

dr hab. inż. Krzysztof Zima, prof. PK¹⁾

ORCID: 0000-0001-5563-5482

mgr inż. Apolonia Grącka^{1)*}

ORCID: 0000-0002-8535-9316

Carbon footprint of a sports hall building – discrepancies between reference buildings and the actual

Emisja śladu węglowego budynku hali sportowej – rozbieżności pomiędzy budynkami referencyjnym a rzeczywistym

DOI: 10.15199/33.2024.09.08

Abstract. The aim of the article is to analyze changes in the global warming potential coefficient depending on design solutions during the building's life cycle. Replacing silicate blocks insulated with mineral wool with sandwich panels reduced CO₂e/m² emissions by 14% compared to the base model. The model taking into account actual material transport distances showed the lowest emission reduction. The article emphasizes the need to use ecological building materials and the differences depending on the advancement of the project.

Keywords: greenhouse gases; carbon footprint of materials; building carbon footprint; building life cycle.

Streszczenie. W artykule zaprezentowano analizę zmian współczynnika potencjału globalnego ocieplenia w zależności od rozwiązań projektowych w cyklu życia budynku. Zamiana silikatowych bloczków docieplonych wełną mineralną na płyty warstwowe zmniejszyła emisję CO₂e/m² o 14% w porównaniu z modelem bazowym. Model uwzględniający rzeczywiste odległości transportu materiałów wykazał najmniejszą redukcję emisji. W artykule podkreślono konieczność stosowania ekologicznych materiałów budowlanych i różnice zależne od zaawansowania projektu.

Słowa kluczowe: gazy cieplarniane; ślad węglowy materiałów; ślad węglowy budynku; cykl życia budynku.

Assessment of the construction sector impact on the environment is becoming increasingly important, as the existing connections between the economy and the environment, consisting in the extraction and processing of natural resources and the emission of pollutants and waste into the environment, cause its degradation, posing a threat to further civilization development. Thanks to the development of appropriate methods and the development of specialized tools, decision-makers can obtain information on the flow of harmful substances in the environment and analyze specific environmental problems, such as global warming, in terms of the entire economy or its individual elements. The information obtained supports decision-making processes. Considerations regarding the impact of construction on the environment can be considered at the meso scale (local market of building materials, housing estate, city), at the macro scale (entire construction sector, national territory) and at the micro scale (single construction material, component, building, one supplier). A method supporting decisions made in this area is the commonly used LCA (*Life Cycle Assessment*) analysis of pro-ecological projects, which has been used in the construction sector since 1990. It is used to assess the

O cenie wpływu sektora budownictwa na środowisko zyskuje coraz większe znaczenie, gdyż istniejące powiązania gospodarki ze środowiskiem polegające na wydobywaniu i przetwarzaniu zasobów naturalnych oraz emisji zanieczyszczeń i odpadów do środowiska powodują jego degradację, stwarzając zagrożenie dla dalszego rozwoju cywilizacyjnego. Dzięki opracowaniu odpowiednich metod i rozwojowi specjalistycznych narzędzi decydenci mogą pozyskiwać informacje na temat przepływu substancji szkodliwych w środowisku i analizować konkretne problemy, takie jak globalne ocieplenie, w ujęciu całej gospodarki lub poszczególnych jej elementów. Uzyskane informacje wspierają procesy decyzyjne.

Rozważania dotyczące wpływu budownictwa na środowisko można rozpatrywać w skali mezo (lokalny rynek materiałów budowlanych, osiedle, miasto), makro (cały sektor budowlany, terytorium państwa) oraz mikro (pojedynczy materiał budowlany, komponent, budynek, jeden dostawca). Metodą wspierającą podejmowane w tym obszarze decyzje jest powszechnie stosowana analiza oceny projektów proekologicznych LCA (*Life Cycle Assessment*), wykorzystywana w sektorze budownictwa od 1990 r. Służy ona do oceny wpływu materiałów budowlanych na środowisko na wszystkich etapach cyklu życia obiektu [1], a więc od kłóyski do grobu z oddzielnym podsumowaniem etapów produktu, procesu

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Ładowej

^{*}) Correspondence address: apolonia.gracka@doktorant.pk.edu.pl

environmental impact of building materials at different stages of the construction project life cycle, even early in the design development stage [1], taking into account the cradle to grave life cycle stages with separate summaries for the product stage, construction process, use stage and end of life. The method is also the basis for the development of new approaches, e.g. hybrid ones [2, 3].

Researchers have undertaken many attempts and analyzes indicating the impact of buildings or individual materials on the environment or the impact of construction methods and strategies on the environment [4 ÷ 11]. Scientists present their own unique estimators and methods for calculating CO₂ equivalent [12, 13], and several carbon footprint models, calculators and programs estimating CO₂ equivalent emissions based on the LCA method are available on the Internet [14], but not all of them are based on unified data or methods, causing discrepancies in results. Due to the fact that the traditional detailed method of analyzing inventoried objects is more widely used at the design stage of detailed construction drawings or for a precisely defined work item, it is necessary to develop a method appropriate to provide feedback on the project at the stage of creating the project concept. Attempts have been made to create a calculation method based on schematic solutions based on the adoption of a „building element” as the basic unit [15] or at an early design stage [16]. Additionally, the OneClick LCA program introduced a similar solution based on reference objects – Carbon Designer 3D, which was used as part of the analyzes carried out.

The aim of the article is a multi-variant analysis of changes in the global warming potential factor depending on the design solutions used, based on an existing sports hall facility located in central Poland. The work examined the impact of material solutions changes, adjusting the distance of material supply and the partial use of ecological concretes based on recycled ingredients. Calculations of actual solutions for the base object and variant models were compared with reference objects created in the Carbon Designer 3D OneClick LCA program in order to observe the discrepancies in emission levels, the possibility of wider use of ready-made diagrams in the program in Polish conditions and to verify the quality of the proposed schematic solutions.

Carbon footprint

Calculating the carbon footprint of construction is crucial in identifying areas where changes can be made to reduce greenhouse gas emissions, which can lead to the optimization of designs for sustainability. It also helps increase awareness of designers, developers and clients about the environmental impact of buildings and supports more informed decisions about material, energy system and design choices to reduce the overall carbon footprint of buildings and infrastructure. In the context of construction, carbon footprint refers to the assessment of the total impact of greenhouse gas emissions associated with the construction process, operation and demolition of a building. It consists of several key elements. Following the stages of a building's life cycle, the first stage

konstrukcyjnego, użytkowania i końca życia. Metoda stanowi również podstawę rozwoju nowych podejść, np. hybrydowych [2, 3].

Badacze podjęli wiele prób i analiz wskazujących wpływ budynków lub poszczególnych materiałów na środowisko, a także wpływ metod i strategii budowy na środowisko [4 ÷ 11]. Naukowcy przedstawiają własne opracowania estymatorów oraz metody obliczania ekwiwalentu CO₂ [12, 13], a w internecie dostępnych jest kilka modeli śladu węglowego, kalkulatorów oraz programów szacujących emisję ekwiwalentu CO₂ bazujących na metodzie LCA [14]. Nie wszystkie jednak wykorzystują ujednolicone dane oraz metody i dlatego występują rozbieżności w wynikach. Ze względu na to, że tradycyjna szczegółowa metoda analizy zinwentaryzowanych obiektów jest najczęściej stosowana na etapie projektowania, szczegółowych rysunków konstrukcyjnych lub przy dokładnie sprecyzowanym przedmiocie robót, niezbędne jest opracowanie metody odpowiedniej do zapewnienia informacji zwrotnych na temat projektu na etapie tworzenia koncepcji projektu. Podjęto próbę stworzenia metody obliczeń z wykorzystaniem schematycznych rozwiązań bazujących na przyjęciu „elementu budynku” jako jednostki podstawowej [15], czy też na wczesnym etapie projektowania [16]. Dodatkowo program OneClick LCA wprowadził podobne rozwiązanie bazujące na obiektach referencyjnych – Carbon Designer 3D, które zostało wykorzystane w ramach przeprowadzonych analiz.

W artykule zaprezentowano wielowariantową analizę zmian współczynnika potencjału globalnego ocieplenia w zależności od zastosowanych rozwiązań projektowych na podstawie istniejącego obiektu hali sportowej zlokalizowanej w centralnej Polsce. W pracy zbadano wpływ zmiany rozwiązań materiałowych, dostosowanie dystansu zaopatrzenia w materiały oraz częściowe wykorzystanie betonów ekologicznych bazujących na składnikach pochodzących z recyklingu. Obliczenia rzeczywistych rozwiązań dotyczących obiektu bazowego oraz modeli wariantowych porównano z obiektami referencyjnymi stworzonymi w programie Carbon Designer 3D OneClick LCA w celu zaobserwowania rozbieżności wielkości emisji, możliwości powszechnego stosowania gotowych schematów w warunkach polskich oraz zweryfikowania jakości proponowanych rozwiązań.

Ślad węglowy

Obliczanie śladu węglowego w budownictwie ma kluczowe znaczenie podczas identyfikacji obszarów, w których można wprowadzić zmiany w celu zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych oraz optymalizacji projektów pod kątem zrównoważonego rozwoju. Pomaga to również zwiększyć świadomość projektantów, deweloperów i klientów na temat wpływu budynków na środowisko naturalne oraz wspiera bardziej świadome decyzje dotyczące wyboru materiałów, systemów energetycznych i projektów, aby zmniejszyć całkowity ślad węglowy budynków i infrastruktury. Ślad węglowy odnosi się do oceny całkowitego wpływu emisji gazów cieplarnianych związanych z procesem budowy, eksplo-

contributing to the highest embedded carbon footprint emissions is the **production of building materials**. This element includes greenhouse gas emissions related to the extraction, production and transport of building materials, the next stage is the construction stage. Greenhouse gas emissions related to the **construction stage**, transport of materials to the construction site, energy used during the construction process itself, and gases emitted by machines and equipment used on the construction site.

The stage with the highest operational carbon footprint is **service life**. It covers the energy consumption of a building during its operation, both for heating, cooling, lighting and for the operation of electrical equipment. Emissions can come both from the direct combustion of fuels in the case of fossil fuel-based heating systems, and from the consumption of electricity, which can be produced from various sources with different emissivity. The final stage is **demolition and disposal**. The process of demolition and disposal of a building also involves greenhouse gas emissions, especially in the case of improper disposal of building materials, which can lead to emissions of methane from degrading organic materials or CO₂ from waste incineration processes. At this stage, the aspect of recycling can also be taken into account, contributing to the reduction of carbon footprint emissions. When recycled materials are used for construction, only emissions from the transport of the element and its assembly are taken into account, the built-in carbon footprint of the product is omitted.

Subject of research

The analyzed sports hall building (Fig. 1) is a single-story building with a partial basement. The structure of the building's frame is based on reinforced concrete columns and beams with predominant wall filling made of silicate blocks. The roof structure is made of glued wood: building area 1710,23 m², usable area 1707,10 m², usable basement area 135,00 m², usable area of the ground floor 1572,10 m², height of the sports hall 10,77 m.

Software used, computational process. OneClick LCA is a tool for calculating the carbon footprint of buildings, which is used, among others, in the Level(s) system, which is a reference framework for sustainable construction developed by the European Commission. Calculations in the OneClick LCA

atacją i rozbiórką budynku. Składa się z kilku kluczowych elementów. Podążając etapami cyklu życia budynku, pierwszym stadium przyczyniającym się do największego wbudowanego śladu węglowego jest **produkcja materiałów budowlanych**. Obejmuje ona emisję gazów cieplarnianych związaną z wydobyciem, produkcją i transportem materiałów budowlanych. Kolejny jest **etap budowy**. Związana jest z nim emisja gazów cieplarnianych podczas transportu materiałów na plac budowy oraz samego procesu budowy, a także gazy emitowane przez maszyny i urządzenia używane na placu budowy.

Etapem wykazującym największy operacyjny ślad węglowy jest **okres użytkowania**. Obejmuje zużycie energii przez budynek podczas eksploatacji, zarówno do ogrzewania, chłodzenia, oświetlenia, jak i do zasilania sprzętu elektrycznego. Emisja może pochodzić zarówno z bezpośredniego spalania paliw w przypadku systemów ogrzewania na bazie paliw kopalnych, jak i ze zużycia energii elektrycznej, która może być wytwarzana z różnych źródeł o różnej emisyjności. Ostatnim stadium jest **rozbiórka i utylizacja budynku**. Ten etap wiąże się z emisją gazów cieplarnianych, szczególnie w przypadku niewłaściwej utylizacji materiałów budowlanych, która może prowadzić do emisji metanu z degradujących się materiałów organicznych lub CO₂ z procesów spalania odpadów. Na tym etapie można również uwzględnić aspekt recyklingu przyczyniający się do redukcji emisji śladu węglowego. W sytuacji wykorzystania do budowy materiałów pochodzących z recyklingu uwzględniana jest jedynie emisja pochodząca z transportu elementów oraz ich montażu, natomiast pomijany jest wbudowany ślad węglowy produktu.

Badania

Analizowany budynek hali sportowej (rysunek 1) jest parterowy, częściowo podpiwniczony. Konstrukcja szkieletu budynku bazuje na słupach i belkach żelbetowych z przeważającym wypełnieniem ścian z bloczków silikatowych. Konstrukcja dachu wykonana jest z drewna klejonego. Powierzchnia zabudowy wynosi 1710,23 m², powierzchnia użytkowa 1707,10 m², powierzchnia użytkowa piwnicy 135,00 m², powierzchnia użytkowa parteru 1572,10 m², a wysokość hali sportowej 10,77 m.

Proces obliczeniowy. Do obliczania śladu węglowego budynków wykorzystano oprogramowanie **OneClick LCA**, które stosuje się m.in. w systemie Level (s), będącym ramą referencyjną do-

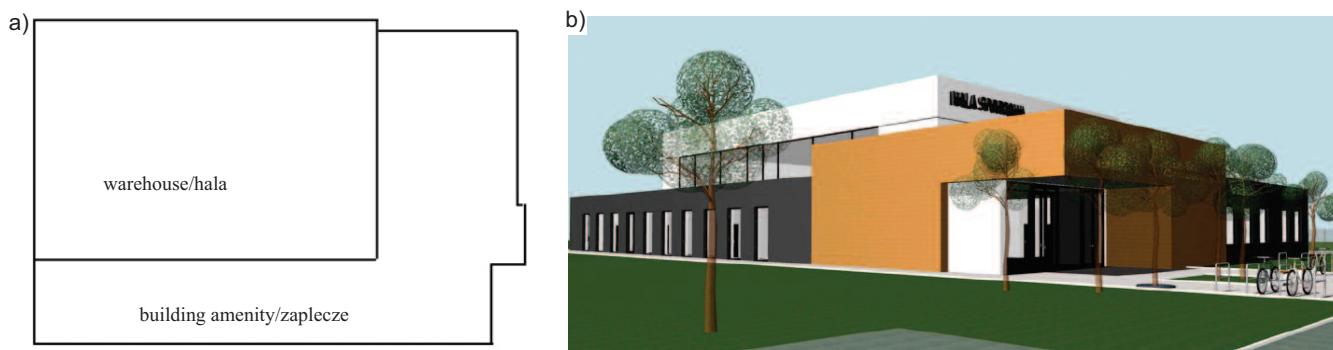


Fig. 1. Sketch (a) and visualization (b) of the building used for calculations

Rys. 1. Szkic (a) oraz wizualizacja (b) budynku wykorzystanego do obliczeń

program are consistent with the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, which is standardized by the ISO 14040 and ISO 14044 standards [17, 18] and with the European standard EN15804.

The calculation process in OneClick LCA based on the Level(s) rating system includes several key steps such as defining the scope of the analysis, collecting data, selecting appropriate environmental indicators, and analyzing the results throughout the building's life cycle. Calculating the carbon footprint is done by transforming inventory data (e.g. quantity of materials, energy consumption) into environmental indicators, such as greenhouse gas emissions expressed in carbon dioxide equivalent CO_2 (CO_2e). The first step is to determine the scope of the analysis, covering individual stages of the building's life cycle (A1-A5, B1-B7, C1-C4, and D), starting from the production of building materials, through construction, operation, to dismantling, disposal and possible recovery. In this step, the building's function and technical parameters, such as usable area, location, climate, etc. should be defined. Data is then collected on the consumption of building materials, energy consumption during operation, greenhouse gas emissions related to transport, etc. This data may come from various sources, such as manufacturers' catalogues, literature, industry standards, environmental declarations or the results of field tests.

Based on the collected data and selected environmental indicators, a **building life cycle model is created in the OneClick LCA program**. This model takes into account all important stages of the building's life cycle and assigns them appropriate greenhouse gas emission values. In the last step, the results are analyzed by comparing different design scenarios, building materials, energy systems, etc. affecting the obtained environmental analysis results.

Scope of analyzes performer. In order to introduce the correct parameters and quantities of materials used in the life cycle calculation process of the sports hall, a detailed bill of quantities was used. The scope of the analyzes does not include finishing materials, water consumption, activities on the construction site other than earthworks, installations and emissions related to the building equipment. To define energy consumption, the values obtained as a result of calculations of the energy performance of the sports hall building were used, performed in accordance with the methodology [19] for determining energy performance, based on data obtained from the tender documentation. The calculation period was adopted in accordance with the approximate designed service life for the 4th category of the design service life according to the PN-EN 1990:2004 standard [20], equal to 50 years.

As part of the research, an analysis of the actual base building was prepared in the OneClick LCA program for the above-mentioned parameters, four modification propositions and two reference models based on the base data and modifications described in Table 1. All models were compared in terms of changes in greenhouse gas emissions expressed in carbon dioxide equivalent (CO_2e). Detailed material parameters were taken from the database integrated with the program based on information available in the design documentation.

tycząca zrównoważonego budownictwa, opracowaną przez Komisję Europejską. Kalkulacje w programie OneClick LCA są zgodne z metodą analizy cyklu życia (LCA – *Life Cycle Assessment*), która jest standaryzowana przez normy ISO 14040 i ISO 14044 [17, 18] oraz z europejską normą EN 15804.

Proces obliczeń w OneClick LCA bazujący na systemie oceny Level(s) obejmuje kilka kluczowych kroków, takich jak: określenie zakresu analizy; zbieranie danych; wybór odpowiednich wskaźników środowiskowych oraz analiza wyników w całym cyklu życia budynku. Obliczanie śladu węglowego odbywa się przez przekształcenie danych inwentaryzacyjnych (np. ilości materiałów, zużycia energii) na wskaźniki środowiskowe, takie jak emisja gazów cieplarnianych wyrażona ekwiwalentem dwutlenku węgla CO_2 (CO_2e). Pierwszym krokiem jest określenie zakresu analizy, obejmującego poszczególne etapy cyklu życia budynku (A1-A5, B1-B7, C1-C4 oraz D), począwszy od produkcji materiałów budowlanych, przez konstrukcję, eksploatację, aż do jego demontażu, utylizacji i ewentualnego odzysku. W tym kroku należy także zdefiniować funkcję budynku oraz parametry techniczne, takie jak powierzchnia użytkowa, lokalizacja, klimat itp. Następnie zbierane są dane dotyczące: zużycia materiałów budowlanych oraz zużycia energii w trakcie eksploatacji; emisji gazów cieplarnianych związanych z transportem itp. Dane te mogą pochodzić z różnych źródeł, takich jak katalogi producentów, literatura, normy branżowe, deklaracje środowiskowe czy też wyniki badań terenowych.

Na podstawie zebranych danych oraz wybranych wskaźników środowiskowych tworzy się **model cyklu życia budynku w programie OneClick LCA**, który uwzględnia wszystkie istotne etapy cyklu oraz przypisuje im odpowiednie wartości emisji gazów cieplarnianych. W ostatnim kroku przeprowadza się analizę wyników, porównując różne scenariusze projektowe, materiały budowlane, systemy energetyczne itp. wpływające na otrzymane wyniki analizy środowiskowej.

Zakres przeprowadzonych analiz. W celu wprowadzenia poprawnych parametrów i ilości materiałów użytych w procesie obliczeń cyklu życia hali sportowej wykorzystano szczegółowy przedmiar robót. Zakres analiz nie obejmuje materiałów wykończeniowych, zużycia wody, czynności na placu budowy innych niż roboty ziemne, instalacji oraz emisji związanych z wyposażeniem budynku. Do zdefiniowania zużycia energii wykorzystano wartości otrzymane w wyniku przeprowadzonych obliczeń charakterystyki energetycznej budynku hali sportowej wykonanych zgodnie z metodologią [19] na podstawie danych uzyskanych z dokumentacji przetargowej. Okres obliczeniowy równy 50 lat przyjęto zgodnie z projektowanym okresem użytkowania wg normy PN-EN 1990:2004 [20].

W ramach badań przeprowadzono analizę budynku rzeczywistego – bazowego w programie OneClick LCA wymienionych parametrów, z wykorzystaniem czterech propozycji modyfikacji oraz dwóch modeli referencyjnych opisanych w tabeli 1. Wszystkie modele porównano pod kątem zmian emisji gazów cieplarnianych wyrażonych ekwiwalentem dwutlenku węgla (CO_2e). Szczegółowe parametry materiałowe przyjęto z bazy danych zintegrowanych z programem na podstawie informacji dostępnych w dokumentacji projektowej.

Table 1. Models analyzed

Tabela 1. Modele poddane analizie

Model	Core structure/ Konstrukcja szkieletu	Description of materials/modification introduced/Opis materiałów/wprowadzona modyfikacja
0 – real base building/ 0 – budynek rzeczywisty – bazowy	reinforced concrete/ beton zbrojony	reinforced concrete beams, columns, reinforced concrete floors and partly made of pre-stressed concrete slabs, prefabricated lintels, walls made of silicate blocks, roof made of glued wood/belki, słupy żelbetowe, podłogi żelbetowe oraz częściowo z płyt strunobetonowych, nadproża prefabrykowane, ściany z bloczków silikatowych, dach z drewna klejonego
1 – modification 1/ 1 – modyfikacja 1	steel/stal	modification of vertical elements – replacement of columns with steel ones and filling with sandwich panels/ modyfikacja elementów wertykalnych – zamiana słupów na stalowe oraz wypełnienie z płyt warstwowych
2 – modification 2/ 2 – modyfikacja 2	reinforced concrete/ beton zbrojony	modification of the concrete mix – the use of ecological concretes based on recycled ingredients/modyfikacja mieszanki betonowej – zastosowanie betonów ekologicznych bazujących na składnikach z recyklingu
3 – modification 3/ 3 – modyfikacja 3	reinforced concrete/ beton zbrojony	modification of the wall cross-section – Use of sandwich panel filling/modyfikacja przekroju ściany – wykorzystanie wypełnienia z płyt warstwowych
4 – modification 4/ 4 – modyfikacja 4	reinforced concrete/ beton zbrojony	modification of material transport distance – shortening the transport route due to the availability of some materials in the immediate area/modyfikacja odległości transportu materiałów – skrócenie drogi transportu ze względu na dostępność niektórych materiałów w najbliższej okolicy
5 – Reference model/ 5 – Model referencyjny	reinforced concrete/ beton zbrojony	as in the real base building without exact material and quantitative values – estimate/tak jak w budynku rzeczywistym – bazowym bez dokładnych wartości materiałowych oraz ilościowych – oszacowanie
6 – Reference model/ 6 – Model referencyjny	steel/stal	as in modification 1 without exact material and quantitative values – estimate/tak jak w modyfikacji 1 bez dokładnych wartości materiałowych oraz ilościowych – oszacowanie

Analysis results

As part of the work, 7 different models illustrating the amounts of emitted CO₂e equivalent were analyzed, depending on the adopted design assumptions and the degree of accuracy of data characterizing the facility. According to common knowledge confirmed in many scientific works [21 ÷ 23], materials such as steel or concrete mixtures contribute to the highest shares of carbon footprint emissions in the facility due to energy-intensive production processes and emissions related to the extraction and processing of raw materials, and additionally high percentage of their use in the construction of many facilities and high specific emissions per m² of usable area. The diversity of embedded carbon footprint emissions in phases A1 – A3 of the materials used in modifications 1 – 3 is presented in Fig. 2. Model analyzes also indicated significant emissions from the materials constituting the walls. Both silicate blocks and sandwich panels have largely contributed to the increase in CO₂ emissions. The blocks themselves emit as much as 120,000 kg of CO₂e, and the sandwich panels emit 77,000 kg of CO₂e for the analyzed hall. The materials generating the highest carbon footprint in the developed models are summarized in Table 2.

Despite the high emissivity of steel, model 1 shows that replacing the vertical elements themselves, i.e. columns with steel ones, and in particular the wall fillings with sandwich panels, allowed for a reduction in kg CO₂e/m²e emissions by

Wyniki analiz

Analizie poddano 7 skrajnie różnych modeli obrazujących wielkość emitowanego ekwiwalentu CO₂e w zależności od przyjętych założeń projektowych oraz stopnia dokładności danych charakteryzujących obiekt. Zgodnie z powszechną wiedzą, potwierdzoną w wielu pracach naukowych [21 ÷ 23], materiały takie jak stal czy też mieszanki betonowe mają największy wpływ na ślad węglowy w obiekcie ze względu

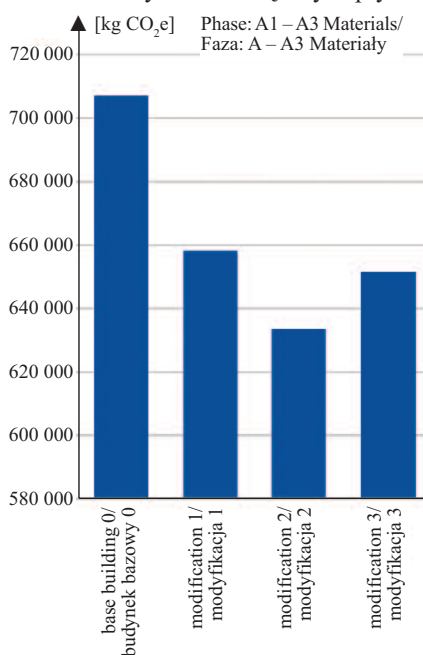


Fig. 2. Summary of the results of the embedded carbon footprint of materials in phases A1 – A3 used in models 0 – 3 [kg CO₂e/m²]

Rys. 2. Zestawienie wyników emisji śladu węglowego wbudowanego w fazach A1 – A3 materiałów wykorzystanych w modelach 0 – 3 [kg CO₂e/m²]

na energochłonne procesy produkcji oraz emisję związaną z wydobyciem i przetwarzaniem surowców, a dodatkowo dużą ilość ich wykorzystania przy wznoszeniu wielu obiektów oraz wysokie emisje jednostkowe na m² powierzchni użytkowej. Zróżnicowanie emisji śladu węglowego w fazach A1 – A3 materiałów wykorzystanych w modyfikacjach 1 – 3 przedstawiono na rysunku 2. Analizy modeli wskazały również znaczną emisję pochodzącą z materiałów tworzących ściany. Zarówno bloczki silikatowe, jak również płyty warstwowe przyczyniły się w dużym stopniu do zwiększenia emisji CO₂. W przypadku analizowanej hali bloczki emitują aż 120 000 kg CO₂e, a płyty warstwowe 77 000 kg CO₂e. Materiały generujące największy ślad węglowy w opracowanych modelach przedstawiono w tabeli 2.

Pomimo dużej emisyjności stali, model 1 wykazuje, że zamiana słupów na stalowe, a przede wszystkim wypełnienia ścian na płyty warstwowe spowodowała zmniejszenie emisji CO₂e/m² o ok. 14% w porównaniu z modelem bazowym.

Table 2. Summary of emission results kg CO₂e/m²
Tabela 2. Zestawienie wyników emisji kg CO₂e/m²

Model	Carbon footprint amount [kg CO ₂ e/m ²]/Ślad węglowy [kg CO ₂ e/m ²]	Materials with the highest carbon footprint in each model, ranked from highest emissions CO ₂ e/Materiały generujące największy ślad węglowy w każdym modelu w kolejności od największych emisji CO ₂ e
0	513	concrete mix, silicate blocks, reinforcement/mieszanka betonowa, bloczki silikatowe, zbrojenie
1	439	concrete mix, steel profiles, sandwich panels/mieszanka betonowa, profile stalowe, płyty warstwowe
2	472	silicate blocks, reinforcement, low-emission concrete mixtures/bloczki silikatowe, zbrojenie, mieszanki betonowe o obniżonej emisyjności
3	478	concrete mix, sandwich panels, reinforcement/mieszanka betonowa, płyty warstwowe, zbrojenie
4	511	concrete mix, silicate blocks, reinforcement/mieszanka betonowa, bloczki silikatowe, zbrojenie
5	554	concrete mix, reinforcement/mieszanka betonowa, zbrojenie
6	521	steel profiles, concrete mix/profile stalowe, mieszanka betonowa

approximately 14% compared to the base model. The reduction in the result was additionally influenced by the elimination of thermal insulation made of rock wool for insulating the blocks, which emits 7,300 kg of CO₂e, the use of material parameters of sandwich panels from the manufacturer and the differentiation of steel profile cross-sections adapted to the needs of the project. Models 5 and 6 were prepared on the basis of reference buildings modeled in OneClick LCA Carbon Designer 3D, therefore their level of precision is much lower, this is highlighted in the graphical comparison of models, which indicates the high emissivity of steel columns (details in Figure 3). Higher carbon footprint values also result from the values of energy needed for heating, hot water preparation and lighting energy estimated by the program, which were adopted only on the basis of the hall area based on reference indicators for facilities of similar construction. The relationship between emissivity changes in the frame structure of walls is visible both in the results obtained on the basis of the created schematic 3D models (Fig. 3, 4) and in model 3. Steel columns in the analyzed hall design in the Carbon Designer 3D model show up to 3 times higher CO₂e emissions. The difference in CO₂e emissions for models 5 and 6 is approximately 6%. The discrepancies result from the low accuracy of the material and surface data used. For models 2 and 3, similar total CO₂e emission values were obtained, but completely different modifications were introduced. In model 2, ecological concretes were used based on 10 – 55% recycled ingredients, while in model 3 only the basic filling of the walls was replaced with sandwich panels. The smallest change was obtained for model 4. It took into account emissions from the transport of elements. The program

Na obniżenie wyniku wpłynęło dodatkowo wyeliminowanie izolacji cieplnej z wełny skalnej do docieplenia bloczków, która emituje 7300 kg CO₂e, wykorzystanie parametrów materiałowych płyt warstwowych oraz zróżnicowanie przekrojów profili stalowych dostosowanych do potrzeb projektu. Modele 5 oraz 6 zostały przygotowane na podstawie budynków referencyjnych modelowanych w OneClick LCA Carbon Designer 3D. W związku z tym poziom ich doprecyzowania jest znacznie niższy, co pokazano na graficznym porównaniu modeli, wskazującym na wysoką emisyjność słupów stalowych (rysunek 3). Większe wartości śladu węglowego wynikają również z oszacowanych przez program wartości energii potrzebnej do ogrzewania, przygotowania ciepłej wody oraz energii do oświetlenia, które zostały przyjęte jedynie na podstawie powierzchni hali z wykorzystaniem wskaźników referencyjnych dotyczących obiektów o podobnej konstrukcji. Zależność zmian emisyjności w konstrukcji szkieletowej ścian widoczna jest zarówno w wynikach otrzymanych na podstawie utworzonych schematycznych modeli 3D (rysunki 3 i 4), jak i modelu 3. Słupy stalowe w analizowanym projekcie hali w modelu Carbon Designer 3D wykazują aż trzykrotnie większą emisję CO₂e. Różnica w emisji CO₂e w przypadku modeli 5 i 6 wynosi ok. 6%. Rozbieżności wynikają z małej dokładności wykorzystanych danych materiałowych oraz powierzchniowych. W przypadku modeli 2 oraz 3

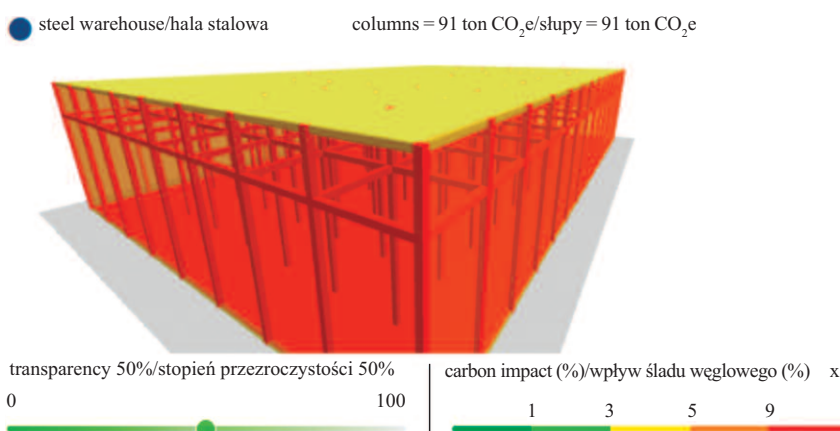


Fig. 3. Schematic model of a sports hall prepared in OneClick LCA Carbon Designer 3D – graphical comparison of the emissions of columns made of steel profiles

Rys. 3. Schematyczny model hali sportowej przygotowany w programie OneClick LCA Carbon Designer 3D – porównanie graficzne emisji słupów wykonanych z profili stalowych

otrzymano zbliżone wartości emisji CO₂e, ale zostały w nich wprowadzone całkiem odmienne modyfikacje. W modelu 2 zastosowano betony ekologiczne bazujące w 10 – 55% na składnikach z recyklingu, natomiast w modelu 3 zastąpiono jedynie bazowe wypełnienie ścian płytami warstwowymi. Najmniejszą zmianę wprowadzono w modelu 4. Uwzględniono w nim emisję po-

accepts default forms of transport as well as the average route of material delivery to the construction site. As part of this model, the nearest factories and material resources located within the modeled sports hall were selected, at distances from approximately 10 to 200 km, and the length of the transport route for individual construction materials was adjusted. Correcting the distance resulted in a reduction of the total carbon footprint by 2 kg CO₂e/m².

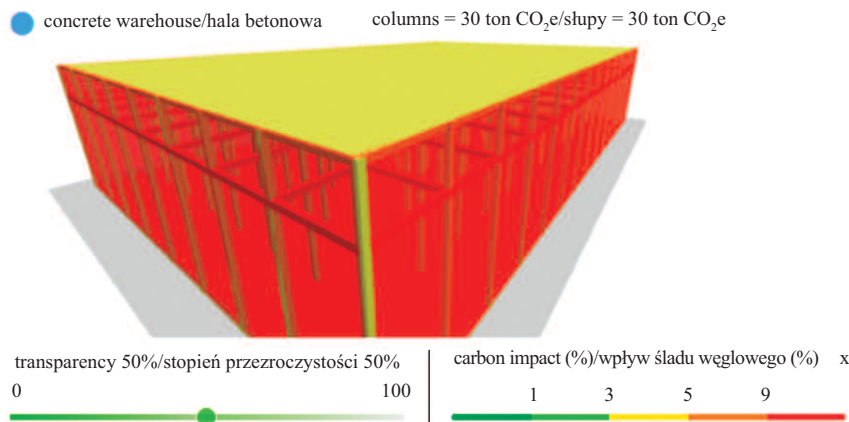


Fig. 4. Schematic model of a sports hall prepared in OneClick LCA Carbon Designer 3D – graphical comparison of the emissions of columns made of reinforced concrete
Rys. 4. Schematyczny model hali sportowej przygotowany w programie OneClick LCA Carbon Designer 3D – porównanie graficzne emisji słupów wykonanych z betonu zbrojonego

chodzącą z transportu elementów. Program przyjmuje domyślne formy transportu, jak również uśrednioną drogę dowozu materiału na budowę. W ramach tego modelu wybrano najbliższe fabryki oraz zasoby materiałowe zlokalizowane w obrębie modelowanej hali sportowej, w odległości od ok. 10 do 200 km, i dostosowano długość drogi transportu poszczególnych materiałów konstrukcyjnych. Skorygowanie dystansu wpłynęło na obniżenie całkowitego śladu węglowego o 2 kg CO₂e/m².

Conclusions

The prepared analysis confirms the authors' belief that it is worth continuing research on the use of variant solutions in carbon footprint modeling. The product stage is a particularly important phase of the life cycle because it has the highest values of environmental indicators. Detailed results show the importance of selecting appropriate materials and confirm the research results presented in the literature, which emphasize the importance of emissions at the production stage [1] of materials and prove the high level of emissivity of concrete and steel [16].

The process of adapting material solutions affects not only ecological aspects but also cost aspects that should be taken into account in further considerations. Preparing models in the form of reference buildings using Carbon Designer 3D allows you to determine the estimated carbon footprint of the facility and identify the structural elements that contribute most to increasing emissions, but not all elements implemented in the tested model are consistent with the practices used in Poland. As part of further research, the analyzes will be expanded to include further alternative models, schematic models and diverse geometries in order to create typical solutions tailored to Polish practices.

Received: 21.06.2024
 Revised: 26.08.2024
 Published: 23.09.2024

Wnioski

Opracowana analiza utwierdza nas w przekonaniu, że warto kontynuować badania dotyczące stosowania rozwiązań wariantowych w modelowaniu śladu węglowego budynku. Etap produkcji materiałów budowlanych jest szczególnie ważną fazą cyklu życia budynku, gdyż wykazuje największe wartości wskaźników środowiskowych. Szczegółowe wyniki pokazują znaczenie doboru odpowiednich materiałów i potwierdzają wyniki badań prezentowane w literaturze, które podkreślają istotę emisji na etapie produkcji materiałów [1] oraz świadczą o wysokim poziomie emisyjności betonu i stali [16].

Proces dostosowywania rozwiązań materiałowych ma wpływ nie tylko na aspekty ekologiczne, ale również kosztowe, które należy uwzględnić w kontynuowanych rozważaniach. Przygotowanie modeli w formie budynków referencyjnych za pomocą Carbon Designer 3D pozwala natomiast określić szacowany ślad węglowy obiektu oraz wskazać elementy konstrukcji przyczyniające się w największym stopniu do zwiększenia emisji, lecz nie wszystkie elementy zaimplementowane do badanego modelu są zbieżne z praktykami stosowanymi w Polsce. W ramach dalszych badań przeprowadzone analizy zostaną rozbudowane o kolejne alternatywne modele, modele schematyczne oraz zróżnicowane geometrie w celu stworzenia typowych rozwiązań dopasowanych do polskiej praktyki.

Wpłynął do redakcji: 21.06.2024 r.
 Otrzymano poprawiony po recenzjach: 26.08.2024 r.
 Opublikowano: 23.09.2024 r.

Literature

- [1] Najjar M, Figueiredo K, Palumbo M, Hadda A. Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building, *Journal of Building Engineering*. 2017; <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2017.10.005>.
 [2] Fenner AE, Kibert ChJ, Woo J, Morque S, Razkenari M, Hakim H, X Lu. The carbon footprint of buildings: A review of methodologies

- and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.012>.
 [3] Jang M, Hong T, Ji C. Hybrid LCA model for assessing the embodied environmental impacts of buildings in South Korea *Environmental Impact Assessment Review*. 2015; <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2014.09.010>.
 [4] Huang B, Gao X, Xu X, Song J, Geng Y, Sarkis J, Fishman T, Kua H, Nakatani J. A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environ-

mental Impact of Building Materials, in 2020 One Earth 3. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.010>.

- [5] Tažiková A, Struková Z. Reducing the carbon footprint by selecting building material, International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM; Sofia, 2020, 4.2, 227 – 234, <https://doi.org/10.5593/sgem2020V4.2/s06.28>.
- [6] Chau, CK, Leung TM, Ng WY. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. Applied Energy 2015; <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023>.
- [7] Ya HD, Yang T, Liu P, Xu Z. Comparing the Standards of Life Cycle Carbon Assessment of Buildings: An Analysis of the Pros and Cons, Buildings. 2023; <https://doi.org/10.3390/buildings13102417>.
- [8] Zujian H, Zhou H, Miao Z, Tang H, Lin B, Zhuang W. Life-Cycle Carbon Emissions (LCCE) of Buildings: Implications, Calculations, and Reductions, Engineering. 2024; <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.08.019>.
- [9] Lin Z, Mueller M, Luo Ch, Yan X. Predicting whole-life carbon emissions for buildings using different machine learning algorithms: A case study on typical residential properties in Cornwall, UK., Applied Energy, 2024; <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122472>.
- [10] Li X, Li Y, Zhou H, Fu Z, Cheng X, Zhang W. Research on the Carbon Emission Baselines for Different Types of Public Buildings in a Northern Cold Areas City of China. Buildings. 2023; <https://doi.org/10.3390/buildings13051108>.
- [11] Atmaca A, Atmaca N. Life cycle energy (LCEA) and carbon dioxide emissions (LCCO2A) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey; Energy and Buildings. 2015; <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.008>.
- [12] Dezhi L, Peng C, Yujie L. Development of an automated estimator of life-cycle carbon emissions for residential buildings: A case study in Nanjing, China, 2016; Habitat International 57; pp. 154 – 163; <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.07.003>.
- [13] Eleftheriadis S, Schwartz Y, Raslan R, Duffour P, Mumovic D. Integrated Building Life Cycle Carbon and Cost Analysis Embedding Multiple Optimisation Levels.; 4th Building Simulation and Optimization Conference, Cambridge, UK: 2018.
- [14] Islam, Hamidul, Margaret Jollands, and Sujeeva Setunge. Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings – A review. Renewable and sustainable energy reviews. 2015; DOI: 10.1016/j.rser.2014.10.006.
- [15] Cang Y, et al. A new method for calculating the embodied carbon emissions from buildings in schematic design: Taking „building element” as basic unit. Building and Environment. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107306>.
- [16] Ruschi M, Saade G, Guest, Amor B. Comparative whole building LCAs: How far are our expectations from the documented evidence?; Building and Environment. 2020; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106449>.
- [17] PN-EN ISO 14040:2009 – Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura.
- [18] PN-EN ISO 14044:2009/A1:2018-05 – Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne.
- [19] Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z 28.03.2023 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej; Dz. U. 2023 poz. 697.
- [20] PN-EN 1990: 2004 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji.
- [21] Xiaocun Z, Fenglai W. Life-cycle assessment and control measures for carbon emissions of typical buildings in China, Building and Environment. 2015; DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.003>.
- [22] Sri Kalyana Rama J, Shreyans S, Sridhar R. Role of lightweight materials of construction on carbon dioxide emission of a reinforced concrete building. Materials Today. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.294>.
- [23] Cang Y, Yang L, Luo Z & Zhang N. Prediction of embodied carbon emissions from residential buildings with different structural forms, Sustainable Cities and Society 54 2020, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101946>.

Oprogramowanie:

OneClick LCA, lic. edukacyjna, narzędzie (Level (s) life cycle assessment (EN 15804 +A1)).