

Wpływ składu mieszanek betonowych nowej generacji na ich ślad węglowy

Effect of the composition of new generation concrete mixtures on their carbon footprint

DOI: 10.15199/33.2023.06.07

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki analizy, która miała na celu zbadanie wpływu różnych składów mieszanek betonowych o zbliżonych cechach mechanicznych na ich ślad węglowy na etapie produkcji. Wyniki odniesiono do ekwiwalentu dwutlenku węgla na jednostkę funkcjonalną produktu (CO₂e) oraz porównano z betonami zwykłymi. Przeprowadzona analiza wykazała, że największy wpływ na wielkość śladu węglowego ma rodzaj i ilość cementu. Skład mieszanek betonowych nowej generacji może mieć istotny wpływ na ich ślad węglowy, a wysiłki zmierzające do zmniejszenia śladu węglowego przez zastosowanie alternatywnych materiałów i zmniejszanie zawartości cementu mogą przyczynić się do bardziej zrównoważonego i przyjaznego środowiska przemysłu budowlanego.

Słowa kluczowe: ślad węglowy; LCA materiałów budowlanych; zrównoważone budownictwo; dekarbonizacja.

Abstract. The paper presents the results of an analysis aimed at investigating the impact of significantly different compositions of concrete mixes with similar mechanical characteristics on their carbon footprint during production. The results were compared to the equivalent amount of carbon dioxide per functional unit of the product (CO₂e) and compared to ordinary concretes. The analysis showed that the type and amount of cement have the greatest impact on the carbon footprint. The composition of new generation concrete mixes can have a significant impact on their carbon footprint, and efforts to reduce the carbon footprint of concrete by using alternative materials and reducing cement content can contribute to a more sustainable and environmentally friendly construction industry.

Keywords: carbon footprint; LCA of building materials; sustainable construction; decarbonization.

Betony nowej generacji charakteryzują się zwiększoną wytrzymałością, lepszą odpornością na warunki środowiskowe oraz poprawą wybranych cech fizyko-mechanicznych w porównaniu z betonem zwykłym.

Do tej grupy zalicza się m.in.:

- **beton wysokowartościowy (HPC)**, który charakteryzuje się dużą wytrzymałością i trwałością w porównaniu z betonem zwykłym; wykonuje się go zwykle przy użyciu niewielkiego stosunku wody do cementu i bardzo dobrej jakości kruszyw;

- **beton samozagęszczalny (SCC)**, który może zagęszczać się pod swoim ciężarem bez potrzeby używania zewnętrznej wibracji; produkowany jest przy użyciu kombinacji kruszyw o bardzo dobrej jakości oraz superplastyfikatorów i środków modyfikujących lepkość;

- **beton wzmocniony włóknami (FRC)**, w swoim składzie zawiera dodatkowo włókna (np. stalowe, szklane lub syntetyczne), które poprawiają jego właściwości mechaniczne, a przede wszystkim wytrzymałość na rozciąganie oraz odporność na oddziaływanie dynamiczne;

- **geopolimerobeton**, wykonywany przy użyciu popiołu lotnego lub innych odpadów przemysłowych jako częściowego zamiennika cementu, charakteryzujący się mniejszą emisją dwutlenku węgla niż tradycyjny beton, a także może wykazywać lepsze właściwości mechaniczne.

Wraz z coraz powszechniejszym zastosowaniem wymienionych betonów konieczne jest określenie i monito-

rowanie ich śladu węglowego, który ze względu na skład przedmiotowych mieszanek może się znacznie różnić w porównaniu z betonem zwykłym. Należy podkreślić, że przed nowoczesnym budownictwem stawia się coraz więcej wymagań dotyczących zastosowania właściwych materiałów budowlanych [1, 2], ograniczenia zużycia energii podczas budowy i eksploatacji obiektów [3, 4], a przede wszystkim możliwie minimalnego oddziaływania na środowisko [5, 6].

Problematyka śladu węglowego jest obecnie niezwykle istotna, nie tylko ze względu na aspekt środowiskowy, ale również ze względu na szybko zachodzące zmiany legislacyjne [7, 8]. Ponadto, informacje na temat śladu węglowego są coraz częściej wykorzystywane w działalności marketingowej przedsiębiorstw, np. do wykazywania m.in. przewagi konkurencyjnej pod względem oddziaływania na środowisko [9]. Wśród najważniejszych dokumentów prawnych dotyczących śladu węglowego znajdują się Europejski Zielony Ład [10] oraz pakiet FIT for 55 [11]. Wymienione aspekty prawne, środowiskowe oraz trendy społeczne wpływają na coraz większe zainteresowanie i potrzebę redukcji emisji gazów cieplarnianych. W przypadku materiałów nowej generacji celowe jest więc sprawdzenie, czy ich wykorzystanie nie spowoduje negatywnego lub zwiększonego oddziaływania na środowisko w porównaniu z materiałami tradycyjnymi.

Biorąc pod uwagę przytoczone argumenty ukazujące konieczność określania i monitorowania śladu węglowego w budownictwie oraz fakt, że beton jest jednym z kluczowych materiałów budowlanych, w artykule przeprowadzono analizę

¹⁾ AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, walach@agh.edu.pl

ślądu węglowego czterech mieszanek betonowych, które ze względu na ich skład wpisują się w definicję betonów nowej generacji. Uzyskane wyniki odniesiono do śładu węglowego betonu zwykłego.

Materiały i metody badań

Analizie poddano etap produkcji mieszanki betonowej, tzn. pozyskiwanie surowców (moduł A1), transport składników (moduł A2) oraz wytwarzanie mieszanki betonowej (moduł A3). Zakres modułów określono wg PN-EN 15643:2021 [12]. Jako jednostkę funkcjonalną ustalono 1 m³ mieszanki betonowej. Skład analizowanych mieszanek przyjęto na podstawie danych literaturowych. W analizie wykorzystano deklaracje EPD (*Environmental Product Declarations*) poszczególnych składników. Dane pochodziły z kategorii wpływu GWP (*Global Warming Potential*), zawartej w deklaracjach środowiskowych poszczególnych produktów. Z powodu braku dostępnych informacji dotyczących kruszywa bazaltowego, wartości GWP przyjęto analogicznie jak w przypadku kruszywa granitowego ze względu na zbliżoną technologię jego pozyskiwania.

Całkowitą wartość emisji gazów cieplarnianych danej mieszanki określono jako sumę iloczynów wartości śładu węglowego i masy poszczególnych jej składników, natomiast emisję dotyczącą transportu określono w przypadku klasy silników spełniających wymagania normy EURO V, zakładając transport na maksymalną odległość 100 km. Ze względu na mały udział w mieszance domieszek i dodatków pominięto emisję związaną z transportem tych materiałów. Analizie poddano następujące betony (mieszanki betonowe):

- zwykły na bazie CEM I – NSC wg [13];
- samozagęszczalny na bazie CEM III – SCC [13];
- wysokowartościowy na bazie CEM II – HPC wg [13];
- fibrobeton z włóknami stalowymi na bazie CEM I – FRC 1 [14];
- fibrobeton z włóknami szklanymi na bazie CEM I – FRC 2 [15].

W tabeli 1 przedstawiono skład poszczególnych mieszanek betonowych i wartości GWP poszczególnych ich składników oraz średnią wytrzymałość betonów na ściskanie po 28 dniach.

Należy podkreślić, że ślad węglowy poza emisją dwutlenku węgla obejmuje również inne gazy cieplarniane, m.in. metan CH₄ oraz podtlenek azotu N₂O (pełną listę gazów cieplarnianych można znaleźć m.in. w raporcie IPCC [21]). W związku z tym wielkość śładu węglowego wyrażana jest jako ekwiwalent dwutlenku węgla na jednostkę funkcjonalną produktu (CO₂e/jedn. funkcjonalna) [22]. Umożliwia to sprowadzenie wszystkich oddziaływań związanych z globalnym ociepleniem do jednej skali, a tym samym porównywanie uzyskanych wyników [23]. Wartość CO₂e otrzymano więc przez przemnożenie masy i wskaźnika potencjału tworzenia efektu cieplarnianego – GWP poszczególnych gazów (tabela 2), a następnie ich zsumowanie.

Wielkość emisji gazów cieplarnianych z 1 m³ mieszanki betonowej, określoną metodą uproszczoną (sumarycznie dla modułów A1-A3 wg PN-EN 15643:2021), przedstawiono na ry-

sunku 1. Analiza uzyskanych wyników wskazuje, że **największą emisyjnością gazów cieplarnianych cechowała się mieszanka FRC 2 (z włóknami szklanymi)**. Jest to spowodowane bardzo dużą ilością cementu CEM I w tej mieszance, któ-

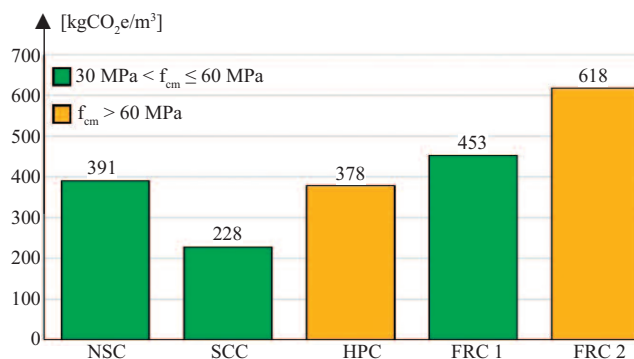
Tabela 1. Składy mieszanek betonowych poddanych analizie
Table 1. Concrete mix compositions used in the analysis

Składniki	GWP			Skład mieszanki betonowej [kg/m ³]					
	[kgCO ₂ e/kg]	źródło danych		NSC	SCC	HPC	FRC1	FRC 2	
Cement	CEM I	0,8890	[16]	380	–	–	330	616	
	CEM II	0,7040		–	–	455	–	–	
	CEM III	0,4820		–	370	–	–	–	
Kruszywo	piasek 0 – 2 mm	0,0031	[13]	580	700	668	–	1355	
	kruszywo drobne max. 4,75 mm	0,0031		–	–	–	790	–	
	kruszywo żwirowe 2 – 8 mm	0,0031		400	468	–	–	–	
	kruszywo żwirowe 8 – 16 mm / max. 20 mm	0,0031		860	468	–	–	–	
	kruszywo wapienne	0,0630		[16]	–	–	–	1069	–
	kruszywo bazaltowe 2 – 8 mm	0,0064		[17]	–	–	1240	–	–
Woda		0,0006	[13]	190	170	160	180	254	
Dodatki i domieszki	pył krzemionkowy	0,0039	[13]	–	–	45	–	53,6	
	popiół lotny	0,0020	[16]	–	180	–	–	–	
	włókna stalowe	1,2800	[18]	–	–	–	39	–	
	włókna szklane	1,4400	[19]	–	–	–	–	13,5	
superplastyfikator	1,5300	[20]	3,8	2,59	4,05	1,16	3,84		
Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]				41,2	42	91,1	37	83	

Tabela 2. GWP najczęściej uwzględnianych gazów cieplarnianych w analizie śładu węglowego wg [21]

Table 2. GWPs of the most commonly considered greenhouse gases in the footprint analysis according to [21]

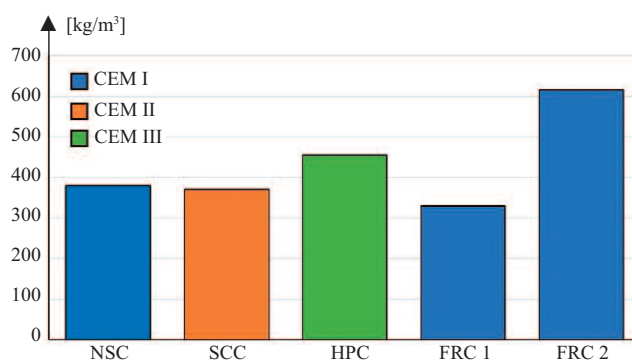
Gaz cieplarniany	GWP ₁₀₀
Dwutlenek węgla – CO ₂	1
Metan pochodzenia kopalnego – CH ₄	29,8
Metan pochodzenia niekopalnego – CH ₄	27,2
Podtlenek azotu – N ₂ O	273



Rys. 1. Ślad węglowy w przypadku modułu A1-A3 w przeliczeniu na 1 m³ mieszanki betonowej

Fig. 1. Carbon footprint for phase A1-A3 per 1 m³ of concrete mix

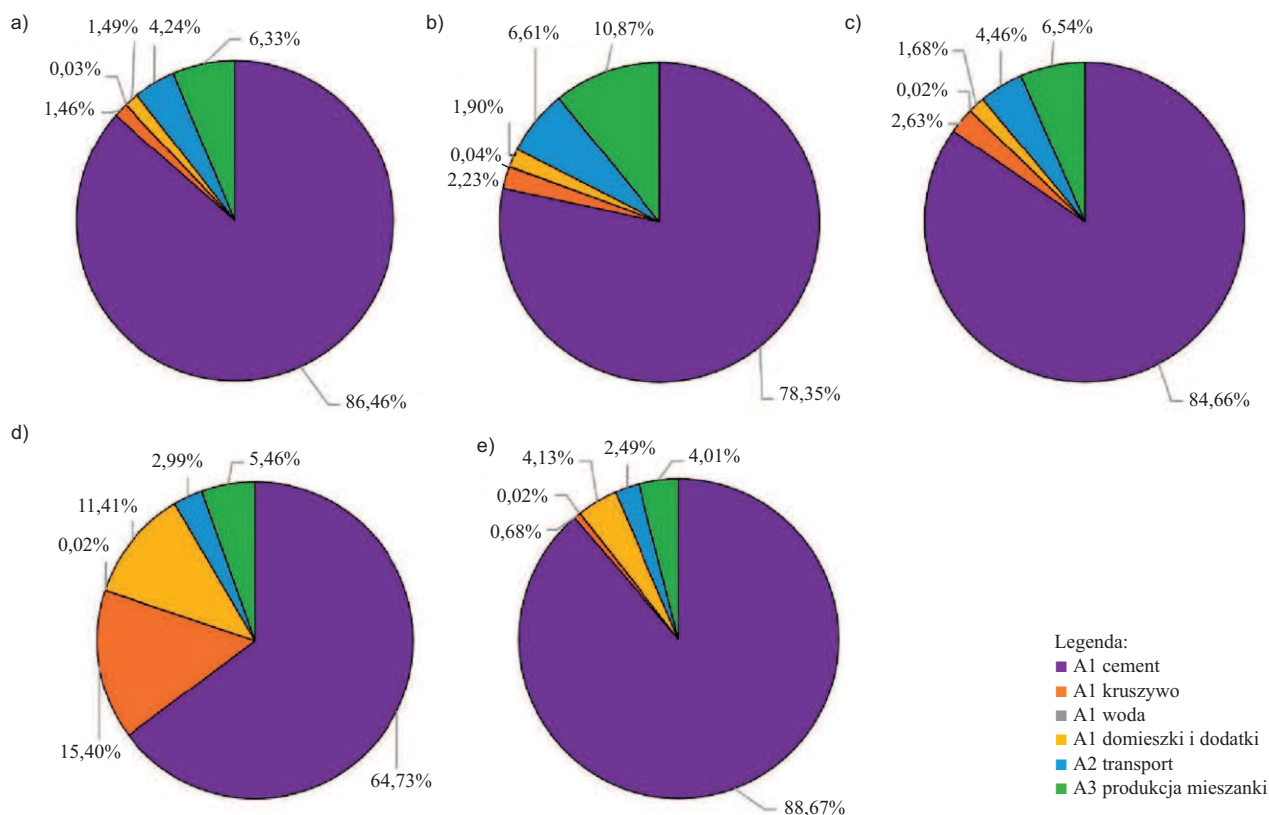
ry w porównaniu z CEM III generuje niemal dwukrotnie więcej CO₂e na jednostkę funkcjonalną. Istotny wpływ rodzaju cementu został potwierdzony w mieszance SCC (mieszanka na bazie CEM III), która emituje najmniej gazów cieplarnianych. Można zatem stwierdzić, że największy wpływ na wielkość śladu węglowego analizowanych mieszanek miał przede wszystkim rodzaj i ilość cementu, przy czym **w pierwszej kolejności o wielkości emisji decyduje rodzaj cementu, a następnie jego ilość**. Porównanie zawartości różnego rodzaju cementu w poszczególnych mieszankach przedstawiono na rysunku 2. Nie zaobserwowano zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie betonu a wartością śladu węglowego, co pokazuje rysunek 1 i porównanie ana-



Rys. 2. Porównanie zawartości cementu w 1 m³ mieszanki betonowej
Fig. 2. Comparison of cement content in 1 m³ of concrete mix

lizowanych cech mieszanki HPC z pozostałymi mieszankami, w przypadku których uzyskano betony o wytrzymałości na ściskanie do 60 MPa. Wynika to z faktu, że na wytrzymałość betonu wpływa wiele czynników, m.in. uziarnienie, ilość i jakość kruszywa oraz stosunek w/c, co potwierdzają również dotychczasowe badania [5]. Betony o dużej wytrzymałości, mimo zazwyczaj większej ilości cementu w porównaniu z betonami zwykłymi, mogą więc cechować się mniejszą emisyjnością CO₂e, o ile mieszanki tych betonów będą bazowały na cementach o zmniejszonym udziale klinkieru portlandzkiego.

Na rysunku 3 przedstawiono porównanie procentowego udziału śladu węglowego poszczególnych grup składników (moduł A1) oraz transportu i produkcji mieszanki (moduł A2-A3) w całkowitej jego wielkości w odniesieniu do analizowanych mieszanek betonowych. Uzyskane wyniki potwierdzają wcześniej opisane wnioski odnoszące się do wpływu ilości i rodzaju cementu na wartość końcową CO₂e rozważanych mieszanek. Udział w emisji gazów cieplarnianych wynikający z ilości zastosowanego cementu wyniósł średnio 80%. We wszystkich mieszankach, oprócz FRC 1, wpływ składników innych niż cement na wartość CO₂e można uznać za niewielki lub pomijalny, co wynika przede wszystkim z ich niewielkiej ilości. Należy zauważyć, że mieszanka FRC 1 cechowała się najmniejszą ilością cementu oraz udziałem włókien stalowych. W związku z tym w FRC 1 udział procentowy śladu węglowego pochodzącego

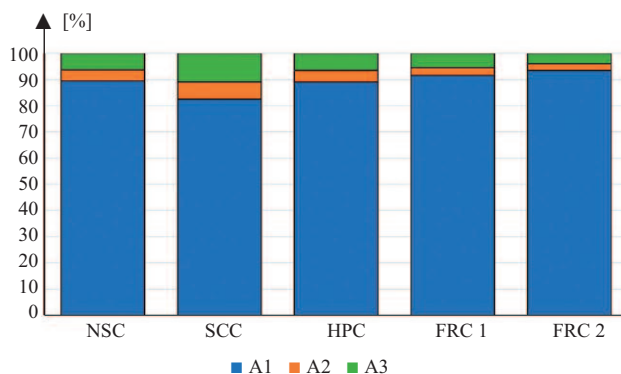


Rys. 3. Procentowy udział składników mieszanki betonowej oraz fazy A2 i A3 w wartości śladu węglowego: a) mieszanka NSC; b) mieszanka SCC; c) mieszanka HPC; d) mieszanka FRC 1; e) mieszanka FRC 2

Fig. 3. Percentage contribution of concrete mix components as well as A2 and A3 phases in the carbon footprint value: a) concrete mix NSC; b) concrete mix SCC; c) concrete mix HPC; d) concrete mix FRC 1; e) concrete mix FRC 2

od cementu był, w porównaniu z innymi mieszankami, najmniejszy – 64,73%, a od kruszywa i włókien stalowych wyniósł odpowiednio 15,40% i 11,41%.

Na rysunku 4 przedstawiono porównanie procentowego udziału śladu węglowego w poszczególnych modułach: pozyskiwanie surowców (moduł A1); transport składników (moduł A2) oraz wytwarzanie mieszanki betonowej (moduł A3) [12].



Rys. 4. Procentowy udział śladu węglowego w poszczególnych modułach: pozyskiwanie surowców (moduł A1), transport składników (moduł A2) oraz wytwarzanie mieszanki betonowej (moduł A3)

Fig. 4. Percentage of carbon footprint by module: raw material procurement (module A1), ingredient transportation (module A2) and concrete mix production (module A3)

Wnioski

Mimo ciągłego rozwoju metod obliczania śladu węglowego wciąż widoczny jest brak jednolitego podejścia oraz mała dostępność baz danych dotyczących emisji gazów cieplarnianych w produkcji materiałów budowlanych. Analiza pięciu różnych mieszanek betonowych pod kątem ich śladu węglowego wskazała, że największy wpływ na jego wielkość ma skład mieszanki betonowej (moduł A1), w tym przede wszystkim rodzaj i ilość cementu. Zastosowanie cementów o małej zawartości klinkieru portlandzkiego istotnie zmniejsza końcową ilość CO₂e betonu.

Prawidłowo przeprowadzona inwentaryzacja emisji CO₂e umożliwia identyfikację jej głównych źródeł oraz obszarów priorytetowych, wymagających podjęcia działań w celu zmniejszenia emisyjności przy produkcji betonu. Z tej perspektywy przedstawiona analiza może być pomocna w odpowiedzialnym kształtowaniu i zarządzaniu środowiskowym nie tylko w produkcji betonu i cementu, ale i innych materiałów z betonu. Ponadto wskazuje na konieczność poszukiwania innych materiałów wiążących niż cement lub też niskoemisyjnych źródeł energii wykorzystywanych przy produkcji klinkieru portlandzkiego oraz mieszanki betonowej.

Literatura

[1] Spišáková M, Mésároš P, Mandičák T. Construction waste audit in the framework of sustainable waste management in construction projects – case study. *Buildings*. 2021. DOI: 10.3390/buildings11020061.

[2] Jaskowska-Lemanska J. Impurities of recycled concrete aggregate-types, origin and influence on the concrete strength parameters. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/603/4/042056.

[3] Sztubecka M, Skiba M, Mrówczyńska M, Bazan-Krzywoszanska A. An innovative decision support system to improve the energy efficiency of buildings in urban areas. *Remote Sens.* 2020. DOI: 10.3390/rs12020259.

[4] Skiba M et al. Probability estimation of the city's energy efficiency improvement as a result of using the phase change materials in heating networks. *Energy*. 2021. DOI:10.1016/j.energy.2021.120549.

[5] Wałach D. Analysis of factors affecting the environmental impact of concrete structures. *Sustainability*. 2021. DOI: 10.3390/su13010204.

[6] Zima K, Przesmycka A. Koncepcja zintegrowanej analizy kosztów i generowanego śladu węglowego w cyklu życia budynku. *Przegląd Budowlany*. 2021; 10: 42 – 48.

[7] Sizirici B, Fseha Y, Cho CS, Yildiz I, Byon YJ. A review of carbon footprint reduction in construction industry, from design to operation. *Materials (Basel)*. 2021. DOI: 10.3390/ma14206094.

[8] Mathur VS, Farouq MM, Labaran YH. The carbon footprint of construction industry: A review of direct and indirect emission. *J. Sustain. Constr. Mater. Technol.* 2021. DOI: 10.29187/jscmt.2021.66.

[9] Garbacz A, Urbańska P. Ślad węglowy betonu. *BTA*. 2021; 4: 56 – 61.

[10] European Commission. The European Green Deal. *Eur. Comm.* 2019. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004.

[11] European Commission. Fit for 55: Delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality. COM (2021) 550 Final, p. 15, 2021, [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550>.

[12] Polski Komitet Normalizacyjny, PN-EN 15643:2021 Zrównoważenie obiektów budowlanych. Struktura oceny budynków i obiektów inżynierskich. 2023.

[13] Wałach D. Economic and environmental assessment of new generation concretes. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020. DOI: 10.1088/1757899X/960/4/042013.

[14] Ali B, Yilmaz E, Sohail Jameel M, Haroon W, Alyousef R. Consolidated effect of fiber-reinforcement and concrete strength class on mechanical performance, economy and footprint of concrete for pavement use. *J. King Saud Univ. – Eng. Sci.* 2021. DOI: 10.1016/j.jksues.2021.09.005.

[15] Lee M, Mata-Falcón J, Kaufmann W. Influence of short glass fibres and spatial features on the mechanical behaviour of weft-knitted textile reinforced concrete elements in bending. *Constr. Build. Mater.* 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128167.

[16] Instytut Techniki Budowlanej ITB. Environmental Product Declaration Type III ITB No. 116/2020 Cements CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V produced in Poland. 2020. no. June, pp. 1 – 8, 2020, [Online]. Available: <https://www.itb.pl/epd.html>.

[17] BRE Global. BREG EN EPD No.: 000206 Environmental Product Declaration Granite Aggregate – Bardon Hill. 2017. vol. 44, no. 01, [Online]. Available: <https://www.greenbooklive.com/index.jsp>.

[18] Instytut Techniki Budowlanej ITB. Environmental Product Declaration Type III ITB No. 064/2017 Steel fibres for concrete reinforcement. 2017, no. 064, 2017, [Online]. Available: <https://www.itb.pl/epd.html>.

[19] Hill C, and Norton A. LCA database of environmental impact to inform material selection process. 2018; no. 761072, p. 24.

[20] Federation DE, Associations CA. EPD – Environmental Product Declaration. 2022.

[21] Forster P et al. The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2021.

[22] Łasut P, Kulczycka J. Methods and programs for calculating Carbon Footprint. *Zesz. Nauk. IGSMiE PAN*. 2014; 87 (87): 137 – 147.

[23] Kijewska A, Bluszcz A. Carbon footprint levels analysis for the world and for the EU countries. *Syst. Wspomagania Inż. Prod.* 2017; vol. 6, no. 2: 167 – 177.

Przyjęto do druku: 04.05.2023 r.