

mgr inż. arch. Agata Marta Muchla^{1*)}, ORCID: 0009-0000-9071-0687; M. Sc. Eng. Alicja Brachaczek-Jokel²⁾, ORCID: 0009-0002-9413-6453; MBA Eng. Jorge Camilo Diaz Garcia²⁾, ORCID: 0009-0004-7169-4975; dr hab. inż. Tomasz Piotrowski, prof. PW³⁾, ORCID: 0000-0002-2547-7601; mgr inż. Piotr Dymarski¹⁾, ORCID: 0009-0003-2515-679X; inż. Witold Olczak¹⁾, ORCID: 0009-0004-5873-9550; mgr inż. Marek Dmochowski⁴⁾, ORCID: 0009-0004-9885-2750

BIM-aided concrete quantities estimation and GWP optimisation

Szacowanie ilości betonu oraz optymalizacja GWP wspomagane BIM

DOI: 10.15199/33.2025.08.12

Abstract. This paper explores the use of BIM technology for concrete quantity estimation, ordering, and automated Global Warming Potential (GWP) calculation. A case study presents a Cemex Revit plug-in, tested and enhanced within the scope of the Horizon Europe Reincarnate project, enabling automated quantity take-off, order placement, and GWP value integration. The solution supports logistics, reduces waste, and prepares for future Whole Life Cycle reporting, addressing gaps in BIM software that overlook material estimation during construction.

Keywords: BIM; building materials; concrete; GWP; life cycle; automatisisation.

The use of Building Information Modelling (BIM) across Europe is not mandatory in 65% of countries when it comes to public investments. The remaining 35% consists of countries where BIM is either mandatory, planned to become mandatory, or required by certain agencies. According to Polish legislation BIM is not mandatory for construction investments. In 2014, several organizations from the AEC industry in Poland (Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa, Stowarzyszenie Architektów Polskich and Główny Urząd Nadzoru Budowlanego), signed an agreement to promote the adoption of BIM. Between 2019 and 2020, the project „Digitalization of the Construction Process in Poland” was carried out to support the integration of BIM into public procurement procedures. In March 2022, the Ministry of Development and Technology formed a dedicated BIM working group responsible for developing a national BIM implementation strategy [1]. Despite the dissolution of the working group, new initiatives have been undertaken, including the development of the national CCI construction classification by the Polish chapter of the buildingSMART. The range of the possibility of the BIM usage is wide. Having 3D object-based parametric elements enriched with data information associated with attributes and datasets, BIM models can serve for diverse design analysis, simulations, interpretations; construction purposes, enhancing the pace of construction, im-

Streszczenie. Artykuł przedstawia zastosowanie technologii BIM do szacowania ilości, wspomagania procesu zamawiania betonu oraz automatycznego obliczania Współczynnika Globalnego Ocieplenia (GWP). Studium przypadku dotyczy wykorzystania wtyczki Cemex Revit, przetestowanej i ulepszonej w ramach projektu Horizon Europe Reincarnate. Wtyczka umożliwia automatyczne pobranie zestawienia materiałów, składanie zamówień i integrację wartości GWP. Rozwiązanie to wspiera logistykę, redukcję odpadów i przygotowuje do raportowania całkowitego śladu węglowego, uzupełniając oprogramowanie BIM o możliwość szacowania ilości materiałów w fazie budowy.

Słowa kluczowe: BIM; materiały budowlane; beton; GWP; cykl życia; automatyzacja.

Zastosowanie Building Information Modelling (BIM) w Europie nie stanowi obowiązku w 65% krajów, w zakresie inwestycji publicznych. Pozostałe 35% stanowią kraje, w których wykorzystanie BIM jest albo obowiązkowe, albo też planowane jest wprowadzenie takiego obowiązku lub też wykorzystanie BIM wymagane jest przez niektóre agencje. Zgodnie z polskim ustawodawstwem wykorzystanie BIM nie jest obowiązkowe dla inwestycji budowlanych. W 2014 r. kilka organizacji z branży AEC w Polsce (Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa, Stowarzyszenie Architektów Polskich oraz Główny Urząd Nadzoru Budowlanego) podpisało porozumienie, mające na celu promowanie wdrożenia BIM. W latach 2019 – 2020 realizowano projekt „Cyfryzacja procesu budowlanego w Polsce”, mający na celu wsparcie integracji BIM w procedury zamówień publicznych. W marcu 2022 r. Ministerstwo Rozwoju i Technologii powołało dedykowaną grupę roboczą ds. BIM, odpowiedzialną za opracowanie krajowej strategii wdrażania BIM [1]. Pomimo rozwiązania grupy roboczej podjęto nowe inicjatywy, w tym opracowanie krajowej klasyfikacji budowlanej CCI przez polski oddział buildingSMART. Zakres możliwości wykorzystania BIM jest szeroki. Posiadając trójwymiarowe elementy parametryczne wzbogacone informacjami powiązanyymi z atrybutami i zestawami danych, modele BIM mogą służyć do różnorodnych analiz projektowych, symulacji, interpretacji; celów budowlanych, przyspieszania tempa budowy, poprawy dokładności prac na miejscu oraz zwiększania bezpieczeństwa [2]; redukcji kosztów operacyjnych oraz doskonalenia rozwiązań zrównoważonego rozwoju [3]. Kolejną korzyścią jest wykorzystanie modelu BIM do szacowania ilości

¹⁾ Mostostal Warszawa SA, Poland

²⁾ Cemex Innovation Holding AG – Brugg, Bern, Switzerland

³⁾ Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering

⁴⁾ Cemex Polska Sp. z o.o.

*) Correspondence address: agata.muchla@gmail.com

proving the accuracy of on-site work, and increasing safety [2]; reduction of operational costs as well as enhancement of sustainable solutions [3]. Another benefit is the use of the BIM model for quantity and cost estimation. This can be done for the purpose of the tendering process by extracting information regarding elements' dimensions to estimate their demand, which translates into the completed cost estimate. Both the native BIM model and the model in IFC format, can be used for this task. One of the examples of programs that are based on IFC is BIMestiMate. Another solution for the IFC viewer is BIM Vision with the Take-off Reports plug-in. It allows to perform quantity take-offs for cost estimation, create a multi-level structure of measurement groups with additional properties, as well as export the lists to Excel. The literature also explores the topic of cost estimation in relation to particular local standards, such as in China, where an IFC extension has been proposed to better represent all necessary information within the model [4]. Although BIM is widely adopted for the geometry-based quantity extraction (especially volume), most research works focus on the tendering process itself and the estimation. The ordering particular quantities of the materials from the perspective of the construction site – where the exact amount of the material is found crucial according to the jobsite planning and daily execution, is often overlooked. Therefore, the paper explores how the BIM model can be used to directly calculate the required material quantities and, furthermore, to enable direct ordering of those materials from the BIM model for construction purposes. The research was based on the review of original documents and scientific publications, which helped to make the results more trustworthy and relevant. The data was analysed by carefully reading and interpreting the content, focusing mainly on the information that was most important for answering the research questions. In addition to the theoretical analysis, the study included a case study focused on developing a digital tool for GWP analysis and concrete ordering. A custom plug-in was created for the BIM environment to automate GWP assessments for concrete elements based on emissions data. The above helped bridge theory with practice, allowing the research to be tested in real-world conditions.

BIM in the process of quantity take-off and material estimation for construction purposes

The potential of BIM, particularly in the 5D cost estimating aspect, is essential and relates to the early design phase through to the final budget. Accurate estimation of the needed materials (preparation of the Bill of Materials) is crucial both for budget and waste reduction. The process of material quantification (Quantity Take-off) is traditionally based on 2D drawings, which makes the process time-consuming and prone to errors. Studies show that the benefits of BIM usage in the Quantity Take-off process are increasingly recognized. The term is connected with the level of detail in a BIM model, known as LOD (Level of Development), which is crucial from the perspective of performing Quantity Take-off and Bill of Materials because it does not require a highly detailed model

i kosztów. Można to zrobić w celu procesu przetargowego poprzez wyodrębnienie informacji dotyczących wymiarów elementów w celu oszacowania ich zapotrzebowania, co przekłada się na sporządzony kosztorys. Do tego zadania mogą być wykorzystane zarówno natywny model BIM, jak i model w formacie IFC. Jednym z przykładów programów opartych na IFC jest BIMestiMate. Innym rozwiązaniem dla przeglądarki IFC jest BIM Vision z wtyczką Take-off Reports. Rozwiązania pozwalają na wykonanie zestawień ilościowych do kosztorysowania, tworzenie wielopoziomowej struktury grup pomiarowych z dodatkowymi właściwościami oraz eksportowanie list do Excela. Literatura bada także temat kosztorysowania w odniesieniu do konkretnych lokalnych standardów, na przykład w Chinach, gdzie zaproponowano rozszerzenie IFC w celu lepszego odwzorowania wszystkich niezbędnych informacji w modelu [4]. Choć BIM jest szeroko stosowany do obliczenia ilości opartej na geometrii (zwłaszcza objętości), większość prac badawczych koncentruje się na samym procesie przetargowym i estymacji. Zamawianie konkretnych ilości materiałów z perspektywy placu budowy – gdzie zamówienie dokładnej ilości materiału jest kluczowe dla zaplanowania prac oraz ich codziennej realizacji – jest często pomijane. Artykuł odpowiada na tę lukę i bada, w jaki sposób model BIM może być użyty do bezpośredniego obliczenia wymaganych ilości materiałów, a ponadto wykorzystany do bezpośredniego zamawiania tych materiałów z modelu BIM na potrzeby budowy. Badania oparto na przeglądzie oryginalnych dokumentów i publikacji naukowych, co pomogło uczynić wyniki bardziej wiarygodnymi i odpowiednimi. Dane zostały przeanalizowane poprzez uważną lekturę i interpretację treści, koncentrując się głównie na informacjach najistotniejszych dla odpowiedzi na pytania badawcze. Oprócz analizy teoretycznej badanie obejmowało studium przypadku skoncentrowane na opracowaniu narzędzia cyfrowego do analizy GWP i zamawiania betonu. Dla środowiska BIM stworzono niestandardową wtyczkę w celu automatyzacji obliczania GWP elementów betonowych na podstawie danych o emisjach. Powyższe pomogło połączyć teorię z praktyką, umożliwiając przetestowanie badań w warunkach rzeczywistych.

BIM w procesie zestawiania ilości i estymacji materiałów do celów budowlanych

Potencjał BIM, zwłaszcza w aspekcie kosztorysowania 5D, jest istotny i ma zastosowanie od wczesnej fazy projektowania aż po ostateczny budżet. Dokładne oszacowanie potrzebnych materiałów (sporządzenie kosztorysu) jest kluczowe zarówno dla budżetu, jak i dla redukcji odpadów. Proces obliczania ilości materiałów (Quantity Take-off) jest tradycyjnie oparty na rysunkach 2D, co czyni go czasochłonnym i podatnym na błędy. Badania wykazują, że korzyści z użycia BIM w procesie Quantity Take-off są coraz bardziej rozpoznawane. Termin ten wiąże się z poziomem szczegółowości w modelu BIM, znanym jako LOD (Level of Development), który jest kluczowy z perspektywy wykonywania Quantity Take-off i kosztorysu, ponieważ nie wymaga bardzo szczegółowego modelu

– lower LOD levels are sufficient. This, in turn, requires less effort while providing a reliable reference point [5]. One of the challenges encountered when using BIM for quantity take-off is the need to comply with the rules for quantity estimation according to the different classification systems used in various countries or regions [6]. Moreover, many BIM software tools provide the user with automatically compiled take-offs, they do not reflect the actual amount of material needed, but rather the amount of material included in the 3D model [7]. In construction, especially when considering materials like concrete, where the amount does not always match the modelled quantities, a more accurate material estimation tool should be proposed. The importance of accurate material estimation for cost efficiency and the elimination of construction waste.

Construction and demolition waste has been pointed out by the European Commission as a priority waste stream [8]. Construction industry contributes approximately 30 – 40% of the total amount of solid waste over the world [9], while the construction phase is responsible for approximately more than 10% of the total global waste [10]. Accurate material estimation can significantly contribute to estimating construction waste, and this accurate estimation is identified as crucial for effective waste management, enabling waste reduction, reuse and recycling. It can also empower contractors with awareness of potential sustainable construction technologies and approaches to minimise waste generation [11]. Secondly, the proper material estimation influences accurate cost estimation which is pointed as one of the most important to the construction projects [12]. Cost estimation is typically not performed within the same software used for quantity take-off, primarily due to the absence of this functionality. As a result, the process generally involves transferring the model in IFC format to dedicated cost estimation software [13]. Nevertheless, accurate material estimation directly impacts cost efficiency, which is a key factor in determining whether a project will be profitable or not.

Carbon footprint estimation within regulatory legislative changes

By the end of 2025, guidelines for calculating GWP in the life cycle of buildings are going to be adopted according to the 'Fit for 55' initiative from the European Union Green Deal [14]. Poland is engaged in reducing its greenhouse gas emissions by 55% by 2030. Additionally, as a signatory of the Paris Agreement, Poland must ensure that net global greenhouse gas emissions reach zero by 2050. According to the new Energy Performance Buildings Directive (EPBD) in the EU, it is expected that starting in 2028, buildings over 1000 m² in area will be required to calculate their whole-life-cycle (WLC) [15]. By 2030, this obligation will apply to all new buildings. The overall calculation will rely on the individual GWP of every construction product which has to comply with the new CPR, recently published in December of 2024 [16]. This new CPR provides the framework for

– wystarczające są niższe poziomy LOD. To z kolei wymaga mniejszego nakładu pracy przy jednoczesnym zapewnieniu wiarygodnego punktu odniesienia [5]. Jednym z wyzwań napotykanym w wykorzystaniu BIM do zestawiania ilości jest konieczność przestrzegania zasad oszacowania ilości zgodnie z różnymi systemami klasyfikacji, stosowanymi w poszczególnych krajach lub regionach [6]. Co więcej, wiele narzędzi programowych BIM dostarcza użytkownikowi automatycznie sporządzone zestawienia, które nie odzwierciedlają rzeczywistej ilości potrzebnego materiału, a raczej ilość materiału, ujętą w modelu 3D [7]. W budownictwie, szczególnie w odniesieniu do materiałów takich jak beton, gdzie ilość nie zawsze odpowiada ilości modelowanej, powinno się zaproponować dokładniejsze narzędzie do estymacji materiałów.

Odpady budowlane i rozbiórkowe zostały wskazane przez Komisję Europejską jako priorytetowy strumień odpadów [8]. Przemysł budowlany przyczynia się do około 30–40% całkowitej ilości odpadów stałych na świecie [9], podczas gdy faza budowy jest odpowiedzialna za ponad 10% całkowitych odpadów globalnych [10]. Dokładne oszacowanie materiałów może znacznie przyczynić się do szacowania odpadów budowlanych, a takie dokładne oszacowanie jest uznawane za kluczowe dla efektywnego zarządzania odpadami, umożliwiając redukcję odpadów, ponowne ich użycie i recykling. Może to również zwiększyć świadomość firm wykonawczych o potencjalnych zrównoważonych technologiach i podejściu, mającemu na celu minimalizowanie powstawania odpadów [11]. Po drugie, właściwe oszacowanie materiałów wpływa na dokładność kosztorysowania, które jest wskazywane jako jedno z najważniejszych dla projektów budowlanych [12]. Kosztorysowanie zazwyczaj nie jest wykonywane w tym samym oprogramowaniu, które służy do Quantity Take-off, głównie z powodu braku tej funkcjonalności. W rezultacie proces ten zazwyczaj polega na przeniesieniu modelu w formacie IFC do dedykowanego oprogramowania do kosztorysowania [13]. Niemniej jednak dokładne oszacowanie materiałów bezpośrednio wpływa na efektywność kosztową, co jest kluczowym czynnikiem decydującym o tym, czy projekt będzie opłacalny.

Szacowanie śladu węglowego w kontekście zmian legislacyjnych

Do końca 2025 r. mają zostać przyjęte wytyczne dotyczące obliczania GWP w cyklu życia budynków, zgodnie z inicjatywą „Fit for 55” wynikającą z Europejskiego Zielonego Ładu [14]. Polska jest zaangażowana w redukcję emisji gazów cieplarnianych o 55% do 2030 r. Dodatkowo, jako sygnatariusz Porozumienia Paryskiego, Polska musi zapewnić, że globalne emisje gazów cieplarnianych netto osiągną zero do 2050 r. Zgodnie z nową dyrektywą o charakterystyce energetycznej budynków (EPBD) w UE, oczekuje się, że począwszy od 2028 r. dla budynków o powierzchni ponad 1000 m², będzie obowiązek obliczania całkowitego śladu węglowego w cyklu życia (WLC) [15]. Do 2030 r. obowiązek ten będzie dotyczył wszystkich nowych budynków. Obliczenie będzie oparte na indywidualnym GWP każdego produktu budowlanego, który musi być zgodny z nowym CPR, opublikowanym w grudniu 2024 r.

publishing Digital Product Passports (DPP) within which will be declared the GWP. Meanwhile, in a transition period of adopting these new regulations, there will be a need to define calculation methodologies and establish a comprehensive database that facilitates this assessment.

Reincarnate project

Overview of the project and innovation scope. The Reincarnate project, funded by the Horizon Europe EU program, focuses on maximizing the life cycle of buildings, construction products, and materials through innovative building solutions that contribute to increased reuse and recycling of demolition waste and construction components [17]. One of the innovation processes tested through the collaboration between the general contractor company with 80 years of tradition – general contractor (Mostostal Warszawa) and concrete manufacturer (Cemex) addresses the need to use a BIM model for accurately estimating the amount of ready-mix concrete needed to be ordered for the construction of structural elements, thus reducing construction waste and contributing to cost savings. This innovation enables placing a concrete order directly from the BIM model (Figure 1). After confirmation of concrete delivery to the construction site, it is possible to retrieve “as-built” parameters from the Digital Delivery Ticket and assign them to each concrete structural element linked to the BIM model including concrete Global Warming Potential (GWP).

Digital tool integrated into the BIM model, supporting purchase phase and storage of the GWP information. The development of this innovation was driven by the need of the digital tool that would benefit from the BIM model to support the ordering process, supply monitoring and material logistics management, thus reducing construction waste, energy consumption needed for the transportation of the material,

[16]. Nowy CPR stanowi ramy dla publikowania Cyfrowych Paszportów Produktów (DPP), w których deklarowany będzie GWP. Tymczasem, w okresie przejściowym przy przyjmowaniu tych nowych regulacji, będzie konieczne zdefiniowanie metodologii obliczeń i ustanowienie kompleksowej bazy danych ułatwiającej tę ocenę.

Projekt Reincarnate

Zarys projektu i innowacji. Projekt Reincarnate, finansowany z programu UE Horizon Europe, koncentruje się na maksymalizacji cyklu życia budynków, produktów budowlanych i materiałów, poprzez innowacyjne rozwiązania budowlane, które przyczyniają się do zwiększenia ponownego użycia i recyklingu odpadów rozbiórkowych oraz elementów budowlanych [17]. Jeden z innowacyjnych procesów, testowanych w ramach współpracy generalnego wykonawcy z 80-letnią tradycją (Mostostal Warszawa) i producenta betonu (Cemex), dotyczy wykorzystania modelu BIM do dokładnego oszacowania ilości betonu, jaki należy zamówić do budowy elementów konstrukcyjnych, co w efekcie zmniejsza odpady budowlane i przyczynia się do oszczędności kosztów. Ta innowacja umożliwia złożenie zamówienia na beton bezpośrednio z modelu BIM (rysunek 1). Po potwierdzeniu dostawy betonu na plac budowy, możliwe jest pobranie parametrów „as-built” z Cyfrowego Dokumentu WZ, w tym globalnego potencjału ocieplenia (GWP) betonu, i przypisanie ich do każdego elementu konstrukcyjnego w modelu BIM.

Cyfrowe narzędzie zintegrowane z modelem BIM, wspierające etap zamówienia i przechowywanie informacji o GWP. Rozwój tej innowacji podyktowany był potrzebą stworzenia narzędzia cyfrowego, które mogłoby korzystać z modelu BIM w celu wsparcia procesu zamawiania materiałów, monitorowania dostaw i zarządzania logistyką, a tym samym ograniczania odpadów budowlanych, zużycia energii potrzebnej na trans-

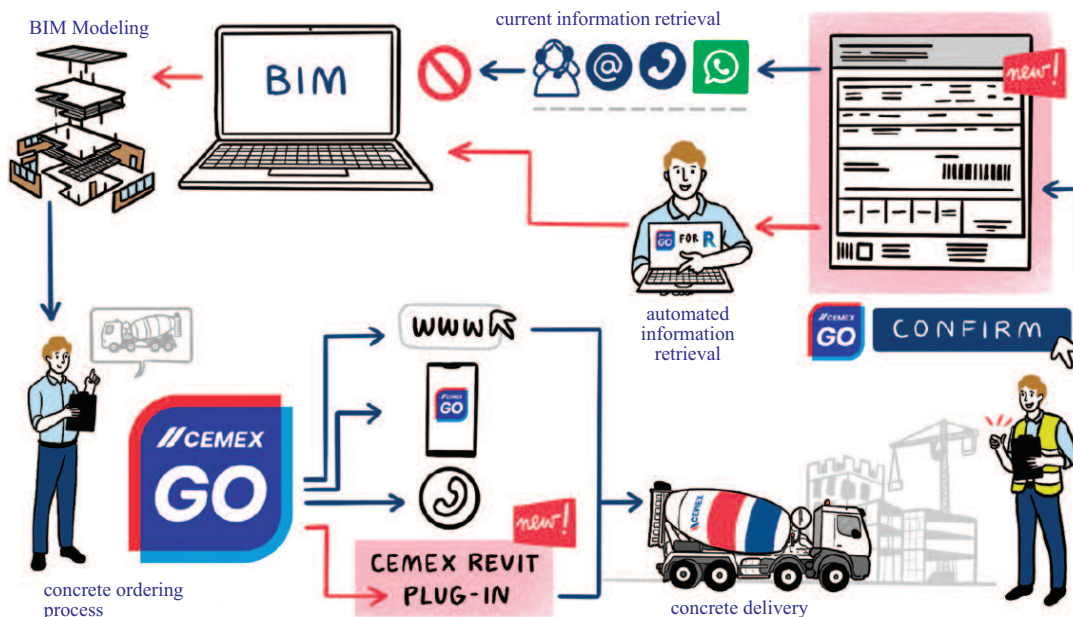


Fig. 1. Diagram of an extension of the current project concrete procurement process with the usage of BIM environment
Rys. 1. Diagram rozszerzenia obecnego procesu zamawiania betonu z wykorzystaniem środowiska BIM

optimising time, cost and resource management. An existing solution at Cemex – the **Cemex GO** application, which has been combined with the BIM environment (Revit) in the form of Revit plug-in based on Revit API. The algorithm was built in Visual Studio, with the use of C# language and .NET framework. The tool allows for the concrete orders creation and then assignment of those orders, to elements in the Revit model, pointing out to which construction elements it applies. In the 'Material Take-off Tool' the user searches for the BIM element for which the concrete needs to be ordered and selects the desired concrete type. Cemex Revit plug-in reads volume of the BIM elements from the model, giving a possibility to the user to adjust volume manually. Once input data is validated by the user, the concrete can be ordered. Orders' information is available through the Cemex Revit plug-in prototype. It includes data such as status of delivery and the information from the Digital Delivery Ticket. The plug-in prototype is integrated with the Cemex GO platform, which in turn is connected to the company's internal order management and billing systems. This ensures traceability of delivery data and consistency with project documentation.

After the confirmation of the delivery, the user can link the information to the specific BIM elements in the Revit model. The algorithm ensures that properties from the Delivery Ticket are created in the Revit 'Instance Property window' and filled in with proper values. These parameters are added only as instance properties of the element and do not overwrite or duplicate the type parameters stored in the material library. **The list of properties included:** 'Project Name'; 'Jobsite Address'; 'Truck number or Vehicle identification'; 'Name of purchaser'; 'Plant name or Plant Identification'; 'Manufacturer'; 'Delivery ticket number'; 'Delivery date (DD. MM. YYYY)'; 'Time of production = time of loading (HH:MM)'; 'Time of the arrival to the jobsite (HH:MM)'; 'Time of the beginning of unloading (HH:MM)'; 'Time of the end of unloading (HH:MM)'; 'Consistency class or consistency target value'; 'Age of strength of class (days)'; 'Strength class'; 'Aggregate size'; 'Chloride content class'; 'Volume'; 'Exposure class'; 'Net Global Warming Potential ($\text{kgCO}_2\text{eq/m}^3$)'; 'Gross Global Warming Potential ($\text{kgCO}_2\text{eq/m}^3$)'; 'Percentage of recycled aggregates by weight (%)'; 'Special Properties'. The majority of the parameters listed above are mandated by the European Standard for Ready-Mix Concrete, EN 206, to be provided to the customer [18]. Three of the parameters included in the plug-in should be mentioned as additional ones, related to sustainability and circularity which are not currently mandatory: 'Net Global Warming Potential ($\text{kgCO}_2\text{eq/m}^3$)'; 'Gross Global Warming Potential ($\text{kgCO}_2\text{eq/m}^3$)' and 'Percentage of recycled aggregates by weight (%)'. However, the inclusion of these environmental parameters is forward-looking, anticipating upcoming legislative changes in Europe and in Poland at the beginning of 2027 from the new CPR when DPP will require these values among others.

The Cemex Revit plug-in prototype supports multiple variants amongst orders and BIM model elements: one concrete order for one BIM element; one concrete order for multi-

port materiału oraz optymalizacji czasu, kosztów i zarządzania zasobami. Istniejące rozwiązanie firmy Cemex – aplikacja **Cemex GO** – zostało połączone ze środowiskiem BIM (Revit) w formie wtyczki do Revita opartej na Revit API. Algorytm został stworzony w Visual Studio z wykorzystaniem języka C# oraz platformy .NET. Narzędzie umożliwia tworzenie zamówień betonu, a następnie przypisywania tych zamówień do elementów w modelu Revit, wskazując, do których elementów konstrukcyjnych się odnosi. W module „Material Take-off Tool” użytkownik wyszukuje element BIM, dla którego należy zamówić beton, i wybiera pożądany rodzaj betonu. Wtyczka Cemex Revit odczytuje objętość elementów BIM z modelu, dając użytkownikowi możliwość ręcznej korekty objętości. Po zatwierdzeniu danych wejściowych przez użytkownika, pojawia się możliwość złożenia zamówienia. Informacje o zamówieniach są dostępne w prototypie wtyczki Cemex Revit. Obejmują one dane, takie jak status dostawy oraz informacje z Cyfrowego Dokumentu WZ. Prototyp wtyczki jest zintegrowany z platformą Cemex GO, która z kolei jest połączona z wewnętrznymi systemami zarządzania zamówieniami i rozliczeniami w firmie. Zapewnia to możliwość śledzenia danych dostawy oraz spójność z dokumentacją projektową.

Po potwierdzeniu dostawy użytkownik może powiązać informacje z konkretnymi elementami BIM w modelu Revit. Algorytm sprawia, że właściwości z Cyfrowego Dokumentu WZ tworzone są w oknie właściwości instancji elementu w Revicie i wypełniane odpowiednimi wartościami. Parametry te są dodawane wyłącznie jako właściwości instancji elementu i nie nadpisują ani nie duplikują parametrów typu, przechowywanych w bibliotece materiałów. **Lista uwzględnionych parametrów obejmuje:** „Nazwa projektu”; „Adres budowy”; „Numer ciężarówki lub identyfikator pojazdu”; „Nazwa nabywcy”; „Nazwa wytwórni lub identyfikator wytwórni”; „Producent”; „Numer dokumentu WZ”; „Data dostawy (DD. MM. RRRR)”; „Czas produkcji = czas załadunku (GG: MM)”; „Czas przybycia na budowę (GG: MM)”; „Czas rozpoczęcia rozładunku (GG: MM)”; „Czas zakończenia rozładunku (GG: MM)”; „Klasa konsystencji lub docelowa wartość konsystencji”; „Wiek osiągnięcia klasy wytrzymałości (dni)”; „Klasa wytrzymałości”; „Frakcja kruszywa”; „Klasa zawartości chlorków”; „Objętość”; „Klasa ekspozycji”; „Netto Global Warming Potential ($\text{kgCO}_2\text{eq/m}^3$)”; „Brutto Global Warming Potential ($\text{kgCO}_2\text{eq/m}^3$)”; „Procent kruszyw z recyklingu wagowo (%)”; „Właściwości specjalne”. Większość wymienionych parametrów jest wymagana do przekazania klientowi przez europejską normę dla betonu towarowego EN 206 [18]. Trzy spośród parametrów uwzględnionych we wtyczce należy wymienić jako dodatkowe, związane ze zrównoważonym rozwojem i gospodarką cyrkularną, które obecnie nie są obowiązkowe. Są to: „Netto Global Warming Potential ($\text{kgCO}_2\text{eq/m}^3$)”, „Brutto Global Warming Potential ($\text{kgCO}_2\text{eq/m}^3$)” oraz „Procent kruszyw z recyklingu wagowo (%)”. Uwzględnienie tych parametrów środowiskowych ma jednak charakter perspektywiczny, przewidujący nadchodzące zmiany legislacyjne w Europie i w Polsce na początku 2027 r., wynikające z nowego CPR, kiedy to DPP będzie wymagał podawania tych wartości.

Prototyp wtyczki Cemex Revit obsługuje wiele wariantów relacji między zamówieniami a elementami modelu BIM: jedno zamówienie betonu dla jednego elementu BIM; jedno zamówienie

ple elements and multiple orders for one element reflect real construction site conditions, which vary according to the construction site dynamics like the type of element to be concreted (wall, beam, structural column, slab). **The innovation developed results in both, precise material estimation on the construction site (thus reducing the construction waste) and more efficient construction and building lifecycle management.**

Comparative analysis of net GWP for C30/37 concrete

Cemex Revit plug-in [19] enables users to compare GWP of different types of concrete prior to selecting the final concrete mix for your project. Plug-in offers a set of concrete libraries available according to the country of the project. Comparison was based on real data calculated by the Sustainable Construction Tool (Figure 2) for stages A1 – A3 of Life Cycle Assessment (LCA). Knowing the exact location of the jobsite, calculation of stage A4 is possible. The Cemex Revit plug-in includes the A4 stage of LCA by automatically calculating the emissions from transporting concrete from the nearest production facility to the construction site, based on geolocation data. It is embedded within the GWP computation logic of the Sustainable Construction Tool. This comprehensive approach facilitates the selection of the concrete mix with the lowest net GWP value. As a case study, calculations were performed for three types of concrete intended for the construction of reinforced concrete slabs in the Faculty of Psychology building in Warsaw. The volume of the concrete slabs was obtained automatically from the BIM model and represents more than 65% of the total volume of concrete elements in this project. These stages correspond to the LCA framework defined in ISO 21930:2017 [20].

wienie betonu dla wielu elementów; oraz wiele zamówień betonu dla jednego elementu – odzwierciedlając tym samym rzeczywiste warunki na placu budowy, które różnią się w zależności od dynamiki budowy, np. rodzaju elementu przeznaczonego do betonowania (ściana, belka, słup konstrukcyjny, płyta). **Opracowana innowacja skutkuje zarówno precyzyjnym oszacowaniem materiałów na placu budowy (a tym samym redukcją odpadów budowlanych), jak i bardziej efektywnym zarządzaniem budową oraz cyklem życia budynku.**

Analiza porównawcza netto GWP dla betonu C30/37

Wtyczka Cemex Revit [19] umożliwia użytkownikom porównanie GWP różnych rodzajów betonu przed wyborem ostatecznej mieszanki betonowej dla projektu. Wtyczka oferuje zestaw bibliotek betonów dostępnych w zależności od kraju, w którym realizowany jest projekt. Porównanie oparto na rzeczywistych danych obliczonych przy pomocy narzędzia Sustainable Construction Tool (rysunek 2) dla etapów A1 – A3 oceny cyklu życia (LCA). Znając dokładną lokalizację placu budowy, możliwe jest obliczenie etapu A4. Wtyczka Cemex Revit uwzględnia etap A4 LCA poprzez automatyczne wyliczenie emisji, wynikających z transportu betonu z najbliższego zakładu produkcyjnego na plac budowy, bazując na danych geolokalizacyjnych. Jest to wbudowane w logikę obliczeń GWP w narzędziu Sustainable Construction Tool. Tak kompleksowe podejście ułatwia wybór mieszanki betonowej o najniższej wartości netto GWP. Jako studium przypadku przeprowadzono obliczenia dla trzech rodzajów betonu przeznaczonego do budowy żelbetonowych płyt stropowych w budynku Wydziału Psychologii w Warszawie. Objętość płyt betonowych została automatycznie pozyskana z modelu BIM i stanowi ponad 65% całkowitej objętości elementów betonowych w tym projekcie. Etapy te odpowiadają ramom LCA zdefiniowanym w normie ISO 21930:2017 [20].

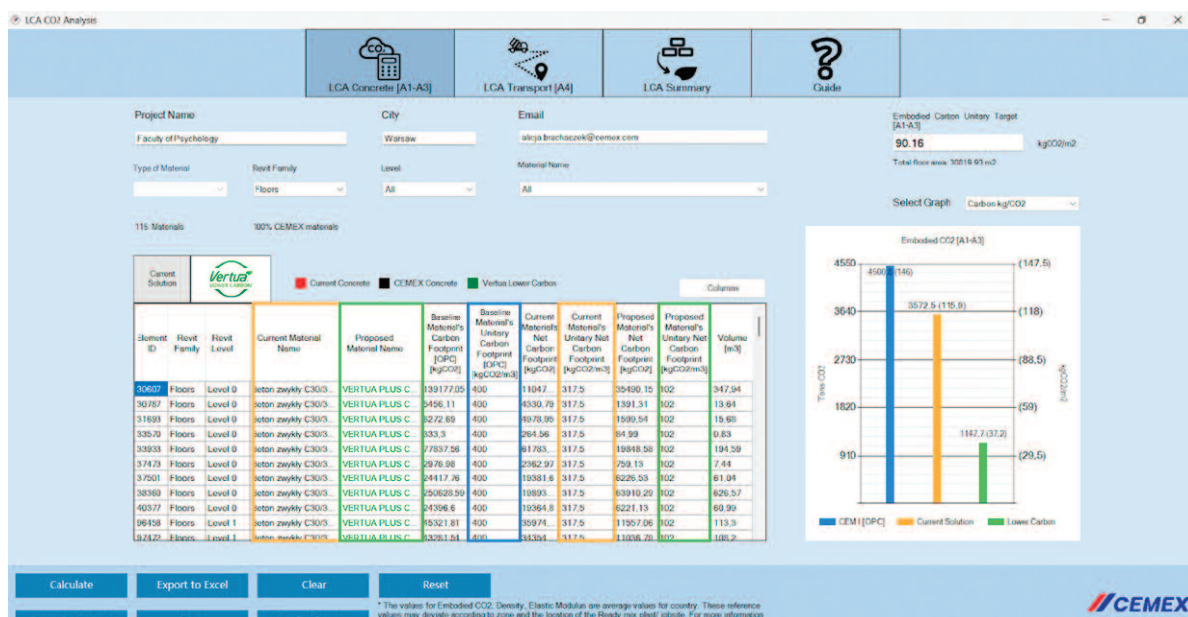


Fig. 2. Comparative analysis of GWP Net for C30/37 concrete

Rys. 2. Analiza porównawcza potencjału globalnego ocieplenia netto dla betonu klasy C30/37

Data taken for the comparison:

- **400 kgCO₂eq/m³** (blue column) – reference value for concrete from 1990 [21] – this historical value acts like a baseline for the comparison;

- **317.5 kgCO₂eq/m³** (orange column) – Polish Industry Value of GWP for concrete based on CEM I – Industry EPD for concrete produced in Poland doesn't exist. Using GCCA Tool [22] an EPD with the reference value for the Polish market was created based on the EPD for reference cement produced in Poland, created by the Polish Cement Association in 2020 (valid until 2025) [23]. On the other hand, the value for reference concrete C30/37 produced by Cemex based on CEM I equals to 233 kgCO₂eq/m³ [24]. The visible difference comes from the fact that Cemex Poland focuses on alternative energy sources [25];

- **102 kgCO₂eq/m³** (green column) – value for Cemex Vertua Lower Carbon Concrete, based on CEM III was taken from third party EPD – issued in 2021 (valid until 2027) [26] – this represents innovative advancements in reducing the carbon footprint of concrete.

Blue column represents the embodied CO₂-eq of the baseline concrete. Orange column represents the values for the current solution – Polish reference concrete. Green column represents values for Cemex Vertua Lower Carbon Concrete. Thanks to the Sustainable Construction Tool, a quick analysis in the early stages of the project is possible and easy to be done. The tool provides an overview of embodied GWP and suggests more sustainable solutions, showing differences in tons and kgCO₂-eq/m². It is possible to filter elements for the comparison by the Revit Family, Level and Material Name. By default, Tool suggests the lowest possible Embodied Carbon Unitary Target (kgCO₂-eq/m²). But if needed, the user can adjust the target manually, as well as the type of concrete used for the analysis. The comparative analysis shows a noticeable reduction in net GWP with Vertua Lower Carbon concrete when compared to both:

- historical reference values from 1990, reduction by ~3353 tons of embodied CO₂-eq;

- contemporary Polish industry values, reduction by ~2425 tons of embodied CO₂-eq.

The right choice of concrete for the construction is crucial, especially if there is a need of pursuing one of the green certifications for buildings or neighbourhoods like: BREEAM, LEED, DGNB or others.

Massive reduction of emissions of greenhouse gases shows innovation and progress made in sustainable concrete manufacturing. The Sustainable Construction Tool lets the user do a real-time CO₂-eq calculation taking volumes of concrete straight from the BIM model. This solution will be valuable in the view of the upcoming legislative changes regarding GWP reporting.

Assumptions for model structure and IFC-based implementation. For accurate volume-based calculations and proper functioning of the Cemex Revit plug-in, the BIM model should meet certain assumptions. Elements such as reinforced concrete slabs should be assigned the correct concrete material, modelled separately – without integrated beams, crowns or lintels – and represent geometry matching

Dane wykorzystane do porównania:

- **400 kgCO₂eq/m³** (kolumna niebieska) – wartość referencyjna dla betonu z 1990 r. [21] – ta historyczna wartość pełni rolę punktu odniesienia w porównaniu;

- **317,5 kgCO₂eq/m³** (kolumna pomarańczowa) – wartość GWP dla betonu na bazie CEM I dla rynku polskiego – w Polsce nie istnieje branżowy EPD dla betonu. Korzystając z narzędzia GCCA [22], utworzono EPD z wartością referencyjną dla polskiego rynku, bazując na EPD dla cementu referencyjnego produkowanego w Polsce, opracowanego przez Stowarzyszenie Producentów Cementu w 2020 r. (ważne do 2025 r.) [23]. Z drugiej strony, wartość dla betonu referencyjnego C30/37 produkowanego przez Cemex na bazie CEM I wynosi 233 kgCO₂eq/m³ [24]. Widoczna różnica wynika z faktu, że Cemex Polska koncentruje się na alternatywnych źródłach energii [25];

- **102 kgCO₂eq/m³** (kolumna zielona) – wartość dla Cemex Vertua Lower Carbon Concrete, na bazie CEM III, zaczerpnięta z zewnętrznego EPD – wydanego w 2021 roku (ważne do 2027 roku) [26] – reprezentuje to innowacyjne postępy w redukcji śladu węglowego betonu.

Kolumna niebieska przedstawia zawarte emisje CO₂-eq dla betonu bazowego. Kolumna pomarańczowa obrazuje wartości dla obecnego rozwiązania – polskiego betonu referencyjnego. Kolumna zielona przedstawia wartości dla Cemex Vertua Lower Carbon Concrete. Dzięki narzędziu Sustainable Construction Tool możliwa jest szybka analiza już na wczesnych etapach projektu. Narzędzie daje przegląd GWP wbudowanego oraz sugeruje bardziej zrównoważone rozwiązania, pokazując różnice w tonach i kgCO₂-eq/m². Możliwe jest filtrowanie elementów do porównania według kategorii Revit Family, Level i Material Name. Domyślnie narzędzie sugeruje najniższy możliwy cel jednostkowego wbudowanego węgla (kgCO₂-eq/m²), jednakże w razie potrzeby użytkownik może ręcznie dostosować cel, a także typ betonu użytego do analizy. Analiza porównawcza wykazała zauważalną redukcję netto GWP w przypadku betonu Vertua Lower Carbon w porównaniu do:

- historycznych wartości referencyjnych z 1990 r. – redukcja o ok. 3353 tony zawartego CO₂-eq;

- współczesnych wartości polskiej branży – redukcja o ok. 2425 ton zawartego CO₂-eq.

Właściwy dobór betonu do budowy jest kluczowy, zwłaszcza jeśli istnieje potrzeba uzyskania jednego z certyfikatów dla budynków lub osiedli, takich jak: BREEAM, LEED, DGNB czy inne. Znaczna redukcja emisji gazów cieplarnianych pokazuje innowacyjność i postęp w zrównoważonej produkcji betonu.

Narzędzie Sustainable Construction Tool umożliwia użytkownikowi wykonywanie obliczeń CO₂-eq w czasie rzeczywistym, pobierając objętości betonu bezpośrednio z modelu BIM. Rozwiązanie to będzie szczególnie wartościowe w świetle nadchodzących zmian legislacyjnych dotyczących raportowania GWP.

Założenia dotyczące struktury modelu i implementacji na podstawie IFC. Aby umożliwić dokładne obliczenia oparte na objętości i prawidłowe działanie wtyczki Cemex Revit, model BIM powinien spełniać określone założenia. Elementy takie jak żelbetowe płyty stropowe powinny mieć przypisany właściwy materiał betonowy, być modelowane oddzielnie – bez zintegrow-

the actual cast volume. As the plug-in retrieves the volume parameter directly from the model, discrepancies in modelling (e.g., composite elements) could lead to inaccurate ordering.

Regarding implementation of the presented solution in an IFC-only environment, analogous functionality would require a dedicated algorithm capable of interpreting the IFC file structure and extracting geometry-related data (e.g., IfcSlab elements with assigned Qto_Slab-BaseQuantities, including Volume). Check mechanisms between IFC parameter sets and geometry-derived quantities would be essential to ensure data consistency. Additionally, consistent use of the IFC schema and guidelines for element decomposition (e.g., avoiding composite objects that mix slabs and beams) would be crucial. Such implementation is technically feasible but requires strict modelling standards and good IFC export practices to ensure data reliability.

Conclusion and discussion

The BIM-based quantity take-off is still at an early stage of implementation [5] and the dedicated software for quantity take-off and cost estimation is much less widespread compared to design software. Nevertheless, the use of BIM-based methods for aforementioned purposes can significantly contribute to detailed and accurate material estimation, reduce the risk of miscalculations, and prevent the omission of elements. It enables not only more precise but also less time-consuming preparation of the Bill of Quantities or several material and cost variants. This, in turn, allows for accurate cost analysis, which leads to well-planned construction works [7].

In this context, the aspect of preparing a high-quality model according to standards should be highlighted. Once the material estimation calculation is based on the automation of algorithms that extract data from the geometry and properties of BIM elements, deviations from proper model preparation can lead to errors in the Bill of Quantities or make it impossible to obtain accurate results [7]. This includes not only incomplete or incorrectly assigned properties but also unresolved geometric collisions, which can distort the accuracy of quantity take-offs. Therefore, waste reduction through BIM-supported estimation is achievable only when based on a well-coordinated and verified model.

Having a well-prepared BIM model, the Cemex Revit plug-in can provide accurate material estimates additionally enabling direct concrete ordering to the construction site. While there is research regarding the use of BIM for quantity take-off and the resulting cost estimation, it mainly focuses on the tendering process, not the construction phase and material ordering. Although there are examples of using BIM for material procurement planning [27], the literature lacks examples of frameworks for ordering concrete directly from a BIM model based on detailed material quantity estimation. Therefore, the proposed solution appears to be innovative, addressing this gap and responding to a real need in the construction industry. The possibility of automating the calculation of the GWP

wanych belek, wieńców czy nadproży – oraz odwzorowywać geometrię odpowiadającą rzeczywistej objętości wylewanego betonu. Ponieważ wtyczka pobiera parametr objętości bezpośrednio z modelu, rozbieżności w modelowaniu (np. elementy złożone) mogą prowadzić do nieprecyzyjnych zamówień.

W odniesieniu do implementacji przedstawionego rozwiązania w środowisku wyłącznie opartym na IFC, analogiczna funkcjonalność wymagałaby dedykowanego algorytmu zdolnego do interpretacji struktury pliku IFC i wydobywania danych geometrycznych (np. elementów IfcSlab z przypisanymi Qto_Slab-BaseQuantities, w tym objętością). Mechanizmy kontrolne pomiędzy zestawami parametrów IFC a ilościami wyliczonymi na podstawie geometrii byłyby niezbędne dla zapewnienia spójności danych. Dodatkowo, konsekwentne stosowanie schematu IFC oraz wytycznych dotyczących dekompozycji elementów (np. unikanie obiektów złożonych łączących płyty i belki) miałyby kluczowe znaczenie. Taka implementacja jest technicznie wykonalna, ale wymaga ścisłych standardów modelowania i dobrych praktyk eksportu IFC, aby zapewnić wiarygodność danych.

Wnioski i dyskusja

Zestawienia ilościowe oparte na technologii BIM nadal znajdują się na wczesnym etapie wdrażania [5], a dedykowane oprogramowanie do zestawień ilościowych i kosztorysowania jest znacznie mniej rozpowszechnione w porównaniu z oprogramowaniem projektowym. Niemniej jednak wykorzystanie metod opartych na BIM w powyższych celach może znacznie przyczynić się do szczegółowego i dokładnego oszacowania materiałów, zmniejszyć ryzyko błędnych obliczeń oraz zapobiec pominięciu elementów. Umożliwia ono nie tylko bardziej precyzyjne, ale także mniej czasochłonne przygotowanie kosztorysu lub kilku wariantów materiałowo-kosztowych. To z kolei pozwala na dokładną analizę kosztów, co prowadzi do dobrze zaplanowanych prac budowlanych [7].

W tym kontekście należy podkreślić aspekt przygotowania modelu wysokiej jakości, zgodnie ze standardami. Gdy obliczenia zapotrzebowania materiałowego opierają się na automatyzacji algorytmów, które pozyskują dane z geometrii i właściwości elementów BIM, odstępstwa od prawidłowego przygotowania modelu mogą prowadzić do błędów w kosztorysie lub uniemożliwić uzyskanie dokładnych wyników [7]. Dotyczy to nie tylko niekompletnych lub nieprawidłowo przypisanych właściwości, ale także nierozwiązanych kolizji geometrycznych, które mogą zaburzyć dokładność zestawień ilościowych. Dlatego też redukcja odpadów poprzez estymację wspieraną przez BIM jest możliwa tylko na podstawie dobrze skoordynowanego i zweryfikowanego modelu.

Mając właściwie przygotowany model BIM, wtyczka Cemex Revit może zapewnić dokładne oszacowanie materiałów, umożliwiając dodatkowo bezpośrednie zamawianie betonu na plac budowy. Chociaż istnieją badania dotyczące wykorzystania BIM do zestawień ilościowych i wynikającego z nich kosztorysowania, koncentrują się one głównie na procesie przetargowym, a nie na fazie budowy i zamawianiu materiałów. Mimo że istnieją przykłady użycia BIM do planowania zaopatrzenia

of concrete elements and aggregating this data could serve future WLC reporting for buildings. A potential future research direction could include a comparative analysis of GWP estimation for all BIM model concrete elements using the plug-in versus manual calculations, to assess the accuracy and time saving of the aforementioned methods.

The Reincarnate project has received funding from the European Union's Horizon Europe research and innovation programme under grant agreement N° 101056773.

Received: 07.04.2025

Revised: 27.05.2025

Published: 21.08.2025

w materiałach [27], w literaturze brakuje przykładów ram dla zamawiania betonu bezpośrednio z modelu BIM na podstawie szczegółowego oszacowania zapotrzebowania materiałowego. Dlatego też zaproponowane rozwiązanie charakteryzuje się innowacyjnością, odpowiadając na tę lukę oraz na realną potrzebę branży budowlanej.

Możliwość automatyzacji obliczeń GWP elementów betonowych oraz agregowania tych danych mogłaby w przyszłości służyć raportowaniu WLC dla budynków. Potencjalnym kierunkiem dalszych badań mogłaby być analiza porównawcza oszacowania GWP dla wszystkich betonowych elementów modelu BIM z użyciem wtyczki w porównaniu z obliczeniami manualnymi, w celu oceny dokładności i oszczędności czasu w wyżej wymienionych metodach.

Projekt Reincarnate otrzymał dofinansowanie ze środków programu ramowego Unii Europejskiej „Horyzont Europa” na podstawie umowy grantowej nr 101056773.

Artykuł wpłynął do redakcji: 07.04.2025 r.

Otrzymało poprawiony po recenzjach: 27.05.2025 r.

Opublikowano: 21.08.2025 r.

Literature

- [1] Jalaei G, Soltani K, K. Rashedi KE. BIM policy trends in Europe: Insights from a multi-stage analysis. *Applied Sciences*, vol. 14, no. 11, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app14114363>.
- [2] Zhang Y et al. Advancing construction site workforce safety monitoring... *Automation in Construction*, vol. 154, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105227>.
- [3] Sadeghi M, Hosseini N, Motamedi MA. Towards an integrative framework for BIM and artificial intelligence capabilities.... *Automation in Construction*, vol. 156, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106168>.
- [4] Ma Y, Wang Y, Wang J. Application and extension of the IFC standard.... *Automation in Construction*, vol. 20, no. 2, pp. 196–204, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.017>.
- [5] Li X, Wang D. BIM-based quantity take-off: Current state and future opportunities. *Automation in Construction*, vol. 159, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105549>.
- [6] Wu Y et al. Design and implementation of quantity calculation method based on BIM data. *Sustainability*, vol. 14, no. 13, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su14137797>.
- [7] Gołaszewska M, Salamak M. Challenges in takeoffs and cost estimating.... *Technical Transactions*, no. 4, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.17.048.6359>.
- [8] Mthembu T et al. State-of-the-art review on construction and demolition waste... *Cleaner Waste Systems*, vol. 5, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100251>.
- [9] Yuan Y et al. An empirical study of construction and demolition waste generation.... *Waste Management*, vol. 95, pp. 545–558, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.049>.
- [10] Ding T et al. A field based methodology for estimating waste generation.... *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 105, pp. 30–39, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.04.002>.
- [11] Botha M. Construction waste estimation methods: A systematic literature review. *Waste and Circular Solutions*, vol. 2, no. 1, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.31705/WCS.2023.35>.
- [12] Olanrewaju S, Abdul-Aziz W. Improving cost estimation in construction projects. *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 26, no. 3, pp. 275–289, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1853657>.
- [13] Kymmell B. Automation of construction quantity take-off using BIM, in *Proc. of 2013 Construction Research Congress*, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1061/9780784479827.221>.
- [14] European Commission „Fit for 55: Delivering the EU's 2030 Climate Target...”, 2021. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0550>.
- [15] Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council, 24 Apr. 2024. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>.
- [16] Regulation (EU) 2024/3110 of the European Parliament and of the Council, 27 Nov. 2024. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/3110/oj>.
- [17] Reincarnate Project – Innovative Solutions for a Greener Construction Industry. [Online]. Available: <https://www.reincarnate-project.eu/>.
- [18] EN 206:2013+A2: 2021, Concrete – Specification, performance, production and conformity, European Committee for Standardization. 2021.
- [19] Cemex Revit plug-in. [Online]. Available: <https://www.cemex.pl/bim>.
- [20] ISO 21930:2017. Sustainability in buildings and civil engineering works – Core rules for environmental product declarations of construction products and services, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2017.
- [21] GNR Database, [Online]. Available: <https://www.cement-co2-protocol.org>.
- [22] The Global Cement and Concrete Association, „EPD Tool,” [Online]. Available: <https://gccapd.org/tool>.
- [23] Environmental Product Declaration (EPD) – Common cements in Poland. [Online]. Available: <https://www.polskicement.pl/content/uploads/2025/01/Deklaracja-srodowiskowa-ENG.pdf>.
- [24] Groups of reference concretes produced by CEMEX POLSKA. [Online]. Available: https://www.itb.pl/wp-content/uploads/2023/07/ITB_EPD-271-CEMEX-concrete-CEM-I.pdf.
- [25] Cemex Polska website. [Online]. Available: <https://www.cemex.pl/-/cemex-polska-stawia-na-odnawialne-%C5%BAr%C3%B3d%C5%82a-energii>.
- [26] Vertua® concrete groups (based on CEM III) produced by Cemex Polska. [Online]. Available: https://www.itb.pl/wp-content/uploads/2024/09/ITB-EPD_273_CEMEX-Polska-Sp.-z-o.o.-Vertua%C2%AE-concrete-groups-based-on-CEM-III-produced-by-Cemex-Polska.pdf.
- [27] Xu L, Li J. BIM framework for efficient material procurement planning. *Automation in Construction*, vol. 160, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105803>.