

mgr inż. Magdalena Bardan^{1*)}

ORCID: 0000-0002-3362-507X

prof. dr hab. inż. Lech Czarnecki¹⁾

ORCID: 0000-0003-3340-9075

Sustainable concrete with recycled aggregate – a multicriteria assessment

Zrównoważony beton z kruszywem z recyklingu – ocena wielokryterialna

DOI: 10.15199/33.2026.01.02

Abstract. The article evaluates the sustainability of recycled aggregate concrete (RAC) using an original multicriteria assessment encompassing ecology, economics, social perception, aggregate quality, and durability. The social perception module was delineated in detail. RAC was compared with natural aggregate concrete (NAC), and hybrid mixes emerged as the optimal choice. The analysis of concrete utility uses a multicriteria assessment as a comparative tool to systematise the variants.

Keywords: recycled aggregates; recycled aggregate concrete; multi-criteria assessment; sustainability level.

Streszczenie. Artykuł ocenia zrównoważenie betonu z kruszywem z recyklingu (RAC) z wykorzystaniem autorskiej wielokryterialnej oceny obejmującej ekologię, ekonomię, percepcję społeczną, jakość kruszyw oraz trwałość. Moduł percepcji społecznej został szczegółowo opisany. RAC porównano z betonem z kruszywem naturalnym (NAC), a za rozwiązanie optymalne uznano mieszanki hybrydowe. Analiza użyteczności betonu wykorzystuje wielokryterialną ocenę jako narzędzie porównawcze służące do usystematyzowania wariantów.

Słowa kluczowe: kruszywa z recyklingu; beton z recyklingu; wielokryterialna ocena; stopień zrównoważenia.

The construction sector intensively exploits natural resources while simultaneously generating substantial amounts of waste [1, 2]. It is projected that, by 2030, the demand for natural aggregates will increase to 55 billion tonnes [3, 4]. Construction and demolition waste accounts for approximately 40% of the total waste generated in the EU, of which around 70% is landfilled [5], which means that we are approaching the limit where the capacity to regenerate resources and ecosystem services collapses [6 ÷ 8]. It is thus necessary to undertake measures aimed at limiting entropy growth (maintaining balance and reducing ecological pressure) and to implement policies for environmental protection sustainable resource use, and waste management based on circular economy model. Therefore, material solutions that enhance the sustainability of concrete are being sought [9 ÷ 11].

Aggregates are an integral component of concrete, constituting approximately 70% of its volume, therefore, one of the key research and application directions is the substitution of natural aggregates (NA) with RA [12, 13]. Despite numerous scientific reports confirming the benefits of RA incorporation, its use in the production of structural concrete on an industrial scale still remains marginal [14 ÷ 16]. Figure 1 presents a schematic circular economy model (RA-RAC), described through stages I – III within the proposed multi-criteria framework, together with the characterization of the material at each stage.

The following question may arise: to what extent does concrete incorporating recycled aggregates comply with the circular economy paradigm? There is a lack of assessment methods that, in an integrated manner, consider ecological,

budownictwo intensywnie eksploatuje zasoby naturalne, wytwarzając jednocześnie znaczną ilość odpadów [1, 2]. Przewiduje się, że do 2030 r. popyt na kruszywa naturalne zwiększy się do 55 mld ton [3, 4]. Odpady budowlane i rozbiórkowe stanowią ok. 40% całkowitej masy odpadów w UE, z czego ok. 70% z nich trafia na wysypiska [5], co oznacza, że zbliżamy się do granicy, gdzie zdolność odtwarzania zasobów oraz usług ekosystemowych ulega załamaniu [6 ÷ 8]. Konieczne jest więc prowadzenie działań ukierunkowanych na hamowanie wzrostu entropii (utrzymanie równowagi, zmniejszanie presji ekologicznej) i implementowanie polityki ochrony środowiska, zrównoważonego użytkowania zasobów oraz gospodarki odpadami w modelu obiegu zamkniętego. W związku z tym, poszukuje się rozwiązań materiałowych zwiększających m.in. zrównoważony charakter betonu [9 ÷ 11].

Kruszywa są integralnym składnikiem betonu i stanowią 70% jego objętości, dlatego jednym z kierunków badań i zastosowań jest substytucja kruszywa naturalnego (NA) przez kruszywa z recyklingu (RA) [12, 13]. Pomimo licznych doniesień naukowych potwierdzających zalety zastosowania RA, ich wykorzystanie w produkcji betonu konstrukcyjnego na skalę przemysłową nadal pozostaje marginalne [14 ÷ 16]. Na rysunku 1 przedstawiono schematyczny model gospodarki o obiegu zamkniętym (RA-RAC), opisany etapami I – III w autorskim ujęciu wielokryterialnym, wraz z charakterystyką wyrobu na poszczególnych etapach.

Może nasunąć się pytanie: w jakim stopniu beton z dodatkiem kruszyw z recyklingu odpowiada paradygmatowi gospodarki cyrkularnej? Istnieje niedostatek metod oceny, która w sposób zintegrowany uwzględniając aspekty ekologiczne, ekonomiczne, społeczne oraz techniczne, pozwoliła-

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej

^{*)} Correspondence address: m.bardan@itb.pl

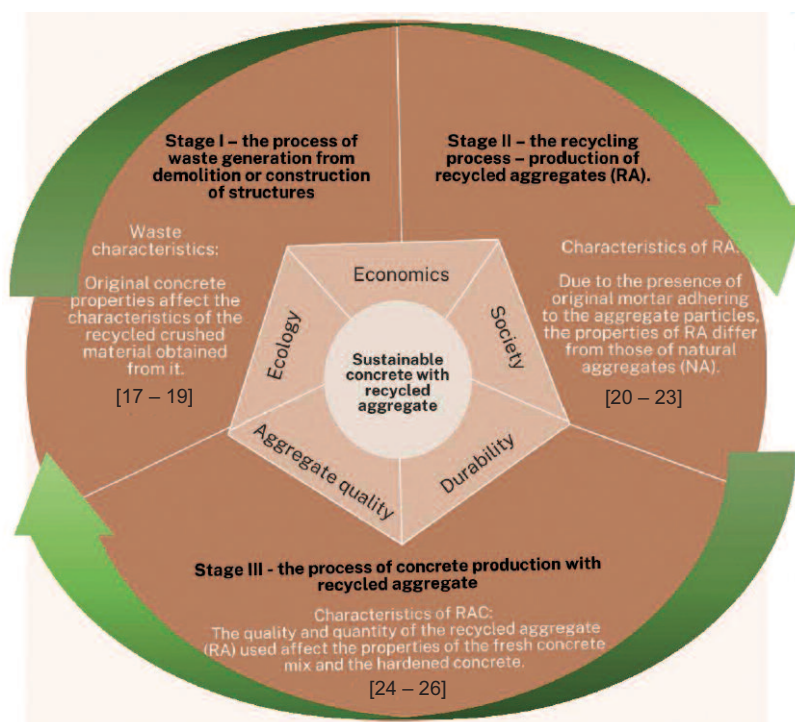


Fig. 1. Schematic three-stage circular economy model (RA – RAC) in the authors' multicriteria approach, with the product characterised at each stage

Rys. 1. Schematyczny, trójetapowy model gospodarki o obiegu zamkniętym (RA – RAC) w autorskim ujęciu wielokryterialnym, z charakterystyką wyrobu na poszczególnych etapach

economic, social, and technical aspects to determine the overall level of sustainability. Further investigation is required in order to identify new development pathways for sustainable concrete solutions incorporating recycled aggregates [9, 27].

This paper focuses on the multi-criteria assessment of recycled aggregate concrete (RAC), considered as a potential alternative to natural aggregate concrete (NAC). The aim is to evaluate the suitability of RAC in view of sustainable development requirements. The methodology adopted in this article is based on the original concept presented in [9], calibrated against an “ideal” sustainable concrete model, and supported by an original data extraction approach. The assessment covers: ecology, economy, social perception, and technical aspects: aggregate quality and concrete durability. The analysis is focused on comparing RAC, NAC, and the model sustainable concrete. In the case of the methodology modification, a focus was placed on the evaluation of data for four core aspects, excluding the social component from the multi-criteria assessment and discussing it separately. This is justified by the different dynamics of the variables. In the areas relating to ecology, economy, and durability quantitative indicators whose values fluctuate significantly over time are available; in contrast, social indicators show considerable inertia and a strong dependence on a national context. Therefore, the social perception aspect was expanded and adapted to local conditions within a separate analytical module. The introduced modification broadens the state of knowledge regarding the applicability of recycled aggregate concrete (RAC).

by ocenić stopień zrównoważenia. Wymagają one dalszej analizy, aby wyznaczyć nowe kierunki rozwoju zrównoważonych rozwiązań betonowych z kruszywem z recyklingu [9, 27].

Artykuł dotyczy wielokryterialnej oceny betonu z kruszywem z recyklingu (RAC), rozpatrywanego jako potencjalna alternatywa dla betonu z kruszywem naturalnym (NAC). Celem jest ocena użyteczności betonu z RAC w świetle wymagań zrównoważonego rozwoju. Przyjęta w artykule metoda bazuje na autorskiej koncepcji przedstawionej w [9], skalibrowanej względem „idealnego” modelu betonu zrównoważonego oraz na oryginalnej ekstrakcji danych. W ocenie uwzględniono: ekologię; ekonomię; percepcję społeczną; aspekty techniczne: jakość kruszyw oraz trwałość betonu. W analizie skupiono się na porównaniu RAC, NAC oraz modelowym betonem zrównoważonym. W przypadku modyfikacji metody skoncentrowano się na ewaluacji danych dotyczących czterech aspektów podstawowych, wyłączając komponent społeczny z wielokryterialnej oceny i omawiając go odrębnie. Uzasadnieniem jest odmienna dynamika zmiennych. W obszarach dotyczących ekologii, ekonomii i trwałości dostępne są ilościowe mierniki, a ich wartości istotnie fluktuują w czasie; natomiast wskaźniki społeczne wykazują dużą inercję oraz silną zależność od kontekstu krajowego. Z tego względu aspekt percepcji społecznej pogłębiono i zaadaptowano do realiów krajowych w osobnym module analitycznym. Wprowadzona modyfikacja pogłębia stan wiedzy w zakresie użyteczności betonu z kruszywem z recyklingu (RAC).

Methods and materials

Methods. The methodology is focused on a multi-criteria analysis enabling a comprehensive assessment of the synergies between the key aspects defining the sustainability of recycled aggregate concrete (RAC). The starting point is the source data presented in [9], based on which the following research problem was formulated: How can the use of recycled aggregates (RA) in concrete be optimised in order to sustainably address environmental, economic, social, and technical requirements, including aggregate quality and concrete durability? In response to this question, an original methodology was proposed, aimed at identifying and analysing the key sustainability indicators that influence the maximum and effective utilisation of recycled aggregates. Due to the extensive body of literature on RA and RAC, the authors of the source article selected a sample of literature data using an original AI-based extraction procedure. Based on a prepared set of questions, the AI tool indicated publications in which the content contained an answer to the respective query. The role of AI was limited exclusively to the random compilation of publications meeting the adopted criteria, whereas the actual content analysis was subsequently performed by the authors, who assigned individual results a score on a 1 ÷ 5 scale. Therefore, the obtained results and conclusions apply solely to this selected literature data sample. The RA discussed therein occurred both as clean crushed concrete and as aggregates contaminated with ceramics, gypsum, wood, or reclaimed asphalt pavement (RAP). Depending on the adopted RA characteristics and the corresponding RAC properties, the resulting scores varied accordingly. By analysing the published data against the reference model of “ideal concrete”, the authors discussed the individual aspects as follows:

- **ecological aspect** – previous analyses indicate that, at the production stage, the carbon footprint of concrete (expressed in kg of CO₂e), including recycled aggregate concrete (RAC), is primarily influenced by the type of cement used; low-emission cements significantly reduce this indicator [28]. With regard to RA production, it is emphasized that the carbon footprint depends on the applied processing technology and the degree of upgrading, usually the higher the energy input, the higher the resulting RA quality. Environmental advantages are achieved when RA is produced locally and based on selective demolition, enabling the use of waste materials instead of exploiting natural resources (NA). The indicator value obtained for RA was consistent with that determined for the ideal reference concrete model;

- **economic aspect** – was evaluated using cost categories: production, transport, and landfilling. In the case of RA, the distribution of results related to concrete production costs was not as clear as for the environmental aspect, and the share of positive evaluations was approximately 40% lower. The potential of RA to reduce production costs was the most frequently discussed issue. The costs included, among others, the purchase and operation of concrete crushing equipment, as well as increased cement and admixture consumption, which at higher replacement levels may lead to an increase in the overall concrete production cost. The economic efficiency of using recycled concrete aggregate (RCA) largely depends on the distance between the

Metody i materiały

Metody. Wykorzystano wielokryterialną analizę umożliwiającą kompleksową ocenę synergii między kluczowymi aspektami definiującymi zrównoważenie RAC. Punkt wyjścia stanowią dane źródłowe [9]. Ze względu na obszerność literatury dotyczącej RA i RAC wyodrębniono próbkę danych literaturowych z wykorzystaniem autorskiej procedury ekstrakcji bazującej na narzędziach AI. Na podstawie przygotowanego zestawu pytań AI wskazywała publikacje, w których treści zawarta była odpowiedź na zadane pytanie. Rola AI ograniczała się wyłącznie do losowego zestawienia publikacji spełniających przyjęte kryteria. Właściwa analiza treści artykułów została przeprowadzona przez autorów, którzy przypisywali poszczególnym wynikom oceny w skali 1 ÷ 5. Otrzymane rezultaty i wnioski odnoszą się zatem wyłącznie do tej wyselekcjonowanej próbki danych literaturowych, przy czym omawiane w niej RA występuje zarówno w postaci czystego przekruszu betonowego, jak i kruszywa zanieczyszczonego ceramiką, gipsem, drewnem czy destruktem asfaltowym. W zależności od przyjętej charakterystyki kruszywa RA i odpowiadającego mu betonu RAC rozkładała się uzyskana punktacja. Analizując opublikowane dane w odniesieniu do modelowego betonu idealnego, omówiono poszczególne aspekty:

- **aspekt ekologiczny** – dotychczasowe analizy wskazują, że na wielkość śladu węglowego betonu [kg CO₂e], rozpatrywanego na etapie produkcji, w tym betonu z kruszywem z recyklingu (RAC), w pierwszej kolejności wpływa rodzaj zastosowanego cementu; cementy niskoemisyjne istotnie zmniejszają wartość tego wskaźnika [28]. Z kolei w odniesieniu do wytwarzania kruszywa RA podkreśla się, że na jego ślad węglowy wpływa technologia produkcji oraz stopień uszlachetnienia, im większy nakład energii, tym zazwyczaj lepsza jakość RA. Kruszywa te zyskują przewagę środowiskową, gdy są wytwarzane lokalnie z uwzględnieniem selektywnej rozbiórki, co umożliwia wykorzystanie odpadów w miejscu eksploatacji zasobów naturalnych (NA). Wartość wskaźnika w przypadku RA była tożsama z wartością wyznaczoną dla idealnego betonu modelowego;

- **aspekt ekonomiczny** oceniano, wykorzystując koszt: produkcji, transportu oraz składowania odpadów. W przypadku RA rozkład wyników dotyczących kosztów produkcji betonu nie był tak jednoznaczny jak dla aspektu środowiskowego. Pozytywnych ocen było o 40% mniej. Pozytywny wpływ RA na obniżenie kosztów produkcji był najczęściej dyskutowanym zagadnieniem. Do kosztów zaliczono m.in. zakup i eksploatację urządzeń do kruszenia betonu oraz zwiększone zużycie cementu i domieszek (co może prowadzić do zwiększenia kosztów produkcji betonu). Efektywność ekonomiczna wykorzystania RCA w dużej mierze zależy od odległości między źródłem recyklingu a miejscem wbudowania. Dodatkowo zasugerowano możliwość redukcji kosztów magazynowania odpadów, przy czym jest ona uzależniona od nakładów przeznaczonych na uszlachetnianie RA;

- **aspekt percepcji społecznej** – kruszywo RA postrzegane jest jako wyrób wpisujący się w gospodarkę o obiegu zamkniętym, co wzmacnia akceptację jego stosowania. Jednak

recycling source and the construction site, which may significantly reduce transport-related costs. Additionally, a potential reduction in waste storage costs was suggested, however, this depends on the expenditure allocated to RA upgrading;

- **social perception aspect** – recycled aggregates, RA, are perceived as a material aligned with the circular economy, which strengthens acceptance of their use. However, the need to modify traditional concrete mix designs when incorporating RA, as well as country-specific regulatory conditions, highlight the challenges related to introducing this product to the market;

- **technical aspect, aggregate quality** – comprises three interrelated indicators: the content of contaminants, porosity, and the heterogeneity of RA batches. The majority of publications report reduced qualitative properties of RA compared to NA. It was emphasised that waste sorting already at the demolition stage limits RA contamination and improves its quality. In RA production, the first stage involves separating concrete from contaminants such as ceramics or wood, while the second stage focuses on removing adhered mortar and dust. These measures contribute to improved RA properties, particularly in terms of density and water absorption. A key challenge remains the heterogeneity of RA, as each demolition process generates an aggregate batch with different characteristics. Nevertheless, this variability can be determined, as confirmed by research, inter alia through analysing the compressive strength of the original concrete as an indicator of source quality. If the origin of RA is known and its properties have been determined, heterogeneity can be effectively managed;

- **technical aspect, concrete durability** – addresses the influence of aggregate type and quality (RA, NA) on the performance properties of RAC and NAC. Concrete durability is defined as the ability to maintain required properties over a specified service life under exposure to degradation (corrosive) factors. In the present analysis, the focus was placed on the effect of RA on RAC durability, with particular emphasis on fresh mix rheology, compressive strength, and resistance to corrosive agents.

In the present paper, the source data was validated as part of the development. The applied framework is presented in Figure 2. The rationale for introducing these modifications lies in the distinct nature of social indicators compared to the remaining environmental-economic-technical ones. Social indicators are characterised by a relatively stable sustainability level over time and high sensitivity to formal and legal conditions in the country of application. In the case of RAC, environmental, economic, and technical variables exhibit high context-dependent variability: environmental burdens depend, among other factors, on the type

konieczność modyfikacji tradycyjnych receptur betonów z RA oraz krajowe uwarunkowania formalne pokazują wyzwania związane z wprowadzeniem tego typu wyrobów do obrotu;

- **aspekt techniczny, jakość kruszyw** obejmuje trzy powiązane wskaźniki: zawartość zanieczyszczeń, porowatość oraz heterogeniczność partii RA. Większość publikacji wskazuje na gorszą jakość RA w porównaniu z NA. Podkreślono, że selekcja odpadów już na etapie rozbiórki ogranicza zanieczyszczenie RA i poprawia jego jakość. W pierwszym etapie wytwarzania RA oddziela się beton od zanieczyszczeń, takich jak ceramika czy drewno, natomiast w drugim etapie usuwa się zaprawę pierwotną oraz pyły. Działania te przekładają się na poprawę właściwości RA, w szczególności jego gęstość i nasiąkliwość. Istotnym wyzwaniem pozostaje heterogeniczność RA, ponieważ każda rozbiórka generuje partię kruszywa o odmiennych właściwościach. Mimo to możliwe jest ich określenie, co potwierdzają badania, m.in. poprzez analizę wytrzymałości na ściskanie betonu pierwotnego jako wskaźnika jakości źródła. Jeśli pochodzenie RA jest znane, a jego właściwości zostały zbadane, można skutecznie zarządzać heterogenicznością;

- **aspekt techniczny, trwałość betonu** odnosi się do wpływu rodzaju i jakości kruszyw (RA, NA) na długotrwałe właściwości użytkowe betonów RAC i NAC. Trwałość betonu definiuje się jako zdolność do zachowania wymaganych właściwości w określonym czasie użytkowania, w warunkach oddziaływania czynników powodujących degradację (korozyjnych). W analizie skoncentrowano się na wpływie RA na trwałość RAC, ze szczególnym uwzględnieniem reologii mieszanki betonowej, wytrzymałości na ściskanie oraz odporności na czynniki korozyjne.

W artykule w ramach rozwinięcia przeprowadzono walidację danych źródłowych. Schemat zastosowanej metody przedstawiono na rysunku 2. Uzasadnieniem wprowadzonych zmian jest odmienny charakter wskaźników społecznych wobec pozostałych ekologiczno-ekonomiczno-technicznych. Cechują się one relatywnie stabilną wartością stopnia zrównoważenia w czasie oraz dużą wrażliwością na uwarunkowania formalnoprawne w kraju stosowania. W przypadku RAC aspekty ekologiczne, ekonomiczne i techniczne wykazują dużą zmienność kontekstową: obciążenia środowiskowe zależą m.in. od rodzaju i dozowania zastosowanego cementu, koszty – od odległości transportu z miejsca rozbiórki do punktu uszlachetniania oraz dalej do węzła betonarskiego, nato-

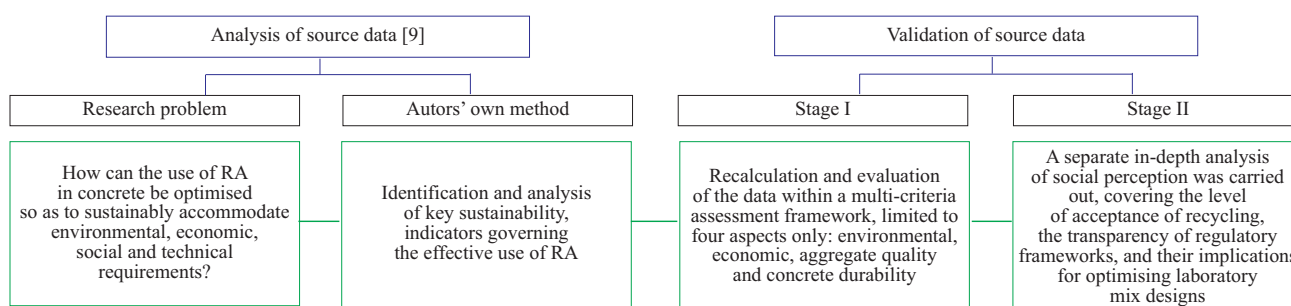


Fig. 2. Schematic description of the adopted methodology

Rys. 2. Schematyczny opis zastosowanej metody

and dosage of cement used, costs - on transport distances from the demolition site to the upgrading facility and further to the concrete batching plant, while RA quality is strongly determined by the origin of the demolished concrete (e.g., bridge structures, road pavements, buildings) and the applied recovery technology. Concrete durability, in turn, directly depends on RA quality and its proportion in the mix [29]. Against this background, the social perception aspect is of a relatively unalterable nature: social acceptance of recycling is stable – consistently positive and reinforced by regulations, while formal frameworks remain unchanged until legislative intervention occurs. Moreover, the need to introduce adjustments to laboratory mix designs should be anticipated – this will be an inherent factor differentiating individual RAC variants from NAC. Such an asymmetry in the dynamics justifies separating the assessments: aspects prone to rapid fluctuations (ecological, economic, and technical) remain at the core of the multi-criteria analysis, whereas the social aspect characterised by high inertia and strong context dependence is examined separately using tools appropriate for public policy evaluation and opinion research. The literature also indicates that the social dimension has so far been investigated only to a limited extent, likely due to the complexity of various social impacts. The primary quantitative inputs are provided by ecological and economic variables [30]. Integrating these with RA quality and RAC durability constitutes an innovation [31].

In **Stage I**, a new assessment framework was developed by redefining the scope and structure of the criteria based on the available published results [9]. Four key aspects and twelve sustainability indicators were selected and calibrated against the desired profile of the target product using a 1 – 5 scale, where 5 indicates a highly favourable outcome and 1 an unfavourable one. The “ideal model” achieved the maximum possible score for each of the analysed indicators. The results were subsequently analysed and presented graphically. A summary of the assessed aspects in relation to the expected values of the model sustainable concrete is provided in Figure 3.

In **Stage II**, the determinants of social perception were analysed based on a literature review. Social impact was assessed through the analysis of three interrelated indicators: public acceptance of material recycling, minimal influence on the development of laboratory mix designs, and regulatory transparency. The latter was further extended to account for country-specific conditions. Data were collected through a literature review supported by (AI) [32]. Artificial intelligence was used exclusively to randomly identify relevant

aspects of RA quality. RA quality is strongly determined by the origin of the demolished concrete (e.g., bridge structures, road pavements, buildings) and the applied recovery technology. Concrete durability, in turn, directly depends on RA quality and its proportion in the mix [29]. Against this background, the social perception aspect is of a relatively unalterable nature: social acceptance of recycling is stable – consistently positive and reinforced by regulations, while formal frameworks remain unchanged until legislative intervention occurs. Moreover, the need to introduce adjustments to laboratory mix designs should be anticipated – this will be an inherent factor differentiating individual RAC variants from NAC. Such an asymmetry in the dynamics justifies separating the assessments: aspects prone to rapid fluctuations (ecological, economic, and technical) remain at the core of the multi-criteria analysis, whereas the social aspect characterised by high inertia and strong context dependence is examined separately using tools appropriate for public policy evaluation and opinion research. The literature also indicates that the social dimension has so far been investigated only to a limited extent, likely due to the complexity of various social impacts. The primary quantitative inputs are provided by ecological and economic variables [30]. Integrating these with RA quality and RAC durability constitutes an innovation [31].

In **Stage I**, a new assessment framework was developed by redefining the scope and structure of the criteria based on the available published results [9]. Four key aspects and twelve sustainability indicators were selected and calibrated against the desired profile of the target product using a 1 – 5 scale, where 5 indicates a highly favourable outcome and 1 an unfavourable one. The “ideal model” achieved the maximum possible score for each of the analysed indicators. The results were subsequently analysed and presented graphically. A summary of the assessed aspects in relation to the expected values of the model sustainable concrete is provided in Figure 3.

In **Stage II**, the determinants of social perception were analysed based on a literature review. Social impact was assessed through the analysis of three interrelated indicators: public acceptance of material recycling, minimal influence on the development of laboratory mix designs, and regulatory transparency. The latter was further extended to account for country-specific conditions. Data were collected through a literature review supported by (AI) [32]. Artificial intelligence was used exclusively to randomly identify relevant

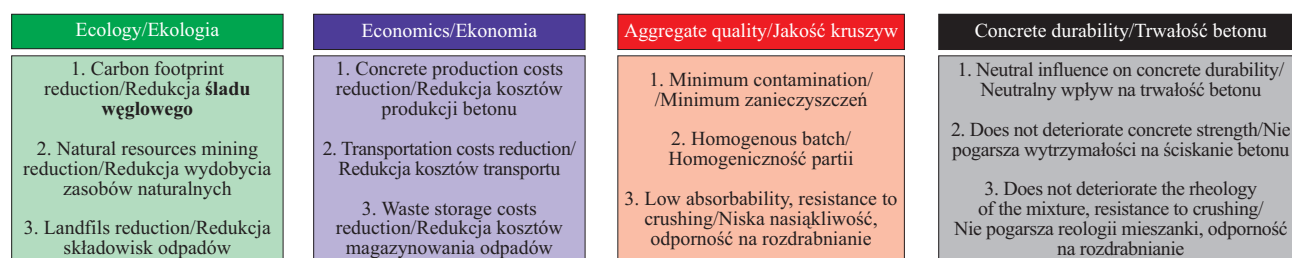


Fig. 3. Diagram of the aspects and corresponding indicators adopted as characteristics of the model sustainable concrete

Rys. 3. Diagram aspektów i odpowiadających im wskaźników, przyjętych jako cechy modelowego betonu zrównoważonego

publications, and its involvement ended at this stage of research. Ten each randomly selected publications addressing the societal impact of RA and NA were analysed, with some referring to both groups simultaneously.

Materials. The analysis focuses on two types of concrete: natural aggregate concrete (NAC) and recycled aggregate concrete (RAC). NAC is associated with long-standing mix design practice for various applications, predictable supply parameters, and well-established in-service durability. At the same time, NAC exerts significant environmental pressure resulting from the exploitation of natural aggregate deposits (resource depletion and landscape transformation).

RAC differs from NAC through the partial or complete substitution of natural aggregates (NA). Recycled aggregates (RA) are characterised by high heterogeneity (including 20–56% presence of adhered mortar on the aggregate particles) and by greater variability between individual batches compared to NA, depending on the origin of the demolition waste and the applied recovery technology. Each demolition process generates a different waste stream (e.g., crushed concrete, ceramics, glass, wood), which translates into varying RA quality, influenced by the degree of selective demolition, the depth of processing, and the upgrading method [33].

RA has $2 \div 15\%$ higher water absorption than NA (usually $\leq 2\%$), which translates into increased water demand [34] and a lower particle density – averaging 2.32 g/cm^3 (for NA, the value is $2.60 \div 2.70 \text{ g/cm}^3$) [35]. As a result, mix design requirements for RAC and NAC differ and must account for both fresh mix rheology and concrete durability. This includes, inter alia, adjustments in water content and binder type, as well as the selection of plasticising and air-entraining admixtures, in order to maintain the assumed workability, strength, and durability within the required exposure class [36 ÷ 39]. Compared to NAC, RAC mixtures exhibit a reduction in compressive strength by $3\% \div 43\%$ (depending on the replacement level), a similar trend for tensile strength, an approximately 25% decrease in the modulus of elasticity, and a reduction in flexural strength of up to 15% [40, 41]. From a sustainability perspective, RAC demonstrates clear environmental potential: it limits the extraction of primary raw materials, enables the utilisation of construction and demolition waste reducing the volume of waste directed to landfills; the overall balance of benefits, however, depends on context-specific conditions (cement type and dosage, transport distances for raw materials and waste, and RCA quality) [42].

Results

Based on the evaluation of the data [9] described in Stage I, limited to four aspects (environmental, economic, aggregate quality, and concrete durability) a new summary of results for RAC and NAC was developed and assessed against the “ideal” reference product model. The results are presented in Table. In the five-aspect variant (including the social component) proposed in [9], RAC achieved 16 points out of a maximum of 25, i.e., 64% of the “ideal model” profile, whereas NAC reached 13/25 points, i.e., 52%. The outcome indicates a

czyła udział w badaniu. Analizie poddano po dziesięć losowo wybranych publikacji dotyczących oceny oddziaływania RA i NA, na społeczeństwo, przy czym niektóre z nich odnosiły się do obu grup jednocześnie.

Materiały. Przedmiotem analizy są dwa typy betonu: z kruszywem naturalnym (NAC) oraz z kruszywem pochodzącym z recyklingu (RAC). NAC wiąże się z długoletnią praktyką projektowania mieszanek w odniesieniu do różnych zastosowań, przewidywalnością parametrów dostaw oraz dobrze rozpoznaną trwałością eksploatacyjną. Jednocześnie NAC wywiera istotną presję środowiskową wynikającą z eksploatacji złóż kruszyw naturalnych (zużycie zasobów, przekształcenie krajobrazu).

RAC różni się od NAC substytucją części lub całości NA. RA charakteryzują się dużą heterogenicznością (m.in. 20 – 56% obecnością zaprawy pierwotnej na ziarnach) oraz większą zmiennością poszczególnych partii w porównaniu z NA, zależną od pochodzenia gruzu oraz zastosowanej technologii odzysku. Każda rozbiórka generuje inny strumień odpadów, co przekłada się na różną jakość RA, uzależnioną od selektywnej rozbiórki, głębokości przeróbki oraz sposobu uszlachetnienia [33].

RA ma $2 \div 15\%$ większą nasiąkliwość niż NA (zwykle $\leq 2\%$), co przekłada się na większą wodożądność [34] i mniejszą gęstość właściwą – średnio $2,32 \text{ g/cm}^3$ (w przypadku NA to wartość $2,60 \div 2,70 \text{ g/cm}^3$) [35]. Skutkiem są odmienne wymagania projektowe dotyczące receptur RAC i NAC, które muszą uwzględniać reologię mieszanki betonowej i trwałość betonu. Obejmują one m.in. modyfikację proporcji wody oraz rodzaju spoiwa, a także dobór domieszek uplastyczniających i napowietrzających, tak aby utrzymać założoną urabialność, wytrzymałość oraz trwałość w danej klasie ekspozycji [36 ÷ 39]. W porównaniu z NAC, betony RAC wykazują o $3 \div 43\%$ zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie (zależnie od liczby zastąpienia), podobny kierunek zmian w przypadku wytrzymałości na rozciąganie, redukcję modułu sprężystości o ok. 25% oraz zmniejszenie wytrzymałości na zginanie do 15% [40, 41]. Z perspektywy zrównoważenia RAC charakteryzuje się wyraźnym potencjałem środowiskowym: ogranicza pozyskanie surowców pierwotnych, umożliwia zagospodarowanie odpadów budowlano-rozbiórkowych, zmniejszając strumień odpadów na składowiska; bilans korzyści zależy jednak od uwarunkowań kontekstowych (udział i rodzaj cementu, odległości transportowe surowców i odpadów, jakość RCA) [42].

Wyniki

Na podstawie ewaluacji danych [9] opisanych w Etapie I, ograniczonej do czterech aspektów (środowiskowego, ekonomicznego, jakości kruszyw oraz trwałości betonu) przedstawiono nowe zestawienie wyników dla RAC i NAC oraz dokonano ich oceny względem „idealnego” modelowego wyrobu. Zestawienie wyników przedstawiono w tabeli. W wariantcie pięcioaspektowym (z komponentem społecznym) [9] RAC uzyskuje 16 punktów na maksymalne 25, tj. 64% profilu „modelu idealnego”, podczas gdy NAC osią-

Summary of the scores for RAC and NAC, including an evaluation against the „ideal (model) concrete” criterion across four aspects
Podsumowanie punktacji RAC oraz NAC wraz z oceną wyników z kryterium „idealnego – modelowego betonu” w czterech aspektach

Aspect/Aspekt	Natural aggregate concrete (NA)/ Beton z kruszywami naturalnymi (NA)	Recycled aggregate concrete (RA)/ Beton z kruszywami z recyklingu (RA)	Model concrete – sustainability ideal /Modelowy beton – ideał zrównoważenia
Ecological/Ekologiczny	2 – satisfactory/2 – zadowalające	5 – highly favourable/5 – wysoce korzystne	5
Economic/Ekonomiczny	2 – satisfactory/2 – zadowalające	4 – favourable/4 – korzystne	5
Technical – aggregate quality/ Techniczny – jakość kruszyw	4 – favourable/4 – korzystne	1 – mediocre/1 – mierne	5
Technical – concrete durability/ Techniczny – trwałość betonu	4 – favourable/4 – korzystne	3 – acceptable/3 – akceptowalne	5
Total score/Suma punktów	12	13	20

definite advantage of RAC, primarily driven by the environmental and economic pillars and – additionally – the social dimension; at the same time, RAC comes second to NAC in technical areas, i.e. aggregate quality and concrete durability. After excluding the social aspect, the advantage of RA decreases: the total score for RA is 13/20, corresponding to 65% of the ideal, while NA achieves 12/20 (60%). This implies that the “technical core” favours NA, whereas the “environmental-economic core” favours RA. The most pronounced deficit of RA as compared to the ideal remains aggregate quality, whereas for NA the main shortcomings are environmental burdens and costs.

When considering aggregate quality aspects and their influence on concrete properties, natural aggregates (NA) received a score of 4 in both categories. This confirms their high quality and beneficial contribution to concrete performance. RA obtained the lowest score – 1. It should be noted, however, that after incorporating RA aggregate into the concrete mix, its final assessment increased by two points, which indicates that the adverse effect of the moderate quality of RA can be neutralised by applying an appropriate technological regime, particularly at its optimal proportion (25–30%), at which the concrete properties remain at an acceptable level. The scoring results are presented in Figure 4.

gnał 13/25 pkt, czyli 52%. Wynik wskazuje na pewną przewagę RAC, wynikającą głównie z filarów ekologicznego i ekonomicznego oraz – dodatkowo – społecznego; równocześnie RAC ustępuje NAC w obszarach technicznych, tj. jakości kruszyw i trwałości betonu. Po wyłączeniu aspektu społecznego przewaga RA maleje: suma punktów dla RA wynosi 13/20, co stanowi 65% ideału, a dla NA 12/20 (60%). Oznacza to, że „rdzeń techniczny” sprzyja NA, natomiast „rdzeń środowiskowo-ekonomiczny” sprzyja RA. Największym deficytem RA względem ideału pozostaje jakość kruszyw, podczas gdy dla NA są to przede wszystkim obciążenia środowiskowe i koszty.

Rozważając aspekty dotyczące jakości kruszyw oraz ich wpływ na właściwości betonu, kruszywo naturalne (NA) uzyskało w obu kategoriach ocenę 4. Potwierdza to jego bardzo dobrą jakość oraz pozytywny wpływ na właściwości betonu. RA uzyskało najniższą ocenę. Należy jednak zaznaczyć, że po zastosowaniu kruszywa RA w mieszance betonowej, jego końcowa ocena zwiększyła się o dwa punkty, co wskazuje na możliwość zneutralizowania negatywnego wpływu miernej jakości RA przez zastosowanie odpowiedniego reżimu technologicznego, szczególnie przy jego optymalnym udziale (25–30%), przy którym właściwości betonu pozostają na akceptowalnym poziomie. Wyniki ocen przedstawiono na rysunku 4.

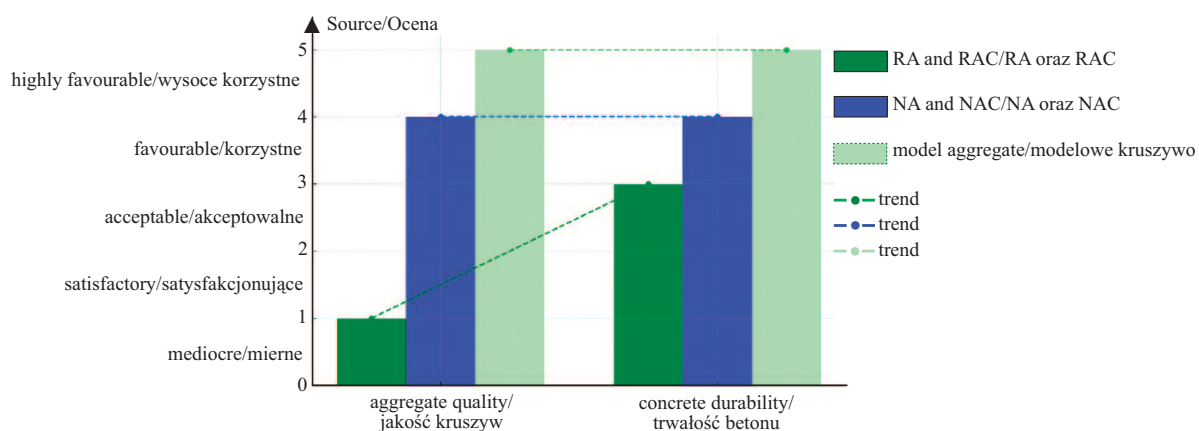


Fig. 4. Results of the assessment of RA and NA aggregates and the concretes containing them, referenced to the desired attributes of a sustainable product developed on the basis of the authors' scoring system for aggregate quality and concrete properties

Rys. 4. Wyniki oceny kruszyw RA i NA oraz betonów je zawierających, odniesione do pożądanych cech wyrobu zrównoważonego, opracowane na podstawie autorskiego systemu punktacji w zakresie jakości kruszywa i właściwości betonu

The applied scoring scale reflects the degree to which the desired features of a sustainable product are fulfilled, whereas the trend lines illustrate overall tendencies within the analysed aspects. For the environmental aspect, all ten opinions regarding RA-based concrete confirmed its positive ecological impact. According to the adopted scoring system, this result was classified as 5 (“highly favourable”), indicating that RAC meets the criteria of a sustainable product. The use of RA in concrete significantly reduces the extraction of natural aggregates, thereby contributing to the protection of environmental resources. In contrast, NAC received a lower rating – 2 “satisfactory”, mainly due to its contribution to environmental degradation. Within the economic aspect, RAC achieved the highest score – 4 “favourable”, indicating substantial potential for reducing production and transport costs. NAC was rated 2 “satisfactory”. Figure 5 presents the results of the multicriteria analysis based on the validation of the source data. For interpretation purposes, the results are shown in the form of two radar charts: (a) a variant corresponding to the recalculation of the source data, in which RAC achieves a favourable economic assessment in relation to NAC; and (b) a scenario-based variant demonstrating that an individual assessment of RAC may shift the evaluation perspective, for example, in a situation where RA production requires inputs comparable to those of NA production (thereby equalising the economic aspect). The area where the RAC and NAC fields partially overlap in relation to the ideal model defines a “hybrid zone”, in which the advantages of both materials can be combined. This can be interpreted as a potential design domain for hybrid concretes (NA+RA), where through an appropriate selection of the replacement level, RA upgrading,

Zastosowana skala punktowa odzwierciedla stopień spełnienia pożądanych cech zrównoważonego wyrobu, natomiast linie trendu ilustrują ogólne tendencje w analizowanych aspektach. W aspekcie środowiskowym, wszystkie 10 opinii dotyczących betonu z RA potwierdziły jego pozytywny wpływ ekologiczny. W przyjętej skali ocen sklasyfikowano ten wynik jako 5 – „bardzo korzystny”, co oznacza, że RAC spełnia kryteria zrównoważonego wyrobu. Zastosowanie RA w betonie pozwala znacznie ograniczyć eksploatację kruszyw naturalnych, przyczyniając się do ochrony zasobów środowiskowych. Dla porównania, NAC otrzymało niższą ocenę – 2 „zadowalające”, co wynika głównie z wpływu na degradację środowiska naturalnego. W aspekcie ekonomicznym, RAC uzyskało najwyższą ocenę – 4 „korzystna”, wskazując na istotne możliwości redukcji kosztów produkcji i transportu. NAC uzyskało ocenę 2 „zadowalająca”. Na rysunku 5 graficznie przedstawiono wyniki analizy wielokryterialnej na podstawie walidacji danych źródłowych. Na potrzeby interpretacji rezultaty zaprezentowano w postaci dwóch wykresów radarowych: (a) wariant odpowiadający wynikom rekalkulacji danych źródłowych, w którym RAC uzyskuje korzystną ocenę ekonomiczną względem NAC; (b) wariant scenariuszowy pokazujący, że indywidualne rozpatrywanie RAC może zmienić perspektywę oceny, np. w sytuacji, gdy produkcja RA wymaga nakładów porównywalnych z produkcją NA (wyrównanie aspektu ekonomicznego). Obszar częściowego nakładania się pól RAC i NAC względem modelu idealnego wyznacza „strefę hybrydową”, w której możliwe jest łączenie zalet obu wyrobów. Interpretować go można jako potencjalny zakres projektowy betonów hybrydowych (NA+RA), w których dzięki odpowiedniemu doborowi poziomu zastąpienia, uszlachetnieniu RA oraz korek-

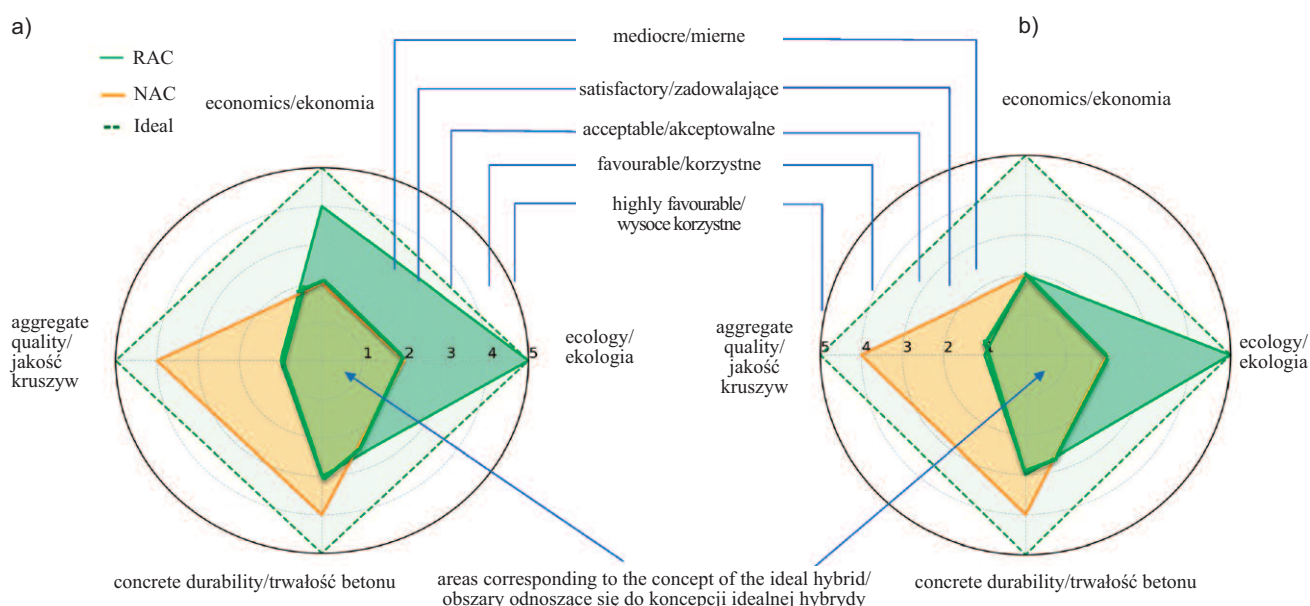


Fig. 5. Schematic presentation of the suggested multicriteria analysis results based on validation of the source data, taking into account in the scores for individual aspects: a) scenario with a favourable economic assessment of RAC relative to NAC; b) scenario with an equal economic assessment (RAC = NAC)

Rys. 5. Poglądowe przedstawienie sugerowanych wyników analizy wielokryterialnej na podstawie walidacji danych źródłowych, z uwzględnieniem zmian oceny w poszczególnych aspektach: a) wariant z korzystną oceną ekonomiczną RAC względem NAC; b) wariant z wyrównaną oceną ekonomiczną (RAC = NAC)

and mix design adjustments (w/c ratio, admixtures) it is possible to simultaneously maintain acceptable technical performance while benefiting from the environmental advantages of RAC.

In **Stage II**, the social impact was analysed by considering public acceptance of construction products recycling, minimal interference with the design of laboratory mix formulations, and the clarity of regulatory frameworks. Regarding social perception of RAC, the analysis indicates that the public positively evaluates actions aimed at reducing waste landfilling and limiting resource extraction, and supports initiatives promoting and implementing pro-environmental solutions (5/10 positive opinions in the reviewed publications) [43 ÷ 47]. Whereas NA is perceived negatively, as current consumption trends necessitate intensified aggregate extraction for construction and infrastructure purposes [43, 48, 49]. Publications focusing on RA emphasise the need to adapt formal legal frameworks regulations, as well as conventional laboratory mix designs, which would contribute to technological development of concrete and improve implementation potential [43, 48, 50, 51]. For NA, it is indicated that the traditional concrete producers know-how can be successfully transferred to the production of hybrid concrete [52]. A potentially positive perception of NA was also highlighted when effective resource management mechanisms are implemented (6/10 publications) [43, 48 ÷ 50, 53, 54]. The formal and legal conditions related to marketing of construction products apply equally to both RAC and NAC – both are classified as construction products [55].

RA and NA are also classified as construction products and are covered by the same harmonised standard [56]. The difference between RAC and NAC concerns the first stage of RA production, namely the fact that demolition rubble initially obtains the legal status of waste. Two issues should be distinguished. The first relates to the loss of waste status (RA production), which is preceded by type testing in accordance with harmonised standards. This stage does not apply to NA. The second issue is to define the quality criteria appropriate for a given application.

A key principle of the circular economy is the distinction between waste requiring processing and by-products that can be utilised without the need for further operations, as well as a clear identification of the “end-of-waste” point (termination of waste status) [57, 58]. Figure 6 presents the estimation of impact categories on social perception for RAC and NAC.

The harmonised standard for aggregates for concrete [56] is classification-based: it describes the product by assigning material classes and categories, without specifying its fields of application. Aggregates are classified according to their origin (NA, RA), size (fraction), type (fine, coarse, continuously graded, filler), and density (lightweight, heavyweight). The standard also divides properties into geometric, physical, and chemical categories and indicates test methods used for their assessment. Consequently, decisions regarding the use of aggregates in concrete and related design requirements are defined in concrete standards and accompanying application documents. Detailed guidance is

cie receptury (w/c, domieszki) możliwe jest jednocześnie utrzymanie akceptowalnych właściwości technicznych i wykorzystanie przewag środowiskowych RAC.

W **Etapie II** przeanalizowano oddziaływanie społeczne, uwzględniając akceptację recyklingu wyrobów budowlanych, minimalną ingerencję w projektowanie receptur laboratoryjnych oraz klarowność ram regulacyjnych. W odniesieniu do percepcji społecznej dotyczącej RAC wyniki analizy wskazują, że opinia publiczna przychylnie ocenia działania ograniczające składowanie odpadów i eksploatację surowców, a także popiera inicjatywy promujące oraz wdrażające rozwiązania proekologiczne (5/10 pozytywnych opinii w publikacjach) [43 ÷ 47]. Natomiast NA ma negatywny odbiór, ponieważ aktualna konsumpcja wymusza intensyfikację pozyskiwania kruszyw dla budownictwa i infrastruktury [43, 48, 49]. Publikacje poświęcone RA akcentują konieczność dostosowania regulacji ram formalnoprawnych oraz tradycyjnych receptur laboratoryjnych, co przyczyni się do rozwoju technologii betonu oraz możliwości wdrożeniowych [43, 48, 50, 51]. W przypadku NA wskazuje się, że know-how producentów betonu tradycyjnego z powodzeniem można zastosować do wytwarzania betonu hybrydowego [52]. Podkreślano potencjalnie pozytywny odbiór NA, gdy wdrażane są efektywne mechanizmy gospodarowania zasobami (6/10 publikacji) [43, 48 ÷ 50, 53, 54]. Uwarunkowania formalnoprawne związane z wprowadzeniem wyrobów budowlanych do obrotu obowiązują w jednakowym zakresie RAC i NAC – oba betony są wyrobami budowlanymi [55].

Kruszywa RA i NA również są wyrobami budowlanymi, objętymi tą samą normą zharmonizowaną [56]. Różnica pomiędzy RAC i NAC dotyczy pierwszej fazy produkcji RA, mianowicie jako gruz pochodzący z rozbiórki otrzymuje status odpadu. Należy rozróżnić dwie kwestie: pierwsza dotyczy utraty statusu odpadu (produkcja RA), co poprzedzają badania typu zgodnie z normami zharmonizowanymi. Etap ten nie dotyczy NA. Druga kwestia to określenie kryterium jakości właściwych w przypadku danego zastosowania.

Kluczowe w gospodarce obiegu zamkniętego jest rozróżnienie odpadów wymagających przetworzenia od produktów ubocznych, które można wykorzystać bez konieczności wdrażania dalszych czynności, oraz jasne określenie momentu „end-of-waste” (koniec fazy odpadu) [57, 58]. Na rysunku 6 poglądowo przedstawiono sugerowany rozkład wpływu kategorii na percepcję społeczną w przypadku RAC i NAC.

Norma zharmonizowana dotycząca kruszyw do betonu [56] ma charakter klasyfikacyjny: opisuje ona wyrób poprzez przypisanie klas i kategorii materiałowych, nie wskazując jednak obszarów zastosowania. Klasyfikuje kruszywa wg pochodzenia (NA, RA), wymiaru (frakcja), rodzaju (drobne, grube, o ciągłym uziarnieniu, wypełniające) oraz gęstości (lekkie, ciężkie). Wprowadza również podział właściwości na geometryczne, fizyczne i chemiczne oraz wskazuje metody badawcze służące do ich oceny. W konsekwencji decyzje dotyczące zastosowania kruszyw w betonie i wymagania projektowe są określone w normach dotyczących betonu oraz w towarzyszących im dokumentach aplikacyjnych. Szczegółowe wytyczne znajdu-

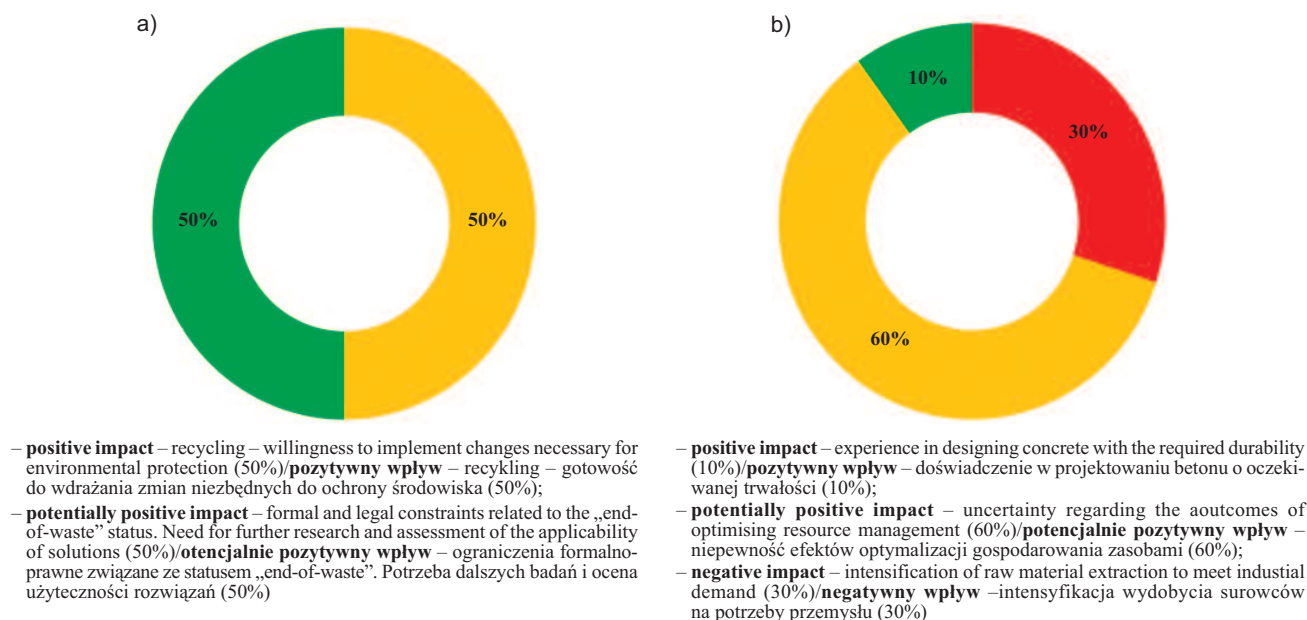


Fig. 6. Estimated distribution of category impact on social perception for RAC (a) and NAC (b)

Rys. 6. Oszacowany rozkład wpływu kategorii na percepcję społeczną w przypadku RAC (a) i NAC (b)

provided in standard [57], which is not a harmonised standard. The national complement to this standard is included in document [58] and its updated version published in 2025 [59]. The requirements defined therein differ for NA and RA, although testing is most often performed using the same methods. The most recent edition introduces changes to the requirements for RA. It distinguishes two RA grading ranges: coarse and fine, the latter being a new category. In addition, it specifies three types of coarse RA: A+, A, and B, depending on the [%] content of individual constituents derived from the demolition process.

RA type: A+ is a recycled aggregate with high resistance to fragmentation ($LA \leq 35$) and a density of $\geq 2300 \text{ kg/m}^3$. It may be used at up to 100% replacement in exposure classes X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XF1, XA1, XD1. Despite the existence of formal regulatory frameworks, defined technical requirements for recycled aggregates, and numerous scientific studies presenting good practices, industrial applications remain limited [60]. Researchers attribute this to insufficient communication and cooperation among the links of the supply chain from waste generation to its reuse in concrete i.e., to inadequate industrial symbiosis (IS) [61]. Studies demonstrate that cooperation between enterprises enables the effective use of concrete waste for RAC production in line with circular economy principles. An example of successful implementation of coarse recycled aggregate in Sardinia also highlights the importance of synergy among entities [62].

The literature review indicates a potentially favourable impact of using recycled materials in construction, while simultaneously highlighting the need for more in-depth analyses that would enable informed decision-making and support the wider implementation of such solutions in engineering practice [63 ÷ 66].

ją się w normie [57], która nie jest normą zharmonizowaną. Krajowe uzupełnienie do tej normy zawarto w dokumencie [58] oraz jego aktualizacji, wydanie z 2025 r. [59]. Zawarte w nich wymagania różnią się dla NA i RA, choć badania najczęściej wykonuje się z zastosowaniem tych samych metod. Najnowsze wydanie wprowadza zmiany wymagania wobec RA. Wyodrębnia dwa wymiary uziarnienia RA: grube i drobne, ostatnie stanowi nowość. Dodatkowo wskazuje trzy typy RA o grubym uziarnieniu: A+, A, oraz B, w zależności od ilości [%] poszczególnych składowych pochodzących z procesu rozbiórki.

Typ RA: A+, to kruszywo o dużej odporności na rozdrabnianie ($LA \leq 35$) oraz gęstości $\geq 2300 \text{ kg/m}^3$. Można je zastosować w ilości 100% w klasie ekspozycji X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XF1, XA1, XD1. Mimo istnienia wymagań technicznych dotyczących kruszyw z recyklingu oraz licznych badań naukowych prezentujących dobre praktyki, wciąż nie ma wielu zastosowań przemysłowych [60]. Badacze wiążą to z niewystarczającą komunikacją i współpracą między ogniwami łańcucha, począwszy od wytworzenia odpadu po jego ponowne wykorzystanie w betonie, czyli z niedostateczną „industrial symbiosis” (IS) [61]. Analizy dowodzą, że współpraca przedsiębiorstw umożliwia efektywne wykorzystanie odpadów betonowych do wytwarzania RAC, zgodnie z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym (circular economy). Przykład skutecznego zastosowania grubego kruszywa z recyklingu na Sycylii również podkreśla znaczenie synergii między podmiotami [62].

Analiza literatury wskazuje na potencjalnie korzystny wpływ zastosowania wyrobów z recyklingu w budownictwie, jednocześnie wskazując na potrzebę pogłębionych analiz, które umożliwią podejmowanie świadomych decyzji i upowszechnienie ich zastosowania w praktyce inżynierskiej [63 ÷ 66].

Summary and discussion

Following the calibration of the original assumptions adopted in [9], the multi-criteria assessment (covering five aspects: environmental, economic, social perception, aggregate quality, and concrete durability) was modified by separating social perception into an independent module. This adjustment enabled the sustainability level to be evaluated against the modelled „ideal” profile and allowed a clear comparison between RAC and NAC. The assessment accuracy increased after extracting the social component as a separate module; however, this did not compromise the holistic approach encompassing the pillars of environment–economy–aggregate quality–concrete durability. As a result, a smaller difference between RAC and NAC was obtained (RAC: 13 points out of 20, i.e., 65% of the ideal profile vs NAC: 12 points out of 20, i.e., 60%). It was demonstrated that the advantage of RCA in the five-aspect variant (16/25 vs 13/25 points) is partly strengthened by a high-inertia component, namely the social pillar. It was confirmed that both solutions, when analysed separately, remain significantly distant from the „ideal” profile. Separating the social module increased the diagnostic resolution of the assessment within the pillars of environment–economy–aggregate quality–durability and revealed factors distorting social perception, particularly legal and regulatory conditions, as also confirmed in [38].

A critical evaluation of the presented multi-criteria assessment requires acknowledging its limitations. The uncertainty of the method arises from the adoption of subjective categorisation procedures and the use of an arbitrary scoring scale. Nevertheless, the obtained results and relative differences remain consistent with observations reported in the literature as well as with engineering experience regarding the influence of recycled aggregates on concrete properties and environmental performance. It should be emphasised that the effective application of this approach requires flexible adaptation to project-specific conditions (local context, regulatory framework, and stakeholder needs) [29, 30, 67].

Conclusions

The multi-criteria analysis constitutes a tool enabling a comprehensive evaluation of interrelationships between the key aspects shaping the sustainability level of products. In the case of RAC, it is essential to assess each specific application individually in order to reliably determine the actual “net gain” from an environmental, economic, and technical perspective. The use of RA cannot be automatically equated with a more sustainable solution – it requires verification as to whether the observed improvement is not limited to a single aspect, achieved at the expense of deterioration in others. In addition:

- the analysis of social perception demonstrated that the change in waste status (“end-of-waste”) remains crucial. It directly affects the ecological and economic aspects, determining the possibility of fully integrating RA into the economic cycle;

- hybrid concrete (RA+NA) achieved the highest level of sustainability, obtaining the most favourable results in the environmental and economic aspects. This indicates a direction

Podsumowanie i dyskusja

W wielokryterialnej ocenie RAC i NAC dokładność zwiększyła się po wyodrębnieniu komponentu społecznego jako osobnego modułu. Nie naruszyło to jednak holistycznego ujęcia obejmującego aspekty: ekologia-ekonomia-jakość kruszyw-trwałość betonu. Uzyskano mniejszą różnicę pomiędzy RAC a NAC (RAC: 13 punktów na 20), 65% ideału vs NAC (12 punktów na 20), 60%. Wykazano, że przewaga RCA w wariantcie pięcioaspektowym (16/25 vs 13/25 pkt) jest w części wzmacniana przez komponent o wysokiej inercji (społeczny). Potwierdzono, że oba rozwiązania, rozpatrywane osobno, pozostają istotnie oddalone od profilu „idealnego”. Wydzielenie modułu społecznego zwiększyło rozdzielczość diagnostyczną oceny w filarach ekologia-ekonomia-jakość-trwałość oraz uwidoczniło czynniki zaburzające percepcję społeczną, przede wszystkim uwarunkowania prawno-regulacyjne [38].

Krytyczne spojrzenie na przedstawioną wielokryterialną ocenę wymaga wymierzenia jej ograniczeń. Niepewność metody wynika z przyjęcia subiektywnych procedur kategoryzacji oraz z użycia arbitralnej skali ocen. Jednakże uzyskane wyniki i różnice względne pozostają spójne z obserwacjami raportowanymi w literaturze oraz doświadczeniem inżynierskim dotyczącym wpływu kruszywa RA na właściwości betonu i bilans środowiskowy. Warto podkreślić, że skuteczne zastosowanie tego podejścia wymaga elastycznego dostosowania do specyficznych uwarunkowań projektu (warunki lokalne, ramy regulacyjne, potrzeby interesariuszy) [29, 30, 67].

Wnioski

Analiza wielokryterialna stanowi narzędzie umożliwiające kompleksową ocenę zależności między kluczowymi aspektami kształtującymi stopień zrównoważenia wyrobów. W odniesieniu do betonu RAC zasadnicze znaczenie ma indywidualne rozpatrzenie konkretnego przypadku, pozwalające na wiarygodną ocenę rzeczywistego „zysku netto” w ujęciu środowiskowym, ekonomicznym i technicznym. Zastosowanie kruszywa RA nie może być z góry utożsamiane z rozwiązaniem bardziej zrównoważonym – wymaga weryfikacji, czy poprawa nie ogranicza się do wybranego aspektu, kosztem pogorszenia pozostałych. Dodatkowo:

- w wyniku analizy percepcji społecznej wykazano, że zmiana statusu odpadu (end-of-waste), pozostaje kluczowa. Oddziałuje ona bezpośrednio na aspekty ekologiczne oraz ekonomiczne, determinując możliwość pełnego włączenia kruszywa RA do obiegu gospodarczego;

- beton hybrydowy (RA+NA) uzyskał najwyższy stopień zrównoważenia, osiągając najkorzystniejsze wyniki w aspektach ekologicznych i ekonomicznych. Wskazuje to kierunek dalszych prac, uwzględniających reżim technologiczny przy produkcji tego typu mieszanek, m.in. poprzez zastosowanie cementów niskoemisyjnych, odpowiedni dobór substytucji RA oraz użycie dodatków i domieszek kształtujących reologię i trwałość betonu;

for further investigation, taking into account the technological regime in producing such mixes, including the use of low-emission cements, an appropriate selection of the RA substitution level, and the use of mineral additions and chemical admixtures shaping concrete rheology and durability;

■ the conducted literature analysis did not identify any concrete that meets all the desired sustainability features. Within the four-aspect framework, RAC achieved 65% of the “ideal” profile, whereas NAC reached 60%. In practice, this implies that the ideal should be treated as a development-oriented directional vector rather than an absolute compliance criterion.

Further pilot studies will be aimed at validating the multi-criteria analysis tool by incorporating weighting factors for individual aspects, which will enable a more precise identification of applicability pathways and implementation priorities.

The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education (Poland), research project number: NZM-001.

Received: 12.10.2025

Revised: 18.12.2025

Published: 26.01.2026

■ w wyniku przeprowadzonej analizy literatury nie zidentyfikowano betonu spełniającego wszystkie pożądane cechy zrównoważenia. W ujęciu czteroaspektowym beton RAC osiąga 65% profilu „ideału”, a NAC – 60%. W praktyce oznacza to traktowanie ideału jako wektora kierunku rozwoju, a nie bezwzględnego kryterium spełnienia.

Kolejne badania pilotażowe będą ukierunkowane na validację narzędzia analizy wielokryterialnej z uwzględnieniem wag poszczególnych aspektów, co umożliwi precyzyjniejsze wskazanie kierunków użyteczności i priorytetów wdrożeń.

Badania zostały sfinansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, numer tematu naukowego: NZM-001.

Artykuł wpłynął do redakcji: 12.10.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 18.12.2025 r.

Opublikowano: 26.01.2026 r.

Literature

- [1] Nagapan S, Rahman IA, Asmi A, Memon AH, Latif I. Issues on Construction Waste: The Need for Sustainable Waste Management.
- [2] Michalik A, Chyliński F, Bobrowicz J, Pichór W. Effectiveness of Concrete Reinforcement with Recycled Tyre Steel Fibres. *Materials* 2022, 15. <https://doi.org/10.3390/ma15072444>.
- [3] Growing Global Aggregates Sustainably. <https://webcitation.org/example-link> (zarchiwizowano 8 grudnia 2025 r.)
- [4] Mills-Beale J, You Z. The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates. *Constr Build Mater.* 2010; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.046>.
- [5] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics (zarchiwizowano 8 grudnia 2025 r.).
- [6] Czamecki L. Zrównoważone wyroby budowlane – piękna idea, konieczność cywilizacyjna czy też imperatyw termodynamiczny. *Materiały Budowlane.* 2022; <https://doi.org/10.15199/33.2022.01.09>.
- [8] Czamecki L, Deja J. Zrównoważone budownictwo: w poszukiwaniu prometeuszowej transformacji. *Inżynieria i Budownictwo.* 2021; 77 (7): 300–308.
- [8] Czamecki L, Justnes H. Sustainable & durable concrete. *Cement Lime Concrete* 2012; 17 (6): 341–362.
- [9] Bardan M, Czamecki L. Green Recycled Aggregate in Concrete: Feasibility Study. *Materials* 2025, 18. <https://doi.org/10.3390/ma18030488>.
- [10] Małek M, Łasica W, Jackowski M., Kadela M. Effect of waste glass addition as a replacement for fine aggregate on properties of mortar. *Materials* 2020; <https://doi.org/10.3390/ma13143189>.
- [11] Giergiczny Zbigniew Spoiwa cementowe – normalizacja, właściwości specjalne i perspektywy rozwoju. *dnibetonu.com* 2025; https://www.dnibetonu.com/wp-content/pdfs/2014/Giergiczny_Garbacik.pdf.
- [12] Behera M, Bhattacharyya SK, Minocha AK, Deoliya R, Maiti S. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Constr Build Mater.* 2014; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003> Get rights and content.
- [13] Özkan H, Kabay N, Miyan N. Properties of Cold-Bonded and Sintered Aggregate Using Washing Aggregate Sludge and Their Incorporation in Concrete: A Promising Material. *Sustainability (Switzerland)* 2022; <https://doi.org/10.3390/su14074205>.
- [14] Kaptan BK, Aguiar JLB. Approaching Green Building Concept by Eco-Efficient Construction and Demolition Waste (CDW) in Portugal. *Springer Nature Switzerland.* 2023.
- [15] Helmy SH, Tahwia AM, Mahdy MG, Abd Elrahman M, Abed MA, Youssef O. The Use of Recycled Tire Rubber, Crushed Glass, and Crushed Clay Brick in Lightweight Concrete Production: A Review. *Sustainability (Switzerland)* 2023; <https://doi.org/10.3390/su151310060>.
- [16] Kim J, Grabiec AM, Ubysz A, Yang S, Kim N. Influence of Mix Design on Physical, Mechanical and Durability Properties of Multi-Recycled Aggregate Concrete. *Materials* 2023; <https://doi.org/10.3390/ma16072744>.
- [17] Piccinalli A, Diotti A, Plizzari G, Sorlini S. Impact of Recycled Aggregate on the Mechanical and Environmental Properties of Concrete: A Review. *Materials* 2022; <https://doi.org/10.3390/ma15051818>.
- [18] Hatungimana D, Yazıcı Ş, Mardani-Aghabaglou A. Effect of recycled concrete aggregate quality on properties of concrete; 2020. <https://doi.org/10.3992/1943-4618.15.2.57>.
- [19] Kou SC, Poon CS. Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater.* 2015; <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.035>.
- [20] Žurauskienė R, Valentukevičiūtė M. Experimental research on quality parameters of recycled concrete. *Materials* 2020; <https://doi.org/10.3390/ma13112538>.
- [21] Huang SC, Chang FC, Lo SL, Lee MY, Wang CF, Lin, J. D. Production of lightweight aggregates from mining residues, heavy metal sludge, and incinerator fly ash. *J Hazard Mater.* 2007; <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.094>.
- [22] Meddah MS, Al-Harthi A, Ismail MA. Recycled concrete aggregates and their influences on performances of low and normal strength concretes. *Buildings.* 2020, 10. <https://doi.org/10.3390/buildings10090167>.
- [23] Omary S, Ghorbel E, Wardeh G. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Constr Build Mater.* 2016; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.042>.
- [24] Bravo M, De Brito J, Pontes J, Evangelista L. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Constr Build Mater.* 2015; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103>.
- [25] Cantero B, Sáez del Bosque IF, Matías A, Medina C. Statistically significant effects of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of structural concretes. *Constr Build Mater.* 2018; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.060>.
- [26] Nedeljković M, Visser J, Šavija B, Valcke S, Schlangen E. Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. *Journal of Building Engineering.* 2021; <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102196>.

- [27] Peiris D, Gunasekara C, Law DW, Patrisia Y, Tam VWY, Setunge S. Impact of treatment methods on recycled concrete aggregate performance: a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2025; <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36497-y>.
- [28] Giergiczny ZBM. *Betony o obniżonym śladzie węglowym*; Polski Cement; Stowarzyszenie Producentów Cementu: Kraków, 2025.
- [29] Marinković S, Josa I, Braymand S, Tošić N. Sustainability assessment of recycled aggregate concrete structures: A critical view on the current state-of-knowledge and practice. *Structural Concrete*. 2023; <https://doi.org/10.1002/suco.202201245>.
- [30] Bajracharya S, Phuyal S, Acharya S, Timilsena S, Regmi S, Chaudhary UK, Nepal B, Shrestha AR. Sustainability assessment of recycled concrete aggregate in the Kathmandu Valley: a comparative analysis with natural coarse aggregate. *Discover Civil Engineering*. 2025; <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00208-w>.
- [31] Barrak E, Rodrigues C, Antunes CH, Freire F, Dias LC. Applying multi-criteria decision analysis to combine life cycle assessment with circularity indicators. *J Clean Prod* 2024; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141872>.
- [32] Consensus. Available online: [https://consensus.app/search/\(zarchiwizowano+11+listopad+2024\)](https://consensus.app/search/(zarchiwizowano+11+listopad+2024)).
- [33] Junior GAF, Leite JCT, Mendez G. de P, Haddad AN, Silva JAF, da Costa BBF. A Review of the Characteristics of Recycled Aggregates and the Mechanical Properties of Concrete Produced by Replacing Natural Coarse Aggregates with Recycled Ones – Fostering Resilient and Sustainable Infrastructures. *Infrastructures (Basel)* 2025, 10. <https://doi.org/10.3390/infrastructure-s10080213>.
- [34] Kepniak M, Chyliński F, Górecka E, Goljan A. The influence of water pre-treated recycled aggregate on the required time of concrete care. *Archives of Civil Engineering*. 2025; <http://doi:10.24425/ace.2025.153335>.
- [35] Pani L, Francesconi L, Rombi J, Mistretta F, Sassu M, Stochino F. Effect of parent concrete on the performance of recycled aggregate concrete. *Sustainability (Switzerland)* 2020; <https://doi.org/10.3390/su12229399>.
- [36] Miraldo S, Lopes S, Pacheco-Torgal F, Lopes A. Advantages and shortcomings of the utilization of recycled wastes as aggregates in structural concretes. *Constr Build Mater*. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123729>.
- [37] Wijayasundara M, Mendis P, Crawford RH. Net incremental indirect external benefit of manufacturing recycled aggregate concrete. *Waste management*. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.042>.
- [38] Silva RV, de Brito J, Dhir RK. Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review. *Constr Build Mater*. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149>.
- [39] Fookes PG. An introduction to the influence of natural aggregates on the performance and durability of concrete. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 1980; <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1980.013.04.02>.
- [40] Hafez H, Kurda R, Kurda R, Al-Hadad B, Mustafa R, Ali B. A critical review on the influence of fine recycled aggregates on technical performance, environmental impact and cost of concrete. *Applied Sciences (Switzerland)* 2020; <https://doi.org/10.3390/app10031018>.
- [41] Silva S, Evangelista L, de Brito J. Durability and shrinkage performance of concrete made with coarse multi-recycled concrete aggregates. *Constr Build Mater* 2021; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121645>.
- [42] Martínez-Lage I, Vázquez-Burgo P, Velay-Lizancos M. Sustainability evaluation of concretes with mixed recycled aggregate based on holistic approach: Technical, economic and environmental analysis. *Waste Management*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.044>.
- [43] Dias A, Nezami S, Silvestre J, Kurda R, Silva R, Martins I, de Brito J. Environmental and Economic Comparison of Natural and Recycled Aggregates Using LCA. *Recycling*. 2022; <https://doi.org/10.3390/recycling7040043>.
- [44] Hubert J, Zhao Z, Michel F, Courard L. Effect of Crushing Method on the Properties of Produced Recycled Concrete Aggregates. *Buildings* 2023; <https://doi.org/10.3390/buildings13092217>.
- [45] Merli R, Preziosi M, Acampora A, Lucchetti MC, Petrucci E. Recycled fibers in reinforced concrete: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119207>.
- [46] Han Y, Yang Z, Ding T, Xiao J. Environmental and economic assessment on 3D printed buildings with recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123884>.
- [47] Salesa Á, Pérez-Benedicto JA, Colorado-Aranguren D, López-Julián PL, Esteban LM, Sanz-Baldú J, Olivares D. Physico – mechanical properties of multi – recycled concrete from precast concrete industry. *Journal of Cleaner Production*. 2017; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.058>.
- [48] Peri A, Rachedi O. Varotto Public Investment in a Production Network: Aggregate and Sectoral Implications. *Review of Economics and Statistics*. 2023; https://doi.org/10.1162/rest_a_01391.
- [49] Corner A, Pidgeon N. Like artificial trees? The effect of framing by natural analogy on public perceptions of geoengineering. *Clim Change*. 2015; <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1148-6>.
- [50] Page BI, Shapiro RY, Dempsey GR. What Moves Public Opinion? 1987; <https://doi.org/10.2307/1960777>.
- [51] McGinnis MJ, DM, DLRA, WBD, KYC. Quantified sustainability of recycled concrete aggregates. *Magazine of Concrete Research*. 2017; <https://doi.org/10.1680/jmacr.16.00338>.
- [52] Braga AM, Silvestre JD, de Brito J. Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *Journal of cleaner production*. 2017; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.057>.
- [53] Drew LJ, Langer WH, Sachs JS. Environmentalism and Natural Aggregate Mining. 2002; <https://doi.org/10.1023/A:1014283519471>.
- [54] Joslyn MR. The Public Nature of Personal Opinion: The Impact of Collective Sentiment on Individual Appraisal. 1997; <https://doi.org/10.1023/A:1024847805976>.
- [55] Kepniak M. The influence of the recycled aggregate preparing method on selected technical characteristics of concrete. *Concrete Days Conference Tradition and Modernity*. Cement Manufacturers Association. 2023. s. 305–316.
- [56] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu.
- [57] PN-EN 206:2013+A2:2021 Beton – Specyfikacja, właściwości, produkcja i zgodność.
- [58] PN-B-06265:2022-08 Beton – Specyfikacja, właściwości, produkcja i zgodność – Załącznik krajowy PN-EN 206+A2: 2021-08.
- [59] PN-B-06265_2022-08_Az1_2025-08P-2 Specyfikacja, właściwości, produkcja i zgodność – Załącznik krajowy PN-EN 206+A2:2021-08.
- [60] Kim J. Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. *Constr Build Mater*. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127071>.
- [61] Yu Y, Yazan DM, Bhochhibhoya S, Volker L. Towards Circular Economy through Industrial Symbiosis in the Dutch construction industry: A case of recycled concrete aggregates. *J Clean Prod*. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126083>.
- [62] Pani L, Rombi J, Francesconi L, Mereu A. *Environmental Engineering and Management*; 2020; <https://doi.org/10.30638/eemj.2020.177>.
- [63] Salehi S, Arashpour M, Kodikara J, Guppy R. Sustainable pavement construction: A systematic literature review of environmental and economic analysis of recycled materials. *Journal of Cleaner Production*. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127936>.
- [64] Faleschini F, Zanini MA, Pellegrino C, Pasinato S. Sustainable management and supply of natural and recycled aggregates in a medium-size integrated plant. *Waste Management*. 2016; <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.013>.
- [65] Addicott ET, Fenichel EP. Spatial Aggregation and the Value of Natural Capital. *Journal of Environmental Economics and Management*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2019.03.001>.
- [66] Suárez Silgado S, Calderón Valdiviezo L, Gassó Domingo S, Roca X. Multi-criteria decision analysis to assess the environmental and economic performance of using recycled gypsum cement and recycled aggregate to produce concrete: The case of Catalonia (Spain). *Resour Conserv Recycl*. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.023>.
- [67] Tošić N, Marinković S, Dašić T, Stanić M. Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. *Journal of cleaner production*. 2015; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.070>.