

dr inż. Łukasz Nowak¹⁾

ORCID: 0000-0002-7732-640X

Basic aspects of reducing the embodied carbon footprint of a building

Podstawowe aspekty redukcji wbudowanego śladu węglowego budynku

DOI: 10.15199/33.2025.09.16

Abstract: Striving for climate neutrality is currently a key task in all sectors of the economy, including the construction sector. As a result, it is necessary to analyze the building, already at the design stage, in terms of both operational and embodied CO₂ emissions. The selection of structural and material solutions, adopted design criteria or the method of conducting works on the construction site have a significant impact on the built-in carbon footprint of the building. The article presents basic information on how to assess the carbon footprint of a building, the impact of the materials used and selected elements of the building envelope on the built-in CO₂ emission and ways to find solutions for its reduction.

Keywords: CO₂ emission; embodied building carbon footprint; climate neutrality.

Streszczenie: Dążenie do neutralności klimatycznej jest obecnie kluczowym zadaniem we wszystkich sektorach gospodarki, w tym w sektorze budownictwa. Następstwem tego jest konieczność analizy budynku, już na etapie projektu, pod kątem emisji CO₂ zarówno tej eksploatacyjnej, jak i tej wbudowanej. Dobór rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych, przyjętych kryteriów projektowych czy sposób prowadzenia prac na budowie ma istotny wpływ na wbudowany ślad węglowy budynku. Artykuł przedstawia podstawowe informacje w zakresie sposobu oceny śladu węglowego budynku, wpływu użytych materiałów i wybranych elementów obudowy budynku na wbudowaną emisję CO₂ oraz sposoby poszukiwania rozwiązań w zakresie jej redukcji.

Słowa kluczowe: emisja CO₂; wbudowany ślad węglowy budynku; neutralność klimatyczna.

The years 2015–2024 constituted the warmest decade in the history of instrumental records [1], with 2024 emerging as the warmest year on record, as the mean annual air temperature exceeded +1.5°C above pre-industrial levels (1850) for the first time. This does not, however, imply that the level of global warming itself has already reached this threshold (in 2024, depending on the estimation model applied, it ranged between 1.34 and 1.41°C [2]), since its definition, adopted in the Sixth IPCC Assessment Report, is expressed as a “twenty-year mean value.” Nevertheless, the evidence is unequivocal that climate warming is ongoing, and the associated risks are neither distant nor hypothetical.

The construction sector is responsible for 35% of total energy consumption [3] and 39% of global CO₂ emissions [4], of which 28% stems from building operation (energy demand for heating, cooling, ventilation, lighting, and domestic hot water), and 11% from construction processes and the production of building materials. Additionally, cement and steel production in 2019 alone accounted for more than 13% of global anthropogenic CO₂ emissions [5]. These figures clearly indicate that the decarbonization of the building sector represents one of the fundamental pathways toward achieving climate neutrality.

A building fulfills architectural functions in terms of aesthetics, spatial enclosure, and interior functionality, as well as structural functions, ensuring safety and user comfort. The fundamental components of a building include roofs, walls, floors, foundations, windows and doors. Despite significant differences, all of these elements may serve one or more of

Lata 2015–2024 były najcieplejszym dziesięcioleciem w historii pomiarów [1], a 2024 r. okazał się najcieplejszym rokiem w historii, gdyż średnia roczna temperatura powietrza po raz pierwszy była większa o ponad +1,5°C w porównaniu z okresem sprzed industrializacji (1850 r.). Nie oznacza to, że poziom globalnego ocieplenia też tyle osiągnął (w 2024 r. w zależności od przyjętego modelu oszacowania wynosił między 1,34 a 1,41°C [2]), gdyż jego definicja, przyjęta w szóstym raporcie IPCC, została ujęta jako „wartość średnia dwudziestoletnia”. Nie zmienia to jednak faktu, że ocieplenie klimatu trwa, a zagrożenia z niego wynikające nie są ani odległe, ani hipotetyczne.

Sektor budowlany jest odpowiedzialny za 35% całkowitego zużycia energii [3] oraz za 39% globalnej emisji CO₂ [4], (28% to eksploatacja budynków, czyli produkcja energii na potrzeby ogrzewania, chłodzenia, wentylacji, oświetlenia czy podgrzania wody, a 11% to proces ich wznoszenia oraz produkcja materiałów budowlanych). Dodatkowo, produkcja cementu i stali w 2019 r. generowała ponad 13% całkowitej światowej emisji CO₂ spowodowanej działalnością człowieka [5]. Te wartości w dość wyraźny sposób wskazują, że dekarbonizacja budownictwa jest jednym z podstawowych działań w dążeniu do neutralności klimatycznej.

Budynek pełni funkcje architektoniczne, w zakresie estetyki, wydzielenia z przestrzeni oraz zapewnienia funkcjonalności wnętrza, a także funkcje konstrukcyjne, gwarantujące bezpieczeństwo i komfort użytkowania. Podstawowymi elementami budynku są dachy, ściany, stropy, fundamenty oraz okna i drzwi. Mimo istotnych różnic, wszystkie wymienione elementy mogą pełnić jedną lub więcej z następujących funkcji: nośną (przenoszenie obciążeń pionowych i/lub poziomych od ciężaru własnego, in-

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; lukasz.nowak@pwr.edu.pl



the following purposes: load-bearing (resisting vertical and/or horizontal loads from self-weight, other structural elements, or imposed loads); stiffening (enhancing the overall spatial rigidity of the structure); and protective barrier (against heat loss, moisture, noise, or fire).

According to building regulations, buildings elements must be designed and constructed to meet the requirements of: “load-bearing capacity and structural stability; fire safety; hygiene, health, and environmental protection; safety of use and accessibility; protection against noise; energy saving and thermal insulation; and sustainable use of natural resources” [6]. The range of functions performed by these components, together with the multiplicity of requirements they must fulfill, demonstrates the extent to which construction and material solutions must be comprehensively verified, while also accounting for construction time, durability, and cost. The requirements concerning “environmental protection” and the “sustainable use of natural resources” are of particular significance today, since the impact of design and construction decisions regarding building envelope components directly translates into the total CO₂ emissions of the building.

Assessment of the carbon footprint of adopted building solutions

The reduction of CO₂ emissions (carbon footprint) in buildings can be achieved in terms of both embodied carbon (EC) and operational carbon (OC), which together constitute the whole life carbon footprint, quantified through the Global Warming Potential (GWP) indicator or, alternatively, the Whole Life Carbon (WLC) indicator. The GWP value is expressed in CO₂ equivalents [kg CO₂e or Mg CO₂e]. Current Polish regulations do not require the assessment of the carbon footprint of newly designed buildings. However, the revised Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) stipulates that, as of 1 January 2028, the evaluation of GWP over the entire life cycle will become mandatory for all new buildings with a usable floor area exceeding 1000 m², and from 2030 onwards for all new buildings [7].

The assessment of a building's carbon footprint may be based on the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, as defined in standard PN-EN 15978 [8], which accounts for CO₂ emissions and sequestration across all life cycle stages of a building, schematically represented in Figure 1. The building life cycle comprises the following stages: product and construction stage (modules A), use stage (modules B), and end-of-life stage (modules C). Additionally, the beyond-life-cycle stage (D) is considered, which can influence the overall carbon footprint of the building either positively or negatively. The commonly assumed service life of a building is 50 years.

The product stage (modules A1–A3) encompasses the production of construction materials, components, building elements and installations, beginning with raw material extraction, their transportation to the manufacturing facility, internal transport within the facility, and the manufacturing processes themselves. The construction stage (A4–A5) covers the building erection process, including the transport of

ných elementów konstrukcji czy obciążeń użytkowych); usztywniającą (zwiększenie sztywności przestrzennej budynku); bariery ochronnej (przed utratą ciepła, wilgocią, hałasem, pożarem).

Zgodnie z przepisami budowlanymi, elementy budynku powinny być projektowane i budowane z zapewnieniem spełnienia wymagań dotyczących: „nośności i stateczności konstrukcji; bezpieczeństwa pożarowego; higieny; zdrowia i środowiska; bezpieczeństwa użytkowania i dostępności obiektów; ochrony przed hałasem; oszczędności energii i izolacyjności cieplnej oraz zrównoważonego wykorzystania zasobów naturalnych” [6]. Zakres funkcji pełnionych przez te elementy oraz wiele wymogów, jakie mają spełniać, pokazuje, jak wszechstronnie należy weryfikować przyjęte w nich rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe, dodatkowo biorąc pod uwagę czas wykonania, trwałość i ich koszt. Wymagania dotyczące „środowiska” i „zrównoważonego wykorzystania zasobów naturalnych” nabierają obecnie szczególnego znaczenia, gdyż wpływ podjętych decyzji projektowo-wykonawczych dotyczących elementów obudowy budynku przekłada się bezpośrednio na ilość całkowitej emisji CO₂ przez budynek.

Ocena śladu węglowego przyjętych rozwiązań w budynku

Redukcja emisji CO₂ (śladu węglowego) w budynku może dotyczyć wbudowanego – EC (ang. *Embodied Carbon*) oraz operacyjnego – OC (ang. *Operational Carbon*) śladu węglowego, które składają się na całkowity ślad węglowy określany wskaźnikiem globalnego ocieplenia GWP (ang. *Global Warming Potential*) lub zamiennie wskaźnikiem WLC (ang. *Whole-Life Carbon*). Wartość GWP wyrażana jest w ekwiwalencie CO₂ [kg CO₂e lub Mg CO₂e]. Obecne przepisy w Polsce nie wymagają oceny śladu węglowego nowo projektowanych budynków, ale znowelizowana Dyrektywa w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (EPBD) przewiduje, że od 1 stycznia 2028 r. ocena wartości GWP w całym cyklu życia stanie się obowiązkowa w przypadku wszystkich nowych budynków o powierzchni użytkowej przekraczającej 1000 m², a od 2030 r. dla wszystkich nowych budynków [7].

Ocena śladu węglowego w budynku może bazować na metodzie LCA (ang. *Life Cycle Assessment*), przedstawionej w normie PN-EN 15978 [8], która uwzględnia emisję i pochłanianie CO₂ na wszystkich etapach cyklu życia budynku, przedstawionych schematycznie na rysunku 1. Cykl życia budynku składa się z etapów: powstania (moduły A); użytkowania (moduły B) i zakończenia eksploatacji (moduły C). Dodatkowo rozważa się też etap po zakończeniu cyklu życia (D), który może zarówno pozytywnie, jak i negatywnie wpłynąć na sumaryczny ślad węglowy budynku. Typowo przyjmowany okres życia budynku to 50 lat.

Etap produktu (moduły A1–A3) to wytworzenie materiałów i komponentów budowlanych, elementów budynku oraz instalacji począwszy od pozyskania surowców, ich transportu do zakładu produkcji oraz na jego terenie po proces wytworzenia wyrobu. Etap budowy (A4–A5) to proces wznoszenia budynku obejmujący transport produktów na teren budowy, ich wbudowanie oraz prace rozbiórkowe lub demontażowe, które były wy-

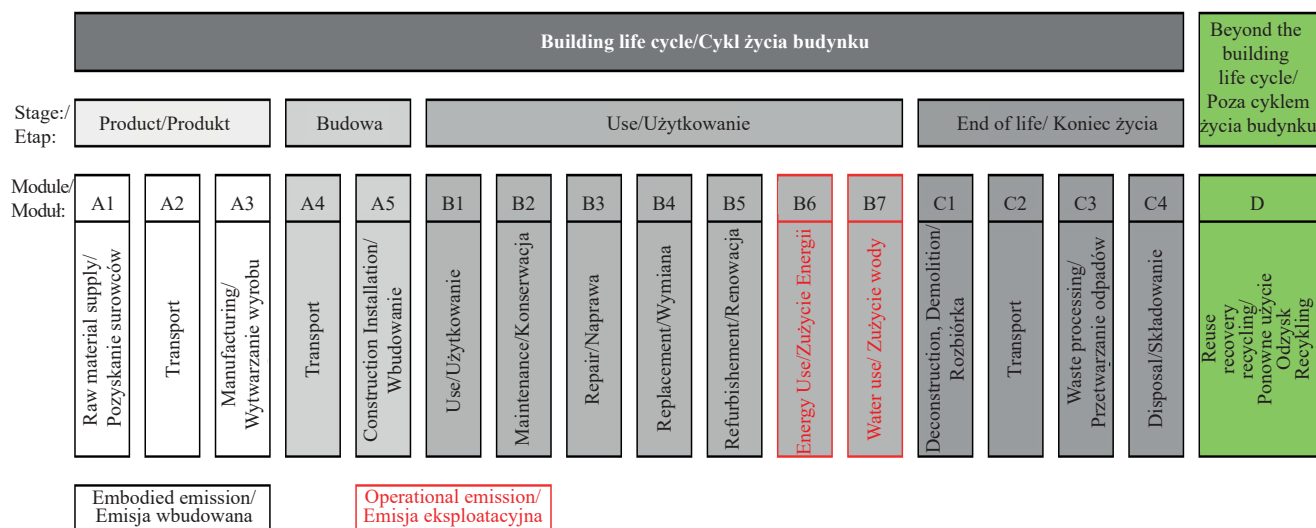


Fig. 1. Stages of the building's life cycle assessed in the analysis of its total carbon footprint [8]

Rys. 1. Etapy cyklu życia budynku podlegające ocenie w analizie jego całkowitego śladu węglowego [8]

products to the construction site, their incorporation into the building, and demolition or dismantling works required at the initial stage of construction [9]. The use stage (B1–B7) is divided into embodied (B1–B5) and operational (B6–B7) CO₂ emissions. Modules B1–B5 cover activities related to maintenance, repair, replacement and refurbishment of building products (materials, components, or elements) subject to periodic servicing, malfunction, or natural degradation. These are activities planned at the design stage, expected to occur during the building's service life (post-construction). This stage also includes emissions from blowing agents in insulation, leakage of refrigerants from building systems, and CO₂ uptake through concrete carbonation [9]. Modules B6–B7 account for operational CO₂ emissions arising from energy and water consumption by building users. The end-of-life stage (C1–C4) includes emissions or sequestration associated with building demolition, transport to waste processing facilities, waste treatment, and disposal. Finally, the beyond-life-cycle stage (D) encompasses potential CO₂ emissions and removals resulting from reuse, recycling, energy recovery, or landfilling of materials generated during construction (A4–A5), use (B2–B5), or end-of-life (C1–C4). It also includes potential benefits from CO₂ reduction through the export of resources in the use stage (B6–B8), such as generated electricity or treated water [9]. Within each stage, the assessment of the carbon footprint follows the general formula [8]:

$$GWP_i = \sum_j a_{i,j} \cdot GWP_{i,j}$$

where:

GWP_i – total carbon footprint of the i -th stage of the building life cycle [kg CO₂e]

$a_{i,j}$ – quantity of used products (materials, components or building elements) or services (e.g., construction works, transportation) within a given module that contribute to the carbon footprint [functional unit of the product or service, e.g., kg, m², m³, km]

$GWP_{i,j}$ – unitary carbon footprint of the j -th product or service in the given stage of the building life cycle [kg CO₂e per functional unit of the product or service]

magane na początku budowy [9]. Etap użytkowania (B1–B7) jest podzielony na część wbudowaną (B1–B5) i część eksploatacyjną emisji CO₂ (B6–B7). Moduły B1–B5 obejmują zakres prac dotyczących utrzymania, konserwacji, naprawy i wymiany wszelkich produktów budowlanych (materiałów, komponentów lub elementów budynku wymagających okresowych prac serwisowych, ulegających awariom lub naturalnemu zużyciu). Są to prace zaplanowane na początku projektu, które mają nastąpić w pewnym momencie eksploatacji budynku (po zakończeniu budowy). Obejmuje on też emisję środków spieniających z izolacji, wycieki czynnika chłodniczego z urządzeń instalacji budynku czy też usuwanie CO₂ przez karbonatyzację betonu [9]. Moduły B6–B7, to eksploatacyjna emisja CO₂ wskutek zużycia energii i wody na potrzeby użytkowników budynku. Etap końca życia (C1–C4) obejmuje emisję lub pochłanianie CO₂ związane z rozbiórką budynku, transportem do miejsca przetwarzania odpadów, przetworzenia odpadów oraz ich składowania. Finalnie, etap poza cyklem życia (D) obejmuje potencjalną emisję i pochłanianie CO₂ wynikające z ponownego użycia, recyklingu, odzysku energii lub składowania na wysypiskach materiałów powstających na etapach budowy (A4–A5), użytkowania (B2–B5) lub końca okresu eksploatacji (C1–C4). Obejmuje też potencjalne korzyści z redukcji CO₂ wskutek eksportu mediów w etapach użytkowania (B6–B8), takich jak generowana energia elektryczna lub oczyszczona woda [9]:

W ramach każdego z etapów ocena śladu węglowego przebiega wg ogólnego wzoru [8]:

$$GWP_i = \sum_j a_{i,j} \cdot GWP_{i,j}$$

gdzie:

GWP_i – sumaryczny ślad węglowy i -tego etapu cyklu życia budynku [kg CO₂e]

$a_{i,j}$ – ilość wykorzystanych produktów (materiałów, komponentów lub elementów budynku) lub usług (np. prace budowlane, transport) w ramach danego modułu, które wpływają na ślad węglowy [jednostka funkcyjna produktu lub usługi, np. kg, m², m³, km];

$GWP_{i,j}$ – jednostkowy ślad węglowy j -tego produktu lub usługi w danym module cyklu życia budynku [kg CO₂e na jednostkę funkcyjną produktu lub usługi].

Used building materials and embodied CO₂ emission

The embodied CO₂ emissions in construction materials result from the energy required for their production as well as from emissions generated during the manufacturing processes. Embodied energy can potentially be recovered at the end of a building's service life; however, this depends on the specific material and the feasibility of its reuse or recycling. A general principle is to reduce the use of materials with high embodied energy (and consequently high embodied CO₂ emissions), unless they contribute significantly to lowering operational CO₂ emissions (i.e., by reducing the operational energy demand of building users). The values of embodied CO₂ emissions for typical construction materials are presented in Table 1.

The analysis of the data contained therein indicates that materials with high embodied emissions may substantially contribute to the operational energy efficiency of a building due to their role in the thermal mass of the envelope (e.g., concrete, reinforced concrete, ceramic bricks) or in the thermal insulation of partitions (e.g., expanded polystyrene, mineral wool, glass wool). It is therefore necessary to evaluate each building individually and to verify design modifications both in terms of reducing embodied emissions and their impact on operational emissions. A further conclusion is that the calculated carbon footprint may vary depending on the used database, the manufacturer or the country of production of the same construction material. This highlights the clear necessity for the development and regular updating of national databases of CO₂ emission factors. Although early design stages do not allow for an accurate assessment of CO₂ emissions, these calculations can be refined as the project progresses, enabling the selection of more sustainable solutions.

Share of building elements in CO₂ emission

In simplified terms, it can be stated that the building elements having the greatest influence on CO₂ emissions are either those present in the largest quantities (in terms of volume, weight, or number) or those composed of materials with high embodied CO₂ emission factors (Table 1). The contribution

Użyte materiały budowlane a wbudowana emisja CO₂

Emisja CO₂ wbudowana w materiały budowlane wynika z energii potrzebnej do ich produkcji oraz emisji powstających w procesie wytwarzania. Energię wbudowaną można próbować odzyskać pod koniec okresu użytkowania budynku, ale zależy to od danego materiału i możliwości jego ponownego wykorzystania lub recyklingu. Generalną zasadą jest redukcja wykorzystania w budynku materiałów o dużej energii wbudowanej (dużej wbudowanej emisji CO₂), chyba że mają one istotny wpływ na eksploatacyjną emisję CO₂ (redukują ilość energii eksploatacyjnej zużytej na potrzeby użytkowników budynku). Wartości wbudowanej emisji CO₂ w typowe materiały budowlane przedstawia tabela 1. Z analizy danych w niej zawartych wynika, że materiały o dużej

wbudowanej emisji mogą odpowiadać w dużej mierze za eksploatacyjną efektywność energetyczną budynku ze względu na ich udział: w masie termicznej obudowy (beton, żelbet, cegły) lub w izolacyjności cieplnej jego przegród (styropian, wełna mineralna, wełna szklana). Konieczne jest więc rozpatrywanie każdego budynku indywidualnie i weryfikowanie wprowadzanych zmian pod kątem redukcji emisji wbudowanej oraz ich wpływu na emisję eksploatacyjną. Drugim wnioskiem jest to, że obliczony ślad węglowy może być różny w zależności od wykorzystanej bazy, od producenta czy od kraju produkcji tego samego materiału budowlanego. Istnieje więc wyraźna potrzeba przygotowywania krajowych baz wskaźników emisji CO₂ i ich aktualizacji. Wczesne etapy projektu budynku nie pozwalają na dokładną ocenę emisji CO₂, ale w miarę postępu prac obliczenia te można doprecyzować i wybrać lepsze rozwiązania.

Table 1. Embodied unitary carbon factors of selected building materials in different databases

*Based on [10, 11]
Tabela 1. Wbudowany jednostkowy ślad węglowy wybranych materiałów budowlanych wg różnych baz danych*

Opracowano na podstawie [10, 11])

Material	Embodied carbon footprint/ Wbudowany ślad węglowy [kg CO ₂ e/kg]	
	FoCA database/ baza danych FoCA [11]	ICE database/ baza danych ICE [10]
Concrete (C8/10–C16/20)/ Beton (C8/10–C16/20)	0.074–0.086	0.087–0.101
Reinforced concrete (C20/25–C32/40)/ Żelbet (C20/25–C32/40)	–	0.109–0.134
Cement (average)/ Cement (średnio)	0.66	0.84
Ceramic brick / Cegła	0.156	0.21
AAC block (600)/ Beton komórkowy (600)	0.313	0.28
Steel (rebar) / Stal zbrojeniowa	0.6	0.73
Glass / Szkło	1.55	1.44
Lime / Wapno	–	0.78
Wood (average) / Drewno (średnio)	–1.27	–1.03
Mineral wool / Wełna mineralna	0.688	1.25
Glass wool / Wełna szklana	0,303	1,533
Expanded polystyrene/ Styropian	3,45	4,532

Udział elementów budynku w emisji CO₂

W dużym uproszczeniu można powiedzieć, że największy wpływ na emisję CO₂ mają te elementy budynku, których jest najwięcej (objętościowo, wagowo lub ilościowo) lub te, które są wykonane z materiałów o wysokich wskaźnikach wbudowanej emisji CO₂ (tabela 1). Udział elementów we wbudowanej emisji CO₂ różnych typów budynków, który zawiera tabela 2, jest zróżnicowany, ale można też zauważyć pewne tendencje.





of building elements to the embodied CO₂ emissions of different building types, presented in Table 2, varies, but some trends can be observed.

The results indicate that, typically, foundations, ground floor construction, load-bearing elements (such as floors, frames, and columns), and external walls have the most significant impact on embodied CO₂ emissions, accounting in the analyzed cases for 60% (railway station), 47% (business center), 79% (office building), and 57% (single-family house) of the total value. This is attributable to both the considerable volumetric and weight share of these elements, as well as the fact that their contribution to CO₂ emissions results from the use of construction materials with potentially high carbon footprints. These include cement-

Przedstawione wyniki wskazują, że zazwyczaj fundamenty, konstrukcja parteru, elementy nośne (stropy, ramy, słupy) i ściany zewnętrzne mają największy wpływ na wbudowaną emisję CO₂ i w przedstawionych przypadkach stanowią odpowiednio 60% (dworzec), 47% (centrum biznesowe), 79% (budynek biurowy) i 57% (dom jednorodzinny) sumarycznej wartości. Wynika to z dużego udziału wagowo-objętościowego tych elementów oraz z faktu, że ich wpływ na emisję CO₂ jest skutkiem zastosowania w ich konstrukcji materiałów o potencjalnie wysokim śladzie węglowym zawierających cement (beton, elementy murowe, tynki, wylewki), stal (zbrojenie, elementy łączące), ceramikę (cegły, okładziny) oraz materiały izolacyjne (styropian, wełna mineralna i wełna szklana).

Table 2. Share of elements in the embodied CO₂ emission in different building types

Tabela 2. Udział elementów we wbudowanej emisji CO₂ w różnych typach budynków

Based on [9]

Opracowano na podstawie [9]

Building element/ Element budynku	Railway station/ Dworzec kolejowy [%]	Business centre/ Centrum biznesowe [%]	Office building/ Budynek biurowy [%]	Single-family passive house/ Budynek jednorodzinny pasywny [%]
Foundations / Fundamenty	23,6			14,0
Ground floor / Parter	14,3	25,9	24,6	26,5
Frame / Konstrukcja nośna	13,2	13,0	41,3	
Upper floors / Wyższe piętra	11,4		12,2	11,4
Stairs / Schody		1,7		
External walls / Ściany zewnętrzne	9,0	8,1	13,3	16,6
Building services / Prace budowlane	8,3	2,3		
Roof / Dach	6,5	17,2	0,5	5,9
Roads, paths and pavings/ Drogi, chodniki i nawierzchnie	4,1			
Basement retaining walls/ Mury oporowe piwnicy	3,6			
Internal walls / Ściany wewnętrzne	2,9	15,5	6,8	13,4
Finishes / Warstwy wykończeniowe	3,0		0,8	2,1
Doors and windows / Drzwi i okna	0,2		0,4	7,0
Miscellaneous / Inne				3,2
Landscaping / Kształtowanie krajobrazu		16,3		

Share in embodied CO₂ emissions [%] / Udział we wbudowanej emisji CO₂ [%]: □ 0–5; □ 5–10; □ 10–20; ■ >20

-based products (concrete, masonry units, plasters, screeds), steel (reinforcement and fasteners), ceramics (bricks, cladding), and insulating materials (expanded polystyrene, mineral wool and glass wool).

Reducing the building's embodied carbon footprint

Measures to reduce the operational carbon footprint of buildings are being implemented primarily through the tightening of energy performance requirements, which result in decreased energy demand and an increased share of renewable energy sources. In contrast, the reduction of embodied carbon requires an intensification of efforts. Increasingly comprehensive and freely accessible databases of embodied emissions of construction materials are now available in the form of Excel spreadsheets [10] or browser-based applications [11], which support the process of selecting appropriate design solutions and ma-

Redukcja wbudowanego śladu węglowego budynku

Działania mające na celu redukcję operacyjnego śladu węglowego budynków są realizowane m.in. przez sukcesywne zaostrzanie wymagań dotyczących efektywności energetycznej budynków, skutkujące zmniejszaniem ich zapotrzebowania na energię oraz zwiększaniem udziału energii ze źródeł odnawialnych. W przypadku redukcji wbudowanego śladu węglowego budynków wymagana jest jednak intensyfikacja prac. Są dostępne coraz lepsze, darmowe bazy danych wbudowanej emisji materiałów budowlanych w formie arkusza Excela [10] czy aplikacji przeglądarkowych [11], które wspomagają proces doboru właściwych rozwiązań i materiałów. Ważne jest jednak podejście ideowe, które pozwala całościowo spojrzeć na ten proces. Autor publikacji [12] przedstawił ideowy schemat postępowania, w kontekście redukcji wbudowanej emisji CO₂ w budynku, który zaleca ocenę podejmowanych decyzji w procesie doboru rozwiązań architek-



terials. However, it is equally important to adopt a conceptual framework that enables a holistic perspective on this process. The author of [12] proposed a conceptual scheme for addressing embodied CO₂ reduction in buildings, which recommends evaluating architectural, structural and installation related design decisions according to the following stages:

1) **Use less stuff** – this is the key stage due to the long-term effect resulting from the lower volume of materials incorporated into the building and, consequently, reduced CO₂ emissions. It involves the following steps:

- **Build nothing** – questioning whether new construction (building, structure, or component) is necessary or whether existing assets can be reused or modernized (e.g. retrofitting of existing buildings, reuse of existing structures or elements). An example is the deliberate omission of finishing layers where they are not essential (e.g., interior plaster in communication areas, evacuation routes, utility or garage spaces).

- **Build less** – considering the reuse of previously utilized materials or components (e.g., reclaimed bricks for partition walls [13]); refurbished (e.g., wooden façade panels) or repurposed (e.g., old façade glazing used as leaves for internal doors [14]); or applying architectural solutions aimed at maximizing the use of building space (shared or multifunctional spaces).

- **Build clever** – employing durable materials and maximizing structural efficiency (minimizing unnecessary load-bearing capacity reserves and reducing underutilized elements).

- **Build efficiently** – reducing the use of elements with high embodied carbon impact (focusing on “major contributors” such as components in large quantities made of high-carbon materials), and replacing them with materials of low embodied CO₂ (e.g., natural, recycled or locally available materials).

- **Minimise waste** – for example, reducing on-site construction waste through the use of prefabricated elements.

2) **Specify low carbon** – employing low-carbon materials such as low-emission concrete, recycled concrete aggregate, recycled steel, or air-dried bricks for partition walls.

3) **Offset** – through two main approaches:

- **Removal** – currently through afforestation or reforestation, with future possibilities including atmospheric CO₂ capture and storage technologies.

- **Reduction** – by minimizing or preventing emissions by other people achieved by investing in renewable energy production, Smart Home technologies, or peatland restoration (degraded peatlands worldwide currently emit over 1 Gt CO₂e annually [12]).

Conclusion

If only 28% of CO₂ emissions from the construction sector (11% of global CO₂ emissions) [15] are attributed to embodied carbon, why is it so significant? This part of total CO₂ emissions is released into the atmosphere during the construction phase of a building, rather than over several decades of operation, and its reduction can have a substantial impact on slowing the effects of climate change. Moreover, the global energy infrastructure is becoming increasingly cleaner and is increasingly

tonicznych, budowlanych i instalacyjnych w budynku w następujących etapach:

1) **używaj mniej materiałów** (ang. *use less stuff*) – jest to kluczowy etap ze względu na długotrwały efekt wynikający z mniejszej ilości wbudowanych produktów w budynek i w efekcie mniejszą emisję CO₂. W jego ramach należy prze-myśleć następujące kroki:

- **nie buduj nic** (ang. *build nothing*) – czyli poszukiwanie odpowiedzi na pytanie, czy potrzebne jest budowanie nowego (budynek, konstrukcja lub element) czy można wykorzystać już coś istniejącego (modernizacja budynku, istniejące konstrukcje lub elementy), przykładem może być celowe niewykonanie warstw wykończeniowych tam, gdzie nie są one niezbędne (tynki wewnętrzne w przestrzeniach komunikacyjnych, ewakuacyjnych, gospodarczych, garażowych),

- **buduj mniej** (ang. *build less*) – rozważenie możliwości wykorzystania ponownie materiałów lub elementów już raz wykorzystanych (np. cegły rozbiórkowej do budowy ścian działowych [13]); po odnowieniu (np. drewniane panele elewacyjne) lub przez nadanie im nowej funkcji (np. stare szyby z fasady jako skrzydła drzwi wewnętrznych [14]) czy zastosowanie architektonicznych działań w celu maksymalizacji wykorzystania przestrzeni w budynku (wspólne lub mieszane wykorzystanie przestrzeni);

- **buduj mądrze** (ang. *build clever*) – stosowanie materiałów trwałych, wysoki stopień wykorzystania konstrukcji (minimalizacja zbędnego zapasu nośności, redukcja elementów słabo wyťažonych);

- **buduj efektywnie** (ang. *build efficiently*) – redukcja elementów o wysokim wpływie na wbudowaną emisję CO₂ (spojrzenie na „duże” pozycje – elementy o dużej liczbie sztuk, z materiałów o dużym śladzie węglowym), zamiana na materiały o niskiej wbudowanej emisji CO₂ (materiały naturalne, z recyklingu czy dostępne lokalnie);

- **minimalizuj odpady** (ang. *minimise waste*), np. redukcja części prac na placu budowy przez stosowanie elementów prefabrykowanych;

2) **używaj materiałów niskoemisyjnych** (ang. *specify low carbon*) – stosowanie materiałów o obniżonym śladzie węglowym, np. betonu niskoemisyjnego, gruzu betonowego jako kruszywa, stali z recyklingu, cegieł suszonych do ścian działowych;

3) **zrównoważ emisję CO₂** (ang. *offset*), stosując dwa główne sposoby:

- **usuwanie** – obecnie polegające na zalesianiu lub ponownym zalesianiu terenów, a w przyszłości może pojawić się sposoby wychwytywania CO₂ z atmosfery i składowania go;

- **redukcję emisji** – polegającą na minimalizacji lub zapobieganiu emisji „innych ludzi” przez np. inwestycje w produkcję energii z OZE, rozwiązania Smart Home czy odnowę torfowisk (zniszczone torfowiska na całym świecie emitują obecnie ponad 1 Gt CO₂e rocznie [12]).

Podsumowanie

Skoro tylko 28% emisji CO₂ z sektora budowlanego (11% globalnej emisji CO₂) [15] to emisja wbudowana, to dlaczego jest tak istotna? Ta składowa całkowitej emisji CO₂ jest uwalniana do atmosfery już w czasie wznoszenia budynku, a nie w ciągu



based on renewable energy sources. Continuous efforts by the architectural, construction, and installation sectors over the past several decades have led to significant improvements in the design, construction, and operation of energy-efficient buildings, which has resulted in a reduction of operational CO₂ emissions. As operational CO₂ emissions continue to decrease, embodied carbon will constitute an increasingly larger proportion of the total carbon footprint. It is estimated that by 2050, nearly half of the carbon footprint of new buildings will originate from the building construction process and the production of building materials [16]. Canada, Sweden, and Norway already report embodied carbon contributions of approximately 50% [16], reflecting the intensive efforts these countries have undertaken to reduce the use of fossil fuels and transition to renewable energy sources. If civilization aims to slow global warming and mitigate its adverse effects, it appears that current perspectives on the design, construction, and operation of buildings must be reassessed. Gradually but effectively, beyond ensuring structural safety and durability, the priority in selecting building solutions and materials is increasingly defined by their effective impact on the carbon footprint. As long as construction materials with zero or negative carbon emissions over their entire life cycle do not exist, the construction of a new building will inevitably result in additional emissions into the atmosphere. In the short term, balancing greenhouse gas emissions through removal and reduction can yield noticeable effects. However, it should be remembered that emission offsets are limited by the availability of land area. At the current global emission level (42 Gt CO₂e/year), a forest covering the combined area of Russia, China, and the USA would be required to reabsorb these emissions [12]. Therefore, it falls to engineers to reduce material consumption in a way that, while maintaining reasonable design solutions, it will minimize environmental impact.

kilkudziesięciu lat jego eksploatacji, a jej ograniczenie może mieć duży wpływ na spowolnienie skutków zmiany klimatu. Dodatkowo, światowa infrastruktura energetyczna staje się coraz czystsza i coraz częściej bazuje na odnawialnych źródłach energii. Sukcesywna praca sektora architektonicznego, budowlanego i instalacyjnego w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat przyniosła znaczną poprawę jakości projektowania, wykonawstwa i eksploatacji budynków efektywnych energetycznie, co przełożyło się na zmniejszenie emisji CO₂ wskutek eksploatacji budynków. Dalsza redukcja eksploatacyjnej emisji CO₂ będzie powodować, że emisja wbudowana będzie stanowić coraz większą część całości i szacuje się, że do 2050 r. prawie połowa śladu węglowego w nowym budownictwie będzie pochodzić z procesu powstawania budynku oraz produkcji materiałów budowlanych [16]. Kanada, Szwecja i Norwegia już odnotowują udział emisji wbudowanej CO₂ na poziomie 50% [16], co jest następstwem intensywnych prac, jakie te kraje wykonały przy ograniczaniu wykorzystania paliw kopalnych i przejścia na odnawialne źródła energii.

Jeżeli zależy nam, jako cywilizacji, na spowolnieniu zjawiska ocieplenia klimatu oraz zmniejszeniu jego negatywnych skutków, to wydaje się, że obecne spojrzenie na sposób projektowania, wykonawstwa i eksploatacji budynków musi ulec pewnemu przewartościowaniu. Powoli, aczkolwiek skutecznie, priorytetem w doborze rozwiązań i materiałów w budynku, oprócz zapewnienia bezpieczeństwa i trwałości konstrukcji, staje się przede wszystkim ich efektywny wpływ na ślad węglowy. Póki nie będą istnieć materiały budowlane o zerowej lub ujemnej emisji CO₂ przez cały cykl ich życia, to powstanie nowego budynku zawsze będzie skutkować dodatkową emisją do atmosfery. Patrząc krótkoterminowo, równoważenie emisji gazów cieplarnianych przez usuwanie i redukcję da zauważalne efekty. Należy jednak pamiętać, że równoważenie emisji jest ograniczone wielkością dostępnego terenu. Przy obecnej emisji (42 Gt CO₂e/rok), potrzebny byłby las o powierzchni Rosji, Chin i USA łącznie, aby ją ponownie wchłonąć [12]. Stąd w gestii inżynierów jest zmniejszenie zużycia materiałów tak, aby zachowując rozsądnosc rozwiązań, minimalizować ich wpływ na środowisko.

Received: 23.04.2025

Revised: 23.04.2025

Published: 19.09.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 23.04.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 23.04.2025 r.

Opublikowano: 19.09.2025 r.

Literatura

- [1] <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level> (dostęp 29.03.2025 r.)
- [2] <https://naukaoklimacie.pl/wykres-na-dzis/czy-juz-przekroczyliśmy-prog-półtora-stopnia> (dostęp 29.03.2025 r.)
- [3] United Nations Environment Programme (2020). 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi
- [4] <https://inzynierbudownictwa.pl/slady-weglowy-w-budownictwie/> (dostęp 1.04.2025 r.)
- [5] <https://www.iea.org/articles/the-challenge-of-reaching-zero-emissions-in-heavy-industry> (dostęp 30.03.2025 r.)
- [6] Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z 21 marca 2024 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo budowlane, Dz. U. 2024, poz. 725.
- [7] Koper M. Przegląd metodyk i standardów obliczania śladu węglowego budynków, Inżynier Budownictwa, 2025; (1):62–65.
- [8] PN-EN 15978:2012 Zrównoważone obiekty budowlane. Ocena środowiskowych właściwości użytkowych budynków. Metoda obliczania.
- [9] RICS Professional Standard, Whole life carbon assessment for the built environment, Global 2nd edition, Version 3, September 2023 (dokument PDF)
- [10] Circular Ecology, The Inventory of Carbon and Energy (ICE) Database, Educational, v4.0, Dec 202, <https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html> (dostęp 29.04.2025 r.)
- [11] Platforma FoCA, Oblicz ślad węglowy budynku w zakresie faz A1-A3 <https://foca.plgbc.org.pl>, (dostęp 30.04.2025 r.)
- [12] [12] Arnold W. A short guide to carbon offsetting, The Structural Engineer Vol. 99, 7, 16–17, 2021; <https://doi.org/10.56330/LAUS8964>
- [13] <https://www.snohetta.com/projects/powerhouse-kjorbo> (dostęp 1.04.2025 r.)
- [14] https://www.architecture2030.org/2030_challenges/embodied/ (dostęp 29.03.2025 r.)
- [15] <https://oneclicklca.com/en/resources/articles/embodied-carbon-vs-operational-carbon> (dostęp 30.04.2025).