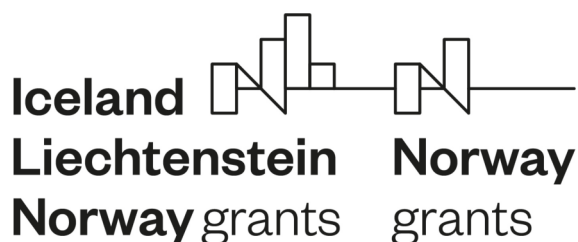


Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

05.2024

Project: Development of methodology of Carbon Footprint assessment for buildings in Poland





Spis treści

Wstęp	2
Summary	3
Ślad węglowy budynków – przegląd literatury	4
Charakterystyka budynków testowych	8
Mapowanie elementów budynku	18
Opis wariantów obliczeniowych budynków testowych	22
Metodyka wyznaczania śladu węglowego budynków testowych	26
Wyniki analizy	28
Dyskusja	48
Analizy dodatkowe	51
Literatura	62

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Wstęp

Propozycja krajowej metodyki wyznaczania śladu węglowego budynków powinna opierać się o wykonane obliczenia uwzględniające specyfikę danego kraju. Dlatego też, w pierwszym etapie projektu „Rozwój metodologii pomiaru śladu węglowego dla budynków w Polsce” skoncentrowano się na stworzeniu bazy danych budynków, dla których wyznaczony zostanie ślad węglowy. Stworzona baza danych obejmuje 21 budynków testowych różniących się funkcją, typem czy systemami technicznymi. W niniejszym raporcie opisano w jaki sposób dokonano wyboru budynków testowych, oraz jakie zmienne zostały użyte aby stworzyć konkretne warianty obliczeń. Następnie w sposób bardziej szczegółowy opisano warianty podstawowe budynków testowych, tak aby można było się do nich odwoływać w innych projektach czy pracach badawczych. Ważnym elementem przy wykonywaniu ocen partych o LCA jest odpowiednie zidentyfikowanie elementów, które zostaną uwzględnione w obliczeniach. W tym celu dokonano mapowania elementów budynków testowych, w wyniku którego wykluczono niektóre elementy z analizy śladu węglowego. Następnie określono parametry, których zmiana miała dać odpowiedź dotyczącą ewentualnych uproszczeń w tworzonej krajowej metodyce liczenia śladu węglowego. Obliczenia wykonano zgodnie z wytycznymi systemu Level(s). Ostatecznie zaprezentowano i omówiono obliczenia wykonane dla 21 wariantów budynków testowych. Dodatkowo przeprowadzono dwie dodatkowe analizy. Pierwszą z nich była analiza wpływu wartości wskaźnika emisji energii elektrycznej i ciepła sieciowego na wskaźnik GWP. Obliczenia wykonano dla podstawowych wariantów każdego rodzaju budynku testowego. Druga analiza uwzględniała porównanie wpływu rodzaju konstrukcji budynku mieszkalnego jednorodzinne. W tym przypadku odniesiono się do lokalizacji Polski i Norwegii oraz konstrukcji budynku w technologii drewnianej oraz murowanej. Wyniki przeprowadzonych obliczeń posłużyły do określenia krajowej metodyki wyznaczania śladu węglowego budynków, która została opisana w raporcie pt. „Propozycja krajowej metodyki wyznaczania śladu węglowego budynków”.

Summary

The proposal for a national methodology for determining the carbon footprint of buildings should be based on calculations made taking into account the specificity of a given country. Therefore, in the first stage of the project "Development of methodology of Carbon footprint assessment for buildings in Poland" the focus was on creating a database of buildings for which the carbon footprint will be determined. The created database includes 21 test buildings differing in function, type and technical systems. This report describes how the test buildings were selected and what variables were used to create specific calculation variants. Then, the basic variants of the test buildings were described in more detail so that they could be referred to in other projects or research works. An important element when performing LCA-based assessments is the appropriate identification of the elements that will be included in the calculations. For this purpose, the elements of test buildings were mapped, as a result of which some elements were excluded from the carbon footprint analysis. Then, the parameters were determined, the change of which was to provide an answer regarding possible simplifications in the national methodology for calculating the carbon footprint. Calculations were performed in accordance with the guidelines of the Level(s) system. Ultimately, calculations made for 21 variants of test buildings were presented and discussed. Additionally, two additional analyses were performed. The first one was an analysis of the impact of the electricity and district heating emission index values on the GWP. Calculations were made for basic variants of each type of test building. The second analysis included a comparison of the influence of the type of construction of a single-family residential building. In this case, reference was made to the location of Poland and Norway and the construction of the building in wooden and brick technology. The results of the calculations were used to determine the national methodology for determining the carbon footprint of buildings, which was described in the report entitled "Proposal of a national methodology for determining the carbon footprint of buildings."

Ślad węglowy budynków – przegląd literatury

Budynki odpowiadają za 36% całkowitej emisji CO₂ w UE, dlatego też sektor budowlany jest sektorem najważniejszym z punktu widzenia polityki efektywności energetycznej. Ocena cyklu życia (LCA) to uznana na całym świecie i powszechnie stosowana metoda oceny i optymalizacji wpływu budynków na środowisko w całym ich cyklu życia. Komisja Europejska (KE) uznaje znaczenie przyjęcia podejścia opartego na cyklu życia przy ocenie efektywności wykorzystania surowców, odpadów budowlanych i energii w budynkach. Kluczowym pierwszym krokiem ułatwiającym przejście na zrównoważone środowisko zbudowane jest ustanowienie wskaźników lub celów środowiskowych, które uwzględniają cały cykl życia budynku. Te wskaźniki LCA umożliwią architektom i innym interesariuszom zainteresowanym sektorem budowlanym poprawę ich pozycji rynkowej poprzez sprostanie zarówno rosnącym wymaganiom klientów jak i poprzez spełnienie regulacji prawnych z zakresu ochrony środowiska. W efekcie może przyczynić się to do dalszego promowania zrównoważonego rozwoju i innowacji w branży budowlanej. Zgodnie z wytycznymi dotyczącymi śladu środowiskowego produktu (Product Environmental Footprint - PEF), punkt odniesienia definiuje się jako „norma lub punkt odniesienia, względem którego można dokonać dowolnego porównania”.

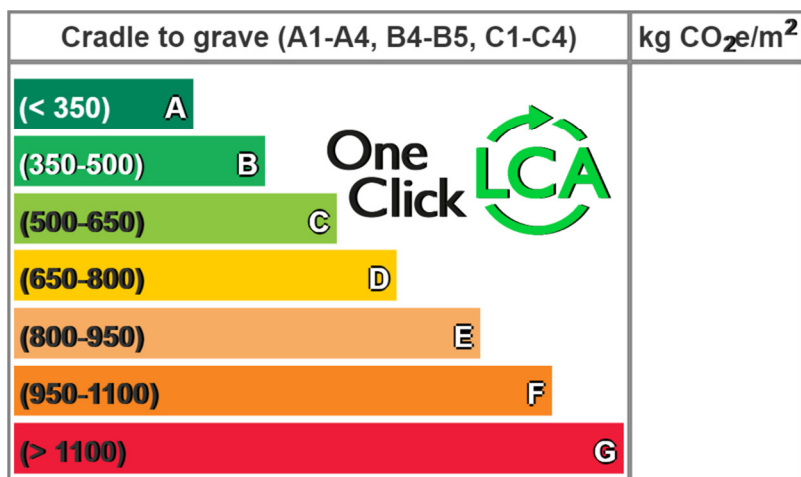
W przeciwieństwie do ugruntowanych wskaźników efektywności energetycznej, opracowywanie i wdrażanie wskaźników LCA budynków jest wciąż na wczesnym etapie. W przeciwieństwie do innych produktów, budynki trudniej jest ocenić pod kątem ich wpływu na środowisko ze względu na różnorodne i masowe wykorzystanie materiałów, długą żywotność i charakterystyczne funkcje każdego budynku. Wyniki LCA budynków obarczone są dużą niepewnością ze względu na ogromną ilość wymaganych danych i uproszczone modelowanie złożonych środowiskowych łańcuchów przyczynowo-skutkowych. Te zawiłości utrudniają porównywanie studiów przypadku LCA budynków i w pewnym stopniu zmniejszają wiarygodność wyników LCA.

Istnieją różne systemy benchmarkingu, a OneClick LCA koncentruje się na efektywności wbudowanej emisji dwutlenku węgla przez budynki. Carbon Heroes Benchmarks podaje wbudowane wskaźniki emisji dwutlenku węgla dla różnych typów budynków w różnych krajach. Skala wartości obejmuje zakres wyników przy dwóch odchyleniach standardowych średniej dla typu budynku. Skala jest podzielona na 7 równomiernych zakresów. Średnia wyników mieści się w przedziale „D”, a dolne i górne krańce zakresu mieszczą się odpowiednio w przedziałach „A” i „G”. Na poniższym rysunku przedstawiono wskaźniki wbudowanej emisji dwutlenku węgla dla wszystkich typów polskich budynków. Średni wartość wskaźnika globalnego ocieplenia GWP wynosi 727 kgCO₂eq/m² i mieści się w przedziale „D”. Ten punkt odniesienia uwzględnia wbudowane oddziaływania odnoszące się do wszystkich części budynku, w tym technologii budowlanej, ale nie obejmuje obszarów zewnętrznych.

Jak wynika z raportu „W kierunku wskaźników wbudowanej emisji dwutlenku węgla budynków w Europie”, (Röck M, Sørensen A, Steinmann J, Le Den X, Lyngé K, Horup L H., Tozan B, Birgisdottir H. Towards Embodied Carbon Benchmarks for Buildings in Europe – Facing the data challenge, 2022, <https://doi.org/10.5281/zenodo.6120522>) pełny cykl życia wbudowanej emisji dwutlenku węgla w budynku wynosi średnio 600 kgCO₂eq/m². Tę średnią wartość można znaleźć zarówno dla budynków mieszkalnych, jak i niemieskalnych. Jednak zakres wartości jest znacznie większy w przypadku budynków niemieskalnych (od 100 do 1200 kgCO₂eq/m²) niż mieszkalnych (od 400 do 800 kgCO₂eq/m²). Większość emisji dwutlenku węgla w cyklu życia jest emitowana podczas produkcji i budowy budynku (fazy A1-A5).

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Raport firmy Ramboll przedstawia wartości bazowe dotyczące emisji gazów cieplarnianych w oparciu o dane LCA z 5 krajów europejskich, z których każdy dostarczył do analizy około 50 przypadków. 5 uwzględnionych krajów to Belgia, Dania, Finlandia, Francja i Holandia. Szczegółowy przegląd średnich wartości emisji dwutlenku węgla w cyklu życia dla budynków o różnych typach konstrukcji i materiałów konstrukcyjnych w różnych krajach przedstawiono w Tabeli 1. We wszystkich przypadkach referencyjny okres badania ujednolicono do 50 lat.



Rysunek 1. Skala wskaźnika wbudowanego śladu węglowego dla budynków w Polsce na rok 2023 - Carbon Heroes Benchmarks, OneClick LCA

Tabela 1. Emisja wbudowana w cyklu życia (wartość średnia) dla budynków o różnych typach konstrukcji [kg CO₂e/m²]

Typ konstrukcji	Belgia	Dania	Finlandia	Francja	Holandia	Średnia
Wszystkie typy	591	352	497	661	389	591
Szkieletowa betonowa	-	-	516	759	-	622
Szkieletowa betonowa/drewniana	-	-	-	672	-	672
Szkieletowa stalowa	-	-	610	912	-	685
Szkieletowa drewniana	464	-	395	610	-	509
Masywna ceglana	655	-	-	643	-	645
Masywna betonowa	-	318	655	806	-	707
Masywna drewniana	-	-	475	600	-	595
Brak danych	-	359	509	-	389	388
Inne	-	-	517	913	-	649

Porównując konstrukcje ramowe z konstrukcjami masywnymi, badanie wskazuje, że ogólnie rzecz biorąc, konstrukcje ramowe nie zawsze skutkują niższą wartością wbudowanej emisji dwutlenku węgla. Obiekty wykorzystujące drewno jako główny materiał

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

konstrukcyjny, zarówno w systemach masywnych, jak i ramowych, prowadzą do najniższych wartości dla odpowiedniego typu układu konstrukcyjnego.

W badaniu przeanalizowano także udział wbudowanej emisji dwutlenku węgla zawartej w różnych etapach cyklu życia w oparciu o normę EN 15978.

Tabela 2. Średni udział wbudowanej emisji CO₂ w całym cyklu życia [kg CO₂e/m²] różnych etapów cyklu życia

	Faza wyrobu	Faza budowy	Faza użytkowania	Faza końca życia	
	A1-A3	A4-A5	B1-B4	C1-C2	C3-C4
Wartość bezwzględna	300	40	120	20	60
Wartość względna	56%	7%	22%	4%	11%

Oprócz zainteresowania tym, „kiedy” mają miejsce wbudowane emisje dwutlenku węgla (tj. etapy cyklu życia), innym celem tego badania było zrozumienie, „jakie elementy” mają główny wkład w wielkość emisji wbudowanej.

Tabela 3. Udział wbudowanej emisji CO₂ w całym cyklu życia [kg CO₂e/m²] dla różnych elementów budynku.

	Prace ziemne	Konstrukcja nośna	Przegrody	Elementy wewnętrzne	Instalacje	Urządzenia
Wartość bezwzględna	50	170	110	150	190	40
Wartość względna	7%	24%	15%	21%	27%	6%

Badanie pokazuje, że średnio największy udział w emisjach dwutlenku węgla w cyklu życia wynika z instalacji technicznych (np. ogrzewania, chłodzenia, ciepłej wody użytkowej). Należy zauważyć, że niniejsza analiza opiera się na danych uzyskanych z Francji.

Na podstawie różnych pozycji literatury stwierdzono, że budynki komercyjne wywierają większy wpływ na środowisko niż budynki mieszkalne. Większość wartości referencyjnych spotykanych w literaturze odnosi się do etapu eksploatacji budynków, a więc do energii potrzebnej do ogrzewania i chłodzenia budynku w całym okresie jego użytkowania. Tabela 4 przedstawia zużycie energii i emisję CO₂ w cyklu życia w oparciu o ponad 100 budynków w różnych krajach, w przeglądzie dokonany przez Penga i in.

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Tabela 4. Zapotrzebowanie na energię [kWh/m²rok] oraz emisję CO₂ [kg CO₂eq/m²rok] dla różnych typów budynków

Typ budynku	Zapotrzebowanie na energię [kWh/m ² rok]	Emisja CO ₂ [kg CO ₂ eq/m ² rok]
Mieszkalny	40 – 400	50
Komercyjny	120 – 550	30-230

Wartości te mieszczą się w tym samym zakresie, co wartości podane przez Moschetti i in. w badaniu przeprowadzonym dla budynków mieszkalnych we Włoszech. Wartości zużycia energii w cyklu życia i emisji CO₂ w tym przypadku wynoszą odpowiednio 140 kWh/m²rok i 35 kgCO₂eq/m²rok. Zgodnie z wartościami referencyjnymi dla budynków mieszkalnych określonymi przez niemiecki system oceny DGNB, energia pierwotna w cyklu życia i współczynnik globalnego ocieplenia wynoszą odpowiednio 100 kWh/m²rok i 17 kgCO₂eq/m²rok. Podobna analiza statystyczna przeprowadzona została przez Francuskie Stowarzyszenie HQE i Centre Scientifique et Technique du bâtiment (CSTB), w ramach której oceniono charakterystykę 63 budynków w oparciu o podejście opracowane przez HQE do oceny efektywności środowiskowej budynków. Ocenie poddano trzy typy budynków: budynek jednorodzinny, budynek wielorodzinny oraz budynek biurowy, biorąc pod uwagę dwa przedziały czasowe: 50 i 100 lat. Wartości znormalizowano według powierzchni użytkowej netto (NFA) każdego budynku. Jeśli chodzi o globalną charakterystykę budynków w okresie 50 lat, energia pierwotna mieściła się w przedziale 170-380 kWh/m²rok, a emisja CO₂ mieściła się w przedziale 15-23,5 kgCO₂eq/m²rok.

W literaturze występuje dość szeroki zakres wartości. Zmienność ta wynika głównie z przyjęcia różnych zakresów analizy, jednostek, metodyki itp. Wszystkie te czynniki mają istotny wpływ na wynik analiz i dlatego nie można ich porównywać. Co więcej, brak informacji w niektórych z recenzowanych źródeł zwiększa niespójność wartości. Wyniki analizy są zwykle normalizowane według powierzchni budynku, ale uwzględnia się różne rodzaje wartości, takie jak powierzchnia brutto, powierzchnia netto, wewnętrzna powierzchnia netto, a zmienność wyżej wymienionej jednostki funkcjonalnej dodatkowo przyczynia się do zmienności wyników. Projekt budynku zależy od warunków lokalnych, wymagań technicznych i funkcjonalnych przepisów bezpieczeństwa i/lub specyficznych wymagań klienta. Dlatego te same czynniki będą również wpływać na efektywność środowiskową budynków, a przy opracowywaniu wskaźników referencyjnych należy uwzględnić te czynniki różnicujące. Każdy kraj ma także specyficzny miks energetyczny, a różnice w znacznym stopniu przyczynią się do rozbieżności wartości końcowych.

Charakterystyka budynków testowych

Proces wyboru budynków testowych

Zgodnie z wymaganiami dyrektywy w sprawie efektywności energetycznej, od 1 stycznia 2028 roku konieczne będzie na poziomie krajowym uwzględnienie na świadectwie charakterystyki energetycznej wyników obliczeń śladu węglowego w cyklu życia nowych budynków o powierzchni ponad 1000 m². Taki wymóg dla wszystkich nowowznoszonych budynków pojawi się od 1 stycznia 2030 roku. Z tego względu do analizy w ramach projektu wytypowano wyłącznie budynki o powierzchni powyżej 1000 m². Nie uwzględniono więc budynku jednorodzinne. Poza tym zdecydowano o uwzględnieniu budynku wielorodzinnego. W tym przypadku technologia wznoszenia jak i zastosowane systemy są typowe i powszechnie stosowane w budynkach o tym przeznaczeniu. W analizie pominięto między innymi budynki magazynowe, produkcyjne czy gospodarcze. Poziom ich skomplikowania zarówno pod kątem konstrukcyjnym jak i instalacyjnym jest dużo mniejszy od budynków użyteczności publicznej oraz wielorodzinnych. Zdecydowano więc, że dokładna analiza budynków, które wybrano będzie dużo bardziej wartościowa dla wyników projektu.

Drugim kryterium wyboru budynków była dostępność danych do analizy oraz ich aktualność. Zdecydowano więc, że muszą to być obiekty wzniesione w ostatnich 10 latach, by możliwe było wykorzystanie szczegółowych przedmiarów robót budowlanych i instalacyjnych. Wybrane budynki charakteryzują się nowoczesnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi i architektonicznymi oraz są wyposażone w nowoczesne rozwiązania instalacyjne.

Do analizy wybrano trzy budynki:

- Budynek biurowy nr 1 (oznaczony w dalszej części jako B1)
- Budynek biurowy nr 2 (oznaczony w dalszej części jako B2)
- Budynek wielorodzinny (oznaczony w dalszej części jako W)

Charakterystyka budynków testowych w zakresie architektury i konstrukcji

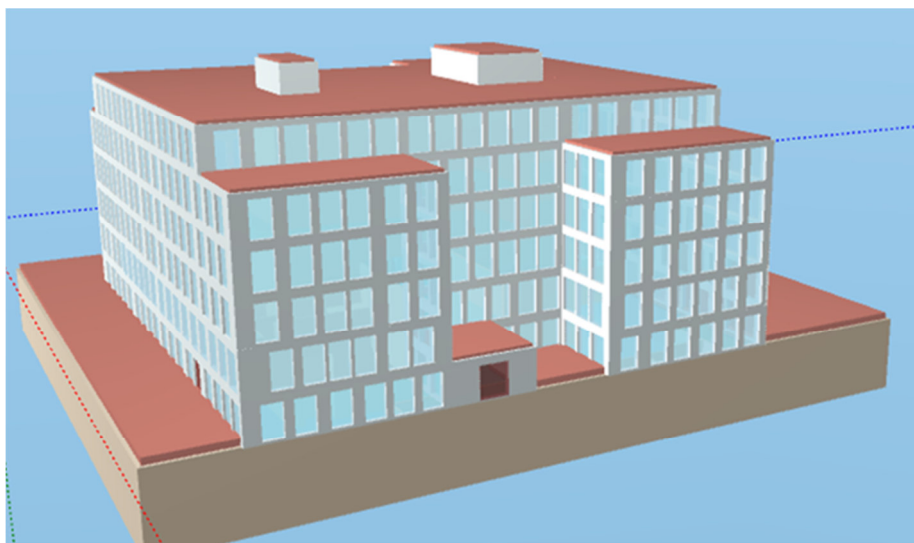
1. Budynek biurowy B1

Budynek zaprojektowany jako biurowo-usługowy. Posiada sześć kondygnacji naziemnych oraz dwie kondygnacje podziemne. Na parterze zlokalizowane są m.in. funkcje takie jak: hol, przestrzenie: biurowe, handlowe, gastronomiczne. Na każdej kondygnacji, w części ogólnodostępnej, w obrębie trzonu, przewidziano klatki schodowe i sanitariaty. Na kondygnacji podziemnej zaprojektowano funkcje parkingowe, techniczne - związane z obsługą obiektu oraz magazynowe. Każda z wyższych kondygnacji (+1 do +5) została zaprojektowana jako jedna otwarta przestrzeń, którą można podzielić tak, aby dostosować do potrzeb najemców. Do budynku przynależy teren z infrastrukturą komunikacyjną (tj. wewnętrzne dojścia, dojazdy, układ parkingowy).

Wysokość budynku: 23,5 m.

Powierzchnia przyjęta do obliczeń (całkowita powierzchnia netto): 19 571 m²

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych



Rysunek 2. Koncepcja architektoniczna budynku biurowego B1

Konstrukcja budynku to żelbetowy, monolityczny układ płytowo – słupowy posadowiony na żelbetowej płycie fundamentowej. Budynek usztywniony jest trzonami żelbetowymi usytuowanym w centralnej części, w której zlokalizowano klatki schodowe, szyby windowe i instalacyjne. Siatka słupów regularna, rozstaw stały 8,10 m w obu kierunkach. Materiały konstrukcyjne wykonane z betonu C30/37, C30/37 W8, C12/15, C35/45, a zbrojenie, ze stali A-IIIN BSt500

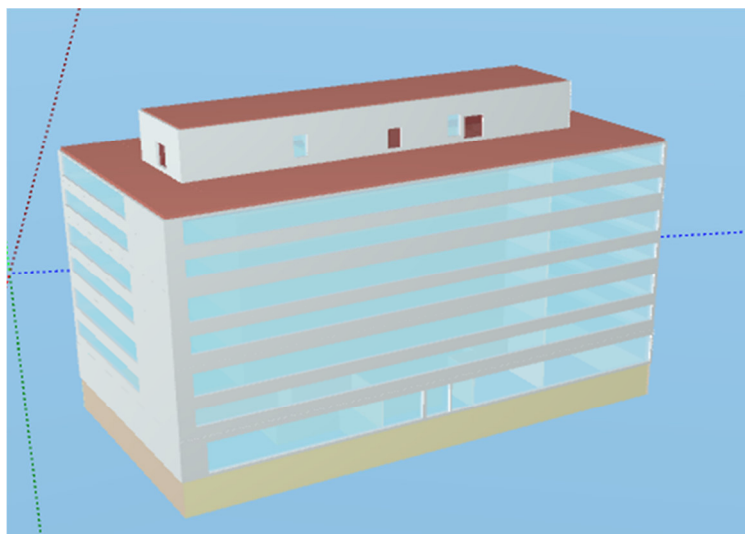
Elewacja budynku to układ okien szklonych oraz pasów poziomych i pionowych z elementów okładzinowych (HPL/panele stalowe/panele kamienne). Okładziny są częścią zabudowy fasady słupowo-ryglowej w formie ściany kurtynowej osłonowej. Część przeszklona to szyby przeźierne zespolone, 2-komorowe. Ściany zewnętrzne kondygnacji nadziemnych oraz pasy międzyokienne izolowane. Nienośne ściany wykonano z pustaków betonowych, natomiast nienośne ścianki systemowe – z płyt gipsowo-kartonowych.

2. Budynek biurowy B2

Budynek zaprojektowano jako 8-kondygnacyjny wraz z parkingiem podziemnym i zagospodarowaniem terenu zewnętrznego. Konstrukcja szkieletowa, wsparta na płycie fundamentowej. Konstrukcja nośna jest zbudowana z monolitycznych, żelbetowych słupów, półprefabrykowanych belek oraz prefabrykowanych stropów. W części centralnej budynku - trzon żelbetowy monolityczny będący elementem usztywniającym.

Ściany zewnętrzne zaprojektowano jako osłonowe w systemie wentylowanych fasad oraz systemów okiennych Aluprof. Pakiety szklane 1- lub 2-komorowe, szkło niskoemisyjne, bezpieczne. Ścianki podparapetowe żelbetowe, monolityczne, wylwane na budowie. Na kondygnacjach biurowych ściany wykonane z bloczków Silka, lub z płyt GK na konstrukcji systemowej. Schody wewnętrzne zaprojektowano jako żelbetowe.

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych



Rysunek 3. Koncepcja architektoniczna budynku biurowego B2

Wysokość budynku: 25,00 m

Powierzchnia przyjęta do obliczeń (całkowita powierzchnia netto): 10 502 m²

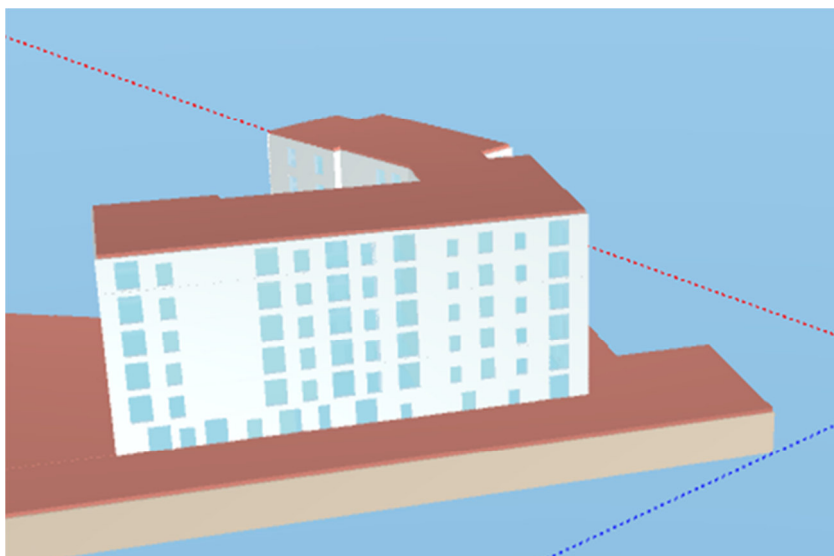
3. Budynek wielorodzinny W

Budynek zaprojektowano jako mieszkalny wielorodzinny z usługami i jednokondygnacyjnym garażem podziemnym. Konstrukcja żelbetowa, monolityczna w układach konstrukcyjnych opartych na systemie żelbetowych ścian poprzecznych wylewanych w szalunkach wieloprzestrzennych. Moduły rozstawu ścian i słupów są nieregularne - od 3,00 do 7,80 m. Dla garażu przyjęto konstrukcję szkieletową o modułach 540 cm. Fundament budynku zaprojektowano w postaci ciągłej żelbetowej płyty dennej. Płytę fundamentową posadowiono na 10 cm warstwie z betonu podkładowego B15.

Konstrukcja nośna składa się z elementów szkieletowych i ścian żelbetowych: poprzecznych, ścian podłużnych usztywniających, ścian wydzielających pionie komunikacyjne i ścian ogniowych. Ściany zewnętrzne piwnic żelbetowe. Słupy w piwnicach żelbetowe o zróżnicowanych wymiarach. Ściany nośne parteru i pięter żelbetowe wylewane. Stropy żelbetowe monolityczne krzyżowo zbrojone. Płyty stropowe ograniczone na obwodzie belkami krawędziowymi. Schody żelbetowe.

Ściany osłonowe zewnętrzne warstwowe murowane z bloczków wapienno-piaskowych lub żelbetowe – monolityczne. Okno zaprojektowano jako PCV 6-komorowe. Ściany konstrukcyjne wewnętrzne wykonano jako żelbetowe; wewnętrzne – z bloczków MULTIGIPS lub z płyt gipsowych. Ściany pomieszczeń technicznych na kondygnacjach podziemnych zaprojektowano jako murowane z pustaków Teknoblok

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych



Rysunek 4. Koncepcja architektoniczna budynku wielorodzinnego W

Teren inwestycji otoczono systemowym ogrodzeniem panelowym, na podmurówce. Ogródki wydzielone ogrodzeniem panelowym, stalowym na podmurówce. Ciągi piesze przed budynkiem wykończono płytami betonowymi.

Wysokość maksymalna budynku: 18,67 m n p.t.

Powierzchnia przyjęta do obliczeń (całkowita powierzchnia netto): 18 964 m²

Charakterystyka budynków testowych w zakresie instalacji budynkowych

1. Budynek biurowy B1

W budynku biurowym B1 zidentyfikowano i uwzględniono w obliczeniach następujące systemy instalacyjne:

- Instalacja ogrzewania;
- Instalacja ciepła technologicznego;
- Instalacja ciepłej wody użytkowej;
- Instalacja chłodzenia;
- Instalacja wentylacji mechanicznej;
- Instalacja oświetlenia;
- Instalacja elektryczna;
- Instalacja kanalizacyjna (sanitarna, deszczowa, technologiczna);
- Instalacja wodociągowa;
- Instalacja tryskaczowa;
- Instalacja hydrantowa;
- Instalacja PV.

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Poniżej przedstawiono krótki opis wybranych instalacji:

Źródłem ciepła na potrzeby ogrzewania i ciepła technologicznego w budynku jest węzeł ciepłowniczy zlokalizowany na kondygnacji podziemnej. Ogrzewanie wodne, dwururowe zasila klimakonwektory zlokalizowane w pomieszczeniach biurowych oraz usługowych. Urządzenia te pracują w systemie czterururowym z zaworami dwudrogowymi i pomieszczeniowymi regulatorami temperatury. Ogrzewanie pomieszczeń sanitarnych realizowane jest przez grzejniki stalowe, a strefa lobby wejściowego przez nawiew ciepłego powietrza i grzejniki kanałowe. Dodatkowo drzwi wejściowe wyposażono w pionowe kutyny powietrzne.

Instalacja ciepła technologicznego dostarcza ciepło do nagrzewnic central wentylacyjnych, aparatów grzewczo-wentylacyjnych oraz kurtyn powietrznych. Zaprojektowano ją jako wodną, pompową, dwururową.

Ciepła woda w budynku przygotowywana jest lokalnie w elektrycznych podgrzewaczach pojemnościowych.

Źródłem chłodu w budynku są wytwornice wody lodowej chłodzone powietrzem, zlokalizowane na dachu budynku, w których czynnikiem roboczym jest woda, z opcją freecoolingu. Instalacja chłodnicza wodna, dwururowa pracuje na potrzeby klimakonwektorów i chłodnic central wentylacyjnych w przestrzeniach biurowych i usługowych.

Wentylacja w budynku realizowana jest głównie przez system mechaniczny nawiewno-wywiewny z odzyskiem ciepła z powietrza wywiewanego. Centrale wentylacyjne zlokalizowane są na dachu budynku i zapewniają filtrowanie, ogrzewanie, chłodzenie i nawilżanie powietrza. Pomieszczenia socjalne i toalety w przestrzeniach biurowych i usługowych obsługiwane są przez system wywiewny (wentylatory wyrzutowe na dachu), w którym nawiew powietrza kompensowany jest z powierzchni biurowej.

Wentylacja pożarowa garażu podziemnego realizowana jest przez system wentylacji kanałowej opartej na wentylatorach rewersyjnych.

Instalacja hydrantowa w budynku zasilana jest z miejskiej sieci wodociągowej poprzez zestaw hydroforowy wspólny dla potrzeb pożarowych i bytowych. Wyposażona jest moduł odcięcia wody bytowej w przypadku wykrycia przepływu na instalacji hydrantowej. W budynku zastosowano hydranty wewnętrzne wężkowe wyposażone w wąż i gaśnicę. Instalacja wykonana jest z rur stalowych ocynkowanych. Budynek objęty jest również ochroną tryskaczową. Instalacja zasilana jest z pompowni tryskaczowej zlokalizowanej na poziomie -2.

Instalacja kanalizacji sanitarnej wykonana jest z rur polietylenowych HDPE oraz polipropylenowych. Wszystkie szachty instalacyjne dla pionów kanalizacyjnych przylegają bezpośrednio do pomieszczeń sanitarnych i socjalnych.

Oświetlenie podstawowe realizowane jest przez oprawy wyposażone w źródła LED zlokalizowane w sufitach podwieszanych lub na stropie. Instalacja w częściach wspólnych wyposażona jest w czujniki ruchu oraz lokalne wyłączniki oświetlenia.

Na dachu budynku zlokalizowano instalację fotowoltaiczną o mocy 50 kWp.

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

2. Budynek biurowy B2

W budynku biurowym B2 zidentyfikowano i uwzględniono w obliczeniach następujące instalacje:

- Instalacja ogrzewania;
- Instalacja ciepła technologicznego;
- Instalacja ciepłej wody użytkowej;
- Instalacja chłodzenia;
- Instalacja wentylacji mechanicznej;
- Instalacja oświetlenia;
- Instalacja elektryczna;
- Instalacja kanalizacyjna (sanitarna, deszczowa, technologiczna);
- Instalacja wodociągowa;
- Instalacja hydrantowa.

Poniżej przedstawiono krótki opis wybranych instalacji:

Źródłem ciepła na potrzeby ogrzewania i ciepła technologicznego w budynku są kotły gazowe kondensacyjne. W budynku realizowany jest dwustopniowy system ogrzewania. Pierwszy stopień stanowią centrale wentylacyjne wyposażone w nagrzewnice powietrze, na których powietrze jest wstępnie ogrzewane do żądanej temperatury nawiewu. Urządzeniami drugiego stopnia są belki indukcyjne grzewczo-chłodzące rozmieszczone w powierzchni openspace budynku. Hol główny ogrzewany jest za pomocą klimakonwektorów czterorurowych sufitowych. Pomieszczenia techniczne oraz klatki schodowe ogrzewane są za pomocą grzejników elektrycznych.

Ciepła woda w budynku przygotowywana jest lokalnie w elektrycznych podgrzewaczach przepływowych.

Źródłem chłodu dla budynku są agregaty wody lodowej. Podobnie jak przy ogrzewaniu, chłodzenie w częściach biurowych również realizowane jest dwustopniowo. Urządzeniem pierwszego stopnia są centrale wentylacyjne wyposażone w chłodnice powietrza. Urządzeniami drugiego stopnia są belki indukcyjne grzewczo-chłodzące.

Wentylacja przestrzeni biurowych realizowana jest przez system mechaniczny nawiewno-wywiewny. Powietrze przygotowywane jest w centralach wentylacyjnych zlokalizowanych na kondygnacji technicznej. Centrale wyposażone są w tłumiki akustyczne, przepustnice, filtry klasy F7, wentylatory, sekcje mieszania, wymienniki obrotowe, chłodnice wodne, nagrzewnice glikolowe oraz sekcję nawilżania. Nawiew do pomieszczeń za pomocą modułów indukcyjnych i nawiewników wyposażonych w skrzynki rozprężne. Wywiew z sanitariatów realizowany jest poprzez instalację mechaniczną wywiewną.

Instalacja kanalizacji sanitarnej wykonana jest z rur polietylenowych HDPE oraz polipropylenowych. Wszystkie szachty instalacyjne dla pionów kanalizacyjnych przylegają bezpośrednio do pomieszczeń sanitarnych i socjalnych.

Oświetlenie podstawowe realizowane jest przez oprawy wyposażone w źródła LED zlokalizowane w sufitach podwieszanych lub na stropie. Instalacja w częściach wspólnych wyposażona jest w czujniki ruchu oraz lokalne wyłączniki oświetlenia.

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

3. Budynek wielorodzinny W

W budynku wielorodzinnym W zidentyfikowano i uwzględniono w obliczeniach następujące instalacje:

- Instalacja ogrzewania;
- Instalacja ciepłej wody użytkowej;
- Instalacja wentylacji;
- Instalacja oświetlenia;
- Instalacja elektryczna;
- Instalacja kanalizacyjna (sanitarna, deszczowa);
- Instalacja wodociągowa;
- Instalacja hydrantowa.

Poniżej przedstawiono krótki opis wybranych instalacji:

Źródłem ciepła dla budynku jest węzeł ciepłowniczy zasilany z miejskiej sieci ciepłowniczej zlokalizowany na kondygnacji podziemnej. Ogrzewanie w budynku realizowane jest poprzez instalację wodną dwururową grzejnikową. Grzejniki płytowe w pomieszczeniach wyposażone są w zawory termostatyczne. Przygotowanie ciepłej wody na potrzeby mieszkańców odbywa się centralnie w węźle ciepłowniczym, skąd woda rozprowadzana jest przewodami polipropylenowymi do poszczególnych mieszkań.

Wentylacja w mieszkaniach - mechaniczna wywiewna z wentylatorami kanałowymi i dachowymi. Powietrze dostarczane z nawiewników okiennych w pokojach usuwane jest kanałami wentylacyjnymi zlokalizowanymi w kuchniach, garderobach i łazienkach.

Budynek zasilany jest w wodę przez przyłącze wodociągowe z sieci wodociągowej. Rury rozprowadzające wykonane są z tworzyw wielowarstwowych. Wewnętrzna instalacja kanalizacyjna zaprojektowana z rur PVC łączonych na uszczelki, rury wykonane zostały w systemie niskoszumowym. Instalacja kanalizacji deszczowej, grawitacyjna i częściowo podciśnieniowa wykonana z przewodów PVC oraz polietylenowych.

Charakterystyka budynków testowych w zakresie wykończenia wewnętrznego

1. Budynek biurowy B1

Ściany wewnętrzne, w zależności od przeznaczenia wykończono: farbą emulsyjną, tapetą, gładzią gipsową. Posadzki wykończono płytkami kamiennymi, płytkami PCV lub ceramicznymi lub wykładziną dywanową.

2. Budynek biurowy B2

Ściany wewnętrzne, w zależności od przeznaczenia wykończono: tynkiem cementowo-wapiennym lub gipsowym, płytkami ceramicznymi (klejonymi), tapetą (klejoną) lub okładziną ze szkła barwionego. Posadzki wykonano z płytek kamiennych lub ceramicznych (klejonych) albo z wykorzystaniem wykładziny dywanowej.

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

3. Budynek wielorodzinny W

Ściany wewnętrzne, w zależności od przeznaczenia wykończono tynkiem gipsowym, malowano farbą emulsyjną akrylową lub obłożono fototapetą na szklanej tafli (tafle klejone). Sufity malowane farbą akrylową lub wykończone tynkiem gipsowym. Posadzka wykończona płytkami gresowymi lub szlichtą cementową.

Charakterystyka energetyczna budynków testowych - zapotrzebowanie na energię

Zapotrzebowanie na energię w trakcie użytkowania ma zazwyczaj istotny udział w śladzie węglowym budynku w cyklu życia. Dlatego też, ten element nie mógł być pominięty w przeprowadzonej analizie. Zgodnie z zapisami EPBD 2024 ślad węglowy budynku w cyklu życia ma być podawany na świadectwie charakterystyki energetycznej. Postanowiono zatem w analizach przyjmować zapotrzebowanie na energię wyliczone zgodnie z krajową metodyką wyznaczania świadectw charakterystyki energetycznej. Obliczenia wykonane zostały zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (Dz.U. 2015 poz. 376), przy czym uwzględniono projektowe dane o konstrukcji przegród, działaniu systemów technicznych czy sprawności cząstkowych instalacji.

W związku z tym, że analizy w projekcie prowadzone były dla dwóch budynków biurowych oraz jednego budynku mieszkalnego wielorodzinnego, w ramach wyznaczonej charakterystyki energetycznej wyznaczono zapotrzebowanie:

- energię do ogrzewania i wentylacji (dla wszystkich budynków);
- energię do przygotowania ciepłej wody użytkowej (dla wszystkich budynków);
- energię pomocniczą (wentylatory, pompy) w systemach technicznych (dla wszystkich budynków);
- energię do chłodzenia (tylko budynki biurowe);
- energię do oświetlenia wbudowanego (tylko budynki biurowe).

Poniżej w Tabeli 5 zestawiono wskaźniki zapotrzebowania na energię użytkową EU dla wszystkich budynków. Wskaźniki odniesiono do powierzchni netto o regulowanej temperaturze (A_f), zgodnie z metodyką sporządzania świadectw charakterystyki energetycznej. Powierzchnia ta wynosiła odpowiednio: budynek biurowy B1 – 19 908,1 m², budynek biurowy B2 – 10 043,8 m², budynek mieszkalny wielorodzinny W – 13 043,3 m².

Tabela 5. Wskaźniki zapotrzebowania na energię użytkową EU [kWh/m²rok] analizowanych budynków.

System techniczny	Wskaźnik EU [kWh/m ² rok]		
	Biurowy B1	Biurowy B2	Wielorodzinny W
Ogrzewanie i wentylacja	26,1	18,4	28,5
Przygotowanie c.w.u.	4,7	4,7	27,5
Chłodzenie	3,5	15,7	-

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

W każdym z systemów technicznych w analizowanych budynkach na podstawie danych projektowych określono cząstkowe sprawności. Wartości te, przedstawione w Tabeli 6 pozwoliły na przeliczenie zapotrzebowania na energię użytkową na zapotrzebowanie na energię końcową.

Tabela 6. Wartości sprawności cząstkowych poszczególnych systemów technicznych analizowanych budynków.

System techniczny	Elementy składowe systemu	Średnia sezonowa sprawność		
		Biurowy B1	Biurowy B2	Wielorodzinny W
Ogrzewanie	Wytwarzanie ciepła	0,95	0,97	0,95
	Przesył ciepła	0,96	0,96	0,90
	Akumulacja ciepła	1,00	1,00	1,00
	Regulacja i wykorzystanie ciepła	0,93	0,88	0,88
	Sprawność całkowita	0,85	0,82	0,75
Przygotowanie c.w.u.	Wytwarzanie ciepła	0,96	0,99	0,95
	Przesył ciepła	1,00	1,00	0,65
	Akumulacja ciepła	0,85	1,00	1,00
	Sprawność całkowita	0,82	0,99	0,62
Chłodzenie	Wytwarzanie chłodu	4,42	4,80	-
	Przesył chłodu	0,96	0,96	-
	Akumulacja chłodu	0,92	1,00	-
	Regulacja i wykorzystanie chłodu	0,94	0,92	-
	Sprawność całkowita	3,67	4,24	-

Wyznaczone wskaźniki zapotrzebowania na energię końcową EK dla wszystkich budynków wraz z podaniem rodzaju nośnika energii lub paliwa przedstawiono w Tabeli 7. Całkowite zapotrzebowanie na poszczególne nośniki energii lub paliwa zestawiono w Tabeli 8.

Tabela 7. Wskaźniki zapotrzebowania na energię końcową EK [kWh/m²rok] analizowanych budynków.

System techniczny	Rodzaj nośnika energii lub paliwa	Wskaźnik EK [kWh/m ² rok]		
		Biurowy B1	Biurowy B2	Wielorodzinny W
Ogrzewanie i wentylacja	Ciepło sieciowe	30,7	-	37,8
	Gaz ziemny	-	22,5	-
Przygotowanie c.w.u.	Ciepło sieciowe	-	-	44,6
	Energia elektryczna	5,7	4,7	-
Chłodzenie	Energia elektryczna	1,0	3,7	-
Energia pomocnicza	Energia elektryczna	16,9	10,8	1,0
Oświetlenie	Energia elektryczna	10,2	16,4	-

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Tabela 8. Zestawienie zapotrzebowania na poszczególne nośniki energii i paliwa analizowanych budynków.

Rodzaj nośnika energii lub paliwa	Ilość nośnika energii lub paliwa [kWh/rok]		
	Biurowy B1	Biurowy B2	Wielorodzinny W
Ciepło sieciowe	611 178,7	0,0	1 074 767,9
Gaz sieciowy	0,0	225 985,5	0,0
Energia elektryczna sieciowa	672 893,8	357 559,3	13 043,3

Wyznaczone wartości zapotrzebowania na ciepło sieciowe, gaz ziemny oraz energię elektryczną zostały wykorzystane do wyznaczenia śladu węglowego budynku w cyklu życia dla etapu B6 (zużycie energii).

Mapowanie elementów budynku

Identyfikacja elementów budynku

Środowisko zbudowane oddziałuje na ekosystem i przebywające w nim społeczeństwo, a dynamika tego procesu jest niezwykle złożona. Oceny cyklu życia (LCA), są niezbędnym krokiem do oszacowania wpływu przedsięwzięcia budowlanego na środowisko naturalne. Dzięki wynikom szerokich analiz, możliwe jest uwzględnienie oddziaływania sektora budowlanego, a w konsekwencji dążenie do wypracowania zadowalającego podejścia do zrównoważonego budownictwa. Projektowanie i realizacja bardziej odpowiedzialnych środowiskowo projektów opiera się na celach jakie sektor wyznaczy i do których zobowiąże się dążyć. Realizacja ów celów wymaga dostępności narzędzi do śledzenia postępów, a także zadeklarowania, adekwatnych do możliwości, wartości odniesienia.

Podstawą do kreowania zrównoważonego budownictwa powinna być metodyka, która w spójny i jednoznaczny sposób pozwoli określać wpływ budynku na środowisko. Pomoże zidentyfikować szereg możliwych niskoemisyjnych działań, a tym samym wspomóc wymianę dobrych praktyk.

Aby metodyka przełożyła się na podejmowanie świadomych decyzji oraz stosowanie praktyk niskoemisyjnych, niezbędne jest wykluczenie niespójności w założeniach, które przekładają się na potencjalne rozbieżności w zestawieniach, a tym samym utrudniają identyfikację czynników wpływających na wyniki.

W celu usprawnienia procesu identyfikacji elementów budynku podlegających ocenie w systemie Level(s), na którym oparte są obliczenia śladu węglowego na cele projektowe, stworzono tzw. listy elementów budynku. Są to zestawienia wszystkich możliwych do wystąpienia komponentów budynku bez względu na jego przeznaczenie. Stworzone one zostały w arkuszach programu Excel na podstawie przedmiarów technicznych budynków różnych typów. Ich celem jest uporządkowanie wiedzy o elementach występujących w budynku oraz zidentyfikowanie możliwości uwzględnia ich w obliczeniach.

Listy elementów zawierają:

- identyfikację elementów budynku wraz przyporządkowaniem do konkretnego obszaru (np. element konstrukcyjny będący częścią fundamentów);
- jeśli to możliwe zidentyfikowanie elementów składowych danego elementu (np. beton konstrukcyjny i stal);
- informację o danych potrzebnych do dokładnego uwzględnia danego elementu w obliczeniach (np. typ stali, masa w kg);
- listę kontrolną występowania danego elementu w budynku;
- listę kontrolną dostępności informacji na temat danego elementu w dokumentacji budynku;
- listę kontrolną dostępności danych środowiskowych dla danego elementu w programie obliczeniowym.

Listy elementów stworzone zostały zarówno dla elementów konstrukcyjnych i architektonicznych jak również dla elementów instalacji budynkowych.

Lista elementów architektonicznych i konstrukcyjnych, wykluczenia

Jak wspomniano wcześniej, określenie granicy modelu budynku jest istotne z punktu widzenia spójności porównywanych wyników. Do określenia listy elementów, które uwzględniono w analizie, posłużono się minimalnym zakresem elementów budynku spójnym z systemem Level(s). Ów zakres został przedstawiony w Tabeli 9.

Pierwszym etapem opracowywania danych była szczegółowa weryfikacja dokumentacji rozpatrywanych budynków oraz określenie dostępności danych dla każdego z poszczególnych elementów ustalonego zakresu. Obecność danego elementu w budynku, nie zawsze była równoznaczna z posiadaniem dostatecznych danych, aby na ich podstawie wykonać wymagane obliczenia. Brak informacji o użytym materiale, lub charakterystyce struktury, z jaką było do czynienia, skutecznie uniemożliwiało uwzględnienie tych elementów w analizie.

Po wstępnym określeniu rodzajów użytych w budynku produktów, konieczne było precyzyjne przyporządkowanie ich do poszczególnych podkategorii wyszczególnionych w Level(s). Było to niezwykle istotne z punktu widzenia analizy późniejszych wyników. Nadmienić należy, iż analiza dotyczyła kilku różnych budynków, których dokumentacja znacząco się od siebie różniła. Zestawienia danych materiałowych zaprezentowano w rozbieżnych formach. Niekiedy zestawienia ilościowe podawano sumarycznie dla kilku kategorii łącznie, więc niezbędne było adekwatne do rzeczywistości, rozdzielenie ich - zgodnie z przyjętym na początku podziałem wg. Level(s).

W wyniku tego etapu, sprecyzowana została interpretacja poszczególnych podkategorii Level(s), a więc i reprezentacyjne dla każdej z kategorii rzeczywiste elementy oraz ich wyłączenia. Wyłączenia wynikały z założenia pewnego poziomu szczegółowości, spójnego i możliwego do uwzględnienia na bazie dokumentacji każdego z analizowanych budynków. Priorytetem było bowiem utrzymanie porównywalności wariantów na jak najwyższym poziomie.

Po wypracowaniu modelu opracowywania dokumentacji, konieczna była weryfikacja, czy możliwe jest wprowadzenie do oprogramowania obliczeniowego wszystkich materiałów, które zostały wyodrębnione do dalszej analizy. W związku z powyższym okazało się, iż konieczne było przeliczanie jednostek, np. płyty betonowej zbrojonej siatką, bądź mieszanki cementowej - z jednostek objętości na jednostki masy poszczególnych składników, co wiązało się z błędem oszacowania i wpływem przyjętego współczynnika na wynik końcowy. Niektóre produkty nie występowały w oprogramowaniu, nie znaleziono także ich wiarygodnych alternatyw - był to powód do wykluczenia tych materiałów z obliczeń.

Przykładem podkategorii, które zostały wyłączone w całości, są: system komunikacji i bezpieczeństwa oraz instalacje telekomunikacyjne i przesyłu danych, które zgodnie z systemem Level(s) można zakwalifikować do „innych systemów”, a wchodzi w skład trzonu budynku. Analogicznie postąpiono z całą kategorią „media”, wchodzącą w skład kategorii robót zewnętrznych.

Minimalny zakres części i elementów budynku uwzględniany w ramach systemu Level(s), wg którego na potrzeby projektu wykonywano identyfikację elementów, przygotowano zestawienia ilościowe oraz przyporządkowano odpowiednią kategorię, pokazano w Tabeli 9.

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Tabela 9. Minimalny zakres części i elementów budynku uwzględniany w ramach systemu Level(s)

Części budynku	Powiązane elementy budynku
Powłoka budynku (podziemna i nadziemna część konstrukcji)	
Fundamenty (podziemna część konstrukcji)	Pale Kondygnacje podziemne Ściany oporowe
Szkielet nośny	Szkielet (belki, słupy i płyty) Górne stropy Ściany zewnętrzne Balkony
Elementy nienośne	Płyta parteru Ściany wewnętrzne, ściany działowe i drzwi Schody i pochylnie
Fasady	Zewnętrzne systemy ścian, okładziny i konstrukcje zacieniające Otwory w elewacji (w tym okna i drzwi zewnętrzne) Zewnętrzne farby, powłoki i tynki
Dach	Struktura Uszczelnianie
Parkingi	Naziemne i podziemne (znajdujące się na terenie wokół budynku i służące użytkownikom budynku)
Trzon (armatura, wyposażenie i instalacje wewnętrzne)	
Armatura i wyposażenie	Armatura sanitarna Szafki, szafy i powierzchnie robocze Wykończenia, pokrycia i powłoki podłóg Listwy przypodłogowe i wykończeniowe Gniazda i przełączniki Wykończenia i powłoki ścian i sufitów
Wbudowany system oświetlenia	Oprawy oświetleniowe Systemy kontroli i czujniki
System energetyczny	Instalacja grzewcza i system dystrybucji ciepła Kaloryfery Instalacja chłodząca i układ chłodzenia Wytwarzanie energii elektrycznej Dystrybucja energii elektrycznej
System wentylacyjny	Centrale klimatyzacyjne Kanały i system dystrybucji
Instalacje sanitarne	System rozprowadzania wody zimnej System rozprowadzania wody gorącej Systemy oczyszczania ścieków System odwadniania
Inne systemy	Windy i schody ruchome Systemy gaśnicze Systemy komunikacji i bezpieczeństwa Instalacje telekomunikacyjne i przesyłu danych
Roboty zewnętrzne	
Media	Przyłącza i przebudowa sieci Podstacje i sprzęt
Architektura krajobrazu	Chodniki i inne powierzchnie utwardzone Ogrodzenia, barierki i mury Systemy odwadniania

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Lista elementów instalacyjnych, wykluczenia

System Level(s) definiuje budynek w kategoriach minimalnego zakresu części budynku i powiązanych elementów. W przypadku elementów instalacyjnych są to składniki trzonu przedstawione w Tabeli 10.

Tabela 10. Minimalny zakres części i elementów trzonu budynku związanych z instalacjami budynkowymi uwzględniany w ramach systemu Level(s)

Kategoria	Element
Armatura i wyposażenie	Armatura sanitarna
Wbudowany system oświetlenia	Oprawy oświetleniowe Systemy kontroli i czujniki
Systemy kontroli i czujniki	Instalacja grzewcza i system dystrybucji ciepła Instalacja chłodząca i układ chłodzenia System wytwarzania i dystrybucji energii elektrycznej
System energetyczny	Centrale klimatyzacyjne Kanały i system dystrybucji System rozpraszania wody zimnej System rozpraszania wody gorącej
Instalacja chłodząca i układ chłodzenia	Systemy oczyszczania ścieków System odwadniania Windy i schody ruchome
System wytwarzania i dystrybucji energii elektrycznej	Systemy gaśnicze Systemy komunikacji i bezpieczeństwa Instalacje telekomunikacyjne i przesyłu danych

Jako elementy instalacyjne identyfikuje się również elementy wchodzące w skład robót zewnętrznych. Przedstawiono je w Tabeli 11.

Tabela 11. Minimalny zakres części i elementów robót zewnętrznych związanych z instalacjami budynkowymi uwzględniany w ramach systemu Level(s)

Kategoria	Element
Media	Przyłącza i przebudowa sieci Podstacje i sprzęt
Architektura krajobrazu	Systemy odwadniania

Spośród elementów instalacyjnych w obliczeniach dla budynków testowych uwzględniono wszystkie występujące w danym budynku, oprócz robót zewnętrznych związanych z mediami, tj. przyłączy i przebudowy sieci oraz podstacji i sprzętu. Prace te wykonywane są zewnętrznie przez właściciela sieci więc ich zinventaryzowanie jest znacząco utrudnione. Pozostałe elementy zostały uwzględnione.

Opis wariantów obliczeniowych budynków testowych

W celu zdefiniowania metodyki wyznaczania śladu węglowego budynków niezbędne jest jej doszczegółowienie na poziomie krajowym, m.in. przez ograniczenie możliwości dowolnego przyjmowania poszczególnych elementów procedury obliczeniowej oraz wypracowanie wartości wskaźnikowych. W tym celu na potrzeby projektu, przeprowadzono analizę różnych scenariuszy obliczeniowych.

W celu zidentyfikowania wpływu poszczególnych założeń na wyniki śladu węglowego budynku, zdefiniowano łącznie 21 wariantów obliczeniowych (budynków referencyjnych): po 7 wariantów obliczeniowych dla każdego budynku. Określony został wariant bazowy, oznaczony jako wariant 0, który zdefiniowano przy użyciu wartości domyślnych i scenariuszy domyślnych.

Warianty 1-6 zostały zdefiniowane w stosunku do scenariusza bazowego ze zmianą w jednym z poniższych obszarów:

- typ danych środowiskowych dla materiałów i elementów budynku;
- czas użytkowania elementów/materiałów/instalacji/urządzeń
- scenariusz transportowy;
- typ danych środowiskowych dla instalacji budynkowych;
- scenariusz dla zmiany miksu energetycznego.

W Tabeli 12 i Tabeli 13 zestawiono warianty obliczeniowe dla budynków testowych.

Tabela 12. Warianty obliczeniowe dla budynku biurowego B1 i mieszkalnego W

Opis wariantu	Typ danych środowiskowych	Czas użytkowania elementów	Scenariusz transportu	Instalacje budynkowe	Scenariusz dla zmiany miksu energetycznego
Wariant bazowy-wariant 0	dane ogólne/generyczne	techniczny	scenariusz 1	metoda dokładna	obecna wartość emisji, stała w czasie
Wariant 1	dane specyficzne	techniczny	scenariusz 1	metoda dokładna	obecna wartość emisji, stała w czasie
Wariant 2	dane ogólne/generyczne	specyficzny dla produktu	scenariusz 1	metoda dokładna	obecna wartość emisji, stała w czasie
Wariant 3	dane ogólne/generyczne	techniczny	scenariusz 2	metoda dokładna	obecna wartość emisji, stała w czasie
Wariant 4	dane ogólne/generyczne	techniczny	scenariusz 1	metoda uśredniona	obecna wartość emisji, stała w czasie
Wariant 5	dane ogólne/generyczne	techniczny	scenariusz 1	metoda dokładna	scenariusz 1
Wariant 6	dane ogólne/generyczne	techniczny	scenariusz 1	metoda dokładna	scenariusz 2

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Tabela 13. Warianty obliczeniowe dla budynku biurowego B2

Opis wariantu	Typ danych środowiskowych	Czas użytkowania elementów	Scenariusz transportu	Instalacje budynkowe	Scenariusz dla zmiany miks energetycznego
Wariant bazowy-wariant 0	dane ogólne/generyczne	techniczny	scenariusz 1	metoda dokładna	obecna wartość emisji, stała w czasie
Wariant 1	dane specyficzne	techniczny	scenariusz 1	metoda dokładna	obecna wartość emisji, stała w czasie
Wariant 2	dane ogólne/generyczne	specyficzny dla produktu	scenariusz 1	metoda dokładna	obecna wartość emisji, stała w czasie
Wariant 3	dane ogólne/generyczne	techniczny	scenariusz 2	metoda dokładna	obecna wartość emisji, stała w czasie
Wariant 4	dane ogólne/generyczne	techniczny	scenariusz 1	metoda mieszana	obecna wartość emisji, stała w czasie
Wariant 5	dane ogólne/generyczne	techniczny	scenariusz 1	metoda dokładna	scenariusz 1
Wariant 6	dane ogólne/generyczne	techniczny	scenariusz 1	metoda dokładna	scenariusz 2

Poniżej omówiono poszczególne scenariusze wykorzystane w określaniu śladu węglowego budynków testowych.

Wybór danych materiałowych

Wybór danych materiałowych związany jest z poziomem szczegółowości wykorzystywanych danych i hierarchii wyboru danych.

W analizie uwzględniono następujące typy danych:

- dane ogólne/generyczne - charakterystyczne dla danego typu elementu konstrukcyjnego lub materiału, technologii. W tym scenariuszu wybrano materiały ogólne, które opierają się na średnich emisjach lub mają średnie emisje szeregu produktów,
- specyficzne dane produktu – dane na podstawie deklaracji środowiskowych EPD lokalnego, polskiego producenta. Oddziaływanie na środowisko w dużym stopniu zależy od gatunku betonu i stali użytej w betonie. Analizę przeprowadzono tylko dla większości materiałów wbudowanych: betonu i stali zbrojeniowej.

Czas użytkowania elementów/materiałów/instalacji/urządzeń

Emisja wbudowana w module B4 zależy m.in. od trwałości materiałów budowlanych a tym samym częstotliwości ich wymiany. W analizie uwzględniono następujące okresy użytkowania:

- Okres użytkowania technicznego - zakłada się, że ten sam typ materiałów ma taką samą trwałość. Techniczny okres użytkowania określa, jak długo materiały wytrzymują w dobrych warunkach.
- Okres użytkowania specyficzny dla produktu — zdefiniowany okres użytkowania różni się w zależności od wyboru producenta (wykorzystywane są wartości z Deklaracji Środowiskowych EPD).

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Scenariusz transportowy

Opracowanie scenariusza transportu materiałów budowlanych obejmuje rodzaj transportu dla danych typów materiałów i wyrobów budowlanych oraz dane dotyczące krajowych średnich odległości transportowych oraz załadunku. W celu określenia wpływu wybranego scenariusza transportu na ślad węglowy budynku na potrzeby analizy zdefiniowano dwa następujące scenariusze:

- Scenariusz 1 – obliczony na podstawie inwentaryzacji ilości materiałów, środek transportu zależny od typu materiałów, przyjęto średnie europejskie odległości transportowe. Załadunek materiałów wynosi 100%.
- Scenariusz 2 – obliczony na podstawie inwentaryzacji ilości materiałów, środek transportu zależny od typu materiałów, przyjęto średnie europejskie odległości transportowe. Modelowanie transportu zależy od organizacji łańcucha logistycznego i ze względu na błędy komunikacyjne i zarządzanie zapasami przyjęto założenie, że poziom załadunku materiałów wynosi 50%.

Instalacje budynkowe

System Level(s) określa minimalny zakres elementów budynku poddawanych ocenie uwzględniający różne systemy budynkowe. Określenie śladu węglowego związanego z instalacjami budynkowymi może być jednak bardzo trudne z uwagi na ograniczone dane środowiskowe instalacji budynkowych oraz wymagany nakład pracy niezbędny do wykonania inwentaryzacji i opracowania zestawień ilościowych. Choć producenci elementów instalacyjnych w coraz większym stopniu udostępniają deklaracje środowiskowe swoich produktów, warto zauważyć, że wiele elementów jest zależnych od wymiarów (np. średnicy) czy danych charakterystycznych np. od mocy urządzenia czy jego pojemności. Z tego względu, często dostępne są tzw. uśrednione dane, których wartość emisji została wyznaczona dla całych systemów technicznych, zaś jednostką referencyjną jest moc instalacji lub wartość emisji odniesiona jest do 1m² powierzchni. W celu określenia wpływu wyboru metody na ślad węglowy instalacji budynkowych zdefiniowano następujące scenariusze:

- metoda dokładna – metoda ta opiera się na dokładnej inwentaryzacji elementów budynkowych, szczegółowe zestawienia wykonano na podstawie przedmiarów robót;
- metoda uśredniona - na podstawie danych uśrednionych dla konkretnego typu budynku i systemu instalacyjnego. Oddziaływanie na środowisko obliczone przy użyciu średniego wskaźnika, takiego jak wpływ/m² powierzchni;
- metoda mieszana – jest kombinacją metody dokładnej i uśrednionej.

Scenariusz dla zmiany miks energetycznego (wytwarzanie energii elektrycznej)

Obliczona wartość śladu węglowego w cyklu życia zależy od wielu czynników. Jednym z nich jest emisyjność systemu energetycznego. Udział poszczególnych źródeł energii i paliw w krajowym miksie energetycznym będzie zmieniał się w czasie, dążąc do zmniejszenia obciążenia środowiska emisjami zanieczyszczeń. W celu określenia, jak zmiana miks energetyczny wpłynie na wartość śladu węglowego obliczanego w cyklu życia, zdecydowano się na przeprowadzenie obliczeń przy założeniu zmiany emisyjności systemu energetycznego w czasie. W analizie uwzględniono zmianę emisyjności jedynie dla systemu elektroenergetycznego:

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

- Scenariusz bazowy (Wariant 0) - emisja CO₂eq jest stała w okresie 50 lat. Przyjęto wskaźnik emisji 1,062 kgCO₂/kWh na podstawie danych Międzynarodowej Agencji Energii z 2022 r na rok 2023.
- Scenariusz 1 - Prognoza dekarbonizacji sieci energetycznej jest zgodna z założeniami zaproponowanymi przez partnera projektu, czyli firmę Asplan Viak z Norwegii. Zakłada ona roczne obniżanie wskaźnika emisji o 2,65% w stosunku do wskaźnika w roku 2023. Przy takim założeniu neutralność emisyjną polskiej sieci elektroenergetycznej osiągnie się w 2062 roku, a średni wskaźnik emisyjności dla kolejnych 50 lat wynosi 0,411 kgCO₂/kWh.
- Scenariusz 2 - Prognoza dekarbonizacji sieci energetycznej jest zgodna z założeniem, iż w roku 2050 osiągnie się neutralność emisyjną polskiego systemu energetycznego. Przyjęto coroczne stałe obniżenie emisyjności aż do roku 2050, gdy wyniesie ona 0 kgCO₂/kWh. Średnia wartość wskaźnika emisji dla kolejnych 50 lat według tego scenariusza to 0,287 kgCO₂/kWh.

W analizie wpływu emisyjności systemu energetycznego uwzględniono trzy scenariusze o różnych wartościach średniego wskaźnika emisji CO₂ dla energii elektrycznej. Wskaźniki podsumowano w poniższej tabeli.

Tabela 14. Scenariusze zmiany miksu energetycznego

Scenariusz	Opis	Współczynnik emisji dla sieci elektroenergetycznej [kg CO ₂ /kWh]
Scenariusz bazowy	Wartość domyślna	1,062
Scenariusz 1	Obniżenie wskaźnika o 2,65% rocznie względem 2023 roku	0,411
Scenariusz 2	Stałe obniżenie wskaźnika aż do uzyskania neutralności emisyjnej w 2050 roku	0,287

Metodyka wyznaczania śladu węglowego budynków testowych

Wybór danych środowiskowych, bazy danych

Z uwagi na charakter danych, którymi dysponowano oraz uwzględniając dostępność EPD, podczas obliczeń wykorzystano:

- dane ogólne - charakterystyczne dla danego typu elementu konstrukcyjnego lub materiału, opracowywane np. przez środowisko naukowe, firmy konsultacyjne;
- dane zagregowane - dane charakterystyczne dla całego komponentu, który może składać się z różnych materiałów, np. ściana g-k, elementy prefabrykowane;
- specyficzne dane produktu – dane na podstawie deklaracji środowiskowych EPD konkretnego producenta;
- średnie specyficzne dane produktu – uśrednione dane opracowane na podstawie materiałów różnych producentów (np. na podstawie deklaracji środowiskowych EPD).

Wskaźniki oddziaływania na środowisko poszczególnych materiałów, które uwzględnione zostały w analizie LCA, pochodzą z bazy danych oprogramowania One Click LCA, wersja programu 0.27.3., wersja bazy danych 7.6 firmy One Click LCA Ltd.

Dostępność deklaracji środowiskowych produktów i materiałów, które użyte zostały w rozpatrywanych budynkach wymusza pewne uproszczenia i kompromisy, a także sprawia, że wynik analizy jest jedynie pewnego rodzaju oszacowaniem rzeczywistości - czasami mniej, a czasami bardziej dokładnym. Poniżej przedstawiono sposób uwzględnienia tejże kwestii w analizie.

Wybór narzędzia obliczeniowego determinował także pewien sposób ujęcia niektórych parametrów używanych do analizy. Konieczne było m.in. ustalenie wstępnych założeń dotyczących wartości domyślnych, a właściwie wybranie ich spośród dostępnych opcji.

Jednym z takich aspektów, była kwestia sposobu uwzględniania lokalizacji wytwarzania materiałów. Profil energetyczny kraju w którym produkowany jest dany element ma wpływ na wynik końcowy. Metoda kompensacji lokalizacji produkcji jest jedną z propozycji rozwiązania problemu braku lokalnych profili środowiskowych. Dostosowanie wyników do lokalnego koszyka energetycznego, pozwala na bardziej reprezentatywne wyniki. Jednocześnie nie zmienia wpływu miksu paliw użytego w procesie produkcji. Przeliczenie opiera się na dostosowaniu emisji z procesu wytwarzania danego materiału dla energii elektrycznej do kraju w którym znajduje się budynek, zamiast do kraju w którym, zgodnie z EPD, materiał ten jest produkowany. Współczynnik kompensacji zastosowano w przypadku korzystania z danych ogólnych One Click LCA.

Granice systemu - fazy budynku uwzględnione w analizie budynków testowych

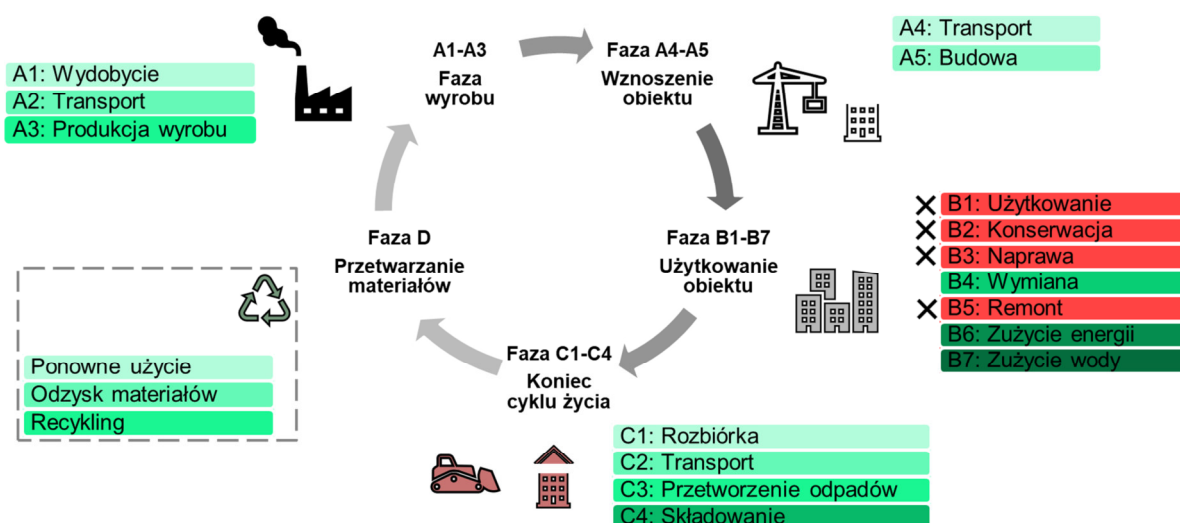
Granice systemu ustalają zakres analizy cyklu życia, tj. określają procesy, które są uwzględniane w analizie. Wartość wskaźnika GWP wyznaczana jest dla całego cyklu życia, który oznacza łączną emisję gazów cieplarnianych na wszystkich etapach jego cyklu

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

życia, czyli od „kołyski” (wydobycie surowców wykorzystywanych do budowy budynku) poprzez etap produkcji i przetwarzania materiałów, okres wznoszenia budynku oraz etap eksploatacji budynku, aż po „grób” (rozbiórka budynku oraz ponowne użycie, recykling, inne rodzaje odzysku i unieszkodliwianie materiałów). Cykl życia budynku, wg EN 15978 podzielony jest na następujące moduły (fazy):

- faza produktu obejmująca fazę wyrobu (tzw. „cradle to gate): A1-A3,
- fazę wznoszenia budynku: A4-A5,
- fazę użytkowania budynku: B1-B7,
- fazę końca cyklu życia: C1-C4,
- oddziaływania poza granicami systemu - potencjalne straty i zyski z materiału wtórnego, paliwa wtórnego lub odzyskanej energii: D.

Jednak obecny stan wiedzy, dostęp do baz danych oraz umiejętności w zakresie wyznaczania wskaźnika GWP w całym cyklu życia są ograniczone i dla niektórych faz trudne lub wręcz niemożliwe może być określenie wskaźników emisji. Takim przykładem są np. fazy B1-B2. W odniesieniu do całego cyklu życia budynku, a nawet w odniesieniu tylko do emisji wbudowanej, szacuje się, że fazy te mają pomijalnie niski wpływ na wartość wskaźnika GWP stąd zostały one pominięte w analizie. Podobnie, przyjęto, że scenariusz dla fazy B5 nie przewiduje głębokiej modernizacji. Podsumowując, fazy B1-B5 zostały uproszczone do uwzględnienia tylko fazy B4. Powyższe założenie opiera się na przyjęciu scenariusza użytkowania, dla którego zakłada się, że z uwagi na marginalny wpływ środowiskowy, faza B1-B2 może zostać pominięta w ocenie środowiskowej. Scenariusz dla fazy B3 nie przewiduje napraw. Zakłada się wymianę urządzenia po jego zdefiniowanym czasie użytkowania. Scenariusz dla fazy B5 nie przewiduje głębokiej modernizacji. Pozostałe fazy zostały uwzględnione w śladzie węglowym budynków testowych.



Rysunek 5 Granice systemu uwzględnione w śladzie węglowym budynków testowych wg EN 15978

Wyniki analizy

Analiza śladu węglowego budynku została wykonana zgodnie z wytycznymi ujętymi w Level(s). Wytyczne te zawierają unijne ramy do oceny pomiaru potencjału globalnego ocieplenia w cyklu życia, stosowane są w celu raportowania i udostępniania informacji o efektywności środowiskowej budynków.

Obliczenia wykonano w programie do analizy środowiskowej One Click LCA, wersja programu 0.27.3., wersja bazy danych 7.6 firmy One Click LCA Ltd. Oprogramowanie to posiada moduł obliczeniowy, zgodny z wymaganiami ujętymi w Level(s).

Wskaźnik globalnego ocieplenia obliczono dla całego budynku oraz w odniesieniu do całkowitej powierzchni netto budynku w całym cyklu życia (50 lat) z rozróżnieniem na poszczególne fazy cyklu życia budynku. W poniższych tabelach znajdują się szczegółowe wartości wskaźników środowiskowych dla analizowanych etapów cyklu życia budynku wraz z zestawieniem ilościowym i rozróżnieniem na elementy budynku.

Analizę wyników rozpoczęto od zaprezentowania interpretacji wyników dla wariantu bazowego, tj. wariantu zerowego, oznaczonego jako „v.0”. W dalszej części analizy zamieszczono wyniki porównawcze, w formie tabel i wykresów, które mają na celu zestawienie różnic między rozpatrywanymi, dla konkretnego budynku, wariantami.

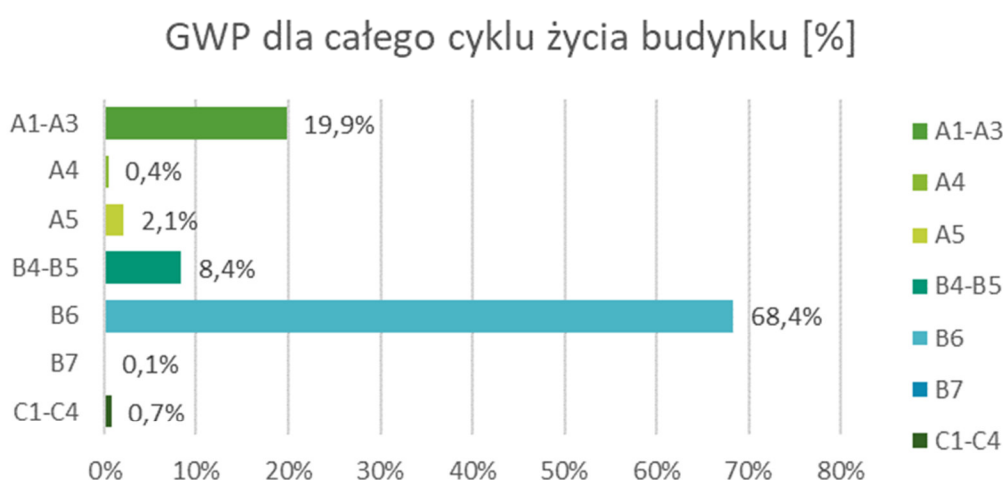
W kolejnej części rozdziału porównano warianty obliczeniowe. Porównania wariantów zaprezentowano blokowo - posegregowane w trzy różne grupy. W pierwszym bloku zestawiono warianty, w których określony został wpływ takich czynników jak: dane o emisjach dla stali zbrojeniowej i betonu, czas użytkowania, scenariusz transportu. Drugi blok to zestawienie dwóch wariantów opierających się na dwóch różnych ujęciach uwzględnienia w projekcie danych o instalacji HVAC. Trzeci blok to porównanie wariantów dotyczących wartości wskaźnika emisji CO₂ systemu elektroenergetycznego.

Wariant bazowy

1. Budynek biurowy B1

1.1 Etapy cyklu życia - wariant bazowy (v.0)

Rozpatrując wpływ w podziale na poszczególne etapy cyklu życia, można zauważyć, że faza użytkowania budynku (która zawiera się między B1, a B7; jednak w naszym przypadku - po wykluczeniu emisji zerowych, właściwie będzie dotyczyła zakresu B4-B7) cechuje się najwyższymi wskaźnikami środowiskowymi: GWP = 48 803,5 t CO₂e (Rysunek 6.). Emisja użytkowa CO₂e pochodząca ze zużycia energii w budynku (faza B6), odpowiedzialna jest za około 68,4% emisji całkowitej (GWP = 43 429,5 t CO₂e).



Rysunek 6. Wskaźnik GWP w podziale na fazy cyklu życia w czasie 50 lat

Emisja, związana z produkcją materiałów budowlanych (fazy A1-A3 oraz B4-B5), stanowi 28,3%. Pozostałe fazy w cyklu życia analizowanego budynku charakteryzują się niskimi udziałami w całkowitym wskaźniku GWP i mają znaczenie marginalne (faza A4; faza A5; faza B7; fazy C1-C4). Łączny udział tychże etapów wynosi około 3,4%; GWP = 2 140,7 t CO₂e. Wartości im odpowiadające zostały zaprezentowane w Tabeli 15.

W roku zerowym, czyli dla faz A1-A3, wskaźnik emisji gazów cieplarnianych GWP wyniósł 19,9%. Włączając fazę budowy (A4-A5), otrzymano wskaźnik GWP na poziomie 22,4%, co oznacza wzrost do 22,4%. Po 50 latach, przed rozbiórką, wskaźnik GWP osiągnie poziom 99,3% całkowitej wartości (fazy A i B).

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

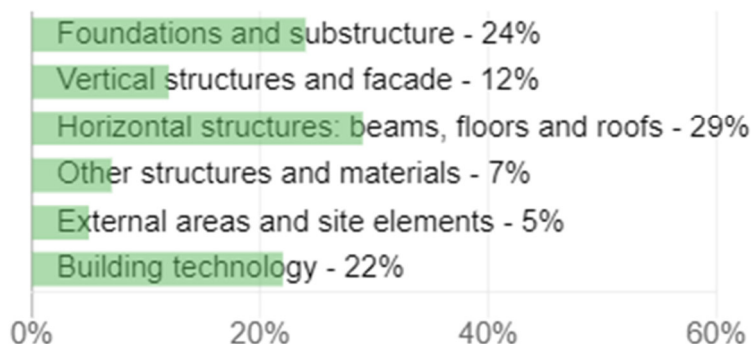
Tabela 15. GWP dla całego cyklu życia budynku w odniesieniu do całkowitej powierzchni netto w całym cyklu życia lub w odniesieniu do 1 m² całkowitej powierzchni netto

Faza	GWP całkowite [t CO ₂ eq]	GWP [kg CO ₂ e/m ²]	GWP [%]
A1-A3 produkcja wyrobów	12 618,0	644,7	19,9%
A4 transport	274,0	14,0	0,4%
A5 proces budowy/installacji	1 360,0	69,5	2,1%
B4-B5 wymiana i remont	5 330,6	272,4	8,4%
B6 zużycie energii	43 429,5	2 219,1	68,4%
B7 zużycie wody	43,3	2,2	0,1%
C1-C4 koniec życia	463,4	23,7	0,7%

1.2 Materiały o największym wpływie

Biorąc pod uwagę fazę wyrobu (A1-A3), materiały o największej, wyróżniającej się wartości wskaźników to kolejno: stal zbrojeniowa (GWP = 3 973 t CO₂e, 31,5 % GWP_{A1-A3}) oraz beton C30/37 (3 441 t CO₂e, 27,3 % GWP_{A1-A3}). Materiały odpowiadają za około 58,8 % emisji fazy wyrobu.

1.3 Elementy o największym wpływie



Rysunek 7. GWP w podziale na kategorie elementów w obrębie faz A1-A3

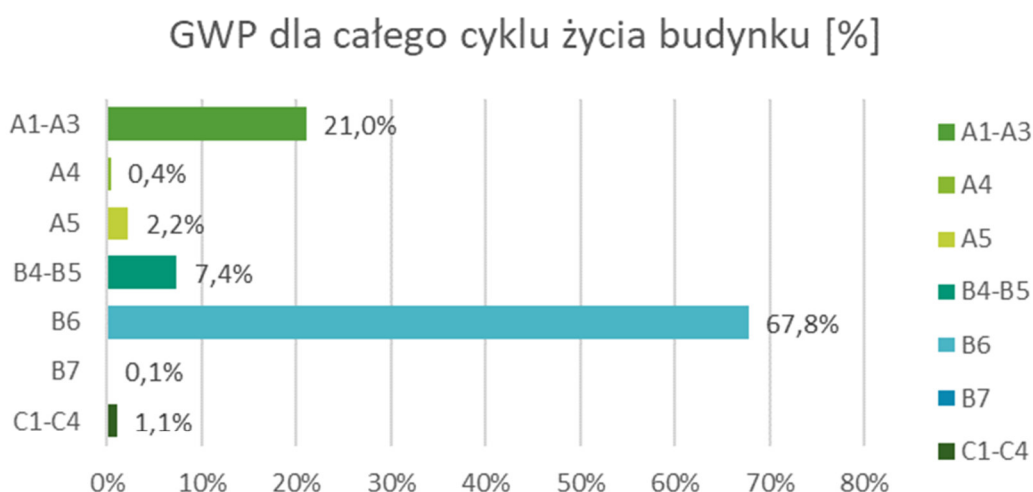
Analizując kategorie elementów w obrębie faz A1-A3, najwyższy wskaźnik GWP występuje dla konstrukcji poziomych (belki, stropy, dachy) - 29% GWP_{A1-A3} oraz dla fundamentów - 24% GWP_{A1-A3}. Instalacje budynkowe odpowiadają za około 22% emisji CO₂e określonej dla fazy A1-A3.

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

2. Budynek biurowy „B2”

2.1 Etapy cyklu życia - wariant bazowy (v.0)

Rozpatrując wpływ w podziale na poszczególne etapy cyklu życia, można zauważyć, że faza użytkowania budynku, w naszym przypadku B4 - B7, cechuje się najwyższymi wskaźnikami środowiskowymi: GWP = 24 419,6 t CO₂e (Rysunek 8.). Zestawiając wartość całkowitą emisji, należy mieć na względzie różnice w powierzchniach porównywanych budynków. Emisja użytkowa CO₂e pochodząca ze zużycia energii w budynku (faza B6), odpowiedzialna jest za około 67,8 % emisji całkowitej (GWP = 21 994 759,0 t CO₂e).



Rysunek 8. Wskaźnik GWP w podziale na fazy cyklu życia w czasie 50 lat

Emisja związana z produkcją materiałów budowlanych (w rozpatrywanym przypadku fazy A1-A3 oraz B4-B5), stanowi 28,4%. Pozostałe fazy w cyklu życia analizowanego budynku charakteryzują się niskimi udziałami w całkowitym wskaźniku GWP i mają znaczenie marginalne (faza A4; faza A5; faza B7; faza C1-C4). Łączny udział tychże etapów wynosi około 3,8%; GWP = 1 241,4 t CO₂e. Wartości im odpowiadające zostały zaprezentowane w Tabeli 16.

W roku zerowym, czyli dla faz A1-A3, wskaźnik emisji gazów cieplarnianych GWP wyniósł 21,0%. Włączając fazę budowy (A4-A5), otrzymano wskaźnik GWP na poziomie 7 679,0 t CO₂e, co oznacza wzrost o 23,7%. Po 50 latach, przed rozbiórką, wskaźnik GWP osiągnie poziom 98,9% całkowitej wartości (fazy A i B).

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Tabela 16. GWP dla całego cyklu życia budynku w odniesieniu do całkowitej powierzchni netto w całym cyklu życia lub w odniesieniu do 1 m² całkowitej powierzchni netto

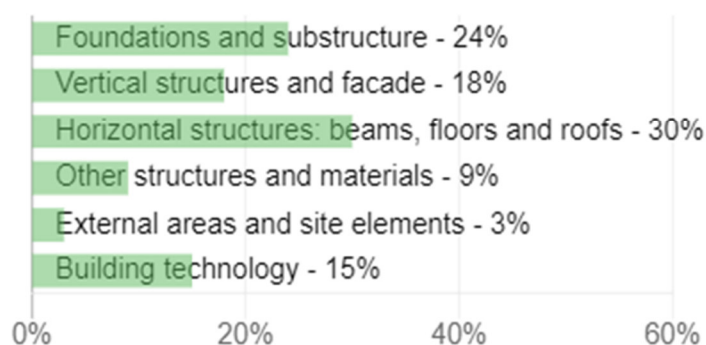
faza	GWP całkowite [t CO ₂ e]	GWP [kg CO ₂ e/m ²]	GWP [%]
A1-A3 produkcja wyrobów	6 822,4	649,6	21,0%
A4 transport	129,2	12,3	0,4%
A5 proces budowy/installacji	727,4	69,3	2,2%
B4-B5 wymiana i remont	2 390,3	227,6	7,4%
B6 zużycie energii	21 994,8	2 094,3	67,8%
B7 zużycie wody	34,6	3,3	0,1%
C1-C4 koniec życia	350,2	33,3	1,1%

2.2 Materiały o największym wpływie

Biorąc pod uwagę fazę wyrobu (A1-A3), materiały o największej, wyróżniającej się wartości wskaźników to kolejno: beton C30/37 (1917 t CO₂e, 28,1 % GWP_{A1-A3}); stal zbrojeniowa (GWP = 1 686 t CO₂e, 24,7 % GWP_{A1-A3}). Materiały odpowiadają za około 52,8 % emisji fazy wyrobu.

2.3 Elementy o największym wpływie

Analizując kategorie elementów w obrębie faz A1-A3, najwyższe GWP występują dla konstrukcji poziomych (belki, stropy, dachy) - 30 % GWP_{A1-A3} oraz dla fundamentów - 24% GWP_{A1-A3}. Instalacje budynkowe odpowiadają za około 15% emisji CO₂e dla fazy A1-A3.

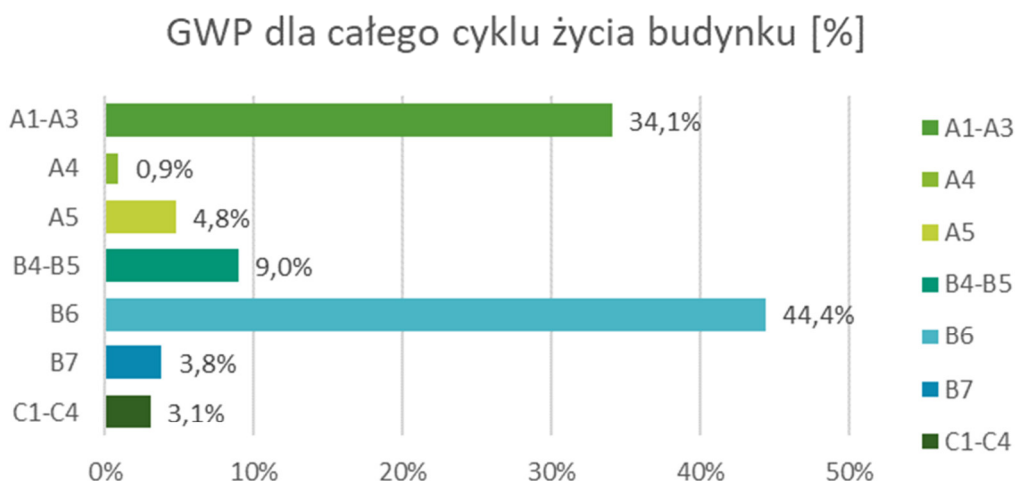


Rysunek 9. GWP w podziale na kategorie elementów w obrębie faz A1-A3

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

3. Budynek wielorodzinny W

Rozpatrując wpływ w podziale na poszczególne etapy cyklu życia, można zauważyć, że faza użytkowania budynku, w naszym przypadku B4 - B7, cechuje się najwyższymi wskaźnikami środowiskowymi: GWP = 17 913,3 t CO₂e (Rysunek 10.). Emisja użytkowa CO₂e pochodząca ze zużycia energii w budynku (faza B6), odpowiedzialna jest za około 44,4 % emisji całkowitej (GWP = 13 904,5 t CO₂e).



Rysunek 10. Wskaźnik GWP w podziale na fazy cyklu życia w czasie 50 lat

Emisja związana z produkcją materiałów budowlanych (w rozpatrywanym przypadku fazy A1-A3 oraz B4-B5), stanowi 43,1%. Pozostałe fazy w cyklu życia analizowanego budynku charakteryzują się niskimi udziałami w całkowitym wskaźniku GWP i mają mniejsze znaczenie (faza A4; faza A5; faza B7; faza C1-C4). Łączny udział tychże etapów wynosi około 12,6%; GWP = 3 943,2 t CO₂e. Wartości im odpowiadające zostały zaprezentowane w Tabeli 17.

W roku zerowym, czyli dla faz A1-A3, wskaźnik emisji gazów cieplarnianych GWP wynosi 34,1%. Włączając fazę budowy (A4-A5), otrzymano wskaźnik GWP na poziomie 12 467,2 t CO₂e, co oznacza wzrost do 39,8%. Po 50 latach, przed rozbiórką, wskaźnik GWP osiągnie poziom 96,9% całkowitej wartości (fazy A i B).

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Tabela 17. GWP dla całego cyklu życia budynku w odniesieniu do całkowitej powierzchni netto w całym cyklu życia lub w odniesieniu do 1 m² całkowitej powierzchni netto

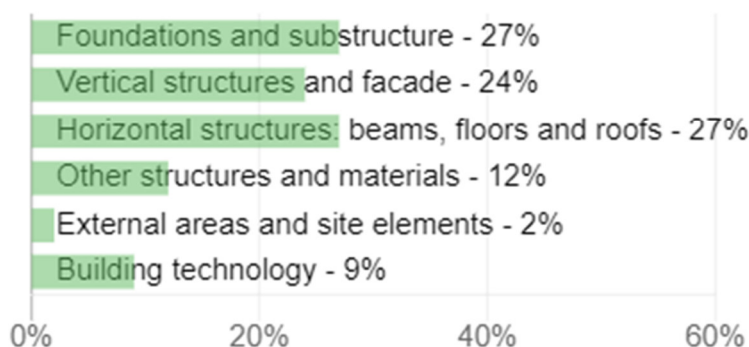
faza	GWP całkowite [t CO ₂ e]	GWP [kg CO ₂ e/m ²]	GWP [%]
A1-A3 produkcja wyrobów	10 681,5	563,3	34,1%
A4 transport	289,0	15,2	0,9%
A5 proces budowy/installacji	1 496,6	78,9	4,8%
B4-B5 wymiana i remont	2 812,3	148,3	9,0%
B6 zużycie energii	13 904,5	733,2	44,4%
B7 zużycie wody	1 196,4	63,1	3,8%
C1-C4 koniec życia	961,1	50,7	3,1%

3.1 Materiały o największym wpływie

Biorąc pod uwagę fazę wyrobu (A1-A3), materiały o największej, wyróżniającej się wartości wskaźników to kolejno: beton - w tym C30/37 oraz C25/30 (3 416 t CO₂e, 32,0 % GWP_{A1-A3}); stal zbrojeniowa (GWP = 3 049 t CO₂e, 28,5 % GWP_{A1-A3}). Materiały odpowiadają za około 60,5 % emisji fazy wyrobu.

3.2 Elementy o największym wpływie

Analizując kategorie elementów w obrębie faz A1-A3, najwyższe GWP występuje dla konstrukcji poziomych (belki, stropy, dachy) - 30 % GWP_{A1-A3} oraz dla fundamentów (podziemia) - 24% GWP_{A1-A3}. Instalacje budynkowe odpowiadają za około 9% emisji CO₂e dla fazy A1-A3.



Rysunek 11. GWP w podziale na kategorie elementów w obrębie faz A1-A3

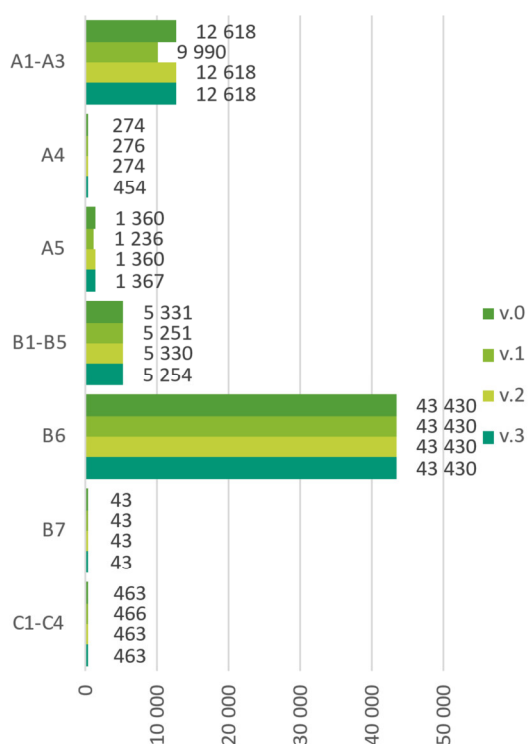
Zestawienie wyników analizowanych wariantów

1. Budynki biurowe

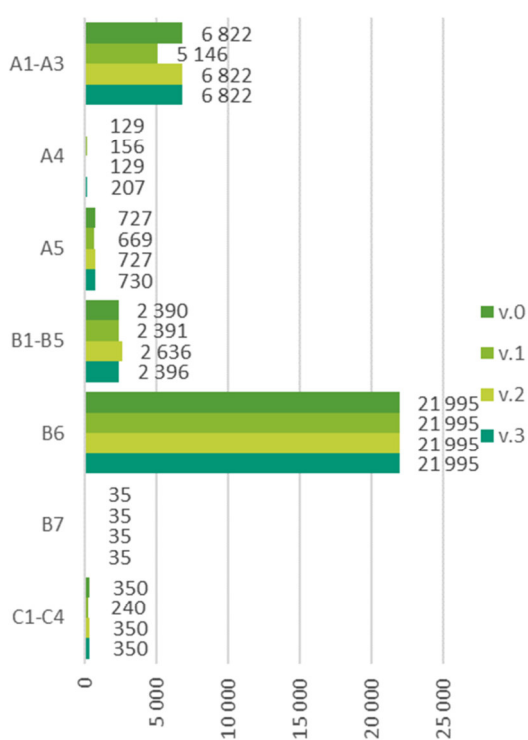
1.1 Warianty: 0, 1, 2, 3

Analizując pierwszy blok wariantów i rozpatrując udział poszczególnych etapów cyklu życia dla pierwszych czterech wariantów (v.0 - v.3), można zauważyć, że największe różnice między wariantami obserwuje się w fazie wyrobu (A1-A3) oraz w fazie użytkowania budynku (B6 - zużycie energii).

W fazie A1-A3 wyróżnia się wariant pierwszy (v.1), w którym zamiast uśrednionych danych o emisjach dla betonu i stali zbrojeniowej, przyjęto dane z lokalnych EPD. Wpłynęło to na zmniejszenie udziału tej fazy o ponad 20% dla obydwu budynków biurowych w stosunku do wariantu bazowego (v.0). Warianty drugi i trzeci (v.2 i v.3) opierają się na tych samych danych, co wariant bazowy i ma to swoje odzwierciedlenie w wynikach. Można z tego wywnioskować, iż dla materiałów o największym wpływie na emisję (beton, stal zbrojeniowa), bardziej precyzyjne dane podają mniejsze wartości wskaźnika niż dane ogólne. Co za tym idzie - wartości uśrednione (na podstawie bazy danych OneClick LCA) oraz sposób ich uwzględniania, prawdopodobnie są przeszacowane. Pozostałe różnice mają znikomy wpływ na wyniki sumaryczne.



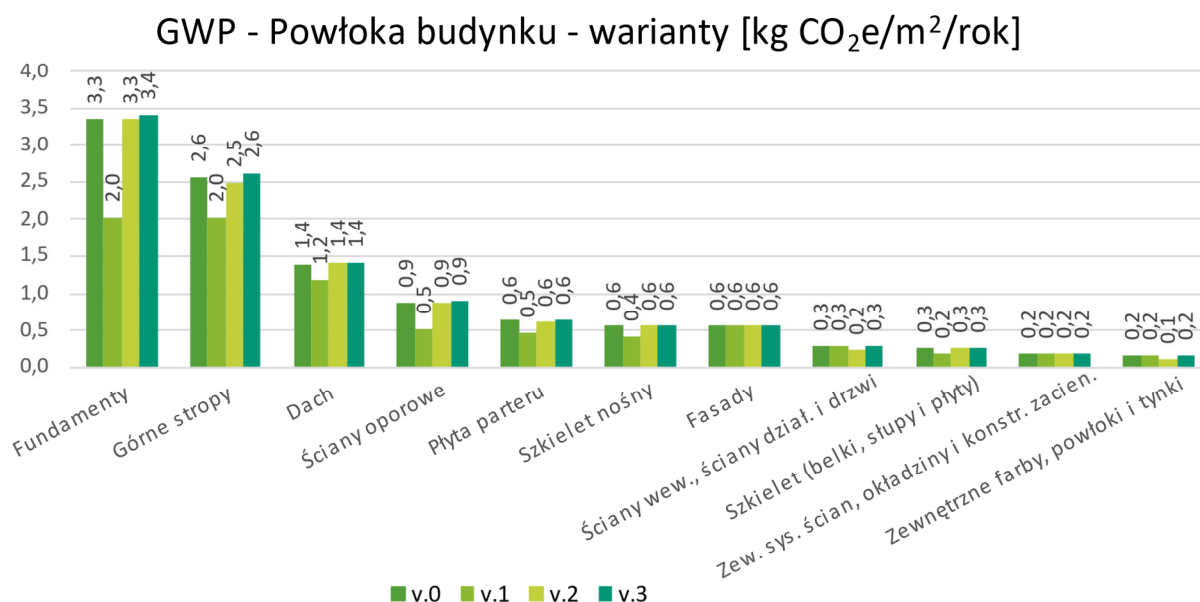
Rysunek 12. GWP w cyklu życia, budynek B1



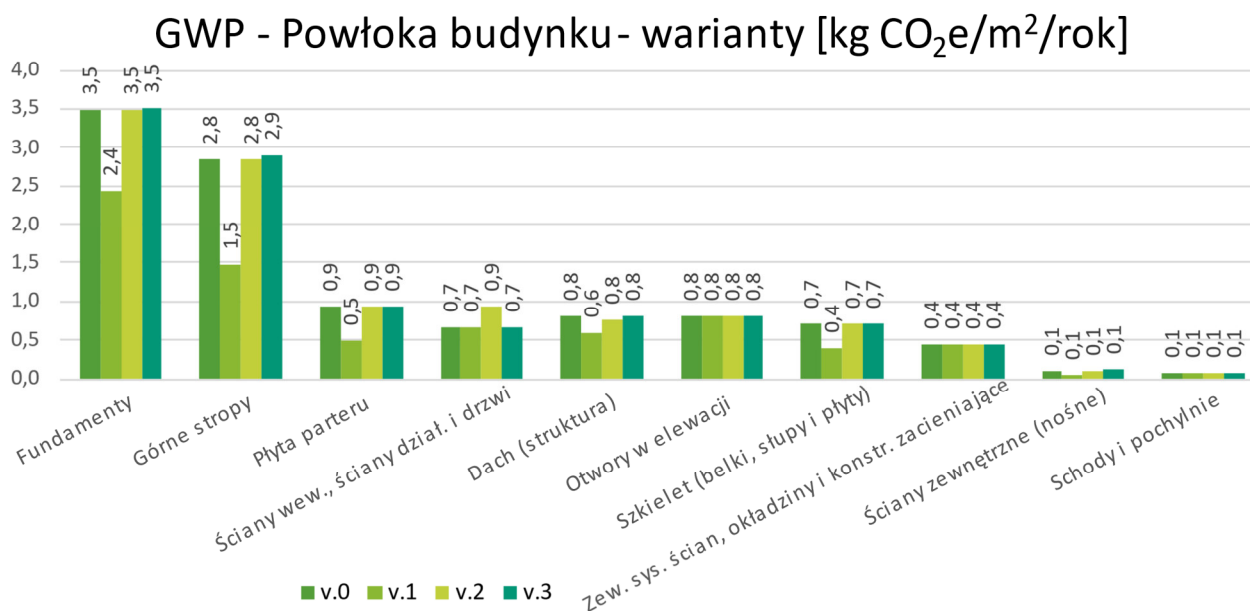
Rysunek 13. GWP w cyklu życia, budynek B2

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Na Rysunek 12 i Rysunek 13 zauważyć można także wpływ założeń wariantu trzeciego na otrzymane wyniki - doszukiwać ich należy się w fazie A4, która uwzględnia transport, bowiem wariant trzeci (v.3) tę kwestię rozpatrywał. Wizualnie różnica nie rzuca się w oczy, jednak gdy przyjrzeć się wartościom liczbowym, można zauważyć, że dla fazy A4 wariant trzeci zwiększył się o ponad 60% w stosunku do wariantu bazowego dla obydwu budynków biurowych.

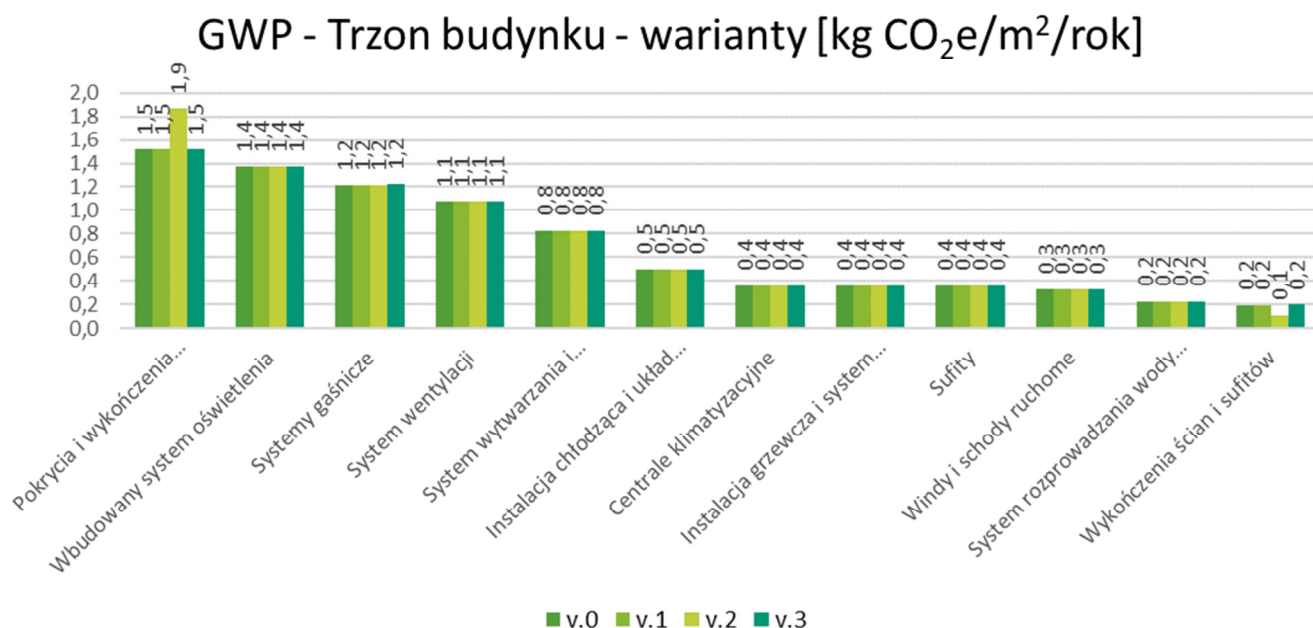


Rysunek 14. GWP w cyklu życia dla kategorii „Powłoka budynku”, budynek B1

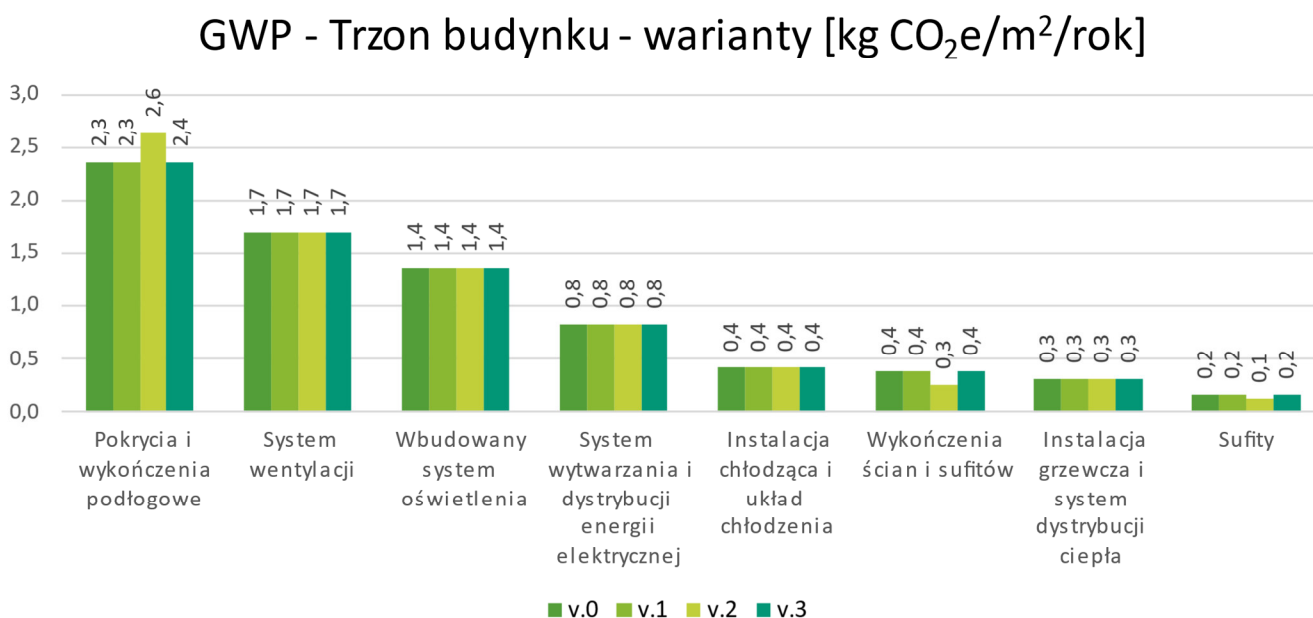


Rysunek 15. GWP w cyklu życia dla kategorii „Powłoka budynku”, budynek B2

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych



Rysunek 16. GWP w cyklu życia dla kategorii „Trzon budynku”, budynek B1



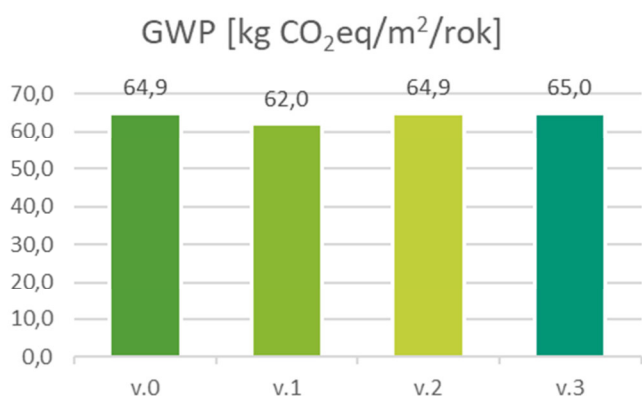
Rysunek 17. GWP w cyklu życia dla kategorii „Trzon budynku”, budynek B2

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

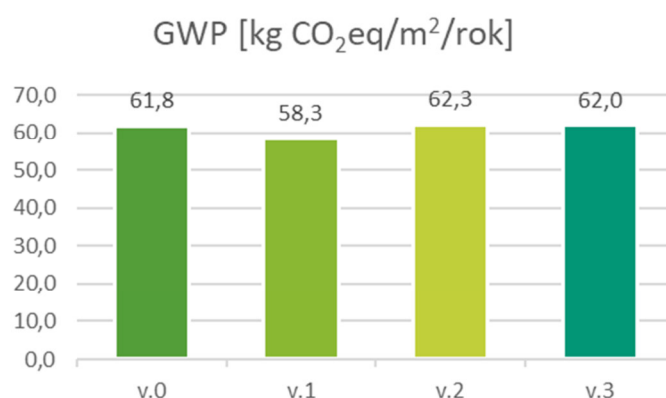
Analizując szczegółowo wartości wskaźnika GWP poszczególnych kategorii według Level(s) można zauważyć wpływ zmian, jakie niosą za sobą założenia dla wariantu drugiego (v.2) w stosunku do wariantu bazowego. Wariant ten odnosi się do zmiany czasu użytkowania z wartości domyślnych, na wartość bazującą na danych EPD. Różnicę można zauważyć szczególnie w podkategoriach, które dotyczą elementów wykończenia, czyli w zewnętrznych farbach, powłokach i tynkach Rysunek 14, Rysunek 15 oraz w „pokryciach i wykończalniach podłogowych” (Rysunek 16, Rysunek 17).

Wykresy Rysunek 14., Rysunek 15, Rysunek 16, Rysunek 17 przedstawiają podkategorie wg Level(s) uporządkowane względem malejącej wartości GWP. Dostarczają też danych odnośnie podkategorii, w których uwidaczniają się zmiany podyktowane założeniami wariantu pierwszego (v.1) - dla elementów zbudowanych w dużej mierze ze zbrojonego betonu.

Wspomniane różnice są widoczne przy rozpatrywaniu rocznego współczynnika GWP w odniesieniu do 1 m² powierzchni. Znaczący wpływ na wyniki obserwuje się dla wariantu pierwszego (v.1). Faza A1-A3, w której wcześniej można było zauważyć znaczne różnice między wariantami, jest najbardziej wpływową - zakładając wykluczenie fazy B6, dla której wartości we wszystkich wariantach mają identyczne wartości. Dla obydwu budynków biurowych dla wariantu pierwszego obserwuje się spadek GWP o ok. 5%



Rysunek 18. Roczny wskaźnik GWP dla 1m², budynek B1



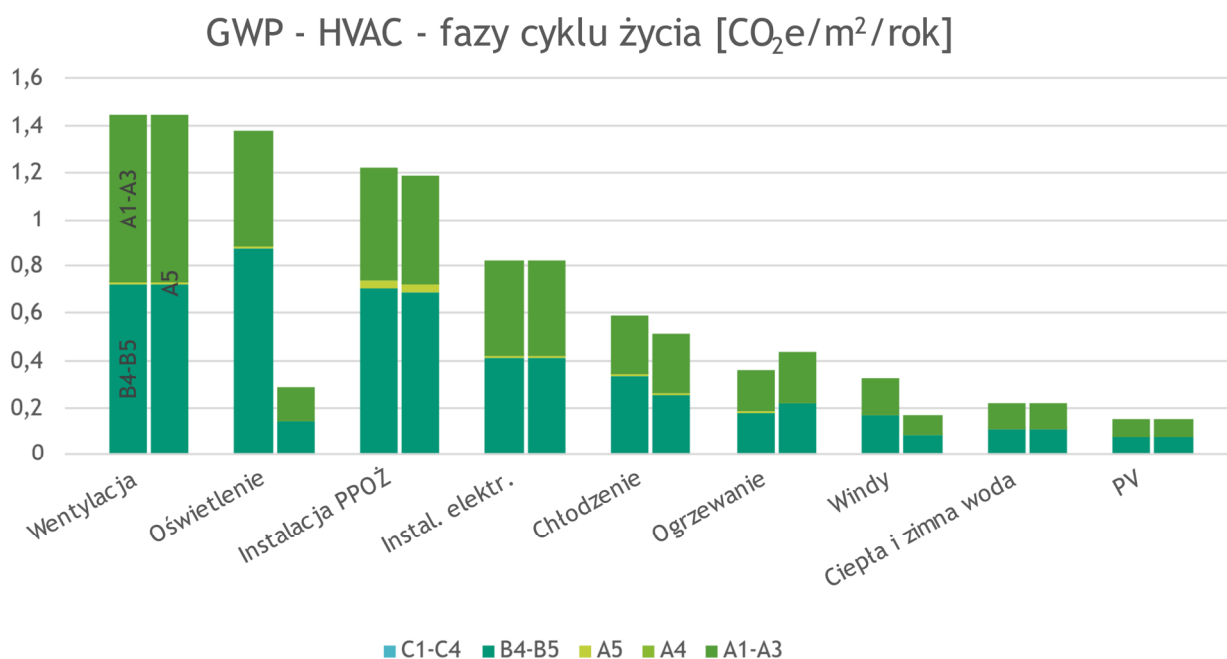
Rysunek 19. Roczny wskaźnik GWP dla 1m², budynek B2

1.2 Wariant 0 vs 4

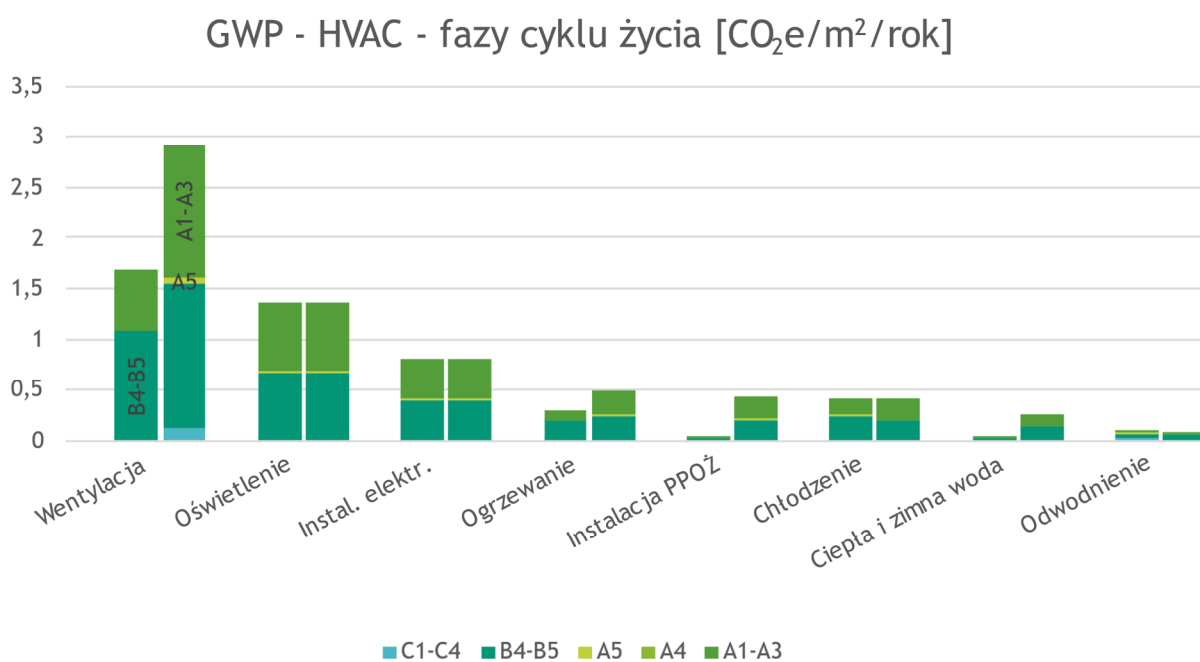
Na poniższych wykresach zaprezentowano wyniki wskaźnika GWP tylko dla elementów instalacyjnych budynków. Wykresy pokazują porównanie wyników wariantu 1, w którym instalacje budynkowe w większości uwzględniane były w sposób szczegółowy oraz wariantu 4 w którym wszystkie instalacje uwzględnione zostały w sposób uproszczony na podstawie wskaźników dla różnych typów instalacji.

Wyniki pokazują, iż pomimo zastosowania innego podejścia w uwzględnieniu w obliczeniach instalacji budynkowych, ostateczne wyniki są zbliżone. Największe różnice pomiędzy obliczeniami szczegółowymi i wskaźnikowymi zaobserwowano w przypadku instalacji oświetlenia w budynku B1, instalacji wentylacji w budynku B2 oraz instalacji PPOŻ w budynku B2.

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych



Rysunek 20. GWP w podziale na fazy cyklu życia – instalacje budynkowe, Budynek B1. Porównanie v.0 (z lewej) i v.4 (z prawej).



Rysunek 21. GWP w podziale na fazy cyklu życia - HVAC, Budynek B2. Porównanie v.0 (z lewej) i v.4 (z prawej).

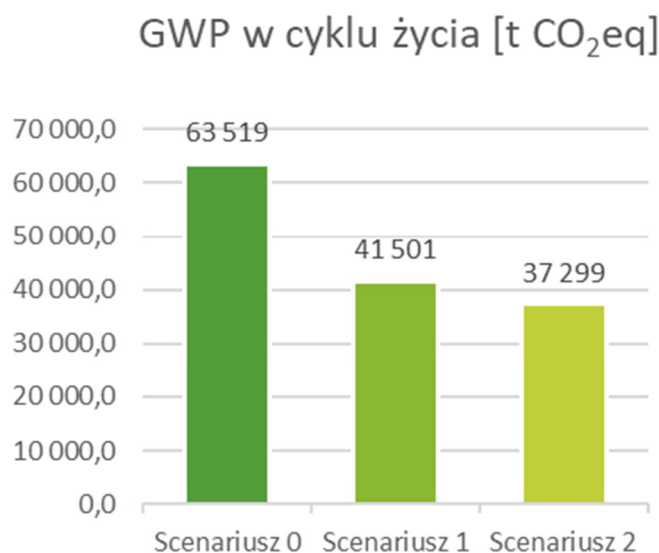
Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

1.3 Warianty 5 i 6

Wariant zmiany miks energetycznego zakłada trzy wcześniej opisane scenariusze:

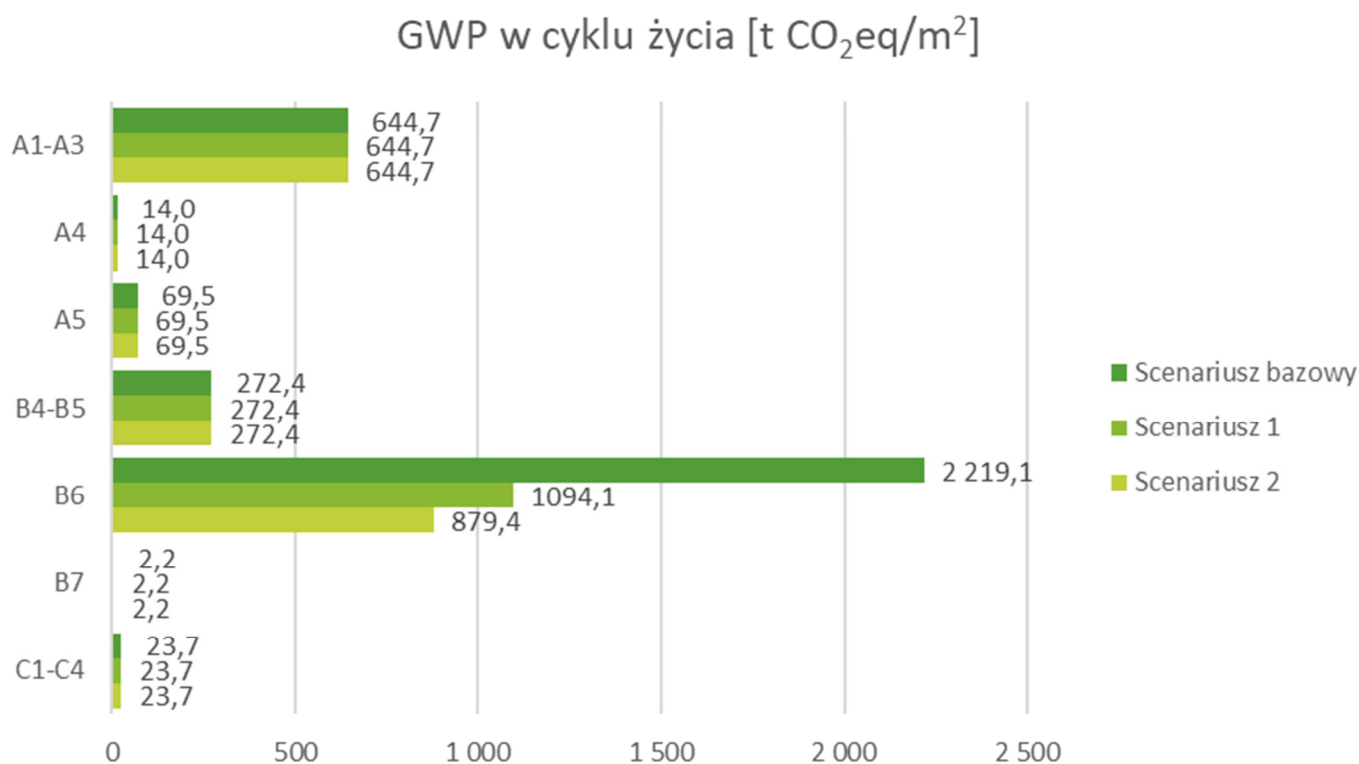
- Scenariusz bazowy – dla którego przeprowadzane są wszystkie wcześniejsze obliczenia – zakłada stały wskaźnik emisji 1,062 kgCO₂/kWh na podstawie danych Międzynarodowej Agencji Energii z 2022 r na rok 2023.
- Scenariusz 1 - obniżenie wskaźnika emisji o 2,65% rocznie względem 2023 roku
- Scenariusz 2 – stałe roczne obniżenie wskaźnika, aż do uzyskania neutralności emisyjnej w 2050 roku

Wpływ zmiany wskaźnika emisyjności w czasie uwzględniono jedynie dla systemu elektroenergetycznego. Wpłyne on więc wyłącznie na fazę B6. Wyniki porównawcze wszystkich scenariuszy dla budynków biurowych przedstawiono na kolejnych wykresach.

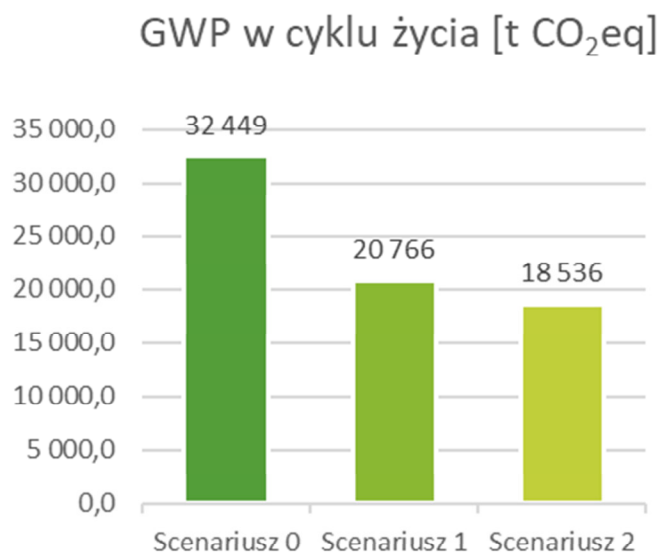


Rysunek 22. Budynek B1. Całkowita wartość wskaźnika GWP dla różnych scenariuszy zmiany miks energetycznego

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

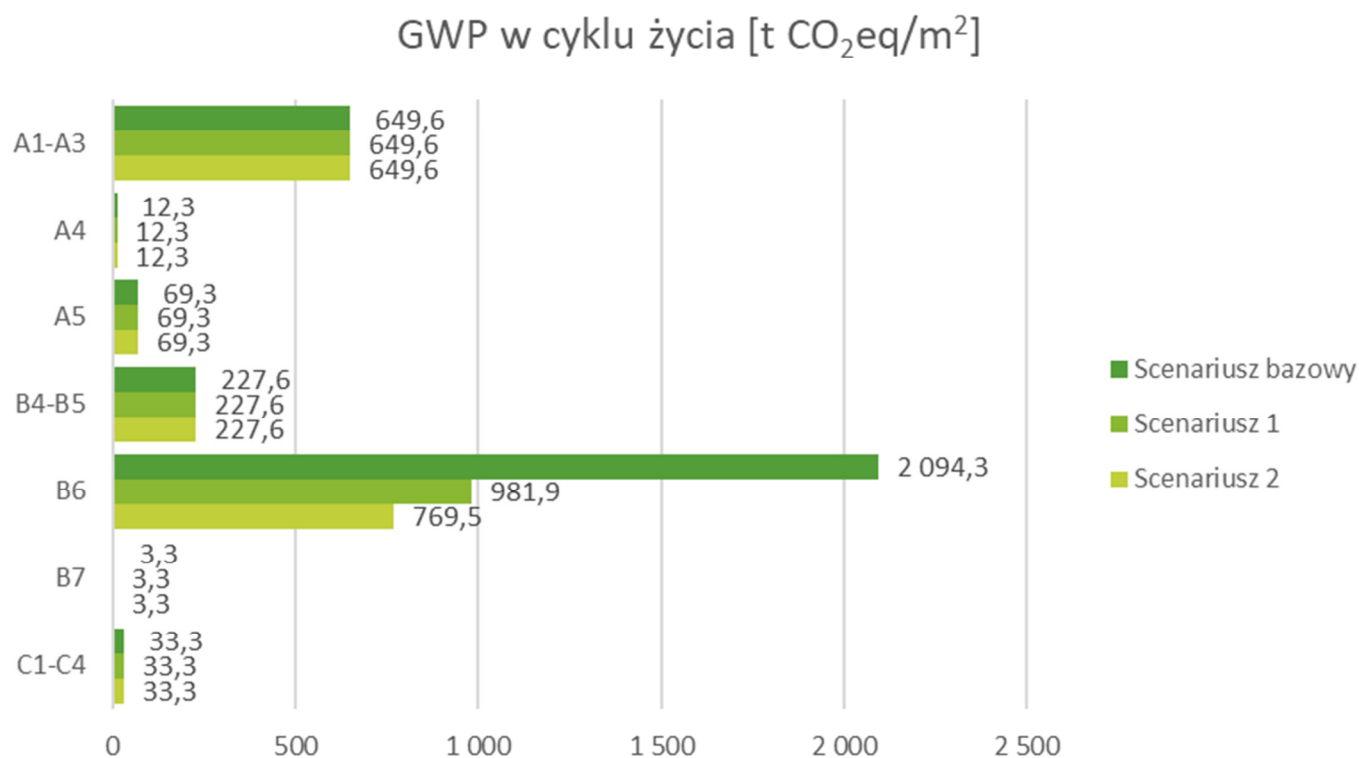


Rysunek 23. Budynek B1. Wartość wskaźnika GWP dla różnych scenariuszy zmiany miks energetyczny w podziale na fazy w cyklu życia



Rysunek 24. Budynek B2. Całkowita wartość wskaźnika GWP dla różnych scenariuszy zmiany miks energetyczny

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych



Rysunek 25. Budynek B2. Wartość wskaźnika GWP dla różnych scenariuszy zmiany miks energetyczny w podziale na fazy w cyklu życia

Powyższe wykresy prezentują wpływ zmiany miks energetyczny w czasie na wskaźnik GWP. W budynkach biurowych to energia elektryczna odpowiada za większość emisji związanych ze zużyciem energii. W analizowanych budynkach w scenariuszu bazowym stanowi ponad 80% emisji związanych z fazą B6. Dekarbonizacja systemu elektroenergetycznego będzie więc miała znaczący wpływ nie tylko na samą fazę B6 ale również na sumaryczny wskaźnik GWP w cyklu życia dla całego budynku. W przypadku Scenariusza 1 uzyskano redukcję wskaźnika w fazie B6 o ponad 50%, co pozwoliło na obniżenie wskaźnika GWP dla budynków biurowych o ponad 30%. Dla Scenariusza 2 redukcja emisji w fazie B6 wyniosła ponad 60%, co dla sumarycznego wskaźnika dla całego budynku dało efekt obniżenia o ponad 40%.

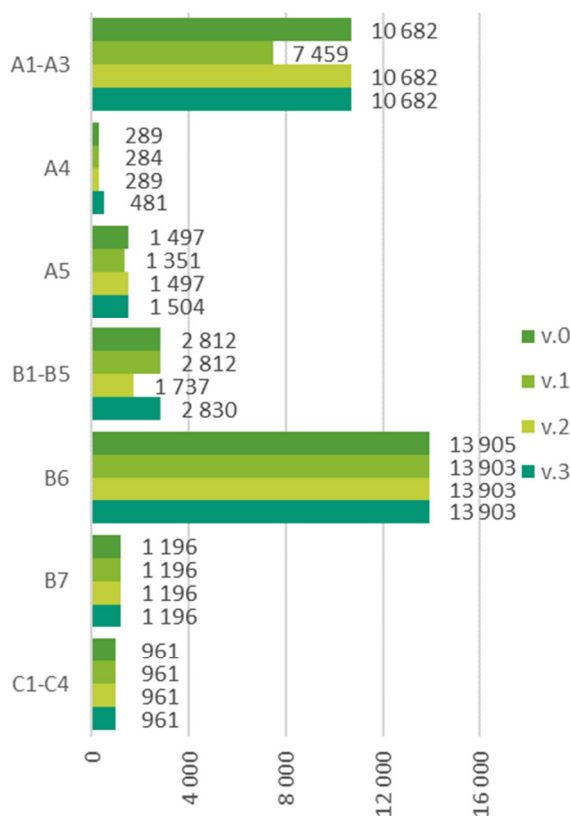
2. Budynek wielorodzinny

2.1 Warianty: 0, 1, 2, 3

Analizując pierwszy blok wariantów dla budynku wielorodzinnego i rozpatrując udział poszczególnych etapów cyklu życia dla pierwszych czterech wariantów (v.0 - v.3), można zauważyć, że największy wpływ mają założenia do wariantu drugiego i obserwujemy to zjawisko w fazie B1-B5, czyli fazie użytkowania budynku. Całkowita emisja spadła o ponad 60%. Dodatkowo, tak jak w przypadku budynków biurowych, tutaj również obserwuje się zmiany wprowadzone założeniami

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

wariantu pierwszego (v.1), a ich skutki to spadek o ok. 70% w fazie A1-A3. Podobnie jak w przypadku budynków biurowych, zmiana założeń transportowych uwidacznia się wzrostem wartości o ponad 65% w fazie A4, w stosunku do wariantu bazowego. Jednakże wpływ założeń tego wariantu, obserwuje się również w fazie A5, gdzie przekłada się to na spadek wartości o ok. 10% w odniesieniu do wariantu bazowego.

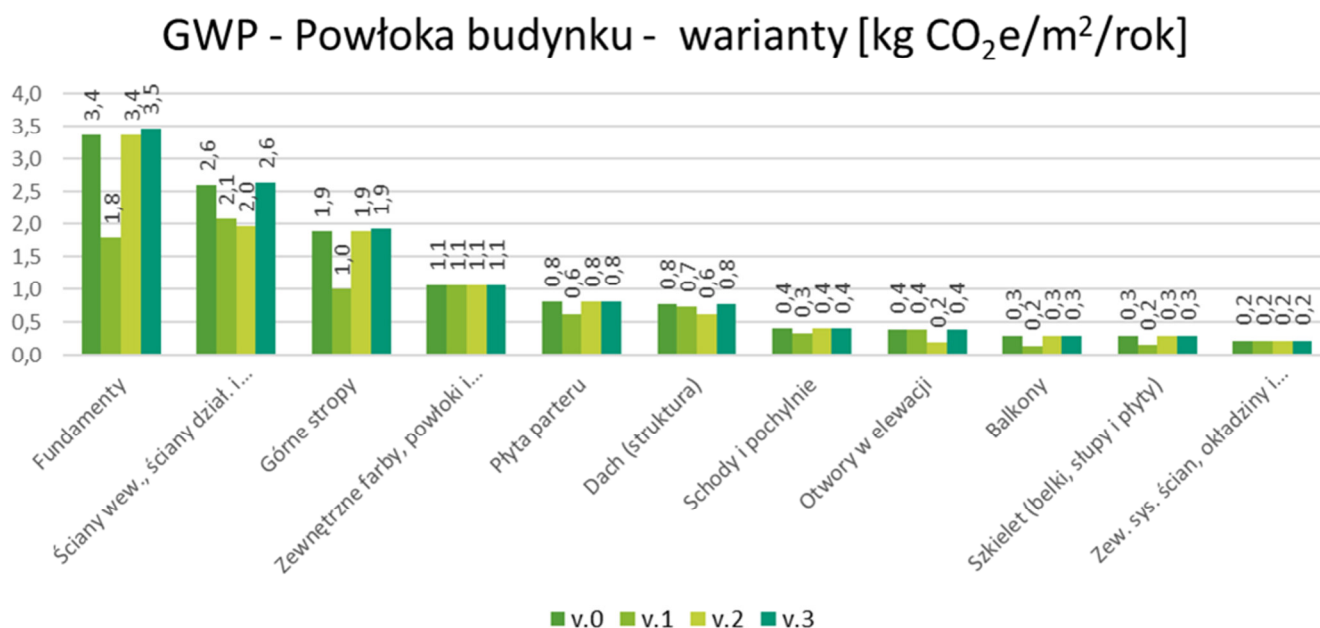


Rysunek 26. GWP w cyklu życia, budynek W

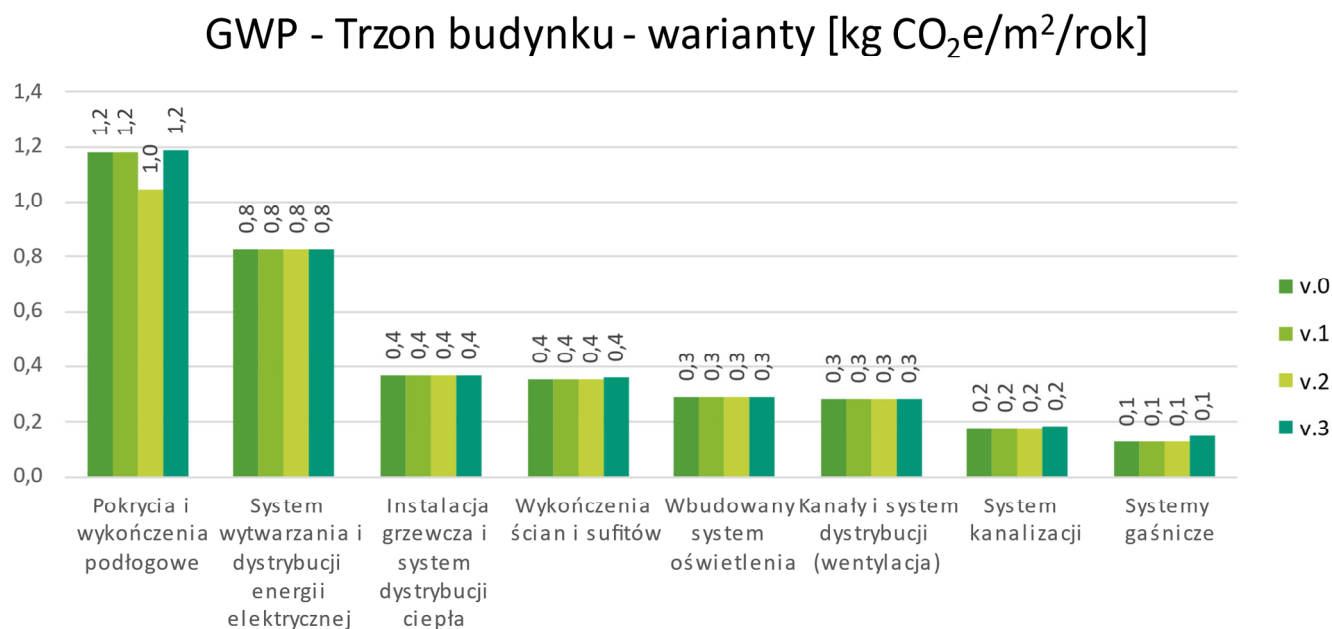
Analogicznie do poprzednich wyników - analizując szczegółowo wartości wskaźnika GWP poszczególnych kategorii według Level(s) widać wpływ zmian, jakie niosą za sobą założenia dla wariantu drugiego (v.2) w stosunku do wariantu bazowego. Wariant ten odnosi się do zmiany czasu użytkowania z wartości domyślnych, na wartość bazującą na danych EPD. Różnicę można zauważyć w podkategoriach: w ścianach wewnętrznych, strukturze dachu, otworach elewacyjnych (Rysunek 27) oraz w pokryciach i wykończeniach podłogowych (Rysunek 28).

Różnice zaprezentowane wyżej są widoczne przy rozpatrywaniu rocznego współczynnika GWP w odniesieniu do 1 m² powierzchni. Znaczący wpływ na wyniki obserwuje się dla wariantu pierwszego (v.1) gdzie zauważalny jest spadek GWP o ok. 11% w stosunku do założeń wyjściowych. Założenia wariantu drugiego pozwalają obniżyć wskaźnik o niecałe 4% w stosunku do wartości bazowej

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

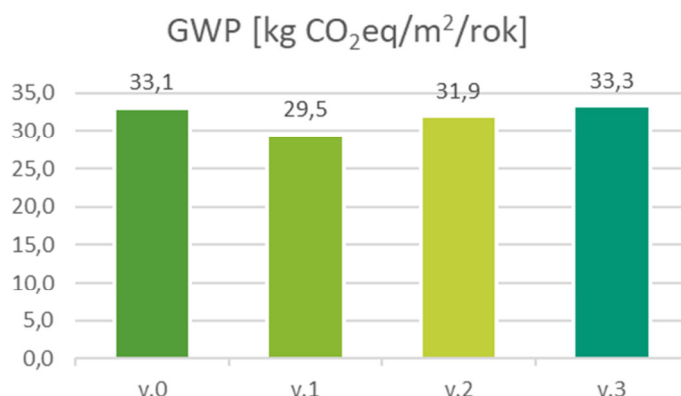


Rysunek 27. GWP w cyklu życia dla kategorii „Powłoka budynku”, budynek W



Rysunek 28. GWP w cyklu życia dla kategorii „Trzon budynku”, budynek W

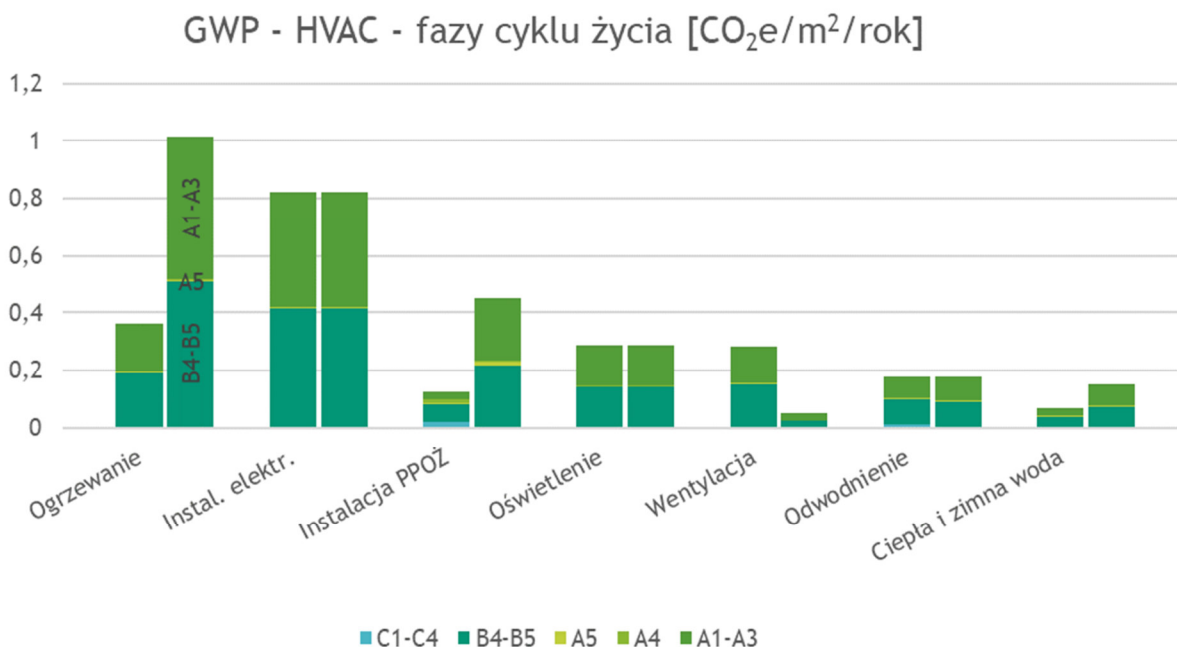
Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych



Rysunek 29. roczny wskaźnik GWP dla 1m², budynek W

2.1 Wariant 0 vs 4

Na poniższych wykresach zaprezentowano wyniki wskaźnika GWP tylko dla elementów instalacyjnych budynku wielorodzinnego. Na wykresach pokazano porównanie wyników wariantu 1, w którym instalacje budynkowe w większości uwzględniane były w sposób szczegółowy oraz wariantu 4 w którym wszystkie instalacje uwzględnione zostały w sposób uproszczony na podstawie wskaźników dla różnych typów instalacji.



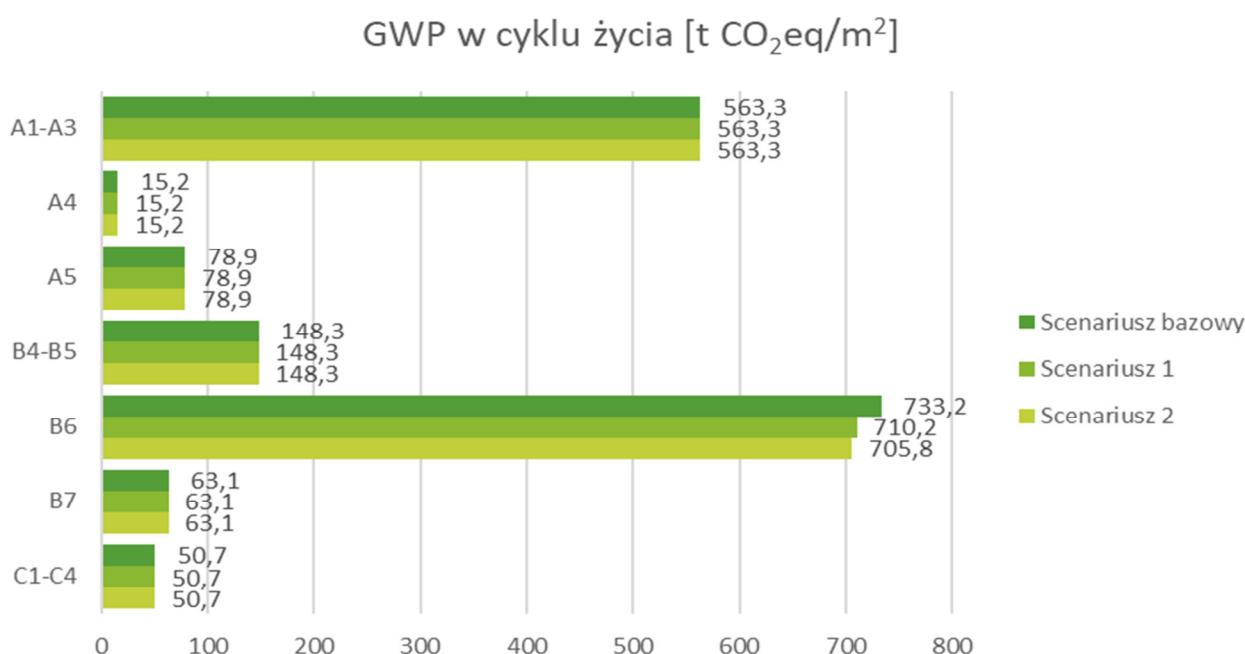
Rysunek 30. GWP w podziale na fazy cyklu życia - HVAC, Budynek W. Porównanie v.0 (z lewej) i v.4 (z prawej).

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

W budynku wielorodzinnym największe różnice pomiędzy obliczeniami szczegółowymi a wskaźnikowymi dla instalacji budynkowych zaobserwowano w przypadku instalacji ogrzewania, PPOŻ oraz wentylacji. Oświetlenie w obu wariantach zostało względnie w sposób wskaźnikowy.

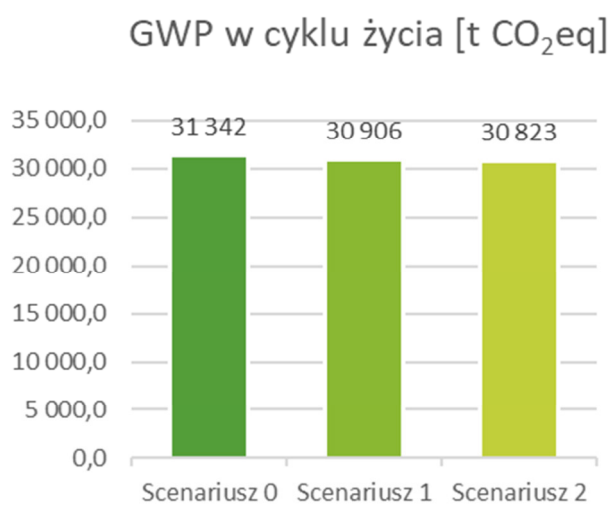
2.2 Warianty: 5, 6

Na poniższych wykresach zaprezentowano wpływ zmiany miks energetyczny w czasie na wskaźnik GWP. W przypadku budynku wielorodzinnego wpływ dekarbonizacji systemu elektroenergetycznego jest dużo niższy niż w przypadku budynków biurowych. Wynika to z faktu, iż inaczej niż w przypadku budynków biurowych, to zużycie ciepła stanowi w budynkach wielorodzinnych główną część zużycia energii w cyklu życia. Scenariusz 1 pozwolił na obniżenie wskaźnika GWP dla fazy B6 w budynku wielorodzinnym o ponad 3%, co dało efekt w postaci obniżenia całkowitego wskaźnika GWP dla budynku o prawie 1,4%. Dla scenariusza 2 wskaźnik GWP dla fazy B6 spadł o ponad 3,7 % przy jednoczesnym obniżeniu całkowitego wskaźnika dla budynku o ponad 1,6%.



Rysunek 31. Budynek W. Wartość wskaźnika GWP dla różnych scenariuszy zmiany miks energetyczny w podziale na fazy w cyklu życia

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych



Rysunek 32. Budynek W. Wartość wskaźnika GWP dla różnych scenariuszy zmiany miks energetycznego

Dyskusja

Na podstawie wykonanych analiz budynków testowych można zauważyć, że największy wpływ na ślad węglowy budynku mają dwie fazy: faza produkcji materiałów A1-A3 oraz faza B6 związana ze „zużyciem” energii w budynku. Dla budynków biurowych fazy te odpowiadały łącznie za 88,3% i 88,8% całkowitej emisji CO₂e; dla budynku wielorodzinnego 78,5% (wariant bazowy). Przy czym dla każdego rozpatrywanego wariantu, najwyższa emisja pochodziła z fazy B6, odpowiednio dla budynków biurowych: 68,4%, 67,8% oraz 44,4% dla budynku mieszkalnego. Zaś emisja z Fazy A1-A3 odpowiednio 19,9%, 21,1% oraz 34,1% dla budynku mieszkalnego. Analizując wartości wskaźnikowe (wartość emisji CO₂e w odniesieniu do 1m² referencyjnej powierzchni i 50 lat użytkowania), faza A1-A1 charakteryzowała się wskaźnikiem wynoszącym niecałe 650 kg CO₂e/m² dla budynków biurowych i około 560 kg CO₂e/m² dla budynku mieszkalnego, zaś emisja w fazie B6 odpowiednio: 2219 CO₂e/m² i 2094 CO₂e/m² dla budynków biurowych i około 733 kg CO₂e/m² dla budynku mieszkalnego. Powyższe wyniki pokazują wpływ typu budynku na jego ślad węglowy. Niższa wartość wskaźnika globalnego ocieplenia budynku mieszkalnego związana jest przede wszystkim z zapotrzebowaniem na energię. Budynki biurowe w większym stopniu są wyposażone w instalacje budynkowe, w szczególności w instalację wentylacji mechanicznej i klimatyzacji, co wpływa na ich charakterystykę energetyczną. Drugim czynnikiem są źródła energii w budynku. Im wyższy wskaźnik emisji danego źródła, tym wyższy ślad węglowy fazy B6. Tym samym emisyjność fazy B6 zależna jest od systemów instalacyjnych występujących w budynku, co nie musi być jednoznaczne z typem i przeznaczeniem samego budynku.

Wpływ wartości emisji na ślad węglowy budynku został przeanalizowany w wariantach v.5 i v.6. W budynkach biurowych, w których występuje znaczące zapotrzebowanie na energię elektryczną, wartość wskaźnika emisji dla sieci elektroenergetycznej znacząco wpływa na otrzymane wyniki, w tym na wartość całkowitego śladu węglowego budynku. Przyjmując scenariusz, w którym następuje zmiana miksu energetycznego, a tym samym zmiana emisji CO₂e, uzyskano redukcję wskaźnika w fazie B6 o ponad 50% (scenariusz 1) oraz obniżenie wskaźnika GWP dla budynków biurowych o ponad 30%. Dla Scenariusza 2 redukcja emisji w fazie B6 wyniosła ponad 60%, co dla sumarycznego wskaźnika dla całego budynku dało efekt obniżenia o ponad 40%. W przypadku budynku testowego wielorodzinnego, który charakteryzuje się niskim zapotrzebowaniem na energię elektryczną, wpływ miksu energetycznego nie jest już taki znaczący. Zastosowanie scenariusza 1 pozwoliło na obniżenie wskaźnika GWP dla fazy B6 w budynku o nieco ponad 3% w stosunku do stałej wartości emisji, co dało efekt w postaci obniżenia całkowitego wskaźnika GWP dla budynku o jedynie 1,4%. Dla scenariusza 2 wskaźnik GWP dla fazy B6 spadł o ponad 3,7 % przy jednoczesnym obniżeniu całkowitego wskaźnika dla budynku o ponad 1,6%.

Faza B7 związana ze zużyciem wody widoczna jest tylko dla budynku mieszkalnego (udział na poziomie 3,8%, 63,1 kg CO₂e/m²), w którym występuje znaczne zużycie wody. Dla budynków biurowych faza ta oscylowała na poziomie około 0,1% (2-3 kg CO₂e/m²).

Faza wznoszenia budynku A5 oraz faza C1 zostały określone wskaźnikowo na podstawie scenariusza wznoszenia zdefiniowanego w narzędziu obliczeniowym. Określenie dokładnych scenariuszy oraz określenie wartości emisji dla tych faz wykracza poza zakres projektu. Dla analizowanych budynków testowych emisja CO₂e związana z fazą wznoszenia wynosi około 70-80 kg CO₂e/m² (2-3%

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

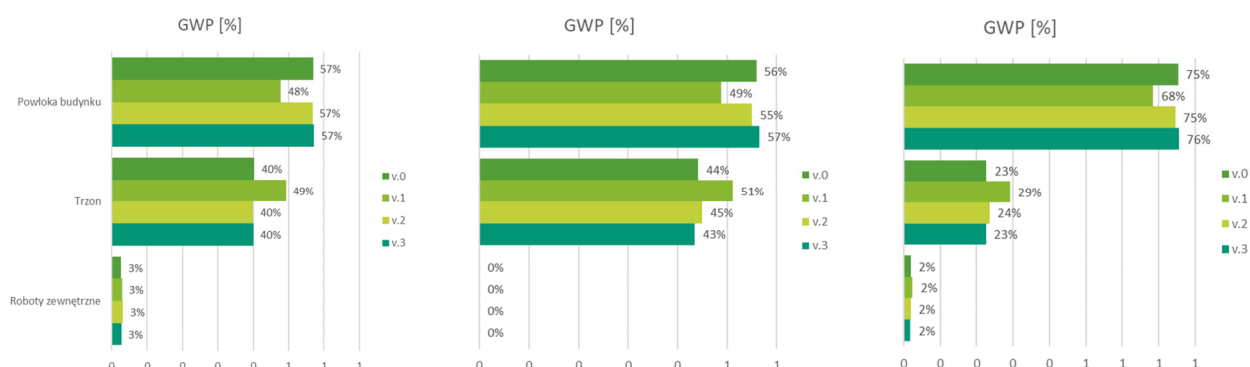
GWP_{tot}) faza wyburzenia ma pomijalnie mały wpływ. Wartości te powinny być przedmiotem dalszych analiz i powinny być określone dla standardów krajowych.

Kolejną fazą w cyklu życia budynku, istotną dla jego śladu węglowego, jest faza B4-B5 związana z czasem użytkowania materiałów/elementów/installacji budynkowych, odpowiadająca za około od 7,4 do 9% całkowitej emisji CO₂e w cyklu życia.

Fazy A4 – transport materiałów na plac budowy oraz faza końca życia (fazy C1-C4) w najmniejszym stopniu wpływają na ślad węglowy budynków testowych. Emisja CO₂e związana z fazą A4 wynosi około 12-15 kg CO₂e/m², zaś faza C: 20-30 dla budynków biurowych oraz około 50 kg CO₂e/m² dla budynku wielorodzinnego.

Warto również podkreślić, że choć oba budynki biurowe charakteryzowały się inną powierzchnią użytkową, innym kształtem oraz innymi systemami technicznymi otrzymano podobny rozkład emisji w podziale na fazy w cyklu życia oraz podobne wartości wskaźnikowe dla poszczególnych faz w cyklu życia. Wyniki otrzymane dla budynku mieszkalnego różniły się od budynków biurowych zarówno pod względem rozkładu procentowego na poszczególne fazy, zaś dla niektórych faz, również pod względem samych wartości wskaźnikowych odniesionych do 1m² powierzchni referencyjnej.

Analizując natomiast wpływ poszczególnych elementów budynku na jego całkowity ślad węglowy, widać zdecydowany wpływ części konstrukcyjnej budynku. Te elementy powinny być obowiązkowo uwzględniane w analizie, z uwzględnieniem części podziemnej. Instalacje budynkowe są obecnie często pomijane w analizach z uwagi na pracochłonność (związaną z wykonywaniem zestawień ilościowych i przeliczaniem na jednostkę referencyjną zgodną z EPD) oraz z uwagi na brak odpowiednich danych środowiskowych. Jednak jak pokazały wykonane obliczenia budynków testowych, instalacje budynkowe wszystkich analizowanych budynków reprezentują wartości od 9% do 22% (faza A1-A3). Zaś cała kategoria Trzon (armatura, wyposażenie i instalacje wewnętrzne) odpowiada za około 40-50% całkowitej emisji CO₂e dla budynków biurowych. Dla budynku mieszkalnego proporcje pomiędzy kategoriami są nieco inne: 70-75% Powłoka budynku (podziemna i nadziemna część konstrukcji) vs 23-29% Trzon (armatura, wyposażenie i instalacje wewnętrzne). Związane jest to m.in. z częstotliwością wymiany elementów budynku w czasie jego użytkowania. Elementy instalacyjne czy wykończeniowe podlegają wymianie, zaś dla elementów konstrukcyjnych czas użytkowania jest równy czasowi życia budynku.



Rysunek 33 Wartość wskaźnika GWP dla budynków B1, B2 i W w podziale na kategorie Level(s)

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Powyższe wyniki pokazują, że elementy wewnętrzne budynku mają istotny udział w całkowitym wskaźniku globalnego ocieplenia i powinny zostać uwzględnione w metodyce wyznaczania śladu węglowego budynku. Być może w postaci wskaźnikowej, dla której wartość emisji odniesiona jest do powierzchni referencyjnej, mocy czy strumienia wentylacyjnego w przypadku instalacji wentylacji.

Elementy budynku przynależące do terenu budynku mają natomiast niewielki udział na poziomie 2-3% GWP_{tot} , około 15-25 kg CO_2e/m^2 .

Wyniki analiz pokazały również jak wybór danych środowiskowych wpływa na poziom generowanej emisji CO_2e . Wykorzystanie danych z EPD konkretnego producenta, zamiast danych uśrednionych (generycznych) spowodowało obniżenie emisji dla fazy A1-A3 o ponad 20% dla obydwu budynków biurowych w stosunku do wariantu bazowego (v.0). W kontekście przyszłej metodyki, w celu zachowania jak najwięcej dokładności, istotne jest zatem określenie hierarchii wyboru danych środowiskowych.

Analizie poddano również czas użytkowania elementów budynku. Elementy konstrukcyjne, mające czas życia równy referencyjnemu okresowi nie są wymieniane i stanowią główny udział w śladzie węglowym budynku w fazie A1-A3. Jednak elementy wykończeniowe, poddawane wymianie w czasie użytkowania, choć mogą mieć stosunkowo niewielki wpływ w fazie A1-A3 to z uwagi na krótki czas użytkowania mogą charakteryzować się istotnym udziałem w fazie B4. Deklarowany czas użytkowania może się dodatkowo różnić w zależności od typu danych środowiskowych. Emisja wbudowana w module B4 zależna jest m.in. od trwałości materiałów budowlanych. Wpływ sposobu deklarowania czasu użytkowania elementów: czas techniczny vs specyficzny na podstawie EPD analizowano w wariantcie v.2. Choć wyniki przeprowadzonej analizy nie pokazują znaczącego wpływu wyboru sposobu określania żywotności materiałów – czas życia deklarowany przez producentów nie odbiegał znacząco od technicznego czasu użytkowania, w pewnym stopniu nadmierne zwiększanie czasu użytkowania może zaniżyć udział fazy B4 i w dalszej perspektywie marginalizować tę fazę w kontekście całego cyklu życia budynku.

Na bazie doświadczeń uzyskanych w ramach działań projektowych oraz analizując wyniki obliczeń wykonanych dla budynków testowych w metodyce wyznaczania śladu węglowego budynku, zaleca się uwzględnienie wszystkich faz w cyklu życia. Jednocześnie proponuje się umożliwienie wykorzystania danych wskaźnikowych dla fazy A5 – proces budowy oraz C1 – proces rozbiórki. Choć faza A4 ma niewielki wpływ na ślad węglowy budynku, proponuje się uwzględnienie tej fazy w sposób dokładny na bazie określonych metod transportu i długości transportowych. Analizując zakres elementów budynku, zaleca się uwzględnienie wszystkich elementów określonych w systemie Level(s), z jednoczesnym umożliwieniem stosowania wartości wskaźnikowych dla niektórych kategorii: wykończenia wewnętrznego, instalacji budynkowych i terenu.

Analizy dodatkowe

W ramach prac w projekcie, poza podstawowymi analizami obejmującymi ponad 20 wariantów obliczeń dla budynków biurowych oraz mieszkalnego wielorodzinnego wykonano dodatkowe analizy obejmujące:

- Wpływ wartości wskaźnika emisji energii elektrycznej i ciepła sieciowego;
- Wpływ rodzaju konstrukcji budynku mieszkalnego jednorodzinnego.

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono wyniki tych dodatkowych analiz.

Wpływ wartości wskaźnika emisji energii elektrycznej i ciepła sieciowego

Miks energetyczny lub elektroenergetyczny wybrany do obliczeń LCA zazwyczaj ma znaczący wpływ na wyniki. Pomimo faktu, że materiały budowlane zyskują na znaczeniu w analizach ze względu na rozwój budynków niskoenergetycznych, zużycie energii na etapie eksploatacji pozostaje istotnym czynnikiem. Oczekuje się, że budynki przetrwają kilka dziesięcioleci i będą przez ten okres użytkowane przez ludzi. Według Level(s), techniczny czas życia budynków komercyjnych i mieszkalnych przyjmuje się równy 50 lat. Przewiduje się, że w tym długim okresie zmieni się klimat i miks energetyczny (ze względu na rosnące znaczenie energii odnawialnych, obniżenie zależności od paliw kopalnych, ograniczenie produkcji energii jądrowej itp.). Parametry te mają łączny wpływ na efektywność środowiskową budynków w cyklu życia.

Program OneClick LCA wykorzystany jako narzędzie obliczeniowe w projekcie, ma opcję ustawienia parametrów obliczeniowych, w tym lokalizacji produkcji materiałów. Każdy materiał ujęty w ocenie ma uwzględniony wpływ produkcji, w dużej mierze zdefiniowany przez profil energetyczny kraju, w którym jest on wytwarzany. OneClick LCA ma opcję wyboru lokalnego współczynnika kompensacji, który dostosowuje wpływ produkcji materiałów w innym kraju, aby reprezentował produkcję w wybranej lokalizacji. Posiada możliwość zmiany wybranego profilu energii elektrycznej, co powoduje, że emisje są przyporządkowane do konkretnego miksu elektroenergetycznego. Wskaźniki emisji poszczególnych mikсів energetycznych oparte są na danych z Międzynarodowej Agencji Energetycznej (IEA).

W tej analizie zbadano wpływ zmiany lokalizacji budynku na inny kraj i strefę klimatyczną, aby zaobserwować, jak zmiana miksu energetycznego oraz wskaźników dla sieci ciepłowniczej wpływa na całkowity współczynnik GWP budynku. W badaniu skupiono się na porównaniu całkowitego GWP (kgCO₂eq/m²rok), emisji w fazach A1-A3 i fazie B6. Wybrane kraje to Polska (pierwotna lokalizacja budynków), Norwegia, Francja i Niemcy. Tabela 18 i Tabela 19 przedstawiają wskaźniki emisji energii elektrycznej i ciepła sieciowego dla wymienionych krajów.

Na wykresach *Rysunek 34*, *Rysunek 35*, *Rysunek 36*. przedstawiono wyniki obliczeń wskaźnika globalnego ocieplenia (GWP) odpowiednio dla trzech analizowanych budynków: budynek biurowy nr 1 (B1), budynek biurowy nr 2 (B2) oraz budynek wielorodzinny (W).

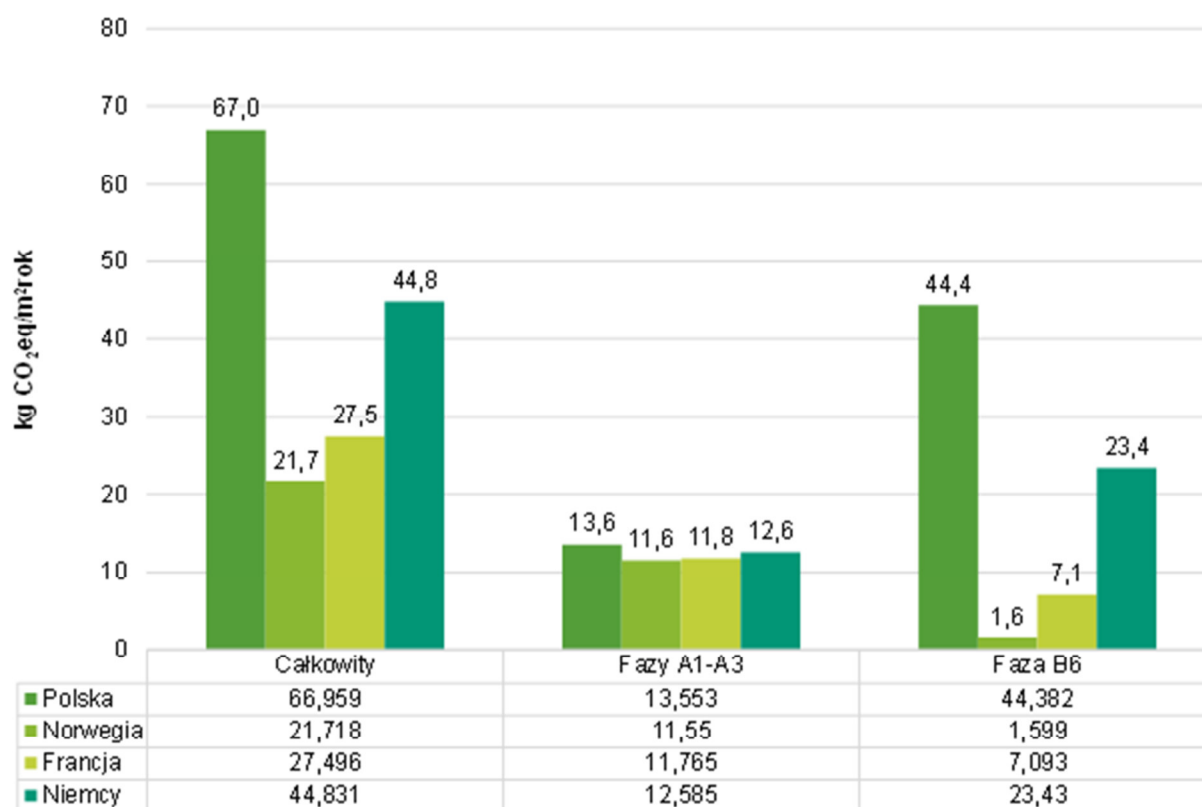
Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Tabela 18. Wskaźniki emisji dla energii elektrycznej przyjęte w obliczeniach

Lokalizacja	Wskaźnik emisji [kg CO ₂ eq/kWh]
Polska	1,06
Norwegia	0,0241
Francja	0,14
Niemcy	0,57

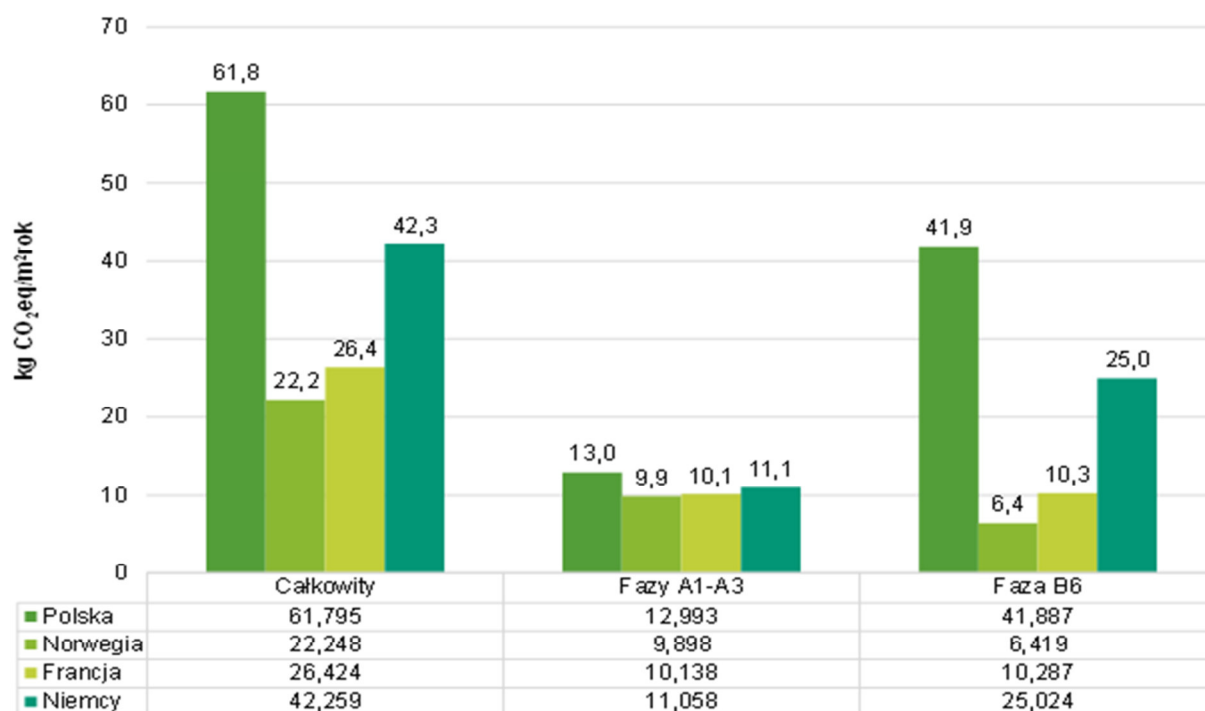
Tabela 19. Wskaźniki emisji dla ciepła sieciowego przyjęte w obliczeniach

Lokalizacja	Wskaźnik emisji [kg CO ₂ eq/kWh]
Polska	0,24
Norwegia	0,0296
Francja	0,0766
Niemcy	0,12

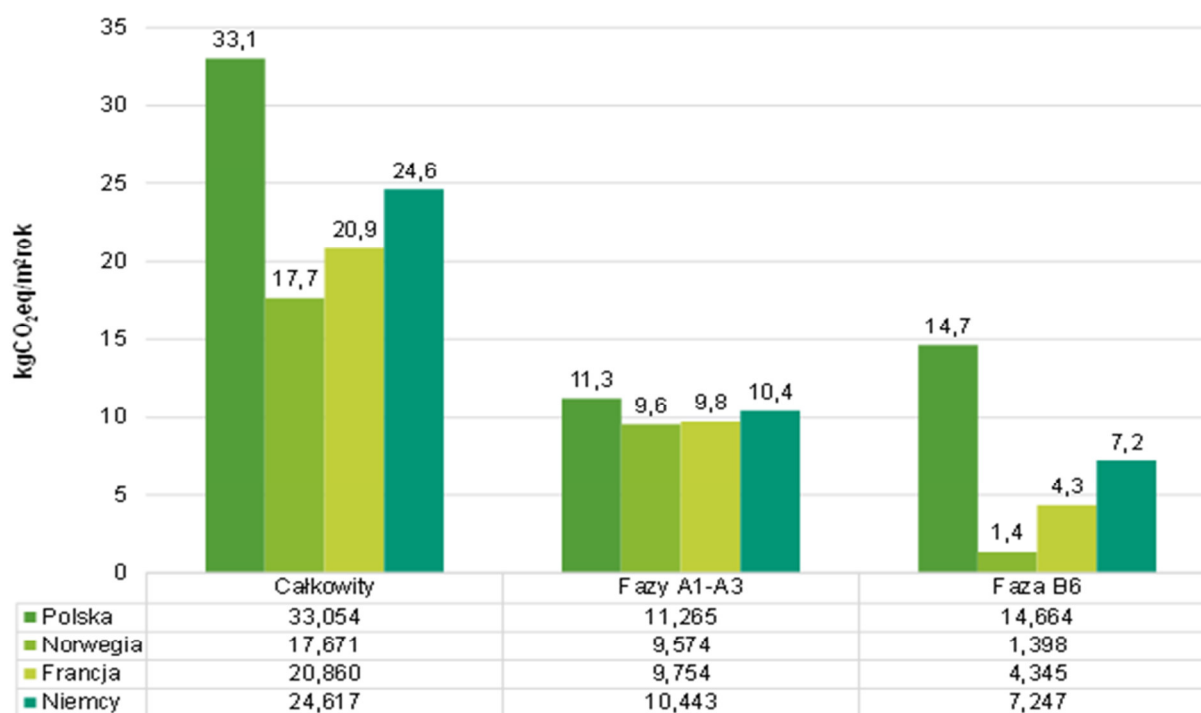


Rysunek 34. Wyniki obliczeń GWP dla budynku biurowego nr 1 (B1)

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych



Rysunek 35. Wyniki obliczeń GWP dla budynku biurowego nr 2 (B2)



Rysunek 36. Wyniki obliczeń GWP dla budynku wielorodzinnego (W)

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Wyniki pokazują, że miks energetyczny w dużym stopniu wpływa na wartość GWP budynku. Największą zmianę odnotowano w fazie B6, konkretnie pomiędzy Polską a Norwegią, gdzie emisje dla wszystkich 3 budynków spadły o około 90%. Faza A1-A3 jest najmniej obciążona zmianą wskaźników emisji dla energii elektrycznej i ciepła sieciowego.

Wpływ rodzaju konstrukcji budynku mieszkalnego jednorodzinnego

Ocena cyklu życia (LCA) to kompleksowa metoda stosowana do oceny wpływu na środowisko związanego ze wszystkimi etapami życia produktu, od wydobycia surowców po utylizację. Niniejsza analiza koncentruje się na porównaniu emisji gazów cieplarnianych (GHG) z domów jednorodzinnych (SFH) w Norwegii i Polsce. Obydwa kraje charakteryzują się odmiennymi warunkami klimatycznymi, praktykami budowlanymi i źródłami energii, które wpływają na profile emisji gazów cieplarnianych. Emisje obliczono według systemu Level(s), a uwzględnione w analizie etapy cyklu życia przedstawiono na poniższym rysunku. Obliczenia wykonano w narzędziu Reduzer (<https://reduzer.com/home#features>).

Faza wyrobu			Faza budowy			Faza użytkowania								Faza końca życia			Odziaływania poza granicami systemu
Dostarczanie surowców	Transport	Produkcja	Transport	Budowa	Użycie	Konserwacja	Naprawa	Wymiana	Remont	Zużycie energii	Zużycie wody	Działania użytkownikó	Rozbiórka	Transport	Przetwarzanie odpadów	Zagospodarowanie odpadami	Potencjał ponownego użycia, odzysku i/lub recyklingu
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	C1	C2	C3	C4	D

Rysunek 37. Etapy cyklu życia uwzględnione w analizie (oznaczone kolorem zielonym).

Opis modeli budynków

W tej analizie cyklu życia (LCA) oceniane są budynki jednorodzinne zbudowane z drewna i cegły. Konstrukcja drewniana wzorowana jest na budynku referencyjnym Asplan Viak dla domów jednorodzinnych (SFH), natomiast konstrukcja ceglana opiera się na danych dostarczonych przez NAPE. Aby zbadać wpływ położenia geograficznego na efektywność środowiskową tego typu

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

konstrukcji, analiza obejmuje cztery scenariusze, w których domy jednorodzinne z drewna i cegły są zlokalizowane zarówno w Norwegii, jak i w Polsce.

1. Budynek jednorodzinny drewniany

Model budynku definiuje się jako prostą konstrukcję o kształcie prostopadłościanu. Jest to podyktowane założeniem, że wymogi publiczne i systemy wsparcia powinny zachęcać do budowania tak skromnie, jak to możliwe, unikając skomplikowanych kształtów geometrycznych, które wymagają większej ilości i określonych rodzajów materiałów do budowy. Ten punkt wyjścia stanowi również zachętę do unikania nadmiernego przewymiarowania, które było i pozostaje stosunkowo powszechne w branży budowlanej. Dlatego też uważa się za właściwe, aby poziomy odniesienia wykorzystania materiałów opierały się na prostej i skromnej konstrukcji budynku zgodnie z obowiązującymi przepisami (Norweskie przepisy budowlane TEK17), zapewniając, że posłuży ona jako przesłanka dla projektów mających na celu osiągnięcie redukcji emisji poprzez odpowiednie wykorzystanie materiałów. Praktykę definiowania budynków referencyjnych w kształcie prostopadłościanu zastosowano także w komercyjnym narzędziu One Click LCA, w module Carbon Designer.

Rozwiązania przyjęte w modelu budynku są najważniejszymi czynnikami wpływającymi na powstałą emisję. Nie ma przyjętej „standardowej norweskiej konstrukcji budowlanej” ani nie ma zgody co do tego, które rozwiązania uważa się za standardowe. Aby zdefiniować model budynku o standardowej konstrukcji jako podstawę do obliczenia poziomów odniesienia, dokonano porównania wyborów rozwiązań pomiędzy Carbon Designer w One Click LCA i ISY Calcus dla różnych kategorii budynków. Następnie przeprowadzono interdyscyplinarny przegląd rozwiązań w porozumieniu z ekspertami firmy Asplan Viak (m.in. inżynierami budowlanymi, akustykami i architektami).

Rozwiązania zostały wybrane w oparciu o następujące zasady:

- Reprezentacja aktualnych standardów i praktyk budowlanych w Norwegii.
- Skromny projekt budynku, który kieruje się względami technicznymi, a nie estetycznymi.
- Spójne wybory rozwiązań dzięki Carbon Designer w ramach LCA One Click, chyba że inne czynniki sugerują inaczej, biorąc pod uwagę szerokie zastosowanie narzędzia obliczeniowego, aby zminimalizować rozbieżne założenia.

W Tabeli 20. przedstawiono dane opisujące model budynku jednorodzinnego.

Tabela 20. Podstawowe dane opisujące budynek modelowy

Typ budynku	Powierzchnia posadowienia	Liczba kondygnacji	Powierzchnia ogrzewana	Powierzchnia całkowita	Stosunek okien i drzwi do powierzchni ogrzewanej
Budynek mieszkalny jednorodzinny	80 (10x8) m ²	2	160 m ²	191 m ²	25%

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Analizowany drewniany budynek jednorodzinny ma dwuspadowy dach, płyty nośne oraz nienośne ściany zewnętrzne i wewnętrzne zbudowane z drewna. Ściany nośne wewnętrzne i zewnętrzne, oraz płyta fundamentowa wykonane są z betonu. Wełnę mineralną zastosowano jako izolację ścian i płyt nośnych. Ściany wykończone są płytami gipsowo-kartonowymi, podłogi – parkietem, płytkami winylowymi lub ceramicznymi, a sufit – gipsem. Jako okładzinę zewnętrzną zastosowano drewno.

2. Budynek jednorodzinny murowany

Model budynku jednorodzinnego w Polsce opiera się na hipotetycznym budynku jednorodzinnym. W przeciwieństwie do innych analizowanych budynków, dla których dane ilościowe zostały określone w sposób szczegółowy, model budynku jednorodzinnego murowanego opiera się na typowej konstrukcji stosowanej w Polsce, a nie na danych dotyczących konkretnego projektu. Podejście to uznano za rozsądne, gdyż metoda oceny śladu węglowego budynków w Polsce nie będzie miała zastosowania w pierwszym okresie w przypadku budynków o powierzchni poniżej 1000 m².

Geometria modelu budynku drewnianego opisanego wcześniej jest również stosowana w przypadku budynku murowanego, aby zapewnić porównywalność obu typów konstrukcji. Ustalono, że przeciętny budynek jednorodzinny w Norwegii i w Polsce ma podobną powierzchnię. Główna różnica w podziale przestrzeni polega na konstrukcji dachu: model drewniany ma nieogrzewane poddasze z ociepleniem stropu, natomiast model murowany ma izolowany dach dwuspadowy.

Budynek murowany ma drewniany dwuspadowy dach, betonową płytę fundamentową oraz ceglane ściany wewnętrzne i zewnętrzne. Do ocieplenia ścian budynku stosuje się izolację EPS, natomiast dachu wełnę mineralną. Podłogi wykończone są terakotą, ściany tynkiem cementowym, a sufit poddasza ogrzewanego płytą G-K.

3. Dodatkowe założenia modeli budynków

Przy zmianie lokalizacji modeli budynków pomiędzy poszczególnymi krajami wprowadzano odpowiednie korekty. Po pierwsze, zmieniono odległości transportu, aby dopasować je do konkretnej lokalizacji. W tym przypadku wyniki obliczeń budynku mieszkalnego wielorodzinnego analizowanego w projekcie posłużyły jako podstawa do obliczenia odległości dla budynków jednorodzinnych zlokalizowanych w Polsce. Odległości transportowe podzielono na trzy grupy w zależności od elementu: lokalne (50km), standardowe (500 km) i odległe (2000 km).

Ponadto, budynki w Polsce i Norwegii różnią się wymaganiami energetycznymi, a co za tym idzie wartości współczynników przenikania ciepła przegród zewnętrznych U ścian, dachów, podłóg na gruncie są różne. Zostało to uwzględnione poprzez zmianę grubości niektórych materiałów izolacyjnych, tak aby odpowiadały wartościom U w danym kraju. W obu krajach przyjęto wartości współczynników odpowiadające nowoprojektowanym budynkom, zgodnie z krajowym prawem budowlanym. W Tabeli 21 zestawiono przyjęte wartości.

Grubość izolacji w przypadku budynku drewnianego zlokalizowanego w Polsce zmniejszono w stosunku do przyjętych wartości dla budynku zlokalizowanego w Norwegii o 25 mm dla ścian zewnętrznych (wełna mineralna) oraz o 100 mm dla podłogi na gruncie (styropian). W przypadku budynku murowanego po zmianie lokalizacji z Polski na Norwegię zwiększono

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

grubość izolacji odpowiednio o 20 mm dla ścian zewnętrznych i dachu (wełna mineralna) oraz 100 mm dla podłogi na gruncie (styropian). Okna i drzwi mają dość podobny współczynnik U, dlatego postanowiono pozostawić je bez zmian. Jednakże współczynnik emisji A1-A3 nie był modyfikowany ze względu na lokalizację. Jest to na pewno uproszczeniem w przeprowadzonej analizie.

W ramach systemów technicznych w budynkach ograniczono się do trzech głównych elementów instalacji we wszystkich wariantach. Obejmowały one centralę wentylacyjną nawiewno-wywiewną z odzyskiem ciepła, grzejniki wodne oraz zasobnik ciepłej wody użytkowej.

Tabela 21. Przyjęte wartości współczynników przenikania ciepła przegród

Przegroda	Współczynnik U [W/m ² K]	
	Norwegia	Polska
Ściana zewnętrzna	0,18	0,20
Dach	0,14	0,15
Podłoga na gruncie	0,13	0,30
Okno	0,8	0,9
Drzwi zewnętrzne	1,2	1,3

4. Zapotrzebowanie na energię

W analizach założono że energia operacyjna (B6), jest taka sama dla budynku drewnianego jak i murowanego w konkretnej lokalizacji. Wielkość zapotrzebowania na energię budynków zlokalizowanych w Norwegii określono na podstawie danych pochodzących z minimalnych wymagań określonych w norweskiej normie TEK17. Jako źródła energii przyjęto sprężarkową pompę ciepła oraz kominek na drewno do ogrzewania, oraz energię elektryczną sieciową dla pozostałych potrzeb. Zapotrzebowanie na energię budynków zlokalizowanych w Polsce określono w oparciu o wymagania krajowego prawa budowlanego, przy czym założono jako źródło ciepła do ogrzewania i przygotowania c.w.u. kocioł gazowy. Zestawienie wskaźników zapotrzebowania na energię końcową (EK) wraz z rodzajami źródeł energii pokazano w poniższych tabelach.

Tabela 22. Wskaźniki zapotrzebowania na energię końcową – budynek w Norwegii

System	Wskaźnik EK	
	[kWh/m ² rok]	Źródło energii
Ogrzewanie	36,0	Pompa ciepła, kominek na drewno
Wentylacja (ciepło)	3,0	Energia elektryczna
C.W.U.	33,0	Energia elektryczna
Pompy/wentylatory	4,0	Energia elektryczna
SUMA	75,6	

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

Tabela 23. Wskaźniki zapotrzebowania na energię końcową – budynek w Polsce

System	Wskaźnik EK [kWh/m ² rok]	Źródło energii
Ogrzewanie i c.w.u.	57,0	Kocioł gazowy
Energia pomocnicza	2,7	Energia elektryczna
SUMA	59,7	

Przyjęte wskaźniki emisji dla poszczególnych nośników energii i paliw pokazano w poniższej tabeli.

Tabela 24. Wskaźniki emisji nośników energii i paliw

Energia elektryczna Norwegia (NOR+EU28)	0,326 kgCO ₂ e/kWh (2024) Współczynnik rocznego spadku 2,65% (do 2050)
Drewno kominkowe	0,055 kgCO ₂ e/kWh
Energia elektryczna Polska	1,062 kgCO ₂ e/kWh (2024) Współczynnik rocznego spadku 2,65% (do 2050)
Gaz sieciowy Polska	0,25 kgCO ₂ e/kWh

Założono, że do 2050 r. wartość wskaźnika emisji w przypadku energii elektrycznej będzie malała rocznie o 2,65%. Założenie to przyjęto w kontekście wymagań dekarbonizacji systemu elektroenergetycznego.

5. Wyniki analiz

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono główne wyniki przeprowadzonej analizy dla budynków jednorodzinnych. Na wykresach poszczególne opisy odpowiadają:

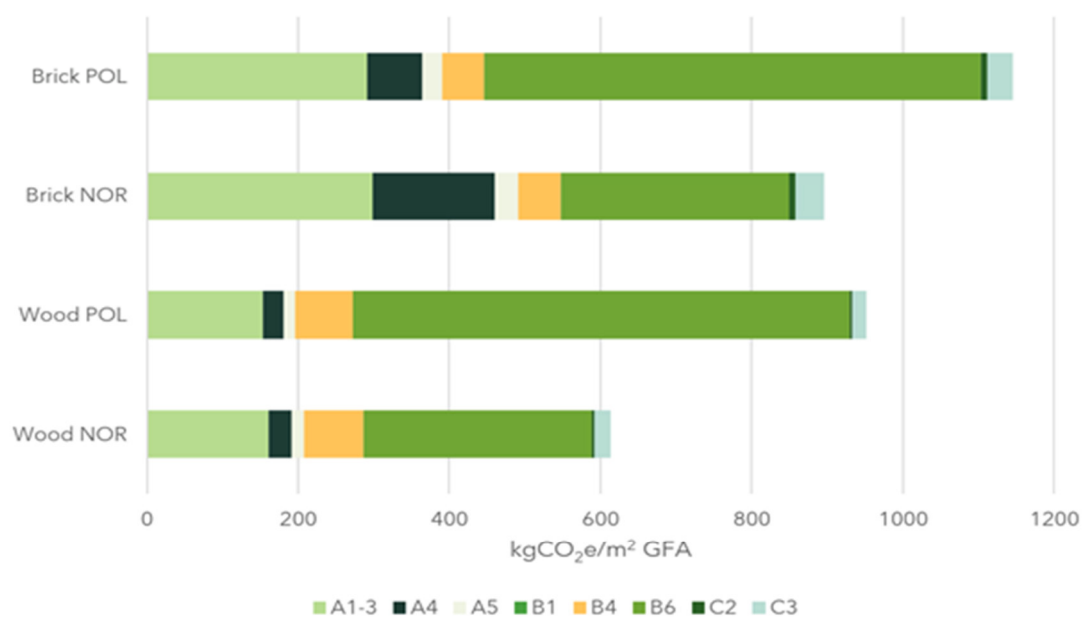
- Wood NOR – budynek jednorodzinny drewniany w Norwegii;
- Wood POL – budynek jednorodzinny drewniany w Polsce;
- Brick NOR – budynek jednorodzinny murowany w Norwegii;
- Brick POL – budynek jednorodzinny murowany w Polsce.

Wyniki obliczeń odniesione są do powierzchni brutto (GFA).

5.1 Wyniki w podziale na etapy cyklu życia

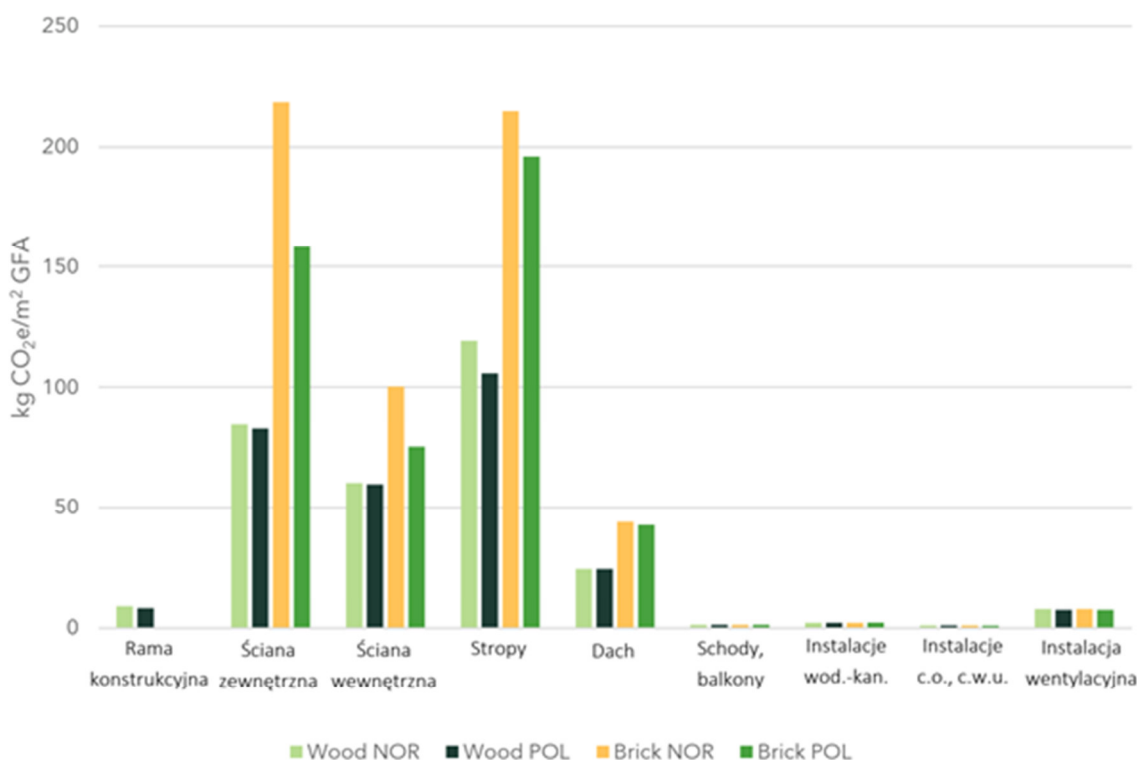
Wyniki z podziałem na poszczególne etapy cyklu życia przedstawiono na poniższym rysunku. Najwyższe wartości otrzymano dla budynku murowanego w Polsce, a następnie dla budynku drewnianego w Polsce. Ponadto etap A1-3 (produkcja materiału) i B6 (energia operacyjna) mają największy udział w emisji we wszystkich czterech wariantach. Widać również, że emisja etapu A1-A3 dla budynków murowanych jest wyższa niż budynków drewnianych. Można także zauważyć, że emisja związana z energią operacyjną (B6) jest wyższa dla budynków zlokalizowanych w Polsce.

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych



Rysunek 38. Wyniki analiz w podziale na etapy cyklu życia

Wyniki w podziale na elementy budynku przedstawiono na poniższym wykresie. Największą emisję otrzymano we wszystkich wariantach dla ścian zewnętrznych oraz stropów z płytą fundamentową.

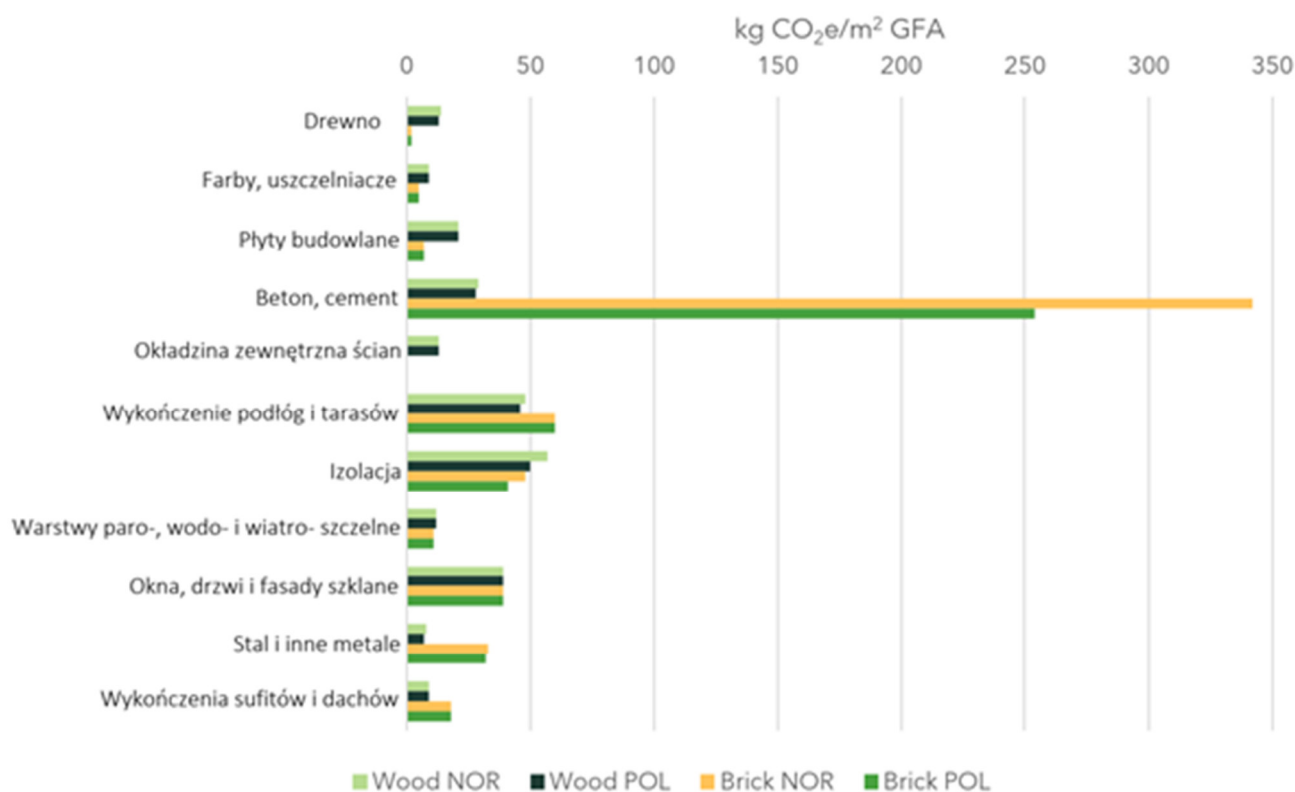


Rysunek 39. Wyniki analiz w podziale na elementy budynku

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych

5.2 Wyniki w podziale na materiały

Na kolejnym wykresie przedstawiono wyniki w podziale na poszczególne materiały. W przypadku budynków murowanych największe wartości emisji otrzymano dla betonu i cementu. W przypadku budynków drewnianych największe wartości uzyskano dla izolacji oraz wykończenia podłóg.

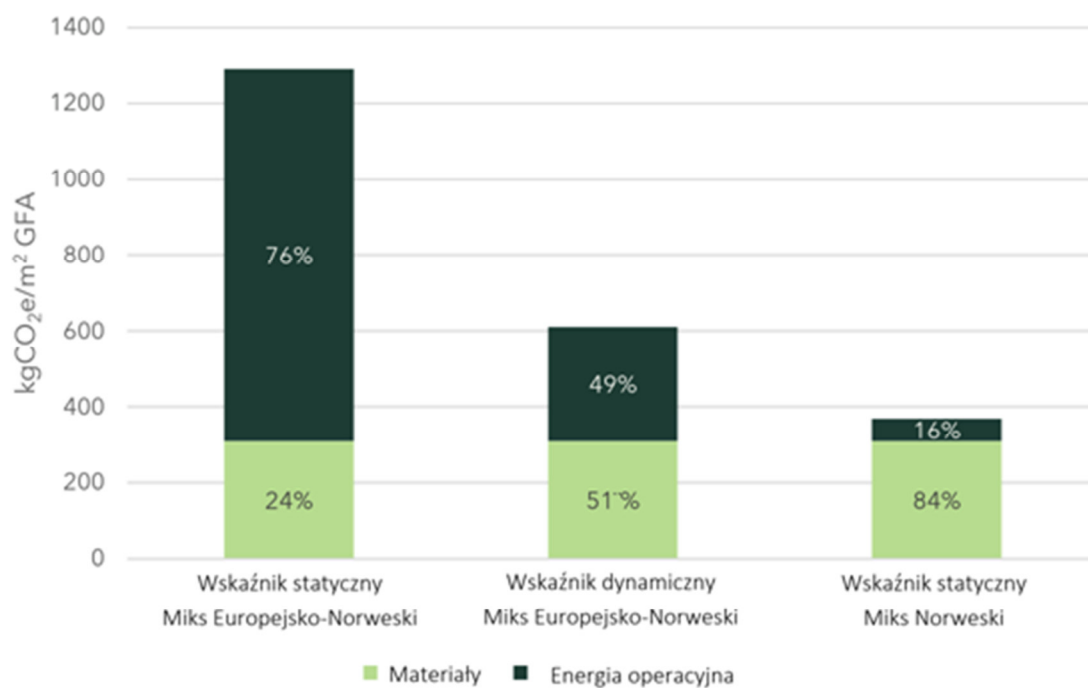


Rysunek 40. Wyniki analiz w podziale na materiały

5.3 Wpływ zmiany wskaźnika emisji energii elektrycznej

Na koniec wyznaczono całkowitą emisję dla budynku drewnianego zlokalizowanego w Norwegii przy użyciu różnych modeli wskaźnika emisji energii elektrycznej. Wyniki analizy przedstawiono na poniższym wykresie. Widać, że wskaźnik emisji znacząco wpływa zarówno na całkowitą emisję, jak i na jej udział związany ze zużyciem energii.

Wyniki analizy śladu węglowego budynków testowych



Rysunek 41. Całkowita emisja z różnymi modelami wskaźnika emisji energii elektrycznej

Wybór wskaźnika emisji zastosowanego w obliczeniach ma duży wpływ na uzyskane wyniki, zatem należy odpowiednio go zdefiniować w krajowej metodycy liczenia śladu węglowego budynku w cyklu życia.

Literatura

1. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1275 z dnia 24 kwietnia 2024 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (wersja przekształcona) (Tekst mający znaczenie dla EOG), Dz.U. L, 2024/1275, 8.5.2024
2. <https://oneclicklca.com/en/resources/articles/carbon-benchmark-join-the-carbon-heroes-program-for-green-buildings>
3. Röck M, Sørensen A, Steinmann J, Le Den X, Lynge K, Horup L H., Tozan B, Birgisdottir H. Towards Embodied Carbon Benchmarks for Buildings in Europe – Facing the data challenge, 2022, <https://doi.org/10.5281/zenodo.6120522>
4. Dong, Y.; Ng, S.T.; Liu, P. A comprehensive analysis towards benchmarking of life cycle assessment of buildings based on systematic review. *Build. Environ.* 2021, 204, 108162.
5. Moschetti R., Mazzarella L and Nord N. 2015 An overall methodology to define reference values for building sustainability parameters *Energy Build* 88 413-427
6. EN 15978:2011 Zrównoważone obiekty budowlane. Ocena środowiskowych właściwości użytkowych budynków. Metoda obliczania
7. ISO 15686-8:2008 Buildings and constructed assets — Service-life planning Part 8: Reference service life and service-life estimation
8. EN 15804:2012+A2 Zrównoważenie obiektów budowlanych -- Deklaracje środowiskowe wyrobu -- Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych
9. PN-EN 15459-1:2017-07 Charakterystyka energetyczna budynków -- Procedura ekonomicznej oceny instalacji energetycznych w budynkach -- Część 1: Procedury obliczeniowe, Moduł M1-14
10. Level(s) – wskaźnik 1.2: podręcznik użytkownika dotyczący współczynnika globalnego ocieplenia w cyklu życia: briefing wprowadzający, instrukcje i wytyczne (wersja publikacji 1.1), Wspólne Centrum Badawcze (JRC), Komisja Europejska