

# Climate Neutral School

## Szkoła neutralna dla klimatu

dr hab. inż. Małgorzata Fedorczyk-Cisak, prof. PK<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0003-1125-4068

dr hab. inż. arch. Patrycja Haupt, prof. PK<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0001-5595-9612

dr inż. Beata Sadowska<sup>3)</sup>

ORCID: 0000-0003-2866-3685

dr hab. inż. arch. Przemysław Markiewicz-Zahorski, prof. PK<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-2853-1263

dr hab. inż. Dorota Krawczyk, prof. PB<sup>3)</sup>

ORCID: 0000-0002-3118-2236

dr inż. Paweł Jastrzębski<sup>4)</sup>

ORCID: 0000-0003-3017-9999

DOI: 10.15199/33.2024.12.22

**Abstract.** European countries as well as many others have taken on the ambitious challenge of achieving zero emissions CO<sub>2</sub> by 2050 in sectors with the highest energy intensity rates such as the construction sector. To meet these commitments, a number of measures need to be taken immediately in various areas of construction and related industries. One such action could be the development of benchmarks for large groups of buildings with similar characteristics, showing how to minimize carbon dioxide emissions. In the article, the authors presented an analysis of achieving climate neutrality performed for a school built as part of an educational program implemented during the Millennium of the Polish State. An attempt was also made to include in the proposed methodology additional aspects of design improvements to the building and its surroundings, such as accessibility and blue-green infrastructure.

**Keywords:** climate neutrality; school building; operational carbon footprint; accessibility; blue-green infrastructure

A policy priority for European Union countries is to move towards climate neutrality [1]. They implement international obligations resulting from the need to stop rapid climate change, which is destroying our planet and causing adverse phenomena such as droughts, floods and fires. At the same time, natural resources of fossil fuels are depleted, hence the only reasonable option is to save energy [2]. Given the very large number of buildings that are not modernized or have been partially retrofitted, there is a need to support all measures that will help reduce the energy and carbon intensity of the building stock [3]. It is also important to consider other aspects related to ensuring user comfort, using blue-green architecture and increasing accessibility for people with special needs.

As early as 2016, the 'School of the Future' project, which aimed to provide scenarios for the thermal modernization of four school buildings, highlighted that a 100% zero-emission building should become the standard of the future [4]. As part of

**Streszczenie.** Kraje europejskie, a także wiele innych, podjęły ambitne wyzwanie osiągnięcia zerowej emisji CO<sub>2</sub> do 2050 r. w sektorach o największym wskaźniku energochłonności, takich jak m.in. sektor budownictwa. Chcąc sprostać tym zobowiązaniom, należy niezwłocznie podjąć wiele działań w różnych obszarach budownictwa i powiązanych gałęziach przemysłu. Jednym z nich może być opracowanie wzorców postępowania w przypadku dużych grup budynków o podobnych cechach pokazujących, w jaki sposób można zminimalizować emisję dwutlenku węgla. W artykule przedstawiliśmy analizę osiągnięcia neutralności klimatycznej w przypadku szkoły wzniesionej w ramach programu oświatowego, realizowanego w czasie jubileuszu Tysiąclecia Państwa Polskiego. Podjęto też próbę uwzględnienia w zaproponowanej metodologii, dodatkowych aspektów projektowania ulepszeń budynku i jego otoczenia, takich jak dostępność i błękitno-zielona infrastruktura.

**Słowa kluczowe:** neutralność klimatyczna; budynek szkolny; operacyjny ślad węglowy; dostępność; infrastruktura błękitno-zielona

Priorytetem polityki krajów Unii Europejskiej jest dążenie do neutralności klimatycznej [1]. Wdrażają one międzynarodowe zobowiązania, wynikające z konieczności powstrzymania gwałtownych zmian klimatu, przekładających się na zniszczenia naszej planety i powodujących niekorzystne zjawiska, takie jak susze, powodzie, pożary. Jednocześnie wyczerpują się zasoby naturalne paliw kopalnych, stąd też jedyne rozsądne wyjście to oszczędzanie energii [2]. Biorąc pod uwagę bardzo dużą liczbę budynków, które nie są modernizowane lub zostały poddane częściowej termomodernizacji, istnieje potrzeba wspierania wszelkich działań, które pomogą zmniejszyć energochłonność i emisyjność zasobów budowlanych [3]. Nie bez znaczenia jest także wzięcie pod uwagę innych aspektów, związanych z zapewnieniem komfortu użytkowego, wykorzystaniem architektury błękitno-zielonej oraz zwiększeniem dostępności dla osób o szczególnych potrzebach.

Już w 2016 r., w ramach projektu "School of the Future", którego celem było przedstawienie scenariuszy modernizacji termicznej czterech budynków szkolnych, podkreślono, że budynek w 100% bezemisyjny powinien stać się standardem przyszłości [4]. W ramach tego projektu budynki demonstracyjne (Solitude-Gymnasium w Niemczech, Tito Maccio Plauto School we Włoszech, Hedegaards School w Danii, Brandengen

<sup>1)</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

<sup>2)</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Architektury

<sup>3)</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

<sup>4)</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Zarządzania

<sup>\*</sup> Correspondence address: mfedorczyk-cisak@pk.edu.pl

this project, the demonstration buildings (Solitude-Gymnasium in Germany, Tito Maccio Plauto School in Italy, Hedegaards School in Denmark, Brandengen School in Norway), because of a well-designed refurbishment concept of this project, the demonstration buildings Del Borghi et al [5] highlighted another aspect, namely the different methods of accounting for greenhouse gas emissions and their impact on the predicted effects. Mazoor et al [6] showed that in the Polish energy rating system for buildings, it is not possible to achieve the nZEB standard without the use of renewable energy. Istil et al [7] discussed various criteria for certifying the energy and environmental performance of buildings in the context of achieving climate neutrality.

Published research results present the achievable effects of modernization of larger groups of buildings, but only if these are newly designed buildings. Fedorczyk-Cisak et al. [8] presented, for example, an innovative method for designing energy self-sufficient groups of residential buildings with an emphasis on proactive user participation. The starting point was to maximise the energy efficiency of individual buildings and then to achieve a fully energy self-sufficient group of buildings. In this case, a Smart City solution was used, characterized by very low final energy demand and a potential greenhouse gas reduction of 96%.

However, there are no thermomodernization benchmarks for large groups of buildings with similar parameters, such as geometry, material solutions or construction time. Schools are an example of such groups of buildings. In Poland, a characteristic and quite numerous groups of buildings were schools erected in the years 1960s and 1970s as part of the campaign „Construction of Schools of Monuments to the Thousand-Year-Old Polish State”, implemented during the jubilee of the Millennium of the Polish State (1966). The list of these buildings includes 1423 schools [9].

In the schools of the millennium, the walls were most often erected of cement or concrete blocks. In addition, cellular concrete blocks were also used and, in some cases, especially in older school buildings, ceramic solid bricks. Required thermal transmittance values of the building envelope were very mild in the 1960s. (Figure 1), as the importance of energy efficiency in buildings and the resulting conservation was not yet realized environment [11].

To meet the thermal protection requirements of the time, the designed partitions usually did not require additional thermal insulation. Only in some cases additional insulation was used in the envelope, using ineffective materials that were available on the market at the time. The most common material used was low-density polyurethane foam, which had a number of disadvantages such as low durability and UV resistance, causing it to degrade quickly and lose its heat-insulating properties. Another insulation method used in the 1960s was to fill the cavity walls with glass wool or polystyrene boards. It was also not fully effective because the insulating materials were used in layers that were too thin, had much poorer thermal conductivity coefficients than modern insulating materials, and there were no construction solutions to prevent thermal bridges, etc.

School w Norwegii), w wyniku dobrze przygotowanej koncepcji ich modernizacji, zmniejszyły zużycie energii od 60% do ponad 80%, na co wpływ miały m.in. warunki klimatyczne lokalizacji budynków. Żaden z nich nie osiągnął jednak poziomu budynku o zerowej emisji, ponieważ brano pod uwagę efektywność kosztową.

Del Borghi i inni [5] zwrócili uwagę na inny aspekt, a mianowicie różne metody rozliczania emisji gazów cieplarnianych i ich wpływ na przewidywane efekty. Manzoor i inni [6] wykazali, że w polskim systemie oceny energetycznej budynków nie ma możliwości uzyskania standardu nZEB bez użycia odnawialnych źródeł energii. Istil i inni [7] dyskutowali różne kryteria certyfikacji efektywności energetycznej i środowiskowej budynków w kontekście osiągnięcia neutralności klimatycznej.

Opublikowane wyniki badań naukowych przedstawiają możliwe do osiągnięcia efekty modernizacji na przykładzie pojedynczych przypadków większych grup budynków, ale tylko w przypadku jeśli są to budynki nowo projektowane. Fedorczyk-Cisak i inni [8] przedstawili np. innowacyjną metodę projektowania energetycznie samowystarczalnych grup budynków mieszkalnych, kładącą nacisk na proaktywny udział użytkowników. Punktem wyjścia była maksymalizacja efektywności energetycznej poszczególnych budynków, a w dalszej kolejności osiągnięcie w pełni energetycznie samowystarczalnej grupy budynków. W tym przypadku zastosowano rozwiązanie Smart City, charakteryzujące się bardzo niskim końcowym zapotrzebowaniem na energię i potencjalną redukcją gazów cieplarnianych na poziomie 96%.

Nie ma jednak wzorców termomodernizacji dotyczących dużych grup budynków o podobnych parametrach, takich jak geometria, rozwiązania materiałowe czy czas budowy. Przykładem takich grup budynków są szkoły. W Polsce dość charakterystyczną i dość liczną grupą budynków były szkoły wzniesione w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX wieku w ramach akcji „Budowa Szkół Pomników Tysiąclecia Państwa Polskiego”, realizowanej w czasie jubileuszu Tysiąclecia Państwa Polskiego (1966). Lista tych szkół obejmuje 1423 szkoły [9].

W szkołach tysiąclecia ściany były najczęściej wznoszone z pustaków ceramicznych lub betonowych. Ponadto stosowano także bloczki z betonu komórkowego, a w niektórych przypadkach, szczególnie w budynkach szkół starszego typu, ceramiczne cegły pełne. Wymagane wartości współczynnika przenikania ciepła przegród tworzących zewnętrzną obudowę budynku były w latach sześćdziesiątych XX w. bardzo łagodne (rysunek 1), ponieważ nie zdawano sobie jeszcze sprawy, jak ważna jest efektywność energetyczna budynków i wynikająca z tego ochrona środowiska [11]. Aby spełnić ówczesne wymagania ochrony cieplnej, projektowane przegrody najczęściej nie wymagały dodatkowego docieplenia. Tylko w niektórych realizacjach stosowano w przegrodach dodatkowe warstwy termoizolacyjne, z nieefektywnych materiałów, które były wówczas dostępne na rynku. Najczęściej wykorzystywano piankę poliuretanową o małej gęstości, która miała wiele wad, takich jak niewielka trwałość i odporność na promieniowanie UV, co powodowało, że szybko degradowała się, tracąc właściwości termoizolacyjne. Inna metoda docieplania stosowana w latach sześćdziesiątych, to wypełnianie przestrzeni między ścianami dwuwarstwowo-

Figure 2 shows the thermal insulation requirements for windows in Poland over the years. In the 1960s and 1970s, there was no Polish regulations do not contain requirements for this parameter. They only appeared at the end of the 1990s. In buildings dating from the 1960s, windows usually had frames and sashes made of wood or steel, and to a lesser extent aluminum. Wooden composite windows were the most common and appeared under the name 'Swedish windows' as early as the early 1960s. The design of these windows consisted of combining summer and winter casements into a single component, joined together by screws. Typical joinery catalogues were created on the basis of these composite windows, i.e. lists of dimensional standards for certain repeatable window types. This made it possible to intensify production, facilitated planning and helped to standardize the production of timber windows. In most school buildings, composite windows were replaced with single frame (wooden or PVC), double-glazed windows with an average heat transfer coefficient of 1.1–1.2 [W/m<sup>2</sup>·K] as part of renovation and thermomodernization work.

The article analyses a typical building of a „thousand-year school” located in south-eastern Poland in the town of Skawina near Kraków. The analysis focused on measures to achieve climate neutrality in the selected school. The research question posed by the authors is: can such schools achieve the “near-zero energy building” standard? Does this group have a chance to achieve climate neutrality? In addition, we have

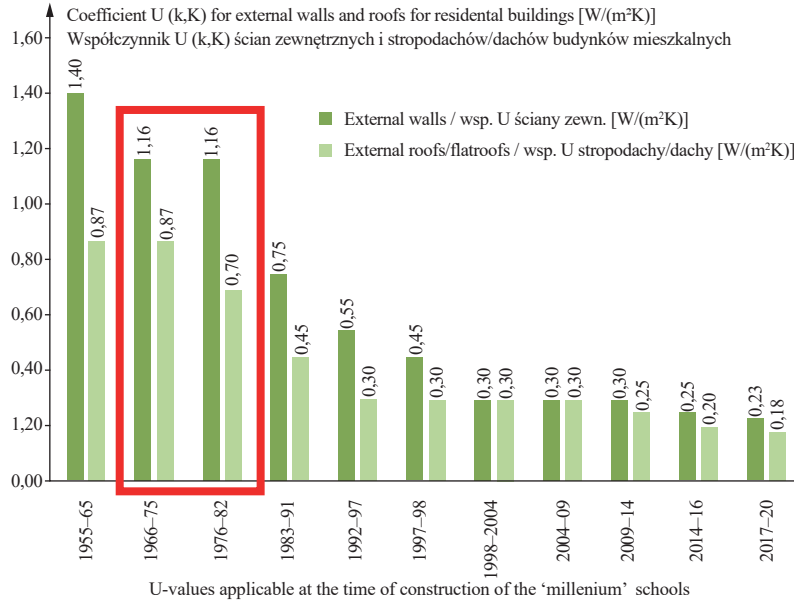


Fig. 1. Change of thermal protection regulations concerning external walls and roofs/ceilings in Poland since 1955. The red frame indicates regulations in force at the time of erection of “thousand-year” schools [10] Own source

Rys. 1. Zmiana przepisów ochrony cieplnej dotycząca ścian zewnętrznych i dachów/stropodachów w Polsce od 1955 r. Czerwoną ramką oznaczono przepisy obowiązujące w czasie wznieszenia szkół „tysiąclecie” [10] Źródło własne

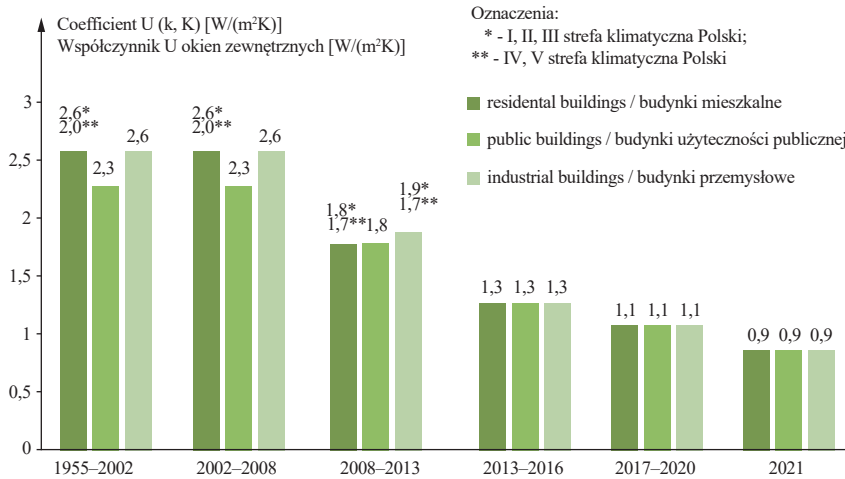


Fig. 2. Change in window thermal protection regulations in Poland since 1997 Own source

Rys. 2. Zmiana przepisów ochrony cieplnej okien w Polsce od 1997 r. Źródło własne

mi watą szklaną lub płytami styropianowymi. Nie była ona również w pełni skuteczna, ponieważ materiały termoizolacyjne stosowano w zbyt cienkich warstwach, miały one znacznie gorsze współczynniki przewodzenia ciepła niż współczesne materiały termoizolacyjne, nie stosowano rozwiązań budowlanych zapobiegających powstawaniu mostków termicznych itd.

Na rysunku 2 przedstawiono wymagania dotyczące izolacyjności cieplnej okien kształtujące się w Polsce na przestrzeni lat. W latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX w. nie było w polskich przepisach wymagań dotyczących tego parametru. Pojawiły się dopiero pod koniec lat dziewięćdziesiątych. W budynkach z lat sześćdziesiątych okna najczęściej miały ramy ościeżnic i skrzydeł wykonane z drewna lub stali, a w mniejszym stopniu z aluminium. Najczęściej stosowa-

no drewniane okna zespolone, które pojawiły się pod nazwą „okien szwedzkich” już w początkach lat sześćdziesiątych XX w. Konstrukcja tych okien polegała na zestawieniu skrzydła letniego i zimowego w jeden element, łączony ze sobą za pomocą śrub. Na podstawie okien zespolonych utworzono tzw. *Katalogi stolarki typowej*, czyli zestawienia normatywów wymiarowych określonych powtarzalnych typów okien. Takie rozwiązanie umożliwiało intensyfikację produkcji, ułatwiało projektowanie i pomogło w ujednoczeniu produkcji okien drewnianych. W większości budynków szkolnych, w ramach remontów i termomodernizacji, okna zespolone zostały wymienione na okna jednoramowe (drewniane lub z PVC), o średniej

proposed an innovative approach to the design of thermal modernization measures at the school. These are in addition to measures related to the use of blue-green infrastructure elements and ensuring usable comfort and accessibility in the school neighborhood for people with special needs, the elderly and the disabled.

### Methodology for achieving climate neutrality of public buildings on the example of schools

Climate neutrality is a concept that was introduced recently. It refers to measures aimed at reducing the environmental impact of energy-intensive sectors. An indicator that illustrates climate neutrality is the carbon footprint indicator. The carbon footprint is defined as the total sum of greenhouse gas emissions caused directly or indirectly by a given person, organization, event, product or building.

It is a type of ecological footprint. The carbon footprint includes emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide and other greenhouse gases expressed in CO<sub>2</sub> equivalents. In order to consider a climate-neutral building, it is necessary to consider the so-called building neutrality balancing. Once the CO<sub>2</sub> emissions have been determined, it is first necessary to consider the possibility of reducing the energy consumption of the building, and then to use credits to „balance” such emission. This can be done by purchasing credits, for example on the websites of international or national organizations [12].

In developing a methodology for the school building to achieve climate neutrality (Figure 3), the authors considered not only a group of mandatory criteria (1 and 2), but also additional criteria (3 and 4), which relate to ensuring the comfort of use and the accessibility of the school building for people with special needs.

**Criterion 1 (mandatory) – achieving the Nearly Zero Energy Building (nZEB) standard.** This standard is regulated by the technical and building regulations in force in each EU country. Buildings to achieve nZEB standard in Poland, defined as buildings meeting the thermal protection requirements for new buildings from 31 December 2020 [13], must meet two criteria. The first concerns the thermal transmittance coefficient of the building envelope, which must be equal to or lower than those given in Table 1. The second parameter is the annual non-renewable primary energy demand factor EP [kWh/(m<sup>2</sup>·year),] which is calculated for heating, ventilation and hot water, cooling and lighting. The maximum permissible value of this indicator depends on the function of the building [14] and may not be higher than the values given in Table 2.

Not all requirements for nZEB are the same for newly designed buildings and buildings undergoing thermomodernization. Table 3 shows the parameters that must be achieved by new and thermally modernized buildings, as well as buildings under conservation protection.

Table 3 shows that facilities undergoing deep thermomodernization, as in the case of the school analyzed, in order to achieve the nZEB standard, must achieve the required thermal quality level for the external envelope elements at the level

wartości współczynnika przenikania ciepła 1,1–1,2 [W/m<sup>2</sup>K], szklone jednokomorowymi zestawami szklanymi.

W artykule została przeprowadzona analiza typowego budynku szkoły „tysiąclatki” zlokalizowanej w południowo-wschodniej Polsce w miejscowości Skawina k. Krakowa. Analiza dotyczyła działań, które pozwolą na uzyskanie neutralności klimatycznej wybranej szkoły. Pytanie badawcze, jakie analizują autorzy, to czy takie szkoły mogą osiągnąć poziom budynku o niemal zerowym zużyciu energii? Czy ta grupa ma szansę osiągnąć neutralność klimatyczną? Dodatkowo zaproponowaliśmy innowacyjne podejście do projektowania działań termomodernizacyjnych w szkole. Są to dodatkowe działania związane z wykorzystaniem elementów błękitno-zielonej infrastruktury i zapewnieniem komfortu użytkowego oraz dostępności w przypadku osób o szczególnych potrzebach, osób starszych i osób z niepełnosprawnościami.

### Metodologia osiągnięcia neutralności klimatycznej budynków użyteczności publicznej na przykładzie szkół

Neutralność klimatyczna jest pojęciem wprowadzonym niedawno. Oznacza działania, zmierzające do ograniczenia wpływu sektorów o dużej energochłonności na środowisko naturalne. Wskaźnikiem, który obrazuje neutralność klimatyczną, jest wskaźnik śladu węglowego. Ślad węglowy określony jest przez całkowitą sumę emisji gazów cieplarnianych wywołanych bezpośrednio lub pośrednio przez daną osobę, organizację, wydarzenie, produkt lub budynek. Jest to rodzaj śladu ekologicznego. Ślad węglowy obejmuje emisję dwutlenku węgla, metanu, podtlenku azotu i innych gazów szklarniowych wyrażone w ekwiwalencie CO<sub>2</sub>. Aby rozpatrywać budynek neutralny klimatycznie, należy rozpatrzyć tzw. bilansowanie neutralności budynku. Po określeniu wielkości emisji CO<sub>2</sub> najpierw należy rozważyć możliwość zmniejszenia energochłonności obiektu, a następnie skorzystać z kredytów, które pozwolą na „zbilansowanie” takiej emisji. Można to wykonać, wykupując kredyty na przykład na stronach organizacji międzynarodowych lub krajowych [12].

Opracowując metodologię osiągnięcia przez budynek szkoły neutralności klimatycznej (rysunek 3), autorzy wzięli pod uwagę poza grupą kryteriów obligatoryjnych (1 i 2) również kryteria dodatkowe (3 i 4), które dotyczą zapewnienia komfortu użytkowania oraz dostępności dla osób o szczególnych potrzebach.

**Kryterium 1 (obligatoryjne) – osiągnięcie standardu budynku o niemal zerowym zapotrzebowaniu na energię (nZEB).** Standard ten jest regulowany przez przepisy techniczno-budowlane obowiązujące w każdym z krajów Unii Europejskiej. Budynki, aby osiągnąć standard nZEB w Polsce, zdefiniowane jako budynki spełniające wymagania ochrony cieplnej stawiane budynkom nowym od 31 grudnia 2020 r. [13], muszą spełnić dwa kryteria. Pierwsze dotyczy wartości współczynnika przenikania ciepła przegród budynków, które muszą być równe lub mniejsze niż podane w tabeli 1.

Drugi parametr to wskaźnik rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną EP [kWh/(m<sup>2</sup>·rok)], który obli-

shown in Table 1. Polish regulations exempt thermomodernized buildings from the necessity to achieve the EP-index requirements.

This article analyses the methods that can be used to achieve the required level of the EP indicator, in accordance with the nZEB standard, in thermally modernized school buildings. The energy calculation method is based on the Polish certification methodology [15], and the detailed input data for the calculations are given in the study on which the article is based [16].

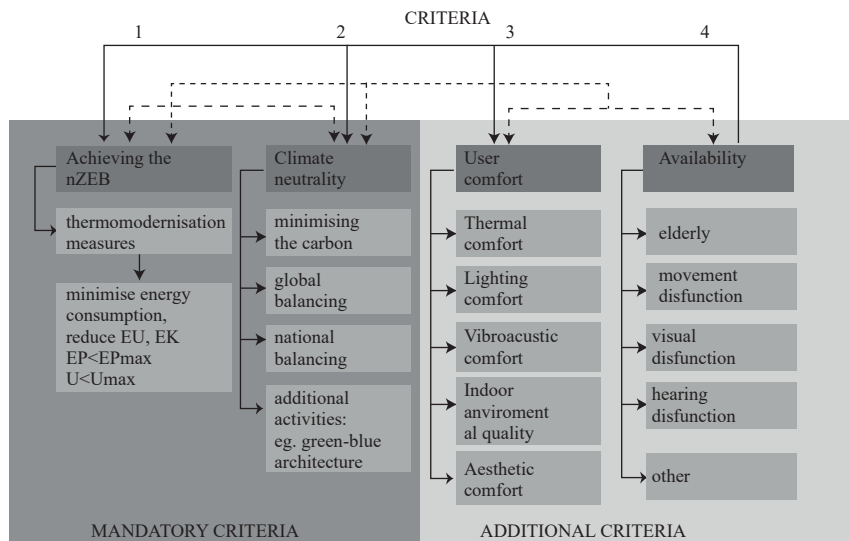
**Criterion 2 (mandatory) – achieving a climate-neutral building standard.**

An amendment to the Energy Performance of Buildings Directive [17] was introduced in April 2024, according to which:

- by 2030, all new buildings should be zero-emission
- existing buildings should be converted into climate-neutral buildings by 2050.

It was recognized that only a reduction in emissions, through greater energy efficiency or less energy consumption and the use of RES, would achieve climate neutrality by 2050 [17].

To achieve climate neutrality, the building must be designed to the latest energy efficiency standards, using advanced technologies and modern building materials, and should therefore have very good thermal insulation, appropriate windows, mechanical ventilation with heat recovery, and renewable energy systems such as photovoltaic panels and solar panels. A climate-neutral building should also be equipped with energy management systems that make it possible to optimise energy use and to control the energy consumption of individual devices and systems. Reducing emissions in a building under a given deep thermomodernisation or achieving zero emission should be adapted to the possibilities of the building. The analysis presented in the article concerns a school building built in the 1960s in south-eastern Poland. The zero-emission analysis was carried out taking into account the methodology according to EN 15978 [18].



**Fig. 3. Criteria adopted by the authors in the method for achieving climate neutrality by an example school building**  
*Rys. 3. Kryteria przyjęte przez autorów w metodzie dotyczącej osiągnięcia neutralności klimatycznej przez przykładowy budynek szkoły*  
*Own source*  
*Źródło własne*

**Table 1. Maximum coefficients of thermal insulation of the building envelope of a building for a standard nZEB [14]**  
*Tabela 1. Maksymalne współczynniki izolacyjności cieplnej przegród zewnętrznych budynku w przypadku standardu nZEB [14]*

Building envelope element / Element obudowy	Required U-value U [W/(m²K)] / Współczynnik przenikania ciepła
External wall / Ściana zewnętrzna	0,20
Roof/ceiling / Dach/stropodach	0,15
Floor on the ground / Podłoga na gruncie	0,30
Windows / Okna	0,90
Doors / Drzwi	1,30

standard nZEB, muszą osiągnąć wymagany poziom izolacyjności cieplnej w przypadku elementów obudowy zewnętrznej na poziomie przedstawionym w tabeli 1. Przepisy polskie zwalniają budynki termomodernizowane z konieczności osiągnięcia wymagań dotyczących wskaźnika EP.

W artykule przeprowadziliśmy analizę, jakimi metodami można osiągnąć poziom wskaźnika EP, jak w standardzie nZEB, w termomodernizowanych budynkach szkół. Metoda obliczeń energetycznych bazuje na polskiej metodologii świadectw [15], a szczegółowe dane wejściowe przyjęte do obliczeń podano w opracowaniu, na podstawie którego powstał artykuł [16].

**Kryterium 2 (obligatoryjne) – osiągnięcie standardu budynku neutralnego klimatycznie.** W kwietniu 2024 r. wprowadzono zmianę dyrektywy o charakterystyce energetycznej budynków [17], zgodnie z którą:

- do 2030 r. wszystkie nowe budynki powinny być zero-emisyjne
- do 2050 r. istniejące budynki powinny zostać przekształcone w budynki neutralne klimatycznie.

Uznano, że tylko zmniejszenie emisji, dzięki większej efektywności energetycznej lub mniejszemu zużyciu energii i zastoso-

wa się w przypadku ogrzewania, wentylacji i ciepłej wody użytkowej, chłodzenia oraz oświetlenia. Maksymalna dopuszczalna wartość tego wskaźnika zależy od funkcji budynku [14] i nie może być wyższa od wartości podanych w tabeli 2.

Nie wszystkie wymagania dla standardu nZEB są takie same w przypadku budynków nowo projektowanych i budynków poddanych termomodernizacji. Tabela 3 przedstawia parametry, które muszą osiągnąć budynki nowe i poddawane termomodernizacji, a także budynki zabytkowe.

Z tabeli 3 wynika, że obiekty poddawane głębokiej termomodernizacji, jak w przypadku szkoły analizowanej w artykule, aby osiągnąć

The emissivity parameter is the so-called carbon footprint, which is calculated over the life cycle of a building and divided into an embedded carbon footprint and an operational carbon footprint. The embedded carbon footprint is the sum of greenhouse gas emissions that occur during material flow operations in the life cycle of a building. It is the carbon footprint in the product phase A1–A3; the construction process phase A4–A5; the use phase B1–B5 and the end-of-life phase C1–C4. This is not a rigid definition. In the industry circulation, one can also come across a definition that only covers modules A1–A5.

Table 4 presents the life cycle modules that should be considered in the analysis of the climate neutrality of buildings.

A major problem in reliable calculations is the lack of available data for many products. The easiest to estimate is the operational carbon footprint directly related to the use phase of the building.

The article is limited to module B5, which presents emissions related to the product and transport phase of renovation, and module B6 of the operational carbon footprint related to energy consumption during use. Emission factors for the production of materials are derived from the EPDs of products originating mainly from Poland, and if this was not possible – from European countries.

Transport benchmarks were adopted from data published by DEFRA. Due to the lack of publicly available emission factors and national guidelines, the share of emissions related to physical construction (refurbishment) work, such as travel of manual workers to the project site, and the use of energy and fuels for construction work, was omitted.

Due to a lack of data, the work and materials associated with the modernization of the lighting and ventilation systems were not analyzed. The operational carbon footprint of energy consumption during use was based on an energy analysis of the existing state and the state after the proposed thermomoderni-

**Table 2. Maximum EP values for the nZEB standard**

Tabela 2. Maksymalne wartości wskaźnika EP w przypadku standardu nZEB

Type of buildings / Rodzaj budynku	EP <sub>H+W</sub>	ΔEP <sub>C</sub>	ΔEP <sub>L</sub>
[kWh/(m <sup>2</sup> ·year)] / [kWh/(m <sup>2</sup> ·rok)]			
Single-family residential building / Budynek mieszkalny jednorodzinny	70	ΔEP <sub>C</sub> = 5 · A <sub>fC</sub> /A <sub>f</sub>	0
Multi-family residential building / Budynek mieszkalny wielorodzinny	65		
Public utility building – healthcare / Budynek użyteczności publicznej – opieki zdrowotnej	190	ΔEP <sub>C</sub> = 25 · A <sub>fC</sub> /A <sub>f</sub>	dla t <sub>0</sub> < 2500 ΔEP <sub>L</sub> = 25
Other public buildings / Pozostałe budynki użyteczności publicznej	45		dla t <sub>0</sub> ≥ 2500 ΔEP <sub>L</sub> = 50
Storage buildings / Budynki magazynowe	70		

A<sub>fC</sub> – cooled area / powierzchnia chłodzona, A<sub>f</sub> – usable heated area / powierzchnia pomieszczeń o regulowanej temperaturze powietrza, t<sub>0</sub> – number of hours when using artificial light per year / ilość godzin użytkowania oświetlenia sztucznego w ciągu roku

**Table 3. Parameters that buildings must meet from 2021 in Poland**

Tabela 3. Parametry, które muszą spełnić budynki w Polsce od 2021 r.

Building / Budynek	U-value / Współczynnik U [W/m <sup>2</sup> K]	EP indicator Wskaźnik EP [kWh/(m <sup>2</sup> ·rok)]
Newly designed / Nowo projektowany	mandatory / obowiązkowo	mandatory / obowiązkowo
Existing, thoroughly thermomodernized / Istniejący, poddany gruntownej termomodernizacji	mandatory / obowiązkowo	not required / niewymagany
Historic, under conservation care / Zabytkowy, pod opieką konserwatora	not required / niewymagany	not required / niewymagany

zwalają na optymalne jej wykorzystanie, a także na kontrolowanie zużycia energii przez poszczególne urządzenia i systemy.

Zmniejszeniu emisji w budynku poddanym głębokiej termomodernizacji lub osiągnięciu poziomu zerowej emisji należy dostosować do możliwości obiektu. Analiza przedstawiona w artykule dotyczy budynku szkoły wybudowanej w latach sześćdziesiątych XX w. w południowo-wschodniej Polsce. Analiza „zerowej emisji” została wykonana z uwzględnieniem metodologii wg normy EN 15978 [18]. Parametrem określającym poziom emisyjności jest tzw. ślad węglowy, który oblicza się w cyklu życia obiektu i dzieli na ślad węglowy wbudowany i ślad węglowy operacyjny. Wbudowany ślad węglowy to suma emisji gazów cieplarnianych, które pojawiają się w trakcie operacji związanych z przepływami materiałów w cyklu życia budynku. Jest to ślad węglowy w fazie: wyrobu A1–A3; procesu budowlanego A4–A5; użytkowania B1–B5 oraz w fazie końca życia C1–C4. Nie jest to sztywna definicja. W obiegu branżowym można się spotkać również z definicją, która obejmuje jedynie moduły A1–A5. W tabeli 4 przedstawiono moduły cyklu życia, które powinny być uwzględnione w analizie neutralności klimatycznej budynków. Dużym problemem w rzetelnych obliczeniach jest brak dostępnych danych w przypadku wielu produktów. Najłatwiej oszacować operacyjny ślad węglowy bezpośrednio związany z fazą użytkowania budynku.

waniu OZE, pozwoli osiągnąć neutralność klimatyczną do 2050 r. [17]. Aby osiągnąć neutralność klimatyczną, budynek musi być zaprojektowany zgodnie z najnowszymi standardami energooszczędności, z wykorzystaniem zaawansowanych technologii i nowoczesnych materiałów budowlanych, a więc powinien mieć bardzo dobrą izolację termiczną, odpowiednie okna, wentylację mechaniczną z odzyskiem ciepła, a także systemy pozyskiwania energii z odnawialnych źródeł, takie jak panele fotowoltaiczne czy kolektory słoneczne. Budynek neutralny klimatycznie należy także wyposażać w systemy zarządzania energią, które po-

**Table 4. Life cycle phases of a building**  
*Tabela 4. Fazy cyklu życia obiektu budowlanego*

Product phase / Faza wyrobu			Process constr. / Faza procesu budowlanego		Use phase / Faza użytkowania					End of life phase / Faza końca życia				Benefits beyond the life cycle / Korzyści poza cyklem życia				
A1 Extraction and supply of raw materials / A1 Wydobycie i dostawa surowców	A2 Transport / A2 Transport	A3 Product manufacturing / A3 Produkcja wyrobu	A4 Transport / A4 Transport	A5 Construction process / A5 Proces budowy	B1 Use / B1 Użytkowanie	B2 Maintenance / B2 Konserwacja	B3 Repair / B3 Naprawa	B4 Replacement / B4 Wymiana	B5 Renovation / B5 Renowacja	B6 Energy consumption / B6 Zużycie energii	B7 Water consumption / B7 Zużycie wody	C1 Demolition/demolition / C1 Rozbiórka/wyburzenie	C2 Transport for disposal / C2 Transport do utylizacji	C3 Recycling / C3 Recykling	C4 Disposal / C4 Utylizacja	D1 Re-use / D1 Ponowne wykorzystanie	D2 Recovery / D2 Odzysk	D3 Recycling / D3 Recykling
									X	X								
Built-in carbon footprint / Wbudowany ślad węglowy										Operational carbon footprint / Operacyjny ślad węglowy		Built-in carbon footprint / Wbudowany ślad węglowy						

zation of the building. Thermomodernization measures primarily reduce the operational (in-use) carbon footprint. Reducing the carbon footprint to zero is impossible. If a self-sufficient or energy-plus building is achieved through thermal modernization measures, the embedded carbon footprint, contained in the material, remains

A climate-neutral building should be considered in terms of what is known as building neutrality balancing. Once the CO<sub>2</sub> emissions have been determined, the possibility to reduce the energy consumption of the building should first be considered and then credits should be used to „balance” these emissions. This can be done by taking out credits from international or national organizations that finance tree planting, the purchase of trees that contribute to reducing the carbon footprint.

We suggest that the striving for a climate-neutral building standard should be combined with additional measures that have an impact on the health and self-esteem of the users. Such measures may include green solutions around the building or inside, e.g. green walls, green roofs, water management measures, e.g. water retention, grey water utilization, rainwater utilization.

**Criterion 3 and 4 (additional) – comfort of use of the buildings and accessibility for people with special requirements.** Comfort of use of the facilities is of paramount importance for users. It should not be overlooked when predicting the effects of thermomodernization measures.

In the case of existing buildings, it is extremely difficult to analyze occupant comfort with specialized simulation programs, as it would be very labor-intensive to gather accurate data on actual usage profiles and repeatability. Surveys or interviews could be a method of collecting such data, but feelings of comfort are very subjective and depend on many individual

W artykule ograniczono się do modułu B5, w ramach którego wykazano emisje związane z fazą wyrobów oraz transportem z fazy procesu budowlanego dotyczącego renowacji oraz modułu B6 operacyjnego śladu węglowego dotyczącego zużycia energii w trakcie użytkowania. Wskaźniki emisyjności produkcji materiałów pochodzą z kart EPD wyrobów przede wszystkim z Polski, a jeżeli nie było takiej możliwości – z krajów europejskich. Wskaźniki emisyjności dotyczące transportu zostały przyjęte na podstawie danych opublikowanych przez DEFRA. Ze względu na brak ogólnodostępnych wskaźników emisyjności oraz wytycznych krajowych pominięto udział emisji związany z realizacją fizycznych prac budowlanych (modernizacyjnych), takich jak dojazdy pracowników fizycznych na teren inwestycji, czy wykorzystaniem energii i paliw na potrzeby prac budowlanych. Ze względu na brak danych nie poddano analizie prac oraz materiałów związanych z modernizacją instalacji oświetlenia i wentylacji. Operacyjny ślad węglowy dotyczący zużycia energii w trakcie użytkowania przyjęto na podstawie analizy energetycznej stanu istniejącego oraz stanu po proponowanej termomodernizacji budynku. Działania termomodernizacyjne obniżają przede wszystkim operacyjny ślad węglowy (w trakcie użytkowania). Zmniejszenie śladu węglowego do zera jest niemożliwe. W przypadku jeśli przez działania termomodernizacyjne osiągniemy budynek samowystarczalny lub plus energetyczny, to pozostaje ślad węglowy wbudowany, zawarty w materiałach i instalacjach, z których wykonany jest obiekt. Budynek neutralny klimatycznie powinien być rozpatrywany pod względem tzw. bilansowania neutralności budynku. Po określeniu wielkości emisji CO<sub>2</sub> należy najpierw rozważyć możliwość zmniejszenia energochłonności obiektu, a następnie skorzystać z kredytów, które pozwolą na „zbilansowanie” takiej emisji. Można to wykonać, wykupując kredyty na stronach

factors such as the age, health and gender of users. This aspect was treated as a supplementary measure to point out that thermal modernization work carried out in existing buildings should result in an improvement in occupant comfort afterwards. This condition can be determined by in-situ studies after thermomodernization measures have been carried out to confirm that the design objectives have been achieved [19].

Accessibility for people with special needs, also known as universal access or accessibility for all, is an approach to the design and construction of buildings, infrastructure and the environment that ensures that they can be used by people with different needs and abilities. It applies to people with a range of disabilities, including those with mobility, hearing, visual, intellectual or sensory limitations. Everyone should have equal access to public spaces, buildings and services in order to enjoy full civic rights and to participate in social, professional and cultural life.

In order to ensure accessibility for people with special needs, their needs must be taken into account already during the design and planning of buildings and infrastructure, but also, as in this case, in the planning of modernization measures for existing facilities. Appropriate solutions such as lifts, wheelchair ramps, appropriate signage, good lighting and assistive systems must be incorporated into the design. It is also important to design internal spaces so that they are accessible to people in wheelchairs, with walking poles or guide dogs. Many countries have introduced laws and regulations that impose accessibility requirements for people with special needs on newly designed or refurbished buildings and infrastructure to ensure equal opportunities and full inclusion of all citizens.

The accessibility of buildings for people with disabilities covers many aspects, such as:

- the entrance to the building should be barrier-free, compliant with accessibility standards and regulations;
- if the building has more than one floor, it should be equipped with a lift or ramp that enables people with disabilities to move freely around the building;
- buildings should have accessible bathrooms with grab rails and special facilities for wheelchair users, etc.;
- the door should be wide enough;
- handles and grips should be positioned at a height that allows easy access for people with disabilities;
- there should be adequate lighting in buildings to make it easier for people with disabilities to move around;
- buildings should be equipped with a public address system that enables people with hearing difficulties to communicate.

### Climate-neutral building with accessibility elements using a selected millennium school as an example

The building of the millennium school is located in Skawina near Krakow. Photograph 1 shows the location of the building of the analyzed school. The main (oldest) part is a two-storey building with a partial basement, dating from the 1960s (created as an adaptation of a typical project). It was built on a rectangular plan with a split in the northern part and is covered

organizacji międzynarodowych lub krajowych, które finansują nasadzenie drzew, przyczyniających się do zmniejszenia śladu węglowego.

Proponujemy, aby dążenie do standardu budynku neutralnego klimatycznie powiązane było z dodatkowymi działaniami mającymi wpływ na zdrowie i samopoczucie użytkowników. Do takich działań można zaliczyć: rozwiązania zieleni wokół budynku lub wewnątrz, np. zielone ściany, zielone stropodachy, działania związane z zagospodarowaniem wody, np. retencja wody, wykorzystanie wody szarej, wykorzystanie wody deszczowej.

**Kryterium 3 i 4 (dodatkowe) – komfort użytkowania budynków oraz dostępność dla osób o szczególnych wymaganiach.** Komfort użytkowania obiektów jest sprawą nadrzędną dla użytkowników. Nie należy go pomijać przy przewidywaniu skutków działań termomodernizacyjnych. W przypadku budynków istniejących niezmiernie trudno jest przeprowadzić analizę komfortu użytkowania w specjalistycznych programach symulacyjnych, gdyż zebranie dokładnych danych dotyczących rzeczywistych profili użytkowania i ich powtarzalność byłyby bardzo pracochłonne. Metodą zebrania takich danych mogłyby być ankiety lub wywiady, ale odczucia komfortu są bardzo subiektywne i zależą od wielu indywidualnych czynników, takich jak wiek, kondycja zdrowotna czy płeć użytkowników. Potraktowano ten aspekt jako działanie dodatkowe, by zwrócić uwagę, że prace termomodernizacyjne przeprowadzane w istniejących obiektach powinny przynieść poprawę komfortu użytkowania po ich wykonaniu. Stan ten można określić na drodze badań in situ po przeprowadzonych działaniach termomodernizacyjnych, aby potwierdzić osiągnięcie założeń projektowych [19].

Dostępność dla osób o szczególnych wymaganiach, zwana też dostępnością uniwersalną lub dostępnością dla wszystkich, to podejście do projektowania i wznoszenia budynków, infrastruktury oraz środowiska, które zapewnia możliwość korzystania z nich przez osoby o różnych potrzebach i umiejętnościach. Dotyczy ona osób z różnymi rodzajami niepełnosprawności, w tym z ograniczeniami ruchowymi, słuchowymi, wzrokowymi, intelektualnymi czy sensorycznymi. Wszyscy powinni mieć równy dostęp do przestrzeni publicznej, budynków i usług, aby móc cieszyć się pełnymi prawami obywatelskimi, a także uczestniczyć w życiu społecznym, zawodowym i kulturalnym.

Aby zapewnić dostępność dla osób o szczególnych wymaganiach, należy uwzględnić ich potrzeby już na etapie projektowania i planowania budynków oraz infrastruktury, ale również, jak w analizowanym przypadku, w planowaniu działań związanych z modernizacją obiektów istniejących. W projekcie należy zastosować odpowiednie rozwiązania, takie jak windy, podjazdy dla wózków inwalidzkich, odpowiednie oznakowanie, dobre oświetlenie czy systemy asystujące. Ważne jest także odpowiednie projektowanie przestrzeni wewnętrznej, aby była ona dostępna dla osób na wózkach inwalidzkich, z kijkami bądź z psami przewodnikami. Wiele krajów wprowadziło przepisy i regulacje, które nakładają wymagania dotyczące dostępności dla osób o szczególnych wymaganiach na nowo projektowane lub modernizowane



with a hipped roof. In 2011, this part was extended with the addition of the headmaster's office and an emergency staircase, and classrooms were added. An overhang was added above the building's main entrance. In 2009, a single-storey sports complex was built on the south-east side, with sanitary and storage facilities, a partial basement and a link to the extended school recreation area (Photo 2). In the basement, in the area of the north-east corner of the building, there is a gas boiler room. The basic details of the school building are as follows.

- usable area: 2 363.69 m<sup>2</sup>
- volume: 11 871.4 m<sup>3</sup>
- built-up area: 1 636.37 m<sup>2</sup>
- Building construction:

#### Building construction:

- main part (south-western part) from the 1960s. The walls of the basement are made of 38 cm and 25 cm thick solid bricks, and the walls of the above-ground storey are 51 cm thick; monolithic reinforced concrete ceilings over the basement, and DZ-3 ribbed ceilings over the ground floor and first floor; prefabricated reinforced concrete roof structure with a slope of 5%, covered with thermally welded membrane; the walls were insulated with 14 cm thick Styrofoam, and the ceiling over the top storey with approx. 10 cm thick Styrofoam; the windows were replaced with new double-glazed PVC windows;

- south-east part (sports complex): 30 cm thick reinforced concrete external basement walls with polystyrene foam insulation. 9 cm thick; external walls of the ground floor made of 36 cm thick cellular concrete blocks and 24 cm above the 3.05 m level;

- extension and superstructure of the south-western part (school building) in a traditional construction, external walls of the staircase based on a reinforced concrete frame, made of 19 cm thick MAX ceramic hollow brick, insulated with 12 mm thick polystyrene with a thin-coat plaster on a system grid.

The heat transfer coefficients (U-value) are summarized in Figure 4.

**Installation solutions.** The building's central heating system is water-based, with parameters of 80/60°C, supplied by a gas boiler: 163 kW (installed in 1992). It is equipped with cast iron sectional radiators with valves and thermostatic heads (the entire school is missing 6 thermostatic valves) and panel radiators with valves (in the extension part of the school). The hot water is prepared in electric boilers (4 pcs.: 2 with power 1200W and 2 with power 1500W) and in electric instant water heaters (3 pcs.: 2 with power 1500 W and 2 with power 1200W).

In the gymnasium complex: the heating system is connected to the heating boiler in the school building (separate additional 80 kW Viessmann boiler from 2006, with control, operating with hot water priority – VitoCell hot water heater with a capacity of 300 l). The radiators are steel panel radiators with thermostatic valves and heads. The roofs and ceilings of the school building in Skawina exceeded the requirements

budynki i infrastrukturę, aby zapewnić równość szans i pełną integrację wszystkich obywateli.

Dostępność budynków dla osób niepełnosprawnych obejmuje wiele aspektów, takich jak:

- wejście do budynku powinno być bez barier, zgodne z normami i przepisami dotyczącymi dostępności;
- jeśli budynek ma więcej niż jedno piętro, powinien być wyposażony w windę lub podjazd, które umożliwiają osobom z niepełnosprawnościami swobodne poruszanie się po budynku;
- w budynkach powinny być dostępne łazienki wyposażone w uchwyty i specjalne udogodnienia dla osób na wózkach itp.;
- drzwi powinny być wystarczająco szerokie;
- klamki i uchwyty powinny być umieszczone na wysokości umożliwiającej łatwy dostęp dla osób z niepełnosprawnościami.
- w budynkach powinno być odpowiednie oświetlenie ułatwiające poruszanie się osobom z niepełnosprawnościami;
- budynki powinny być wyposażone w system nagłośnienia, który umożliwia komunikację osobom mającym problem ze słuchem.

## Budynek neutralny dla klimatu z elementami dostępności na przykładzie wybranej szkoły tysiąclecia

**Budynek szkoły** tysiąclecia zlokalizowany jest w miejscowości Skawina pod Krakowem. Na fotografii 1 zobrazowano lokalizację budynku analizowanej szkoły. Część główna (najstarsza) jest budynkiem dwukondygnacyjnym, częściowo podpiwniczonym, pochodzącym z lat sześćdziesiątych XX wieku (powstał jako adaptacja projektu typowego). Budynek został wzniesiony na planie prostokąta rozczłonkowanego w północnej części i jest kryty dachem czterospadowym. W 2011 r. część tę rozbudowano o gabinet dyrektora i schody ewakuacyjne oraz nadbudowano sale dydaktyczne. Nad wejściem głównym budynku wykonano nadwieszenie. W 2009 r. powstał od strony południowo-wschodniej jednokondygnacyjny zespół sportowy, z zapleczem sanitarnym i magazynowym, częściowo podpiwniczony, z łącznikiem o funkcji rozbudowanej rekreacji szkoły (fotografia 2). W piwnicy, w rejonie północno-wschodniego narożnika budynku, znajduje się kotłownia gazowa. Podstawowe dane obiektu szkoły są następujące.

- powierzchnia użytkowa: 2 363,69 m<sup>2</sup>
- kubatura: 11 871,4 m<sup>3</sup>
- powierzchnia zabudowy: 1 636,37 m<sup>2</sup>

#### Konstrukcja budynku:

- część główna (południowo-zachodnia) z lat sześćdziesiątych XX w.: ściany piwnic murowane z cegły pełnej grubości 38 cm i 25 cm, a nadziemna 51 cm; stropy nad piwnicami żelbetowe monolityczne, nad parterem i piętrem gęstożebrowe DZ-3, konstrukcja dachu żelbetowa prefabrykowana o nachyleniu 5%, pokrycie z papy termoizolacyjnej; ściany zostały docieplone



Photo 1. Location of the school

(Source: Google maps)

Fot. 1. Lokalizacja szkoły

(Źródło: Google maps)

of WT2021 [14] by 31–146%, the walls of the above-ground construction by 3–77.5%, the windows by 122%, the external doors by 16.3%, and the floors on the ground (except the Gymnasium) and in the basement by 6–21%. It was therefore possible to improve the energy efficiency of the building by reducing heat loss through the building envelope.

The following modernization variants were adopted to analyze the improvement of the energy efficiency of the school building:

- W0 – basic – existing state;
- W1 – viable option for energy efficiency improvement (insulation of external walls, roof/roof, replacement of windows and doors to nZEB standard, replacement of lighting with LEDs, application of mechanical ventilation supply and exhaust with heat recovery, use of building automation, replacement of heat source (gas boiler);
- W2 – all thermomodernization works as in option W1 plus replacement of the gas boiler with a biomass boiler;
- W3 – all thermomodernization work as in option W1 plus replacement of the gas boiler with a heat pump powered by the electricity grid;
- W4 – all thermomodernization works as in option W1, replacement of gas boiler with heat pump powered by photovoltaic panels.

A critical analysis of the results of attempts to achieve a near-zero energy building (nZEB) standard. Figure 5 shows the calculated values [16] of the annual energy demand indicator for heating (EUH), which indicates the quality of the building shell, the annual final energy demand indicator, which determines the heating cost and CO<sub>2</sub> emissions, and the non-renewable primary energy (EP) demand indicator of the analyzed

variants. The value of the usable energy demand indicator for heating and ventilation  $EU_H = 75.4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$  of the building before thermomodernization (variant W0) indicates to the average thermal quality of its shell.

As a result of the proposed measures to improve the thermal quality of the building shell, the value of the usable energy requirement for heating and ventilation EUH was reduced to  $17.3 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$ . In other words, it was possible to achieve significant savings (over 70 %) and to reach the level required by the NF40 building standard ( $EU_H \leq 40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$ ) and almost the level required by the NF15 standard ( $EU_H \leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$ ). The savings achieved are similar to those reported in other studies on schools [4].

warstwą styropianu grubości 14 cm, a strop nad ostatnią kondygnacją styropianem grubości ok. 10 cm; okna wymieniono na nowe z PVC, dwuszybowe.

- część południowo-wschodnia (zespół sportowy): ściany zewnętrzne piwnic żelbetowe grubości 30 cm z izolacją ze styropianu grubości 9 cm; ściany zewnętrzne parteru z bloczków z betonu komórkowego grubości 36 cm i 24 cm powyżej poziomu 3,05 m;

- rozbudowa i nadbudowa części południowo-zachodniej (budynku szkolnego) w konstrukcji tradycyjnej, ściany zewnętrzne klatki schodowej oparte na ramie żelbetowej, z pustaka ceramicznego MAX grubości 19 cm, ocieplone styropianem grubości 12 z tynkiem cienkowarstwowym na siatce systemowej;

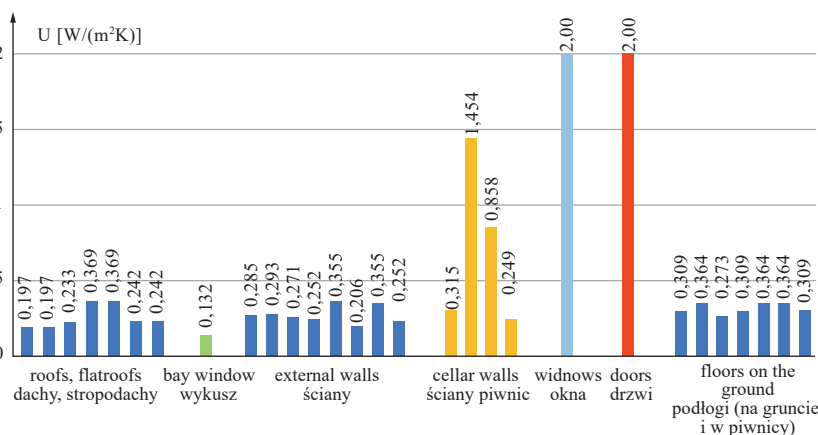
Współczynniki przenikania ciepła U zestawiono na rysunku 4.

**Rozwiązania instalacyjne.** Instalacja c.o. w budynku wodna, o parametrach 80/60°C, zasilana jest z kotła gazowego o mocy 163 kW (z roku 1992). Wyposażona jest w grzejniki członowe żeliwne z zaworami i głowicami termostatycznymi (w całej szkole brakuje 6 szt. zaworów termostatycznych) oraz grzejniki płytowe z zaworami (w części dobudowanej szkoły).

Instalacja c.w.u. przygotowana jest w bojlerach elektrycznych (4 szt.: 2 o mocy 1200 W oraz 2 o mocy 1500 W) oraz w elektrycznych podgrzewaczach przepływowych (3 szt.: 2

o mocy 1500 W oraz 1 o mocy 1200 W).

W zespole sali gimnastycznej: instalacja grzewcza podłączona do kotła gazowego w budynku szkoły (oddzielny dodatkowy kocioł Viessmann o mocy 80 kW z 2006 r., z regulacją, pracujący z priorytetem ciepłej wody – podgrzewacz wody ciepłej Vito-Cell o poj. 300 l). Grzejniki są stalo-



**Fig. 4. Values of heat transfer coefficient U [W/(m²K)] of all types of partitions of the analysed building in the state before modernisation [16]**

*Rys. 4. Wartości współczynnika przenikania ciepła U [W/(m²K)] wszystkich rodzajów przegród analizowanego budynku w stanie przed modernizacją [16]*

*Own source  
Źródło własne*

we płytowe z zaworami i głowicami termostatycznymi. Dachy i stropodachy budynku szkoły w Skawinie przekraczały wymagania WT2021 [14] o 31–146%, ściany kondygnacji nadziemnych o 3–77,5%, okna o 122%, drzwi zewnętrzne o 16,3%, a podłogi na gruncie (oprócz sali gimnastycznej) i w piwnicy o 6–21 %. Możliwa więc była poprawa efektywności energetycznej budynku przez zmniejszenie strat ciepła przez przegrody zewnętrzne.

Do analizy poprawy efektywności energetycznej budynku szkoły przyjęto następujące warianty termomodernizacji:

- W0 – wariant bazowy – stan istniejący;
- W1 – realny wariant poprawy efektywności energetycznej (docieplenie ścian zewnętrznych, dachu/stropodachu, wymia-



Photo 2. View of the facility  
Fot. 2. Widok obiektu



Own source [16]  
Źródło własne [16]



By far the lowest value for the final energy demand indicator was achieved with the heat pump in the building. For the other heat sources considered (new gas boilers and a district heating substation), this indicator decreased slightly (by 6.5 % and 13.1 % respectively) and increased by 1.2 % with a biomass boiler (due to the lower generation efficiency of these boilers).

The  $EP_{max} = 70 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ year})$  required for new school buildings was achieved in the building of the school studied in variants W2 (use of a biomass boiler) and W3 and W4 (use of a heat pump). The value of  $EP = 0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ year})$  was achieved in variant W4, which assumes feasible thermomodernization measures and energy sources in the form of an air heat pump and photovoltaic panels. This is the only variant that allows achieving a nearly zero energy building. The results are consistent with those of the paper [6], which states that in Poland it is not possible to meet the requirement of  $EP_{max}$  without the use of renewable energy sources.

#### Analysis of the school building's ability to achieve climate neutrality.

The carbon footprint analysis concerned phase B5, covering information of emissions from phases A1-A4, and phase B6 concerning the operational carbon footprint depending on electricity and heat

consumption. The calculations were carried out over a period of thirty years. Figure 6 shows the results of the calculations. One method of balancing the building footprint is to plant trees, which are effective in absorbing the harmful carbon gases emitted by the building. It was then calculated how many new trees would need to be planted in order to balance the  $\text{CO}_2$  emissions in the case of various variants of thermomodernization of the analyzed school. The results are presented in Figure 7.

**Proposed measures to ensure user comfort.** After analyzing measures to reduce energy demand and  $\text{CO}_2$ , additional works were proposed using noise barriers and green walls (vertical gardens) in the corridors and classrooms. Green plants

na okien i drzwi do poziomu obowiązującego w standardzie nZEB, wymiana oświetlenia na LED, zastosowanie wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej z rekuperacją, zastosowanie automatyki budynkowej, źródło ciepła pozostawione bez zmian (kocioł gazowy);

- W2 – wszystkie prace termomodernizacyjne jak w wariantcie W1 oraz zamiana kotła gazowego na kocioł na biomasę.
- W3 – wszystkie prace termomodernizacyjne jak w wariantcie W1 oraz zamiana kotła gazowego na pompę ciepła zasilaną z sieci.
- W4 – wszystkie prace termomodernizacyjne jak w wariantcie W1, zamiana kotła gazowego na pompę ciepła zasilaną z paneli fotowoltaicznych.

**Krytyczna analiza wyników prób osiągnięcia standardu budynku o niemal zerowym zapotrzebowaniu na energię (nZEB).** Na rysunku 5 przedstawiono wartości obliczone [16]

wskaźnika rocznego zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania ( $EU_H$ ), mówiącego o jakości „bryły” budynku, wskaźnika rocznego zapotrzebowania na energię końcową, determinującego koszt ogrzewania i emisje  $\text{CO}_2$  oraz wskaźnika zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną (EP) analizowanych

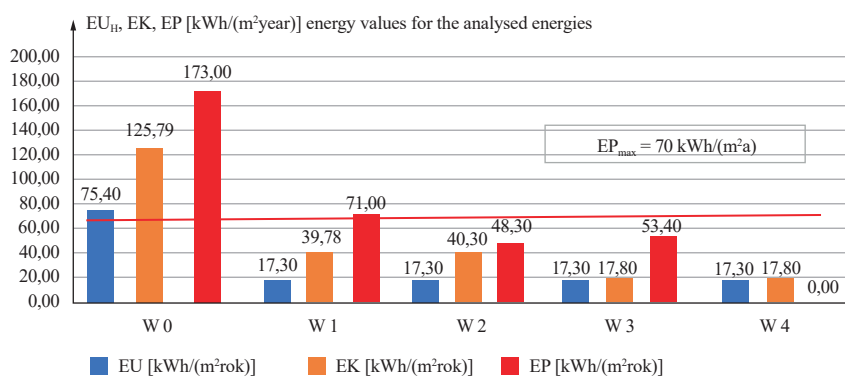


Fig. 5.  $EU_H$ , EK and EP [kWh/(m<sup>2</sup>·year)] values of the analysed variants [16]

Rys. 5. Wartości wskaźników  $EU_H$ , EK oraz EP [kWh/(m<sup>2</sup>·rok)] analizowanych wariantów [16]

Own source  
Źródło własne

wariantów. Wartość wskaźnika zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji  $EU_H = 75,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ rok})$  budynku przed modernizacją (wariant W0) świadczył o średniej jakości cieplnej jego obudowy.

Dzięki zaproponowanym działaniom dotyczącym poprawy jakości cieplnej bryły budynku wartość wskaźnika zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji  $EU_H$  uległa zmniejszeniu do  $17,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ rok})$ , czyli możliwe było osiągnięcie znacznych oszczędności (ponad 70%) i uzyskanie poziomu wymaganego przez standard budynku NF40 ( $EU_H \leq 40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ rok})$ ) oraz niemalże poziomu wymaganego w przypadku standardu NF15 ( $EU_H \leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ rok})$ ). Poziom

absorb carbon dioxide, giving it back to the air with pure oxygen. Plants filter pollutants, trapping dust particles and harmful organic compounds. In addition, they can nullify the damaging effects of air-conditioning systems, such as overlying air.

They regulate the level of humidity, and the right moisture prevents the proliferation of viruses and bacteria. A clean and well-moisturized air contributes to a sense of well-being, and the plants transform the school corridor into a place where pupils enjoy spending time. Plants on the green wall filter airborne dust and convert CO<sub>2</sub> into oxygen. 1 m<sup>2</sup> of the green wall absorbs 2.3 kg of CO<sub>2</sub> from the air each year and extracts 1.7 kg of oxygen. In addition, green plants, in the form of vertical gardens, are excellent at blocking noise. Plants also have a positive effect on our mood, reducing stress and inducing relaxation, as well as improving concentration, productivity and creativity. The proposal to establish vertical gardens at the school has an impact on the acoustic comfort, air quality and aesthetic comfort.

Improving accessibility for people with special needs. The accessibility of the school building was analyzed in terms of facilities for the elderly, people with physical, hearing, visual and other disabilities, including over- and underweight people. In the area of accessibility of the facility's location, it was found that the proximity of a pedestrian crossing and a bay was ensured to enable safe access to the school. There are no facilities for the elderly in the building and its surroundings: the entrance is accessible by climbing stairs; there are no restrooms on the school grounds. In the accessibility report for people with special needs, the school states that accessibility is provided through an entrance on the south side. There are toilets for wheelchair users on the ground floor by the sports block. The school uses a stairlift to eliminate vertical barriers to circulation spaces. The school building does not use equipment or other technical means to cater for the hard of hearing and visually impaired. The school provides access for a person using an assistance dog. Accessibility is ensured by the support of a porter's lodge employee, located at the main entrance, as an alternative access.

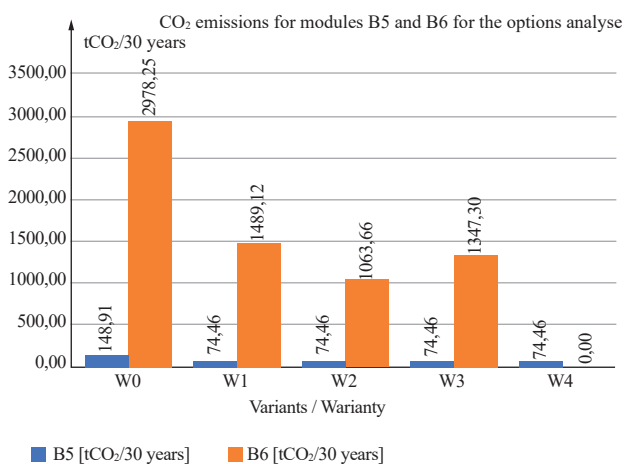
uzyskanych oszczędności jest zbliżony do wykazywanych w innych opracowaniach dotyczących szkół [4].

Zdecydowanie najmniejszą wartość wskaźnika zapotrzebowania na energię końcową osiągnięto przy zastosowaniu pompy ciepła w budynku. W przypadku innych rozpatrywanych źródeł ciepła (nowe kotły na gaz i węzeł ciepły) wskaźnik ten zmniejszył się nieznacznie (odpowiednio o 6,5 % oraz 13,1 %), a przy zastosowaniu kotła na biomasę uległ zwiększeniu o 1,2% (ze względu na mniejszą sprawność wytwarzania takich kotłów).

Wskaźnik EP<sub>max</sub> = 70 kWh/(m<sup>2</sup>rok) wymagany w przypadku nowych budynków szkolnych został osiągnięty w budynku badanej szkoły w wariantach W2 (zastosowanie kotła na biomasę) oraz W3 i W4 (zastosowanie pompy ciepła). Wartość EP = 0 kWh/(m<sup>2</sup>rok) osiągnięto w wariantach W4, w którym założono realne do wykonania działania termoizolacyjne, oraz źródła energii w postaci powietrznej pompy ciepła i paneli PV. Jest to jedyny wariant umożliwiający osiągnięcie budynku netto zeroenergetycznego. Wyniki pokrywają się z danymi zawartymi w pracy [6], w której stwierdzono, że w Polsce nie ma możliwości spełnienia wymagania dotyczącego EP<sub>max</sub> bez zastosowania źródeł energii odnawialnej.

**Analiza możliwości osiągnięcia przez budynek szkolny neutralności klimatycznej.** Analiza śladu węglowego dotyczyła fazy B5, obejmującej informacje o emisjach z faz A1-A4 oraz fazy B6 dotyczącej operacyjnego śladu węglowego zależnego od zużycia energii elektrycznej i ciepłej. Obliczenia przeprowadzono dla okresu trzydziestu lat. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki obliczeń. Jedną z metod bilansowania śladu budynku są nasadzenia drzew, które skutecznie pochłaniają emitowane przez budynek szkodliwe gazy cieplarniane. Następnie przeliczono, ile nowych drzew należy nasadzić, aby zbilansować emisję CO<sub>2</sub> w przypadku różnych wariantów termomodernizacji analizowanej szkoły. Wyniki przedstawiono na rysunku 7.

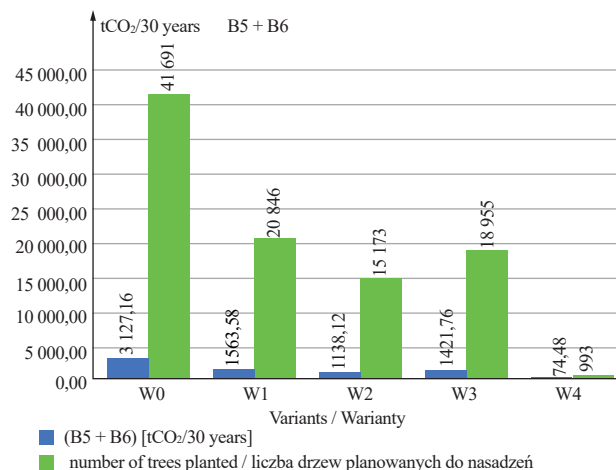
**Proponowane działania w kierunku zapewnienia komfortu użytkowego.** Po przeanalizowaniu działań mających



**Fig. 6. Results of CO<sub>2</sub> emissions calculations in phases B5 and B6 for the retrofit options considered**

*Own source*  
Rys. 6. Wyniki obliczeń emisji CO<sub>2</sub> w fazie B5 i B6 w przypadku rozpatrywanych wariantów modernizacji

*Zródło własne*



**Fig. 7. Number of new trees to be planted to offset CO<sub>2</sub> emissions for each analysis option**

*Own source*  
Rys. 7. Liczba nowych drzew, które należy posadzić, aby zrównoważyć emisję CO<sub>2</sub> w przypadku poszczególnych wariantów analizy

*Zródło własne*

The school space has not been equipped with solutions facilitating spatial orientation. The evacuation of people with special needs was not provided.

An analysis of accessibility has shown that it is provided, to a basic degree, mainly to people with mobility impairments. The solutions adopted in the entrance area ensure safety, but due to the lack of adaptations for other groups of people with special needs and the use of a separate entrance and stairs for vertical communication, the comfort of use of the facility for people with special needs is low.

## Conclusions

This paper analyses a school building located in south-eastern Poland. The aim of the analysis was to check whether this type of building can achieve the standard of a nearly zero-energy building and a level of climate neutrality. The authors added additional criteria to their innovative concept in terms of user comfort and accessibility for people with special needs closely related to the comfort of use.

The results of the analysis showed that the school building can achieve a nearly zero energy demand standard, but only if comprehensive thermal modernization measures are carried out and the heat source is replaced with a renewable one (biomass, heat pump). A non-renewable primary energy demand of 0 kWh/(m<sup>2</sup> year) will only be achieved with thermal modernization measures (up to the level of nZEB buildings) and a change of the heat source from gas boilers to an air source heat pump powered by photovoltaic panels.

Climate neutrality of a building is only achievable with an operational carbon footprint. Additional comfort criteria apply to the building's occupants, which directly contributes to the quality of the work performer and health and well-being.

The methodology presented by the authors has been positively verified as a real example of a school building. The results of the analysis can be implemented in other similar buildings with the same use profile.

*This work was carried out with the support of the Białystok University of Technology and funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Poland [grant number WZ/WB-III/2/2023].*

*Received: 26.08.2024 r.*

*Revised: 30.09.2024 r.*

*Published: 20.12.2024 r.*

## Literature

[1] Komunikat Komisji Do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego, Komitetu Regionów i Europejskiego Banku Inwestycyjnego „Czysta planeta dla wszystkich. Europejska długoterminowa wizja strategiczna dobrze prosperującej, nowoczesnej, konkurencyjnej i neutralnej dla klimatu gospodarki”, Bruksela, 2018, COM (2018) 773.

[2] Fedorczyk-Cisak M. Classification of Historical Buildings Based on Energy Efficiency Tests and Comfort Tests. In Proceedings of the 6th World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium – WMCAUS; 2021. DOI:10.1088/1757-899X/1203/3/032131.

na celu redukcję zapotrzebowania na energię oraz emisji CO<sub>2</sub> zaproponowano prace dodatkowe polegające na zastosowaniu ekranów akustycznych oraz zielonych ścian (ogrodów wertykalnych) w korytarzach i klasach. Zielone rośliny pochłaniają dwutlenek węgla, oddając do powietrza czysty tlen. Rośliny filtrują zanieczyszczenia, zatrzymują cząsteczki kurzu i szkodliwych związków organicznych. Dodatkowo potrafią niwelować szkodliwe działanie systemów klimatyzacyjnych, m.in. przesuszenie powietrza. Regulują poziom wilgotności, a odpowiednia wilgotność zapobiega namnażaniu się wirusów i bakterii. Czyste i odpowiednio nawilżone powietrze wpływa na samopoczucie, a dzięki roślinom szkolny korytarz zmienia się w miejsce, w którym chętnie przebywają uczniowie. Rośliny znajdujące się na zielonej ścianie filtrują pyły unoszące się w powietrzu oraz przetwarzają CO<sub>2</sub> na tlen. 1 m<sup>2</sup> zielonej ściany pochłania rocznie 2,3 kg CO<sub>2</sub> z powietrza oraz wytwarza 1,7 kg tlenu. Ponadto rośliny zielone, w postaci ogrodów wertykalnych, doskonale blokują hałas. Rośliny pozytywnie wpływają na nasze samopoczucie, redukując stres i wprowadzając w stan relaksacji, a także podnoszą poziom koncentracji, produktywności i kreatywności. Propozycja założenia w szkole ogrodów wertykalnych wpłynie też korzystnie na poprawę komfortu akustycznego oraz jakości powietrza i komfortu estetycznego.

**Poprawa dostępności dla osób o szczególnych wymaganiach.** Dostępność budynku szkoły analizowano pod kątem udogodnień dla osób starszych, z niepełnosprawnością ruchową, słuchu, wzroku oraz innymi niepełnosprawnościami, w tym z nadwrażliwością. W obszarze dostępności lokalizacji obiektu stwierdzono zapewnienie bliskości przejścia dla pieszych oraz zatoki umożliwiającej bezpieczne dotarcie do szkoły. W budynku i jego otoczeniu nie zastosowano udogodnień dla osób starszych: wejście jest dostępne po pokonaniu schodów; nie ma ławek do odpoczynku na terenie szkoły. W raporcie o dostępności dla osób ze szczególnymi potrzebami szkoła stwierdza jej zapewnienie dzięki wejściu od południowej strony. Na parterze przy bloku sportowym znajdują się toalety dla osób poruszających się na wózkach. W celu eliminacji barier pionowych przestrzeni komunikacyjnych szkoła wykorzystuje schodolaz. W budynku szkoły nie zastosowano urządzeń i innych środków technicznych do obsługi słabosłyszących i słabowidzących. Szkoła umożliwia wejście osobie korzystającej z psa asystującego. Dostępność zapewniana jest przez wsparcie pracownika portierni, znajdującej się przy wejściu głównym, jako dostęp alternatywny. W przestrzeni szkoły nie zastosowano rozwiązań ułatwiających orientację przestrzenną. Nie zapewniono możliwości ewakuacji osób ze szczególnymi potrzebami.

Analiza dostępności wykazała zapewnienie jej, w stopniu podstawowym, głównie osobom z niepełnosprawnością ruchową. Przyjęte rozwiązania w obszarze strefy wejściowej zapewniają bezpieczeństwo, ale w związku z brakiem dostosowania dla innych grup osób ze szczególnymi potrzebami oraz zastosowaniem odrębnego wejścia i schodolazów do komunikacji pionowej, komfort użytkownika obiektu przez osoby ze szczególnymi potrzebami jest niski.

[3] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/844 z 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków i dyrektywę 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej.

[4] Erhorn-Kluttig H, Doster S, Erhorn H. School of the future – Towards zero emission with high performance indoor environment. Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP) Verlag, 1016. Dostęp online: <https://www.school-of-the-future.eu/> (12.11.2024).

[5] Del Borghi, A, Spiegelhalter, T, Moreschi, L, Gallo M. Carbon-neutral-campus building: Design versus retrofitting of two university zero energy buildings in Europe and in the United States. Sustainability, 13(16) 2021, 9023. <https://doi.org/10.3390/su13169023>.

[6] Manzoor B, Othman I, Sadowska B, Sarosiek W. Zero-energy buildings and energy efficiency towards sustainability: A bibliometric review and a case study. Applied Sciences, 12(4) 2022, 2136. <https://doi.org/10.3390/app1204213>

[7] Istil SA, Górecki J, Diemer A. Study on Certification Criteria of Building Energy and Environmental Performance in the Context of Achieving Climate Neutrality. Sustainability 2023, 15, 2770. <https://doi.org/10.3390/su15032770>

[8] Fedorczyk-Cisak M, Radziszewska-Zielina E, Nowak-Ocłoń M, Biskupski J, Jastrzębski P, Kotowicz A, ...& Kłemeš JJ. (2023). A concept to maximise energy self-sufficiency of the housing stock in central Europe based on renewable resources and efficiency improvement. Energy, 278, 127812. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127812>

[9] Lista Szkół Tysiąclecia – Wikipedia, Wolna Encyklopedia. Dostęp online: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Lista\\_szk%C3%B3%C5%82\\_tysi%C4%85lecia](https://pl.wikipedia.org/wiki/Lista_szk%C3%B3%C5%82_tysi%C4%85lecia) (30.10.2024).

[10] Ekspertyza „Przegląd przepisów określających minimalne wymagania dotyczące charakterystyki energetycznej budynków” opracowana na zlecenie Ministerstwa Infrastruktury i Budownictwa. 2016, Kraków.

[11] Sarosiek W, Sadowska B. Ekologiczne aspekty termomodernizacji wybranych budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej. Materiały Budowlane, 2009; (1)

[12] What-is-a-carbon-credit-worth? Dostępne online: <https://www.gold-standard.org/news/what-is-a-carbon-credit-worth> (30.10.2024).

[13] Uchwała nr 91 Rady Ministrów z 22 czerwca 2015 r. w sprawie przyjęcia „Krajowego planu mającego na celu zwiększenie liczby budynków o niskim zużyciu energii” (M.P. 2015 poz. 614).

[14] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. (Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690 z późn. zmianami).

[15] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (Dz.U. 2015 poz. 376).

[16] Opracowanie na zlecenie Urzędu Marszałkowskiego Małopolski „Koncepcja budynku neutralnego dla klimatu w formie opracowania pn. „Szkoła neutralna dla klimatu”, 2023 Kraków. [https://klimat.ekomalopolska.pl/wp-content/uploads/2023/06/Opracowanie\\_szkola-neutralna-dla-klimatu.pdf](https://klimat.ekomalopolska.pl/wp-content/uploads/2023/06/Opracowanie_szkola-neutralna-dla-klimatu.pdf)

[17] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1275 z 24 kwietnia 2024 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (wersja przekształcona) 2024/1275.

## Wnioski

W artykule przeprowadzono analizę budynku szkoły, zlokalizowanej w południowo-wschodniej Polsce. Celem analizy było sprawdzenie, czy budynek tego typu może osiągnąć standard budynku o niemal zerowym zużyciu energii oraz poziom neutralności klimatycznej. Autorzy do swojej innowacyjnej koncepcji dołączyli dodatkowe kryteria, dotyczące komfortu użytkownika oraz dostępności dla osób o szczególnych potrzebach ściśle związane z komfortem użytkownika.

Wyniki analizy wykazały, że budynek szkoły może osiągnąć standard o niemal zerowym zapotrzebowaniu na energię, ale pod warunkiem przeprowadzenia kompleksowych działań termomodernizacyjnych i zamiany źródła ciepła na odnawialne (biomasa, pompa ciepła). Wartość wskaźnika zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną równą 0 kWh/(m<sup>2</sup>rok) osiągnięto jedynie w wariantcie obejmującym działania termomodernizacyjne (do poziomu budynków nZEB) oraz zmianę źródła ciepła z kotłów gazowych na powietrzną pompę ciepła zasilaną panelami fotowoltaicznymi.

Neutralność klimatyczna budynku jest możliwa do osiągnięcia jedynie w przypadku operacyjnego śladu węglowego. Dodatkowe kryteria komfortu użytkownika dotyczą użytkowników budynku, co w bezpośredni sposób przyczynia się do poprawy jakości wykonywanej pracy oraz zdrowia i samopoczucia. Metodologia przedstawiona przez autorów została pozytywnie zweryfikowana na rzeczywistym przykładzie budynku typowej szkoły. Wyniki analizy można implementować do innych podobnych budynków o takim samym sposobie użytkowania.

*Praca ta została zrealizowana przy wsparciu Politechniki Białostockiej i sfinansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego RP [nr grantu WZ/WB-III/2/2023].*

*Artykuł wpłynął do redakcji: 26.08.2024 r.*

*Otrzymało poprawiony po recenzjach: 30.09.2024 r.*

*Opublikowano: 20.12.2024 r.*

[18] PN-EN 15978:2012 – Wersja angielska, Zrównoważone obiekty budowlane – Ocena środowiskowych właściwości użytkowych budynków – Metoda obliczania.

[19] Kowalska-Koczwara A, Pachla F, Tatara T, Fedorczyk-Cisak M. Measurement and Interpretation Methodology for Determining Comfort in Passive Buildings and NZEB Buildings. In Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2019; Vol. 603. DOI 10.1088/1757-899X/603/4/042036