

dr inż. Ewa Sylwia Kamińska¹⁾

ORCID: 0000-0002-4547-8775

Sustainable transport infrastructure: LCA methods, environmental indicators and legal regulations

Zrównoważone budownictwo komunikacyjne: metody LCA, wskaźniki środowiskowe i regulacje prawne

DOI: 10.15199/33.2025.10.09

Abstract. The article discusses the importance of environmental analyses in the context of road construction, taking into account the individual stages of the investment life cycle and the impact of the use of waste materials on the reduction of greenhouse gas emissions and other environmental indicators. Attention was drawn to the application of the principles of waste hierarchy and circular economy. A course of action is proposed to promote the use of life cycle assessments in the field of road construction.

Keywords: carbon and environmental footprint; GWP; PAS construction waste; recycling; road infrastructure; life cycle.

Streszczenie. W artykule omówiono znaczenie analiz środowiskowych w kontekście budownictwa drogowego, z uwzględnieniem poszczególnych etapów cyklu życia inwestycji oraz wpływu wykorzystania materiałów odpadowych na redukcję emisji gazów cieplarnianych oraz innych wskaźników środowiskowych. Zwrócono uwagę na stosowanie zasad hierarchii postępowania z odpadami oraz gospodarki o obiegu zamkniętym. Zaproponowano kierunek działań pozwalający na upowszechnienie analiz ekobilansowych w obszarze inwestycji drogowych.

Słowa kluczowe: ślad węglowy i środowiskowy; GWP; PAS odpady budowlane; recykling; infrastruktura drogowa; cykl życia.

Waste management in the EU is regulated, among others, by Directive 2008/98/EC, amended by Decision 2014/955/EU [1] and the Waste Catalogue Regulation (2020) [2]. Construction and demolition waste (CDW) is classified in group 17 of the waste catalogue, which includes materials generated during the construction, renovation, and demolition of residential, industrial, and infrastructure facilities [3]. In the Polish Waste Act (2012) [4], it is defined as materials generated during construction works (construction, reconstruction, renovation, demolition), in accordance with the definitions of the Construction Law [5]. At the national level, the directions of action are set out in the National Waste Management Plan 2028 (KPGO), adopted in 2023 [6]. According to the KPGO, between 2014 and 2018, 18 – 23.7 million Mg of waste from group 17 was generated, and by 2028, this figure is projected to increase to approximately 26 – 31 million Mg [6]. At the EU level, the first comprehensive document on the circular economy was the CEAP1 Action Plan (2015) [7]. In 2018, the Circular Economy Monitoring Framework (CEF) was adopted, updated in 2023 with new indicators: material footprint, resource productivity, and consumption footprint [8–9]. The next plan – CEAP2 (2020) – was incorporated into the European Green Deal. It identified the construction sector as key, as it accounts for more than 1/3 of EU waste, emphasising the importance of selective demolition, recycling, material passports, and the reuse of secondary raw materials [10 – 11].

W UE gospodarka odpadami regulowana jest m.in. przez Dyrektywę 2008/98/WE, zmienioną Decyzją 2014/955/UE [1] oraz Rozporządzenie w sprawie katalogu odpadów (2020) [2]. Odpady budowlane i rozbiórkowe (CDW) są klasyfikowane w grupie 17 katalogu odpadów, obejmującej materiały powstające podczas budowy, remontów i rozbiórek obiektów mieszkalnych, przemysłowych i infrastrukturalnych [3]. W polskiej ustawie o odpadach (2012) [4] zdefiniowano je jako materiały powstałe przy robotach budowlanych (budowa, przebudowa, remont, rozbiórka), zgodnie z definicjami prawa budowlanego [5]. Na poziomie krajowym kierunki działań określa Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2028 (KPGO), przyjęty w 2023 r. [6]. Zgodnie z KPGO, w latach 2014 – 2018 wytworzono 18 – 23,7 mln Mg odpadów z grupy 17, a do 2028 r. prognozuje się ich wzrost do ok. 26 – 31 mln Mg [6]. Na szczeblu unijnym pierwszym całościowym dokumentem dotyczącym gospodarki o obiegu zamkniętym był Plan Działań CEAP1 (2015) [7]. W 2018 r. przyjęto Ramy Monitorowania Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (GOZ), zaktualizowane w 2023 r. o nowe wskaźniki: ślad materiałowy, produktywność zasobów i ślad konsumpcyjny [8 – 9]. Kolejny plan – CEAP2 (2020) – został włączony w Europejski Zielony Ład. Wskazano w nim sektor budowlany jako kluczowy, gdyż odpowiada za ponad 1/3 odpadów UE, podkreślając znaczenie selektywnej rozbiórki, recyklingu, paszportów materiałowych i ponownego użycia surowców wtórnych [10 – 11].

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów; ewa.kaminska@ibdim.edu.pl

Construction and demolition waste

In EU countries, construction and demolition waste accounted for approximately 35% of the total waste mass in 2018, including waste from construction, demolition, and infrastructure maintenance. According to the waste management hierarchy, waste should first be prevented, then prepared for reuse, recycling, and other forms of recovery, and only then disposed of. Waste should be directed to reuse as much as possible [1]. In Poland, these principles are regulated by the Waste Act (Article 101a), which requires CDW to be segregated into at least six material groups to enable recycling or recovery [4]. In practice, technologies are used to crush, sort, and clean asphalt, concrete, and reinforcing steel, keeping records in the BDO system and marking waste in KPO cards [12]. Asphalt waste from milling is not waste if the machine simultaneously mills and lays the surface [12]. If it is considered waste, it has the catalogue code 17 03 02 or 17 03 01* for hazardous waste [2].

Selected methods for estimating the environmental impact of a facility, service, or process

A method such as LCA allows the benefits of using recycled asphalt on site to be assessed, including reduced CO₂ emissions during transport and production of new materials, and a reduction in the overall carbon footprint of road surfaces [13]. In 2023, the construction industry accounted for 14% of greenhouse gas emissions [14]. The emission structure is dominated by CO₂ (49%) and N₂O (32%) [15]. Although CO₂ has the largest share, other greenhouse gases, such as CH₄, capture heat more effectively than CO₂. It is more than 80 times stronger than CO₂ over the last 20 years [14]. Global warming potential (GWP) determines the strength of the impact of individual gases on the greenhouse effect, with the impact of CO₂ taken as a reference point (GWP = 1 per 100 years) [15]. The environmental footprint (EF) is a broader concept than the carbon footprint (CF), covering, among other things, water consumption, resource consumption, and impact on biodiversity [16 – 18]. EF methods include the product environmental footprint (PEF) and the organisational environmental footprint (OEF) and enable a comprehensive assessment of the life cycle of a product or organisation [17]. In the context of the circular economy and climate neutrality, CF and EF analyses of all projects that may have an impact on the environment, including those related to the life cycle of road infrastructure, are becoming increasingly important. CF is calculated as the weighted sum of the environmental footprint results of all categories of environmental impact in accordance with the Kyoto Protocol [19], and their GWP values are specified in the 6th IPCC report [20]. The calculation rules are described in the EC Recommendation (2013, 2021) [21 – 22]. The systematic use of life cycle assessment (LCA) enables the quantitative determination of the global warming potential of road pavements, taking into account the impact of waste reuse on CO₂ emission reduction throughout the life cycle of materials and structures [23]. The

Odpady budowlane i rozbiórkowe

W państwach UE odpady budowlane i rozbiórkowe stanowiły w 2018 r. ok. 35% ogólnej masy odpadów, obejmując odpady z budowy, rozbiórki, utrzymania infrastruktury. Zgodnie z hierarchią postępowania z odpadami najpierw należy zapobiegać ich powstawaniu, następnie przygotować do ponownego użycia, recyklingu i innych form odzysku, a dopiero na końcu unieszkodliwiać. Odpady powinny być maksymalnie kierowane do ponownego wykorzystania [1]. W Polsce zasady te reguluje Ustawa o odpadach (art. 101a), wymagająca segregowania CDW na co najmniej 6 grup materiałowych w celu umożliwienia ich recyklingu lub odzysku [4]. W praktyce stosuje się technologie rozdrabniania, sortowania i oczyszczania destruktu asfaltowego, betonu i stali zbrojeniowej, prowadząc ewidencję w systemie BDO i oznaczając odpady w kartach KPO [12]. Destrukt asfaltowy z frezowania nie jest odpadem, jeśli urządzenie jednocześnie frezuje i układa nawierzchnię [12]. W przypadku uznania go za odpad ma kod katalogowy 17 03 02 lub 17 03 01* dotyczący odpadów niebezpiecznych [2].

Wybrane metody szacowania wpływu obiektu, usługi, procesu na środowisko

Metoda taka jak LCA pozwala ocenić korzyści wynikające z wykorzystania asfaltu odzyskanego na miejscu budowy, w tym redukcję emisji CO₂ podczas transportu i produkcji nowych materiałów oraz zmniejszenie całkowitego śladu węglowego nawierzchni drogowej [13]. W 2023 r. udział budownictwa w emisjach gazów cieplarnianych wyniósł 14% [14]. W strukturze emisji dominuje CO₂ (49%) i N₂O (32%) [15]. Mimo że CO₂ ma największy udział, to inne gazy cieplarniane, np. CH₄, wychwytyują ciepło efektywniej niż CO₂. Jest on ponad 80 razy silniejszy niż CO₂ w ciągu ostatnich 20 lat [14]. Potencjał globalnego ocieplenia (GWP) określa siłę oddziaływania poszczególnych gazów na efekt cieplarniany, przy czym wpływ CO₂ przyjęto jako punkt odniesienia (GWP = 1 na 100 lat) [15]. Ślad środowiskowy (EF) jest pojęciem szerszym od śladu węglowego (CF), obejmującym m.in. zużycie wody, zasobów oraz wpływ na bioróżnorodność [16 – 18]. Metody EF obejmują ślad środowiskowy produktu (PEF) i ślad środowiskowy organizacji (OEF) i umożliwiają kompleksową ocenę cyklu życia produktu lub organizacji [17]. W kontekście GOZ i neutralności klimatycznej coraz większe znaczenie zyskują analizy CF i EF wszelkich przedsięwzięć mogących mieć wpływ na środowisko, w tym te związane z cyklem życia infrastruktury drogowej. CF oblicza się jako sumę ważoną wyników śladu środowiskowego wszystkich kategorii oddziaływania na środowisko zgodnie z Protokołem z Kioto [19], a ich wskaźniki GWP określono w 6. raporcie IPCC [20]. Zasady obliczeń opisano w Zaleceniu KE (2013, 2021) [21 – 22]. Systematyczne stosowanie oceny cyklu życia (LCA) umożliwia ilościowe określenie potencjału globalnego ocieplenia nawierzchni drogowych, uwzględniając wpływ ponownego wykorzystania odpadów na redukcję emisji CO₂ w całym cyklu życia materiałów i konstrukcji [23]. Podstawową metodologią oceny wpływu na środowisko jest analiza cyklu życia (LCA), obejmująca wszystkie etapy – od wydobycia surow-

basic methodology for assessing environmental impact is life cycle assessment (LCA), covering all stages from raw material extraction to disposal [24]. Standards BS EN 15804 (EPD for construction products) [25], PAS 2050:2011 (carbon footprint of products) [26–28], PAS 2080:2023 (emissions management in infrastructure) [29–30], ISO 14067 (carbon footprint of products) [31–32] and BS EN 15978 (environmental assessment of buildings and infrastructure) [33], together with the GHG Protocol [34], form a coherent system enabling comparable ecological assessment. They fit into the framework of the European Green Deal and the EU taxonomy, supporting green financing and public procurement [27–34].

Life cycle assessments in the context of road construction

The basis for calculating the environmental footprint of a product (PEF) and the ecological footprint of an organisation (OEF), as well as life cycle assessment (LCA), is a holistic approach and decision-making framework, enabling comprehensive assessment and management of the environmental impact of products and organisations. In this way, companies and organisations can better understand the ecological impact of their activities, reduce it, and use the results of the analyses to inform consumers about the sustainability of their products or organisations [35]. In the context of road construction, the principles of LCA analysis covering the entire life cycle of road surfaces and various environmental aspects are described in [36]. LCA is a standardised method (according to ISO 14040 and ISO 14044) for assessing the ecological impact of a given product, process, or system throughout its life cycle – from raw material extraction, through production and use, to disposal or recycling. The environmental impact of road construction. The design and preparation stage includes energy consumption for geotechnical analyses, BIM modelling, and logistics in the context of planning the transport of materials, equipment, and work schedules – still at the design stage, to optimise future construction stages (e. g., minimise transport distances, the amount of equipment required, the order of deliveries). Emissions at this stage are usually very low and mainly relate to electricity consumption (use of computer applications for design and process optimisation). They do not directly affect BIM, but LCA results can inform designers and planners about potential areas where emissions can be reduced in subsequent stages of construction and operation (e. g., selection of materials closer to the construction site, optimised transport) [37]. The complexity and versatility of life cycle assessment methods are evidenced by their increasingly frequent use by many stakeholders involved in the design, construction, use, and maintenance of road infrastructure. An analysis of this issue in the case of road surfaces was undertaken by Koh et al. [38].

In LCA analyses of road investments, numerous studies have been conducted on their environmental impact: material production [38, 39, 44], transport [38, 40–42, 44], construction [38, 41–44], use [38, 39, 42, 45], maintenance and decommissioning [38, 41, 45, 46]. At the design stage, emissions are associated with, among other things, planning

ców po likwidację [24]. Normy BS EN 15804 (EPD dla wyrobów budowlanych) [25], PAS 2050:2011 (ślad węglowy produktów) [26–28], PAS 2080:2023 (zarządzanie emisjami w infrastrukturze) [29–30], ISO 14067 (ślad węglowy produktów) [31–32] oraz BS EN 15978 (ocena środowiskowa budynków i infrastruktury) [33], wraz z Protokołem GHG [34], tworzą spójny system umożliwiający porównywalną ocenę środowiskową. Wpisują się one w ramy Europejskiego Zielonego Ładu i taksonomii UE, wspierając zielone finansowanie i zamówienia publiczne [27–34].

Analizy ekobilansowe w kontekście budownictwa drogowego

Podstawą metody obliczania śladu środowiskowego produktu (PEF) i śladu środowiskowego organizacji (OEF) oraz oceny cyklu życia (LCA) są holistyczne podejście i ramy podejmowania decyzji, umożliwiające kompleksową ocenę i zarządzanie wpływem produktów i organizacji na środowisko. W ten sposób przedsiębiorstwa, organizacje mogą lepiej zrozumieć wpływ realizowanych działań na środowisko, zmniejszyć jego poziom oraz wykorzystać wyniki otrzymanych analiz do informowania konsumentów o zrównoważonym rozwoju swoich produktów lub organizacji [35]. W kontekście budownictwa drogowego, zasady analizy LCA obejmujące cały cykl życia nawierzchni i różne aspekty środowiskowe opisano w pracy [36]. LCA to znormalizowana metoda (wg ISO 14040 i ISO 14044) oceny wpływu danego produktu, procesu lub systemu na środowisko w całym jego cyklu życia – od pozyskania surowców, przez produkcję, użytkowanie, aż po etap unieszkodliwiania lub recyklingu. Wpływ inwestycji drogowej na etapie projektowania i przygotowywania jej do realizacji obejmuje zużycie energii do analiz geotechnicznych, modelowania BIM i logistykę, w kontekście planowania transportu materiałów, sprzętu i harmonogramów prac – jeszcze w fazie projektowania, aby zoptymalizować przyszłe etapy budowy (np. minimalizować odległości transportu, ilość potrzebnego sprzętu, kolejność dostaw). Emisje na tym etapie są zazwyczaj bardzo niewielkie i dotyczą głównie zużycia energii elektrycznej (wykorzystanie aplikacji komputerowych do projektowania i optymalizacji procesów). Nie wpływają bezpośrednio na BIM, ale wyniki LCA mogą informować projektantów i planistów o potencjalnych obszarach, gdzie można zredukować emisje w kolejnych etapach budowy i eksploatacji (np. wybór materiałów bliżej placu budowy, zoptymalizowane transporty) [37]. O kompleksowości i wszechstronności metod ekobilansowych, świadczy ich coraz częstsze wykorzystywanie przez wielu interesariuszy związanych z projektowaniem, budową, użytkowaniem, czy konserwacją infrastruktury drogowej. Analizę tego zagadnienia w przypadku nawierzchni drogowych podjął Koh i in. [38].

W analizach LCA inwestycji drogowych przeprowadzono wiele badań dotyczących ich wpływu na środowisko: produkcji materiałów [38, 39, 44], transportu [38, 40–42, 44], budowy [38, 41–44], użytkowania [38, 39, 42, 45], konserwacji, etapu likwidacji [38, 41, 45, 46]. Na etapie projekto-

and soil testing. The energy consumed in the preparation of documentation and geotechnical work may account for several per cent of the total carbon footprint of the project [47]. The reuse of waste materials in road infrastructure brings environmental benefits primarily related to the lack of use of primary raw materials, including energy consumption, the use of heavy equipment, and environmental pollution associated with their extraction and transport. For example, the use of steel slag with asphalt rubble reduces GWP by 23% [48]. In turn, the use of PET and artificial aggregates allows for a reduction in GWP by 13 – 14% [49]. The construction stage generates the highest emissions, mainly from the transport of materials to the site and the operation of heavy equipment. The carbon footprint of this stage can account for as much as 30 – 50% of the total emissions of the investment [50]. The production and incorporation of 1 tonne of asphalt generates over 50 kg CO₂e [41]. The use of asphalt rubble can reduce emissions by 20 – 40% and reduce the consumption of natural aggregates [51]. Recycling is not the only important element of sustainable road construction. The use of materials with reduced CO₂ emissions is equally important. For example, cement (the basic component of concrete) accounts for 7 – 8% of global CO₂ emissions. The production of one tonne of clinker generates 700 – 800 kg CO₂e/t, which is why reducing its use in cement is one of the most important steps in lowering the carbon footprint of cement [52].

In the study described in [53], it was estimated that during the construction of a 3 km cycle path, construction machinery generated 75.5 tonnes of CO₂, 56% of which came from transport. During the operational phase, emissions are associated with maintenance and upkeep. Bituminous overlays account for as much as 15 – 25% of total life cycle emissions [53]. Digital road management systems (e.g., IoT) can also reduce operational emissions, i.e., greenhouse gas emissions generated during the organisation's day-to-day activities, both directly and indirectly through the purchase of energy, by 10 – 15% [34, 55]. During demolition and recycling, milling and reusing asphalt debris can reduce emissions by over 30% [56]. The use of other waste materials (slag, ash, PET) further reduces eutrophication and resource consumption [49]. The study [57] examined the possibility of replacing natural aggregates (sand and gravel) with recycled aggregates (RA) from construction and demolition waste. It was demonstrated that RA can be used up to 50% of the mixture weight (cement concrete), obtaining concrete with properties that meet the standards (water absorption < 6%, tensile strength > 3.6 MPa). The use of RA in the production of paving stones further reduces cement consumption, production costs, and environmental impact [57].

In the study [58], CCWRC concrete (made from rubber waste using the compression moulding method, which improves its compaction and mechanical properties compared to concrete with recycled tyre rubber produced traditionally) replaces traditional aggregates with used tyre rubber, enhancing mechanical properties. An LCA study has shown that the carbon footprint (CFP) of CCWRC can be 37–50%

wania emisje są związane m.in. z planowaniem czy badaniami gruntu. Energia zużyta na opracowanie dokumentacji i prace geotechniczne może odpowiadać za kilka procent całkowitego śladu węglowego przedsięwzięcia [47]. Ponowne użycie materiałów odpadowych w infrastrukturze drogowej przynosi korzyści środowiskowe przede wszystkim związane z brakiem wykorzystania surowców pierwotnych, w tym zużycia energii, wykorzystania ciężkiego sprzętu i zanieczyszczenia środowiska związanego z ich wydobyciem i transportem. Przykładowo zastosowanie żużla stalowego z destruktem asfaltowym redukuje GWP o 23% [48]. Z kolei zastosowanie PET i sztucznych kruszyw pozwala na redukcję GWP o 13 – 14% [49]. Etap budowy generuje największą emisję – głównie z transportu materiałów na miejsce realizacji inwestycji i pracy ciężkiego sprzętu. Ślad węglowy tego etapu może stanowić nawet 30 – 50% całkowitych emisji inwestycji [50]. Produkcja i wbudowanie 1 tony asfaltu generuje ponad 50 kg CO₂e [41]. Zastosowanie destruktu asfaltowego pozwala ograniczyć emisję o 20 – 40% i zmniejszyć zużycie kruszyw naturalnych [51]. Nie tylko recykling jest ważnym elementem zrównoważonego budownictwa drogowego. Równie istotne jest wykorzystywanie materiałów charakteryzujących się zmniejszoną emisją CO₂. Przykładowo cement (podstawowy składnik betonu), odpowiada za 7 – 8% światowej emisji CO₂. Wytworzenie tony klinkieru generuje 700 – 800 kg eq CO₂/t, dlatego też jego redukcja w cemencie to jeden z najważniejszych kroków obniżenia śladu węglowego cementu [52].

W badaniu opisanym w [53] oszacowano, że przy budowie 3 km ścieżki rowerowej maszyny budowlane wygenerowały 75,5 t CO₂ – z czego 56% pochodziło z transportu. Na etapie eksploatacji emisja związana jest z konserwacją i utrzymaniem. Nakładki bitumiczne odpowiadają nawet za 15 – 25% całkowitej emisji w cyklu życia [53]. Również cyfrowe systemy zarządzania drogami (np. IoT) mogą ograniczać emisje operacyjne (ang. *operational emissions*), tzn. emisję gazów cieplarnianych powstającą w trakcie bieżącej działalności organizacji – zarówno bezpośrednio, jak i pośrednio przez zakup energii 10 – 15% [34, 55]. Na etapie rozbiórki i recyklingu frezowanie i ponowne użycie destruktu asfaltowego pozwala ograniczyć emisję o ponad 30% [56]. Stosowanie innych materiałów odpadowych (żużle, popioły, PET) dodatkowo zmniejsza eutrofizację i zużycie zasobów [49]. W pracy [57] zbadano możliwość zastąpienia kruszyw naturalnych (piasku i żwiru) kruszywami z recyklingu (RA) pochodzącymi z odpadów budowlanych i rozbiórkowych. Wykazano, że RA można stosować do 50% masy mieszanki (beton cementowy), uzyskując beton o właściwościach spełniających normy (absorpcja wody < 6%, wytrzymałość na rozciąganie > 3,6 MPa). Zastosowanie RA w produkcji kostki brukowej pozwala dodatkowo obniżyć zużycie cementu, koszty produkcji i wpływ na środowisko [57].

W pracy [58] beton CCWRC (z odpadów gumowych, wykonywany metodą odlewania kompresyjnego, co poprawia jej zagęszczenie i właściwości mechaniczne w porównaniu z betonem z dodatkiem gumy z recyklingu opon wytwarzanym tradycyjnie) zastępuje tradycyjne kruszywa zużytą gumą z opon, poprawiając właściwości mechaniczne. Badanie me-

lower than that of traditional concrete and 28% lower than that of concrete with recycled tyre rubber without compression (i.e., traditional rubber concrete produced using the classic method). – 46% lower than that of concrete with recycled tyre rubber without compression (i.e., traditional rubber concrete produced by classic casting/vibration, without an additional pressure compaction stage). The difference in LCA results from the fact that the compression casting method produces more compact and durable concrete, which translates into lower material requirements and a lower carbon footprint per unit of structure. The use of recycled aggregates further reduces the CFP by 28–34% compared to conventional concrete. The results of the study indicate directions for the development of sustainable concrete production and the promotion of CCWRC in construction [58].

The study [38] analysed the LCA of various pavement design variants in terms of CO₂ emissions over their life cycle (60 years). The assessment metric was global warming potential (GWP60) expressed in kgCO₂e/m. The maintenance phase had the greatest impact on emissions, while in the case of flexible composite pavement on weak soil, it was the production phase due to the high consumption of concrete. Ready-mixed concrete and asphalt concrete accounted for the largest percentage of the weight of materials used in the construction of the pavement, while in the case of pavement renovation, the dominant material was asphalt used for overlays.

National Highways (a UK government agency responsible for the management, maintenance and development of major national roads in the UK) has obtained PAS 2080 accreditation for the Lower Thames Crossing (LTC) road project (e.g. *Lower Thames Crossing* – (LTC) covering planned road crossings over the Thames in east London and Essex, demonstrating the possibility of building carbon-neutral infrastructure [59]. The use of 40 – 60% recycled materials (RAP, RCA, GGBFS) reduces CF by >35% and PEF by 20 – 30%, reducing water consumption, acidification, and toxicity (detailed toxicity indicators were not specified in the available data) [51].

An analysis of the available studies, summarised in the table, showed that the use of recycled materials, such as asphalt rubble, aggregates from construction waste, or GGBFS, significantly reduces the carbon footprint and environmental impact of road investments. The largest share of CO₂ emissions occurs during the construction and maintenance of the pavement, which indicates the need to optimise the transport of materials and the efficiency of construction machinery. Innovative production methods, including CCWRC concrete compression compaction, further reduce material requirements and the carbon footprint of a single structure. Digital road management systems and strategic investment planning can reduce operational emissions and support the achievement of carbon neutrality in infrastructure. Further research should fill in the missing environmental indicators in LCA and promote the standardisation of assessment and implementation of sustainable practices in road construction.

W tym samym badaniu wykazano, że ślad węglowy (CFP) CCWRC może być mniejszy o 37 – 50% w porównaniu z tradycyjnym betonem i o 28 – 46% w porównaniu z betonem z dodatkiem gumy z recyklingu opon bez kompresji (tzn. tradycyjnym betonem gumowym wytwarzanym metodą klasycznego odlewania/wibrowania, bez dodatkowego etapu zagęszczania pod ciśnieniem). Różnica w LCA wynika z tego, że metoda odlewania kompresyjnego pozwala uzyskać bardziej zwarty i wytrzymały beton, co przekłada się na mniejsze zapotrzebowanie materiałowe i niższy ślad węglowy na jednostkę konstrukcji. Zastosowanie kruszyw z recyklingu pozwala dodatkowo obniżyć CFP o 28 – 34% w stosunku do betonu konwencjonalnego. Uzyskane wyniki badań wskazują kierunki rozwoju zrównoważonej produkcji betonu i promocję CCWRC w budownictwie [58].

W pracy [38] przeanalizowano LCA różnych wariantów konstrukcji nawierzchni pod kątem emisji CO₂ w cyklu życia (60 lat). Miernikiem oceny był potencjał globalnego ocieplenia (GWP60) wyrażony w kgCO₂e/m². Największy wpływ na emisję miała faza utrzymania, natomiast w przypadku nawierzchni kompozytowej elastycznej na gruncie słabym – faza produkcji, ze względu na duże zużycie betonu. Beton towarowy i beton asfaltowy miały największy procentowy udział w masie materiałów użytych do budowy nawierzchni, podczas gdy w przypadku remontu nawierzchni dominującym materiałem był asfalt używany do nakładek.

National Highways (państwowa agencja w Wielkiej Brytanii, odpowiedzialna za zarządzanie, utrzymanie i rozwój głównych dróg krajowych w Wielkiej Brytanii) uzyskała akredytację PAS 2080 dla przedsięwzięcia drogowego (np. *Lower Thames Crossing* – (LTC) obejmującą planowane przeprawy drogowe przez Tamizę we wschodniej części Londynu i hrabstwie Essex, pokazując możliwość budowy infrastruktury neutralnej węglowo [59]. Zastosowanie 40–60% materiałów z recyklingu (RAP, RCA, GGBFS) redukuje CF o >35%, a PEF o 20 – 30%, zmniejszając zużycie wody, zakwaszenie i toksyczność (szczegółowe wskaźniki toksyczności nie zostały określone w dostępnych danych) [51].

Analiza dostępnych badań, zestawionych w tabeli, wykazała, że stosowanie materiałów z recyklingu, takich jak destrukta asfaltowy, kruszywa z odpadów budowlanych czy GGBFS, znacznie obniża ślad węglowy i wpływ inwestycji drogowych na środowisko. Największy udział emisji CO₂ występuje na etapie budowy i utrzymania nawierzchni, co wskazuje na konieczność optymalizacji transportu materiałów i efektywności maszyn budowlanych. Innowacyjne metody produkcji, w tym kompresyjne zagęszczanie betonu CCWRC, pozwalają dodatkowo zmniejszyć zapotrzebowanie materiałowe i ślad węglowy jednostkowej konstrukcji. Cyfrowe systemy zarządzania drogami oraz planowanie strategiczne inwestycji mogą ograniczyć emisje operacyjne i wspierać osiągnięcie neutralności węglowej infrastruktury. Dalsze badania powinny uzupełniać brakujące wskaźniki środowiskowe w LCA oraz promować standaryzację oceny i wdrażanie zrównoważonych praktyk w budownictwie drogowym.

A compilation of selected works on environmental aspects in the field of transport infrastructure construction

Zestawienie wybranych prac dotyczących aspektów środowiskowych w zakresie budownictwa komunikacyjnego

Authors	Year	Publishing house	Analyzed problem	Method	Environmental aspects
Koh et al.	2024	IOP Conf Ser Earth Environ Sci	road surface construction	LCA	the maintenance phase has the greatest impact on CO ₂ emissions; towing concrete and asphalt concrete have the largest material share in the pavement mass; asphalt overlays dominate in repairs
Contreras Llanes et al.	2022	Environ Sci Pollut Res	recycling of construction waste in the production of paving stones	LCA	possibility of replacing up to 50% of natural aggregates; concrete meets mechanical requirements; low environmental footprint and reduced cement consumption
Tang et al.	2024	scientific article	CCWRC concrete from rubber waste	LCA	CCWRC carbon footprint 37–50% lower than traditional concrete; 28 – 46% lower than non-compressed rubber concrete; recycled aggregates reduce CFP by 28 – 34%
Rispoli et al.	2024	Heliyon	recycling of PET and artificial aggregates	LCA	GWP reduction of 13 – 14%
Ribeiro et al.	2023	J Clean Prod	recycling in road surfaces (RAP, RCA, GGBFS)	LCA	CF reduction >35%, PEF 20 – 30%; reduction in water consumption, acidification, and toxicity (detailed toxicity indicators not specified)
Lou et al.	2025	no specified	construction machinery for road/cycle path construction	LCA	construction machinery generated 75.5 t CO ₂ per 3 km of track, 56% of which came from transport; the analysis highlights the impact of transport and equipment use on the total carbon footprint of the investment
National Highways	2025	official website	road infrastructure carbon neutrality plan	report	targets: carbon neutrality for operations by 2030, for construction and maintenance by 2040; implementation of tools for calculating emissions and strategies for decarbonising building materials
Zaumanis & Mallick	2015	Int J Pavement Eng	high proportion of asphalt waste in road surfaces	literature review/ LCA	milling and reusing asphalt rubble reduces emissions by over 30%, promotes recycling, and reduces the consumption of natural aggregates
Azari Jafari et al.	2016	J Clean Prod	road surface life cycle assessment	LCA	bituminous overlays account for 15 – 25% of total life cycle emissions; the analysis highlights the impact of use and maintenance on CO ₂ emissions
Moura et al.	2024	Sustainable Cities Soc	smart road infrastructure (smart roads)	LCA	digital road management systems (IoT) can reduce operational emissions (both direct and indirect) by 10 – 15%
Blaauw et al.	2021	Transp Res Part D: Transp Environ	flexible pavement performance	LCA	analysis of the impact of flexible structures on the life cycle of pavements; emphasises the importance of maintenance in reducing emissions
Anastasiou et al.	2015	Resour Conserv Recycl	Concrete road pavements using industrial waste	LCA	comparative LCA analysis has shown environmental benefits when using industrial waste instead of virgin raw materials
Zapata & Gambatese	2005	J Infrastruct Syst	energy consumption in materials and construction of asphalt and concrete pavements	LCA	energy for geotechnical works and documentation preparation accounts for several per cent of the total carbon footprint of the investment
Krawczyńska-Piechna & Budek-Wiśniewska	2025	Materiały Budowlane	use of recycled asphalt at construction sites in Poland	LCA	the use of asphalt obtained from the construction site reduces emissions associated with the transport and production of new materials and lowers the carbon footprint of the pavement
Medina et al.	2023	Sustainability	use of waste in road pavements – overview and proposed guidelines	Systematic Review/ LCA	a review of the literature showed that recycling materials in road surfaces significantly reduces the carbon footprint and consumption of primary raw materials; guidelines for the implementation of best practices were proposed

Conclusions

LCA analysis of the recycling stage of materials from road infrastructure demolition enables: comparison of technological variants not only in terms of cost but also in terms of environmental impact, assessment of the real impact of reusing materials, and support for sustainable planning of public investments.

Recycling construction and demolition waste in road construction reduces CO₂ emissions by up to 40 – 50% compared to virgin materials. The obligation of selective collection and recycling, reinforced by new EU regulations, enables an almost complete closure of the material cycle in road construction. The implementation of LCA and environmental footprint (EF) analyses in conjunction with PAS

Wnioski

Analiza LCA etapu recyklingu materiałów z rozbiórki infrastruktury drogowej umożliwia: porównanie wariantów technologicznych nie tylko kosztowo, ale i środowiskowo, ocenę realnego wpływu ponownego użycia materiałów, wspomaganie zrównoważonego planowania inwestycji publicznych.

Recykling odpadów budowlanych i rozbiórkowych w drogownictwie pozwala ograniczyć emisję CO₂ nawet o 40 – 50% w porównaniu z materiałami pierwotnymi. Obowiązek selektywnej zbiórki i recyklingu, wzmocniony nowymi regulacjami UE, umożliwia niemal pełne zamknięcie obiegu materiałów w drogownictwie. Wdrożenie analiz LCA i śladu środowiskowego (EF) w połączeniu ze standardami PAS 2050

2050 and PAS 2080 standards allows for the assessment of the environmental performance of investments, the comparison of technological options, and the rationalisation of tender decisions.

To increase the effectiveness of road investment projects, stakeholders involved in the design, implementation, use, maintenance, and closure of the material cycle of road investments should pay attention to the benefits of mandatory LCA analyses. During the design phase, it is recommended to monitor and report the carbon footprint using PAS 2050 and manage emissions in accordance with PAS 2080, optimising projects in terms of the use of recycled materials and low-carbon components, training and educating designers, contractors, and investors in LCA, CF, EF, and PAS standards. It also seems necessary to assess the effectiveness of the measures implemented and to update procedures in line with research findings and EU regulations. This enables sustainable planning of road investments, reduction of greenhouse gas emissions, and limitation of negative impact on the natural environment. New regulations, such as EU Regulation 2024/1781, increase the eco-design requirements for construction products. Data from EU countries indicate an increasing level of reuse of asphalt waste – on average, 72% is reused, 25% is recycled, and only 3% is landfilled. These indicators show that it is possible to achieve an almost complete closed loop for materials in road construction. Further legislative and educational measures are needed to support recycling in road construction. Life cycle assessment (LCA) and environmental footprint (EF) are effective tools for assessing the environmental impact of materials and investments. The practical implementation of these methods increases transparency and enables the rationalization of investment decisions. Recycling is not the only important element of sustainable road construction. The use of materials with low CO₂ emissions is equally important.

Received: 30.06.2025

Revised: 04.08.2025

Published: 23.10.2025

i PAS 2080 pozwala na ocenę efektywności środowiskowej inwestycji, porównanie wariantów technologicznych i racjonalizację decyzji przetargowych.

W celu zwiększenia efektywności przedsięwzięć w obszarze inwestycji drogowych, interesariusze zaangażowani w projektowanie, realizację, użytkowanie, konserwację i zamknięcie obiegu materiałowego inwestycji drogowych powinni zwrócić uwagę na korzyści wynikające z obowiązkowych analiz LCA. W fazie projektowania zalecane jest monitorowanie i raportowanie śladu węglowego przy użyciu PAS 2050 oraz zarządzanie emisjami zgodnie z PAS 2080, optymalizacja przedsięwzięć pod kątem wykorzystania materiałów wtórnych i niskoemisyjnych komponentów, szkolenie i edukacja projektantów, wykonawców i inwestorów w zakresie LCA, CF, EF oraz standardów PAS. Niezbędna wydaje się również ocena skuteczności wdrożonych działań i aktualizacja procedur zgodnie z wynikami badań i regulacjami UE. Umożliwia to zrównoważone planowanie inwestycji drogowych, redukcję emisji gazów cieplarnianych oraz ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Nowe regulacje, jak Rozporządzenie UE 2024/1781, zwiększają obowiązki dotyczące ekoprojektowania wyrobów budowlanych. Dane z krajów UE wskazują na zwiększający się poziom powtórnego wykorzystania destruktu asfaltowego – średnio 72% ponownie używane, 25% recyklingowane, a jedynie 3% składowane. Wskaźniki te świadczą o możliwości osiągnięcia niemal pełnego zamknięcia obiegu materiałów w drogownictwie. Niezbędne są dalsze działania legislacyjne i edukacyjne wspierające recykling w drogownictwie. Analiza cyklu życia (LCA) oraz ślad środowiskowy (EF) to skuteczne narzędzia oceny oddziaływania materiałów i inwestycji na środowisko. Praktyczne wdrożenie tych metod zwiększa transparentność i pozwala racjonalizować decyzje inwestycyjne. Nie tylko recykling jest ważnym elementem zrównoważonego budownictwa drogowego. Równie istotne jest wykorzystywanie materiałów charakteryzujących się małą emisją CO₂.

Artykuł wpłynął do redakcji: 30.06.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 04.08.2025 r.

Opublikowano: 23.10.2025 r.

Literatura

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 312, 3 – 30.
- [2] Rozporządzenie Ministra Klimatu z 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów. Dziennik Ustaw, 2020, poz. 10.
- [3] Decyzja Komisji z 18 grudnia 2014 r. zmieniająca decyzję 2000/532/WE w sprawie wykazu odpadów zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE.
- [4] Ustawa z 14 grudnia 2012 r. o odpadach. Dz.U. 2013, poz. 21 (z późn. zm.).
- [5] Ustawa z 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane. Dziennik Ustaw, 2021, poz. 2351.
- [6] Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2028 (KPGO 2028). Uchwała nr 96 Rady Ministrów z 12 czerwca 2023 r., M. P. 2023, poz. 702.
- [7] European Commission. Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy (COM (2015) 614 final). Brussels. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52015D-C0614> (accessed 24.07.2025).
- [8] Sileryte R, Sabbe A, Bouzas V, Meister K, Wandl A, van Timmeren A. European Waste Statistics data for a Circular Economy Monitor: Opportunities and

limitations from the Amsterdam Metropolitan Region. J CleanProd. 2022; 358: 131767.

[9] European Commission. Plan działania na rzecz gospodarki o obiegu zamkniętym – Monitorowanie. Available from: https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en (accessed 14.07.2025).

[10] European Commission. Buildings and construction. Available from: https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/buildings-and-construction_en (accessed 14.07.2025).

[11] European Commission. Circular economy action plan. Available from: https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en?prefLang=pl (accessed 14.07.2025).

[12] Baza danych o produktach i opakowaniach oraz o gospodarce odpadami (BDO). Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Warszawa.

[13] Krawczyńska-Piechna A, Budek-Wisniewska K. Site-won asphalt utilization in road construction in Poland. Materiały Budowlane. 2025. DOI: 10.15199/33.2025.05.11.

[14] UNEP. Emission Group Report. United Nations Environment Programme. 2024.

[15] Dyrekcja Generalna ds. Komunikacji Parlament Europejski. Emisje gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej wg sektora i krajów. Available

from: https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2018/3/story/20180301STO98928/20180301STO98928_pl.pdf (accessed 16.07.2025).

- [16] EPD.org.pl. Ślad węglowy a ślad środowiskowy – różnice i standardy oceny. 2025. Available from: <https://epd.org.pl> (accessed 16.07.2025).
- [17] European Commission. Environmental footprint methods. Available from: https://green-forum.ec.europa.eu/green-business/environmental-footprint-methods/about-environmental-footprint-methods_en (accessed 14.07.2025).
- [18] Fantke P, Saouter E, et al. USEtox 2.1 – comparative toxicity model for human health. *J CleanProd.* 2017.
- [19] United Nations. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 1998.
- [20] IPCC AR6. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. 2021.
- [21] European Commission. Zalecenie Komisji w sprawie stosowania wspólnych metod pomiaru efektywności środowiskowej w cyklu życia produktów i organizacji (2013/179/UE). 2013.
- [22] European Commission. Zalecenie Komisji (UE) 2021/2279 w sprawie stosowania metod oznaczania śladu środowiskowego do pomiaru efektywności środowiskowej w cyklu życia produktów i organizacji oraz informowania o niej. 2021.
- [23] Medina T, Calmon JL, Vieira D, Bravo A, Vieira T. Life Cycle Assessment of Road Pavements That Incorporate Waste Reuse: A Systematic Review and Guidelines Proposal. *Sustainability.* 2023; 15 (20): 14892.
- [24] Polski Komitet Normalizacyjny. PN-EN ISO 14040 – Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura. 2009.
- [25] BS EN 15804:2012+A2: 2019 – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products.
- [26] Quantifying The Greenhouse Gas Emissions Of Products. PAS 2050 & the GHG Protocol Product Standard. A short guide to their purpose, similarities and differences. Available from: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/GHG%20Protocol%20PAS%202050%20Factsheet.pdf>
- [27] British Standards Institution. PAS 2050:2011. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. 2011.
- [28] Schryver AD, Zampori L. Product Carbon Footprint standards: which one to choose? 2022. Available from: <https://pre-sustainability.com/articles/product-carbon-footprint-standards-which-standard-to-choose/>.
- [29] McGarry H, Martin B, Winslow P. Delivering Low Carbon Concrete for Network Rail on the Routemap to Net Zero. *Case Stud Constr Mater.* 2022; 17: e01343.
- [30] Institution of Civil Engineers. Guidance Document for PAS 2080: Practical actions and examples to accelerate the decarbonisation of buildings and infrastructure. 2023. Available from: https://www.ice.org.uk/media/vm0n-wehp/2023-03-29-pas_2080_guidance_document_april_2023.pdf (accessed 20.08.2025).
- [31] ISO 14067:2018 – Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification.
- [32] British Standards Institution. (2011). PAS 2050. Specyfikacja dotycząca oceny emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia towarów i usług. Pobrano z <https://www.bsigroup.com/fr-FR/A-propos-de-BSI/espacepresse/Communiqués-de-presse/actualite-2011/La-norme-PAS-2050-nouvellement-revisée-sapprete-a-relancer-les-efforts-internationaux-pour-les-produits-relatifs-a-lEmpreinte-Carbone/>.
- [33] BS EN 15978: 2011 – Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method.
- [34] The Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard. REVISED EDITION. Available from: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf> (accessed 13.08.2025).
- [35] European Commission. Green Forum: Life Cycle Assessment & the EF methods. Available from: https://green-forum.ec.europa.eu/green-business/environmental-footprint-methods/life-cycle-assessment-ef-methods_en (accessed 2025).
- [36] Kamińska E, Rymasz B. Zagadnienia szacowania obciążeń środowiska wynikających ze stosowania w drogownictwie materiałów z recyklingu. *Materiały Budowlane.* 2023; 1 (592): 45–50.
- [37] Medina C, Sánchez de Rojas MI, Frias M. Environmental footprint of recycled aggregates in road sub-bases. *Constr Build Mater.* 2023; 368: 130360.
- [38] Koh D, Tokbolat S, Blaauw S A. Life cycle assessment of pavement construction: A case study. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 2024; 1363: 012065.
- [39] Wang T, Lee IS, Kendall A, Harvey J, Lee EB, Kim C. Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance. *J CleanProd.* 2012; 33: 86 – 96.
- [40] Harvey J, Saboori A, Dauvergne M, Steyn W, Jullien A, Li H. Comparison of New Pavement Construction GHG and Energy Impacts in Different Regions. *IntSympPavement Life CycleAssessment.* 2014; 133.
- [41] Giani MI, Dotelli G, Brandini N, Zampori L. Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resour Conserv Recycl.* 2015; 104: 224–238.
- [42] dos Santos JMO, Thyagarajan S, Keijzer E, Flores RF, Flintsch G. Comparison of Life-Cycle Assessment Tools for Road Pavement Infrastructure. *Transp Res Rec.* 2017; 2646 (1): 28 – 38.
- [43] Farina A, Zanetti MC, Santagata E, Blengini GA. Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials. *Resour Conserv Recycl.* 2017; 117: 204 – 212.
- [44] Blaauw SA, Maina JW. Life Cycle Inventory for Pavements – A Case Study of South Africa. *TranspEng.* 2021; 3: 100049.
- [45] Blaauw SA, Maina JW, Mturi GAJ, Visser AT. Flexible pavement performance. *Transp Res Part D: Transp Environ.* 2022; 104: 103203.
- [46] Anastasiou EK, Liapis A, Papayianni I. Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials. *Resour Conserv Recycl.* 2015; 101: 1 – 8.
- [47] Zapata P, Gambatese J. Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction. *J Infrastruct Syst.* 2005; 11 (1): 9 – 20.
- [48] Moura FNC, Silva MRDH, Oliveira RMJ, Loureiro DAC. A Life Cycle Assessment of an Asphalt Mixture with Steel Slag and Reclaimed Asphalt. *Proc 10th Int Conf on Maintenance and Rehabilitation of Pavements.* 2024; 605 – 615.
- [49] Rispoli R, Ajibade C. Comparative life cycle assessment of a novel sustainable road pavement system adopting recycled plastic from PET bottles and carbonated aggregate. *Heliyon.* 2024; 10: e24354.
- [50] Santero N, Masanet E, Horvath A. Life-cycle assessment of pavements. *Resour Conserv Recycl.* 2011; 55 (9–10): 801 – 809.
- [51] Ribeiro DV, Labrincha JA, Morelli MR. Carbon and environmental footprint reduction by using recycled aggregates in pavements. *J CleanProd.* 2023; 405: 136938.
- [52] Kuryś D, Gorzelak B. Technologie. Na drodze do neutralności klimatycznej – transformacja cementu i betonu. *Holcim Polska.* [52]
- [53] Lou B, Rasmussen FN, Degago SA, Juvik ES, Bohne RA. A BIM-based carbon footprinting of earthworks in road construction process. *Environ Impact Assess Rev.* 2025; 110. [53]
- [54] Azari Jafari H, Yahia A, Amor B. Life cycle assessment of pavements. *J Clean Prod.* 2016; 112: 2187 – 2197.
- [55] Moura A, Teixeira SR, Antunes ML. LCA of smart road infrastructure: climate and resource impacts. *Sustainable Cities Soc.* 2024; 103: 104685.
- [56] Zaumanis M, Mallick RB. Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements. *Int J Pavement Eng.* 2015; 16 (1): 39 – 55.
- [57] Contreras Llanes M, Romero Pérez M, Gázquez González MJ, Bolívar Raya JP. Construction and demolition waste as recycled aggregate for environmentally friendly concrete paving. *Environ Sci Pollut Res.* 2022; 29 (7): 9826 – 9840.
- [58] Tang B, Wu H, Wu YF. Evaluation of carbon footprint of compression cast waste rubber concrete based on LCA approach. *J Build Eng.* 2024; 86: 108818.