

Prefabrykaty betonowe w budownictwie strategicznym na potrzeby obronności i bezpieczeństwa państwa

Concrete prefabricated elements in strategic construction for national defence and security

Katarzyna Łaskawiec^{1,*}, Marzena Najduchowska¹, Paweł Pichniarczyk¹, Krzysztof Jan Klęczar²

¹Sieć Badawcza Łukasiewicz Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych

²Akademia WSB w Dąbrowie Górniczej

*corresponding author: K. Łaskawiec, e-mail: katarzyna.laskawiec@icimb.lukasiewicz.gov.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań prefabrykowanych elementów betonowych przeznaczonych do zastosowania w konstrukcjach służących zabezpieczeniu ludności i infrastruktury krytycznej. Oceniono właściwości osłonowe betonów o różnych składach wobec promieniowania gamma i neutronowego oraz odporność elementów na oddziaływania balistyczne. Pokazano, że zastosowanie kruszyw ciężkich, w szczególności magnetytu, poprawia właściwości osłonowe względem promieniowania gamma i umożliwia zmniejszenie grubości osłon. Betony z serpentynitem wykazują dodatkowo korzystne właściwości w zakresie ochrony przed neutronami. Badania balistyczne wykazały dużą odporność elementów na perforację i uszkodzenia tylnej powierzchni oraz zachowanie integralności konstrukcji podczas wielokrotnego ostrzału. Wyniki potwierdzają potencjał prefabrykatów betonowych zbrojonych włóknami rozproszonymi do zastosowania w modułowych budowlach ochronnych. Dodatkowo w pracy dokonano przeglądu aktów prawnych oraz podsumowania wymagań i regulacji dotyczących wznoszenia konstrukcji ochronnych.

Słowa kluczowe: prefabrykaty betonowe, budownictwo ochronne, osłony radiacyjne, odporność balistyczna, infrastruktura krytyczna

Summary

The paper presents the results of studies on precast concrete elements intended for use in structures designed to protect the population and critical infrastructure. The shielding properties of concretes with different compositions against gamma and neutron radiation, as well as the ballistic resistance of the elements, were evaluated. The results demonstrate that the use of heavyweight aggregates, particularly magnetite, improves gamma-radiation shielding performance and enables a reduction in shield thickness. Concretes containing serpentinite additionally exhibit beneficial neutron-shielding properties. Ballistic tests demonstrated high resistance to perforation and damage to the rear surface, as well as preservation of structural integrity under repeated impact loading. The results confirm the potential of fibre-reinforced precast concrete elements for use in modular protective structures. In addition, the paper reviews the relevant legal acts and summarises the requirements and regulations governing the construction of protective structures.

Keywords: precast concrete elements, protective construction, radiation shielding, ballistic resistance, critical infrastructure

1. Wprowadzenie

Zapewnienie bezpieczeństwa ludności, ciągłości funkcjonowania państwa oraz odporności infrastruktury krytycznej należy obecnie do najważniejszych wyzwań współczesnych społeczeństw. Zmieniające się uwarunkowania geopolityczne, rozwój nowych technologii wojskowych, zagrożenia hybrydowe, a także rosnąca liczba katastrof naturalnych i awarii technicznych powodują konieczność ponownej oceny zdolności państw do ochrony ludności

1. Introduction

Ensuring public safety, continuity of state functioning, and the resilience of critical infrastructure is currently among the most important challenges facing modern societies. Changing geopolitical conditions, the development of new military technologies, hybrid threats, as well as the increasing number of natural disasters and technical failures necessitate a reassessment of states' capabilities to protect the population and maintain the basic functions of

oraz utrzymania podstawowych funkcji infrastruktury w sytuacjach kryzysowych (1–8). W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania budownictwem strategicznym obejmującym obiekty ochronne, schrony, stanowiska kierowania, obiekty wojskowe, magazyny strategiczne oraz elementy infrastruktury krytycznej o znaczeniu dla obronności i bezpieczeństwa państwa (1–4, 9, 10). Szczęólnego znaczenia nabrały doświadczenia wynikające z konfliktów zbrojnych prowadzonych w Europie, które wykazały konieczność zapewnienia odpowiednich zasobów infrastrukturalnych umożliwiających ochronę ludności, zabezpieczenie procesów logistycznych oraz utrzymanie ciągłości funkcjonowania państwa (8, 11, 12). Budownictwo ochronne od wielu dziesięcioleci stanowi istotny element systemów bezpieczeństwa. Już w okresie międzywojennym opracowywano pierwsze wytyczne dotyczące budowy schronów przeciwlotniczych oraz pomieszczeń zabezpieczających przed skutkami bombardowań (13). W kolejnych dekadach rozwijano rozwiązania konstrukcyjne przeznaczone do ochrony przed skutkami działań wojennych, oddziaływaniem broni konwencjonalnej oraz zagrożeniami wynikającymi z użycia broni masowego rażenia (14–17). Współcześnie zagadnienia te ponownie zyskują na znaczeniu, czego wyrazem są nowe regulacje prawne dotyczące ochrony ludności i obrony cywilnej oraz wymagania odnoszące się do budowli ochronnych i infrastruktury strategicznej (1–7, 25–32). Wśród technologii stosowanych do realizacji obiektów o znaczeniu strategicznym szczególną rolę odgrywa prefabrykacja betonowa. Produkcja elementów konstrukcyjnych w warunkach zakładowych umożliwia uzyskanie wysokiej jakości wykonania, powtarzalności parametrów materiałowych oraz skrócenie czasu realizacji inwestycji (18). Prefabrykaty betonowe znajdują zastosowanie nie tylko w budownictwie mieszkaniowym i przemysłowym, lecz również w obiektach przeznaczonych do ochrony ludności, zabezpieczenia infrastruktury krytycznej, budowy stanowisk dowodzenia, magazynów strategicznych oraz innych elementów infrastruktury związanej z obronnością państwa (9–12, 18). Rosnące wymagania dotyczące odporności konstrukcji na oddziaływania ekstremalne powodują jednocześnie konieczność stosowania betonów specjalnych, zaawansowanych technologii materiałowych oraz nowoczesnych metod projektowania uwzględniających oddziaływania dynamiczne, pożarowe, środowiskowe i eksploatacyjne (11, 12, 19–24). Szczęólnego znaczenia nabierają zagadnienia związane z ochroną przed promieniowaniem jonizującym, oddziaływaniem odłamków, skutkami ostrzału oraz zapewnieniem odpowiedniej trwałości konstrukcji eksploatowanych w warunkach podwyższonego ryzyka (11, 12, 19–24). Celem artykułu jest przedstawienie roli prefabrykatów betonowych w budownictwie strategicznym na potrzeby obronności i bezpieczeństwa państwa oraz omówienie możliwości ich zastosowania w realizacji nowoczesnych budowli ochronnych i infrastruktury o znaczeniu strategicznym. Szczęólną uwagę poświęcono właściwościom materiałowym prefabrykatów betonowych, wymaganiom stawianym obiektom ochronnym oraz kierunkom rozwoju technologii zwiększających odporność konstrukcji na oddziaływania ekstremalne.

infrastructure in crisis situations (1–8). In recent years, there has been growing interest in strategic construction, including protective structures, shelters, command and control facilities, military facilities, strategic storage facilities, and critical infrastructure elements of importance to national defence and security (1–4, 9, 10). The experience gained from armed conflicts in Europe has become particularly significant, demonstrating the need to ensure adequate infrastructure resources to protect the population, secure logistical processes, and maintain continuity of state functioning (8, 11, 12).

Protective construction has been an important component of security systems for many decades. As early as the interwar period, the first guidelines were developed concerning the construction of air-raid shelters and facilities designed to protect against the effects of bombing (13). In subsequent decades, structural solutions were developed to provide protection against the effects of military operations, conventional weapons, and hazards associated with the use of weapons of mass destruction (14–17). Today, these issues are once again gaining importance, as reflected in new legislation concerning civil protection and civil defence, as well as requirements relating to protective structures and strategic infrastructure (1–7, 25–32).

Among the technologies used to construct strategically important facilities, concrete prefabrication plays a particularly important role. The production of structural elements under controlled factory conditions enables high construction quality, consistent material parameters, and reduced project completion times (18). Precast concrete elements are used not only in residential and industrial construction, but also in facilities intended for population protection, critical infrastructure protection, command and control facilities, strategic storage facilities, and other infrastructure associated with national defence (9–12, 18).

At the same time, increasing requirements concerning the resistance of structures to extreme loads necessitate the use of special concretes, advanced material technologies, and modern design methods that account for dynamic, fire, environmental, and service loads (11, 12, 19–24). Particular importance is attached to issues related to protection against ionizing radiation, the impact of fragments, the effects of shelling, and ensuring adequate durability of structures operated under conditions of increased risk (11, 12, 19–24).

The aim of this paper is to present the role of concrete prefabricated elements in strategic construction for national defence and security and to discuss their potential applications in the construction of modern protective structures and strategically important infrastructure. Particular attention is given to the material properties of concrete prefabricated elements, the requirements for protective structures, and the development trends in technologies aimed at increasing the resistance of structures to extreme loads.

2. Aktualne wymagania prawne dla budowli ochronnych w Polsce

W celu omówienia wymagań prawnych warunkujących projektowanie, budowę, utrzymanie i eksploatację budowli ochronnych w Polsce w szerszym kontekście dostępnych materiałów wykorzystywanych na potrzeby obronności i bezpieczeństwa państwa zasadnym jest przyjęcie trójpoziomowego modelu analitycznego, obejmującego akty normatywne, dokumenty strategiczne oraz akty systemowe pozostające w funkcjonalnym związku z ochroną ludności i obroną cywilną (1–7, 25–32). Przyjęcie wskazanego modelu analitycznego pozwala na wieloaspektową ocenę obowiązujących regulacji prawnych, uwzględniając zarówno ich wymiar normatywny, jak i strategiczny oraz systemowy. Takie podejście umożliwia pełniejsze zrozumienie współczesnego modelu funkcjonowania budowli ochronnych w Polsce oraz ocenę stopnia jego dostosowania do aktualnych zagrożeń bezpieczeństwa państwa, ochrony ludności oraz wymagań wynikających z koncepcji odporności infrastrukturalnej i społecznej (1–8).

W pierwszej kolejności analizie należy poddać akty normatywne stanowiące bezpośrednią podstawę funkcjonowania obiektów zbiorowej ochrony. Kluczowe znaczenie ma w tym zakresie ustawa z dnia 5 grudnia 2024 r. o ochronie ludności i obronie cywilnej (1) wraz z nowelizacją przyjętą w 2026 r. (2), która określa podstawowe zasady organizacji systemu ochrony ludności, definiuje kategorie obiektów zbiorowej ochrony oraz wskazuje kompetencje organów administracji publicznej w zakresie ich planowania, utrzymania i wykorzystania. Uzupełnienie i uszczegółowienie regulacji ustawowych stanowią akty wykonawcze, w szczególności: rozporządzenie w sprawie kryteriów uznawania obiektów budowlanych albo ich części za budowle ochronne (27), rozporządzenie w sprawie sposobu przygotowania obiektu zbiorowej ochrony do użycia, szczegółowych warunków eksploatacji budowli ochronnych, zapewnienia porządku w ich obrębie oraz ich niezbędnego wyposażenia (28), rozporządzenie w sprawie warunków wyznaczania budynków użyteczności publicznej, w których zapewnia się budowle ochronne (32), rozporządzenie w sprawie warunków technicznych dla budowli ochronnych oraz warunków technicznych ich użytkowania i sytuowania (31), rozporządzenie w sprawie warunków organizowania oraz wymagań, jakie powinny spełniać miejsca doraźnego schronienia (29), a także rozporządzenie dotyczące Centralnej Ewidencji Obiektów Zbiorowej Ochrony (30). Drugim poziomem analizy są dokumenty strategiczne wyznaczające kierunki rozwoju systemu ochrony ludności i infrastruktury ochronnej. Szczególne znaczenie należy przypisać Programowi Ochrony Ludności i Obrony Cywilnej na lata 2025–2026 (3) oraz Programowi Ochrony Ludności i Obrony Cywilnej na lata 2027–2031 (4). Dokumenty te określają cele strategiczne państwa w zakresie zwiększania odporności społecznej, rozbudowy infrastruktury ochronnej, tworzenia nowych miejsc schronienia oraz rozwijania zdolności reagowania na zagrożenia o charakterze militarnym i niemilitarnym (3, 4). Trzeci poziom analizy obejmuje akty systemowe, które choć nie odnoszą się bezpośrednio do obiektów zbiorowej ochrony, wywierają istotny wpływ na proces ich lokalizacji, projektowania, realizacji

2. Current legal requirements for protective structures in Poland

In order to discuss the legal requirements governing the design, construction, maintenance, and operation of protective structures in Poland, in the broader context of available materials used for national defence and security purposes, it is appropriate to adopt a three-level analytical model comprising normative acts, strategic documents, and system-level legislation functionally related to population protection and civil defence (1–7, 25–32). This analytical model enables a multidimensional assessment of the applicable legal framework, taking into account its normative, strategic, and systemic dimensions. Such an approach provides a more comprehensive understanding of the contemporary framework governing protective structures in Poland and allows for an assessment of its adequacy in relation to current threats to national security and population protection, as well as requirements arising from the concept of infrastructure and societal resilience (1–8).

First, the normative acts constituting the direct legal basis for the operation of collective protection facilities should be analysed. Of key importance in this respect is the Act of 5 December 2024 on Population Protection and Civil Defence (1), together with the amendment adopted in 2026 (2), which establishes the fundamental principles governing the organization of the population protection system, defines the categories of collective protection facilities, and specifies the responsibilities of public administration authorities with regard to their planning, maintenance, and use. The statutory provisions are supplemented and further specified by implementing regulations, in particular: the Regulation on the criteria for recognizing buildings or parts thereof as protective structures (27); the Regulation on the preparation of collective protection facilities for use, detailed conditions for the operation of protective structures, maintaining order within such structures, and their necessary equipment (28); the Regulation on the conditions for designating public buildings in which protective structures are to be provided (32); the Regulation on technical requirements for protective structures and the technical requirements for their use and siting (31); the Regulation on the conditions for organizing temporary shelters and the requirements to be met by such facilities (29); and the Regulation concerning the Central Register of Collective Protection Facilities (30).

The second level of analysis comprises strategic documents defining the directions for the development of the population protection system and protective infrastructure. Particular importance should be attributed to the Population Protection and Civil Defence Programme for 2025–2026 (3) and the Population Protection and Civil Defence Programme for 2027–2031 (4). These documents define the strategic objectives of the state with regard to strengthening societal resilience, expanding protective infrastructure, creating new shelter capacity, and developing capabilities to respond to military and non-military threats (3, 4).

The third level of analysis comprises systemic legislation which, although not directly addressing collective protection facilities,

i wykorzystania. Do najważniejszych należą: ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (25), ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (5), ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (26), ustawa z dnia 29 sierpnia 2002 r. o stanie wojennym oraz kompetencjach Naczelnego Dowódcy Sił Zbrojnych i zasadach jego podległości konstytucyjnym organom Rzeczypospolitej Polskiej (6), a także ustawa z dnia 18 kwietnia 2002 r. o stanie klęski żywiołowej (7).

W świetle przytoczonych powyżej aktów prawnych system ochrony ludności obejmuje przedstawione poniżej rodzaje obiektów zbiorowej ochrony (1, 2, 27–32). Budowle ochronne – w postaci schronów lub ukryć, jako budowle specjalistyczne – oraz miejsca doraźnego schronienia. Dodatkową kategorię, wprowadzoną przy okazji ostatniej nowelizacji przepisów, stanowią punkty schronienia (1, 2). Najwyższy poziom ochrony zapewniają schrony. Są to budowle o konstrukcji zamkniętej i hermetycznej, wyposażone w urządzenia filtrowentylacyjne lub pochłaniacze regeneracyjne, przeznaczone do ochrony ludności przed skutkami działań wojennych, w tym przed promieniowaniem, skażeniami biologicznymi, chemicznymi oraz skutkami wybuchów [falą uderzeniową, odłamkami czy też zawaleniem się kondygnacji nadziemnych budynku lub budynków w otoczeniu] (1, 27, 31). Prostsza i tańsza w realizacji oraz możliwa do ulokowania w istniejących obiektach formą budowli ochronnej są ukrycia. Obiekty te, w odróżnieniu od schronów, charakteryzują się konstrukcją niehermetyczną i zapewniają ochronę przed skutkami wybuchów o ograniczonej sile, ostrzałem z broni małokalibrowej, odłamkami, zawaleniem się kondygnacji nadziemnych budynku lub budynków w otoczeniu, a także przed ekstremalnymi zjawiskami pogodowymi (1, 27, 31). Ważnym elementem systemu o powszechnym charakterze są miejsca doraźnego schronienia. Są to obiekty zbiorowej ochrony przystosowane do czasowego ukrycia ludzi w sytuacjach kryzysowych. Nie stanowią one klasycznych budowli ochronnych, są jednak niezwykle istotne ze względu na ich dostępność i relatywną łatwość tworzenia. Mogą być one organizowane w szczególności w obiektach użyteczności publicznej, tunelach, garażach i przejściach podziemnych, budowlach ziemnych i wykopach (29, 32). Ostatnią z kategorii pozostają punkty schronienia. Na gruncie prawa nie są one budowlami ochronnymi ani miejscami doraźnego schronienia. Mogą być one jednak wyznaczane zarówno wewnątrz, jak i poza obiektami budowlanymi, służąc krótkotrwałej ochronie ludzi i zapewniając spełnienie podstawowej funkcji ochronnej przed nagłymi niebezpiecznymi zjawiskami pogodowymi oraz skutkami użycia konwencjonalnych środków rażenia, w szczególności odłamkami. Identyfikację punktów schronienia reguluje art. 91a ustawy o ochronie ludności i obronie cywilnej (1) [wprowadzony nowelizacją (2)].

Analizując aktualne wymagania prawne dla obiektów zbiorowej ochrony w Polsce, należy także odnieść się do kwestii obowiązku projektowania i wykonywania ww. obiektów w ramach realizacji inwestycji budowlanych (1, 25, 27, 31, 32). Zagadnienie projektowania budowli ochronnych reguluje art. 92 ustawy o ochronie ludności i obronie cywilnej (1), a warunki organizacji miejsca doraźnego schronienia oraz możliwość zastosowania rozwiązań

has a significant impact on their location, design, construction, and use. The most important acts include the Act of 7 July 1994 – Construction Law (25); the Act of 26 April 2007 on Crisis Management (5); the Act of 27 March 2003 on Spatial Planning and Development (26); the Act of 29 August 2002 on Martial Law and the Powers of the Commander-in-Chief of the Armed Forces and the Principles of His Subordination to the Constitutional Authorities of the Republic of Poland (6); and the Act of 18 April 2002 on the State of Natural Disaster (7).

In light of the legal acts cited above, the population protection system comprises the following types of collective protection facilities (1, 2, 27–32): protective structures, in the form of shelters or safe rooms, as specialized structures, and temporary shelter facilities. An additional category, introduced as part of the latest amendment to the regulations, comprises shelter points (1, 2).

The highest level of protection is provided by shelters. These are enclosed and hermetically sealed structures equipped with filter-ventilation systems or regenerative absorbers, designed to protect the population against the effects of military operations, including radiation, biological and chemical contamination, and the effects of explosions [blast waves, fragments, and the collapse of above-ground floors of the building or surrounding buildings] (1, 27, 31).

A simpler and less expensive form of protective structure, which can also be installed in existing buildings, is represented by safe rooms. Unlike shelters, these facilities are not hermetically sealed and provide protection against the effects of explosions of limited magnitude, small-arms fire, fragments, the collapse of above-ground floors of the building or surrounding buildings, as well as extreme weather events (1, 27, 31).

Temporary shelter facilities constitute an important element of the system intended for general use. These are collective protection facilities adapted for the temporary sheltering of people in emergency situations. They do not constitute conventional protective structures; however, they are of considerable importance due to their availability and the relative ease with which they can be established. In particular, they may be organized in public buildings, tunnels, garages and underground passages, earth structures, and excavations (29, 32).

The final category comprises shelter points. Under the law, these are neither protective structures nor temporary shelter facilities. They may, however, be designated both inside and outside buildings and serve to provide short-term protection for people, fulfilling a basic protective function against sudden hazardous weather events and the effects of the use of conventional weapons, particularly fragments. The identification of shelter points is regulated by Article 91a of the Act on Population Protection and Civil Defence (1), introduced by the amendment (2).

When analysing the current legal requirements for collective protection facilities in Poland, it is also necessary to address the obligation to design and construct the aforementioned facilities as part of building projects (1, 25, 27, 31, 32). The design of protective

zamiennych określono w art. 92a tej ustawy (1, 2). Natomiast w kwestii wykonywania obiektów zbiorowej ochrony, zgodnie z art. 93 ustawy o ochronie ludności i obronie cywilnej (1), w budynku użyteczności publicznej zapewnia się budowlę ochronną: schron lub ukrycie, chyba że przepis szczególny stanowi inaczej. W tym miejscu należy skorzystać z odesłania do aktu wykonawczego – rozporządzenia w sprawie szczegółowych warunków wyznaczania budynków użyteczności publicznej, w których zapewnia się budowlę ochronną (32). Rozporządzenie to obowiązuje do dnia 29 listopada 2026 r., tj. do czasu wydania nowego rozporządzenia w tym zakresie w oparciu o delegację ustawową zawartą w art. 93 ust. 4 po nowelizacji (2, 32). Jak wynika z tych przepisów, nie każdy budynek użyteczności publicznej wymaga zapewnienia budowli ochronnej (1, 2, 32). W zakresie miejsc doraźnego schronienia [MDS] obowiązek ich organizacji został uregulowany w art. 94 ustawy o ochronie ludności i obronie cywilnej (1) i wszedł w życie 1 stycznia 2026 r. (2). W przypadku gdy w ramach inwestycji budowlanej na kondygnacjach podziemnych w budynkach użyteczności publicznej lub budynkach mieszkalnych wielorodzinnych oraz w garażach podziemnych nie przewidziano, zgodnie z ww. przepisami, budowli ochronnej - schronu lub ukrycia, aktualizuje się obowiązek projektowania i wykonania tych kondygnacji podziemnych w taki sposób, aby możliwa była organizacja w nich miejsc doraźnego schronienia (1, 2, 29). Mając na uwadze fakt, iż zapis ten często bywa błędnie interpretowany, należy wyraźnie zaznaczyć, że przytoczony przepis nie nakłada na inwestora obowiązku zaplanowania i wykonania schronu lub ukrycia, uregulowanych odrębnie w art. 93 ustawy o ochronie ludności i obronie cywilnej (1). Jak wynika z przytoczonych powyżej regulacji, to czy w ogóle oraz potencjalnie jaki obiekt zbiorowej ochrony jest wymagany w ramach zamierzenia inwestycyjnego o charakterze budowlanym, wynika z wieloetapowej analizy warunków konkretnego przypadku (1, 2, 25, 32). Ustawodawca przewidział bowiem sytuacje, gdy taki obowiązek w ogóle nie powstaje lub też okoliczności umożliwiające zwolnienie inwestora z takiego obowiązku [art. 93 ust. 2–4 ustawy o ochronie ludności i obronie cywilnej] (1, 2), jak również zastosowanie rozwiązań zamiennych w zakresie warunków organizowania oraz wymagań, jakie powinny spełniać miejsca doraźnego schronienia [art. 92a i art. 94 ust. 4 ustawy o ochronie ludności i obronie cywilnej] (1, 2, 29). W powyższym zakresie istotne są również przepisy przejściowe zawarte w art. 206, gdzie w ramach nowelizacji wprowadzonych ustawą o zmianie ustawy o ochronie ludności i obronie cywilnej oraz niektórych innych ustaw (2) przewidziano, kiedy należy stosować, a kiedy nie stosuje się przepisów art. 93–95 ustawy o ochronie ludności i obronie cywilnej (1) – datami granicznymi są 31 grudnia 2025 r. oraz 1 stycznia 2026 r. (1, 2). Jednocześnie ustawodawca w ramach nowelizacji (2) wprowadził do ustawy o ochronie ludności i obronie cywilnej (1) art. 95a, obejmujący nowy obowiązek dla inwestorów zamierzenia budowlanego polegającego na budowie obiektu budowlanego, o którym mowa w art. 93 [budynek użyteczności publicznej] oraz art. 95 [obiekty podziemne metra i kolei], dotyczący zawiadomienia wójta, burmistrza, prezydenta miasta, właściwego ze względu na lokalizację inwestycji, o zamiarze jej realizacji. Właściwy organ ochrony ludności określa pojemność oraz kategorię budowli

structures is regulated by Article 92 of the Act on Population Protection and Civil Defence (1), while the conditions for organizing temporary shelter facilities and the possibility of applying alternative solutions are specified in Article 92a of the Act (1, 2).

With regard to the construction of collective protection facilities, pursuant to Article 93 of the Act on Population Protection and Civil Defence (1), a protective structure, i.e. a shelter or safe room, shall be provided in a public utility building unless otherwise provided by specific legislation. At this point, reference should be made to the implementing act, namely the Regulation on the detailed conditions for designating public utility buildings in which protective structures are to be provided (32). This Regulation remains in force until 29 November 2026, i.e. until a new regulation in this area is issued pursuant to the statutory delegation contained in Article 93(4), as amended (2, 32).

As follows from these provisions, not every public utility building is required to provide a protective structure (1, 2, 32). With regard to temporary shelter facilities [TSF], the obligation to organize such facilities is regulated by Article 94 of the Act on Population Protection and Civil Defence (1) and entered into force on 1 January 2026 (2).

Where, as part of a building project, no protective structure – shelter or safe room – has been provided in accordance with the aforementioned provisions on underground floors of public utility buildings or multi-family residential buildings, and in underground garages, an obligation arises to design and construct these underground spaces in such a way as to enable the organization of temporary shelter facilities therein (1, 2, 29). Given that this provision is frequently misinterpreted, it should be clearly emphasized that it does not impose on the investor an obligation to plan and construct a shelter or safe room, which are regulated separately under Article 93 of the Act on Population Protection and Civil Defence (1).

As follows from the regulations cited above, whether a collective protection facility is required at all, and potentially what type of facility is required as part of a building project, is determined through a multi-stage analysis of the circumstances of the specific case (1, 2, 25, 32). The legislator has provided for situations in which such an obligation does not arise at all, as well as circumstances allowing the investor to be exempted from such an obligation [Article 93(2)–(4) of the Act on Population Protection and Civil Defence] (1, 2). The legislation also permits the application of alternative solutions with regard to the conditions for organizing temporary shelter facilities and the requirements to be met by such facilities [Article 92a and Article 94(4) of the Act on Population Protection and Civil Defence] (1, 2, 29).

The transitional provisions set out in Article 206 are also relevant in this respect. The amendments introduced by the Act amending the Act on Population Protection and Civil Defence and certain other acts (2) specify when the provisions of Articles 93–95 of the Act on Population Protection and Civil Defence (1) are to be applied and when they do not apply. The relevant cut-off dates are 31 December 2025 and 1 January 2026 (1, 2).

ochronnej, jaką należy zapewnić w projektowanym obiekcie budowlanym (1, 2). W ust. 5 i 6 art. 95a przewidziano, kiedy organ ochrony ludności nie określa pojemności i kategorii oraz w jakich przypadkach nie stosuje się tego przepisu [gdy inwestorem jest gmina, powiat lub wojewoda albo gdy inwestor uzyskał zwolnienie, o którym mowa w art. 93 ust. 2 ustawy o ochronie ludności i obronie cywilnej] (1, 2).

3. Ewolucja budowli ochronnych w Polsce

Rozwój budownictwa ochronnego w Polsce od okresu międzywojennego do czasów współczesnych odzwierciedla zmieniające się uwarunkowania militarne, technologiczne oraz organizacyjne systemu ochrony ludności. Na przestrzeni niemal stu lat nastąpiło przejście od prostych schronów przeciwlotniczych i pomieszczeń zabezpieczających do zaawansowanych budowli ochronnych wyposażonych w systemy filtrowentylacji, hermetyzacji oraz ochrony przed oddziaływaniami dynamicznymi i zagrożeniami CBRN [C-chemiczne, B-biologiczne, R-radiologiczne, N-nuklearne] (1, 9–18). Podstawę rozwoju krajowych rozwiązań technicznych stanowiły kolejne akty normatywne i wytyczne projektowe, począwszy od *Wytycznych technicznych dotyczących budowy schronów przeciwlotniczych, pomieszczeń zabezpieczających i uszczelnionych* z 1938 r. (13), poprzez *Szczegółowe zasady projektowania i wykonywania schronów* z 1977 r. (14) oraz *Tymczasowe szczegółowe zasady projektowania i wykonywania schronów obrony cywilnej* z 1986 r. (16), aż po współczesne regulacje obejmujące ustawę o ochronie ludności i obronie cywilnej (1) oraz rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji w sprawie warunków technicznych dla budowli ochronnych oraz warunków technicznych ich użytkowania i usytuowania (31). Dokumenty te stopniowo rozszerzały zakres wymagań konstrukcyjnych, obejmując ochronę przed falą uderzeniową, odłamkami, zagruzowaniem, pożarem oraz skutkami oddziaływań wyjątkowych (14–18, 21, 24). Współczesne wymagania techniczne wykraczają daleko poza klasyczne kryteria nośności konstrukcji. Obejmują one m.in. konieczność zachowania szczelności obiektu, zapewnienia odpowiedniej odporności ogniowej, utrzymania nadciśnienia ochronnego oraz zdolności funkcjonowania w warunkach skażeń chemicznych, biologicznych, radiologicznych i nuklearnych [CBRN] (1, 12, 19, 20, 23, 24, 31). W efekcie współczesny schron stanowi zintegrowany system ochronny, którego skuteczność zależy zarówno od parametrów konstrukcji, jak i niezawodności instalacji technicznych (11, 12, 18–20, 31).

W latach trzydziestych XX wieku, wraz ze wzrostem zagrożenia lotniczego, rozpoczęto opracowywanie pierwszych krajowych wytycznych dotyczących budownictwa ochronnego (13). Opublikowane w 1938 r. wytyczne stworzyły fundamenty polskiej szkoły projektowania schronów, wprowadzając wymagania dotyczące hermetyzacji pomieszczeń, filtrowentylacji oraz minimalnych parametrów przegród ochronnych (13). Głównym zagrożeniem były wówczas bombardowania lotnicze, dlatego konstrukcje projektowano przede wszystkim pod kątem ochrony przed odłamkami, zagruzowaniem oraz skutkami pośrednimi nalotów.

At the same time, as part of the amendment (2), the legislator introduced Article 95a into the Act on Population Protection and Civil Defence (1), establishing a new obligation for investors undertaking building projects involving the construction of a building referred to in Article 93 [public utility buildings] and Article 95 [underground metro and railway facilities]. This obligation concerns notifying the mayor of the municipality, competent for the location of the investment, of the intention to carry out the project.

The competent population protection authority determines the capacity and category of the protective structure to be provided in the designed building (1, 2). Paragraphs 5 and 6 of Article 95a specify the circumstances in which the population protection authority does not determine the capacity and category, as well as the cases in which this provision does not apply, namely where the investor is a municipality, county (powiat), or voivode, or where the investor has obtained an exemption referred to in Article 93(2) of the Act on Population Protection and Civil Defence (1, 2).

3. Evolution of protective structures in Poland

The development of protective construction in Poland from the interwar period to the present day reflects the changing military, technological, and organizational conditions of the population protection system. Over nearly one hundred years, there has been a transition from simple air-raid shelters and protective rooms to advanced protective structures equipped with filtration and ventilation systems, airtightness systems, and protection against dynamic loads and CBRN hazards (1, 9–18).

The development of national technical solutions was based on successive normative acts and design guidelines, beginning with the *Technical Guidelines for the Construction of Air-Raid Shelters, Protective and Sealed Rooms* of 1938 (13), followed by the *Detailed Principles for the Design and Construction of Shelters* of 1977 (14) and the *Temporary Detailed Principles for the Design and Construction of Civil Defence Shelters* of 1986 (16), and culminating in current regulations, including the Act on Population Protection and Civil Defence (1) and the Regulation of the Minister of the Interior and Administration on the technical requirements for protective structures and the technical requirements for their use and siting (31).

These documents progressively expanded the scope of structural requirements to include protection against blast waves, fragments, debris, fire, and the effects of exceptional loads (14–18, 21, 24). Contemporary technical requirements extend well beyond the conventional criteria of structural load-bearing capacity. They include, among other aspects, the need to maintain the airtightness of the facility, ensure adequate fire resistance, maintain protective overpressure, and ensure the ability to operate under conditions of chemical, biological, radiological, and nuclear [CBRN] contamination (1, 12, 19, 20, 23, 24, 31).

Consequently, a modern shelter constitutes an integrated protection system whose effectiveness depends both on structural

Po zakończeniu II wojny światowej oraz wraz z rozwojem broni jądrowej wymagania techniczne uległy zasadniczym zmianom. Rozbudowywany system Obrony Cywilnej obejmował schrony przeciwoatomowe oraz ukrycia ochronne przeznaczone do zabezpieczenia ludności przed skutkami eksplozji jądrowych, promieniowaniem jonizującym oraz skażeniami promieniotwórczymi (17). W projektowaniu zaczęto uwzględniać oddziaływania dynamiczne, wymagania dotyczące hermetyczności oraz konieczność autonomicznego funkcjonowania obiektu przez dłuższy czas. Szczególnie intensywny rozwój budownictwa ochronnego nastąpił w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX wieku. W *Szczegółowych zasadach projektowania i wykonywania schronów* z 1977 r. (14) oraz *Tymczasowych szczegółowych zasadach projektowania i wykonywania schronów obrony cywilnej* z 1986 r. (16) określono klasy odporności budowli ochronnych, wymagania dotyczące konstrukcji żelbetonowych oraz zasady ochrony przed falą uderzeniową, odławkami i zagruzowaniem. W tym okresie dominowały masywne konstrukcje monolityczne wykonywane z żelbetu, projektowane z dużym zapasem bezpieczeństwa. Dla wielu typowych schronów i ukryć ochronnych przyjmowano minimalną grubość przegród żelbetonowych wynoszącą około 25 cm lub większą, zależnie od wymaganej klasy odporności. Natomiast dla konstrukcji murowanych stosowano odpowiednio większe grubości wynikające z mniejszej wytrzymałości materiałów (14–16). Stosowane klasy betonu odpowiadały w przybliżeniu współczesnym betonom klasy C20/25, a projektowanie opierało się głównie na analizach statycznych oraz uproszczonych modelach oddziaływania wybuchów (14, 16). Należy jednak podkreślić, że historyczne wymagania dotyczące grubości przegród nie mogą być utożsamiane ze współczesną odpornością na oddziaływanie nowoczesnych środków rażenia. Wartość 25 cm miała charakter normowo-osłonowy i odnosiła się przede wszystkim do ochrony przed odławkami, zagruzowaniem, promieniowaniem jonizującym oraz ograniczonym oddziaływaniem fali uderzeniowej (14, 16, 31). Współczesne badania wskazują, że sama grubość elementu nie stanowi wystarczającego kryterium oceny odporności konstrukcji (11, 18). O skuteczności ochronnej decydują również klasa betonu, rodzaj kruszywa, układ zbrojenia, ciągliwość materiału oraz zdolność konstrukcji do absorpcji energii oddziaływań dynamicznych (18, 21, 22). Szczególne znaczenie ma zjawisko odprysku wtórnego [ang. spalling], polegające na odrywaniu fragmentów betonu od strony chronionej wskutek propagacji fali naprężeń przez przegrodę (18). Zjawisko to może wystąpić nawet bez całkowitej perforacji elementu i stanowi jedno z głównych zagrożeń dla użytkowników budowli ochronnych. Współczesne rozwiązania konstrukcyjne wykorzystują betony wysokowartościowe, zbrojenie rozproszone oraz układy wielowarstwowe ograniczające ryzyko fragmentacji materiału (18, 21, 22). W okresie PRL istotnym elementem projektowania była również ochrona przed zagruzowaniem. Konstrukcje schronowe musiały zachować nośność nawet w przypadku całkowitego zawalenia się budynku znajdującego się nad nimi (14, 16, 17). W zależności od liczby kondygnacji przyjmowano odpowiednie obciążenia od gruzu, które dla budynków niskich wynosiły co najmniej 10 kN/m², a dla wyższych obiektów były odpowiednio zwiększane (16). W praktyce prowadziło to do projektowania stropów ochronnych

parameters and on the reliability of technical installations (11, 12, 18–20, 31).

In the 1930s, with the increasing threat posed by aerial warfare, the first national guidelines for protective construction began to be developed (13). The guidelines published in 1938 laid the foundations for the Polish school of shelter design, introducing requirements concerning the airtightness of rooms, filtration and ventilation systems, and minimum parameters for protective barriers (13). At that time, the primary threat was aerial bombardment; therefore, structures were designed primarily to provide protection against fragments, debris, and the secondary effects of air raids.

Following the end of the Second World War and the development of nuclear weapons, technical requirements underwent fundamental changes. The expanding Civil Defence system included nuclear shelters and protective safe rooms intended to protect the population against the effects of nuclear explosions, ionizing radiation, and radioactive contamination (17). Design practices began to account for dynamic loads, airtightness requirements, and the need for facilities to operate autonomously for extended periods.

Protective construction developed particularly rapidly during the 1970s and 1980s. The *Detailed Principles for the Design and Construction of Shelters* of 1977 (14) and the *Temporary Detailed Principles for the Design and Construction of Civil Defence Shelters* of 1986 (16) specified resistance classes for protective structures, requirements for reinforced-concrete structures, and principles for protection against blast waves, fragments, and debris. During this period, massive monolithic reinforced-concrete structures predominated, designed with substantial safety margins. For many typical shelters and protective safe rooms, a minimum thickness of reinforced-concrete barriers of approximately 25 cm or more was adopted, depending on the required resistance class. For masonry structures, correspondingly greater thicknesses were used due to the lower strength of the materials (14–16).

The concrete classes used corresponded approximately to the modern C20/25 class, while design was based primarily on static analyses and simplified models of blast loading (14, 16). It should be emphasized, however, that historical requirements concerning barrier thickness cannot be equated with contemporary resistance to the effects of modern weapons. The value of 25 cm was a prescriptive protective requirement and referred primarily to protection against fragments, debris, ionizing radiation, and limited blast-wave effects (14, 16, 31).

Contemporary research indicates that the thickness of an element alone is not a sufficient criterion for assessing structural resistance (11, 18). Protective performance also depends on the concrete strength class, aggregate type, reinforcement arrangement, material ductility, and the ability of the structure to absorb energy generated by dynamic loads (18, 21, 22). Of particular importance is the phenomenon of secondary spalling, involving the detachment of concrete fragments from the protected side as a result of stress-wave propagation through the barrier (18). This phenomenon may occur even without complete perforation of the

Tablica 1 / Table 1

PORÓWNANIE SCHRONÓW PROJEKTOWANYCH W OKRESIE PRL I WSPÓŁCZESNYCH BUDOWLI OCHRONNYCH.

COMPARISON OF SHELTERS DESIGNED DURING THE POLISH PEOPLE'S REPUBLIC AND CONTEMPORARY PROTECTIVE STRUCTURES.

Cecha / Feature	Schrony PRL [lata 70.–80.] / Polish People's Republic shelters [1970s–1980s]	Współczesne budowle ochronne / Contemporary protective structures
Podstawa projektowania Design basis	Wytyczne OC z 1977 i 1986 r., normy branżowe i resortowe / Civil Defence guidelines of 1977 and 1986, industry and sectoral standards	Ustawa o ochronie ludności i obronie cywilnej, rozporządzenia MSWiA, Eurokody i normy PN-EN / Act on Population Protection and Civil Defence, regulations of the Ministry of the Interior and Administration, Eurocodes and PN-EN standards
Dominujące zagrożenie projektowe / Predominant design threat	Wojna nuklearna, fala uderzeniowa, skażenia promieniotwórcze / Nuclear war, blast waves, radioactive contamination	Zagrożenia hybrydowe, konflikty konwencjonalne, zagrożenia dla infrastruktury krytycznej, CBRN / Hybrid threats, conventional conflicts, threats to critical infrastructure, CBRN hazards
Materiał konstrukcyjny Structural material	Głównie monolityczny żelbet / Mainly monolithic reinforced concrete	Żelbet wysokiej wytrzymałości, prefabrykaty betonowe, stal i kompozyty / High-strength reinforced concrete, steel and composites
Typowe klasy betonu Typical concrete classes	Odpowiednik obecnych klas C16/20–C20/25 Equivalent to current classes C16/20–C20/25	Najczęściej C30/37–C50/60, betony specjalne i UHPC Typically C30/37–C50/60, special concretes and UHPC
Metody obliczeniowe Calculation methods	Obliczenia analityczne i uproszczone modele dynamiczne / Analytical calculations and simplified dynamic models	MES/FEM, analizy nieliniowe, symulacje numeryczne wybuchów i penetracji / FEM, nonlinear analyses, numerical simulations of explosions and penetration
Ocena oddziaływań wybuchowych / Assessment of blast effects	Tabele projektowe i współczynniki uproszczone Design tables and simplified coefficients	Modele numeryczne, analizy impulsu i nadciśnienia, walidacja eksperymentalna / Numerical models, impulse and overpressure analyses, experimental validation
Typowe grubości ścian Typical wall thicknesses	ok. 25–40 cm / approx. 25–40 cm	ok. 30–60 cm, lokalnie więcej w obiektach o podwyższonej odporności / approx. 30–60 cm, locally greater in facilities with enhanced resistance
Typowe grubości stropów Typical floor/slab thicknesses	ok. 30–50 cm / approx. 30–50 cm	40–80 cm, w obiektach specjalnych >80 cm / 40–80 cm; >80 cm in special-purpose facilities
Filtrowentylacja Filtration and ventilation	Mechaniczna, wielostopniowa filtracja przeciwpyłowa i przeciwchemiczna / Mechanical, multistage filtration against dust and chemical contaminants	Automatyczne systemy ochrony CBRN, monitoring parametrów powietrza / Automatic CBRN protection systems, monitoring of air parameters
Podejście projektowe Design approach	Duże współczynniki bezpieczeństwa i przewymiarowanie konstrukcji / Large safety factors and structural overdesign	Optymalizacja konstrukcji, analizy niezawodności i odporności obiektu / Structural optimization, reliability and resilience analyses
Lokalizacja i funkcja Location and function	Zakłady pracy, osiedla mieszkaniowe, szkoły, obiekty administracyjne / Industrial workplaces, residential estates, schools, administrative buildings	Infrastruktura krytyczna, obiekty użyteczności publicznej, rozwiązania dual-use / Critical infrastructure, public utility buildings, dual-use solutions

o znacznie większej sztywności i nośności niż w budownictwie powszechnym [tablica 1].

Po przemianach ustrojowych lat dziewięćdziesiątych znaczenie budownictwa ochronnego stopniowo malało. Wiele istniejących schronów utraciło funkcję ochronną, a część obiektów została zaadaptowana na magazyny lub pomieszczenia techniczne (10). Jednocześnie ograniczono inwestycje w nowe budowle ochronne, a rozwój regulacji technicznych uległ znacznemu spowolnieniu. Dopiero po 2018 r., w związku ze wzrostem zagrożeń geopolitycznych oraz potrzebą odbudowy systemu ochrony ludności, rozpoczęto proces tworzenia nowych ram prawnych (1–4, 10). Przełomowym wydarzeniem było uchwalenie ustawy o ochronie ludności i obronie cywilnej (1) oraz wydanie rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji w sprawie warunków technicznych dla budowli ochronnych oraz warunków technicznych ich użytkowania i usytuowania (31). W dokumentach tych określono współczesne wymagania dotyczące ochrony przed falą uderzeniową, odłamkami, zagruzowaniem, pożarem oraz zagrożeniami CBRN. Wprowadzono także obowiązek zapewnienia odpowiednich warunków filtrowentylacji, utrzymywania nadciśnienia ochronnego

element and represents one of the principal hazards to occupants of protective structures.

Modern structural solutions employ high-performance concretes, dispersed reinforcement, and multilayer systems designed to reduce the risk of material fragmentation (18, 21, 22). During the period of the Polish People's Republic, protection against debris was also an important aspect of design. Shelter structures had to retain their load-bearing capacity even in the event of the complete collapse of the building located above them (14, 16, 17). Depending on the number of storeys, appropriate debris loads were adopted; for low-rise buildings, these amounted to at least 10 kN/m², while higher values were assumed for taller structures (16). In practice, this resulted in the design of protective floors with considerably greater stiffness and load-bearing capacity than those used in conventional construction [Table 1].

Following the political transformation of the 1990s, the importance of protective construction gradually declined. Many existing shelters lost their protective function, while some facilities were converted into storage or technical rooms (10). At the same time,

oraz możliwości funkcjonowania obiektu przez minimum 48 godzin w warunkach zagrożenia (1, 31). Równolegle nastąpił rozwój współczesnej inżynierii ochronnej. Tradycyjne konstrukcje monolityczne zaczęły być stopniowo uzupełniane przez rozwiązania modułowe i prefabrykowane (18, 20). Coraz częściej wykorzystuje się prefabrykowane elementy żelbetowe, betony ciężkie przeznaczone do ochrony radiologicznej, betony wysokowartościowe [HPC], betony ultra-wysokowytrzymałe [UHPC] oraz wielowarstwowe układy ochronne łączące różne materiały konstrukcyjne (18–22). Rozwiązania te umożliwiają uzyskanie wysokiej odporności przy jednoczesnym ograniczeniu masy konstrukcji i skróceniu czasu realizacji inwestycji. Znaczącej ewolucji podlegały również drzwi ochronne, zawory przeciwybuchowe oraz systemy filtrowentylacji (14–17, 18). Historyczne rozwiązania, często pozbawione aktualnej dokumentacji technicznej, są obecnie zastępowane urządzeniami posiadającymi potwierdzone parametry wytrzymałościowe oraz certyfikowaną odporność na oddziaływania dynamiczne (11, 31). Współczesne systemy filtrowentylacji zapewniają skuteczną ochronę przed zagrożeniami CBRN, utrzymanie odpowiedniej jakości powietrza oraz autonomiczną pracę przez wiele godzin bez zewnętrznego zasilania (19, 20, 31). Zmieniło się również podejście do analiz obciążeń. W dawnych wytycznych dominowały uproszczone modele quasi-statyczne, natomiast obecnie coraz większe znaczenie mają analizy dynamiczne oraz modelowanie numeryczne wykorzystujące zaawansowane programy obliczeniowe (11, 18, 21, 22). Pozwala to na bardziej realistyczne odwzorowanie zachowania konstrukcji pod wpływem wybuchów, uderzeń odłamków oraz innych oddziaływań wyjątkowych [tablica 1]. Pomimo postępu technologicznego i wprowadzenia nowych regulacji nadal występują liczne problemy związane z oceną stanu istniejących budowli ochronnych (1, 10, 11, 31). W wielu przypadkach brakuje kompletnej dokumentacji technicznej, danych dotyczących parametrów drzwi ochronnych, zaworów przeciwybuchowych czy systemów filtrowentylacji. Konieczne staje się zatem prowadzenie badań diagnostycznych, prób szczelności oraz analiz potwierdzających rzeczywistą zdolność obiektów do spełniania współczesnych wymagań ochronnych (11, 18, 31).

Istotnym punktem odniesienia dla rozwoju współczesnego budownictwa ochronnego w Polsce są doświadczenia Finlandii, uznawanej za jedno z najlepiej przygotowanych państw Europy pod względem ochrony ludności. Fiński system schronowy rozwijany jest nieprzerwanie od okresu II wojny światowej i obejmuje obecnie rozbudowaną sieć schronów stanowiących integralny element systemu bezpieczeństwa państwa oraz polityki planowania przestrzennego. W przeciwieństwie do Polski, gdzie proces odbudowy zasobów ochronnych przyspieszył po wejściu w życie nowych regulacji dotyczących ochrony ludności i obrony cywilnej (1–4, 10, 31), w Finlandii schrony od wielu dekad stanowią standardowy element większych inwestycji budowlanych. Obiekty ochronne projektowane są równolegle z budynkiem i pełnią funkcje użytkowe również w czasie pokoju. Powszechnie stosowane są rozwiązania typu dual-use, w których schrony wykorzystywane są jako parkingi, obiekty sportowe, magazyny, zaplecza techniczne lub przestrzenie usługowe. Analiza wymagań technicznych wskazuje

inwestycja w nowe struktury ochronne została zmniejszona, a rozwój regulacji technicznych spowolniono. Dopiero po 2018 roku, w odpowiedzi na rosnące zagrożenia geopolityczne i potrzebę odbudowy systemu ochrony ludności, rozpoczął się proces ustanowienia nowego ramy prawnej (1–4, 10).

Ważnym osiągnięciem było przyjęcie ustawy o ochronie ludności i obronie cywilnej (1) oraz wydanie rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji o technicznych wymaganiach dla obiektów ochronnych i ich użytkowaniu (31). Te dokumenty ustaliły wymagania dla obiektów ochronnych i techniczne wymagania dla ich użytkowania i lokalizacji (31). Dokumenty te ustaliły również wymagania dla ochrony przed falami uderzeniowymi, fragmentami, ogniem i zagrożeniami CBRN. Wprowadziły również wymagania dla odpowiednich systemów filtracji i wentylacji, utrzymania nadciśnienia w obiektach ochronnych i zapewnienia, że obiekty mogą pozostać operacyjne przez minimum 48 godzin w warunkach zagrożenia (1, 31).

W tym samym czasie nowoczesna inżynieria ochronna przeszła istotny rozwój. Tradycyjne konstrukcje monolityczne stopniowo były uzupełniane przez rozwiązania modułowe i prefabrykowane (18, 20). Prefabrykowane elementy żelbetu, ciężkie betony zaprojektowane do osłony promieniowania, wysokowytrzymałe betony [HPC], ultra-wysokowytrzymałe betony [UHPC] oraz wielowarstwowe systemy ochronne łączące różne materiały konstrukcyjne są coraz częściej wykorzystywane (18–22). Te rozwiązania umożliwiają osiągnięcie wysokiej odporności przy jednoczesnym zmniejszeniu masy konstrukcji i skróceniu czasu budowy.

Drzwi ochronne, zawory przeciwybuchowe oraz systemy filtracji i wentylacji przeszły również istotny rozwój (14–18). Historyczne rozwiązania, często pozbawione aktualnej dokumentacji technicznej, są obecnie zastępowane urządzeniami o potwierdzonych parametrach i certyfikowanej odporności na obciążenia dynamiczne (11, 31). Nowoczesne systemy filtracji i wentylacji zapewniają skuteczną ochronę przed zagrożeniami CBRN, utrzymanie odpowiedniej jakości powietrza oraz autonomiczną pracę przez wiele godzin bez zewnętrznego zasilania (19, 20, 31).

Podejście do analiz obciążeń również uległo zmianie. W dawnych wytycznych dominowały uproszczone modele quasi-statyczne, natomiast obecnie coraz większe znaczenie mają analizy dynamiczne oraz modelowanie numeryczne wykorzystujące zaawansowane programy obliczeniowe (11, 18, 21, 22). To umożliwia bardziej realistyczne odwzorowanie zachowania konstrukcji pod wpływem wybuchów, uderzeń odłamków oraz innych oddziaływań wyjątkowych [tablica 1].

Należy zauważyć, że mimo postępów technologicznych i wprowadzenia nowych regulacji, wiele problemów związanych z oceną stanu istniejących obiektów ochronnych nadal występuje (1, 10, 11, 31). W wielu przypadkach brakuje kompletnej dokumentacji technicznej, danych dotyczących parametrów drzwi ochronnych, zaworów przeciwybuchowych czy systemów filtrowentylacji. Konieczne jest zatem prowadzenie badań diagnostycznych, prób szczelności oraz analiz potwierdzających rzeczywistą zdolność obiektów do spełniania współczesnych wymagań ochronnych (11, 18, 31).

jednak na istotne różnice pomiędzy podejściem polskim i fińskim. Obowiązujące w Polsce przepisy przewidują wysokie wymagania dotyczące ochrony radiologicznej, przegród ochronnych, stref funkcjonalnych oraz wyposażenia technicznego budowli ochronnych (1, 31). W rezultacie koszt budowy schronu realizowanego zgodnie z polskimi wymaganiami może być istotnie wyższy od kosztu analogicznego obiektu wykonywanego w Finlandii. Na uwagę zasługują również rozwiązania eksploatacyjne stosowane w fińskich schronach. W wielu obiektach wykorzystuje się uproszczone systemy sanitarne, w tym toalety suche niewymagające rozbudowanych instalacji wodno-kanalizacyjnych i dodatkowych pomieszczeń technicznych. Podejście takie pozwala ograniczyć koszty budowy i eksploatacji przy jednoczesnym zachowaniu wymaganej funkcjonalności obiektu w warunkach kryzysowych. Doświadczenia fińskie pokazują, że skuteczność systemu ochrony ludności nie zależy wyłącznie od parametrów technicznych pojedynczego schronu, lecz również od skali wdrożenia, standaryzacji rozwiązań oraz ich integracji z procesem inwestycyjnym. Wnioski te mają szczególne znaczenie dla rozwoju polskiego budownictwa ochronnego, zwłaszcza w kontekście wykorzystania prefabrykacji betonowej (1, 3, 4, 18).

W odpowiedzi na rosnące zapotrzebowanie na rozproszone obiekty ochronne obserwuje się również rozwój koncepcji niewielkich schronów modułowych przeznaczonych dla ograniczonej liczby użytkowników. Rozwiązania tego typu mogą stanowić uzupełnienie dużych budowli ochronnych, szczególnie na terenach o rozproszonej zabudowie, przy obiektach infrastruktury krytycznej, jednostkach samorządowych oraz w budownictwie jednorodzinym. Ich zaletą jest możliwość prefabrykacji całych modułów, ograniczenie robót budowlanych do minimum oraz krótki czas przygotowania obiektu do eksploatacji (18, 19, 20). W ten kierunek wpisują się prowadzone przez Łukasiewicza – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych badania związane z projektem SCHRON25. Prace koncentrują się na opracowaniu prefabrykowanych schronów przeznaczonych dla niewielkich grup użytkowników, wykorzystujących betony specjalne o podwyższonej odporności oraz rozwiązania modułowe umożliwiające szybki montaż i dostosowanie obiektu do lokalnych warunków terenowych. Równolegle prowadzone są analizy dotyczące ochrony radiologicznej, trwałości materiałowej oraz odporności elementów prefabrykowanych na oddziaływanie odłamków i ostrzału. Rozwój tego typu rozwiązań wskazuje, że przyszłość budownictwa ochronnego może obejmować zarówno wielokubaturowe schrony zbiorowe, jak i sieć mniejszych obiektów prefabrykowanych rozmieszczanych bliżej miejsc zamieszkania użytkowników. Takie podejście zwiększa elastyczność systemu ochrony ludności oraz umożliwia stopniową rozbudowę zasobów ochronnych bez konieczności realizacji wyłącznie dużych inwestycji infrastrukturalnych.

W świetle aktualnych trendów rozwojowych szczególnego znaczenia nabierają działania badawczo-rozwojowe związane z wykorzystaniem betonów specjalnych, prefabrykacji oraz nowoczesnych metod projektowania (11, 18–22). Prefabrykowane elementy ochronne umożliwiają poprawę jakości wykonania, ograniczenie wpływu warunków atmosferycznych na proces budowy oraz skró-

An important reference point for the development of modern protective construction in Poland is the experience of Finland, which is regarded as one of the best-prepared European countries in terms of population protection. The Finnish shelter system has been continuously developed since the Second World War and currently comprises an extensive network of shelters constituting an integral part of the national security system and spatial planning policy.

In contrast to Poland, where the process of rebuilding protective capacity has accelerated following the entry into force of new regulations concerning population protection and civil defence (1–4, 10, 31), shelters in Finland have been a standard component of larger construction projects for many decades. Protective facilities are designed concurrently with the main building and also serve functional purposes during peacetime. Dual-use solutions are widely implemented, whereby shelters are used as car parks, sports facilities, storage areas, technical spaces, or service areas.

An analysis of the technical requirements indicates, however, significant differences between the Polish and Finnish approaches. The regulations currently in force in Poland impose stringent requirements concerning radiation protection, protective barriers, functional zones, and the technical equipment of protective structures (1, 31). Consequently, the construction cost of a shelter designed and constructed in accordance with Polish requirements may be significantly higher than that of a comparable facility constructed in Finland. The operational solutions used in Finnish shelters are also noteworthy. Many facilities employ simplified sanitary systems, including dry toilets that do not require extensive water and sewage installations or additional technical rooms. This approach makes it possible to reduce construction and operating costs while maintaining the required functionality of the facility under emergency conditions. The Finnish experience demonstrates that the effectiveness of a population protection system depends not only on the technical parameters of individual shelters, but also on the scale of implementation, standardization of solutions, and their integration into the construction process. These conclusions are particularly relevant to the development of protective construction in Poland, especially in the context of the use of concrete prefabrication (1, 3, 4, 18).

In response to the growing demand for distributed protective facilities, the concept of small modular shelters designed for a limited number of occupants is also being developed. Such solutions may complement large protective structures, particularly in areas with dispersed development, at critical infrastructure facilities, in local government facilities, and in single-family housing. Their advantages include the possibility of prefabricating entire modules, minimizing on-site construction works, and reducing the time required to prepare the facility for operation (18–20).

Research conducted by Łukasiewicz – Institute of Ceramics and Building Materials as part of the SCHRON25 project follows this development direction. The work focuses on the development of prefabricated shelters intended for small groups of occupants, incorporating special concretes with enhanced resistance and

cenie czasu realizacji inwestycji. Jednocześnie rozwój betonów ciężkich, betonów wysokowartościowych, betonów ultra-wysokowytężalnych oraz wielowarstwowych układów osłonowych stwarza możliwość zwiększenia odporności budowli ochronnych przy zachowaniu racjonalnych kosztów wykonania (18–22). Dzięki temu prefabrykacja betonowa staje się jednym z najważniejszych kierunków rozwoju współczesnego budownictwa ochronnego, odpowiadając zarówno na wymagania bezpieczeństwa państwa, jak i potrzebę szybkiego zwiększania zasobów infrastruktury ochronnej. Doświadczenia państw o rozwiniętych systemach ochrony ludności, takich jak Finlandia, wskazują jednocześnie, że skuteczny rozwój budownictwa ochronnego wymaga nie tylko odpowiednich regulacji technicznych, ale również długofalowej strategii inwestycyjnej, standaryzacji rozwiązań oraz szerokiego wykorzystania technologii prefabrykacji. Jednocześnie rozwój prefabrykowanych schronów modułowych wiąże się z szeregiem wyzwań technicznych i organizacyjnych. Jednym z najważniejszych problemów pozostaje zapewnienie odpowiedniej odporności połączeń pomiędzy elementami prefabrykowanymi, szczególnie w warunkach oddziaływań dynamicznych wywołanych falą uderzeniową, ostrzałem lub oddziaływaniem odłamków (11, 18, 21). W przeciwieństwie do konstrukcji monolitycznych miejsca styków prefabrykatów mogą stanowić obszary osłabienia konstrukcji wymagające specjalnych rozwiązań materiałowych i montażowych. Istotnym zagadnieniem pozostaje również transport oraz montaż ciężkich elementów prefabrykowanych, zwłaszcza na terenach o ograniczonej dostępności komunikacyjnej lub trudnych warunkach gruntowych. W przypadku niewielkich schronów lokalizowanych przy zabudowie jednorodzinnej dodatkowym ograniczeniem mogą być wymagania dotyczące posadowienia, odwodnienia oraz integracji obiektu z istniejącą infrastrukturą techniczną (18, 22). Wyzwania obejmują także konieczność zapewnienia odpowiedniej szczelności obiektu, trwałości materiałowej oraz odporności na długotrwałe oddziaływanie wilgoci i agresywnego środowiska gruntowego (18, 22, 31). Szczególnego znaczenia nabiera również problem standaryzacji rozwiązań prefabrykowanych oraz opracowania procedur seryjnej produkcji umożliwiających zachowanie powtarzalnych parametrów bezpieczeństwa i jakości wykonania. Dodatkowym kierunkiem badań pozostaje optymalizacja konstrukcji pod względem masy i mobilności przy jednoczesnym zachowaniu wymaganej odporności balistycznej i przeciwybuchowej. W praktyce oznacza to konieczność rozwoju nowych betonów specjalnych, kompozytów cementowych oraz wielowarstwowych układów osłonowych pozwalających ograniczyć grubość i ciężar prefabrykatów bez pogorszenia skuteczności ochronnej (11, 18–22).

4. Badania doświadczalne prefabrykowanych elementów ochronnych

4.1. Doświadczalna analiza właściwości osłonowych betonów specjalnych we wzorcowych polach promieniowania

W ramach pracy badawczej w projekcie SCHRON25 przeprowadzono analizę właściwości osłonowych betonów przeznaczonych

modular solutions enabling rapid assembly and adaptation of the facility to local site conditions. In parallel, analyses are being conducted concerning radiation protection, material durability, and the resistance of precast elements to fragment impact and small-arms fire.

The development of such solutions indicates that the future of protective construction may encompass both large-volume collective shelters and a network of smaller prefabricated facilities located closer to users' places of residence. Such an approach increases the flexibility of the population protection system and enables the gradual expansion of protective infrastructure without relying exclusively on large-scale infrastructure projects.

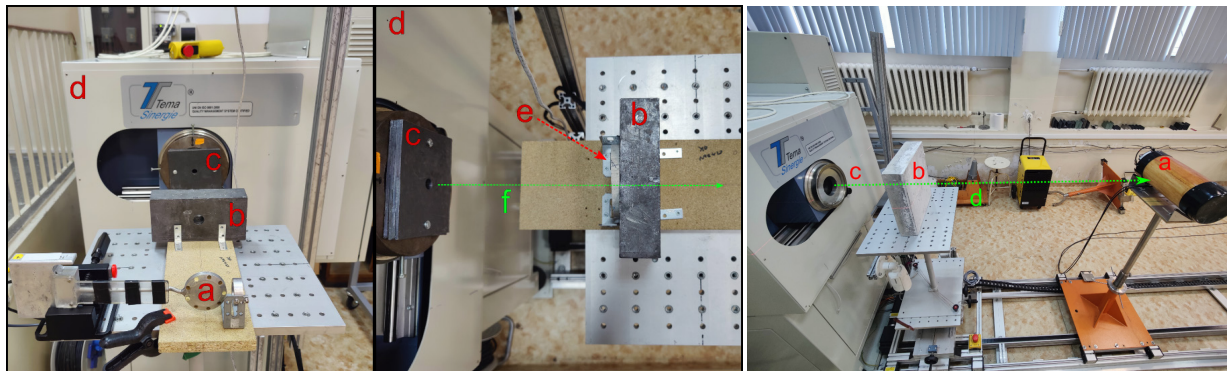
In light of current development trends, particular importance is attached to research and development activities involving special concretes, prefabrication, and advanced design methods (11, 18–22). Prefabricated protective elements enable improved construction quality, reduced influence of weather conditions on the construction process, and shorter project completion times. At the same time, the development of heavy concretes, high-performance concretes, ultra-high-performance concretes, and multilayer shielding systems creates opportunities to increase the resistance of protective structures while maintaining economically reasonable construction costs (18–22).

Consequently, concrete prefabrication is becoming one of the key directions in the development of modern protective construction, addressing both national security requirements and the need for rapid expansion of protective infrastructure. The experience of countries with well-developed population protection systems, such as Finland, also indicates that the effective development of protective construction requires not only appropriate technical regulations, but also a long-term investment strategy, standardization of solutions, and extensive use of prefabrication technologies.

At the same time, the development of modular prefabricated shelters involves a number of technical and organizational challenges. One of the most important issues is ensuring adequate resistance of connections between prefabricated elements, particularly under dynamic loads generated by blast waves, shelling, or fragment impact (11, 18, 21). Unlike monolithic structures, joints between prefabricated elements may constitute areas of structural weakness requiring dedicated material and assembly solutions.

The transportation and installation of heavy prefabricated elements is another important issue, particularly in areas with limited accessibility or difficult ground conditions. In the case of small shelters located adjacent to single-family housing, additional constraints may result from requirements concerning foundations, drainage, and integration of the facility with existing technical infrastructure (18, 22).

Other challenges include ensuring adequate airtightness, material durability, and resistance to long-term exposure to moisture and aggressive soil environments (18, 22, 31). The standardization of prefabricated solutions and the development of serial production



Rys. 1. Widok stanowiska pomiarowego w hali kalibracyjnej Laboratorium Pomiarów Dozymetrycznych, NCBJ.

Fig. 1. View of the measurement setup in the calibration hall of the Dosimetric Measurement Laboratory, National Centre for Nuclear Research [NCBJ].

do prefabrykacji elementów ochronnych w obiektach infrastruktury krytycznej oraz budownictwie schronowym. Zakres badań obejmował ocenę skuteczności tłumienia promieniowania gamma przez betony zawierające kruszywa ciężkie, takie jak magnetyt, baryt, serpentynit, bazalt i granit. Program eksperymentalny zrealizowano z wykorzystaniem wzorcowych pól promieniowania izotopowego oraz stanowisk badawczych wyposażonych w komory rekombinacyjne typu F1 i REM-2 [rys. 1]. Badania prowadzono dla źródeł promieniowania gamma ^{137}Cs oraz ^{60}Co .

Analizie właściwości osłonowych poddano betony oznaczone jako 1S/17, 2S/17, 3S/17, 4S/17, 1S/18, 2S/18 oraz próbki I, II i III. Zastosowane receptury badanych betonów różniły się udziałem i rodzajem kruszyw ciężkich oraz dodatków mineralnych odpowiedzialnych za tłumienie promieniowania gamma [tablica 2]. Uzyskane wyniki wykazały wyraźny wpływ składu mineralnego oraz gęstości objętościowej próbek betonowych na skuteczność tłumienia promieniowania gamma. Najwyższy liniowy współczynnik osłabienia uzyskano dla próbki 1S/18 zawierającej magnetyt i granit, dla której $\mu = 0,218 \text{ cm}^{-1}$ natomiast najniższy dla próbki 1S/17 zawierającej głównie kruszywo granitowe, gdzie $\mu = 0,183 \text{ cm}^{-1}$. Odpowiadało to grubości połowicznej HVL odpowiednio 3,18 cm i 3,79 cm. Szczególnie istotnym parametrem z punktu widzenia projektowania schronów okazała się grubość osłony zapewniająca tysiąckrotne osłabienie wiązki promieniowania. Dla betonu 1S/18 wartość ta wyniosła około 31,7 cm, podczas gdy dla klasycznego betonu z kruszywem granitowym 1S/17 przekraczała 37 cm. Oznacza to, że zastosowanie kruszyw ciężkich umożliwia redukcję wymaganej grubości osłony nawet o kilkanaście procent przy zachowaniu identycznego poziomu ochrony radiacyjnej. Analiza wykresu na rys. 2 potwierdza wykładniczy charakter tłumienia promieniowania gamma przez badane betony. Na osi poziomej przedstawiono grubość osłony, a na osi pionowej krotność osłabienia k , czyli stosunek sygnału bez osłony do sygnału po przejściu przez próbkę. Im większa wartość k , tym skuteczniej beton ogranicza przenikanie promieniowania. Wszystkie serie pomiarowe układają się wzdłuż rosnących krzywych wykładniczych, zgodnych z zależnością [1].

$$k(d) = e^{\mu d} \quad [1]$$

procedures ensuring consistent safety parameters and construction quality are also of particular importance.

Another area of research involves optimizing structures in terms of mass and mobility while maintaining the required ballistic and blast resistance. In practice, this requires the development of new special concretes, cement-based composites, and multilayer shielding systems that can reduce the thickness and weight of prefabricated elements without compromising their protective performance (11, 18–22).

4. Experimental testing of prefabricated protective elements

4.1. Experimental analysis of the shielding properties of special concretes in reference radiation fields

As part of the research conducted within the SCHRON25 project, an analysis was performed of the shielding properties of concretes intended for the prefabrication of protective elements for critical infrastructure facilities and shelter construction. The experimental programme included an assessment of the effectiveness of gamma-radiation attenuation by concretes containing heavy aggregates, such as magnetite, barite, serpentinite, basalt, and granite. The experimental programme was carried out using reference isotopic radiation fields and test facilities equipped with F1 and REM-2 recombination chambers [Fig. 1]. The tests were conducted using the gamma radiation sources ^{137}Cs and ^{60}Co .

The shielding properties of concretes designated 1S/17, 2S/17, 3S/17, 4S/17, 1S/18, 2S/18, as well as samples I, II, and III, were investigated. The mix designs of the tested concretes differed in terms of the proportion and type of heavy aggregates and mineral additives responsible for gamma-radiation attenuation [Table 2].

The results demonstrated a clear effect of the mineral composition and bulk density of the concrete samples on the effectiveness of gamma-radiation attenuation. The highest linear attenuation coefficient was obtained for sample 1S/18, containing magnetite and granite, for which $\mu = 0.218 \text{ cm}^{-1}$, whereas the lowest value was obtained for sample 1S/17, containing predominantly granite

Oznacza to, że zwiększenie grubości próbki nie powoduje liniowego, lecz wykładniczego wzrostu skuteczności osłony. Już przy grubości około 5 cm obserwuje się kilkukrotne osłabienie promieniowania, natomiast przy 10–15 cm krotność osłabienia rośnie do wartości rzędu kilkunastu–kilkudziesięciu. Taki przebieg potwierdza poprawność przyjętej metody obliczania liniowego współczynnika osłabienia μ . Najwyżej na wykresie na rys. 2 przebiega krzywa próbki 1S/18, dla której uzyskano największy współczynnik liniowego osłabienia $\mu = 0,218 \text{ cm}^{-1}$. Oznacza to, że beton magnetytowo-granitowy charakteryzował się najwyższą efektywnością tłumienia promieniowania gamma. W praktyce przekłada się to na najmniejszą wymaganą grubość osłony dla uzyskania określonego poziomu redukcji dawki – grubość zapewniająca krotność osłabienia $k = 1000$ dla tej próbki wynoszącą około 31,7 cm.

Bardzo zbliżone wyniki uzyskały próbki I, 4S/17, III oraz II, dla których wartości μ mieściły się w zakresie 0,201–0,203 cm^{-1} . Ich krzywe na wykresie na rys. 2 są niemal równoległe i położone blisko siebie, co wskazuje na podobną skuteczność osłonową wobec promieniowania gamma. Różnice pomiędzy nimi są niewielkie, ale istotne materiałowo, ponieważ próbki z serpentynitem mogą dodatkowo poprawiać ochronę przed promieniowaniem neutronowym, mimo że ich skuteczność osłonowa na promieniowanie gamma jest zbliżona do próbek betonu magnetytowo-granitowych.

Najniżej położone krzywe odpowiadają próbkom 1S/17, 2S/17 oraz 2S/18, dla których współczynniki μ wynosiły odpowiednio 0,183, 0,185 i 0,190 cm^{-1} . Oznacza to słabsze tłumienie promieniowania gamma oraz większą wymaganą grubość osłony. Dla próbki 1S/17 grubość potrzebna do uzyskania $K=1000$ wyniosła 37,8 cm, czyli o około 6 cm więcej niż dla najlepszej próbki 1S/18.

4.2. Badanie prefabrykatów betonowych przed bezpośrednim ostrzałem z broni małokalibrowej

Badania odporności balistycznej stanowiły pierwszy etap programu badawczego dotyczącego możliwości wykorzystania prefabrykowanych elementów betonowych w budownictwie ochronnym. W etapie tym skoncentrowano się na ocenie zachowania elementów pod wpływem oddziaływania pocisków przeciwpancernych kalibru 12,7 mm oraz identyfikacji rozwiązań materiałowych ograniczających penetrację i lokalne uszkodzenia konstrukcji. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do dalszych badań obejmujących ocenę odporności elementów prefabrykowanych na oddziaływanie odłamków, promieniowania jonizującego oraz innych oddziaływań charakterystycznych dla budowli ochronnych. Badania przeprowadzono w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia zgodnie z akredytowanymi procedurami badawczymi LBUSO.PB.12 „Badanie kuloodporności próbek” oraz LBUSO.PB.14 „Pomiar prędkości metodą radiolokacyjną”. Metodyka badań została opracowana w oparciu o wymagania standardu STANAG 4569 [Ed. 3] *Protection Levels for Occupants of Armoured Vehicles* oraz dokumentu AEP-55 Volume 1 [Ed. C, Ver. 1] *Procedures for Evaluating the Protection Level of Armoured Vehicles – Kinetic Energy and Artillery Threat*. Dokumenty te są powszechnie wykorzystywane do oceny odporności osłon ochronnych i konstrukcji przeznaczonych

aggregate, for which $\mu = 0.183 \text{ cm}^{-1}$. These values corresponded to half-value layers [HVLs] of 3.18 cm and 3.79 cm, respectively.

From the perspective of shelter design, the shielding thickness required to achieve a thousandfold attenuation of the radiation beam proved to be a particularly important parameter. For concrete 1S/18, this value was approximately 31.7 cm, whereas for conventional concrete containing granite aggregate [1S/17], it exceeded 37 cm. This indicates that the use of heavy aggregates can reduce the required shielding thickness by up to approximately 16 % while maintaining the same level of radiation protection.

The analysis of the graph in Fig. 2 confirms the exponential nature of gamma-radiation attenuation by the tested concretes. The horizontal axis represents the shielding thickness, whereas the vertical axis represents the attenuation factor, k , defined as the ratio of the signal measured without shielding to that measured after transmission through the sample. The higher the value of k , the more effectively the concrete limits radiation penetration. All measurement series follow increasing exponential curves consistent with relationship [1].

$$k(d) = e^{\mu d} \quad [1]$$

This indicates that an increase in sample thickness does not result in a linear, but rather an exponential increase in shielding effectiveness. Even at a thickness of approximately 5 cm, several-fold attenuation of radiation is observed, whereas at 10–15 cm, the attenuation factor increases to values of the order of several tens. This behaviour confirms the validity of the adopted method for calculating the linear attenuation coefficient, μ . The curve for sample 1S/18 is the highest on the graph in Fig. 2, corresponding to the highest linear attenuation coefficient, $\mu = 0.218 \text{ cm}^{-1}$. This indicates that the magnetite–granite concrete exhibited the highest gamma-radiation attenuation efficiency. In practical terms, this translates into the smallest required shielding thickness for achieving a specified level of dose reduction – the thickness required to obtain an attenuation factor of $k = 1000$ for this sample was approximately 31.7 cm.

Very similar results were obtained for samples I, 4S/17, III, and II, for which the μ values ranged from 0.201 to 0.203 cm^{-1} . Their curves in Fig. 2 are almost parallel and closely spaced, indicating similar shielding effectiveness against gamma radiation. The differences between these samples are small but materially relevant, as samples containing serpentinite may additionally improve protection against neutron radiation, despite their gamma-radiation shielding effectiveness being comparable to that of magnetite–granite concrete samples.

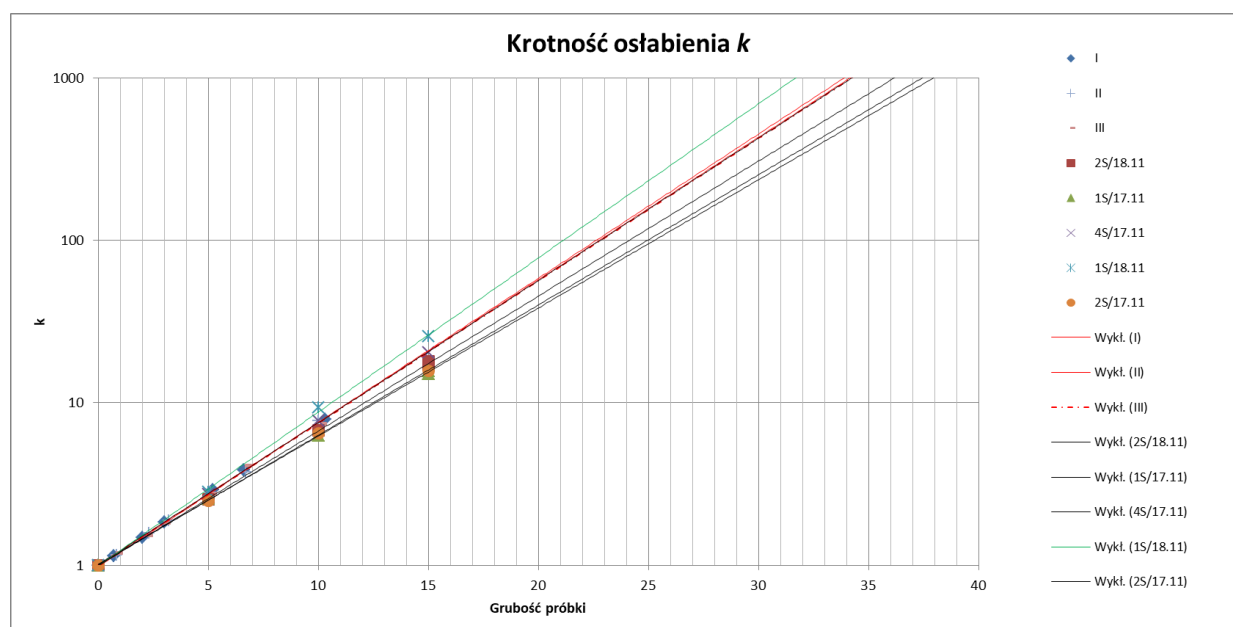
The lowest curves correspond to samples 1S/17, 2S/17, and 2S/18, for which the μ coefficients were 0.183, 0.185, and 0.190 cm^{-1} , respectively. This indicates lower gamma-radiation attenuation and a greater required shielding thickness. For sample 1S/17, the thickness required to achieve $k = 1000$ was 37.8 cm, i.e. approximately 6 cm greater than that required for the best-performing sample, 1S/18.

Tablica 2 / Table 2

WSPÓŁCZYNNIKI OSŁABIANIA PROMIENIOWANIA GAMMA ORAZ PARAMETRY HVL, TVL I GRUBOŚCI OSŁONY DLA KROTNOŚCI $k = 1000$ OSŁABIANIA DLA BADANYCH BETONÓW SPECJALNYCH.

GAMMA-RADIATION ATTENUATION COEFFICIENTS AND HVL, TVL, AND SHIELDING THICKNESS PARAMETERS FOR AN ATTENUATION FACTOR OF $k = 1000$ FOR THE TESTED SPECIAL CONCRETES.

Próbka / Sample	Współczynnik liniowego osłabienia μ Linear attenuation coefficient μ , 1/cm	Grubość połowiczna HVL Half-value layer HVL, cm	Grubość dziesiąta TVL Tenth-value layer TVL, cm	Grubość x dla krotności osłabienia $k = 1000$ Thickness x for attenuation factor $k = 1000$, cm
1S/18 [magnetyt, granit] / 1S/18 [magnetite, granite]	0.218	3.18	10.56	31.69
I [magnetyt, bazalt] / I [magnetite, basalt]	0.203	3.41	11.34	34.03
4S/17 [magnetyt, granit] / 4S/17 [magnetite, granite]	0.202	3.43	11.40	34.20
III [baryt, serpentynit] / III [barite, serpentinite]	0.202	3.43	11.40	34.20
II [magnetyt, serpentynit] / II [magnetite, serpentinite]	0.201	3.45	11.46	34.37
3S/17 [magnetyt, granit] / 3S/17 [magnetite, granite]	0.192	3.61	11.99	35.98
2S/18 [amfibolit/bazalt] / 2S/18 [amphibolite/basalt]	0.190	3.65	12.12	36.36
2S/17 [granit, piasek] / 2S/17 [granite, sand]	0.185	3.75	12.45	37.34
1S/17 [granit] / 1S/17 [granite]	0.183	3.79	12.58	37.75



Rys. 2. Charakterystyki osłonowości badanych betonów specjalnych w funkcji grubości osłony w polu promieniowania ^{137}Cs .

Fig. 2. Shielding characteristics of the tested special concretes as a function of shielding thickness in the ^{137}Cs radiation field.

do zabezpieczenia ludzi oraz infrastruktury przed oddziaływaniem pocisków i odłamków o wysokiej energii kinetycznej. Badania prowadzono z wykorzystaniem amunicji przeciwpancernej 12,7 × 108 mm B-32 [rys. 3]. Prędkość pocisków przed uderzeniem w próbki wyznaczano metodą radiolokacyjną zgodnie z procedurą LBUSO.PB.14. Badania przeprowadzono przy następujących warunkach środowiskowych: temperatura powietrza około 21°C, wilgotność względna około 48% oraz ciśnienie atmosferyczne około 1015 hPa.

Przedmiotem badań były prefabrykowane elementy betonowe o wymiarach 500 × 500 × 450 mm wykonane z betonów zbrojonych różnymi rodzajami włókien rozproszonych [tablica 3 i 4]. W wybranych wariantach zastosowano dodatkowe wkładki wewnętrzne pełniące funkcję warstw rozpraszających energię

4.2. Testing of concrete prefabricated elements under direct small-arms fire

Ballistic resistance testing constituted the first stage of the research programme aimed at assessing the potential use of prefabricated concrete elements in protective construction. This stage focused on evaluating the behaviour of the elements under the impact of 12.7 mm armour-piercing projectiles and identifying material solutions capable of limiting penetration and local structural damage. The results provide a basis for further studies involving the assessment of the resistance of prefabricated elements to fragment impacts, ionising radiation, and other effects characteristic of protective structures.

pocisku oraz ograniczających rozwój lokalnych stref zniszczenia. Oceny skuteczności ochronnej dokonano na podstawie pomiaru głębokości penetracji pocisku, analizy strefy uszkodzenia oraz oceny stanu powierzchni tylnej elementu. Szczególną uwagę zwrócono na występowanie perforacji, odprysków wtórnych [ang. *scabbing*] oraz utratę integralności konstrukcyjnej elementu. W budownictwie ochronnym zjawiska te mają kluczowe znaczenie, ponieważ nawet przy zachowaniu ciągłości przegrody odspojone fragmenty materiału mogą stanowić bezpośrednie zagrożenie dla użytkowników schronu.

Analiza wyników przedstawionych w tablicy 3 wskazuje, że głębokość penetracji pocisków przeciwpancernych kalibru 12,7 mm mieściła się w przedziale od 65,0 do 79,0 mm. Największą wartość odnotowano dla próbki 1 z włóknem typu S [79,0 mm], natomiast najmniejszą dla próbki 3 z włóknem typu C i wkładką wewnętrzną [65,0 mm]. Pozostałe warianty charakteryzowały się głębokością penetracji od 66,0 do 75,0 mm. Uzyskane różnice nie wskazują na jednoznaczny wpływ rodzaju włókna rozproszonego na zdolność zatrzymania pocisku, jednak potwierdzają skuteczność wszystkich analizowanych rozwiązań w zakresie zachowania integralności konstrukcyjnej elementów. We wszystkich badanych próbkach zachowana została ciągłość konstrukcji. Nie stwierdzono perforacji elementów, uszkodzeń tylnej powierzchni ani występowania zjawiska *scabbingu* [rys. 5]. Nawet przy głębokości penetracji przekraczającej 70 mm nie zaobserwowano odspajania fragmentów betonu po stronie chronionej. Nie odnotowano również pęknięć otwartych ani rozwijających się szczelin na tylnej powierzchni elementów. Wyniki te wskazują, że zastosowane zbrojenie rozproszone skutecznie ogranicza lokalne uszkodzenia materiału oraz redukuje ryzyko wtórnej fragmentacji, stanowiącej jedno z podstawowych zagrożeń dla użytkowników budowli ochronnych. Uzyskane wyniki potwierdzają, że zastosowanie włókien rozproszonych pozwala na zachowanie funkcji ochronnej prefabrykowanych elementów betonowych poddanych oddziaływaniu pocisków przeciwpancernych kalibru 12,7 mm. Szczególnie istotny jest brak perforacji oraz uszkodzeń tylnej powierzchni, gdyż z punktu widzenia budownictwa ochronnego są to kryteria ważniejsze niż sama wartość głębokości penetracji. Należy jednak podkreślić, że analiza oparta na pojedynczych trafieniach ma swoje ograni-



Rys. 3. Widok zastosowanej amunicji – amunicja kalibru 12,7 × 108 mm typu B32.

Fig. 3. View of the ammunition used – 12.7 × 108 mm B-32 ammunition.

The tests were conducted at the Military Institute of Armament Technology in accordance with the accredited test procedures LBUSO.PB.12, “Bullet Resistance Testing of Specimens”, and LBUSO.PB.14, “Velocity Measurement Using Radar”. The test methodology was developed based on the requirements of STANAG 4569 [Ed. 3], Protection Levels for Occupants of Armoured Vehicles, and AEP-55 Volume 1 [Ed. C, Ver. 1], Procedures for Evaluating the Protection Level of Armoured Vehicles – Kinetic Energy and Artillery Threat. These documents are widely used to assess the resistance of protective barriers and structures designed to protect people and infrastructure against projectiles and high-kinetic-energy fragments.

The tests were conducted using 12.7 × 108 mm B-32 armour-piercing ammunition [Fig. 3]. The projectile velocity immediately before impact with the specimens was determined using radar measurements in accordance with procedure LBUSO.PB.14. The tests were conducted under the following environmental conditions: air temperature of approximately 21°C, relative humidity of approximately 48%, and atmospheric pressure of approximately 1015 hPa.

The specimens tested were prefabricated concrete elements measuring 500 × 500 × 450 mm, manufactured from concretes reinforced with different types of dispersed fibres [Tables 3 and



Rys. 4. Widok stanowiska badawczego – poligon.

Fig. 4. View of the test site – proving ground.



Tablica 3 / Table 3

WYNIKI BADAŃ BALISTYCZNYCH PREFABRYKOWANYCH ELEMENTÓW BETONOWYCH PO POJEDYNCZYM TRAFIENIU POCISKIEM 12,7 × 108 mm B-32.

RESULTS OF BALLISTIC TESTS OF PREFABRICATED CONCRETE ELEMENTS AFTER A SINGLE IMPACT BY A 12.7 × 108 mm B-32 PROJECTILE.

Nr próbki Sample no.	Rozwiązanie materiałowe Material solution	Prędkość pocisku Projectile velocity, m/s	Głębokość penetracji Penetration depth, mm	Stan tylnej powierzchni Condition of rear surface
1	zbrojenie włóknem S / S-fibre reinforcement	812 ± 0.2 %	79.00 ± 0.2 %	brak odprysków i zarysowań no scabbing or cracking
2	zbrojenie włóknem C / C-fibre reinforcement	809 ± 0.2 %	69.50 ± 0.2 %	brak odprysków i zarysowań no scabbing or cracking
3	zbrojenie włóknem C + wkładka wewnętrzna C-fibre reinforcement + internal insert	821 ± 0.2 %	65.00 ± 0.2 %	brak odprysków i zarysowań no scabbing or cracking
4	zbrojenie włóknem D / D-fibre reinforcement	813 ± 0.2 %	66.00 ± 0.2 %	brak odprysków i zarysowań no scabbing or cracking
5	zbrojenie włóknem D + wkładka wewnętrzna D-fibre reinforcement + internal insert	811 ± 0.2 %	75.00 ± 0.2 %	brak odprysków i zarysowań no scabbing or cracking
6	zbrojenie włóknem P / P-fibre reinforcement	806 ± 0.2 %	71.00 ± 0.2 %	brak odprysków i zarysowań no scabbing or cracking



Rys. 5. Element prefabrykowany w trakcie ostrzału i po ostrzale.

Fig. 5. Prefabricated element during and after ballistic testing.



Rys. 6. Widok elementu prefabrykowanego po ostrzale czterema pociskami amunicji 12,7×108 B32; widok od strony ostrzału (A) i od strony tylnej (B).

Fig. 6. View of the prefabricated element after being hit by four 12.7 × 108 mm B-32 projectiles; view from the impact side (A) and the rear side (B).

czenia. Jak wskazano w literaturze, badania balistyczne cechują się znaczną zmiennością wyników wynikającą z niejednorodności procesów dynamicznych, lokalizacji punktu trafienia, niewielkich różnic prędkości pocisku oraz lokalnej struktury materiału. Dlatego uzyskane różnice głębokości penetracji należy traktować jako wartości orientacyjne, wskazujące określone tendencje materiałowe. W celu zwiększenia reprezentatywności wyników planowana jest kontynuacja badań obejmująca zwiększenie liczby strzałów oraz przeprowadzenie analizy statystycznej uzyskanych rezultatów. Niezależnie od obserwowanych różnic w głębokości penetracji wszystkie analizowane próbki spełniły podstawowe kryteria odporności balistycznej, zachowując integralność konstrukcyjną i eliminując ryzyko powstawania niebezpiecznych odprysków po stronie chronionej.

W celu oceny zachowania elementu prefabrykowanego pod wpływem wielokrotnego oddziaływania balistycznego próbkę nr 2 poddano czterokrotnemu ostrzałowi w ten sam obszar [tablica 4, rys. 6]. Po pierwszym trafieniu głębokość penetracji wyniosła 69,5 mm. Kolejne trafienia spowodowały zwiększenie strefy uszkodzenia do poziomu 124,0 – 126,0 mm, co potwierdza kumulacyjny charakter lokalnych uszkodzeń materiału poddanego wielokrotnemu oddziaływaniu pocisków o wysokiej energii kinetycznej. Pomimo znaczącego wzrostu głębokości penetracji nie stwierdzono perforacji elementu ani uszkodzeń powierzchni tylnej. Oznacza to, że nawet w warunkach wielokrotnego trafienia zachowana została integralność konstrukcyjna elementu oraz zdolność do ograniczania zjawiska fragmentacji wtórnej. Z punktu widzenia budownictwa ochronnego wynik ten ma szczególne znaczenie, ponieważ wskazuje na możliwość zachowania funkcji ochronnej prefabrykowanego elementu również po wielokrotnym oddziaływaniu balistycznym. Przeprowadzone badania potwierdziły potencjał opracowanych betonów zbrojonych włóknami rozproszonymi do zastosowań w prefabrykowanych budowlach ochronnych. Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowane rozwiązania materiałowo-konstrukcyjne zapewniają skuteczne ograniczenie penetracji pocisku oraz eliminację niebezpiecznych odprysków po stronie chronionej. W kontekście projektowania schronów i budowli ochronnych szczególnie istotne jest zachowanie integralności przegrody po oddziaływaniu balistycznym, ponieważ to właśnie brak perforacji i brak fragmentacji wtórnej decydują o rzeczywistej skuteczności ochronnej konstrukcji.

4]. In selected variants, additional internal inserts were used to dissipate projectile energy and limit the development of localised damage zones. Protective performance was assessed based on measurements of projectile penetration depth, analysis of the damage zone, and evaluation of the condition of the rear surface of the element. Particular attention was paid to the occurrence of perforation, secondary concrete fragments [*scabbing*], and loss of structural integrity. In protective construction, these phenomena are of critical importance because, even when the continuity of the barrier is maintained, detached material fragments may pose a direct hazard to shelter occupants.

The analysis of the results presented in Table 3 indicates that the penetration depth of the 12.7 mm armour-piercing projectiles ranged from 65.0 to 79.0 mm. The greatest value was recorded for specimen 1 reinforced with S-type fibres [79.0 mm], whereas the lowest value was obtained for specimen 3 reinforced with C-type fibres and incorporating an internal insert [65.0 mm]. The remaining variants exhibited penetration depths ranging from 66.0 to 75.0 mm. The differences obtained do not indicate an unequivocal effect of the type of dispersed fibre on the projectile-stopping capability; however, they confirm the effectiveness of all the solutions investigated in maintaining the structural integrity of the elements.

Structural continuity was maintained in all specimens tested. No perforation of the elements, damage to the rear surface, or occurrence of *scabbing* was observed [Fig. 5]. Even at penetration depths exceeding 70 mm, no detachment of concrete fragments from the protected side was observed. No open cracks or developing fissures were recorded on the rear surfaces of the elements. These results indicate that the dispersed reinforcement effectively limits localised material damage and reduces the risk of secondary fragmentation, which constitutes one of the principal hazards to occupants of protective structures.

The results confirm that the use of dispersed fibres enables the protective function of prefabricated concrete elements subjected to the impact of 12.7 mm armour-piercing projectiles to be maintained. The absence of perforation and damage to the rear surface is particularly important, as, from the perspective of protective construction, these criteria are more significant than the penetration depth itself.

It should be emphasised, however, that an analysis based on single impacts has certain limitations. As indicated in the literature, ballistic testing is characterised by considerable variability in the results, resulting from the heterogeneous nature of dynamic

Tablica 4 / Table 4

WYNIKI BADAŃ BALISTYCZNYCH PREFABRYKOWANYCH ELEMENTÓW BETONOWYCH. WYNIKI WIELOKROTNEGO OSTRZAŁU PRÓBK nr 2.
RESULTS OF BALLISTIC TESTS OF PREFABRICATED CONCRETE ELEMENTS. RESULTS OF REPEATED IMPACTS ON SPECIMEN NO. 2.

Nr próbki Sample no.	Liczba trafień Number of impacts	Prędkość pocisku Projectile velocity, m/s	Głębokość penetracji Penetration depth, mm	Stan tylnej powierzchni Condition of rear surface
2	1	809.0 ± 0.2 %	69.5 ± 0.2 %	brak odprysków i zarysowań / no scabbing or cracking
2	4	808.0–814.0 ± 0.2 %	124.0–126.0 ± 0.2 %	brak odprysków i zarysowań / no scabbing or cracking

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków.

1. Skład oraz gęstość betonów mają istotny wpływ na ich właściwości osłonowe wobec promieniowania gamma. Najwyższą skuteczność tłumienia uzyskano dla betonów zawierających kruszywo ciężkie - magnetyt, co przekłada się na wyższe wartości liniowego współczynnika osłabienia,
2. Zastosowanie kruszyw ciężkich umożliwia istotne zmniejszenie wymaganej grubości osłony radiacyjnej przy zachowaniu tego samego poziomu ochrony. W analizowanych przypadkach redukcja ta wyniosła kilkanaście procent w porównaniu z betonami z kruszyw tradycyjnych,
3. Betony zawierające serpentynit, przy zbliżonej skuteczności wobec promieniowania gamma, mogą dodatkowo poprawiać właściwości osłonowe względem promieniowania neutronowego, co jest istotne w projektowaniu wielofunkcyjnych osłon radiacyjnych,
4. Wyniki badań balistycznych potwierdziły dużą odporność analizowanych elementów prefabrykowanych, w szczególności w zakresie zapobiegania perforacji oraz eliminacji uszkodzeń tylnej powierzchni [*scabbingu*], co ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa użytkowników budowli ochronnych.
5. Rodzaj zastosowanych włókien rozproszonych nie wykazał jednoznacznego wpływu na głębokość penetracji pocisku. We wszystkich wariantach materiałowych zachowana została integralność konstrukcyjna elementów oraz brak uszkodzeń tylnej powierzchni.
6. Badania wielokrotnego ostrzału wykazały zdolność elementów do zachowania integralności konstrukcyjnej nawet przy kumulacji lokalnych uszkodzeń, co potwierdza ich potencjał do zastosowań w budownictwie ochronnym.
7. Uzyskane wyniki potwierdzają potencjał prefabrykowanych elementów betonowych zbrojonych włóknami rozproszonymi do zastosowań w modułowych budowlach ochronnych przeznaczonych do ochrony ludności i infrastruktury krytycznej.

Literatura / References

1. Ustawa z dnia 5 grudnia 2024 r. o ochronie ludności i obronie cywilnej, Dz.U. 2024 poz. 1907 z późn. zm.
2. Ustawa z dnia 17 kwietnia 2026 r. o zmianie ustawy o ochronie ludności i obronie cywilnej oraz niektórych innych ustaw, Dz.U. 2026 poz. 646.
3. Program Ochrony Ludności i Obrony Cywilnej na lata 2025–2026, Rada Ministrów, Warszawa 2025.
4. Program Ochrony Ludności i Obrony Cywilnej na lata 2027–2031, Rada Ministrów, Warszawa 2026.
5. Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym, t.j. Dz.U. 2026 poz. 574 z późn. zm.
6. Ustawa z dnia 29 sierpnia 2002 r. o stanie wojennym oraz kompetencjach Naczelnego Dowódcy Sił Zbrojnych i zasadach jego podległości konstytucyjnym organom Rzeczypospolitej Polskiej, t.j. Dz.U. 2025 poz. 504 z późn. zm.

processes, the location of the impact point, minor differences in projectile velocity, and the local structure of the material. Therefore, the differences in penetration depth obtained should be regarded as indicative values reflecting specific material trends. To increase the representativeness of the results, further studies are planned, including an increased number of shots and statistical analysis of the results obtained. Irrespective of the observed differences in penetration depth, all specimens investigated met the basic ballistic resistance criteria, maintaining structural integrity and eliminating the risk of hazardous fragment formation on the protected side.

To assess the behaviour of the prefabricated element under repeated ballistic loading, specimen No. 2 was subjected to four impacts in the same area [Table 4, Fig. 6]. After the first impact, the penetration depth was 69.5 mm. Subsequent impacts increased the damage zone to 124.0–126.0 mm, confirming the cumulative nature of localised material damage under repeated impact by high-kinetic-energy projectiles. Despite the significant increase in penetration depth, no perforation of the element or damage to the rear surface was observed. This indicates that, even under repeated impact conditions, the structural integrity of the element and its ability to limit secondary fragmentation were maintained.

From the perspective of protective construction, this result is of particular importance, as it indicates the potential for the prefabricated element to retain its protective function even after repeated ballistic loading. The tests conducted confirmed the potential of the developed concretes reinforced with dispersed fibres for use in prefabricated protective structures. The results indicate that the material and structural solutions employed effectively limit projectile penetration and prevent the formation of hazardous fragments on the protected side. In the context of designing shelters and protective structures, maintaining the integrity of the barrier following ballistic impact is of particular importance, as the absence of perforation and secondary fragmentation determines the actual protective effectiveness of the structure.

5. Conclusions

The studies conducted allow the following conclusions to be drawn.

1. The composition and density of concrete have a significant effect on its gamma-radiation shielding properties. The highest attenuation efficiency was obtained for concretes containing heavy magnetite aggregate, which resulted in higher values of the linear attenuation coefficient.
2. The use of heavy aggregates enables a significant reduction in the required thickness of radiation shielding while maintaining the same level of protection. In the cases analysed, this reduction amounted to approximately 16 % compared with concretes containing conventional aggregates.
3. Concretes containing serpentinite, while exhibiting comparable effectiveness against gamma radiation, may additionally improve shielding performance against neutron radiation, which is relevant to the design of multifunctional radiation shields.

7. Ustawa z dnia 18 kwietnia 2002 r. o stanie klęski żywiołowej, t.j. Dz.U. 2025 poz. 112 z późn. zm.
8. A. Skrabacz, F. Wołoch, Protective structures as a device of ensuring the safety of victims in a war situation. *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych* **1**, 1–12 (2024). <https://dx.doi.org/10.37105/iboa.198>
9. F. Wołoch, Przeciwdziałanie skutkom działania broni jądrowej w ochronie ludności. W A. Skrabacz et al. (Ed.), *Instytucjonalne i organizacyjne aspekty ochrony ludności. Ochrona Ludności* **1**, 291-304 (2024).
10. Szef Obrony Cywilnej Kraju, *Wytyczne w sprawie zasad postępowania z zasobami budownictwa ochronnego*, Warszawa, 2018.
11. M. Nowak, F. Wołoch, Z. Lewandowska, T. Gajewski, K. Szajek, P.W. Sielicki, Numerical prediction of debris loads on underground structures following progressive collapse of multi-story buildings. *Eng. Struct.* **367**, 123592 (2026). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2026.123592>
12. NATO Standardization Office, *STANAG 2280 – Minimum Standards for Protective Construction*, Brussels, 2016.
13. Inspektorat Obrony Powietrznej Państwa, *Wytyczne techniczne dotyczące budowy schronów przeciwlotniczych, pomieszczeń zabezpieczających i uszczelnionych*, Warszawa, 1938.
14. Ministerstwo Budownictwa i Przemysłu Materiałów Budowlanych, *Szczegółowe zasady projektowania i wykonywania schronów*, Warszawa, 1977.
15. Ministerstwo Budownictwa i Przemysłu Materiałów Budowlanych, *Katalog przykładowych rozwiązań budowli ochronnych i ukryć*, Warszawa, 1981.
16. Ministerstwo Budownictwa, Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej, *Tymczasowe szczegółowe zasady projektowania i wykonywania schronów obrony cywilnej. Część I – Schrony o konstrukcji monolitycznej*, Warszawa, 1986.
17. Ministerstwo Obrony Narodowej, *Techniczne zasady przystosowania piwnic na ukrycia zabezpieczające*, Warszawa, 1966.
18. Kobiela S., Tatko M., *Podziemne betonowe budowle ochronne*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2009.
19. FEMA, *Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings*, FEMA 426, Washington D.C., 2011.
20. FEMA, *Design and Construction Guidance for Community Safe Rooms*, FEMA P-361, Washington D.C., 2021.
21. PN-EN 1991-1-7, *Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Oddziaływania wyjątkowe*.
22. PN-EN 1992-1-1, *Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu*.
23. PN-EN 13501-2, *Klasyfikacja ogniowa wyrobów budowlanych i elementów budynków*.
24. PN-B-02852:2001, *Ochrona przeciwpożarowa budynków – Obliczanie gęstości obciążenia ogniowego oraz wyznaczanie względnego czasu trwania pożaru*.
25. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane, t.j. Dz.U. 2026 poz. 524 z późn. zm.
26. Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym, t.j. Dz.U. 2026 poz. 538 z późn. zm.
27. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 21 lutego 2025 r. w sprawie kryteriów uznawania obiektów budowlanych albo ich części za budowle ochronne, Dz.U. 2025 poz. 235.
4. The ballistic tests confirmed the high resistance of the prefabricated elements investigated, particularly with respect to preventing perforation and eliminating damage to the rear surface [scabbing], which is of critical importance for the safety of occupants of protective structures.
5. The type of dispersed fibres used did not show an unequivocal effect on projectile penetration depth. In all material variants, the structural integrity of the elements was maintained and no damage to the rear surface was observed.
6. The repeated-impact tests demonstrated the ability of the elements to maintain structural integrity even in the presence of cumulative localised damage, confirming their potential for use in protective construction.
7. The results obtained confirm the potential of prefabricated concrete elements reinforced with dispersed fibres for use in modular protective structures intended to protect the population and critical infrastructure.

28. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji w sprawie sposobu przygotowania obiektu zbiorowej ochrony do użycia, szczegółowych warunków eksploatacji budowli ochronnych, zapewnienia porządku w ich obrębie oraz ich niezbędnego wyposażenia, Dz.U. 2025 poz. 933.

29. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 9 lipca 2025 r. w sprawie warunków organizowania oraz wymagań, jakie powinny spełniać miejsca doraźnego schronienia, Dz.U. 2025 poz. 932.

30. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji w sprawie Centralnej Ewidencji Obiektów Zbiorowej Ochrony, Dz.U. 2025 poz. 922.

31. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji w sprawie warunków technicznych dla budowli ochronnych oraz warunków technicznych ich użytkowania i usytuowania, Dz.U. 2025 poz. 1278.

32. Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie szczegółowych warunków wyznaczania budynków użyteczności publicznej, w których zapewnia się budowle ochronne, Dz.U. 2025 poz. 1070.