ROZPRAWY MONOGRAFIE

382

DANIEL WAŁACH

Metodyka zrównoważonej oceny monolitycznych konstrukcji żelbetowych w ich cyklu życia

WYDAWNICTWA AGH

KRAKÓW 2025

Rozprawy
Monografie 382

382 DISSERTATIONS
MONOGRAPHS

DANIEL WAŁACH

Methodology for the sustainable assessment of monolithic reinforced concrete structures throughout the life cycle

AGH UNIVERSITY PRESS

KRAKOW 2025

ROZPRAWY
MONOGRAFIE 382

DANIEL WAŁACH

Metodyka zrównoważonej oceny monolitycznych konstrukcji żelbetowych w ich cyklu życia

WYDAWNICTWA AGH

KRAKÓW 2025

Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2025
Creative Commons CC-BY 4.0

ISBN 978-83-68219-71-5 (print)
ISBN 978-83-68219-72-2 (PDF)
ISSN 0867-6631

https://doi.org/10.7494/978-83-68219-72-2

Recenzenci:
prof. dr hab. inż. Edyta Plebankiewicz
dr hab. inż. Dariusz Bajno, prof. PB

Afiliacja autora:
Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami
Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki
al. A. Mickiewicza 30
30-059 Kraków

Wydanie monografii finansowane ze środków programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza" w AGH

Opieka wydawnicza i korekta techniczna: *Monika Filipek*

Korekta: *Magdalena Osica, www.literackapracownia.pl*

Skład komputerowy: *Wydawnictwo JAK*

Wydawnictwa AGH
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel. 12 617 32 28, 12 636 40 38
e-mail: redakcja@wydawnictwoagh.pl
www.wydawnictwo.agh.pl

Spis treści

Streszczenie 9

Summary 11

Wykaz ważniejszych pojęć 13

1. Wprowadzenie 17
1.1. Uzasadnienie podjęcia tematu 17
1.2. Cel pracy 24
1.3. Zakres pracy 24

2. Ocena cyklu życia w budownictwie 27
2.1. Ewolucja oceny cyklu życia w aspekcie zrównoważonego rozwoju 27
2.2. Normowe zasady zrównoważonej oceny konstrukcji żelbetowych 30
2.3. Granica systemu i fazy cyklu życia obiektu budowlanego 32
2.4. Granice systemu dla monolitycznych konstrukcji żelbetowych 38

3. Kryterium techniczne w zrównoważonej ocenie konstrukcji żelbetowych 43
3.1. Beton jako materiał konstrukcyjny 43
3.1.1. Betony wysokowartościowe i ultrawysokowartościowe 44
3.1.2. Beton samozagęszczalny 45
3.1.3. Fibrobeton 46
3.1.4. Beton geopolimerowy 47
3.1.5. Beton z kruszywem z recyklingu i z kruszywem alternatywnym 47
3.2. Wymagania projektowo-techniczne stawiane konstrukcjom żelbetowym 51
3.2.1. Standardy i wytyczne dotyczące projektowania konstrukcji żelbetowych 51
3.2.2. Dobór klasy betonu i składu mieszanki betonowej 53
3.2.3. Projektowanie konstrukcji z wykorzystaniem metod optymalizacyjnych 57
3.3. Ekwiwalent funkcjonalny 60
3.4. Analiza wybranych składów mieszanek betonowych 62

4. Kryterium środowiskowe w zrównoważonej ocenie konstrukcji żelbetowych 64
4.1. Metodyka oceny środowiskowej w cyklu życia obiektu budowlanego 64
4.1.1. Regulacje prawne i normy techniczne w ocenie środowiskowej 64
4.1.2. Cykl życia betonu w ujęciu środowiskowym 67

4.1.3. Zjawisko karbonatyzacji betonu w ujęciu środowiskowym ... 71
4.1.4. Kategorie wpływu i wskaźniki wykorzystania zasobów w analizie LCA ... 73
4.1.5. Analiza i interpretacja wyników oceny środowiskowej ... 79
4.2. Czynniki wpływające na ocenę środowiskową konstrukcji żelbetowych ... 81
4.2.1. Skład mieszanki betonowej ... 83
4.2.2. Rodzaj cementu ... 84
4.2.3. Struktura źródeł energii (miks energetyczny) ... 86
4.2.4. Procesy transportowe ... 88
4.2.5. Praca maszyn budowlanych ... 92
4.3. Jednostkowa ocena środowiskowa wybranych mieszanek betonowych i stali zbrojeniowej ... 92
4.3.1. Opis zastosowanego modelu środowiskowego ... 92
4.3.2. Analiza wpływu środowiskowego mieszanek betonowych ... 98
4.3.3. Analiza wpływu środowiskowego stali zbrojeniowej ... 110
4.3.4. Zyski i straty poza systemowe ... 113

5. Kryterium ekonomiczne w zrównoważonej ocenie konstrukcji żelbetowych ... 115
5.1. Analiza kosztów cyklu życia LCC obiektów budowlanych ... 115
5.1.1. Koszty budowy ... 116
5.1.2. Koszty eksploatacji ... 118
5.1.3. Koszty końca cyklu życia ... 119
5.2. Normowe zasady analizy kosztów w cyklu życia ... 120
5.3. Rachunek LCC w odniesieniu do obiektów budowlanych ... 125
5.4. Analiza ryzyka w ocenie kosztów cyklu życia ... 129
5.5. Analiza cen jednostkowych mieszanek betonowych oraz stali zbrojeniowej ... 132

6. Kryterium społeczne w zrównoważonej ocenie konstrukcji żelbetowych ... 136
6.1. Standardy i wytyczne dotyczące oceny społecznej ... 136
6.2. Czynniki wpływające na ocenę społeczną konstrukcji żelbetowych ... 142
6.2.1. Hałas ... 143
6.2.2. Wibracje ... 144
6.2.3. Zapylenie ... 145
6.3. Jednostkowa ocena społeczna konstrukcji żelbetowych w cyklu życia ... 146
6.3.1. Model oceny oddziaływania hałasu ... 146
6.3.2. Model oceny oddziaływania wibracji ... 152
6.3.3. Model oceny oddziaływania zapylenia ... 154
6.3.4. Analiza oceny społecznej konstrukcji żelbetowej ... 157

7. Systemy wspomagania decyzji w zrównoważonej ocenie konstrukcji żelbetowych ... 161
7.1. Podstawowe kryteria wyboru wariantu projektowego ... 161
7.2. Złożone metody wspomagania decyzji stosowane w budownictwie ... 161
7.2.1. Metoda AHP ... 163
7.2.2. Metoda TOPSIS ... 166
7.2.3. Metody ELECTRE ... 168
7.2.4. Inne metody wielokryterialne ... 170
7.3. Metodyka zrównoważonej oceny konstrukcji żelbetowych ... 172

8. Zrównoważona ocena przykładowej konstrukcji obiektu budowlanego 175
8.1. Wprowadzenie 175
8.2. Charakterystyka analizowanego obiektu budowlanego 177
8.3. Analiza kryterium technicznego zrównoważonej oceny 178
8.3.1. Obliczenia statyczne i wymiarowanie 179
8.3.2. Rezultaty wymiarowania konstrukcji 185
8.3.3. Ekwiwalent funkcjonalny 187
8.4. Analiza kryterium środowiskowego zrównoważonej oceny 188
8.4.1. Wskaźnik Ecopoint dla mieszanek betonowych 188
8.4.2. Wskaźnik Ecopoint dla stali 190
8.4.3. Wskaźnik Ecopoint dla konstrukcji żelbetowej 191
8.4.4. Wskaźniki GWP i ADP-fossils dla konstrukcji żelbetowej 192
8.5. Analiza kryterium ekonomicznego zrównoważonej oceny 195
8.5.1. Założenia do analizy 195
8.5.2. Analiza wartości kosztorysowej fazy A i C 196
8.5.3. Analiza wartości kosztorysowej fazy A oraz kapitalizowanej fazy C 198
8.5.4. Analiza wartości kosztorysowej fazy A oraz zdyskontowanej fazy C 201
8.5.5. Analiza wartości rezydualnej w ramach fazy D 205
8.6. Analiza kryterium społecznego zrównoważonej oceny 207
8.7. Zrównoważona ocena analizowanych wariantów konstrukcyjno-materiałowych 209
8.7.1. Ocena wariantów konstrukcyjno-materiałowych uproszczoną metodą AHP 210
8.7.2. Ocena wariantów konstrukcyjno-materiałowych metodą TOPSIS 213
8.7.3. Ocena wariantów konstrukcyjno-materiałowych metodą SAW 215
8.7.4. Wpływ wag kryteriów na ocenę wariantów konstrukcyjno-materiałowych 216
9. Podsumowanie i wnioski 220

Bibliografia 226

Załącznik 1. Metodyka zebrania danych bibliograficznych przedstawionych w rozdziale 1 245

Załącznik 2. Kalkulacja wartości kosztorysowej W_k dla jednego z rozpatrywanych wariantów konstrukcyjno-materiałowych – wariant W-1 M1 – NSC 30/37 246

DANIEL WAŁACH

Metodyka zrównoważonej oceny monolitycznych konstrukcji żelbetowych w ich cyklu życia

Streszczenie

Praca przedstawia metodykę zrównoważonej oceny konstrukcji żelbetowych, uwzględniającą podstawowe aspekty zrównoważonego budownictwa – środowiskowe, ekonomiczne i społeczne – w odniesieniu do cyklu życia konstrukcji. Wobec rosnących wymagań dotyczących odpowiedzialności środowiskowej oraz dążenia do efektywności kosztowej i społecznej akceptacji rozwiązań inżynierskich, konieczne wydaje się zintegrowane podejście do oceny projektowanych i realizowanych inwestycji budowlanych. Głównym celem pracy jest zatem nie tylko teoretyczne opracowanie, lecz także praktyczna weryfikacja autorskiej metodyki, umożliwiającej kompleksową ocenę konstrukcji żelbetowych w kontekście zrównoważonego rozwoju.

W pierwszej części pracy przeprowadzono analizę istniejących metod oceny cyklu życia: środowiskowej (LCA, ang. *life cycle assessment*), ekonomicznej (LCC, ang. *life cycle costing*) oraz społecznej (S-LCA, ang. *social life cycle assessment*). Przedstawiono ewolucję podejścia do zrównoważonej oceny obiektów budowlanych, zwracając uwagę na postępującą integrację tych trzech perspektyw w ramach tzw. LCSA (ang. *life cycle sustainability assessment*). Przedstawiono aktualny stan prawny i normatywny, kładąc nacisk na dokumenty, takie jak PN-EN 15643:2021 oraz PN-EN 15804+A2:2020, które definiują zasady opracowywania i stosowania metod oceny zrównoważonego rozwoju budynków i wyrobów budowlanych.

W kolejnych rozdziałach monografii przeprowadzono szczegółową identyfikację kluczowych czynników wpływających na wynik zrównoważonej oceny konstrukcji żelbetowych. Uwzględniono zarówno dane literaturowe, jak i wyniki własnych analiz, co umożliwiło wskazanie procesów najbardziej istotnych dla poszczególnych aspektów oceny.

W aspekcie środowiskowym praca koncentruje się na analizie wpływu produkcji mieszanek betonowych oraz stali zbrojeniowej m.in. na emisję gazów cieplarnianych, zużycie zasobów czy energii. Przeprowadzono ocenę cyklu życia konstrukcji żelbetowych od momentu wytworzenia materiałów do rozbiórki i ich ewentualnego recyklingu. W tym kontekście uwzględniono również zjawisko karbonatyzacji betonu, które może częściowo kompensować emisję CO_2 w późniejszych etapach cyklu życia. Wyniki własnych analiz środowiskowych dla różnych mieszanek betonowych wskazać rozwiązania o najniższym wpływie środowiskowym, przy zachowaniu odpowiednich właściwości technicznych.

W ramach oceny ekonomicznej przeanalizowano czynniki wpływające na całkowity koszt cyklu życia konstrukcji żelbetowych. Poddano również analizie wpływ składu

mieszanek betonowych na ceny jednostkowe materiałów, ze szczególnym uwzględnieniem udziału cen cementu i kruszyw. Ocenę przeprowadzono, uwzględniając główne zalecenia norm ISO 15686-5:2017 i PN-EN 16627:2015.

Aspekt społeczny zrównoważonej oceny przeanalizowano z zastosowaniem podejścia S-LCA, które uwzględnia wpływ inwestycji budowlanych na zdrowie, bezpieczeństwo i komfort użytkowników oraz społeczności lokalnych. Oceniono oddziaływania, takie jak hałas, drgania, zapylenie czy uciążliwości związane z prowadzeniem robót budowlanych. Opracowano wskaźnik Socpoint, umożliwiający ilościową ocenę oddziaływań społecznych. Przedstawiono również rekomendacje dotyczące ograniczania negatywnych oddziaływań, m.in. przez optymalizację harmonogramów budowy oraz dobór niskoemisyjnych technologii wykonawczych.

Integralną część opracowanej metodyki stanowi zastosowanie metod analizy wielokryterialnej. Metody te umożliwiają przejrzystą integrację wyników ocen środowiskowych, ekonomicznych i społecznych oraz wspomagają podejmowanie racjonalnych decyzji projektowych. W monografii zaprezentowano autorskie podejście do łączenia analiz LCA, LCC i S-LCA w oparciu o jednolite kryteria funkcjonalne, co stanowi jedno z kluczowych osiągnięć pracy.

W części aplikacyjnej pracy przedstawiono studium przypadku, obejmujące zrównoważoną ocenę monolitycznej konstrukcji żelbetowej garażu wielopoziomowego. Analiza ta posłużyła do przetestowania i zweryfikowania zaproponowanej metodyki w rzeczywistym kontekście projektowym. Na podstawie uzyskanych wyników oceniono efektywność różnych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych, wskazano możliwe usprawnienia oraz zaprezentowano schemat wspomagania decyzji dla projektanta i inwestora.

Monografia stanowi wkład w rozwój metodologii oceny zrównoważonego budownictwa, oferując narzędzia i wiedzę niezbędne do prowadzenia świadomego i odpowiedzialnego projektowania konstrukcji żelbetowych w perspektywie całego cyklu życia.

DANIEL WAŁACH

Methodology for the sustainable assessment of monolithic reinforced concrete structures throughout the life cycle

Summary

The monograph presents a methodology for the sustainability assessment of reinforced concrete structures, taking into account the fundamental pillars of sustainable construction – environmental, economic, and social – over the full life cycle of a structure. In light of rising expectations for environmental accountability, cost efficiency, and the social acceptability of engineering solutions, an integrated approach to assessing both the design and delivery of construction projects is necessary. The principal aim is therefore not only the theoretical development but also the practical verification of an original methodology enabling a comprehensive evaluation of reinforced concrete structures in the context of sustainable development.

The first part reviews established lifecycle assessment methods: environmental (LCA – Life Cycle Assessment), economic (LCC – Life Cycle Costing), and social (S-LCA – Social Life Cycle Assessment). It traces the evolution of approaches to the sustainability assessment of built assets, highlighting the increasing integration of these three perspectives within Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). The current regulatory and normative framework is outlined, with emphasis on PN-EN 15643:2021 and PN-EN 15804+A2:2020, which define principles for developing and applying methods to assess the sustainability of buildings and construction products.

Subsequent chapters identify in detail the key factors that shape the outcome of sustainability assessments of reinforced concrete structures. Both literature data and the results of the author's own analyses are considered, enabling the indication of processes most significant to each assessment dimension.

On the environmental dimension, the study focuses on the impacts of producing concrete mixes and reinforcing steel on, among others, greenhouse gas emissions, resource consumption, and energy use. A lifecycle assessment of reinforced concrete structures was carried out from material production through demolition and potential recycling. In this context, concrete carbonation was also accounted for, as it can partially offset CO_2 emissions in later lifecycle stages. The results of environmental analyses for various concrete mixes made it possible to identify solutions with the lowest environmental impact while maintaining the required technical performance.

For the economic assessment, factors affecting the total lifecycle costs of reinforced concrete structures were examined. The influence of concrete mix composition on unit

material prices was analysed, with particular attention to the contribution of cement and aggregate prices. The assessment followed the main recommendations of ISO 156865:2017 and PN-EN 16627:2015.

The social dimension was investigated using the S-LCA approach, which considers the effects of construction investments on the health, safety, and comfort of users and local communities. Impacts such as noise, vibration, dust, and other nuisances associated with construction activities were evaluated. A Socpoint indicator was developed to quantify social impacts. Recommendations are also provided for mitigating adverse effects, including optimising construction schedules and selecting low-emission construction methods.

An integral component of the proposed methodology is the use of multicriteria analysis methods. These enable transparent integration of environmental, economic, and social assessment results and support rational design decisionmaking. The monograph presents an original approach to combining LCA, LCC, and S-LCA on the basis of uniform functional criteria, which constitutes one of the study's key contributions.

In the application part, a case study is presented in which a sustainability assessment was performed for the monolithic reinforced concrete structure of a multi-storey car park. This analysis served to test and validate the proposed methodology in a real design context. On the basis of the results, the effectiveness of different structural and material solutions was assessed, potential improvements were identified, and a decision-support scheme for designers and investors was outlined.

The monograph contributes to the development of sustainability assessment methodologies in construction, offering tools and insights essential for informed and responsible design of reinforced concrete structures from a whole-life perspective.

Wykaz ważniejszych pojęć

LCA – analiza cyklu życia (ang. *Life Cycle Assessment*)

Systematyczna procedura oceny potencjalnych oddziaływań środowiskowych wyrobu, procesu lub systemu w całym cyklu życia: od pozyskania surowców, przez wytwarzanie, transport i realizację, użytkowanie, aż po zakończenie życia. Obejmuje definiowanie celu i zakresu, inwentaryzację przepływów (LCI), ocenę oddziaływań (LCIA) oraz interpretację wyników.

LCC – koszty cyklu życia (ang. *Life Cycle Costing*)

Metoda ekonomiczna służąca do oszacowania łącznych kosztów związanych z produktem, usługą lub systemem w całym cyklu życia. Obejmuje zwykle: pozyskanie/zakup, wdrożenie i instalację, użytkowanie (energia, materiały eksploatacyjne), utrzymanie i serwis, modernizacje, przestoje, szkolenia, zgodność regulacyjną, a także zakończenie cyklu życia (wycofanie, utylizacja, recykling) oraz wartość rezydualną. Wynikiem jest najczęściej wartość bieżąca netto skumulowanych kosztów w odniesieniu do przyjętego horyzontu czasowego i stopy dyskontowej. LCC służy do porównywania alternatyw zapewniających tę samą funkcję, przy czym kluczowe znaczenie mają jawne założenia (okres analizy, stopa dyskontowa, scenariusze cen) oraz analiza niepewności (np. analiza wrażliwości, modelowanie probabilistyczne).

S-LCA – społeczna analiza cyklu życia (ang. *Social Life Cycle Assessment*)

Ocena potencjalnych skutków społecznych związanych z produktem, usługą lub organizacją w całym łańcuchu wartości – od pozyskania surowców, przez wytwarzanie i dystrybucję, po użytkowanie i zakończenie cyklu życia. Analiza jest ukierunkowana na grupy interesariuszy (m.in. pracowników, społeczności lokalne, konsumentów/użytkowników) i wykorzystuje wskaźniki odnoszące się do takich obszarów, jak prawa człowieka, zdrowie i bezpieczeństwo, warunki pracy, równouprawnienie, rozwój społeczny, uczciwe praktyki rynkowe oraz wpływ na dostęp do zasobów.

Zrównoważona ocena

Przymiotnik „zrównoważona” oznacza jednoczesne uwzględnienie aspektów środowiskowych, ekonomicznych i społecznych przy zachowaniu wymagań technicznych i funkcjonalnych. „Zrównoważona ocena” to procedura, w której te trzy perspektywy są rozpatrywane łącznie i porównywane pomiędzy wariantami.

Jednostka funkcjonalna

Ilościowe określenie funkcji analizowanego wyrobu lub procesu, stanowiące wspólny mianownik porównań (np. „1 m³ mieszanki betonowej określonej klasy" lub „1 km drogi utrzymanej przez 30 lat"). Zapewnia porównywalność wyników LCA, LCC i S-LCA na poziomie wyrobów i procesów.

Ekwiwalent funkcjonalny

Zestaw ilościowo określonych wymagań dotyczących funkcji i parametrów technicznych ocenianego obiektu (lub jego części), stanowiący wspólną podstawę porównania rozwiązań. Obejmuje m.in. przeznaczenie i zakres funkcji, kluczowe parametry techniczne, warunki i okres odniesienia oraz istotne założenia brzegowe dotyczące użytkowania. Analizowane warianty muszą spełniać ten sam ekwiwalent funkcjonalny, aby wyniki oceny mogły być porównywalne.

Granica systemu

Umownie wyznaczony obszar wzajemnego oddziaływania ocenianego budynku i jego otoczenia (środowiska oraz innych systemów produktowych). Granica ta rozstrzyga, co jest, a co nie jest objęte oceną: wskazuje procesy, etapy cyklu życia i przepływy materiałowo-energetyczne włączone do analizy oraz te, które pozostają poza zakresem; obejmuje także ustalenie zakresu rzeczowego, przestrzennego, czasowego i technologicznego oraz zasad traktowania przepływów między systemami (np. produkty uboczne, recykling, alokacja).

Kategoria oddziaływania (kategoria wpływu)

Grupa oddziaływań środowiskowych, do których przypisywane są wyniki inwentaryzacji w LCA (np. zmiana klimatu, zakwaszenie, eutrofizacja, zużycie zasobów, emisja pyłów drobnych). Dla każdej kategorii stosuje się odpowiedni model charakterystyki i jednostkę wyniku.

Wskaźnik środowiskowy

Wielkość liczbowa opisująca poziom oddziaływania w danej kategorii (np. potencjał tworzenia efektu cieplarnianego, wyrażony w ekwiwalencie CO_2). Może mieć postać wskaźnika cząstkowego (dla jednej kategorii) albo wskaźnika zagregowanego „jednopunktowego", łączącego wiele kategorii.

Ecopoint (E_p)

Jednopunktowy, bezwymiarowy, zagregowany wskaźnik środowiskowy, wyznaczany na podstawie wyników analizy cyklu życia LCA. Powstaje przez normalizację i ważenie wartości wskaźników poszczególnych kategorii oddziaływań środowiskowych, obliczonych dla przyjętych granic systemu. Wartość wskaźnika interpretuje się jako łączną miarę obciążeń środowiskowych, przypisanych do analizowanego wariantu. Wskaźnik stosuje się do porównywania rozwiązań zapewniających tę samą funkcję, określoną przez ekwiwalent funkcjonalny.

Wskaźnik społeczny

Miernik ilościowy lub jakościowy, opisujący stan lub zmianę w obszarze społecznym, przypisany do określonej grupy interesariuszy lub procesu.

Socpoint (S_p)

Jednopunktowy, bezwymiarowy wskaźnik społeczny, służący do ilościowego ujęcia skumulowanej uciążliwości społecznej analizowanego rozwiązania w cyklu życia. Wyznacza się go jako sumę ważoną znormalizowanych wskaźników jednostkowych, odnoszących się do analizowanych kategorii. Wskaźnik umożliwia porównywanie wariantów, spełniających ten sam ekwiwalent funkcjonalny.

1. Wprowadzenie

1.1. Uzasadnienie podjęcia tematu

Zrównoważony rozwój (ang. *sustainable development*) to koncepcja, która od dekad wyznacza kierunki rozwoju nauki i inżynierii, wpływając na sposób projektowania, użytkowania oraz oceny konstrukcji w całym cyklu życia, z uwzględnieniem zarówno aspektów środowiskowych, ekonomicznych, społecznych, jak i charakterystyki techniczno-funkcjonalnej (Lélé 1991; Redclift 2005; Siekierski i Rutkowska 2008; Rakoczy et al. 2015; Fukuda-Parr 2016; Mensah 2019; Jong i Vijge 2021). W polskim systemie prawnym podejście to znajduje odzwierciedlenie m.in. w ustawie Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2001 nr 62), której art. 3 pkt 50 definiuje zrównoważony rozwój jako: rozwój społeczno-gospodarczy, w którym następuje proces integrowania działań politycznych, gospodarczych i społecznych z zachowaniem równowagi przyrodniczej oraz trwałości podstawowych procesów przyrodniczych, w celu zagwarantowania możliwości zaspokajania podstawowych potrzeb poszczególnych społeczności lub obywateli zarówno współczesnego pokolenia, jak i przyszłych pokoleń. Definicja ta podkreśla konieczność harmonijnego łączenia aspektów politycznych, gospodarczych i społecznych z troską o środowisko naturalne. Podobne podejście prezentuje także literatura naukowa, w której zrównoważony rozwój definiowany jest jako proces integracji działań w sferze społecznej, gospodarczej i środowiskowej, ukierunkowany na zachowanie równowagi ekologicznej oraz trwałości procesów przyrodniczych, przy jednoczesnym dążeniu do zaspokajania potrzeb obecnych i przyszłych pokoleń. Warto podkreślić, że zasady zrównoważonego rozwoju stanowią obecnie podstawę opracowywania i aktualizacji krajowych koncepcji rozwoju oraz licznych dokumentów planistycznych, takich jak strategie rozwoju województw czy plany zagospodarowania przestrzennego (Dz.U. 2001 nr 62). Na rysunku 1.1 przedstawiono potrzebę zachowania równowagi pomiędzy trzema filarami zrównoważonego rozwoju oraz ich wzajemne zależności.

Budownictwo pełni istotną rolę w kształtowaniu rozwoju społeczno-gospodarczego, jednak jego działalność wiąże się z istotnym obciążeniem środowiska naturalnego (Ramesh et al. 2010; Mokhlesian i Holmén 2012). Według raportu Programu Środowiskowego Organizacji Narodów Zjednoczonych (UNEP) z 2023 r. (Raport UNEP 2024), budynki odpowiadają za 34% globalnego zapotrzebowania na energię oraz 37% emisji dwutlenku węgla związanych z energią i procesami produkcyjnymi. Dodatkowo produkcja i transport materiałów

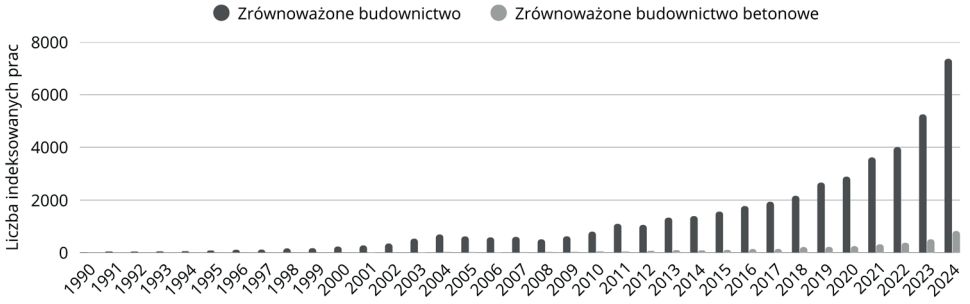
budowlanych pochłaniają nawet 25% całkowitej energii zużywanej w różnych krajach. Branża budowlana generuje również znaczną ilość odpadów, powstających zarówno podczas budowy, jak i w wyniku rozbiórek czy remontów. W skali globalnej odpady budowlane stanowią jeden z największych strumieni odpadów, odpowiadając nawet za 30–40% wszystkich odpadów wytwarzanych w krajach rozwiniętych (Islam et al. 2024).



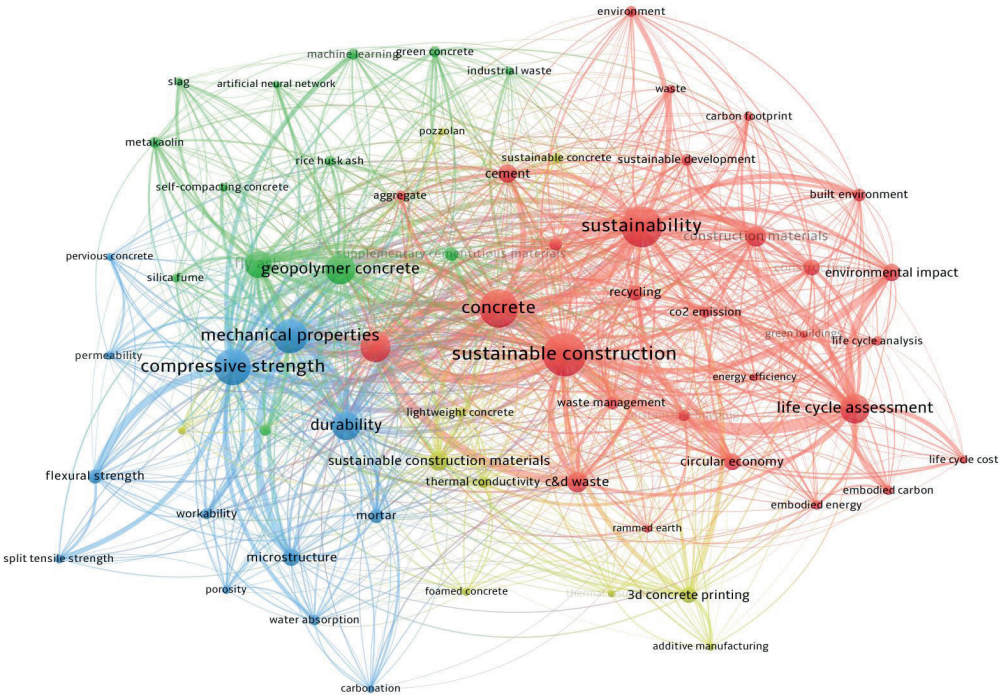
Rys. 1.1. Współzależność filarów zrównoważonego rozwoju

W odpowiedzi na wskazane problemy oraz w związku z rosnącymi oczekiwaniami społecznymi rozwinął się nurt określany mianem zrównoważonego budownictwa. Podejście to koncentruje się przede wszystkim na innowacjach technologicznych, które jednocześnie zaspokajają potrzeby społeczne, minimalizują negatywny wpływ na środowisko oraz odznaczają się wysoką efektywnością ekonomiczną (Purvis et al. 2018; Mensah 2019). Współczesna literatura przedmiotu podkreśla, że realizacja celów zrównoważonego budownictwa wymaga kompleksowej i systematycznej analizy cyklu życia obiektu budowlanego, obejmującej fazy projektowania, budowy, eksploatacji oraz rozbiórki (Kasprowicz 2010; Dhull 2024). W tym kontekście szczególne znaczenie przypisuje się konstrukcjom żelbetowym, gdyż beton pozostaje najczęściej stosowanym i najbardziej rozpowszechnionym materiałem budowlanym na świecie (Mukherjee i Vesmawala 2013; Nilimaa 2023). Rosnące znaczenie zrównoważonego budownictwa znajduje odzwierciedlenie w literaturze naukowej, co potwierdza analiza trendów publikacyjnych, przedstawiona na rysunku 1.2.

Liczba prac omawiających tematykę zrównoważonego rozwoju systematycznie rośnie i w 2024 r. osiągnęła poziom 7400, co stanowi ponad pięciokrotny wzrost w stosunku do 2014 r., w którym zaindeksowano 1400 prac. Mimo tego istotnego wzrostu zainteresowania naukowego zrównoważonym rozwojem, prace dotyczące zrównoważonego budownictwa betonowego, uwzględniające wszystkie filary zrównoważonego rozwoju, wciąż stanowią niewielki odsetek. Analiza bibliograficzna mapy powiązań słów kluczowych dla frazy „zrównoważone budownictwo betonowe", przedstawiona na rysunku 1.3, wskazuje, że większość prac naukowych koncentruje się na aspektach technicznych (materiałowych i mechanicznych) oraz środowiskowych, w mniejszym stopniu uwzględniając aspekty ekonomiczne, a w znikomym stopniu społeczne.



Rys. 1.2. Zmiana liczby indeksowanych publikacji naukowych dotyczących zrównoważonego rozwoju w budownictwie w latach 1974–2024[1]



Rys. 1.3. Mapa współwystępowania słów kluczowych dla frazy *sustainable concrete construction*[2]

Na podstawie przeglądów bibliograficznych można stwierdzić, że współcześnie zrównoważone budownictwo betonowe (ang. *sustainable concrete construction*) koncentruje się na

[1] Metodykę pozyskania i opracowania danych bibliograficznych przedstawiono w załączniku 1.
[2] Zob. przypis 1.

minimalizacji śladu środowiskowego betonu przez redukcję zużycia surowców naturalnych oraz emisji gazów cieplarnianych, w tym przede wszystkim dwutlenku węgla (Neville 2011; Mehta i Monteiro 2014). Produkcja cementu, ze względu na swoją energochłonność, odpowiada za około 8% globalnej emisji CO_2 (Raport UNEP 2024). Tym samym współczesne działania ukierunkowane na zrównoważony rozwój konstrukcji żelbetowych koncentrują się przede wszystkim na stosowaniu cementów niskoemisyjnych oraz dodatków mineralnych, takich jak popioły lotne, żużel wielkopiecowy czy krzemionka amorficzna, które częściowo zastępując klinkier portlandzki, przyczyniają się do redukcji emisji gazów cieplarnianych (Scrivener et al. 2018). Coraz większą popularność zyskują również betony geopolimerowe (ang. *geopolymer concrete*), które całkowicie eliminują konieczność stosowania klinkieru portlandzkiego, wykorzystując w jego miejsce uboczne produkty przemysłowe, dzięki czemu charakteryzują się znacząco niższym śladem węglowym w porównaniu z betonami tradycyjnymi (Provis i van Deventer 2014).

Kolejnym obserwowanym trendem jest stosowanie materiałów, które pozwalają zmniejszyć zużycie zasobów naturalnych. Najpowszechniejszym z takich materiałów jest beton na bazie kruszywa z recyklingu (ang. *recycled aggregate concrete*). Należy zauważyć, że jego stosowanie nie tylko ogranicza wydobycie surowców naturalnych, lecz także umożliwia zagospodarowanie odpadów powstających w wyniku rozbiórki istniejących obiektów betonowych (Gicala i Halicka 2019; Bai et al. 2020). Poszukuje się również możliwości częściowego zastępowania kruszyw naturalnych materiałami odpadowymi, pochodzącymi z różnych gałęzi przemysłu. Przykładami takich surowców wtórnych są m.in. odpady ceramiczne i szklane, odpady z tworzyw sztucznych, zużyte opony, a także popioły lotne i żużle przemysłowe (Wałach 2016; Sadowski 2018; Domagała 2020). W wielu badaniach wykazano, że odpowiednio przygotowane i właściwie dobrane materiały odpadowe mogą korzystnie wpływać na właściwości mechaniczne betonu, a także zwiększać jego trwałość i odporność na działanie agresywnych czynników środowiskowych (Sabbrojjaman et al. 2024; Wang i Dong 2024). Do prac z tego zakresu należą również badania dotyczące wprowadzania do mieszanek betonowych różnego rodzaju dodatków w postaci włókien pochodzących z materiałów odpadowych – zarówno organicznych, jak i polimerowych. Tego typu rozwiązania nie tylko umożliwiają efektywne zagospodarowanie odpadów, lecz także w niektórych przypadkach przyczyniają się do poprawy wybranych właściwości mechanicznych betonu (Ahmad i Zhou 2022). Pomimo dużego potencjału wykazanego w badaniach naukowych, w praktyce wdrożeniowej istnieją liczne bariery implementacyjne, wynikające ze względów technologicznych i legislacyjnych, przez co zastosowanie mieszanek wykorzystujących materiały odpadowe – zarówno jako dodatek, jak i zamiennik – jest obecnie znacząco ograniczone.

Oprócz samego betonu istotnym czynnikiem wpływającym na zrównoważoną charakterystykę konstrukcji żelbetowych jest rodzaj zastosowanego zbrojenia, który może znacząco oddziaływać zarówno na ekonomikę przedsięwzięcia, jak i na ślad węglowy całej konstrukcji. Tradycyjnie w konstrukcjach żelbetowych stosuje się stal zbrojeniową, której produkcja wiąże się z wysokim zużyciem energii i znaczną emisją gazów cieplarnianych. W odpowiedzi na te problemy rozwijane są – a w niektórych przypadkach już wdrażane w praktyce – technologie wykorzystujące zbrojenie kompozytowe FRP (ang. *fiber-reinforced polymer*), którego

produkcja i transport cechują się niższym obciążeniem środowiskowym w porównaniu ze stalą (Ostrowski et al. 2016). Dzięki wysokiej odporności na korozję zbrojenie kompozytowe może dodatkowo wydłużać okres eksploatacji obiektów żelbetowych oraz ograniczać koszty ich utrzymania i remontów, zwłaszcza w warunkach oddziaływania środowisk agresywnych (Bank 2006; Task Group 9.3 2007; Qureshi 2022; De et al. 2024). Warto jednak podkreślić, że rozwiązanie to wiąże się wciąż z pewnymi ograniczeniami – zarówno legislacyjnymi, technologicznymi, jak i ekonomicznymi.

Równolegle do rozwiązań materiałowych stosowanych w konstrukcjach żelbetowych rozwijane są również innowacje technologiczne w budownictwie, takie jak inteligentne systemy zarządzania budynkami (ang. *smart building solutions*), które zwiększają efektywność energetyczną i ograniczają negatywny wpływ obiektów na środowisko (Firoozi et al. 2025). Do innych przykładów należą technologie druku 3D elementów betonowych, umożliwiające praktyczne zastosowanie nowoczesnych materiałów z udziałem surowców odpadowych, a jednocześnie znacząco skracające czas realizacji inwestycji i ograniczające ilość odpadów generowanych podczas procesów budowlanych (Nilimaa 2023).

Pomimo globalnych dążeń do idei zrównoważonego rozwoju obserwowane trendy w zakresie projektowania, wykonawstwa i użytkowania konstrukcji żelbetowych nie wskazują na podejście holistyczne, integrujące zaawansowane technologie z troską o środowisko, odpowiedzialnością społeczną oraz efektywnością ekonomiczną. W literaturze jako główne bariery wdrażania zasad zrównoważonego budownictwa wskazuje się utrwalone schematy postępowania, wyższe koszty budynków zrównoważonych – zwłaszcza w początkowych fazach cyklu życia – a także brak wystarczających zachęt rządowych i jednoznacznych regulacji prawnych (Maqbool et al. 2023).

Aby możliwa była obiektywna ocena oraz porównanie opracowywanych materiałów, technologii i rozwiązań stosowanych we współczesnym budownictwie, niezbędne jest wykorzystanie kompleksowych narzędzi i metod umożliwiających analizę całego cyklu życia obiektu budowlanego. Jednym z podejść wspierających takie całościowe spojrzenie jest projektowanie konstrukcji inżynierskich w ujęciu zintegrowanym, znane pierwotnie jako projektowanie zintegrowane (ang. *integrated design*) (Sarja 1998; Ajdukiewicz 2006). Metoda ta obejmuje cztery kluczowe aspekty: ekonomiczny, środowiskowy, społeczny oraz techniczny. Model uwzględnia trzy główne wymiary projektowania – poziom szczegółowości (od ogólnego do szczegółowego), fazy życia obiektu budowlanego (od koncepcji do końca użytkowania) oraz kryteria oceny, uwzględniające aspekty techniczne, ekonomiczne, społeczne oraz środowiskowe. W praktyce oznacza to, że zintegrowane projektowanie konstrukcji żelbetowych wymaga uwzględniania interdyscyplinarnych uwarunkowań na każdym etapie cyklu życia budowli – od doboru materiałów, przez opracowanie projektu i wykonawstwo, aż po eksploatację i końcową utylizację obiektu (Task Group 3.7 2013).

W ostatnich latach pojęcie projektowania zintegrowanego coraz częściej utożsamiane jest z ujęciem procesowym, określanym jako *Integrated Design Process* (IDP), odnoszącym się do interdyscyplinarnego podejścia w projektowaniu budowlanym. Koncepcja ta zakłada ścisłą współpracę specjalistów z różnych branż od najwcześniejszych etapów cyklu życia inwestycji. Celem IDP jest optymalizacja rozwiązań technicznych, funkcjonalnych, ekonomicznych

i środowiskowych przez integrację wiedzy oraz doświadczeń szerokiego zespołu projektowego (Larsson 2009; Leoto i Lizarralde 2019; Shibeika et al. 2021; Ikudayisi et al. 2022).

Szczególnie istotnym elementem tego podejścia jest wczesne zaangażowanie przedstawicieli różnych dziedzin – architektów, konstruktorów, projektantów instalacji, inwestorów oraz ekspertów ds. zrównoważonego rozwoju, co sprzyja efektywnej wymianie informacji, sprawniejszemu rozwiązywaniu konfliktów międzybranżowych i skuteczniejszej realizacji założeń projektowych. Integralną częścią zintegrowanego procesu projektowania jest także uwzględnienie cyklu życia budynku, obejmującego wszystkie fazy – od koncepcji i projektowania, przez realizację, aż po eksploatację i końcową utylizację. Na rysunku 1.4 przedstawiono kolejne etapy zintegrowanego procesu projektowania (IDP) – od zdefiniowania założeń projektowych, przez fazę koncepcji i projektowania szczegółowego, aż po realizację inwestycji.

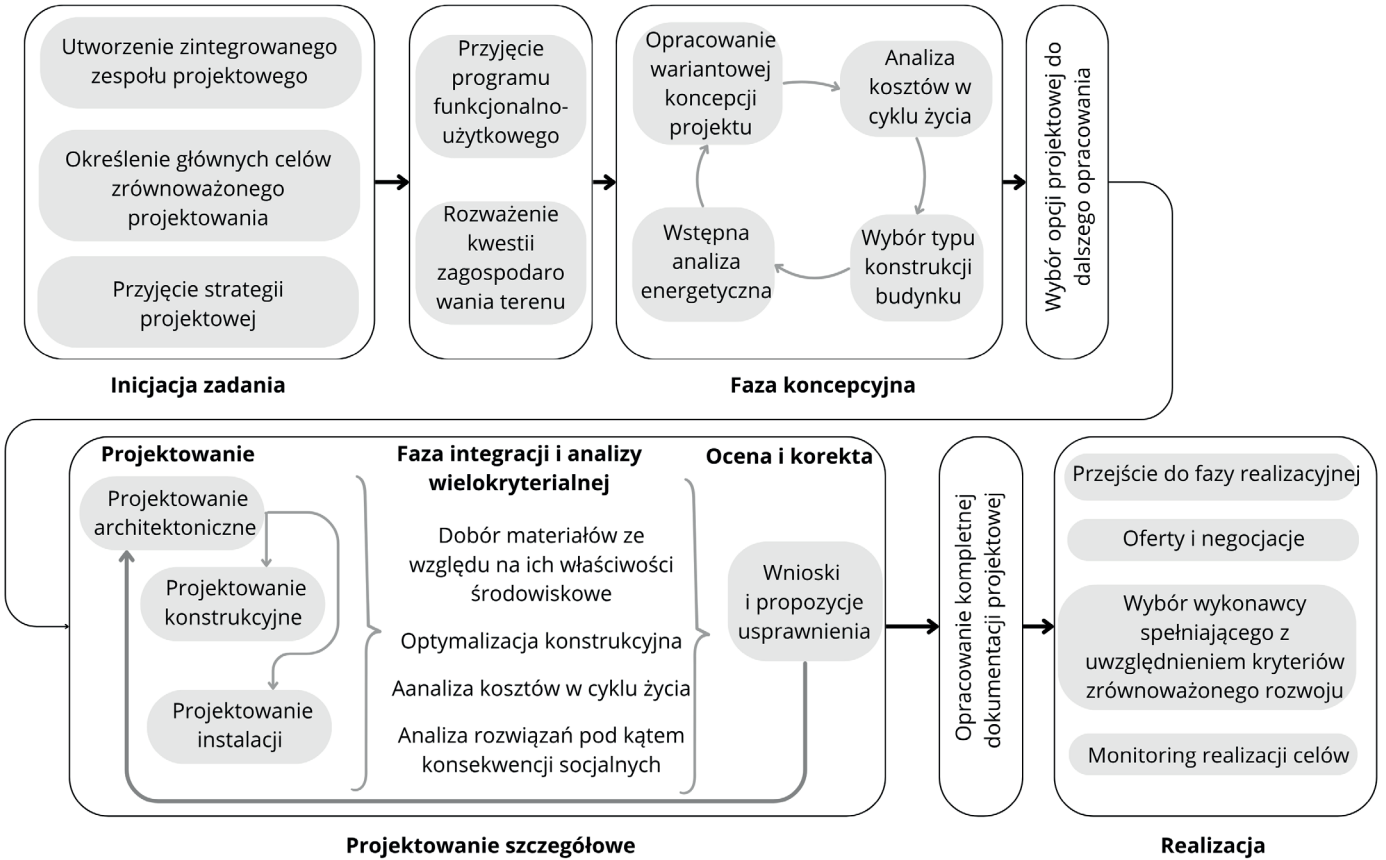
Efektywność zintegrowanego projektowania może zostać dodatkowo zwiększona przez zastosowanie technologii Building Information Modeling (BIM), wspierającej współpracę międzybranżową dzięki możliwości kompleksowego modelowania informacji o obiekcie budowlanym. BIM umożliwia redukcję ryzyka błędów projektowych, skrócenie czasu realizacji inwestycji oraz lepszą koordynację działań uczestników procesu budowlanego (Azhar et al. 2011; Attia et al. 2012; Cemesova et al. 2015; Liu Z. et al. 2021).

Obecnie zintegrowane projektowanie znajduje zastosowanie w inwestycjach, w których wymagania dotyczące efektywności energetycznej, niskiej emisyjności i ograniczania negatywnego wpływu na środowisko są szczególnie rygorystyczne. W takich przypadkach zastosowanie metody IDP umożliwia skuteczną realizację celów zrównoważonego rozwoju przez optymalizację parametrów techniczno-funkcjonalnych i ekonomicznych inwestycji (Chardon et al. 2016; Ferrara et al. 2018; Alajmi 2021; Feehan et al. 2021; Li Z. et al. 2022).

W świetle założeń zintegrowanego projektowania współczesne podejście do projektowania obiektów budowlanych – zwłaszcza konstrukcji żelbetowych – wymaga uwzględnienia nie tylko kryteriów technicznych, lecz także aspektów środowiskowych, społecznych i ekonomicznych. W tym kontekście zrównoważona ocena konstrukcji, prowadzona już w fazie koncepcyjnej procesu inwestycyjnego, staje się kluczowym elementem umożliwiającym podejmowanie świadomych decyzji zgodnych z ideą zrównoważonego rozwoju.

Należy jednak podkreślić, że pomimo rosnącego znaczenia tej koncepcji nadal występują istotne bariery w jej praktycznym wdrażaniu. Jedną z głównych przeszkód jest brak kompleksowych, ustandaryzowanych wytycznych oraz narzędzi oceny, które w sposób zintegrowany uwzględniałyby trzy filary zrównoważonego rozwoju – środowiskowy, społeczny i ekonomiczny – w odniesieniu do projektowania konstrukcji betonowych. Dotychczasowe metody skupiają się głównie na wybranych aspektach, takich jak środowiskowa analiza cyklu życia (LCA) czy analiza kosztów cyklu życia (LCC), pomijając podejście holistyczne, niezbędne do pełnej i obiektywnej zrównoważonej oceny konstrukcji.

W związku z powyższym istnieje wyraźna luka badawcza w zakresie opracowania spójnej, wieloaspektowej metodyki oceny konstrukcji żelbetowych w cyklu ich życia, integrującej różnorodne kryteria projektowe i wykonawcze, zgodnie z ideą zrównoważonego rozwoju. Potrzeba ta stanowi istotne uzasadnienie dla podjęcia niniejszej tematyki badawczej.



Rys. 1.4. Etapy zintegrowanego procesu projektowania (IDP) w budownictwie

1.2. Cel pracy

Głównym celem pracy jest kompleksowe opracowanie i zastosowanie metodyki zintegrowanej oceny zrównoważonego rozwoju konstrukcji żelbetowych, uwzględniającej aspekty środowiskowe, ekonomiczne i społeczne w cyklu życia obiektu budowlanego. Osiągnięcie celu głównego będzie możliwe przez zdefiniowanie i realizację celów szczegółowych, do których należą:

- Analiza i ocena istniejących metod zrównoważonej oceny cyklu życia (LCA, LCC, S-LCA), ze szczególnym uwzględnieniem ich zastosowania do konstrukcji żelbetowych.
- Przedstawienie aktualnego stanu prawnego i normatywnego w zakresie oceny zrównoważenia obiektów budowlanych, ze szczególnym uwzględnieniem obowiązujących norm PN-EN 15643:2021 oraz PN-EN 15804+A2:2020.
- Identyfikacja kluczowych czynników środowiskowych, ekonomicznych i społecznych, istotnych dla zrównoważonej oceny konstrukcji żelbetowych w pełnym cyklu życia obiektu budowlanego, wraz ze wskazaniem procesów o największym znaczeniu dla końcowego wyniku oceny.
- Analiza i porównanie wpływu różnych rodzajów mieszanek betonowych (m.in. betonów samozagęszczalnych, wysokowartościowych i betonów z kruszywami z recyklingu) na aspekty środowiskowe, ekonomiczne i społeczne w kontekście cyklu życia obiektu budowlanego.
- Opracowanie szczegółowej metodyki integrującej analizy LCA, LCC oraz S-LCA, umożliwiającej przejrzystą i kompleksową ocenę rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych.
- Zastosowanie metody analizy wielokryterialnej (MCDA) do integracji wyników ocen środowiskowych, ekonomicznych i społecznych w celu ułatwienia decyzji projektowych dotyczących doboru optymalnych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych.
- Przedstawienie praktycznej implementacji metodyki oceny zrównoważonej na przykładzie monolitycznej konstrukcji żelbetowej, wraz z oceną efektywności proponowanych rozwiązań i identyfikacją potencjalnych usprawnień.

1.3. Zakres pracy

Praca składa się z dziewięciu rozdziałów. W rozdziale pierwszym przedstawiono uzasadnienie podjęcia tematu pracy oraz syntetyczny opis jej zakresu.

W rozdziale drugim omówiono metodykę oceny cyklu życia (LCA), przedstawiając jej rozwój od początków aż do współczesnych zastosowań w budownictwie. Wskazano na ewolucję koncepcji, która doprowadziła do opracowania zintegrowanej oceny zrównoważenia (LCSA), łączącej aspekty środowiskowe (LCA), ekonomiczne (LCC) oraz społeczne (S-LCA). Przedstawiono również kluczowe normy, w szczególności normę PN-EN 15643:2021, która określa ogólne zasady i wymagania dotyczące opracowania metodyk zintegrowanej oceny zrównoważoności budynków w odniesieniu do aspektów środowiskowych, społecznych i ekonomicznych, w tym właściwości użytkowych, z uwzględnieniem ich charakterystyk technicznych i funkcjonalnych. Szczegółowo opisano etapy cyklu życia obiektów budowlanych – od przygotowania

projektu (faza A0) do końca eksploatacji (moduły C1–C4) – uwzględniając także fazę poza systemem zasadniczej oceny cyklu życia obiektów budowlanych (moduł D). Podkreślono znaczenie decyzji podejmowanych na etapie projektowym, które mają kluczowy wpływ na wszystkie aspekty zrównoważonej oceny w cyklu życia obiektu.

W rozdziale trzecim omówiono kryterium techniczne zrównoważonej oceny, koncentrując się na analizie różnych rodzajów betonów stosowanych w nowoczesnym budownictwie, takich jak betony wysokowartościowe (HPC, UHPC), samozagęszczalne (SCC), fibrobetony, geopolimerowe oraz betony z kruszywem z recyklingu. Przedstawiono główne zalety i ograniczenia tych technologii, podkreślając ich rolę w ograniczaniu wpływu środowiskowego przy zachowaniu wysokich parametrów użytkowych i trwałości. Dodatkowo podkreślono znaczenie doboru klasy betonu z uwzględnieniem aspektów nośności, trwałości oraz kryteriów ekologicznych i ekonomicznych.

Rozdział czwarty poświęcono analizie kryterium środowiskowego. Omówiono cykl życia konstrukcji żelbetowych – od produkcji materiałów, przez etap użytkowania, aż po rozbiórkę i recykling. Dokonano przeglądu norm regulujących ten obszar (m.in. PN-EN 15804+A2:2020, PN-EN 15978:2012, PN-EN 16757:2023), wskazując na dominujący wpływ produkcji cementu na bilans emisji CO_2. Omówiono także zjawisko karbonatyzacji betonu w kontekście kompensacji emisji w cyklu życia konstrukcji. W ramach badań własnych zaprezentowano wyniki analiz środowiskowych różnych składów mieszanek betonowych, identyfikując główne źródła oddziaływań oraz potencjalne możliwości ich redukcji.

W rozdziale piątym przedstawiono kryterium ekonomiczne, obejmujące analizę całkowitych kosztów cyklu życia konstrukcji żelbetowych (LCC). Omówiono metodykę oceny kosztów na podstawie norm ISO 15686-5:2017 i PN-EN 16627:2015, podkreślając znaczenie analizy kosztów końcowych, obejmujących m.in. rozbiórkę i recykling. Zwrócono uwagę na wpływ doboru mieszanek betonowych i ich składników na całkowite koszty realizacji inwestycji budowlanych. Dodatkowo opisano procedury kalkulacji kosztów, z uwzględnieniem udziału cementu oraz kruszywa w całkowitych kosztach materiałowych.

Rozdział szósty poświęcono kryterium społecznemu, omawiając społeczną analizę cyklu życia (S-LCA). Omówiono istniejące standardy i wytyczne (m.in. ISO 14040:2006, ISO 14044:2006, PN-EN 16309:2014+A1), analizując wpływ inwestycji budowlanych na zdrowie i komfort użytkowników oraz społeczności lokalnych. Uwzględniono oddziaływania, takie jak hałas, wibracje i zapylenie, a ich skutki oceniono przy użyciu autorskiego wskaźnika Socpoint. Wskazano także metody redukcji tych uciążliwości przez dobór właściwych technologii i planowanie harmonogramów prac budowlanych i rozbiórkowych.

W rozdziale siódmym omówiono metody analizy wielokryterialnej (MCDA), takie jak m.in. AHP i TOPSIS. Zaprezentowano również autorską metodykę integrującą oceny techniczne, środowiskowe, ekonomiczne i społeczne na podstawie jednolitych kryteriów funkcjonalnych, bazującą na metodach MCDA. Omówiono korzyści wynikające ze stosowania tych metod w procesie projektowym, w tym możliwość przejrzystego i racjonalnego wyboru optymalnych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych w odniesieniu do przyjętych kryteriów.

W rozdziale ósmym przedstawiono praktyczne zastosowanie opracowanej autorskiej metodyki na przykładzie zrównoważonej oceny monolitycznej konstrukcji żelbetowej garażu wielopoziomowego. Opisano sposób przeprowadzenia analiz oraz interpretację wyników

w kontekście podejmowania decyzji projektowych i doboru rozwiązań materiałowych. Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem wybranych metod MCDA, umożliwiających ocenę rozwiązań pod kątem kryteriów technicznych, środowiskowych, społecznych i ekonomicznych.

Rozdział dziewiąty przedstawia podsumowanie przeprowadzonych badań, wnioski końcowe oraz rekomendacje dotyczące dalszych kierunków badań naukowych i możliwości wdrożeń w praktyce inżynierskiej.

2. Ocena cyklu życia w budownictwie

2.1. Ewolucja oceny cyklu życia w aspekcie zrównoważonego rozwoju

Dotychczas w projektowaniu obiektów budowlanych dominującym aspektem były kwestie funkcjonalno-konstrukcyjne. Priorytetem było uzyskanie rozwiązania konstrukcyjnego o wymaganej charakterystyce, zapewniającego zaspokojenie potrzeb inwestora i użytkowników obiektu budowlanego, przy jednoczesnym zachowaniu możliwie niskich nakładów inwestycyjnych (Kasprowicz 2010). Horyzont czasowy oceny efektywności przyjętych rozwiązań obejmował przede wszystkim etap realizacji obiektu budowlanego oraz okres jego gwarancji. W kontekście zrównoważonego rozwoju pojawiła się konieczność opracowania nowego podejścia do projektowania, uwzględniającego wszystkie wymagania stawiane zrównoważonemu budownictwu. W tym celu wykorzystuje się metody pierwotnie stosowane w innych dziedzinach gospodarki i przemysłu, takie jak LCA, LCC i S-LCA.

Ocena cyklu życia (LCA) to metoda służąca do oceny potencjalnych oddziaływań środowiskowych i wykorzystania zasobów we wszystkich etapach cyklu życia produktu (ISO 14040:2006). Początki metody sięgają lat 70. XX w., kiedy w przemyśle opakowaniowym podejmowano pierwsze próby porównania wpływu różnych materiałów na środowisko (Hunt 1974). Koncepcja została ujednolicona i sformalizowana przez Towarzystwo Toksykologii i Chemii Środowiskowej (SETAC) w 1990 r., a następnie włączona do norm środowiskowych ISO serii 14040–14044 w latach 1997–2006 (Liu Min et al. 2024). Zgodnie z tymi dokumentami, LCA polega na identyfikacji danych wejściowych i wyjściowych oraz potencjalnych oddziaływań środowiskowych związanych z analizowanym systemem w jego cyklu życia. Obecnie LCA znajduje zastosowanie w ocenie materiałów, technologii i całych obiektów budowlanych i inżynierskich, stanowiąc kluczowe narzędzie porównywania poszczególnych analizowanych wariantów pod kątem ich oddziaływań na środowisko (Wałach et al. 2017; 2019; Wałach i Mach 2023; Asdrubali et al. 2024; Munir et al. 2024).

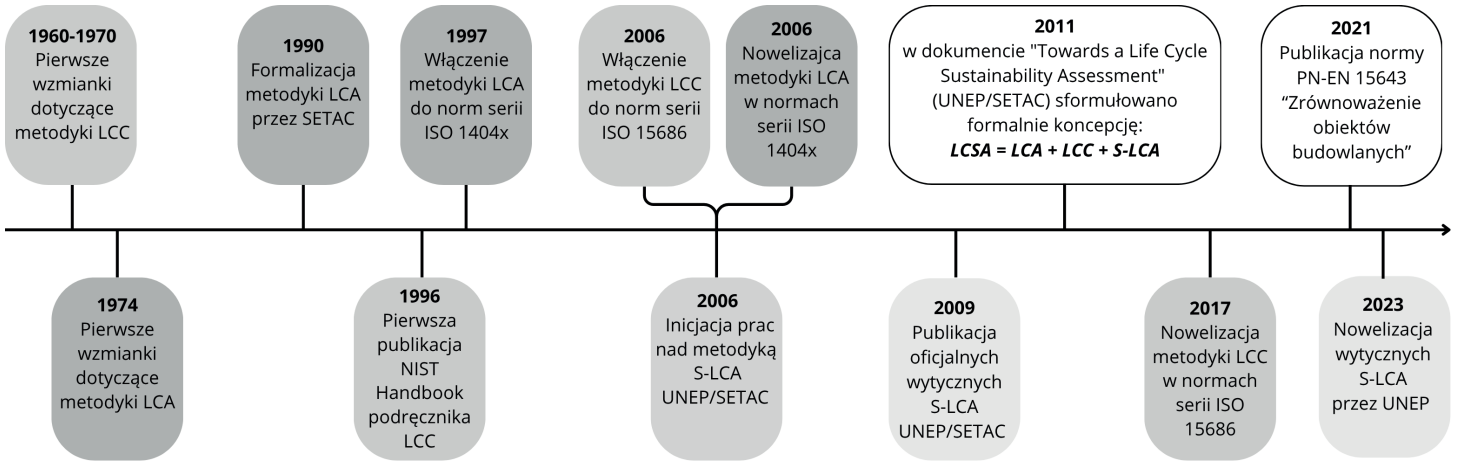
Równolegle z oceną środowiskową (LCA) istotnym narzędziem wspierającym podejmowanie decyzji projektowych w kontekście zrównoważonego rozwoju jest analiza kosztów cyklu życia (LCC). Metoda ta koncentruje się na identyfikacji i ocenie wszystkich kosztów związanych z obiektem budowlanym w całym okresie jego życia – od etapu planowania, przez realizację i eksploatację, aż po rozbiórkę (Fuller i Petersen 1996). Jej początki sięgają

lat 60. XX w., kiedy została rozwinięta na potrzeby projektów wojskowych w Stanach Zjednoczonych (Cole i Sterner 2000). Od lat 80. XX w. analiza LCC znajduje zastosowanie w projektach budowlanych i infrastrukturalnych, głównie w odpowiedzi na rozwijającą się politykę efektywności energetycznej oraz rosnące znaczenie kosztów eksploatacyjnych w cyklu życia obiektów (Plebankiewicz 2019). W latach 2008–2017 opublikowano międzynarodowe normy zawierające wytyczne dotyczące stosowania metody LCC w budownictwie, co umożliwiło jej szersze wdrożenie w praktyce projektowej (ISO 15686-5:2008, ISO 15686-5:2017, PN-EN 16627:2015). W odróżnieniu od tradycyjnego podejścia inwestycyjnego analiza LCC uwzględnia nie tylko koszty realizacji, lecz również nakłady związane z użytkowaniem, utrzymaniem, modernizacją i rozbiórką obiektu, umożliwiając kompleksową ocenę efektywności ekonomicznej rozwiązań projektowych w całym cyklu życia. Choć metoda ta znajduje szerokie zastosowanie w analizie przedsięwzięć budowlanych, jej pełne wdrożenie w odniesieniu do cyklu życia obiektu stanowi zagadnienie złożone ze względu na wieloetapowy i zintegrowany charakter procesów inwestycyjnych (Moins et al. 2020; Plebankiewicz i Zając 2022).

Analizę środowiskową (LCA) i ekonomiczną (LCC) uzupełnia społeczna ocena cyklu życia (S-LCA) – rozwijana od początku XXI w. metodyka służąca do identyfikacji i oceny oddziaływań produktów oraz procesów na interesariuszy społecznych, w tym m.in. pracowników, społeczności lokalne, konsumentów, uczestników łańcucha dostaw i społeczeństwo jako całość (Benoît i Mazijn 2009). Choć dla metodyki S-LCA nie sformułowano jeszcze jednoznacznych wymagań i zaleceń normowych, jak ma to miejsce w przypadku LCA czy LCC, stanowi ona istotne narzędzie wspierające projektowanie ukierunkowane na użytkownika końcowego i otoczenie społeczne. Obecnie w sektorze budowlanym analiza ta koncentruje się głównie na aspektach związanych z warunkami pracy, takich jak zdrowie i bezpieczeństwo pracowników oraz godziwe wynagrodzenie (Backes i Traverso 2024). W ramach analizy S-LCA uwzględnia się także wpływ inwestycji budowlanych na społeczność lokalną, obejmujący m.in. zapewnienie bezpiecznych i zdrowych warunków życia, tworzenie miejsc pracy na poziomie lokalnym oraz szersze oddziaływania społeczne, takie jak wkład w rozwój technologiczny i gospodarczy (Backes i Traverso 2024; Barbero et al. 2024).

Pomimo wciąż istniejących trudności związanych z jednoznacznym pomiarem i kategoryzacją oddziaływań społecznych integracja S-LCA z LCA i LCC staje się coraz powszechniejszą praktyką w ramach zintegrowanego podejścia do oceny zrównoważonego rozwoju. Zarówno w literaturze, jak i w praktyce projektowej podkreśla się potrzebę kompleksowego ujęcia trzech kluczowych filarów oceny cyklu życia – środowiskowego, ekonomicznego i społecznego – w ramach jednolitej, spójnej metodyki wspierającej podejmowanie zrównoważonych decyzji projektowych (Siwowski 2013). Podejście to określane jest jako zrównoważona ocena cyklu życia (LCSA, ang. *Life Cycle Sustainability Assessment*) i ma na celu umożliwienie kompleksowej oceny zrównoważenia produktów, procesów i inwestycji w oparciu o spójne kryteria i wskaźniki. Koncepcja LCSA została zaproponowana przez UNEP we współpracy z SETAC w 2011 r. i zakłada, że pełna ocena zrównoważonego rozwoju powinna uwzględniać równocześnie oddziaływania środowiskowe, koszty ekonomiczne oraz konsekwencje społeczne analizowanego systemu – wzór (2.1) (UNEP, 2011).

$$LCSA = LCA + LCC + SLCA \tag{2.1}$$



Rys. 2.1. Ewolucja narzędzi zrównoważonej oceny w cyklu życia w odniesieniu do obiektów budowlanych

Integracja trzech metod – LCA, LCC i S-LCA – wciąż wiąże się z istotnymi wyzwaniami metodycznymi i praktycznymi. Mimo to podejście LCSA stopniowo zyskuje uznanie jako perspektywiczny kierunek w projektowaniu zrównoważonych konstrukcji budowlanych. Umożliwia ono bardziej kompleksową, spójną i wieloaspektową ocenę rozwiązań projektowych w cyklu życia obiektu (Larsen et al. 2022). Na rysunku 2.1 przedstawiono schematycznie oś czasu publikacji kolejnych wytycznych dotyczących LCSA w kontekście obiektów budowlanych.

Obecnie w Polsce jednym z najważniejszych dokumentów ramowych jest norma PN-EN 15643:2021 „Zrównoważenie obiektów budowlanych – Struktura oceny budynków i obiektów inżynieryjnych", która określa zasady oceny zrównoważenia budynków i budowli inżynierskich w odniesieniu do ich cyklu życia. Norma ta integruje trzy główne filary zrównoważonego rozwoju i podkreśla znaczenie analizy cyklu życia jako podstawy oceny. W praktyce oznacza to, że już na etapie koncepcji należy porównywać różne warianty materiałowe i technologiczne, zachowując równoważność funkcjonalną (ang. *functional equivalent*) definiowaną w ISO 14040:2006, która gwarantuje spełnienie tych samych wymagań użytkowych. Przy zachowaniu tej równoważności możliwe jest obiektywne wskazanie rozwiązania optymalnego, które uwzględnia jednocześnie kryteria techniczne, środowiskowe, ekonomiczne i społeczne.

2.2. Normowe zasady zrównoważonej oceny konstrukcji żelbetowych

Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (ISO) oraz Europejski Komitet Normalizacyjny (CEN) odgrywają kluczową rolę w standaryzacji wymagań i zaleceń dotyczących zrównoważonego projektowania w budownictwie. Komitet Techniczny ISO/TC 59 „Buildings and civil engineering works" w ramach podkomitetu ISO/TC 59/SC 17 „Sustainability in buildings and civil engineering works" prowadzi prace nad normalizacją zrównoważonego budownictwa, uwzględniając aspekty środowiskowe, ekonomiczne i społeczne w kontekście Celów Zrównoważonego Rozwoju ONZ oraz działań na rzecz klimatu. Równolegle Komitet Techniczny CEN/TC 350 „Sustainability of construction works" opracowuje zharmonizowane metody oceny zrównoważonego rozwoju w budownictwie, uwzględniające metody oceny wydajności środowiskowej, społecznej i ekonomicznej nowych oraz istniejących obiektów budowlanych, bazujące na podejściu oceny cyklu życia. Z kolei Komitet Techniczny ISO/TC 71 „Concrete, reinforced concrete and pre-stressed concrete" w ramach Podkomitetu SC 8 „Environmental management for concrete and concrete structures" opracowuje wymagania dotyczące zarządzania środowiskowego w odniesieniu do konstrukcji betonowych.

W Polsce podstawę zrównoważonej oceny budynków i obiektów inżynierskich stanowią wymagania sformułowane w normie PN-EN 15643:2021. Norma ta obejmuje wszystkie typy obiektów budowlanych – zarówno budynki, jak i budowle inżynierskie – i może być stosowana zarówno do nowych inwestycji, jak i w kontekście modernizacji, przebudów i rozbiórek obiektów istniejących. Ocena opiera się na analizie cyklu życia obiektu, co oznacza, że uwzględnia się nie tylko etap projektowania i budowy, lecz także eksploatację, konserwację, modernizację oraz fazę końcową – demontaż, utylizację i potencjalne ponowne wykorzystanie

materiałów. Należy podkreślić, że norma ta integruje wcześniejsze wymagania norm z serii PN-EN 15643, części 1–5 z lat 2011–2017, tworząc ujednolicone ramy kompleksowej oceny zrównoważonego budownictwa.

Zgodnie z tymi wytycznymi, w kontekście środowiskowym ocenie podlegają m.in. zużycie zasobów naturalnych, emisje zanieczyszczeń do powietrza, gleby i wody, generowanie odpadów oraz wpływ na lokalną bioróżnorodność. Aspekty społeczne obejmują m.in. komfort i zdrowie użytkowników, dostępność, bezpieczeństwo, a także wpływ inwestycji na lokalną społeczność i dziedzictwo kulturowe. Aspekty ekonomiczne obejmują m.in. całkowite koszty cyklu życia, wartość rezydualną, koszty utrzymania oraz wpływ obiektu na lokalną gospodarkę. Punktem wyjścia do oceny poszczególnych rozwiązań projektowych pod kątem zrównoważoności powinno być rozwiązanie spełniające ekwiwalent funkcjonalny, czyli opis głównych wymagań technicznych i funkcjonalnych.

Każda z przyjętych alternatyw powinna podlegać ocenie i porównaniu w celu wyboru zrównoważonego rozwiązania. Analizowana norma nie narzuca metod wartościowania kryteriów, lecz zawiera jedynie podstawy metodyczne do wyznaczania wskaźników jakościowych i ilościowych. Systemy wartościowania i związane z nimi reguły obliczeniowe agregacji wskaźników mogą być określone w normach krajowych lub schematach oceny dostosowanych do preferencji krajowych bądź lokalnych.

W odniesieniu do konstrukcji żelbetowych obiektów inżynieryjnych opracowano szczegółowe wymagania, które skodyfikowano w normie PN-EN 17472:2022. Celem wymagań sformułowanych w tej normie jest uregulowanie i wsparcie procesu podejmowania decyzji projektowych przez ujednolicenie zasad oceny oraz zapewnienie porównywalności wyników dla różnych wariantów danego przedsięwzięcia przy zastosowaniu wspólnego ekwiwalentu funkcjonalnego obiektu. W przeciwieństwie do normy PN-EN 15643:2021, obejmującej wszystkie typy obiektów budowlanych, norma PN-EN 17472:2022 koncentruje się wyłącznie na obiektach inżynieryjnych. Wyłącza zatem z oceny budynki stanowiące części składowe większych systemów infrastrukturalnych, odsyłając w takich przypadkach do odpowiednich norm przeznaczonych dla budynków: PN-EN 15978:2012 (ocena środowiskowa), PN-EN 16309:2014 (ocena społeczna) oraz PN-EN 16627:2015 (ocena ekonomiczna).

Pod względem struktury norma PN-EN 17472:2022 obejmuje cały proces oceny, analogicznie jak w normie ramowej PN-EN 15643:2021 – od określenia celu i przedmiotu oceny (z uwzględnieniem funkcji oraz charakterystyki technicznej konstrukcji), przez ustalenie zakresu i scenariuszy cyklu życia, zebranie danych wejściowych, aż po wybór metod oceny, obliczenie wskaźników i opracowanie końcowego sprawozdania z wyników. Norma zawiera także rozbudowany zestaw definicji i skrótów dostosowanych do specyfiki obiektów inżynieryjnych oraz szczegółowe wymagania każdej fazy oceny, które w normie podstawowej PN-EN 15643:2021 pozostają jedynie zasygnalizowane. W kontekście praktyki projektowej wymagania i zalecenia normy PN-EN 15643:2021 powinny stanowić podstawę wdrażania strategii zintegrowanego projektowania, rozumianego jako proces interdyscyplinarnej współpracy pomiędzy wszystkimi uczestnikami inwestycji – architektami, inżynierami branżowymi, konsultantami ds. środowiskowych, inwestorami, a także przyszłymi użytkownikami obiektu. Choć sama norma nie zawiera ani definicji, ani odniesienia do terminu „projektowanie zintegrowane", jej podejście jest w pełni zgodne z jego założeniami – ze szczególnym uwzględnieniem roli fazy

koncepcyjnej, iteracyjnego charakteru decyzji projektowych, wielokryterialnej analizy rozwiązań oraz dążenia do synergii pomiędzy różnymi aspektami technicznymi i środowiskowymi. Poza wymaganiami sformułowanymi w normach PN-EN 15643:2021 oraz PN-EN 17472:2022, odnoszącymi się do obiektów inżynieryjnych, zrównoważona ocena konstrukcji żelbetowych powinna być prowadzona na podstawie zaleceń zawartych w aktualnych, uznanych normach technicznych, zapewniających spójność, porównywalność i rzetelność wyników w odniesieniu do aspektów środowiskowych, ekonomicznych i społecznych.

2.3. Granica systemu i fazy cyklu życia obiektu budowlanego

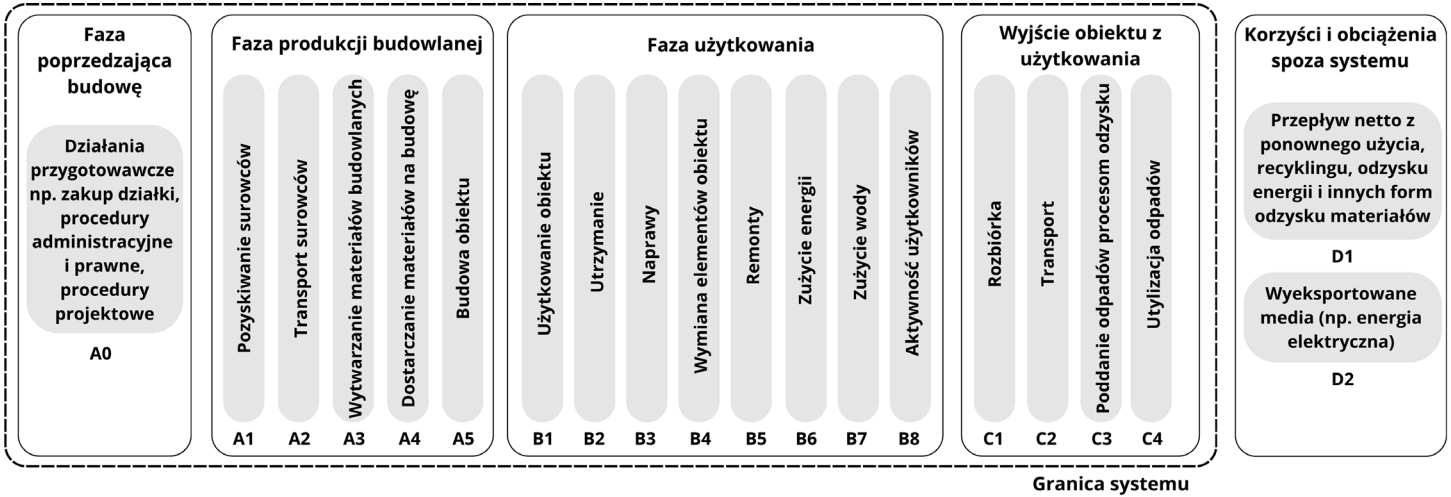
W ocenie rozwiązań projektowych, zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 15643:2021, należy stosować podejście systemowe obejmujące analizę cyklu życia obiektu budowlanego. W podejściu systemowym uwzględnia się budynek, jego fundamenty, elementy małej architektury na terenie działki oraz tymczasowe obiekty związane z budową, natomiast elementy wyposażenia niezwiązane z budynkiem wyłącza się z analizy. Jeśli ocena ogranicza się do części obiektu, wybranego aspektu cyklu życia, lub pomija istotne oddziaływania, należy to udokumentować, przedstawić w raporcie i uzasadnić.

Wymagania normy PN-EN 15643:2021 przewidują podział cyklu życia obiektu budowlanego na moduły informacyjne, reprezentujące kolejne etapy – od działań przedinwestycyjnych, pozyskiwania surowców i wytwarzania wyrobów budowlanych, aż po procesy związane z końcem życia obiektu. W kontekście oceny cyklu życia granice systemu odgrywają kluczową rolę w definiowaniu zakresu analizy. Odpowiedni dobór granic systemu wpływa bezpośrednio na kompletność i wiarygodność wyników, dlatego wymagają one precyzyjnego określenia oraz jednoznacznego udokumentowania. Strukturę systemu objętego oceną przedstawiono na rysunku 2.2.

Faza poprzedzająca budowę – moduł A0 – obejmuje procesy fazy przedbudowlanej, na którą składają się: ocena ryzyka związanego z zagospodarowaniem terenu, zaangażowanie interesariuszy, wstępne badania techniczne i ekspertyzy, koszty związane z nabyciem nieruchomości lub gruntu, a także planowanie i projektowanie. Ważne jest, aby wdrażać w tej fazie działania, takie jak ocena oddziaływania na środowisko czy ocena aspektów społecznych, ponieważ decyzje podejmowane w tej fazie mają zazwyczaj największy wpływ na późniejsze oddziaływanie obiektu.

Faza wyrobu – w granicach tego podsystemu mieszczą się procesy związane z wytwarzaniem wyrobów budowlanych. Zgodnie z normą PN-EN 15643:2021, moduł A1 obejmuje:

- wydobycie i przetwarzanie surowców oraz produkcję i przetwarzanie biomasy,
- ponowne użycie wyrobów lub materiałów z wcześniejszego systemu wyrobu,
- przetwarzanie materiałów wtórnych stosowanych jako wejścia do produkcji wyrobu bez uwzględnienia procesów prowadzących do utraty statusu odpadu,
- produkcję energii elektrycznej, pary i ciepła z zasobów energii pierwotnej z uwzględnieniem procesów ich pozyskiwania, oczyszczania i transportu,
- odzyskiwanie energii oraz inne procesy odzyskiwania z paliw wtórnych, z wyłączeniem procesów przetwarzania we wcześniejszych systemach.



Rys. 2.2. Struktura systemu budynku – moduły informacyjne
(PN-EN 15643:2021)

Moduł A2 (transport w fazie wyrobu) obejmuje procesy transportowe surowców, półproduktów itp. do producenta oraz transport wewnętrzny. Z kolei moduł A3 (wytwarzanie wyrobów budowlanych) obejmuje procesy:

– produkcji materiałów pomocniczych lub półproduktów,
– wytwarzania wyrobów,
– produkcji opakowań.

Każdy z modułów w fazie wyrobu obejmuje również procesy związane z przeróbką wytworzonych odpadów do momentu utraty przez nie statusu odpadu oraz z usuwaniem końcowych pozostałości (w tym opakowań, które nie opuszczają bram zakładu wraz z wyrobem).

Faza budowy – etap obejmujący procesy zachodzące pomiędzy opuszczeniem bramy zakładu produkcyjnego wyrobów a całkowitym ukończeniem robót budowlanych.

Moduł A4 (transport) obejmuje transport wyrobów budowlanych od dostawcy na budowę, z uwzględnieniem pośredniego magazynowania, dystrybucji itp., transport na budowę i z budowy wszelkiego sprzętu niezbędnego do wykonywania robót, a także oddziaływania i aspekty związane ze stratami materiału podczas transportu. Należy podkreślić, że transport ludzi na budowę i z budowy nie jest uwzględniany w ocenie.

Moduł A5 (zasadnicze procesy budowlane) obejmuje:

– roboty ziemne i krajobrazowe,
– magazynowanie materiałów i ich zabezpieczenie,
– transport materiałów, produktów, urządzeń i odpadów w obrębie budowy,
– roboty tymczasowe,
– produkcję i przetwarzanie wyrobów budowlanych w obrębie placu budowy,
– zapewnienie ogrzewania, chłodzenia, wentylacji itp. podczas procesu budowy,
– wbudowanie wyrobów budowlanych w strukturę obiektu, z uwzględnieniem materiałów pomocniczych nieuwzględnianych w EPD (np. środków antyadhezyjnych do dekowań),
– zużycie wody na potrzeby chłodzenia i czyszczenia urządzeń na budowie,
– gospodarowanie odpadami na budowie (wraz z transportem z budowy),
– produkcję, transport i gospodarowanie odpadami oraz stratami materiałów i wyrobów budowlanych podczas procesu budowy.

Faza użytkowania – rozumiana jako faza eksploatacji – następuje po ukończeniu robót budowlanych i obejmuje wszystkie procesy do momentu wycofania obiektu z eksploatacji. W granicach podsystemu mieszczą się procesy użytkowania i utrzymania obiektu. Ocena powinna obejmować oddziaływania i aspekty systemów technicznych i wyposażenia integralnie związanego z obiektem**.** Analiza powinna wykluczać oddziaływania urządzeń, które nie są trwale związane z budynkiem.

Wyposażenie związane z budynkiem obejmuje wyroby przytwierdzone do niego w taki sposób, że ich demontaż stanowi proces konstrukcyjny. Z kolei urządzenia niezwiązane z obiektem obejmują m.in. wyposażenie domowe, komercyjne lub przemysłowe, w tym pralki, lodówki, urządzenia kuchenne, elektroniczne wyposażenie biurowe oraz urządzenia procesów przemysłowych.

Moduł B1 (użytkowanie) obejmuje oddziaływania i aspekty wynikające z normalnych, przewidywanych warunków użytkowania budynku. Moduł B2 (utrzymanie) obejmuje

wszystkie planowe działania techniczne i związane z nimi działania administracyjne, których celem jest utrzymanie obiektu lub jego elementu w stanie spełniającym wymagania techniczne i użytkowe, przy zachowaniu właściwości estetycznych. Obejmuje również działania prewencyjne i regularne, takie jak czyszczenie i serwisowanie, a także wymianę lub naprawę części zużytych, zniszczonych lub zdegradowanych. Do podstawowych elementów modułu należą:

– produkcja i transport materiałów potrzebnych do utrzymania,
– utrzymanie czystości budynku wewnątrz i na zewnątrz,
– transport wszelkich odpadów powstających w procesie utrzymania,
– inne procesy związane z utrzymaniem obiektu, niezbędne do zachowania właściwego stanu technicznego i estetycznego.

Zużycie wody i energii na potrzeby utrzymania również powinno zostać uwzględnione w obrębie tego modułu, mimo że moduły B6 i B7 odnoszą się bezpośrednio do wykorzystania tych mediów.

W granicach modułu naprawy (B3) mieszczą się wszystkie procesy związane z naprawą elementów obiektu w fazie jego użytkowania. Wyszczególnia się w nim:

– produkcję i transport wyrobów (zasadniczych i pomocniczych) potrzebnych do prowadzenia napraw, z uwzględnieniem ewentualnych strat,
– zużycie energii i wody związane z tymi procesami,
– aspekty i oddziaływania odpadów materiałowych podczas procesu naprawy, wynikające z produkcji i transportu,
– gospodarowanie odpadami.

Moduł B4 (wymiana) oraz B5 (remont) są analogiczne do modułu B3, z ta różnicą, że odnoszą się kolejno do wymiany elementów oraz remontów – tj. przywrócenia budynku lub jego części do stanu, w którym może on pełnić przypisane mu funkcje. W granicach fazy eksploatacji znajduje się również moduł B6, związany z operacyjnym zużyciem energii – dotyczy on wyłącznie urządzeń technicznych trwale związanych z budynkiem (zintegrowanego systemu technicznego obiektu). Zużycie energii w tym module wynika z ogrzewania, dostarczania ciepłej wody, klimatyzacji, wentylacji, oświetlenia, zasilania pomp czy systemów kontroli i automatyzacji budynku.

Pewne wytyczne dotyczące zużycia energii i obliczania wskaźników jej zużycia zawierają normy PN-EN 15603:2008 i późniejsza PN-EN ISO 52000-1:2017, dotyczące energetycznych właściwości użytkowych budynków. Zużycie energii wynikające z użytkowania innych, niewymienionych w normie urządzeń, a będących integralną częścią budynku, powinno zostać uwzględnione i szczególnie zaznaczone w raporcie. Pozostałe zużycie energii, wynikające z użytkowania obiektu (np. urządzeń AGD i RTV), może zostać dodatkowo uwzględnione w ocenie jako osobna część opracowania. Ewentualne nadwyżki energii, wynikłe z jej produkcji w obrębie obiektu, powinny zostać uwzględnione, lecz jako składowe modułu D.

Moduł informacyjny B7 dotyczy zużycia wody w okresie eksploatacji budynku w obrębie systemów technicznych, tj. ogrzewania, chłodzenia, wentylacji, nawilżania, ciepłej wody użytkowej i innych systemów sanitarnych, ochronnych, przeciwpożarowych, nawadniania obszarów związanych z obiektem – zielonych dachów i zielonych ścian – a także innych specyficznych systemów związanych z budynkiem, np. fontann, basenów i saun.

Moduł B8 obejmuje aspekty środowiskowe i skutki wynikające z aktywności użytkowników obiektu (np. oddziaływania związane z dojazdami pracowników biur czy mieszkańców do i z budynku), z wyłączeniem zużycia energii eksploatacyjnej, uwzględnionego w innych modułach B.

Faza końca życia – to etap wycofania obiektu z użytkowania i przekazania go do likwidacji. Od tego momentu obiekt budowlany powinien być traktowany jako źródło surowców wtórnych, dlatego należy przewidzieć technologię rozbiórki lub dekonstrukcji obiektu, aby zmaksymalizować odzysk odpadów budowlanych. Aby jednak można było mówić o transformacji odpadu w produkt, muszą być spełnione następujące warunki (Dz.U. 2016, poz. 1987):

- przedmiot lub substancja są powszechnie stosowane do konkretnych celów;
- istnieje rynek takich przedmiotów lub substancji lub popyt na nie;
- dany przedmiot lub substancja spełnia wymagania techniczne dla zastosowania do konkretnych celów oraz wymagania określone w przepisach i normach mających zastosowanie do produktu;
- zastosowanie przedmiotu lub substancji nie prowadzi do negatywnych skutków dla życia, zdrowia ludzi ani środowiska;
- przedmiot lub substancja spełnia wymagania określone przez przepisy Unii Europejskiej.

Budynek osiąga status końca życia, gdy wszystkie elementy obiektu i materiały zostaną usunięte z działki, a ona sama będzie gotowa do dalszego zagospodarowania. Na fazę końca życia składają się moduły C1–C4.

Moduł C1 obejmuje procesy rozbiórki/dekonstrukcji obiektu, w tym wszystkie procesy zasadnicze realizowane na budowie, a także roboty tymczasowe, zlokalizowane również poza placem budowy, niezbędne do przeprowadzenia rozbiórki/dekonstrukcji wraz ze wstępnym sortowaniem materiałów. Moduł C2 dotyczy transportu odpadów z placu budowy do miejsca ich utylizacji, z uwzględnieniem procesów tymczasowego magazynowania. Moduł C3 obejmuje procesy związane z odzyskiem odpadów, w tym ich gromadzenie i przetwarzanie. W tym module należy uwzględnić hierarchię postępowania z odpadami, która obejmuje:

- zapobieganie powstawaniu odpadów (w pierwszej kolejności),
- przygotowywanie do ponownego użycia,
- recykling,
- inne procesy odzysku (w tym energii),
- unieszkodliwianie.

Zaznacza się, że jeśli wskaźnik odzysku energii dla danego odpadu jest mniejszy niż 60%, nie może być on traktowany jako surowiec do odzysku energii. Jeśli materiał utraci status odpadu i znajdzie zastosowanie jako półprodukt w innym systemie produkcyjnym, wszelkie dodatkowe procesy przypisuje się do modułu D. Cały system zamyka moduł C4, a więc etap usuwania odpadów wraz z ich obróbką fizyczną oraz zarządzaniem miejscem składowania. Wszelkie obciążenia (emisje) związane z usuwaniem odpadów należy przypisywać do badanego systemu.

Zyski i straty poza granicą systemu – moduł D zawiera informacje na temat zysków i strat związanych z odzyskiwaniem wartości z wyrobów i materiałów nadających się do odzysku, a pochodzących z obiektu budowlanego. Odnosi się również do użytecznych nośników energii opuszczających system, np. paliw wtórnych. Potencjalne zyski oblicza się na

podstawie przyjętych scenariuszy przetwarzania odpadów, w oparciu o aktualne technologie i stosowaną praktykę.

Alokacja wpływów – w kontekście oceny cyklu życia kluczową kwestią jest moment przejścia materiałów z obszaru systemowego (moduły A–C) do etapu poza systemem (moduł D). W praktyce stosuje się różne podejścia metodologiczne do alokacji, które określają, w jakim stopniu obciążenia i korzyści przypisywane są analizowanemu systemowi, a w jakim kolejnemu cyklowi życia materiału. Do często stosowanych metod należą m.in. (Raport EUROFER 2015; Obrecht et al. 2021):

- *Cut-off* (100:0) – wszystkie obciążenia środowiskowe związane z produkcją materiału przypisuje się systemowi pierwotnemu, natomiast system wtórny nie ponosi żadnej odpowiedzialności ani nie uzyskuje korzyści wynikających z dalszego wykorzystania materiału. W efekcie nie uwzględnia się żadnych korzyści z odzysku, recyklingu czy ponownego użycia materiału po zakończeniu jego pierwotnej funkcji.
- *End-of-life* (0:100) – podejście to uwzględnia wpływy środowiskowe związane z końcowym etapem cyklu życia produktu oraz potencjalne korzyści wynikające z jego ponownego wykorzystania lub recyklingu. Całość tych wpływów i korzyści przypisuje się systemowi wtórnemu, natomiast system pierwotny nie ponosi odpowiedzialności za dalszy los materiału.
- Podejście rynkowe (ang. *market-based*) – alokacja wpływów środowiskowych opiera się na uwarunkowaniach ekonomicznych, w szczególności na relacji między popytem a podażą materiału po zakończeniu jego pierwotnego cyklu życia. Jeżeli materiał odzyskany ma wartość rynkową i istnieje zapotrzebowanie na jego ponowne użycie, część korzyści środowiskowych przypisuje się systemowi pierwotnemu. W przeciwnym razie większa część obciążeń pozostaje w systemie pierwotnym.
- Podejście 50/50 – dzieli obciążenia i korzyści po równo między pierwszy i drugi cykl życia produktu. Oznacza to, że 50% korzyści wynikających z wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu w fazie produkcji oraz 50% korzyści związanych z recyklingiem na końcu życia produktu przypisuje się do analizowanego cyklu życia.

Zgodnie z normą PN-EN 15804+A2:2020 zalecanym podejściem do modelowania końcowych etapów cyklu życia materiałów jest podejście *cut-off*, tzw. zanieczyszczający płaci. Zakłada ono uwzględnienie w analizie wszystkich procesów prowadzących do utraty statusu odpadu. Dopiero po spełnieniu tych warunków możliwe jest formalne zaklasyfikowanie materiału jako surowca wtórnego, a tym samym przypisanie potencjalnych korzyści do etapu poza systemem (moduł D).

Utrata statusu odpadu jest uregulowana przepisami prawa unijnego, a w Polsce jej zasady określa ustawa o odpadach (Dz.U. 2013 poz. 21 z późn. zm.). Zgodnie z art. 14 tej ustawy materiał przestaje być odpadem, jeżeli spełnia wszystkie kryteria:

- materiał lub substancja są wykorzystywane do określonego celu,
- dla danego materiału istnieje rynek lub zapotrzebowanie,
- materiał spełnia wymagania techniczne oraz przepisy prawa i normy właściwe dla danego zastosowania,
- jego wykorzystanie nie powoduje negatywnego wpływu na zdrowie ludzi ani na środowisko.

2.4. Granice systemu dla monolitycznych konstrukcji żelbetowych

Sposób definiowania granic systemu zależy bezpośrednio od charakteru analizowanego obiektu, ponieważ poszczególne fazy cyklu życia mogą mieć różne znaczenie w zależności od rodzaju wyrobu. W wielu przypadkach określone etapy/moduły okazują się marginalne, a niektóre oddziaływania mogą w ogóle nie występować. Przykładowo, w odniesieniu do konstrukcji związanych z posadowieniem obiektów budowlanych znaczenie przypisuje się głównie etapom produkcji i realizacji, natomiast etapy użytkowania oraz zakończenia eksploatacji nie generują istotnych procesów (Mach i Wałach 2024).

W odpowiedzi na to zróżnicowanie opracowywane są szczegółowe wytyczne dla konkretnych grup materiałowych, elementów lub obiektów budowlanych, które precyzują, jakie etapy cyklu życia oraz związane z nimi procesy należy uwzględniać, a które mogą być pomijane w analizie. Obecnie podejście to znajduje zastosowanie głównie w ocenach środowiskowych, jednak przyjęte zasady mogą stanowić punkt wyjścia do formułowania analogicznych ram również w odniesieniu do analiz kosztowych i społecznych. Przykładami dokumentów normalizacyjnych, które określają wytyczne dotyczące definiowania granic systemu w ramach ocen środowiskowych dla wybranych grup materiałowych, są normy np. dla drewna okrągłego i tarcicy – PN-EN 16485:2014, płytek ceramicznych – PN-EN 17160:2019 czy izolacji cieplnej – PN-EN 16783:2024. W przypadku wyrobów z betonu oraz elementów betonowych zasady definiowania granic systemu określono w normie PN-EN 16757:2023.

Na podstawie normy PN-EN 16757:2023, dostępnych publikacji oraz doświadczeń praktycznych określono modelowy cykl życia konstrukcji żelbetowych, służący do prowadzenia wieloaspektowej oceny takich konstrukcji. Przed właściwym etapem produktu należy wyróżnić fazę przygotowawczą, określaną jako etap A0. Etap ten obejmuje opracowanie dokumentacji projektowej, wybór rozwiązań materiałowych i technologicznych (np. klasy betonu, rodzaju zbrojenia, technologii monolitycznej/prefabrykowanej), analizy warunków gruntowych i środowiskowych, a także działania administracyjne oraz organizacyjne związane z przygotowaniem inwestycji. Choć etap ten nie wiąże się jeszcze z fizycznym zużyciem materiałów ani emisjami, to właśnie w jego ramach podejmowane są decyzje mające kluczowy wpływ na charakter i skalę oddziaływań w kolejnych fazach cyklu życia konstrukcji.

Etap produktu (A1–A3) obejmuje procesy związane z przygotowaniem materiałów niezbędnych do wykonania konstrukcji żelbetowych. Uwzględnia on wydobycie oraz wstępne przetwarzanie wszystkich surowców wykorzystywanych do produkcji mieszanki betonowej – cementu, kruszyw, dodatków mineralnych oraz domieszek chemicznych. W ramach tego etapu analizowany jest również transport surowców z miejsca ich pozyskania lub wytworzenia do zakładu produkcyjnego. W przypadku konstrukcji monolitycznych może to być transport do mobilnego węzła betoniarskiego zlokalizowanego bezpośrednio na placu budowy lub do stacjonarnej wytwórni obsługującej daną inwestycję. Ostatnim procesem w ramach modułu A1–A3 jest przygotowanie mieszanki betonowej – dozowanie składników, ich wymieszanie oraz załadunek gotowej mieszanki do środka transportu. W przypadku monolitycznych konstrukcji żelbetowych jest to końcowy etap przygotowania materiału, który zostanie

bezpośrednio wbudowany na placu budowy. Z kolei w przypadku prefabrykatów żelbetowych etap ten obejmuje dodatkowo procesy układania, zagęszczania czy pielęgnacji mieszanki betonowej w zakładzie prefabrykacji aż do uzyskania końcowego elementu.

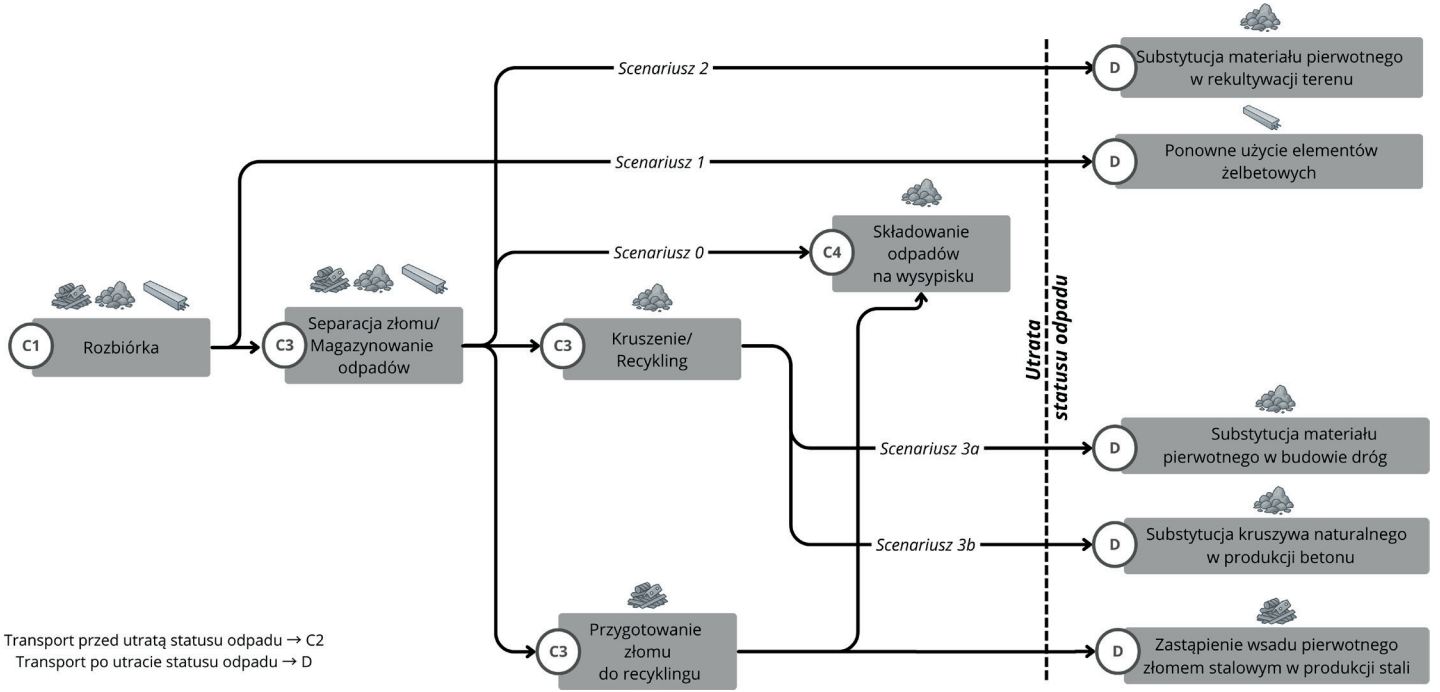
W przypadku konstrukcji żelbetowych wykonywanych w technologii monolitycznej etap budowy (moduły A4–A5) obejmuje zarówno dostawy materiałów na plac budowy, jak i realizację procesów technologicznych bezpośrednio *in situ*. W ramach modułu A4 analizowany jest transport mieszanki betonowej z wytwórni, stali zbrojeniowej, deskowań oraz innych materiałów pomocniczych. Moduł A5 obejmuje sekwencję operacji wykonawczych, w tym montaż i demontaż deskowań, układanie zbrojenia, betonowanie, zagęszczanie mieszanki, a także pielęgnację betonu. W przypadku elementów prefabrykowanych moduł A4 obejmuje transport prefabrykatów żelbetowych z zakładu produkcyjnego na plac budowy, a także dostawę materiałów pomocniczych, takich jak stal montażowa, zaprawy, łączniki i systemy kotwiące. W module A5 ujęte są procesy związane z montażem prefabrykatów przy użyciu ciężkiego sprzętu (np. dźwigów wieżowych lub samojezdnych) oraz ich łączeniem w jednorodną strukturę konstrukcyjną. W zależności od rozwiązania projektowego mogą być konieczne również dodatkowe materiały konstrukcyjne, np. nadbeton, wypełnienia dylatacyjne, zbrojenie uzupełniające lub zaprawy wyrównawcze.

W przypadku konstrukcji żelbetowych etap użytkowania (moduły B1–B7) nie wiąże się z istotnymi procesami technologicznymi ani materiałowymi. Elementy żelbetowe pełnią funkcję nośną w sposób pasywny – bez konieczności zasilania energią, stosowania materiałów eksploatacyjnych czy prowadzenia cyklicznych działań serwisowych. Konstrukcje te projektowane są na pełny, przewidywany okres użytkowania obiektu. Przy zachowaniu właściwych standardów wykonawczych oraz odpowiedniej jakości materiałów w fazie eksploatacji zazwyczaj nie występuje konieczność napraw, wymiany ani renowacji elementów nośnych. Wyjątek stanowią elementy niektórych konstrukcji infrastrukturalnych, narażonych na silne oddziaływania atmosferyczne.

Etap końca życia konstrukcji żelbetowej (moduły C1–C4) obejmuje procesy związane z jej likwidacją oraz zagospodarowaniem powstałych materiałów odpadowych. Prace te polegają przede wszystkim mechanicznym usuwaniu elementów z zastosowaniem technik, takich jak cięcie i kruszenie, realizowanych przy użyciu specjalistycznych maszyn i urządzeń.

Po rozbiórce elementy konstrukcyjne z żelbetu traktowane są jako odpady. Odpady mogą być transportowane poza teren budowy do dalszego przetwarzania lub unieszkodliwiania, bądź poddawane wstępnemu przetwarzaniu bezpośrednio na miejscu. W zależności od przyjętej strategii możliwe są różne scenariusze dalszego postępowania z odpadami betonowymi, przedstawione na rysunku 2.3.

Scenariusze różnią się stopniem wykorzystania pozyskanego materiału – od braku wykorzystania, tj. unieszkodliwienia na składowisku (scenariusz 0), aż po ponowne wykorzystanie (scenariusz 1), w którym prefabrykowane elementy lub fragmenty konstrukcji, po ocenie technicznej, mogą zostać ponownie użyte. Scenariusz 2 zakłada użycie gruzu betonowego bez przetwarzania, np. jako materiał zasypowy przy rekultywacji. W scenariuszu 3 gruz betonowy jest rozdrabniany na kruszywo wtórne, które może służyć jako zamiennik kruszywa naturalnego w budownictwie drogowym (scenariusz 3a) lub – po przesianiu – jako składnik nowej mieszanki betonowej (scenariusz 3b).



Rys. 2.3. Scenariusze zagospodarowania odpadów z rozbiórki
(PN-EN 16757:2023)

W praktyce dominującym scenariuszem zagospodarowania gruzu betonowego w krajach Unii Europejskiej pozostaje jego wykorzystanie w zastosowaniach o niskiej jakości. Składowanie jest najmniej preferowaną opcją zgodnie z hierarchią gospodarowania odpadami w UE. Niektóre państwa (np. Belgia, Holandia, Wielka Brytania) wprowadziły rygorystyczne przepisy – zakazy składowania lub wysokie podatki od składowania – co skutecznie zwiększyło poziom recyklingu (Cudecka-Purina et al. 2024). Według danych z 2020 r. średni poziom odzysku odpadów budowlanych i rozbiórkowych w UE wyniósł 89%, jednak wartość ta obejmuje również działania o charakterze technicznego wykorzystania, np. użycie jako materiał w podbudowach drogowych (Caro et al. 2024) lub materiał wypełniający. Zastosowania umożliwiające pełną substytucję surowców pierwotnych, np. ponowne użycie elementów konstrukcyjnych lub recykling betonu do produkcji nowej mieszanki, pozostają ograniczone ze względu na wymagania techniczne i ekonomiczne. Tym samym, mimo wysokiego poziomu odzysku deklarowanego w statystykach, rzeczywisty stopień cyrkularności gruzu betonowego pozostaje stosunkowo niski. Zgodnie z Uchwałą nr 96 Rady Ministrów z dnia 12 czerwca 2023 r. w sprawie Krajowego planu gospodarki odpadami 2028 (Uchwała nr 96 z dnia 12 czerwca 2023), w ostatnich latach odzyskowi poddawano około 96,0% odpadów budowlanych i rozbiórkowych, uwzględniając wszystkie formy odzysku. Natomiast sam odzysk materiałowy (recykling) dla wybranych rodzajów tych odpadów wyniósł odpowiednio 74,4% i 75,1%.

Należy zauważyć, że w przeciwieństwie do betonu stal jest materiałem powszechnie poddawanym wysokiej jakości recyklingowi. Wynika to z kilku kluczowych cech – wysokiej wartości ekonomicznej złomu stalowego, łatwości separacji dzięki właściwościom magnetycznym oraz dużej uniwersalności, pozwalającej na jego ponowne zastosowanie w różnych produktach (Steel for Life 2021). Złom stalowy w 100% nadaje się do recyklingu, nie tracąc nic ze swoich właściwości po odpowiednim przetworzeniu (Raport EUROFER 2015), a osiągany wskaźnik recyklingu szacuje się na 95% (Raport WSA 2024). W Unii Europejskiej około 56% produkcji stali pochodzi ze złomu stalowego, co przekłada się na recykling blisko 100 mln ton złomu rocznie (Raport EUROFER 2015).

Etap poza systemem (moduł D) obejmuje procesy zachodzące po zakończeniu cyklu życia konstrukcji żelbetowej, które nie są bezpośrednio związane z jej eksploatacją ani rozbiórką, lecz generują wymierne korzyści środowiskowe, materiałowe, energetyczne lub ekonomiczne. W przypadku budynku żelbetowego moduł ten uwzględnia przede wszystkim potencjalne efekty wynikające z odzysku i ponownego wykorzystania materiałów powstałych w wyniku demontażu lub rozbiórki. Dla rozpatrywanych wcześniej scenariuszy korzyści te mogą obejmować: uniknięcie wpływów związanych z produkcją nowych prefabrykatów, ograniczenie zużycia kruszyw naturalnych oraz częściowe zastąpienie surowców pierwotnych.

Należy podkreślić, że nie każdy przypadek odzysku lub recyklingu automatycznie skutkuje bilansem korzystnym środowiskowo lub ekonomicznie. W określonych warunkach proces przetwarzania materiału wtórnego może wiązać się z wyższymi emisjami lub kosztami niż zastosowanie surowców pierwotnych. Warunki utraty statusu odpadu mogą być różne. W przypadku stali zbrojeniowej odzyskiwanej z rozbiórek kwestie te regulują m.in. przepisy rozporządzenia Rady (UE) nr 333/2011 (Rozporządzenie Rady (UE) nr 333/2011 z dnia 31 marca 2011 r.), które ustanawiają kryteria, jakie musi spełniać złom stalowy, aby

mógł zostać uznany za surowiec wtórny. Zgodnie z tymi przepisami złom stalowy może utracić status odpadu, jeśli zostanie odpowiednio posegregowany i oczyszczony, a wszystkie operacje przygotowawcze (cięcie, sortowanie, usuwanie zanieczyszczeń) zostaną zakończone. Z kolei w przypadku gruzu betonowego w Polsce obecnie nie istnieją szczegółowe przepisy wykonawcze określające warunki utraty statusu odpadu dla tego materiału. Oznacza to, że proces ten musi opierać się na ogólnych zasadach zawartych w art. 14 ustawy o odpadach (Dz.U. 2013, poz. 21 z późn. zm.).

3. Kryterium techniczne w zrównoważonej ocenie konstrukcji żelbetowych

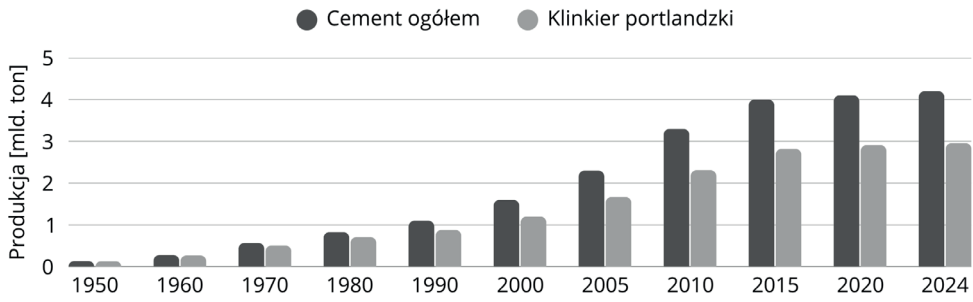
3.1. Beton jako materiał konstrukcyjny

Beton jest obecnie najpowszechniej stosowanym materiałem konstrukcyjnym na świecie – szacuje się, że globalna produkcja betonu sięga około 30 mld ton rocznie (Nehdi et al. 2024). Wynika to z unikalnych cech betonu – plastyczności w stanie świeżym oraz wysokiej wytrzymałości, zwłaszcza na ściskanie, po jego związaniu (Mehta i Monteiro 2014). W połączeniu ze stalowym zbrojeniem (tworząc żelbet) beton przenosi także znaczne obciążenia rozciągające, co pozwala wznosić trwałe i ognioodporne obiekty budowlane (Neville i Brooks 2010). Powszechność betonu wynika również z dostępności surowców (cementu, kruszyw, wody) praktycznie w każdym regionie świata (Schneider 2019). Typowa mieszanka betonu zwykłego składa się z cementu portlandzkiego jako spoiwa, wody i kruszywa (piasku, żwiru lub kruszywa łamanego) – przy czym kruszywo stanowi łącznie około 60–75% objętości, co czyni je drugim po wodzie najczęściej eksploatowanym na świecie zasobem naturalnym (Yasmin et al. 2024).

Intensywne wykorzystanie betonu wiąże się jednak z poważnymi wyzwaniami środowiskowymi. Produkcja cementu (zwłaszcza klinkieru portlandzkiego) jest procesem wysokoenergetycznym i wysokoemisyjnym – odpowiada za około 7–8% globalnej emisji CO_2 (Raport UNEP 2024). Emisje te wynikają zarówno ze spalania paliw do ogrzania pieców, jak i z rozkładu węglanu wapnia w klinkierze cementowym. Z kolei proces pozyskania kruszyw naturalnych odpowiada szacunkowo za około 1% globalnej emisji CO_2 (Bortoli 2023), a ponadto powoduje degradację środowiska (erozję, dewastację krajobrazu, zużycie energii). Na rysunku 3.1 przedstawiono szacunkowe dane dotyczące produkcji klinkieru portlandzkiego oraz cementu na świecie – widoczny jest rosnący trend zapotrzebowania, ze szczególnie znaczącym wzrostem po 1990 r. oraz stabilizacją poziomu produkcji po 2015 r. Istotna z punktu widzenia oddziaływania na środowisko jest także tendencja do zmniejszania udziału klinkieru portlandzkiego w globalnej produkcji cementu, co wynika z coraz powszechniejszego stosowania dodatków mineralnych w cementach.

W związku z rosnącym zapotrzebowaniem na beton (a tym samym cement) oraz coraz wyższymi wymaganiami stawianymi współczesnym konstrukcjom – zarówno betonowym, jak i żelbetowym – obserwuje się intensywny rozwój technologii. Jego efektem są cementy o zmniejszonym udziale klinkieru portlandzkiego na rzecz dodatków mineralnych oraz

nowoczesne odmiany betonów o zróżnicowanych parametrach, takie jak betony wysokowartościowe i ultrawysokowartościowe, betony samozagęszczalne, betony na bazie kruszyw z recyklingu, fibrobetony zwierające różnego rodzaju włókna czy niskoemisyjne betony geopolimerowe (Gołaszewski 2021).



Rys. 3.1. Zestawienie produkcji cementu na świecie
(opracowanie własne na podstawie Andrew 2019; Ige et al. 2024; Research and Markets 2024)

3.1.1. Betony wysokowartościowe i ultrawysokowartościowe

Beton wysokowartościowy i ultrawysokowartościowy (HPC, ang. *high-performance concrete*; UHPC, ang. *ultrahigh-performance concrete*) to beton o podwyższonych parametrach wytrzymałościowych i eksploatacyjnych w stosunku do betonu tradycyjnego (NSC). Najczęściej jako kryterium przyjmuje się wytrzymałość na ściskanie powyżej 60 MPa (klasy powyżej C50/60). Osiągnięcie wysokich parametrów wymaga specjalnych zabiegów technologicznych, takich jak obniżenie wskaźnika w/c (często do 0,20–0,35) oraz zastosowanie superplastyfikatorów w celu zachowania urabialności mieszanki przy małej ilości wody. Konieczne jest również zastosowanie dodatków mineralnych poprawiających strukturę materiału, najczęściej w postaci pyłu krzemionkowego, który dzięki bardzo drobnym cząstkom wypełnia ewentualne pory i tym samym zwiększa końcową wytrzymałość betonu (Kadri et al. 2012; Bajno et al. 2020).

Beton ten charakteryzuje się wysoką wytrzymałością (w praktyce około 80–120 MPa, a w przypadku UHPC nawet powyżej 120 MPa) oraz podwyższoną trwałością. Ma bardzo niską porowatość i nasiąkliwość, co przekłada się na wysoką odporność na penetrację wody, chlorków i gazów, co jest istotne m.in. w kontekście ochrony zbrojenia przed korozją (Konkov 2013). Odznacza się także zwiększoną odpornością na cykle zamrażania i odmrażania oraz na agresję chemiczną (np. siarczany), dzięki zredukowanej przepuszczalności. Często HPC charakteryzuje się również wyższym modułem sprężystości (większą sztywnością) niż beton zwykły, co może korzystnie wpływać na ugięcia elementów. Poprawnie zaprojektowany i wykonany beton HPC i UHPC może charakteryzować się znacznie wydłużoną żywotnością

projektową – szacuje się, że może ona wynosić od 100 do 200 lat bez istotnej degradacji właściwości (Konkov 2013). Długookresowa trwałość HPC przyczynia się do większej zrównoważoności – rzadko wymagane są remonty i naprawy konstrukcji, co w skali cyklu życia obiektu zmniejsza zużycie materiałów i energii.

Produkcja betonów wysokowartościowych zwykle wymaga użycia większej ilości cementu (a także energii przy przygotowaniu mieszanki, np. w wydajnych mieszalnikach), co zwiększa ślad węglowy na 1 m³ betonu. Z drugiej strony, dzięki znacznie wyższej wytrzymałości i trwałości, elementy z HPC i UHPC mogą mieć mniejsze wymiary (zwłaszcza elementy pracujące głównie na ściskanie, co pozwala na znaczną oszczędność materiałów) oraz służyć dłużej bez konieczności remontów i napraw, co sprzyja redukcji ogólnej emisji w ujęciu cyklu życia konstrukcji (Barbhuiya et al. 2025).

3.1.2. Beton samozagęszczalny

Beton samozagęszczalny (SCC, ang. *self-compacting concrete*) to rodzaj mieszanki betonowej, która w stanie świeżym charakteryzuje się wysoką płynnością i zdolnością do samodzielnego odpowietrzania oraz zagęszczania pod własnym ciężarem. Oznacza to, że beton SCC może wypełnić nawet deskowanie o bardzo gęstym zbrojeniu bez potrzeby wibracji czy innych metod zagęszczania mechanicznego (Gołaszewski i Cygan 2009). Innowacja ta została wprowadzona pod koniec lat 80. XX w. (pierwotnie w Japonii) w odpowiedzi na problemy z uzyskaniem jednorodnego, dobrze zagęszczonego betonu w konstrukcjach o skomplikowanych kształtach i gęstym zbrojeniu (Shi et al. 2015).

Cechy świeżej mieszanki SCC znacznie odbiegają od cech betonu tradycyjnego. Konsystencja jest bardzo płynna – tzw. rozpływ w teście „slump flow" wynosi typowo 650–800 mm przy niemal całkowitym opadzie stożka (dla betonów zwykłych wartość ta mieści się zazwyczaj w zakresie 50–210 mm). Beton ten zachowuje jednak odpowiednią stabilność – mimo dużej płynności nie ulega segregacji ani wydzielaniu mleczka cementowego. Efekt ten uzyskuje się przez modyfikację składu mieszanki: redukcję ilości kruszywa grubego, zwiększenie udziału drobnych frakcji (wypełniaczy) oraz zastosowanie silnych superplastyfikatorów i domieszek lepkościowych. Wypełniacze wraz z cementem tworzą lepką masę, zapewniającą mieszance jednorodność (Aggarwal i Aggarwal 2020). Dzięki tym modyfikacjom SCC potrafi samoczynnie przepływać przez ciasne przestrzenie między prętami zbrojenia, jednocześnie usuwając powietrze (pod wpływem siły grawitacji i napięcia powierzchniowego), bez pozostawiania pustek (Dybeł i Kucharska 2019).

Właściwości stwardniałego betonu SCC mogą odpowiadać właściwościom betonu zwykłego oraz wysokowartościowego (HPSCC). Beton samozagęszczalny może wykazywać lepszą jednorodność i szczelność niż beton wibrowany, ponieważ brak zagęszczania mechanicznego eliminuje ryzyko lokalnego przegęszczenia mieszanki lub powstania tzw. gniazd żwirowych. W efekcie może to korzystnie wpływać na jego trwałość (Hossain i Mutsuddy 2023). Należy jednak zaznaczyć, że SCC, ze względu na wysoką zawartość drobnych frakcji, bywa bardziej podatny na skurcz, co wymaga odpowiedniej pielęgnacji. Samo projektowanie i wykonywanie takich mieszanek wymaga natomiast ścisłej kontroli.

Receptura betonu SCC często zawiera dodatki mineralne (wypełniacze) pochodzące z odpadów przemysłowych, takie jak popioły lotne czy drobne odpady powstające przy produkcji kruszyw (pył z kruszywa). Pozwala to częściowo zastąpić cement i wykorzystać produkty uboczne innych procesów, co w kontekście oddziaływania na środowisko należy uznać za korzystne (Barbhuiya et al. 2025). Eliminacja procesu wibrowania to również korzyść ekonomiczna i społeczna – skraca czas wykonania elementu, redukuje hałas na budowie i zmniejsza obciążenie fizyczne pracowników (Schutter et al. 2008). Należy jednak pamiętać, że produkcja SCC może wymagać nieco wyższego dozowania cementu lub zastosowania droższych domieszek chemicznych w celu uzyskania odpowiedniej lepkości, co z kolei zwiększa koszt i potencjalny ślad węglowy 1 m³ betonu.

3.1.3. Fibrobeton

Fibrobeton jest kompozytem cementowym, którego struktura została wzmocniona dodatkiem włókien poprawiających jego właściwości mechaniczne oraz użytkowe. W betonie tym stosuje się włókna stalowe, polimerowe, szklane, bazaltowe oraz naturalne. Zawartość włókien w mieszance betonowej wynosi najczęściej od 0,1% do 2,5% jej objętości, w zależności od oczekiwanych właściwości użytkowych (Brandt 2008). Dodanie włókien skutecznie ogranicza propagację pęknięć przez efekt mostkowania, prowadząc do wzrostu wytrzymałości na rozciąganie nawet o 20–50%, poprawy odporności na kruche pękanie oraz zwiększenia udarności materiału o 10–40% w porównaniu z betonami zwykłymi. Zakres tych zmian zależy od rodzaju i ilości włókien (Mehta i Monteiro 2014).

Fibrobetony, szczególnie z włóknami stalowymi, mogą osiągać wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu przekraczającą 8 MPa oraz wytrzymałość na ściskanie w zakresie 40–120 MPa. W efekcie znajdują zastosowanie przede wszystkim w konstrukcjach narażonych na znaczne obciążenia dynamiczne i zmęczeniowe (Jhatial et al. 2018). Włókna polimerowe stosuje się zazwyczaj w celu ograniczenia skurczu, zmniejszenia ryzyka powstawania rys skurczowych oraz poprawy odporności ogniowej betonu, szczególnie w konstrukcjach przemysłowych (Sadiqul Islam i Gupta, 2016). Włókna szklane i bazaltowe stosuje się w elementach elewacyjnych oraz cienkościennych prefabrykatach, gdzie istotne jest uzyskanie lekkiej konstrukcji o zwiększonej odporności na korozję i warunki atmosferyczne (Kosior-Kazberuk i Krassowska 2019; Blazy et al. 2022; Krassowska et al. 2024). Natomiast włókna naturalne wybierane są głównie ze względów ekologicznych w elementach o niskich wymaganiach wytrzymałościowych (Chen L. et al. 2023).

Wprowadzenie włókien do mieszanki betonowej rodzi wyzwania technologiczne, takie jak zapewnienie ich jednorodnego rozproszenia, co może wymagać stosowania specjalistycznych domieszek chemicznych lub mechanicznych metod mieszania. Trwające badania naukowe koncentrują się na optymalizacji parametrów mieszanki, ocenie trwałości fibrobetonów w różnych warunkach eksploatacyjnych oraz doskonaleniu metod projektowania uwzględniających rzeczywiste warunki użytkowania. Szczególną uwagę zwraca się na interakcję pomiędzy włóknami a matrycą cementową, która istotnie wpływa na końcowe właściwości mechaniczne fibrobetonu (Abbas i Iqbal Khan 2016).

3.1.4. Beton geopolimerowy

Beton geopolimerowy to materiał budowlany całkowicie pozbawiony cementu portlandzkiego, w którym funkcję spoiwa pełni mieszanina materiałów bogatych w krzemionkę i glin, aktywowanych za pomocą roztworów alkalicznych. Typowe składniki stosowane do produkcji betonów geopolimerowych obejmują popioły lotne, granulowany żużel wielkopiecowy, metakaolin oraz inne odpady przemysłowe zawierające amorficzną krzemionkę i glin. Aktywacja alkaliczna tych materiałów, prowadzona z użyciem roztworów, takich jak wodorotlenek sodu czy krzemian sodu lub potasu (szkło wodne), inicjuje reakcję geopolimeryzacji, prowadzącą do powstania stabilnej struktury krzemianowo-glinowej o wysokiej trwałości (Tome et al. 2024). Dzięki całkowitemu wyeliminowaniu klinkieru cementowego, produkcja betonów geopolimerowych wiąże się ze znaczącą redukcją emisji CO_2 – osiąga nawet o 60–70% niższe wartości niż w przypadku tradycyjnych betonów cementowych (Liu Mo et al. 2024).

Betony geopolimerowe charakteryzują się korzystnymi właściwościami mechanicznymi, osiągając wytrzymałość na ściskanie w zakresie od 40 MPa do ponad 60 MPa (Hasnaoui et al. 2021). Dodatkowo wyróżniają się wysoką odpornością chemiczną i termiczną, co czyni je szczególnie atrakcyjnymi w zastosowaniach narażonych na agresywne środowiska lub wysokie temperatury (Amran et al. 2021). Technologia ta umożliwia również efektywne zagospodarowanie odpadów przemysłowych, wpisując się w strategię gospodarki o obiegu zamkniętym.

Jednak pomimo licznych zalet stosowanie betonów geopolimerowych napotyka na pewne trudności, takie jak konieczność użycia agresywnych chemicznie substancji aktywujących oraz spełnienia specyficznych wymagań dotyczących warunków dojrzewania mieszanki. Obecnie prowadzone są intensywne badania mające na celu optymalizację procesu produkcyjnego, ujednolicenie standardów oraz ograniczenie zmienności parametrów użytkowych betonu geopolimerowego wynikającej ze zróżnicowanego pochodzenia stosowanych surowców (Mohamed 2023).

3.1.5. Beton z kruszywem z recyklingu i z kruszywem alternatywnym

Beton z kruszywem z recyklingu to koncepcja wykorzystania odpadów (po odpowiednim przetworzeniu) jako składnika nowego betonu. Najczęściej stosowanym materiałem (dopuszczonym w systemach normalizacji) jest kruszywo betonowe recyklingowe (RCA, ang. *recycled concrete aggregate*), pozyskiwane z przekruszonego betonu pochodzącego z rozbiórki obiektów budowlanych (McNeil i Kang 2013).

Beton z kruszywem recyklingowym (RCA) wykazuje odmienne właściwości w porównaniu z betonem z kruszywem naturalnym, głównie ze względu na obecność starej, najczęściej porowatej matrycy cementowej otaczającej kruszywo. Przekłada się to na niższą gęstość nasypową, zwiększoną nasiąkliwość oraz obniżoną wytrzymałość tego kruszywa. W konsekwencji prowadzi to do mniejszej wytrzymałości na ściskanie samego betonu (przy pełnym zastąpieniu naturalnego kruszywa grubego kruszywem recyklingowym spadek wynosi 15–30%),

a także większej przepuszczalności i skurczu (Silva et al. 2014; Wałach 2014). Zaleca się więc częściowe zastępowanie kruszywa naturalnego recyklingowym (np. w udziale 20–50%), co zapewnia kompromis pomiędzy właściwościami użytkowymi a korzyściami ekologicznymi. Negatywne efekty można łagodzić przez karbonatyzację kruszywa (uszczelnienie porowatej zaprawy z użyciem CO_2), powlekanie nanomateriałami (np. nano-krzemionką) lub odpowiednie oczyszczanie i frakcjonowanie (Li L. et al. 2021). Obecnie RCA stosuje się głównie w elementach mniej wymagających konstrukcyjnie (podbudowy drogowe, fundamenty maszyn, elementy niekonstrukcyjne, prefabrykaty), jednak zastosowanie aktywnych domieszek (mikrokrzemionki, żużla) umożliwia spełnienie wymagań normowych także dla bardziej złożonych konstrukcji (Xiao et al. 2022).

Kruszywa pochodzące z recyklingu innych odpadów (kruszywa alternatywne) również znajdują zastosowanie w mieszankach betonowych, choć ich użycie jest ograniczone specyficznymi właściwościami technicznymi. Pokruszona cegła i ceramika budowlana, ze względu na wysoką nasiąkliwość i niską wytrzymałość, używane są głównie w elementach o ograniczonych wymaganiach konstrukcyjnych (np. bloczki ścienne, lekkie betony izolacyjne) (Helmy et al. 2023). Odpadowe szkło zmielone do frakcji piaskowej bywa stosowane ze względów estetycznych, jednak konieczna jest kontrola reakcji alkaliczno-krzemionkowej. Z kolei granulaty gumowe uzyskane ze zużytych opon, stosowane jako częściowy zamiennik piasku, wyraźnie zwiększają zdolność tłumienia drgań i ciągliwość betonu kosztem nieznacznego spadku wytrzymałości (optymalny dodatek 5–10% obj. piasku) (Singaravel et al. 2024). Badane są również kruszywa organiczne (np. łupiny kokosowe i palmowe, łuski ryżu, trociny), stosowane w produkcji lekkich betonów konstrukcyjnych i izolacyjnych. Betony takie osiągają gęstość ok. 1900–2000 kg/m³ oraz wytrzymałość rzędu 20–30 MPa, a przy dodatku aktywnych popiołów mogą osiągać zadowalającą trwałość (Okafor 1988; Nadir i Sujatha 2018). W ostatnim czasie obserwowany jest również wzrost zainteresowania wykorzystaniem w betonach odpadów pochodzących z urządzeń związanych z odnawialnymi źródłami energii, takimi jak panele fotowoltaiczne czy łopaty turbin wiatrowych (Korentz 2023).

Z punktu widzenia środowiskowego betony z recyklingu przynoszą wymierne korzyści w zakresie oszczędności surowców i gospodarki odpadami. Każda tona kruszywa naturalnego zastąpiona materiałem z odzysku to mniejsze zapotrzebowanie na eksploatację żwirowni i kamieniołomów oraz mniejsza ilość odpadów budowlanych składowanych na wysypiskach (Jamil et al. 2025). Proces produkcji kruszywa recyklingowego (np. kruszenie gruzu betonowego) zużywa znacznie mniej energii niż wydobycie i transport nowego kruszywa z kopalni, co przekłada się na niższe emisje CO_2 w pełnym cyklu życia betonu (Yaseen et al. 2024). Jednocześnie rosnąca liczba wyeksploatowanych konstrukcji budowlanych generuje znaczące ilości odpadów budowlanych i rozbiórkowych. W 2016 r. odpady te oszacowano globalnie na ponad 2 mld t, a prognozy wskazują wzrost do 3–4 mld t do 2050 r. (Jamil et al. 2025).

W tabeli 3.1 zestawiono porównanie najważniejszych cech wybranych typów betonów, ze szczególnym uwzględnieniem ich charakterystyki, parametrów wytrzymałościowych oraz obszarów zastosowań.

Tabela 3.1

Porównanie najważniejszych cech wybranych typów betonów

Typ betonu	NSC zwykły	HPC wysokowartościowy	UHPC ultra-wysokowartościowy	SCC samozagęszczalny	FRC fibrobeton	GPC geopolimerowy	RCA z kruszywa z recyklingu
Charakterystyka	podstawowy beton do typowych zastosowań konstrukcyjnych	beton o zwiększonej trwałości i wytrzymałości	beton o ekstremalnie wysokiej wytrzymałości	beton o dużej płynności, nie wymaga wibrowania	beton ze zbrojeniem rozproszonym w postaci włókien	beton bezcementowy aktywowany alkalicznie	beton zawierający kruszywo z recyklingu
Typowe f_c [MPa]	20–50	60–100	120–250	40–80	30–90	40–90	25–50
Charakterystyka stosowanych kruszyw	naturalne, żwir, piasek rzeczny, łamany (frakcje 0–32 mm)	łamane wysokiej jakości (bazalt, granit), frakcja 0–16 mm	bardzo drobne kruszywa (kwarcowe, bazaltowe) frakcje poniżej 4 mm	precyzyjnie dobrane frakcje drobne i średnie, naturalne lub łamane	naturalne lub łamane (frakcje 0–16/32 mm), dostosowane do ilości i rodzaju włókien	naturalne lub odpadowe (popioły, żużle, kruszywa wtórne)	kruszywa z recyklingu betonu uzupełniane naturalnymi (frakcje 0–32 mm)
Typowe w/c	0,45–0,65	0,25–0,40	0,15–0,25	0,30–0,45	0,30–0,50	Brak (używane roztwory alkaliczne)	0,40–0,60
Typowe dodatki i domieszki	podstawowe plastyfikatory	mikrokrzemionka, popiół lotny, superplastyfikatory	mikrokrzemionka, włókna stalowe/ syntetyczne, najnowsze superplastyfikatory	superplastyfikatory, stabilizatory lepkości, popiół lotny	włókna stalowe, syntetyczne, naturalne, superplastyfikatory	aktywatory alkaliczne (NaOH, szkło wodne), popioły lotne, żużle	dodatki poprawiające trwałość, superplastyfikatory
Przewidywana trwałość	umiarkowana	wysoka	bardzo wysoka	wysoka	wysoka	wysoka (chemiczna, termiczna)	umiarkowana do niskiej

Tabela 3.1 cd.

Typ betonu	NSC zwykły	HPC wysoko-wartościowy	UHPC ultra-wysoko-wartościowy	SCC samo-zagęszczalny	FRC fibrobeton	GPC geopoli-merowy	RCA z kruszywa z recyklingu
Poziom trudności technologicznej	niski	średni do wysokiego	bardzo wysoki	średni do wysokiego	średni do wysokiego	wysoki	średni
Inne typowe cechy	standardowa trwałość i parametry mechaniczne	wysoka odporność chemiczna, niska nasiąkliwość	bardzo wysoka odporność na zginanie, ścieranie i uderzenia	bardzo dobre właściwości reologiczne, wysoka płynność	zwiększona ciągliwość, wytrzymałość na zginanie, ograniczenie rys	Wysoka odporność chemiczna, niska emisja CO_2, niski skurcz	podwyższona nasiąkliwość, większa porowatość
Typowe zastosowania	konstrukcje ogólne, budownictwo mieszkaniowe	konstrukcje mostowe, wysokie budynki, konstrukcje agresywnie obciążone	prefabrykaty cienkościenne, mosty, konstrukcje specjalne	elementy gęsto zbrojone, prefabrykaty o skomplikowanych kształtach	posadzki przemysłowe, tunele, prefabrykaty, elementy obciążone dynamicznie	elementy odporne chemicznie, termicznie obciążone, ekologiczne prefabrykaty	konstrukcje drogowe, elementy mało obciążone
Typowe problemy wykonawcze	segregacja, pękanie skurczowe	konieczność precyzyjnego dozowania, kontrola technologii	wysoka lepkość mieszanki, problemy z pompowaniem, trudne mieszanie	segregacja przy błędach w doborze składników	trudności z równomiernym rozkładem włókien oraz z pompowaniem	precyzyjna kontrola aktywacji alkalicznej, utrzymanie reżimu technologicznego	niestabilność właściwości kruszyw recyklingowych, większy skurcz
Względny koszt produkcji	niski (referencyjny)	średni do wysokiego	bardzo wysoki	średni do wysokiego	średni do wysokiego	średni do wysokiego	niski do średniego

3.2. Wymagania projektowo-techniczne stawiane konstrukcjom żelbetowym

3.2.1. Standardy i wytyczne dotyczące projektowania konstrukcji żelbetowych

Konstrukcje żelbetowe, z uwagi na swoją rolę w budownictwie, muszą spełniać szereg szczegółowych wymagań technicznych. Wymagania te wynikają z regulacji prawnych, obowiązujących norm technicznych oraz oczekiwań społecznych dotyczących bezpieczeństwa, trwałości i ochrony środowiska naturalnego. W Polsce podstawowym dokumentem prawnym określającym wymagania wobec budynków i obiektów budowlanych, w tym konstrukcji żelbetowych, jest Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2022, poz. 1225). Rozporządzenie to nakłada obowiązek stosowania zasad wynikających z aktualnego stanu wiedzy technicznej oraz odwołuje się bezpośrednio do norm europejskich i krajowych.

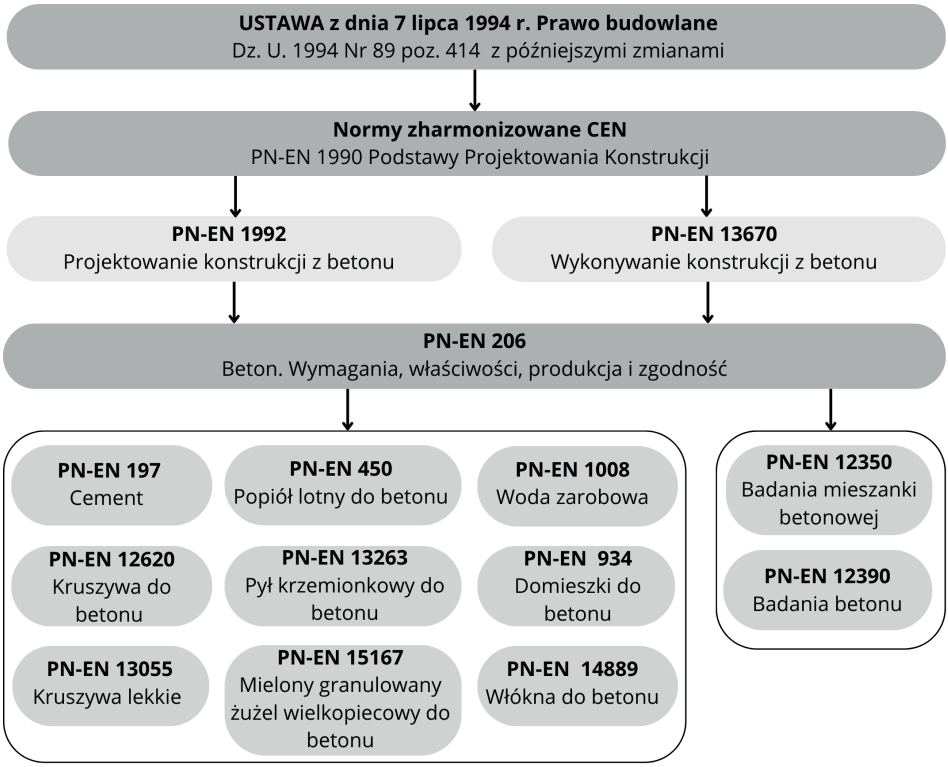
Kluczową normą dotyczącą projektowania konstrukcji żelbetowych jest Eurokod 2 – PN-EN 1992-1-1:2008 „Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1–1: Reguły ogólne i reguły dla budynków", który określa ogólne zasady oraz szczegółowe wymagania dotyczące projektowania konstrukcji żelbetowych i sprężonych. Uzupełnieniem Eurokodu 2 jest norma PN-EN 206+A2:2021 „Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność", regulująca zagadnienia jakości produkcji betonu, klasyfikacji ekspozycji środowiskowej oraz wymagania dotyczące składu mieszanek betonowych (m.in. minimalna klasa wytrzymałości, maksymalny współczynnik wodno-cementowy). Dodatkowe wymagania w zakresie odporności ogniowej konstrukcji betonowych zawarte są w normie PN-EN 1992-1-2:2008 „Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1–2: Reguły ogólne – Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe". Norma ta określa klasy odporności ogniowej (REI) elementów betonowych oraz zasady projektowania w kontekście zagrożeń pożarowych.

Należy podkreślić, że choć normy techniczne mają formalnie charakter dobrowolny, to przez ich bezpośrednie odwołania w obowiązujących przepisach prawnych oraz wymóg stosowania zasad wiedzy technicznej wynikający z ustawy – Prawo budowlane, ich przestrzeganie jest w praktyce obligatoryjne. Naruszenie zasad określonych w normach może skutkować odmową zatwierdzenia projektu przez odpowiednie organy administracji budowlanej lub odpowiedzialnością zawodową projektanta.

Zapewnienie zgodności z aktualnymi regulacjami prawnymi oraz normami technicznymi jest kluczowym elementem projektowania, realizacji oraz eksploatacji konstrukcji żelbetowych, gwarantującym ich bezpieczeństwo i trwałość. Na rysunku 3.2 zestawiono najważniejsze wytyczne i normy bezpośrednio związane z projektowaniem i wykonywaniem konstrukcji żelbetowych.

Podstawowym wymaganiem dla konstrukcji żelbetowych jest zapewnienie odpowiedniej nośności, która umożliwia bezpieczne przenoszenie wszystkich działających obciążeń przez cały przewidywany okres użytkowania. Projektowanie elementów konstrukcyjnych powinno uwzględniać obciążenia zebrane w grupie norm Eurokod 1, takie jak obciążenia stałe i zmienne (PN-EN 1991-1-1:2010) oraz oddziaływania klimatyczne, w tym

obciążenia śniegiem (PN-EN 1991-1-3:2015), wiatrem (PN-EN 1991-1-4:2010) i temperaturą (PN-EN 1991-1-5:2010). Należy również uwzględniać oddziaływania dynamiczne wynikające np. z pracy maszyn i ruchu pojazdów, a także sytuacje wyjątkowe, takie jak uderzenia lub eksplozje (PN-EN 1991-1-7:2015). W szczególnych przypadkach uwzględnia się również obciążenia sejsmiczne (PN-EN 1998-1:2014).



Rys. 3.2. Zestawienie norm technicznych związanych z projektowaniem i wykonywaniem konstrukcji żelbetowych

Podstawą projektowania konstrukcji żelbetowych jest podejście według metody stanów granicznych, zgodnie z normą Eurokod 0 (PN-EN 1990:2010). Metoda ta obejmuje weryfikację dwóch podstawowych grup stanów granicznych – nośności (SGN) oraz użytkowalności (SGU). Weryfikacja SGN odbywa się przez porównanie obliczeniowej wartości efektów oddziaływań (np. sił wewnętrznych, momentów zginających) z obliczeniową wartością nośności elementów konstrukcyjnych, z uwzględnieniem współczynników bezpieczeństwa dla obciążeń oraz materiałów. Natomiast SGU dotyczą m.in. ograniczenia deformacji, ugięć, rys, drgań i zapewnienia komfortu użytkowania obiektu przez cały jego okres eksploatacji.

Metody wymiarowania konstrukcji żelbetowych, zawarte w normie PN-EN 1992-1-1, opierają się na analizie sprężysto-plastycznej materiałów. Zasady te wymagają określenia odpowiednich parametrów wytrzymałościowych betonu i stali zbrojeniowej oraz przyjęcia

modeli materiałowych uwzględniających nieliniową charakterystykę pracy tych materiałów. Istotną rolę odgrywa również prawidłowy dobór układu zbrojenia, zapewniającego odpowiednią nośność oraz trwałość konstrukcji, a także spełnienie wymagań dotyczących minimalnych otulin betonowych, które wpływają na ochronę zbrojenia przed oddziaływaniem środowiska oraz odporność ogniową konstrukcji.

Trwałość betonu określana jest z kolei poprzez wymagania dotyczące klasy ekspozycji środowiskowej. Norma PN-EN 206+A2:2021 klasyfikuje warunki środowiskowe wpływające na trwałość konstrukcji betonowych oraz określa minimalne wymagania dotyczące składu mieszanki betonowej i parametrów betonu (np. minimalna klasa wytrzymałości, maksymalny współczynnik wodno-cementowy, minimalna zawartość cementu). Zgodnie z normą projektant zobowiązany jest określić klasę ekspozycji środowiskowej oraz klasę konstrukcji, na podstawie których dobiera się odpowiedni beton oraz zabezpieczenia konstrukcyjne, takie jak grubość otulenia zbrojenia. Z kolei wymagania dotyczące odporności ogniowej dla konstrukcji żelbetowych określone są w normie PN-EN 1992-1-2:2008. Parametry odporności ogniowej (klasyfikacja REI) powinny być spełnione przez elementy betonowe, uwzględniając zakładany scenariusz pożarowy oraz warunki użytkowania obiektu budowlanego.

Wymagania techniczne dla konstrukcji żelbetowych obejmują także kontrolę jakości materiałów (cementu, kruszyw, wody, domieszek) oraz wykonawstwa. Beton, zgodnie z normą PN-EN 206+A2:2021 oraz krajowymi dokumentami wykonawczymi, musi być dostarczany i układany zgodnie z odpowiednimi procedurami technologicznymi, zapewniającymi uzyskanie projektowanych właściwości mechanicznych oraz trwałości.

3.2.2. Dobór klasy betonu i składu mieszanki betonowej

Projektowanie konstrukcji żelbetowych opiera się przede wszystkim na podstawowych założeniach dotyczących klasy wytrzymałości betonu. Wybór odpowiedniej klasy betonu w projektowaniu konstrukcji żelbetowych ma kluczowe znaczenie nie tylko dla zapewnienia wymaganej nośności i trwałości, ale również dla efektywnego gospodarowania zasobami materiałowymi i minimalizacji wpływu na środowisko. Zastosowanie betonu o zbyt wysokiej klasie wytrzymałościowej może prowadzić do nadmiernego zużycia cementu i innych surowców, zwiększając tym samym koszty oraz emisję dwutlenku węgla. Z kolei użycie betonu o zbyt niskiej klasie może skutkować koniecznością zwiększenia wymiarów elementów konstrukcyjnych, co również wpływa na wzrost zużycia materiałów.

Doświadczenia wykazują, że dla wielu typowych elementów konstrukcyjnych, takich jak belki czy płyty (elementy zginane), optymalne pod względem zużycia materiałów i ich kosztów są niskie klasy betonu, takie jak C25/30 czy C30/37. W takich przypadkach zastosowanie wyższych klas najczęściej nie przekłada się na proporcjonalne zmniejszenie wymiarów elementów (Yücel et al. 2022). Wyższe klasy betonu warto natomiast rozważać w przypadku takich elementów, jak np. słupy (elementy ściskane), zwłaszcza o dużych obciążeniach, gdzie redukcja przekroju może być znacząca (Ślusarczyk et al. 2023), a także w elementach narażonych na oddziaływanie agresywnego środowiska (tab. 3.2). Wzrost klasy betonu niesie za sobą wyższe koszty materiałowe oraz potencjalnie wyższe zużycie cementu, co może prowadzić do zwiększenia emisji dwutlenku węgla. Z tego względu optymalizacja pod kątem materiałowym polega na znalezieniu kompromisu między klasą betonu a ilością stali zbrojeniowej, mając na uwadze zarówno kwestie ekonomiczne, jak i środowiskowe (Negrin et al. 2023).

Odrębnym zagadnieniem dotyczącym zastosowania odpowiednich betonów w konstrukcjach jest projektowanie składu ich mieszanek. Stanowi to kluczowy element procesu technologicznego, mający bezpośredni wpływ na właściwości fizyczne i mechaniczne betonu, które determinują przypisanie materiału do odpowiedniej klasy wytrzymałościowej. Tradycyjne metody projektowania składu mieszanki betonowej opierają się na doświadczeniu i normach, jednak w obliczu rosnących wymagań dotyczących zrównoważonego rozwoju i efektywności materiałowej coraz częściej stosuje się zaawansowane metody doboru składu, takie jak metody optymalizacji wielokryterialnej (Zheng et al. 2023), algorytmy sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego (Almutairi 2017; Ziolkowski 2025) czy metody bazujące na statystykach i metodologii powierzchni odpowiedzi (RSM). Wybrane narzędzia pozwalają na optymalizację składu mieszanki betonowej z uwzględnieniem nie tylko parametrów mechanicznych ale również środowiskowych (Kurda et al. 2019; Ženíšek et al. 2020).

Poza docelową wytrzymałością betonu, dobór składu mieszanki betonowej powinien być dostosowany do planowanej klasy ekspozycji elementów żelbetowych. W tabeli 3.2 zestawiono najważniejsze wymagania związane z mieszankami betonowymi w odniesieniu do ich przyszłej trwałości, przy narażeniu na różne czynniki środowiskowe, takie jak oddziaływanie karbonatyzacji, chlorków pochodzących i niepochodzących z wody morskiej, agresji chemicznej czy też cyklicznego zamrażania i rozmrażania.

Tabela 3.2

Wartości graniczne dla składów betonu w odniesieniu do klasy ekspozycji na podstawie norm (PN-EN 197-1:2011; PN-EN 206+A2:2021)

Klasa ekspozycji		**Wartości graniczne składu betonu**				**Cementy wykluczone z użycia**
		maks.	**min.**			
		w/c	**zawartość cementu**	**klasa betonu**	**zawartość cementu przy dodatku**	
Brak ryzyka korozji, brak oddziaływania						
X0	brak ryzyka korozji	–	–	C8/10	–	–
XC1	suche	0,70	260	C16/20	250	–
XC2	stale mokre	0,65	280	C16/20	260	–
XC3	umiarkowanie wilgotne	0,60	280	C20/25	260	CEM II/A,B-W, CEM II/B-LL, CEM II/B-L, CEM III/C, CEM IV/B, CEM V/B
XC4	cyklicznie mokre i suche	0,55	300	C25/30	280	CEM II/A,B-W, CEM II/B-LL, CEM II/B-L, CEM II/B-M, CEM III/C, CEM IV/B, CEM V/B

Tabela 3.2 cd.

Klasa ekspozycji		Wartości graniczne składu betonu				Cementy wykluczone z użycia
		maks.	min.			
		w/c	zawartość cementu	klasa betonu	zawartość cementu przy dodatku	
Korozja wywołana chlorkami niepochodzącymi z wody morskiej						
XD1	umiarkowanie wilgotne	0,55	300	C30/37	280	CEM II/A,B-W, CEM II/B-LL, CEM II/B-L, CEM II/B-M, CEM IV/B, CEM V/B
XD2	mokre, sporadycznie suche	0,50	320	C30/37	300	
XD3	cyklicznie mokre i suche	0,45	320	C35/45	300	CEM II/A,B-W, CEM II/B-LL, CEM II/B-L, CEM II/B-M, CEM III/C, CEM IV/B, CEM V/B
Korozja wywołana chlorkami pochodzącymi z wody morskiej						
XS1	działanie soli zawartych w powietrzu	0,50	300	C30/37	280	CEM II/A,B-W, CEM II/B-LL, CEM II/B-L, CEM II/B-M, CEM III/C, CEM IV/B, CEM V/B
XS2	stałe zanurzenie w wodzie	0,45	320	C35/45	300	CEM II/A,B-W, CEM II/B-LL, CEM II/B-L, CEM II/B-M, CEM IV/B, CEM V/B
XS3	strefa pływów, rozbryzgów i aerozoli	0,45	340	C35/45	320	CEM II/A,B-W, CEM II/B-LL, CEM II/B-L, CEM II/B-M, CEM III/C, CEM IV/B, CEM V/B
Agresja chemiczna						
XA1	słaba agresja chemiczna	0,55	300	C30/37	280	CEM II/A,B-W, CEM II/B-LL, CEM II/B-L, CEM II/B-M
XA2	umiarkowana agresja chemiczna	0,50	320	C30/37	300	
XA3	silna agresja chemiczna	0,45	360	C35/45	330	

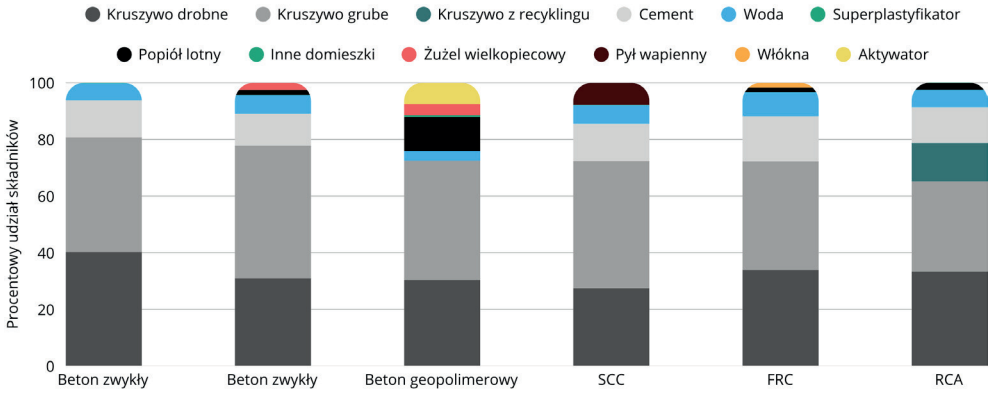
Tabela 3.2 cd.

Korozja przez zamrażanie/rozmrażanie						
XF1	umiarkowane nasycenie wodą	0,55	300	C30/37	280	CEM II/A,B-W, CEM II/B-V, CEM II/B-LL, CEM II/A,B-L, CEM II/B-M, CEM III/C, CEM IV/B, CEM V/B
XF2	umiarkowane nasycenie wodą ze środkami odladzającymi	0,55	300	C30/37	–	
XF3	silne nasycenie wodą bez środków odladzających	0,50	320	C30/37	–	CEM II/A,B-W, CEM II/B-LL, CEM II/A,B-L, CEM II/B-M, CEM III/C, CEM IV, CEM V
XF4	silne nasycenie wodą ze środkami odladzającymi	0,45	340	C30/37	–	
Korozja spowodowana ścieraniem						
XM1	umiarkowane zagrożenie ścieraniem	0,55	300	C30/37	280	CEM II/A,B-W, CEM II/B-LL, CEM II/B-L, CEM II/B-M, CEM IV, CEM V/B
XM2	silne zagrożenie ścieraniem	0,55	300	C30/37	280	
XM3	ekstremalnie silne zagrożenie ścieraniem	0,45	320	C35/45	300	

Należy podkreślić, że przy spełnieniu tych samych wymagań wytrzymałościowych i trwałościowych możliwe jest projektowanie różnych składów mieszanek betonowych. W związku z powyższym wybór odpowiedniego składu pozwala na znaczną optymalizację właściwości betonu pod względem parametrów środowiskowych, ekonomicznych oraz użytkowych konstrukcji (Cen et al. 2019; Mostafaei et al. 2023; Agrawal et al. 2024; Ren et al. 2024). Warianty składu mieszanek mogą różnić się m.in.:

– proporcjami cementu i kruszyw,
– rodzajami stosowanych cementów i domieszek,
– zastosowaniem materiałów recyklingowych oraz odpadów przemysłowych (np. popiołów lotnych, żużli hutniczych),
– metodami produkcji oraz dojrzewania betonu.

Na rysunku 3.3 przedstawiono przykładowe składy mieszanek, z których każda została zaprojektowana na klasę wytrzymałości C30/37. Można zaobserwować bardzo zróżnicowane udziały poszczególnych składników, przy równoczesnym założeniu, że każda z tych mieszanek powinna uzyskać zakładaną wytrzymałość (zapewne ze zróżnicowanym zapasem), lecz będzie się cechować odmiennymi parametrami trwałościowymi i zróżnicowaną odpornością na czynniki agresywne.

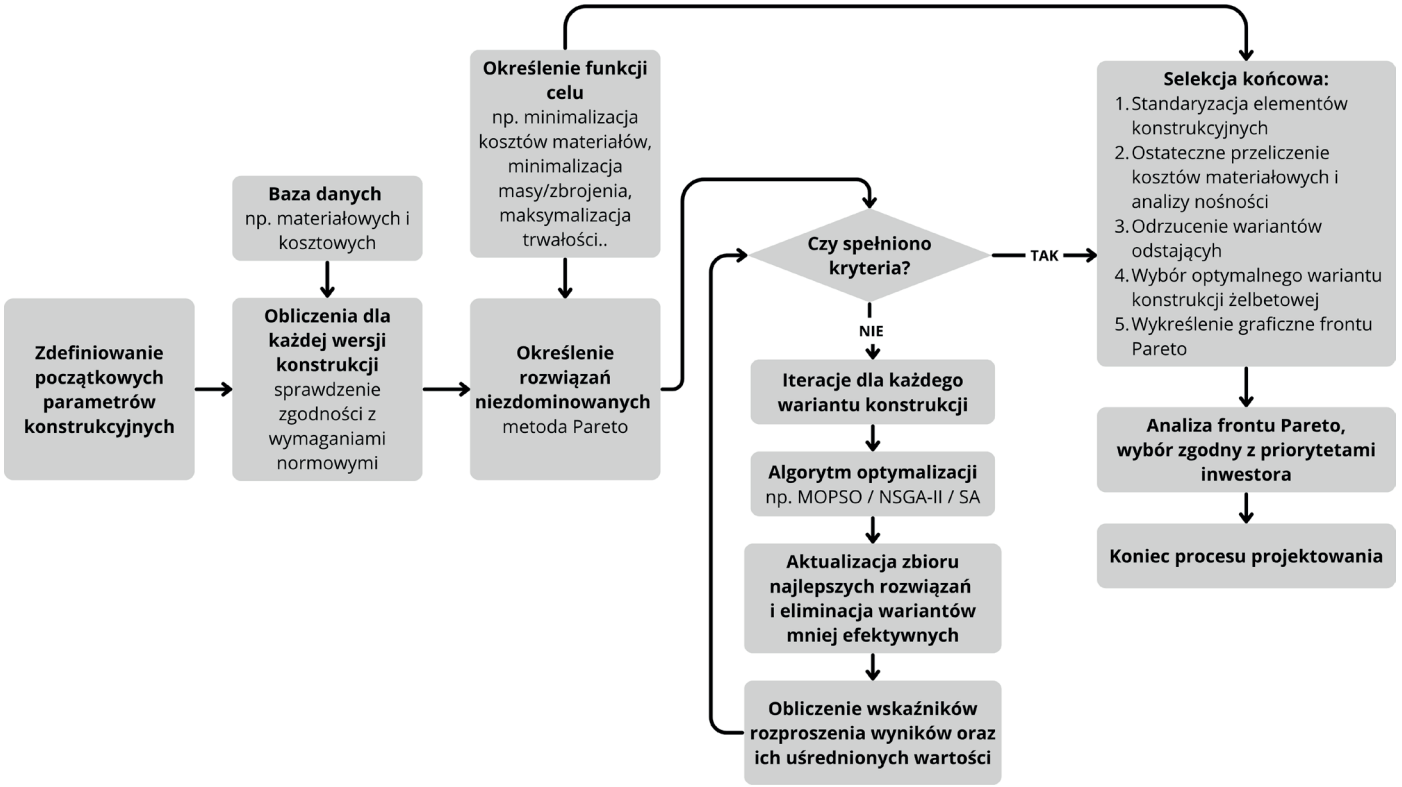


Rys. 3.3. Procentowy udział składników różnych typów mieszanek betonu klasy C30/37 (Ahmed et al. 2020; Rudnicki 2021; Faustmann et al. 2024; Kars et al. 2024; Tao et al. 2025)

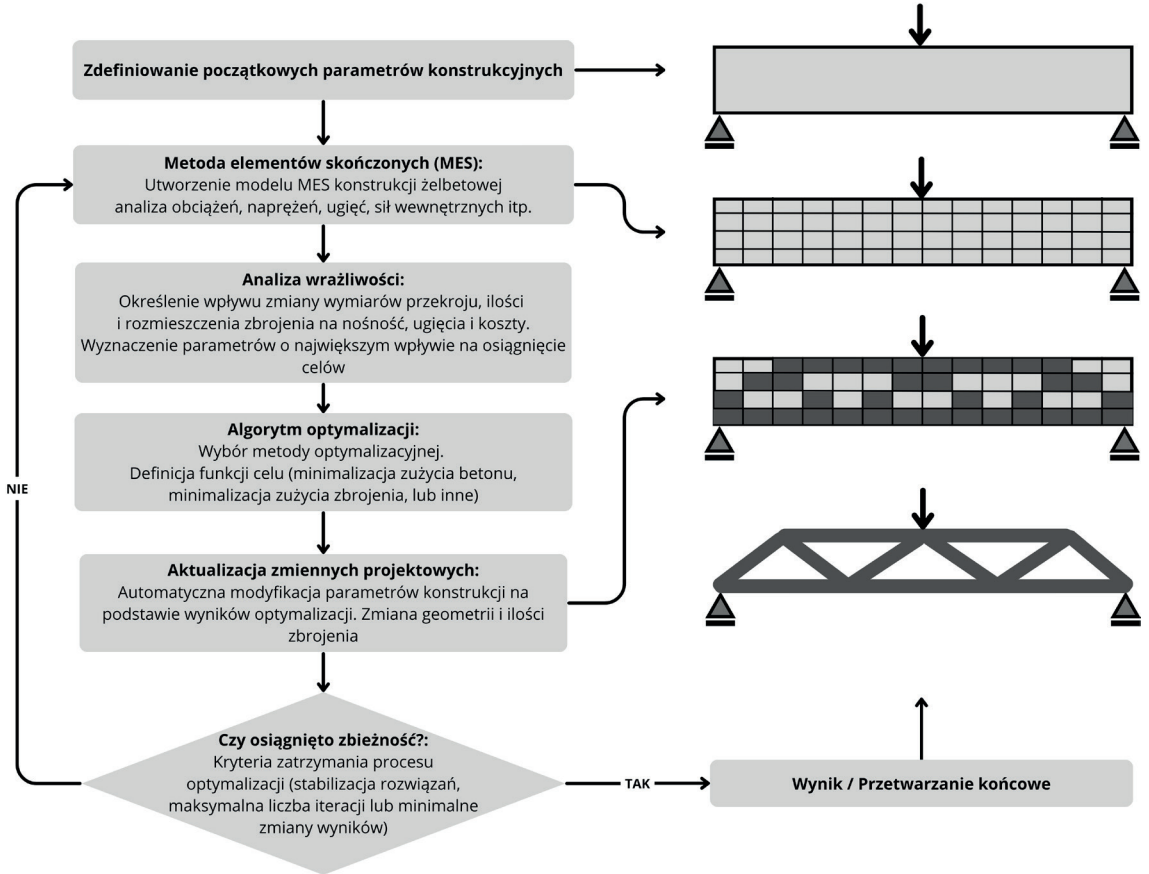
3.2.3. Projektowanie konstrukcji z wykorzystaniem metod optymalizacyjnych

W obrębie ustalonej w ramach zintegrowanego projektowania fazy koncepcyjnej projektu, w pewnym ograniczonym zakresie, możliwe jest przyjęcie do dalszej analizy konstrukcji różnych schematów statycznych. Decyzja o wybranym schemacie determinuje rozkład sił wewnętrznych, co bezpośrednio wpływa na wymagane przekroje elementów oraz ilość potrzebnych materiałów (Hafez et al. 2024). W konsekwencji podejmowane na tym etapie decyzje projektowe przekładają się na koszty materiałowe oraz aspekt ekologiczny realizacji przedsięwzięć budowlanych. Wybór odpowiedniego układu konstrukcyjnego oraz schematu statycznego stanowi punkt wyjściowy w procesie optymalizacji materiałowej. Zastosowanie właściwych dla wskazanej koncepcji architektonicznej układów konstrukcyjnych prowadzi do efektywnego rozkładu obciążeń, co przekłada się na zmniejszenie wymiarów elementów nośnych. Poza odpowiednim doborem układu konstrukcyjnego istotne jest wykorzystanie możliwie dokładnych metod odwzorowania konstrukcji w ramach prowadzenia obliczeń statycznych. Wyniki badań wskazują, że umiejętny dobór schematu statycznego może obniżyć zużycie stali zbrojeniowej nawet o 20%, szczególnie w przypadku dużych konstrukcji kubaturowych (Afzal et al. 2020; Chen A. et al. 2023).

W ostatnich latach coraz szerzej stosowane są metody optymalizacji wielokryterialnej, które pozwalają na znalezienie kompromisu pomiędzy minimalizacją zużycia materiałów a spełnieniem normowych wymagań nośności, sztywności oraz trwałości konstrukcji (Medeiros i Kripka 2014). Algorytmy optymalizacyjne umożliwiają efektywne dopasowanie przekrojów elementów oraz dobór odpowiednich klas betonu w celu jednoczesnego ograniczenia kosztów i negatywnego wpływu na środowisko naturalne (Halicka et al. 2019; Negrin et al. 2023). Przykładowy schemat postępowania optymalizacyjnego w projektowaniu konstrukcji żelbetowych bazujących na metodzie Pareto przedstawiono na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. Zmodyfikowana procedura MDO-MOPSO do projektowania strukturalnego (opracowanie własne na podstawie Okasha et al. 2024)



Rys. 3.5. Optymalizacja topologiczna z wykorzystaniem MES
(opracowanie własne na podstawie Moosavi et al. 2021)

Aktualnie obserwuje się dynamiczny rozwój podejścia, jakim jest optymalizacja topologiczna. Pozwala ona na identyfikację najbardziej efektywnego rozmieszczenia materiału konstrukcyjnego (Amir 2013; Ren et al. 2024). Proces optymalizacji topologicznej może uwzględniać różnorodne kryteria projektowe, takie jak nośność, sztywność, trwałość oraz koszty materiałowe. W praktyce technika ta pozwala na precyzyjne dostosowanie układu konstrukcyjnego do rzeczywistych warunków obciążenia, eliminując obszary o niskim poziomie naprężeń lub takie, które nie są efektywnie wykorzystywane. W efekcie można osiągnąć znaczne ograniczenie objętości użytego betonu, szczególnie przy zastosowaniu jego wysokich klas, które ze względu na swoje korzystne właściwości mechaniczne umożliwiają dalsze redukcje przekrojów poprzecznych elementów. Z kolei mniejsze wymiary elementów skutkują bezpośrednio zmniejszeniem zapotrzebowania na stal zbrojeniową, ponieważ niższe wartości momentów zginających i sił wewnętrznych redukują konieczność użycia dużych ilości zbrojenia konstrukcyjnego. Przykładowy schemat projektowania z wykorzystaniem optymalizacji topologicznej przedstawiono na rysunku 3.5.

3.3. Ekwiwalent funkcjonalny

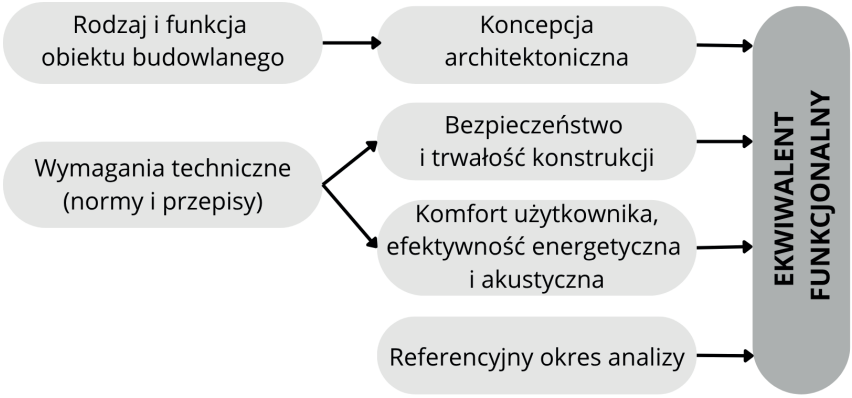
Analizę porównawczą wybranych założeń projektowych konstrukcji żelbetowych (wariantów konstrukcyjno-materiałowych spełniających wymogi normowe) w świetle zrównoważonej oceny należy przeprowadzać w oparciu o ich ekwiwalent funkcjonalny. Jest to kluczowe pojęcie stosowane w ocenie zrównoważonego rozwoju obiektów budowlanych, które zostało zdefiniowane w normie PN-EN 15643:2021. Norma ta opisuje ekwiwalent funkcjonalny jako zbiór ilościowo określonych wymagań funkcjonalnych i technicznych dla budynku, obiektu inżynieryjnego lub ich części, stanowiący podstawę do porównywania wyników oceny różnych rozwiązań projektowych czy eksploatacyjnych. W przeciwieństwie do jednostki funkcjonalnej, która odnosi się do produktu, ekwiwalent funkcjonalny jest używany w odniesieniu do całych obiektów budowlanych lub ich fragmentów i uwzględnia nie tylko ich podstawową funkcję użytkową, lecz także szereg wymagań specyficznych wynikających z regulacji prawnych i potrzeb użytkownika końcowego.

Ekwiwalent funkcjonalny obejmuje:

- rodzaj obiektu budowlanego (np. budynek mieszkalny, most, droga);
- podstawową funkcję obiektu (np. zamieszkanie, transport, edukacja);
- specyficzne wymagania techniczne i funkcjonalne wynikające z przepisów i wytycznych klienta;
- referencyjny okres analizy, czyli okres, na który ustalane są parametry użytkowe i techniczne obiektu.

Ekwiwalent funkcjonalny opiera się na założeniu, że porównywane rozwiązania muszą spełniać (lub przewyższać) te same wymagania techniczne i funkcjonalne, aby możliwa była rzetelna analiza ich wpływu środowiskowego, społecznego i ekonomicznego.

Określenie ekwiwalentu funkcjonalnego wymaga szczegółowego opisania parametrów technicznych i użytkowych danego obiektu budowlanego. Parametry te ustalane są na podstawie specyfikacji projektowej, wymagań klienta oraz przepisów budowlanych (rys. 3.6).



Rys. 3.6. Przykładowe wymagania składające się na ekwiwalent funkcjonalny

W praktyce oznacza to identyfikację i kwantyfikację głównych wymagań, takich jak:
- wymagania związane z bezpieczeństwem konstrukcji;
- wymagania energetyczne (np. zapotrzebowanie na energię);
- wymagania dotyczące komfortu użytkowego (termicznego, akustycznego, wizualnego);
- wymagania związane z efektywnością wykorzystania zasobów naturalnych;
- wpływ na różnorodność biologiczną i lokalny ekosystem.

W normie PN-EN 15643:2021 szczególnie podkreśla się znaczenie jasnego i precyzyjnego opisu tych wymagań w celu uniknięcia błędów metodologicznych podczas przeprowadzania porównań oraz oceny zrównoważoności.

W przypadku konstrukcji żelbetowych ekwiwalent funkcjonalny powinien uwzględniać specyfikę materiałową, technologiczną oraz użytkową tych obiektów w zakresie:
- Wytrzymałości i trwałości betonu – określenie minimalnych wymagań dotyczących wytrzymałości betonu na ściskanie oraz odporności na działanie czynników środowiskowych (korozja, cykle zamrażania i rozmrażania). Szczególne znaczenie mają klasy betonu określone według norm, np. klasy ekspozycji (tab. 3.2) oraz klasy wytrzymałości na ściskanie (C20/25, C30/37, C50/60), które powinny być precyzyjnie dobrane do przewidywanych warunków eksploatacji.
- Wymagań użytkowych specyficznych dla konstrukcji żelbetowych – wymagania dotyczące bezpieczeństwa pożarowego, akustyki czy zdolności do pochłaniania drgań i wibracji (szczególnie w konstrukcjach inżynierskich, takich jak mosty czy tunele).
- Efektywności energetycznej – uwzględnienie parametrów izolacyjności cieplnej oraz możliwości magazynowania ciepła przez elementy betonowe, mających wpływ na efektywność energetyczną całego obiektu.
- Składu mieszanek betonowych – uwzględnienie składu mieszanek betonowych (udział cementu, domieszek i dodatków mineralnych i chemicznych, kruszyw naturalnych płukanych i łamanych oraz kruszyw pochodzących z recyklingu), które powinny być dostosowane do założonych w projekcie klas betonu oraz przewidywanych warunków eksploatacji obiektów.

– Zużycia betonu – porównanie całkowitego zużycia betonu w różnych wariantach konstrukcyjnych, z uwzględnieniem optymalizacji materiału przez zastosowanie bardziej efektywnych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych.
– Rodzaju oraz zużycia stali zbrojeniowej – porównanie całkowitego zużycia stali zbrojeniowej w różnych wariantach konstrukcyjno-materiałowych, analogicznie jak w przypadku zużycia betonu.

Wszystkie te elementy powinny być jasno sformułowane i skwantyfikowane, co umożliwia przeprowadzenie szczegółowej i porównywalnej oceny zrównoważenia konstrukcji betonowych.

3.4. Analiza wybranych składów mieszanek betonowych

Na potrzeby niniejszej pracy opracowano 16 składów przykładowych mieszanek betonowych (tab. 3.3 na wklejce), dla których przeprowadzona zostanie zrównoważona ocena w świetle kryteriów środowiskowych, ekonomicznych i społecznych. Składy te opracowano na podstawie metod analitycznych, doświadczeń autora oraz z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego.

Do opracowania projektów mieszanek betonowych przyjęto wykorzystanie następujących materiałów:
– Cementy – różne typy cementów (CEM I, CEM II, CEM III), które charakteryzują się odmiennymi właściwościami hydratacyjnymi oraz wpływem na trwałość betonu. Szczególną uwagę zwrócono na dodatki mineralne, takie jak popiół lotny, żużel wielkopiecowy oraz pucolany, które mogą korzystnie wpływać na parametry mechaniczne i trwałościowe oraz oddziaływanie środowiskowe.
– Dodatki mineralne – mikrokrzemionka i popioły lotne, które znacząco zwiększają szczelność betonu, ograniczają jego porowatość oraz zmniejszają emisję CO_2 związaną z produkcją cementu.
– Kruszywa – kruszywa naturalne (żwir i piasek), kruszywa łamane oraz kruszywa pochodzące z recyklingu betonu; należy podkreślić, że odpowiedni dobór frakcji oraz rodzaju kruszywa ma kluczowe znaczenie dla uzyskania wymaganej wytrzymałości i urabialności mieszanki betonowej.
– Domieszki chemiczne – plastyfikatory, superplastyfikatory, lepkościowe domieszki reologiczne (VMA) oraz domieszki redukujące wodę, które są istotnymi komponentami, pozwalającymi na regulację właściwości reologicznych mieszanki oraz uzyskanie wysokich parametrów mechanicznych i technologicznych.

Opracowane mieszanki betonów zwykłych (1–6) charakteryzują się zastosowaniem cementów o zróżnicowanej zawartości dodatków mineralnych, takich jak popiół lotny czy granulowany żużel wielkopiecowy, co wpływa korzystnie na trwałość i odporność chemiczną. W mieszance 6 wykorzystano również kruszywo recyklingowe, co wpływa na aspekty ekologiczne tej mieszanki. Betony wysokowartościowe (mieszanki 7–8) cechują się dużą ilością cementu oraz dodatków mineralnych (mikrokrzemionka, popiół lotny), co zapewnia wysokie właściwości mechaniczne, a także zwiększoną odporność na agresywne środowisko.

Tabela 3.3

Zestawienie receptur zróżnicowanych mieszanek betonowych wykorzystanych do analiz
[składniki w kg/m^3 mieszanki betonowej]

Numer mieszanki	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16
Klasa betonu	C30/37	C30/37	C30/37	C50/60	C50/60	C50/60	C80/95	C80/95	C30/37	C30/37	C30/37	C50/60	C50/60	C50/60	C80/95	C80/95
Typ betonu	NSC	NSC	NSC	NSC	NSC	NSC	HPC	HPC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	SCC	HPSCC	HPSCC
CEM I 32,5R	370	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CEM I 42,5R	–	–	–					–	370	–	–	–	–	–	–	–
CEM I 52,5R	–	–	–	450			490	–	–	–	–	420	–	–	500	–
CEM II/A-V 42,5N (z 20% popiołu lotnego)	–	330	–	–	410			–	–	350	–	–	–	–	–	–
CEM II/B-S 42,5N (z 35% żużla wielkopiecowego)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CEM II/B-S 52,5N (z 35% żużla wielkopiecowego)	–	–	–	–	–	–	–	470	–	–	–	–	–	–	–	–
CEM II/A-D 52,5N (20% dodatków pucolanowych)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	390	–	–	460
CEM III/A 32,5N (z 50% żużla wielkopiecowego)	–	–	320	–	–	–	–	–	–	–	330	–	–	–	–	–
CEM III/A 42,5N (z 50% żużla wielkopiecowego)	–	–	–	–	–	400	–	–	–	–	–	–	–	370	–	–
CEM III/A 52,5N (z 50% żużla wielkopiecowego)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Woda	175	170	160	160	160	160	150	150	175	165	160	165	160	150	160	150
Piasek 0–2 mm	850	850	850	800	800	800	700	600	750	750	750	700	700	700	700	700
Żwir naturalny 2–8 mm	450	450	500	–	–	–	–	–	550	550	550	–	–	–	–	–
Żwir naturalny 8–16 mm	450	450	–	–	–	–	–	–	350	350	350	–	–	–	–	–
Kruszywo łamane 2–8 mm	–	–	–	450	450	550	1050	1150				600	600	600	700	700
Kruszywo łamane 8–16 mm	–	–	–	500	500		–	–	–	–	–	350	350	350	300	300
Kruszywo recyklingowe 8–16 mm	–	–	400	–	–	300	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Domieszka uplastyczniająca – plastyfikator	3,60	3,96	5,50	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Domieszka upłynniająca – superplastyfikator	–	–	–	9,10	8,75	7,40	13,20	11,75	3,50	3,84	4,12	5,88	5,70	6,20	8,32	8,28
Lepkościowa domieszka reologiczna VAM	–	–	–	–	–	–	–	–	0,925	0,850	0,850	1,260	1,140	1,360	2,150	1,840
Domieszka redukująca wodę	–	–	–	–	–	–	4,16	4,70	–	–	–	–	–	–	–	–
Popiół lotny	–	40	40		40	40	20	30	–	30	30	–	20	30	–	20
Mikrokrzemionka	–	–	10	20	10	10	50	30	–	–	10	10	10	10	30	20

Beton samozagęszczalny (mieszanki 9–14) wymaga zastosowania domieszek reologicznych (VMA), które umożliwiają samoczynne zagęszczanie mieszanki bez konieczności mechanicznego wibrowania. W składzie mieszanek samozagęszczalnych wykorzystano także superplastyfikatory oraz dodatki mineralne zwiększające szczelność i trwałość. Mieszanki betonów HPSCC (15–16) łączą cechy betonu wysokowartościowego i samozagęszczalnego, zawierając znaczną ilość cementu o wysokiej klasie oraz domieszki umożliwiające uzyskanie wymaganych parametrów mechanicznych i reologicznych.

Pod względem właściwości wytrzymałościowych mieszanki betonów zwykłych zaprojektowano na umiarkowane klasy wytrzymałości (C30/37–C50/60), odpowiednie dla standardowych zastosowań konstrukcyjnych. Betony wysokowartościowe (HPC oraz HPSCC) zaprojektowano na znacznie wyższą wytrzymałość na ściskanie (klasa C80/95). Pod względem reologicznym mieszanki betonów zwykłych mają standardową konsystencję wymagającą mechanicznego zagęszczania. Mieszanki samozagęszczalne (SCC oraz HPSCC) charakteryzują się natomiast zdolnością samoczynnego zagęszczania, eliminując konieczność mechanicznego wibrowania. Dzięki obecności domieszek reologicznych (VMA) oraz superplastyfikatorów, mieszanki te mają właściwą lepkość zapobiegającą segregacji składników oraz zapewniającą jednorodność gotowego betonu.

Należy zauważyć, że osiągnięcie zakładanych parametrów technicznych betonu, zgodnych z jego projektowaną klasą, jest ściśle uzależnione od przestrzegania określonych wymagań technologicznych podczas przygotowania mieszanki betonowej. Kluczowe znaczenie ma precyzyjne dozowanie składników mieszanki oraz przestrzeganie zalecanej kolejności ich dodawania. Mieszanki betonowe zawierające dodatki mineralne, takie jak mikrokrzemionka, oraz domieszki modyfikujące właściwości reologiczne wymagają starannego procesu mieszania, aby zapewnić ich jednorodność i skuteczne działanie składników. Istotnym parametrem jest również kontrola temperatury składników mieszanki, zwłaszcza w przypadku betonów wysokowartościowych, w celu ograniczenia ryzyka przedwczesnego wiązania. W przypadku betonów samozagęszczalnych konieczna jest regularna kontrola konsystencji. Odpowiedni dobór ilości wody oraz domieszek stabilizujących powinien minimalizować ryzyko segregacji składników mieszanki. Czas transportu i układania mieszanki również wpływa na uzyskanie wymaganych parametrów technicznych betonu, gdyż wydłużony okres tych operacji może prowadzić do pogorszenia właściwości reologicznych i wytrzymałościowych materiału.

Przedstawione mieszanki betonowe cechują się szerokim spektrum zastosowań, od tradycyjnych betonów konstrukcyjnych po zaawansowane mieszanki samozagęszczalne o wysokich parametrach mechanicznych. Dobór składników przeprowadzono w celu zróżnicowania zarówno właściwości użytkowych betonu, jak i aspektów środowiskowych związanych z wykorzystaniem materiałów z recyklingu oraz ograniczeniem emisji CO_2.

4. Kryterium środowiskowe w zrównoważonej ocenie konstrukcji żelbetowych

4.1. Metodyka oceny środowiskowej w cyklu życia obiektu budowlanego

4.1.1. Regulacje prawne i normy techniczne w ocenie środowiskowej

Metodyka analizy cyklu życia (LCA) dla obiektów budowlanych została ujęta w dwóch uzupełniających się grupach norm – na poziomie wyrobu budowlanego oraz na poziomie całego budynku. Norma PN-EN 15804+A2:2020 określa zasady opracowywania deklaracji środowiskowych typu III (EPD) dla wyrobów budowlanych, natomiast norma PN-EN 15978:2012 wyznacza ramy prowadzenia oceny środowiskowej obiektów budowlanych. Dzięki temu możliwe jest przenoszenie danych środowiskowych z poziomu materiałów i komponentów na poziom całego obiektu budowlanego w sposób spójny z zasadami analizy cyklu życia.

Szczegółowe zasady opracowywania analiz środowiskowych dla betonu określono z kolei w normie PN-EN 16757:2023, która pełni funkcję reguł kategoryzacji wyrobu (ang. *product category rules*) dla betonu oraz prefabrykowanych elementów betonowych. Dokument ten uzupełnia ogólną normę PN-EN 15804+A2:2020, dostarczając wytycznych dostosowanych do specyfiki betonu jako materiału budowlanego. W analizach środowiskowych materiałów budowlanych, zgodnie z normą PN-EN 15804+A2:2020 i metodyką LCA, powszechnie stosuje się ustandaryzowane określenia dotyczące granic systemu, takie jak:

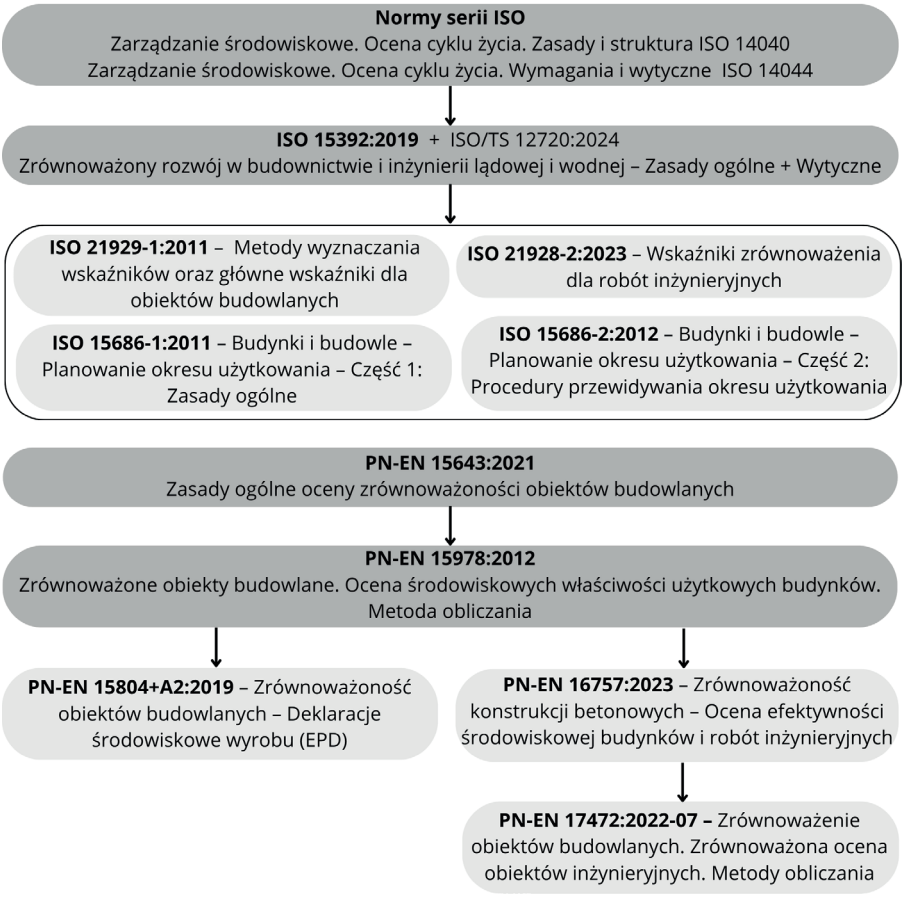
- od kołyski do bramy z modułami C1–C4 i D (ang. *cradle to gate with modules C1–C4 and module D*) – obejmuje moduły A1–A3, C1–C4, D;
- od kołyski do bramy z opcjami i modułem D (ang. *cradle to gate with options, modules C1–C4 and module D*) – obejmuje moduły A1–A3, A4 i/lub A5 i/lub B1–B7, C1–C4, D;
- od kołyski do grobu z modułem D (ang. *cradle to grave and module D*) – obejmuje moduły A1–A3, B1–B7, C1–C4, D;
- od kołyski do bramy (ang. *cradle to gate*) – obejmuje moduły A1–A3;
- od kołyski do bramy z opcjami (ang. *cradle to gate with options*) – obejmuje moduły A1–A3, A4 i/lub A5.

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 15804+A2:2020 dla wszystkich wyrobów i materiałów budowlanych, dla których prowadzi się ocenę środowiskową, należy uwzględnić moduły A1–A3, C1–C4 oraz D. Zwolnienie z obowiązku uwzględnienia końcowych etapów cyklu

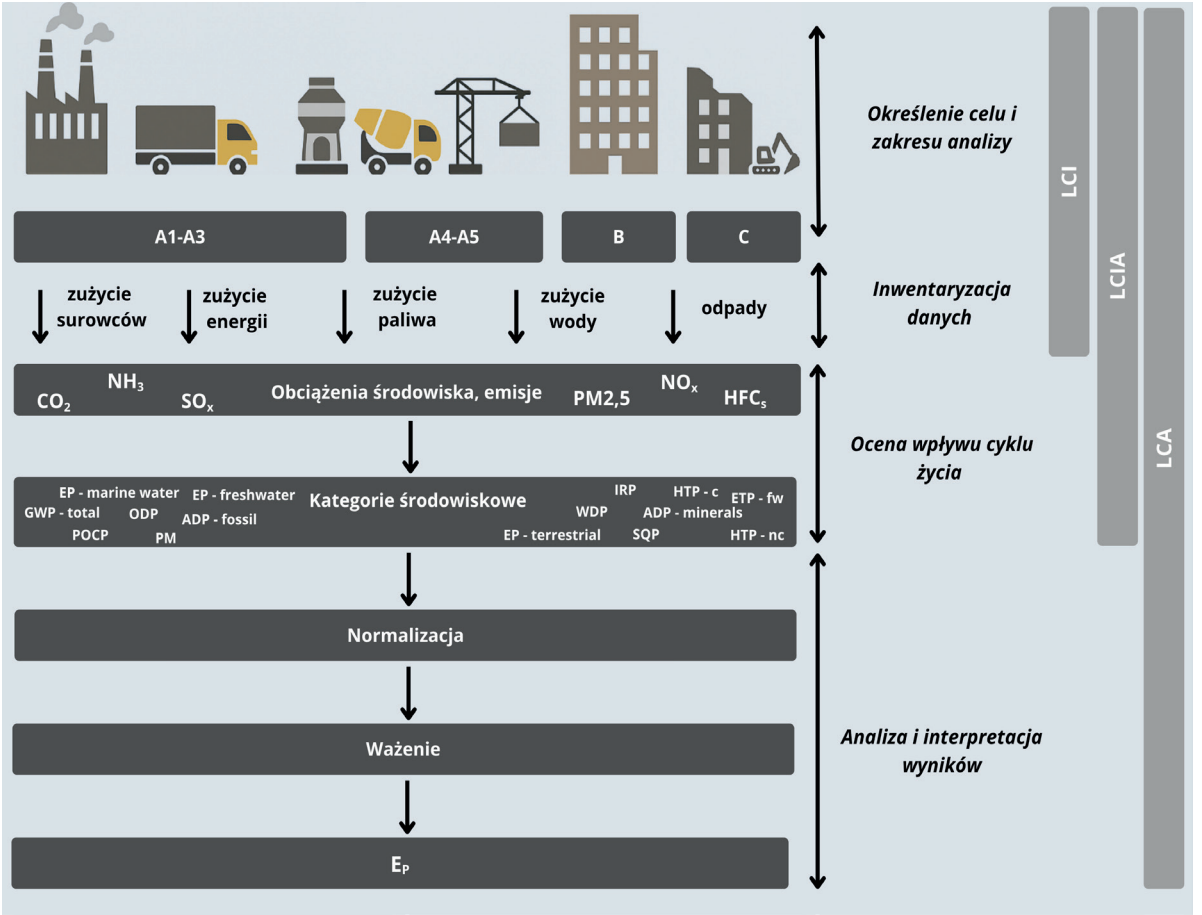
życia (C1–C4, D) jest możliwe jedynie w przypadku produktów, które spełniają określone warunki wskazane przez normę. Kryteria te odnoszą się do dalszego sposobu wykorzystania produktu oraz jego właściwości fizykochemicznych, które uniemożliwiają jego identyfikację lub wydzielenie w fazie końca życia. Dodatkowym wymogiem jest brak zawartości węgla biogenicznego w składzie rozpatrywanego materiału.

Zastosowanie wymienionych norm w sposób komplementarny – od poziomu materiału (PN-EN 16757:2023, PN-EN 15804+A2:2020) po poziom budynku (PN-EN 15978:2012) – tworzy spójne podstawy do kompleksowej oceny środowiskowej konstrukcji żelbetowych. Podejście to wspiera zarówno racjonalne projektowanie materiałowe, jak i podejmowanie świadomych decyzji ukierunkowanych na minimalizację wpływu budownictwa na środowisko.

Zapewnienie zgodności z aktualnymi regulacjami prawnymi oraz normami technicznymi jest kluczowym elementem oceny zrównoważoności konstrukcji na etapie analizy środowiskowej. Na rysunku 4.1 zestawiono najważniejsze wytyczne i normy bezpośrednio związane z prowadzeniem analiz środowiskowych dla obiektów budowlanych.



Rys. 4.1. Zestawienie norm technicznych związanych z oceną środowiskową konstrukcji żelbetowych



Rys. 4.2. Schemat prowadzenia analizy LCA

Analiza cyklu życia (definiowana w normach ISO 14040:2006 i ISO 14044:2006) obejmuje cztery główne etapy (rys. 4.2):

- definicję celu i zakresu analizy – określenie celu badania oraz zakresu systemu, w tym granic systemu i jednostki funkcjonalnej, aby zapewnić spójność i użyteczność wyników;
- inwentaryzację przepływów materiałowych i energetycznych (ang. *life cycle inventory* − LCI) – polega na zebraniu ilościowych danych wejściowych i wyjściowych (materiałów, energii, emisji) związanych z każdym etapem cyklu życia produktu;
- ocenę wpływu na środowisko (ang. *life cycle impact assessment* − LCIA) – dane z etapu LCI są klasyfikowane i charakteryzowane w odniesieniu do wybranych kategorii wpływu środowiskowego w celu oceny ich potencjalnych oddziaływań;
- interpretację wyników – obejmuje analizę etapów LCI i LCIA, identyfikację kluczowych aspektów środowiskowych oraz formułowanie wniosków i zaleceń zgodnych z celem analizy.

Na podstawie tych ram metodycznych przedstawiono charakterystykę analizy cyklu życia, mającej zastosowanie do oceny środowiskowej konstrukcji żelbetowych.

4.1.2. Cykl życia betonu w ujęciu środowiskowym

Etap produkcji materiałów

Etap produkcji obejmuje pozyskanie surowców oraz wytworzenie głównych materiałów składowych betonu (cementu, kruszyw, domieszek itp.), a także produkcję samej mieszanki betonowej w wytwórni. Proces ten wiąże się z bardzo dużym zapotrzebowaniem na surowce. Do wyprodukowania 1 t cementu portlandzkiego potrzebne jest ok. 1,65 t skały wapiennej (wapienia) oraz 0,6 t gliny (Cavalett et al. 2024). Produkcja betonu wymaga także znaczących ilości kruszyw naturalnych oraz wody. Szacuje się, że globalne zużycie kruszyw przez budownictwo sięga ok. 50 mld t rocznie, co stanowi około 40% całego światowego wydobycia tych surowców (Baic et al. 2024), a zużycie wody wynosi ok. 1 mld t rocznie (Miller et al. 2018). W konsekwencji wydobycie surowców powoduje ingerencję w środowisko przyrodnicze, w szczególności degradację terenu, ubytek zasobów nieodnawialnych oraz potencjalne zaburzenia ekosystemów.

Proces produkcji betonu jest wysoko energochłonny, zwłaszcza w części dotyczącej wypalania klinkieru cementowego. Piece obrotowe do produkcji klinkieru pracują w temperaturach rzędu 1350–1450°C (Zhang Q. et al. 2022), co wiąże się z dużym zużyciem paliw i energii. Produkcja 1 t cementu wymaga kilku gigadżuli energii, a uwolniona przy tym emisja CO_2 sięga ok. 0,8 t (pochodzi zarówno ze spalania paliw, jak i procesu kalcynacji węglanu wapnia). Oprócz dwutlenku węgla w trakcie produkcji cementu i pozyskiwania kruszyw emitowane są znaczne ilości innych zanieczyszczeń powietrza: tlenków azotu (NO_x) i dwutlenku siarki (SO_2) – będących prekursorami kwaśnych deszczy, a także pyłów zawieszonych. Pyły i gazy mogą zawierać śladowe ilości metali ciężkich i innych substancji szkodliwych, które w niekontrolowanych warunkach mogą osiadać w glebie lub przedostawać się do wód. Nowoczesne instalacje przemysłowe najczęściej wyposażone są w filtry i systemy oczyszczania

spalin oraz wód procesowych, co znacząco zmniejsza emisje zanieczyszczeń stałych i ciekłych do otoczenia. Niemniej jednak oddziaływania przemysłu cementowego i betonowego w fazie produkcji tych materiałów mają najwyższy negatywny wpływ środowiskowy w cyklu życia konstrukcji żelbetowej (Cheng et al. 2023).

Proces produkcji betonu może wiązać się także z emisjami do wód i gruntu, głównie na skutek gospodarki wodno-osadowej w cementowniach i betoniarniach. Wody technologiczne (np. po myciu bębnów mieszarek i instalacji) zawierają wysoki ładunek zawiesin cementowych i mają silnie zasadowy odczyn (pH ~12). Nieodpowiednio zarządzane ścieki cementowe mogą lokalnie powodować degradację gleby lub zanieczyszczenie wód powierzchniowych przez podwyższenie pH i stężenia jonów (np. wapnia, potasu, chromu sześciowartościowego z domieszek). W większości nowoczesnych wytwórni betonu stosuje się obiegi zamknięte wody i ponowne wykorzystanie mleczka cementowego lub kieruje ścieki do oczyszczania, co ogranicza bezpośrednie emisje do środowiska wodnego (Azeem et al. 2023). Etap produkcji generuje stosunkowo niewiele stałych odpadów nieorganicznych – mogą to być np. pyły i osady z odpylania gazów (częściowo zawracane do procesu jako cement *kiln dust*), niewykorzystane resztki świeżego betonu przeznaczane do ponownego przetworzenia lub formowane w bloki oporowe (Seo et al. 2019).

W procesie produkcji betonu, ze względu na bardzo wysoki tonaż ładunków, transport stanowi istotny element bilansu środowiskowego. Emisje z transportu mają charakter bezpośredni i lokalny – spaliny z pojazdów dostawczych emitują CO_2 oraz zanieczyszczenia, takie jak tlenki azotu, tlenek węgla, pyły PM czy węglowodory, przyczyniając się do powstawania smogu komunikacyjnego (Hottle et al. 2022). Dodatkowo transport jest istotnym źródłem hałasu oraz drgań, co może negatywnie oddziaływać na otoczenie (aspekt uciążliwości środowiskowej).

Faza budowy

Wykonawstwo konstrukcji żelbetowej wymaga zaangażowania licznych maszyn i urządzeń budowlanych. Do mieszania, pompowania, podawania oraz zagęszczania betonu używa się urządzeń zasilanych elektrycznie bądź spalinowo, natomiast do transportu wewnątrz placu i operacji montażowych stosuje się maszyny (dźwigi, koparki, ładowarki) przeważnie wyposażone w silniki spalinowe. Zużycie energii na budowie jest istotne z punktu widzenia lokalnego (pobór prądu z sieci, zużycie paliw w generatorach lub maszynach), ale zazwyczaj stanowi niewielki odsetek (<5–10%) skumulowanej energii całego cyklu życia obiektu (Wałach 2021). Korzystanie z energii elektrycznej na budowie skutkuje emisjami, których wielkość zależy od „miksu energetycznego", natomiast spalanie paliw w maszynach budowlanych generuje bezpośrednie emisje spalin. Poza energią, plac budowy zużywa wodę do pielęgnacji świeżego betonu oraz do mycia sprzętu i narzędzi. Część tej wody odparowuje, a część staje się ściekiem zawierającym cement i dodatki chemiczne (Azeem et al. 2023). Przy wykonywaniu konstrukcji żelbetowych najczęstszym odpadem są resztki niewbudowanej mieszanki, która po związaniu może zostać pokruszona i wykorzystana jako kruszywo pomocnicze na miejscu lub odtransportowana do recyklingu. Inne odpady to zużyte deskowania, opakowania po materiałach oraz resztki drutu i prętów zbrojeniowych.

Wskazane roboty budowlane emitują zanieczyszczenia przede wszystkim do powietrza i gleby. Urządzenia i maszyny spalinowe na budowie są źródłem CO_2 oraz zanieczyszczeń

komunikacyjnych (NO_x, CO, pył). Dodatkowo prace z betonem mogą powodować emisję pyłu cementowego (np. podczas cięcia lub szlifowania elementów betonowych, zrzutu suchego cementu), który wpływa na jakość powietrza i gleby w najbliższej okolicy.

Faza eksploatacji (użytkowania)

Oddziaływania samej konstrukcji żelbetowej na środowisko w fazie użytkowania są relatywnie niewielkie w porównaniu z etapami wytwarzania i budowy – żelbetowa konstrukcja w trakcie normalnej eksploatacji nie zużywa istotnych ilości zewnętrznych surowców ani energii i nie generuje znaczących emisji szkodliwych substancji. Użytkowany element żelbetowy jest chemicznie stabilny i obojętny; nie wydziela do środowiska gazów ani cieczy (pomijając ewentualne śladowe uwalnianie alkaliów do wód opadowych spływających po powierzchni). Zużycie energii w tej fazie dotyczy głównie energii operacyjnej budynku (ogrzewanie, chłodzenie), co jest poza bezpośrednim wpływem samego materiału konstrukcyjnego. Można jedynie uwzględnić okresowe prace konserwacyjne, które wiążą się z użyciem dodatkowych materiałów (żywice, zaprawy naprawcze) i energii, jednak skala tych prac jest znikoma (Wałach 2021).

Rozbiórka i koniec cyklu życia

Rozbiórka konstrukcji żelbetowej to proces wymagający najczęściej użycia ciężkiego sprzętu, koparek z młotami hydraulicznymi, przecinarek i kruszarek mobilnych. Działania te są wysoko energochłonne punktowo, ponieważ skupione są w krótkim czasie. Sprzęt rozbiórkowy napędzany silnikami Diesla spala duże ilości paliwa, emitując CO_2 oraz inne zanieczyszczenia spalinowe. Proces kruszenia betonu generuje znaczne ilości pyłu cementowo-kruszywowego unoszącego się w powietrzu (Sobotka i Sagan 2021). Pył ten zawiera drobne frakcje mineralne (w tym krzemionkę) i może stanowić zagrożenie dla jakości powietrza i zdrowia ludzi w okolicy, jeśli nie jest odpowiednio kontrolowany. Standardowo podczas rozbiórek stosuje się zraszanie wodą w celu minimalizacji zapylenia, co z kolei zwiększa zużycie wody i prowadzi do powstawania odcieków (mieszaniny wody i drobin cementu oraz pyłu). Odcieki te mają wysoki odczyn zasadowy, podobnie jak ścieki na etapie produkcji, dlatego wymagają zabezpieczenia, aby nie przedostały się bezpośrednio do gruntu lub kanalizacji bez uzdatnienia. Mimo tych emisji etap rozbiórki charakteryzuje się relatywnie krótkim czasem oddziaływania i zwykle mniejszy wkład w globalne wskaźniki niż wcześniejsze etapy cyklu życia (Sobotka i Sagan 2017).

Rozbiórka konstrukcji żelbetowej generuje duże ilości odpadów mineralnych w postaci gruzu betonowego i złomu stalowego. W ujęciu masowym jest to jeden z największych strumieni odpadów. Beton z rozbiórek jest odpadem nieulegającym biodegradacji, ale jednocześnie nie jest klasyfikowany jako odpad niebezpieczny. Jego obojętność i jednorodność składu sprawiają, że posiada wysoki potencjał do materialnego odzysku, co opisano w podrozdziale 2.3.

Ogólny schemat cyklu życia konstrukcji żelbetowej w ujęciu środowiskowym, uwzględniający kluczowe procesy w modułach LCA, z rozróżnieniem na beton towarowy i prefabrykowany, przedstawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1

Cykl życia konstrukcji żelbetowej (opracowanie własne na podstawie PN-EN 16757:2023)

Moduł	Konstrukcja monolityczna	Konstrukcja prefabrykowana
A1 – Pozyskanie surowców	emisje i zużycie zasobów związane z produkcją wszystkich komponentów mieszanki betonowej, w tym: cementu, kruszyw (drobnych i grubych), domieszek chemicznych, dodatków mineralnych oraz uzdatniania wody; uwzględnia się także przetwarzanie odpadów i wpływ cyklu wytwórczego każdego składnika	
	emisje i zużycie zasobów związane z produkcją stali zbrojeniowej	
A2 – Transport	emisje z transportu wszystkich komponentów do zakładu produkcyjnego (z uwzględnieniem rodzaju transportu, odległości, zużycia paliwa)	
	–	emisje z transportu stali zbrojeniowej do zakładu prefabrykacji
A3 – Wytwarzanie	emisje związane z procesem wytwarzania mieszanki betonowej w wytwórni: zużycie energii elektrycznej i paliw, wody, transport wewnętrzny, powstawanie i zagospodarowanie odpadów	emisje z produkcji elementów prefabrykowanych w zakładzie prefabrykacji: wytwarzanie mieszanki betonowej (formowanie, zagęszczanie, pielęgnacja, dojrzewanie), zużycie energii, transport wewnętrzny, magazynowanie, powstawanie i zagospodarowanie odpadów
	–	emisje z montażu stali zbrojeniowej; karbonatyzacja betonu
A4 – Transport	emisje z transportu mieszanki betonowej, sprzętu budowlanego i materiałów pomocniczych na plac budowy	emisje z transportu prefabrykatów, sprzętu budowlanego oraz materiałów pomocniczych na plac budowy
	emisje z transportu stali zbrojeniowej na plac budowy	–
A5 – Proces budowy/instalacji	emisje z wytwarzania materiałów pomocniczych (np. środków pielęgnacyjnych, deskowań); emisje z pompowania, układania i zagęszczania mieszanki betonowej; procesy pielęgnacji betonu; straty materiałowe na budowie i ich utylizacja	emisje z wytwarzania materiałów pomocniczych (np. zaprawy montażowe); z pracy sprzętu budowlanego podczas montażu elementów prefabrykowanych (np. dźwigów) straty materiałowe na placu budowy oraz ich przetworzenie
	emisje z montażu stali zbrojeniowej	–
B1 – Użytkowanie	karbonatyzacja betonu	
B2 – B8	brak wpływu	
C1 – Rozbiórka	emisje związane z rozbiórką przy użyciu materiałów wybuchowych lub sprzętu mechanicznego; kruszenie i cięcie elementów żelbetowych	

Tabela 4.1 cd.

C2 – Transport	emisje z wszelkiego transportu odpadów (np. gruzu betonowego, złomu stalowego) od momentu rozbiórki do chwili przetworzenia, utraty statusu odpadu lub składowania
C3 – Przetwarzanie odpadów	emisje związane z magazynowaniem odpadów, separacją złomu stalowego i jego przygotowaniem jako wsadu do produkcji wtórnej stali; emisje z kruszenia gruzu betonowego; możliwy efekt pochłaniania CO_2 wskutek karbonatyzacji odpadów
C4 – Usuwanie odpadów	składowanie frakcji niepoddanych recyklingowi (np. drobnych resztek gruzu, zanieczyszczonych materiałów); możliwy efekt pochłaniania CO_2 wskutek karbonatyzacji
D – Zyski i straty poza granicami systemu	zyski środowiskowe wynikające z uniknięcia emisji, m.in. przez: – ponowne użycie odzyskanych elementów żelbetowych w nowych obiektach budowlanych (uniknięcie emisji z produkcji nowych elementów); – zastosowanie gruzu betonowego do rekultywacji terenu zamiast wykorzystania kruszywa naturalnego (uniknięcie emisji z wydobycia i transportu); – kruszenie i recykling betonu – wykorzystanie kruszywa betonowego w nowym betonie lub w podbudowach drogowych (uniknięcie emisji związanych z produkcją kruszyw naturalnych)
	zyski środowiskowe wynikające z uniknięcia emisji, m.in. przez recykling złomu stalowego – zastąpienie produkcji stali pierwotnej stalą wtórną (uniknięcie emisji z wydobycia rudy, procesów hutniczych i wytopu stali)

4.1.3. Zjawisko karbonatyzacji betonu w ujęciu środowiskowym

Elementem wyróżniającym beton w analizie środowiskowej w stosunku do innych materiałów budowlanych jest zjawisko karbonatyzacji, czyli zdolność betonu do pochłaniania dwutlenku węgla (CO_2) z atmosfery na różnych etapach jego cyklu życia. Karbonatyzacja to proces chemiczny, w którym CO_2 reaguje z wodorotlenkiem wapnia ($Ca(OH)_2$) w matrycy cementowej, prowadząc do powstania węglanu wapnia ($CaCO_3$). Reakcja ta skutkuje trwałym związaniem cząsteczek CO_2 w strukturze betonu (PN-EN 16757:2023). Z perspektywy właściwości technicznych betonu reakcja karbonatyzacji jest uważana za zjawisko niekorzystne, ponieważ prowadzi do obniżenia jego pH. Spadek alkaliczności (poniżej wartości chroniących stal przed korozją) powoduje utratę pasywnej warstwy ochronnej na powierzchni prętów zbrojeniowych, co z kolei sprzyja ich korozji i w konsekwencji może prowadzić do zmniejszenia trwałości konstrukcji (Zhang B. et al. 2023).

Z perspektywy wpływu betonu na środowisko karbonatyzacja może być uznana za zjawisko korzystne, ponieważ prowadzi do pochłaniania CO_2 z atmosfery i tym samym częściowo kompensuje emisje gazów cieplarnianych związane z jego produkcją. Wu et al. (2024) twierdzą, że w skali globalnej w latach 1930–2023 skumulowane pochłanianie CO_2 przez materiały na bazie cementu osiągnęło 23,89 Gt, co odpowiada około 52,3% emisji CO_2 związanych z jego produkcją w tym samym okresie. Van Roijen et al. (2024) zwracają uwagę, że wpływ karbonatyzacji może być przeszacowany ze względu na powolny przebieg tego procesu oraz

emisje związane z rozbiórką, kruszeniem i transportem betonu, w związku z czym efekt netto pochłaniania CO_2 może być znacznie mniejszy. Dlatego też uwzględnianie efektu karbonatyzacji w analizie LCA powinno obejmować pełen kontekst cyklu życia materiału oraz bazować na wiarygodnych danych.

Zgodnie z wytycznymi normowymi proces karbonatyzacji może być uwzględniany w następujących fazach (PN-EN 16757:2023):

– Na etapie produkcji (moduł A) w przypadku prefabrykatów betonowych karbonatyzacja może zachodzić podczas długotrwałego składowania elementu przed dostawą.
– W fazie użytkowania (moduł B) ilość pochłanianego CO_2 zależy od wytrzymałości betonu oraz warunków jego ekspozycji. Powłoki ochronne i warstwy wykończeniowe nakładane na powierzchnię betonu zazwyczaj znacząco ograniczają tempo procesu karbonatyzacji.
– Na etapie końca życia konstrukcji (moduł C) intensywność karbonatyzacji betonu zależy od sposobu zagospodarowania odpadów. Największą efektywność obserwuje się w przypadku rozdrobnionego gruzu betonowego – im drobniejsza frakcja, tym większa powierzchnia kontaktu z atmosferą, co sprzyja absorpcji CO_2. Należy jednak uwzględnić, że bardzo drobne frakcje składowane w dużych pryzmach mogą mieć ograniczony dostęp powietrza, co zmniejsza efektywność tego procesu. W module C4 (składowanie odpadów) przyjmuje się 100-letni okres ekspozycji gruzu betonowego na procesy karbonatyzacji od momentu jego zdeponowania.

Ocena pochłaniania dwutlenku węgla przez beton w wyniku karbonatyzacji zależy od rodzaju betonu, warunków środowiskowych oraz scenariusza końca życia konstrukcji. Ocena bazuje na określeniu maksymalnego teoretycznego pochłaniania CO_2, wyznaczanego jako U_{tcc}, określonego na podstawie jednego z dwóch podejść (PN-EN 16757:2023):

– podejście pełne – uwzględniające wszystkie składniki spoiwa (np. klinkier portlandzki, popiół lotny, żużel wielkopiecowy) zawierające reaktywny CaO;
– podejście uproszczone – oparte wyłącznie na zawartości klinkieru portlandzkiego jako głównego źródła pochłaniania CO_2.

W praktyce najczęściej stosowane jest podejście uproszczone, opisane wzorem:

$$U_{tcc} = w \cdot C_c \cdot \left(\frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \right) \tag{4.1}$$

gdzie:
U_{tcc} – maksymalne teoretyczne pochłanianie CO_2 [kg CO_2/kg cementu],
w – udział reaktywnego CaO (zwykle przyjmuje się 65%),
C_c – masa klinkieru portlandzkiego w cemencie [kg],

$$M_{CO_2} = 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}}, \quad M_{CaO} = 56 \frac{\text{g}}{\text{mol}} .$$

Dla cementu portlandzkiego (CEM I) zawierającego 95% klinkieru portlandzkiego wartość U_{tcc} (przy założeniu 65% udziału reaktywnego CaO) wynosi 0,49 kg CO_2/kg cementu. Dla cementów o mniejszej zawartości klinkieru wynik należy dostosować proporcjonalnie. Otrzymana maksymalna wartość teoretycznego pochłaniania CO_2 (U_{tcc}) nie stanowi jeszcze

końcowej ilości pochłoniętego CO_2. Do jej ustalenia dostępne są dwie metody obliczeniowe: szczegółowa (standardowa) oraz uproszczona.

Standardowa metoda służy do szacowania pochłaniania CO_2 przez beton w fazie użytkowania (moduł B) oraz w fazie końca życia (moduły C1–C4), z uwzględnieniem rzeczywistych warunków środowiskowych i właściwości materiału. W podejściu tym analizuje się m.in. klasę wytrzymałości betonu, warunki ekspozycji (np. opady, osłonięcie, kontakt z gruntem), stosunek powierzchni do objętości elementu, czas użytkowania oraz zawartość klinkieru i cementu w betonie. Dodatkowo w modułach końca życia uwzględnia się m.in. stopień rozdrobnienia, czas składowania oraz krajowe przepisy dotyczące utraty statusu odpadu. Fazy C1–C3 zazwyczaj trwają krótko, co ogranicza potencjał pochłaniania CO_2. Należy zauważyć, że metoda ta wymaga znajomości szczegółowych parametrów technicznych i użytkowych.

W przypadku braku szczegółowych danych dotyczących warunków eksploatacyjnych lub końcowego zastosowania betonu norma PN-EN 16757:2023 dopuszcza zastosowanie metody uproszczonej, opartej na uśrednionych wartościach pochłaniania CO_2. Pochłanianie CO_2 w fazie użytkowania (B1) oblicza się na podstawie stosunku powierzchni do objętości elementu zgodnie z tabelą 4.2.

W odniesieniu do fazy końca życia (moduły C), w sytuacji braku danych umożliwiających określenie realnego scenariusza postępowania z betonem po rozbiórce dopuszcza się zastosowanie podejścia zakładającego pochłanianie w ilości 5 kg CO_2/m^3 betonu dla cementu CEM I. W przypadku innych rodzajów cementu, analogicznie jak przy określaniu U_{tcc} wartość tę należy odpowiednio skorygować, stosując proporcjonalny przelicznik oparty na zawartości klinkieru względem wartości referencyjnej 95%.

Tabela 4.2

Pochłanianie CO_2 przez beton i elementy betonowe w fazie B1 [kg CO_2/m^3 betonu]

Klasa betonu	**Wartość pochłaniania CO_2 [kg CO_2/m^3 betonu] przy stosunku powierzchni do objętości betonu [m^2/m^3]**		
	≤3 m^2/m^3	**3–8 m^2/m^3**	**≥8 m^2/m^3**
C16/20–C20/25	7,5	15,0	$CO_2 = U_{tcc} \cdot 0{,}15$
C25/30–C35/45	6,5	13,0	
>C35/45	5,0	10,0	

4.1.4. Kategorie wpływu i wskaźniki wykorzystania zasobów w analizie LCA

W analizie LCA jako miernik oddziaływania stosuje się kategorie wpływu środowiskowego, które umożliwiają ilościowe określenie potencjalnych skutków działalności człowieka (w tym procesów budowlanych) dla środowiska. Każda z kategorii odnosi się do określonego

typu obciążenia, takiego jak emisja gazów cieplarnianych, zakwaszenie środowiska czy zużycie zasobów naturalnych. Poszczególne kategorie różnią się zakresem, jednostką odniesienia, skalą przestrzenną oraz charakterem oddziaływania (Garbacz i Urbańska 2021).

W zależności od przyjętej metodyki LCA stosuje się różne zestawy kategorii wpływów. W ocenie betonowych wyrobów budowlanych przyjmuje się zestawy określone w normie PN-EN 15978:2012, dotyczącej oceny oddziaływań środowiskowych budynków, oraz w normie PN-EN 16757:2023 odnoszącej się bezpośrednio do wyrobów betonowych. Obie te normy powołują się na normę PN-EN 15804+A2:2020 jako podstawę definiującą zestaw kategorii wpływu środowiskowego, które należy stosować w analizie cyklu życia wyrobów budowlanych. Umożliwia to zachowanie spójności i porównywalności wyników.

W tabelach 4.3 i 4.4 przedstawiono podstawowe i dodatkowe kategorie wpływu uwzględniane w analizach środowiskowych. W zestawie podstawowym znajdują się takie kategorie, jak: potencjał tworzenia efektu cieplarnianego, potencjał zubożenia stratosferycznej warstwy ozonowej, potencjał tworzenia ozonu troposferycznego, eutrofizacja wód i lądów, potencjał wyczerpania zasobów abiotycznych dla zasobów kopalnych i niekopalnych, zakwaszenie i wyczerpywanie zasobów wodnych. Wśród kategorii dodatkowych obowiązkowe jest uwzględnienie emisji pyłów zawieszonych oraz promieniowania jonizującego w odniesieniu do zdrowia człowieka. Pozostałe wskaźniki z tego zestawu, takie jak ekotoksyczność w wodach słodkich, toksyczność dla ludzi oraz wpływ na użytkowanie terenu i jakość gleby, nie są obowiązkowe. Mogą one zostać zadeklarowane, jednak należy pamiętać o wysokim poziomie niepewności wyników związanych z tymi kategoriami.

Tabela 4.3

Opis podstawowych kategorii wpływu i wskaźników wykorzystania zasobów zgodnie z normą PN EN 15804+A2:2020

Kategoria wpływu	Opis	Źródło
Zmiany klimatyczne – suma **GWP-total** [kg CO_2 eq.]	**Całkowity potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (ślad węglowy)** Służy do ilościowej oceny wpływu emisji gazów cieplarnianych (CO_2, CH_4, N_2O) na zmianę klimatu w okresie 100 lat. Uwzględnia zdolność gazów do pochłaniania promieniowania cieplnego oraz czas ich przebywania w atmosferze. Zmiana klimatu odnosi się do długoterminowych zmian średnich warunków atmosferycznych spowodowanych wzrostem koncentracji tych gazów w wyniku działalności antropogenicznej	IPCC 2013
Zmiany klimatyczne – paliwa kopalne **GWP-fossils** [kg CO_2 eq.]	**Potencjał tworzenia efektu cieplarnianego – emisje z paliw kopalnych** Służy do oceny wpływu emisji gazów cieplarnianych pochodzenia kopalnego (np. ze spalania węgla, ropy naftowej, gazu ziemnego) na zmianę klimatu w horyzoncie 100 lat	IPCC 2013

Tabela 4.3 cd.

Zmiany klimatyczne – biogeniczne **GWP-biogenic** [kg CO_2 eq.]	**Potencjał tworzenia efektu cieplarnianego – emisje biogeniczne** Służy do oceny wpływu emisji i pochłaniania dwutlenku węgla pochodzenia biologicznego (np. drewno, biomasa) na zmianę klimatu w horyzoncie 100 lat. Dotyczy emisji CO_2 wcześniej pochłoniętego z atmosfery w procesie fotosyntezy, co zazwyczaj oznacza neutralny wpływ netto na klimat	IPCC 2013
Zmiany klimatyczne – użytkowanie gruntów **GWP-luluc** [kg CO_2 eq.]	**Potencjał tworzenia efektu cieplarnianego – zmiana użytkowania gruntów** Służy do oceny emisji lub pochłaniania dwutlenku węgla wynikających ze zmiany użytkowania gruntów, takich jak wylesianie, przekształcanie łąk w pola uprawne czy osuszanie torfowisk. Wartości obliczane są zgodnie z modelem IPCC 2013 i uwzględniają emisje CO_2 związane z uwolnieniem węgla zgromadzonego w glebie i biomasie	IPCC 2013
Zubożenie warstwy ozonowej: **ODP** [kg CFC 11 eq.]	**Potencjał zubożenia warstwy ozonowej w stratosferze** Służy do określenia, w jakim stopniu dana substancja chemiczna może przyczyniać się do niszczenia stratosferycznej warstwy ozonowej. Warstwa ta chroni Ziemię przed szkodliwym promieniowaniem ultrafioletowym (UV)	Raport WMO/ UNEP 2014
Zakwaszenie **AP** [mol H + eq.]	**Potencjał zakwaszenia – skumulowany poziom przekroczenia** Służy do oceny wpływu emisji gazów zakwaszających (SO_2, NO_x, NH_3) na zakwaszenie środowiska. Substancje te mogą przenosić się na duże odległości w atmosferze, a następnie opadać na powierzchnię ziemi wraz z deszczem lub pyłem, prowadząc do zakwaszenia gleby i wód. Zakwaszenie może osłabiać rośliny, zmieniać skład chemiczny gleb i negatywnie wpływać na organizmy wodne	Seppälä et al. 2006; Posch et al. 2008
Eutrofizacja wód słodkich **EP-freshwater** [kg N eq.]	**Eutrofizacja wód słodkich** Służy do oceny wpływu emisji fosforu na eutrofizację wód słodkich, czyli ich nadmierne wzbogacenie w substancje odżywcze. Prowadzi to do gwałtownego wzrostu glonów, pogorszenia jakości wody, zmniejszenia zawartości tlenu oraz obumierania organizmów wodnych	Ortiz-Reyes i Anex 2018

Tabela 4.3 cd.

Kategoria wpływu	Opis	Źródło
Eutrofizacja środowiska morskiego **EP-marine** [kg P eq.]	**Eutrofizacja wód morskich** Służy do oceny wpływu emisji związków azotu na eutrofizację wód morskich. Prowadzi to do nadmiernego rozwoju glonów, spadku poziomu tlenu oraz pogorszenia warunków życia organizmów morskich	Cosme et al. 2020
Eutrofizacja na lądzie **EP-terrestrial** [mol N eq.]	**Eutrofizacja środowiska lądowego** Służy do oceny wpływu emisji związków azotu na równowagę składników odżywczych w ekosystemach lądowych. Nadmiar azotu może powodować zakwaszenie gleb oraz utratę różnorodności biologicznej	Seppälä et al. 2006; Posch et al. 2008
Tworzenie ozonu fotochemicznego **POCP** [kg NMVOC eq.]	**Potencjał tworzenia ozonu troposferycznego** Służy do oceny zdolności substancji do tworzenia ozonu troposferycznego, powstającego w wyniku reakcji lotnych związków organicznych i tlenków azotu pod wpływem promieniowania słonecznego. Ozon przyziemny jest szkodliwy dla zdrowia ludzi, a także dla roślin i ekosystemów	van Zelm et al. 2008
Wyczerpywanie zasobów abiotycznych – minerały i metale **ADP-minerals&metals** [kg Sb eq.]	**Potencjał wyczerpania zasobów abiotycznych – zasoby niekopalne** Służy do oceny zużycia zasobów mineralnych, w szczególności metali, z uwzględnieniem rzadkości pierwiastków oraz wpływu ich eksploatacji na przyszłą dostępność dla społeczeństwa	Van Oers et al. 2002; Van Oers i Guinée 2016
Wyczerpywanie zasobów abiotycznych – paliwa kopalne **ADP-fossils** [MJ, net calorific value]	**Potencjał wyczerpania zasobów abiotycznych – zasoby kopalne** Służy do oceny utraty energii pierwotnej wynikającej ze zużycia paliw kopalnych, takich jak węgiel, ropa naftowa i gaz ziemny	Van Oers et al. 2002; Van Oers i Guinée 2016
Wyczerpywanie zasobów wodnych **WDP** [m^3 world eq. deprived]	**Potencjał pozbawienia użytkowników (zużycie wody ważone wskaźnikiem pozbawienia)** Służy do ilościowej oceny wpływu zużycia wody na zmniejszenie dostępności zasobów wodnych dla innych użytkowników, w tym dla środowiska naturalnego i działalności gospodarczej. Wskaźnik nie odnosi się bezpośrednio do objętości zużytej wody, lecz do potencjalnych skutków tego zużycia w kontekście lokalnej dostępności zasobów wodnych. Model AWARE, na którym opiera się wskaźnik, uwzględnia ilość wody pozostałej do dyspozycji po zaspokojeniu podstawowych potrzeb ekosystemów i społeczeństwa, umożliwiając ocenę względnego obciążenia hydrologicznego w różnych regionach świata	Boulay et al. 2018

Tabela 4.4

Opis dodatkowych kategorii wpływu zgodnie z normą PN EN 15804+A2:2020

Kategoria wpływu	Opis	Źródło
Emisje pyłów zawieszonych **PM** [disease inc.]	**Potencjalny wpływ emisji pyłów zawieszonych na zdrowie człowieka** Służy do oceny wpływu emisji zanieczyszczeń powietrza na zdrowie człowieka przez tworzenie drobnych cząstek pyłu zawieszonego. Uwzględnia zarówno emisje cząstek pierwotnych (np. sadzy), jak i emisje substancji prekursorowych, takich jak SO_2, NO_x i NH_3, które mogą ulegać przemianom chemicznym w atmosferze i prowadzić do wtórnego powstawania pyłu. Model uwzględnia nie tylko emisje, lecz także transport zanieczyszczeń, ekspozycję ludności oraz efekt zdrowotny wyrażony jako utrata zdrowia przypadająca na jednostkę emisji	Raport UNEP/ SETAC 2016
Promieniowanie jonizujące, wpływ na zdrowie człowieka **IRP** [kgBq U–235 eq]	**Potencjał promieniowania jonizującego – odniesienie do U–235** Służy do oceny wpływu emisji radionuklidów na środowisko i zdrowie człowieka. Odnosi się do zdolności substancji promieniotwórczej do generowania promieniowania jonizującego, przy czym jako substancję referencyjną przyjęto uran-235	Frischknecht et al. 2000
Ekotoksyczność (wody słodkie) **ETP-fw** [CTUe]	**Potencjalna porównawcza jednostka toksyczności dla ekosystemów** Służy do oceny wpływu emisji substancji chemicznych na organizmy żyjące w wodach słodkich. Opiera się na modelu USEtox, który uwzględnia trzy etapy oddziaływania: los substancji w środowisku, narażenie ekosystemów oraz ich wrażliwość na toksyczne działanie. Jednostka CTUe odnosi się do liczby dni, w których organizmy wodne mogą być narażone na toksyczne stężenia danej substancji w jednostce objętości środowiska	Rosenbaum et al. 2008
Toksyczność dla ludzi, skutki rakotwórcze **HTP-c** [CTUh]	**Potencjalna porównawcza jednostka toksyczności dla człowieka** Określa ryzyko zdrowotne dla człowieka wynikające z kontaktu z substancjami chemicznymi, w tym rakotwórczymi. Uwzględnia narażenie przez inhalację, spożycie zanieczyszczonej wody i żywności oraz wchłanianie przez skórę. Jednostka CTUh oznacza przewidywaną liczbę przypadków zachorowań w populacji przypadającą na emisję 1 kg danej substancji	Rosenbaum et al. 2008

Tabela 4.4 cd.

Kategoria wpływu	Opis	Źródło
Toksyczność dla ludzi, skutki nie rakotwórcze **HTP-nc** [CTUh]	**Potencjalna porównawcza jednostka toksyczności dla człowieka (choroby inne niż nowotworowe)** Określa ryzyko wystąpienia chorób innych niż nowotworowe w wyniku kontaktu z toksycznymi substancjami chemicznymi. Uwzględnia narażenie poprzez inhalację, spożycie i kontakt ze skórą, z wyłączeniem efektów związanych z pyłem zawieszonym i promieniowaniem jonizującym. Jednostka CTUh oznacza liczbę przypadków zachorowań w populacji przypadającą na emisję 1 kg danej substancji	Rosenbaum et al. 2008
Skutki związane z użytkowaniem gruntów/Jakością gleby **SQP** [dimensionless]	**Potencjalny wskaźnik wpływu na jakość gleby** Służy do oceny wpływu użytkowania i przekształceń terenu na funkcje gleby, takie jak produkcja biomasy, filtracja wody, retencja składników odżywczych i wspieranie bioróżnorodności. Ocena opiera się na porównaniu wartości tych funkcji w stanie zakłóconym (np. w wyniku działalności człowieka) ze stanem referencyjnym (naturalnym). Wskaźniki te mają charakter bezwymiarowy i opisują względną utratę lub poprawę funkcji środowiskowych gleby	Bos et al. 2016

W praktyce, w zależności od celu analizy i oczekiwań interesariuszy, dopuszcza się stosowanie podejść uproszczonych, polegających na analizie wyłącznie wybranych kategorii. Przykładami takich analiz są:

– analiza śladu węglowego (ang. *carbon footprint*) – ogranicza się do kategorii potencjału globalnego ocieplenia (GWP-total) wg normy PN-EN ISO 14076-10:2018;
– analiza śladu wodnego (ang. *water footprint*) – określana na podstawie normy ISO 14046:2014.

W literaturze dotyczącej ocen środowiskowych funkcjonuje również pojęcie śladu środowiskowego (ang. *environmental footprint*), odnoszące się do całościowego wpływu produktu lub organizacji na środowisko, z uwzględnieniem wielu kategorii oddziaływań. Przykładem jego zastosowania jest metodyka Environmental Footprint, opracowana przez Komisję Europejską i oparta na zasadach analizy LCA (Environmental Footprint Methods 2025).

Ustalenie wartości liczbowych dla poszczególnych kategorii wpływu i wskaźników wykorzystania zasobów wymaga określenia jednostki funkcjonalnej lub deklarowanej, zebrania danych inwentaryzacyjnych (LCI), modelowania cyklu życia oraz oceny wpływu cyklu życia (LCIA). W przypadku wyrobów budowlanych najczęściej stosuje się jednostkę deklarowaną, opisującą wyrób niezależnie od kontekstu użycia (np. 1 m³ betonu, 1 t stali

zbrojeniowej), natomiast pełna funkcja ujawnia się dopiero na poziomie obiektu budowlanego. Ustala się także granice systemu, tj. które etapy cyklu życia zostaną ujęte w analizie – zgodnie z normą PN-EN 15804+A2:2020 minimum obejmuje moduły A1–A3 (wydobycie surowców, transport do wytwórcy, proces produkcji). Zbieranie danych inwentaryzacyjnych polega na zgromadzeniu szczegółowych informacji o procesach produkcyjnych, zużyciu surowców i energii, emisjach substancji zanieczyszczających (do powietrza, wody, gleby) oraz ilościach generowanych odpadów. Uwzględnia się również transport materiałów i produktów. Dane powinny pochodzić z ewidencji producenta danego wyrobu i/lub z zewnętrznych baz danych (np. ELCD – European Reference Life Cycle Database, Ecoinvent, NEEDS).

Zebrane dane LCI wprowadzane są do modelu analitycznego, najczęściej z użyciem specjalistycznego oprogramowania np. GaBi, SimaPro, openLCA. Model obrazuje przepływy materiałów, energii oraz emisji w kolejnych etapach cyklu życia produktu. Dla procesów współprodukcyjnych stosuje się odpowiednią alokację wpływów środowiskowych. Następnie dane z modelu LCI przeliczane są na wskaźniki wpływu środowiskowego. Część tych wskaźników (np. emisje CO_2, NO_x, SO_2) jest bezpośrednio mierzalna podczas produkcji, natomiast większość (np. zużycie zasobów, eutrofizacja, toksyczność) wyznacza się pośrednio, za pomocą współczynników przeliczeniowych przypisanych do poszczególnych surowców lub substancji.

Obecnie dane dotyczące wskaźników dla produktów podstawowych (np. cementu, kruszywa, stali zbrojeniowej) mogą być dostępne w deklaracjach środowiskowych producentów (EPD). Korzystanie z kart EPD pozwala na obliczenie oddziaływań środowiskowych całego obiektu budowlanego, jednak wymaga uwzględnienia dalszych procesów technologicznych, takich jak transport materiałów na plac budowy, wbudowanie w konstrukcję, eksploatacja czy rozbiórka (Geryło 2022).

4.1.5. Analiza i interpretacja wyników oceny środowiskowej

Normy określają strukturę i zasady przeprowadzania oceny cyklu życia dla wyrobów budowlanych oraz obiektów budowlanych, jednak nie precyzują wartości progowych umożliwiających jednoznaczną ocenę wyników środowiskowych. Opierają się na założeniu, że interpretacja wyników analizy LCA powinna być prowadzona w odniesieniu do celu badania oraz kontekstu decyzyjnego, bez narzucania arbitralnych granic (Pizzol et al. 2017).

W praktyce oznacza to konieczność stosowania dodatkowych narzędzi, umożliwiających interpretację i porównywanie wyników. Jednym z takich narzędzi jest podejście agregacyjne, pozwalające na łączenie wyników z różnych kategorii wpływu środowiskowego w jeden zagregowany wskaźnik – Ecopoint (E_p) (Laurent et al. 2020). Wskaźnik ten (wzory (4.2) i (4.3)) stanowi bezwymiarową wartość integrującą wielkości cząstkowe i umożliwiającą porównanie różnych wariantów w sposób syntetyczny. Zastosowanie Ecopointu wymaga ustalenia zestawu parametrów (kategorii wpływu – tabele 4.3 i 4.4), stanowiących podstawę oceny cząstkowej. Poszczególne kategorie wpływu środowiskowego różnią się nie tylko charakterem, ale również znaczeniem w kontekście globalnych i lokalnych wyzwań środowiskowych. W związku z tym podczas agregacji wyników stosuje się dwa kluczowe procesy – normalizację i ważenie.

Normalizacja w tym przypadku polega na przekształceniu wyników poszczególnych kategorii wpływu w wartości względne przez odniesienie ich do reprezentatywnych wartości porównawczych. Przyjętą praktyką jest definiowanie odniesienia normalizacyjnego jako równoważnika osoby (P_t), co umożliwia uwzględnienie wpływu jednostkowego w kontekście populacyjnym.

$$N_k = \frac{S_k}{R_k} \tag{4.2}$$

gdzie:

N_k – znormalizowany wynik dla kategorii wpływu k,
S_k – wartość charakterystyczna dla kategorii wpływu k,
R_k – współczynnik normalizacji przypisany do kategorii wpływu k.

Ważenie w tym przypadku polega na określeniu względnej istotności poszczególnych kategorii wpływu środowiskowego w ramach całościowej oceny. Każdej kategorii przypisuje się wagę odzwierciedlającą jej znaczenie względem pozostałych. Wartości wag mogą być określane na podstawie priorytetów środowiskowych, ocen eksperckich, analiz ryzyka lub podejść opartych na preferencjach społecznych.

$$E_p = \sum_{k}^{m} \left(N_k \cdot w_k \right) \tag{4.3}$$

gdzie:

k – kategorie wpływu środowiskowego,
N_k – znormalizowany wynik dla kategorii wpływu k,
w_k – waga przypisana do kategorii wpływu k.

W tabeli 4.5 przedstawiono zestaw wartości normalizacyjnych oraz wag środowiskowych dla poszczególnych kategorii wpływu, opracowanych przez Komisję Europejską w ramach metodyki *Environmental Footprint* (EF). Metodyka ta opiera się na danych globalnych i przyjmuje za punkt odniesienia średnie roczne obciążenie środowiskowe przypadające na jednego mieszkańca świata.

Tabela 4.5

Wartości wag i normalizacji dla poszczególnych kategorii wpływu (Sala et al. 2018)

Wskaźnik	Waga [%]		Normalizacja	Jednostka / P_t
	bez kategorii opcjonalnych	z uwzględnieniem kategorii opcjonalnych		
GWP-total	22,19	21,06	7553,08	kg CO_2 eq.
ODP	6,75	8,96	0,05	kg CFC–11 eq.
AP	6,64	6,2	55,57	mol H+ eq.
EP-freshwater	2,95	2,96	1,61	kg P eq.

Tabela 4.5 cd.

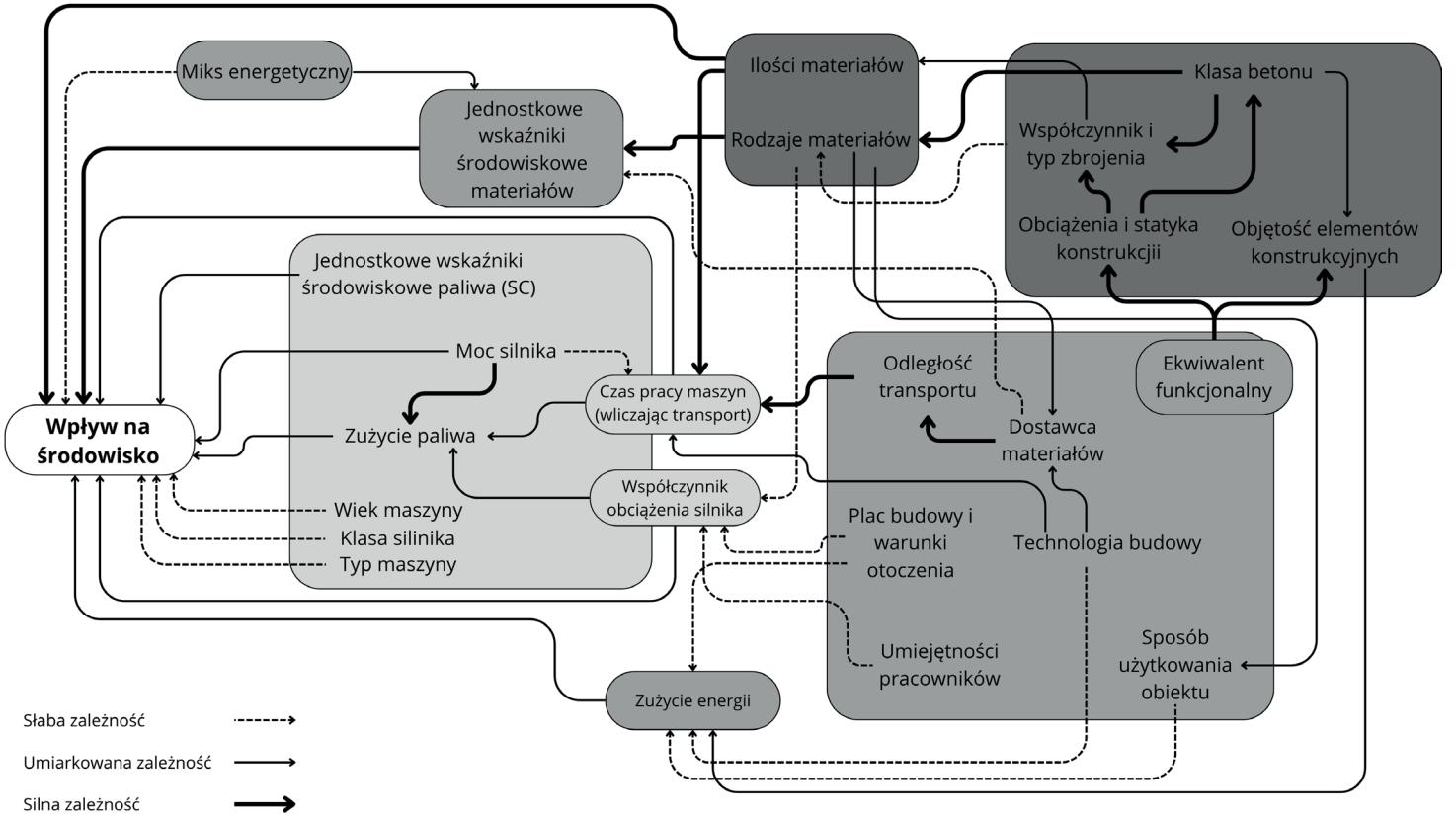
EP-marine	3,12	3,71	19,55	kg N eq.
EP-terrestrial	3,91	2,13	176,75	mol N eq.
POCP	5,1	4,78	40,86	kg NMVOC eq.
ADP-minerals &metals	8,08	7,55	0,06	kg Sb eq.
ADP-fossil	8,92	8,32	65 004,26	MJ, net calorific value
WDP	9,03	8,51	11 468,71	m^3 water eq. of deprived water
PM	9,54	2,80	0,0006	disease inc.
IRP	5,37	7,94	4220,16	kBq U–235 eq.
ETP-fw	–	1,92	56 716,5863	CTUe
HTP-c	–	1,84	0,0000173	CTUh
HTP-nc	–	5,01	0,0001	CTUh
SQP	8,42	6,31	819 498,18	dimensionless

Należy podkreślić, że w metodyce EF największą wagę przypisuje się emisjom gazów cieplarnianych (GWP – ok. 22%), zużyciu zasobów (ADP – łącznie ok. 17%) oraz zużyciu wody (WDP – ok. 9%). Istotne są także kategorie związane z zanieczyszczeniem powietrza i zdrowiem człowieka (PM – do 9,5%) oraz z toksycznością i eutrofizacją (po ok. 3–6%). Najniższe wartości wag (ok. 3%) przypisano wskaźnikom eutrofizacji wód słodkich (EP-freshwater) oraz środowiska morskiego (EP-marine).

4.2. Czynniki wpływające na ocenę środowiskową konstrukcji żelbetowych

W pracy autora (Wałach 2021) przeprowadzono analizę poszczególnych czynników wpływających na końcowe wyniki oddziaływania środowiskowego konstrukcji żelbetowych. W celu określenia istotności poszczególnych parametrów przeprowadzono analizę DEMATEL, której wyniki pozwoliły wskazać czynniki należące istotnych parametrów. W grupie tej znalazły się przede wszystkim:

– liczba godzin pracy maszyn (w tym transport),
– rodzaje materiałów, w tym klasa betonu,
– ilość materiałów,
– jednostkowe wskaźniki środowiskowe materiałów,
– objętość elementów konstrukcyjnych,
– obciążenia i schemat statyczny konstrukcji,
– stopień i rodzaj zbrojenia,
– zużycie paliwa oraz wybór dostawcy materiałów.



Rys. 4.3. Zależności pomiędzy wybranymi czynnikami wpływającymi na ocenę LCA – analiza DEMATEL

Na rysunku 4.3 przedstawiono zależności pomiędzy wybranymi czynnikami wpływającymi na ocenę LCA konstrukcji żelbetowych, wykorzystane w analizie DEMATEL.

Spośród tych parametrów w przeprowadzonej analizie jako przyczyny (wartości dodatnie wskaźnika) wskazano: klasę betonu, obciążenia, statykę konstrukcji, używane materiały oraz ich dostawców, a także objętość elementów konstrukcyjnych. Jako główne skutki (wartości ujemne wskaźnika) wskazano w pierwszej kolejności liczbę godzin pracy maszyn, a następnie jednostkowe wskaźniki środowiskowe materiałów, rodzaj i stopień zbrojenia oraz zużycie paliwa. Z kolei w grupie parametrów drugorzędnych znalazły się: ekwiwalent funkcjonalny (w podstawowym zakresie dotyczącym funkcjonalności obiektu budowlanego), współczynnik obciążenia silnika, odległość transportu, moc silnika, technologia budowy, miks energetyczny (charakterystyczny dla danego kraju), sposób użytkowania obiektu, warunki placu budowy i jego otoczenia, jednostkowe wskaźniki środowiskowe paliwa, umiejętności pracowników, klasa silnika, typ maszyny oraz wiek maszyny. Spośród uzyskanych wyników wybrano do szczegółowej analizy następujące parametry: skład mieszanki betonowej, rodzaj cementu, strukturę źródeł energii, procesy transportowe oraz pracę maszyn budowlanych.

4.2.1. Skład mieszanki betonowej

Skład mieszanki betonowej kształtuje właściwości betonu zarówno w stanie świeżym, jak i po związaniu, a ponadto wpływa na jego profil środowiskowy (Wałach i Mach 2023). W betonach klasycznych wzrost wytrzymałości związany jest z obniżeniem współczynnika wodno-cementowego (w/c); sama wytrzymałość zależy również w dużym stopniu od rodzaju zastosowanego kruszywa i cementu. Tę samą wartość wytrzymałości betonu można osiągnąć, stosując różne receptury mieszanek, co przedstawiono w rozdziale 3.

Zwiększenie udziału klinkieru oraz całkowitej ilości cementu w mieszance skutkuje wzrostem emisji (Durastanti i Moretti 2024), natomiast ich częściowe lub całkowite zastąpienie dodatkami mineralnymi (np. popiołem lotnym, mielonym żużlem wielkopiecowym) może znacząco ograniczać obciążenia środowiskowe (Orozco et al. 2024). W przypadku kruszyw istotne znaczenie ma pochodzenie materiału – dominacja kruszyw łamanych i długie trasy transportowe zwiększają emisje (Orozco et al. 2024), w przeciwieństwie do stosowania kruszyw recyklingowych (Sabău et al. 2021). W grupie dodatków i domieszek zastosowanie plastyfikatorów i superplastyfikatorów może pośrednio przyczynić się do redukcji ilości cementu w mieszance, obniżając tym samym jej ogólny ślad środowiskowy przy relatywnie niskim oddziaływaniu własnym. Całość wskazuje na potrzebę zintegrowanego podejścia do projektowania mieszanki betonowej, z uwzględnieniem źródła i charakterystyki poszczególnych składników. Najważniejsze zależności wpływające na wynik środowiskowy mieszanek betonowych podsumowano na rysunku 4.4.

Czynnikiem wpływającym na wynik analizy środowiskowej cyklu życia obiektów budowlanych jest również wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu. Materiały te, zgodnie z zasadami analizy LCA, w wielu przypadkach wchodzą do systemu z przypisaną zerową wartością wpływu środowiskowego w zakresie fazy pozyskania surowca (A1), ponieważ etap ich pierwotnej produkcji został już uwzględniony w analizie poprzedniego

cyklu życia, co odpowiada brakowi emisji związanych z wydobyciem i przygotowaniem surowców pierwotnych.

Niestety, jedynie około 11,8% wszystkich materiałów wykorzystywanych w gospodarce UE w 2023 r. pochodziło z recyklingu. Jest to jedynie niewielki wzrost w porównaniu z 10,7% w 2010 r., co wyraźnie wskazuje na potrzebę intensyfikacji działań w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym. Główne strumienie materiałów pochodzących z recyklingu, wykorzystywane w gospodarce UE w 2023 r. obejmowały przede wszystkim rudy metali (24,7%) oraz minerały niemetaliczne (13,6%) (Raport EEA 2025).



Rys. 4.4. Wpływ kształtowania składu mieszanki betonowej na wskaźniki środowiskowe

Warto zaznaczyć, że zastosowanie materiałów pochodzących z recyklingu może wiązać się z odmiennymi wymaganiami technologicznymi, wpływającymi na przebieg procesów budowlanych. Przykładowo, wykorzystanie destruktu asfaltowego może prowadzić do obniżenia niektórych kategorii wpływu środowiskowego (np. śladu węglowego czy zużycia energii), a jednocześnie powodować zwiększone zużycie wody w porównaniu z konwencjonalną mieszanką asfaltową (Bruno et al. 2024).

4.2.2. Rodzaj cementu

W zależności od typu, cement zawiera różne ilości klinkieru portlandzkiego. Jego udział waha się od ok. 20% w cementach wieloskładnikowych do 95–100% w cemencie

portlandzkim. Pozostałymi składnikami cementu są głównie wapień, gips, żużel wielkopiecowy oraz inne dodatki mineralne w różnych proporcjach. Ich rodzaj oraz ilość determinują zarówno właściwości betonu, jak i jego profil środowiskowy. W tabeli 4.6 przedstawiono porównanie wpływu środowiskowego cementów CEM I–CEM IV w klasie 42,5, wyrażone względem cementu CEM I (100%) i odniesione do 1 kg produktu (moduły A1–A3, baza danych Sphera (Sphera 2025)).

W pracy Durastanti i Moretti (2024) przeanalizowano 41 zakładów produkujących klinkier portlandzki w Europie w latach 2015–2023. Na podstawie analizy statystycznej przedstawiono wnioski dotyczące współzależności oddziaływań środowiskowych. Wykazano, że potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP) jest najsilniej powiązany ze zużyciem paliw kopalnych (ADP-fossil) oraz ujemnie skorelowany z wykorzystaniem odnawialnych i nieodnawialnych paliw wtórnych. Ponadto zidentyfikowano silną współzależność między GWP a zużyciem energii elektrycznej oraz zasobów wodnych w procesie produkcji klinkieru. Analiza wykazała również, że potencjał niszczenia warstwy ozonowej (ODP) jest silnie skorelowany ze wskaźnikami ADP-fossil oraz zużyciem nieodnawialnej energii pierwotnej, co podkreśla znaczenie redukcji zużycia paliw kopalnych dla jednoczesnego ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i ochrony warstwy ozonowej.

Tabela 4.6

Zmiana wyniku oceny środowiskowej cementów CEM II-CEM IV
względem cementu referencyjnego CEM I na podstawie LCA Database – Sphera

Wskaźnik kategorii wpływu	**CEM I 42.5 [%]**	**CEM II 42.5 [%]**	**CEM III 42.5 [%]**	**CEM IV 42.5 [%]**
GWP	100	−20	−62	−32
ODP	100	−5	−10	−6
AP	100	−20	−60	−29
EP-freshwater	100	−9	−20	−4
EP-marine	100	−20	−60	−28
EP-terrestrial	100	−20	−60	−28
POCP	100	−20	−61	−30
ADP-minerals &metals	100	−9	−24	−10
ADP-fossil	100	−15	−45	−21
WDP	100	−12	−33	−17
PM	100	−13	−60	−33
IRP	100	−5	−10	−6
SQP	100	−6	−11	0

W analizowanych zakładach produkcji cementu zaobserwowano istotne zróżnicowanie głównych wskaźników środowiskowych. Przykładowo, wartość wskaźnika globalnego ocieplenia (GWP) mieściła się w przedziale 849–1042 kg CO_2 eq/Mg klinkieru, zużycie energii elektrycznej wynosiło 51–119 kWh/Mg, natomiast zużycie wody wahało się od 0,66 do 2,21 m^3/Mg klinkieru (Durastanti i Moretti 2024).

4.2.3. Struktura źródeł energii (miks energetyczny)

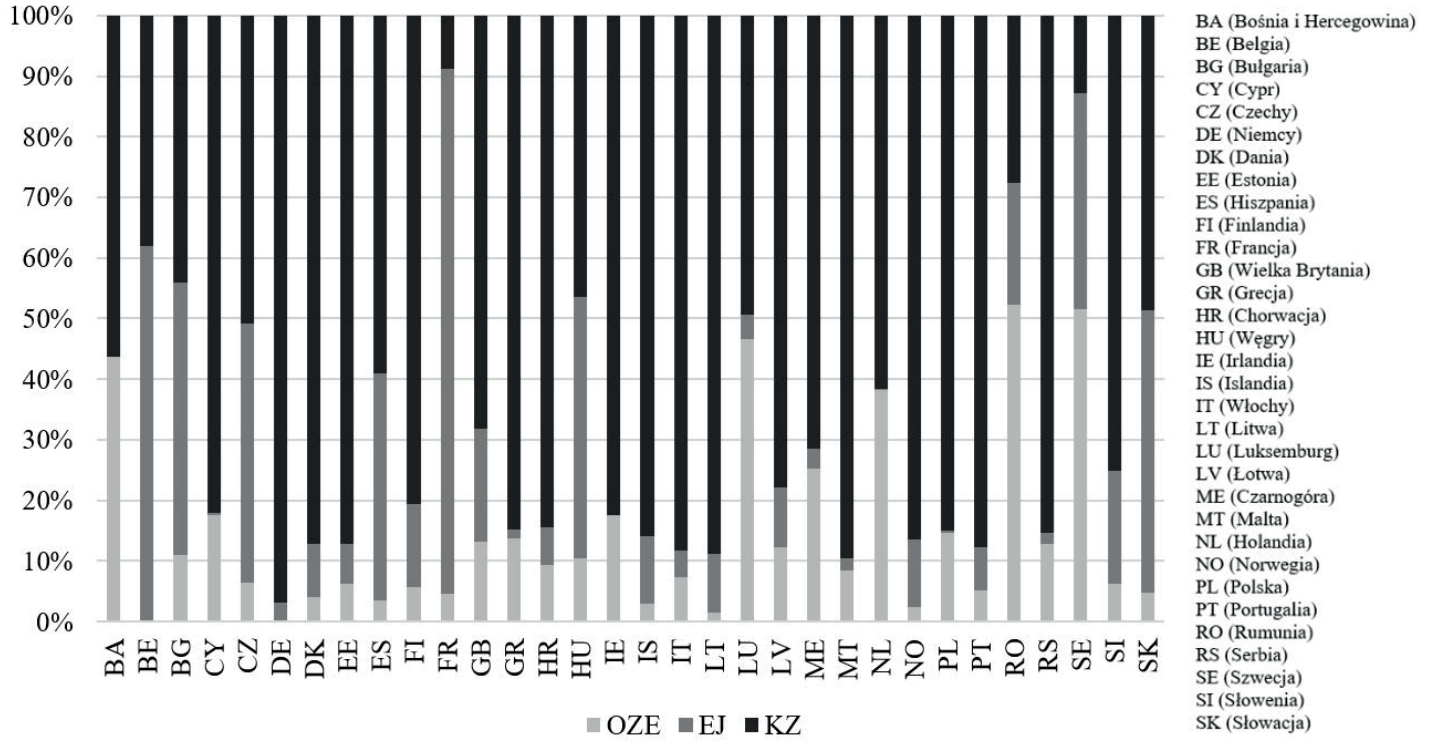
Miks energetyczny to struktura wykorzystywanych źródeł energii w danym kraju, określająca udział poszczególnych technologii w produkcji energii elektrycznej. Źródła energii dzieli się na trzy główne grupy:

- źródła kopalne (ZK) – węgiel kamienny, węgiel brunatny, ropa naftowa, gaz ziemny;
- źródła odnawialne (OZE) – energia słoneczna, wiatrowa, wodna, biomasa oraz energia geotermalna;
- źródła jądrowe (EJ) – energia wytwarzana w elektrowniach atomowych.

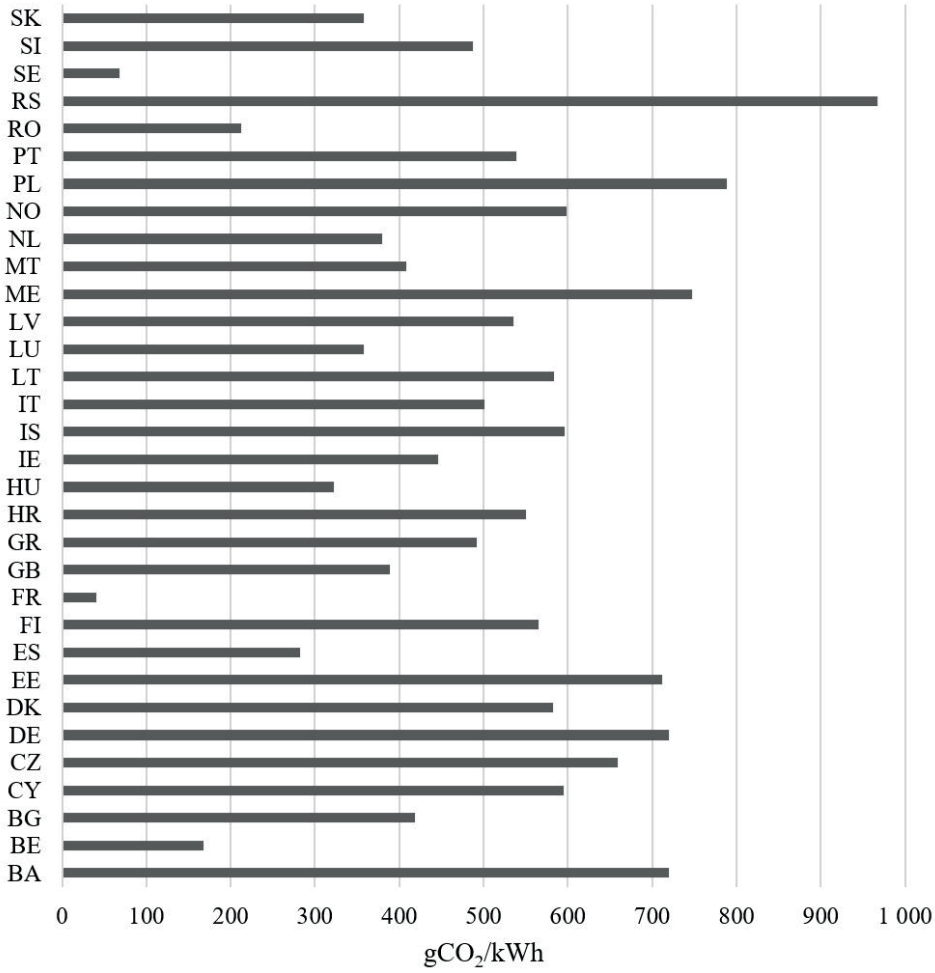
Miksy energetyczne w Europie charakteryzują się dużą różnorodnością, wynikającą z odmiennych uwarunkowań geograficznych, gospodarczych oraz politycznych poszczególnych krajów. Ogólnoeuropejska strategia klimatyczna, ukierunkowana na osiągnięcie neutralności emisyjnej do 2050 r., wymusza dalsze zmiany w strukturze energetycznej. W związku z tym oddziaływanie środowiskowe miksu energetycznego ulega istotnym zmianom na przestrzeni lat, co znajduje odzwierciedlenie w znacznym ograniczeniu emisji gazów cieplarnianych oraz poprawie jakości powietrza.

Uzyskanie jednostki energii (kWh) z każdego źródła wiąże się z ilościowym i jakościowym zróżnicowaniem wskaźników środowiskowych. Na rysunku 4.5 przedstawiono średnie miksy energetyczne i ich oddziaływanie w różnych krajów europejskich w 2023 r. (Raport AIB 2024). Państwa skandynawskie, takie jak Norwegia i Szwecja, korzystają głównie z odnawialnych źródeł energii – przede wszystkim elektrowni wodnych i wiatrowych – podczas gdy Francja opiera swój miks w dużej mierze na energetyce jądrowej (Osuma i Yusuf 2025). Europa Środkowo-Wschodnia, w tym Polska, nadal jest zależna od paliw kopalnych, szczególnie węgla kamiennego i brunatnego, jednak sukcesywnie podejmowane są kroki w kierunku dywersyfikacji źródeł energii przez zwiększanie inwestycji w odnawialne źródła oraz technologie niskoemisyjne (Aydın et al. 2025).

Na rysunku 4.6 przedstawiono poziomy emisji gazów cieplarnianych, wyrażone jako jednostkowe emisje CO_2 przypadające na 1 kWh energii elektrycznej (gCO_2/kWh), dla wybranych krajów europejskich w 2023 r. Dane wskazują na wyraźną korelację pomiędzy strukturą miksu energetycznego a intensywnością emisji. Kraje o wysokim udziale niskoemisyjnych źródeł energii, takich jak odnawialne (np. hydroenergia, energia wiatrowa) i energetyka jądrowa – jak Szwecja, Francja i Norwegia – charakteryzują się relatywnie niskim wskaźnikiem emisji jednostkowej. Z kolei państwa opierające produkcję energii w dużej mierze na paliwach kopalnych, zwłaszcza węglu (np. Polska, Serbia, Bośnia i Hercegowina), wykazują znacznie wyższe wartości emisji przypadających na jednostkę wyprodukowanej energii.



Rys. 4.5. Struktura źródeł energii krajów UE dla 2023 r.
(Raport AIB 2024)



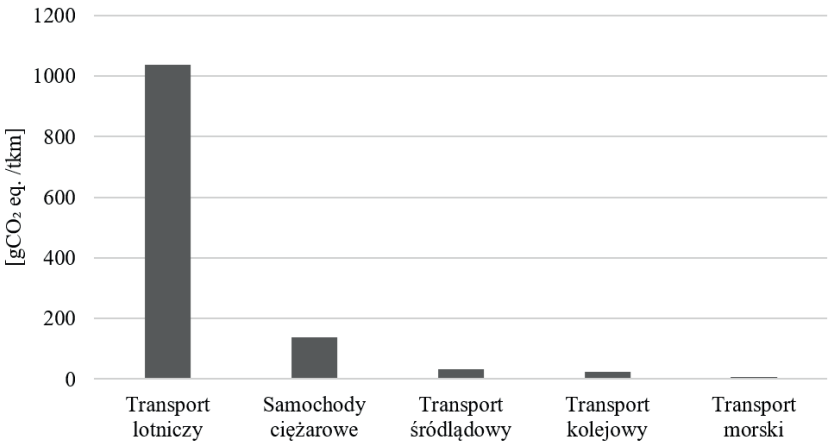
Rys. 4.6. Emisje CO_2 dla poszczególnych miksów krajowych dla 2023 r. (Raport AIB 2024)

4.2.4. Procesy transportowe

Procesy transportowe stanowią kolejny element wpływający na ocenę środowiskową całego procesu budowlanego. Założenia dotyczące transportu przyjmowane w analizie LCA mają istotny wpływ na uzyskane wyniki (Soust-Verdaguer et al. 2022). Do kluczowych parametrów transportowych zalicza się m.in.: rodzaj zastosowanego środka transportu, odległość przewozu, ładowność oraz efektywność wykorzystania przestrzeni ładunkowej, a także typ paliwa oraz wiek i stan techniczny pojazdu.

Rodzaj zastosowanego środka transportu może w istotnym stopniu wpływać na poziom emisji gazów cieplarnianych generowanych w procesie budowlanym. Jak wskazują dane

Europejskiej Agencji Środowiska (rys. 4.7), transport kolejowy i wodny charakteryzują się znacznie niższym śladem węglowym w przeliczeniu na tonokilometr w porównaniu z transportem drogowym (Raport EEA 2022). W związku z tym, w przypadkach, gdy jest to technicznie i logistycznie uzasadnione, zastosowanie niskoemisyjnych form transportu materiałów może przyczynić się do ograniczenia wpływu środowiskowego na tym etapie cyklu życia.



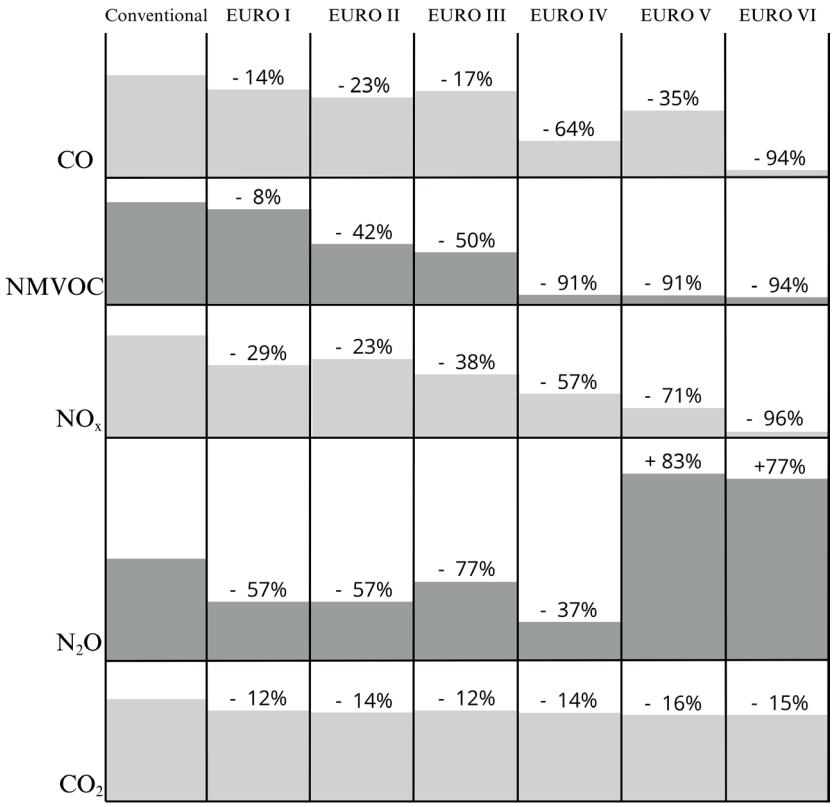
Rys. 4.7. Średnie emisje gazów cieplarnianych dla różnych środków transportowych (Raport EEA 2022)

Odległość transportowa stanowi jeden z czynników mogących istotnie wpływać na bilans środowiskowy, szczególnie w przypadku przewozu materiałów ciężkich lub o dużej objętości, takich jak kruszywa, cement czy stal. Wzrost odległości transportowej wiąże się zazwyczaj ze zwiększoną emisją gazów cieplarnianych, co wynika z liniowej zależności pomiędzy odległością a generowaną emisją w podstawowym modelu obliczeniowym. W ramach oceny cyklu życia (LCA) emisje związane z transportem najczęściej szacuje się jako iloczyn masy ładunku [t], odległości transportowej [km] oraz współczynnika emisji przypisanego danemu typowi pojazdu [kgCO_2 eq./(t·km)]. W celu ograniczenia wpływu środowiskowego tego etapu korzystnym rozwiązaniem może być optymalizacja łańcucha dostaw, obejmująca wybór lokalnych dostawców oraz efektywne planowanie logistyki transportowej. Warto jednak zauważyć, że w praktyce zależność pomiędzy odległością a emisją może odbiegać od modelu liniowego. Na krótkich trasach często występują relatywnie wyższe jednostkowe emisje związane z fazą rozruchu pojazdu i zwiększonym zużyciem paliwa w warunkach miejskich. Z kolei na dłuższych trasach możliwe jest osiągnięcie pewnej optymalizacji zużycia paliwa (m.in. przez utrzymywanie stałej prędkości na trasach szybkiego ruchu), co może nieznacznie obniżyć wskaźnik emisji przypadający na jednostkę odległości.

Na wielkość oddziaływania transportu na środowisko wpływa również stopień wykorzystania ładowności pojazdu, określany jako współczynnik załadowania. Emisje gazów cieplarnianych przypadające na jednostkę przewożonego ładunku maleją wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia przestrzeni ładunkowej. W przypadku częściowego załadunku emisje przeliczone na tonę przewożonego towaru są stosunkowo wyższe.

Dane Europejskiej Agencji Środowiska (2022) wskazują, że w latach 2008–2019 średnia masa ładunku przypadająca na kilometr przebiegu pojazdów ciężarowych w Europie wzrosła z 11,0 t do 11,5 t, natomiast udział przejazdów realizowanych z ładunkiem zwiększył się z 77,7% do 80% (Raport EEA 2022). Tendencje te świadczą o poprawie efektywności wykorzystania floty transportowej, co w konsekwencji przekłada się na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych w przeliczeniu na jednostkę masy transportowanego ładunku.

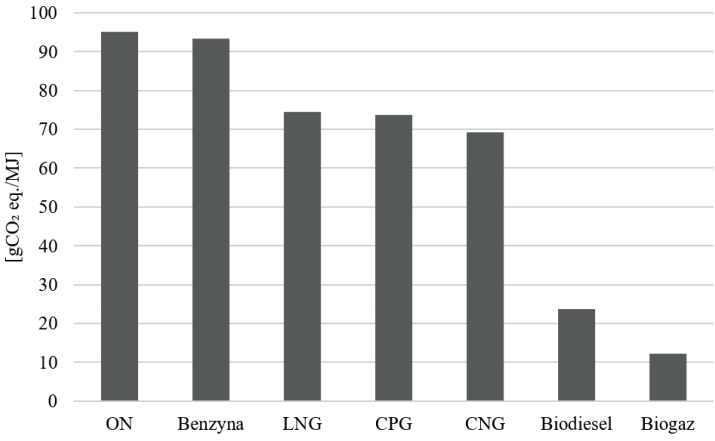
W Unii Europejskiej emisje z transportu drogowego regulowane są przez tzw. normy Euro, które definiują dopuszczalne poziomy emisji zanieczyszczeń powietrza dla nowych pojazdów silnikowych. Normy te sukcesywnie aktualizowane są od początku lat 90. XX wieku, a każda kolejna wersja wprowadza coraz bardziej rygorystyczne limity emisji. W przypadku transportu budowlanego, obejmującego m.in. samochody ciężarowe i dostawcze, obecnie obowiązującym standardem jest norma Euro VI, która weszła w życie w 2014 r. Wprowadzenie tego standardu wiązało się z istotnym zaostrzeniem dopuszczalnych poziomów emisji, szczególnie w odniesieniu do tlenków azotu (NO_x) i cząstek stałych (PM). Procentowe zmiany wartości granicznych emisji w kolejnych generacjach norm Euro, wprowadzanych na przestrzeni lat, przedstawiono na rysunku 4.8.



Rys. 4.8. Zmiany emisji spalin względem pojazdów konwencjonalnych (*conventional*) dla samochodów ciężarowych z silnikiem Diesla >32 t, w zależności od normy Euro

W celu kompleksowej oceny wpływu paliw transportowych na środowisko stosuje się podejście *well-to-wheel* (WTW), czyli „od źródła do koła". Metodologia ta obejmuje pełen cykl życia paliwa – od jego pozyskania lub produkcji (etap *well-to-tank*, WTT), przez proces dystrybucji, aż po końcowe wykorzystanie w pojeździe (etap *tank-to-wheel*, TTW) (The Joint Research Centre: EU Science Hub 2016). Rodzaj stosowanego paliwa odgrywa istotną rolę w kształtowaniu poziomu emisji generowanych przez transport. W sektorze transportu materiałów budowlanych nadal dominują paliwa kopalne, w szczególności olej napędowy i benzyna, które stanowią główne źródło emisji oraz substancji szkodliwych dla jakości powietrza. Według danych za 2019 r. najczęściej wykorzystywanym paliwem w transporcie drogowym w Unii Europejskiej był olej napędowy, którego udział wynosił 66,8%, podczas gdy benzyna stanowiła 24,3% (Raport EEA 2022). Udział paliw alternatywnych, takich jak LPG, gaz ziemny oraz biopaliwa, pozostawał niewielki i wynosił łącznie około 9%.

Najwyższe emisje gazów cieplarnianych w przeliczeniu na jednostkę energii dotyczą paliw kopalnych, w szczególności oleju napędowego i benzyny (rys. 4.9). Inne paliwa, takie jak LPG, CPG, CNG, charakteryzują się nieco niższym poziomem emisji, natomiast zdecydowanie najniższe wartości notuje się w przypadku biopaliw. Zwiększenie wykorzystania paliw odnawialnych i niskoemisyjnych w transporcie może przyczynić się do ograniczenia jego negatywnego wpływu na środowisko. Warto zauważyć, że rozwijają się także inne technologie niskoemisyjne, takie jak napędy elektryczne czy wodorowe, jednak ich zastosowanie w transporcie wysokotonażowym materiałów budowlanych jest obecnie ograniczone ze względu na bariery technologiczne i infrastrukturalne.



Rys. 4.9. Ślad węglowy dla różnych rodzajów paliwa
(opracowanie własne na podstawie Vourliotakis i Platsakis 2023)

W Europie obliczanie emisji z transportu drogowego odbywa się zgodnie z wytycznymi zawartymi w dokumencie EMEP/EEA (Ntziachristos i Samaras 2023; Winther i Dore 2023). Przewodnik ten zawiera metodologie obliczeń wraz ze współczynnikami emisji zależnymi m.in. od typu pojazdu, klasy silnika czy rodzaju paliwa. Aktualne wersje przewodnika obejmują zarówno podejścia uproszczone (Tier 1), jak i bardziej szczegółowe modele (Tier 2 i Tier 3).

4.2.5. Praca maszyn budowlanych

Praca maszyn budowlanych stanowi kolejny element oceny środowiskowej procesu budowlanego w kontekście analizy cyklu życia (LCA). Emisje z pracy sprzętu związane są przede wszystkim z rodzajem zastosowanego napędu (najczęściej spalinowego – diesel), klasą emisji danego silnika oraz wydajnością pracy urządzeń. Znaczenie tego etapu rośnie szczególnie w projektach infrastrukturalnych oraz podczas intensywnych robót ziemnych, gdzie dominujące jest wykorzystanie ciężkiego sprzętu. Maszyny budowlane odpowiadają za około 25% emisji gazów cieplarnianych w sektorze pojazdy i maszyny nieporuszających się po drogach (NRMM), co przekłada się na około 0,5% całkowitych emisji gazów cieplarnianych w UE (Raport ERA/CNG 2019).

W Unii Europejskiej emisje spalin z maszyn budowlanych regulowane są przez tzw. normy emisji Stage, które określają dopuszczalne poziomy zanieczyszczeń, takie jak tlenki azotu (NO_x), cząstki stałe (PM), tlenek węgla (CO) oraz węglowodory (HC). Obowiązująca od 2019 r. norma Stage V znacząco zaostrzyła limity emisji dla wszystkich klas mocy silników, a ponadto objęła regulacjami również jednostki napędowe o małej (poniżej 19 kW) i bardzo dużej mocy (powyżej 560 kW), które wcześniej podlegały mniej restrykcyjnym wymogom. Wprowadzenie normy Stage V wiąże się z koniecznością stosowania zaawansowanych technologii ograniczających emisje spalin, w tym filtrów cząstek stałych (DPF) oraz układów selektywnej redukcji katalitycznej (SCR).

W celu standaryzacji obliczeń emisji ze sprzętu NRMM w Europie stosuje się wytyczne zawarte w dokumencie EMEP/EEA (Winther i Dore 2023). Przewodnik ten, analogicznie jak w przypadku transportu, zawiera metodyki dla różnych poziomów szczegółowości (Tier 1–3). Uwzględniono w nim m.in. kategorie sprzętu, klasy mocy silnika, typy paliwa oraz normy emisji (Stage I–V).

4.3. Jednostkowa ocena środowiskowa wybranych mieszanek betonowych i stali zbrojeniowej

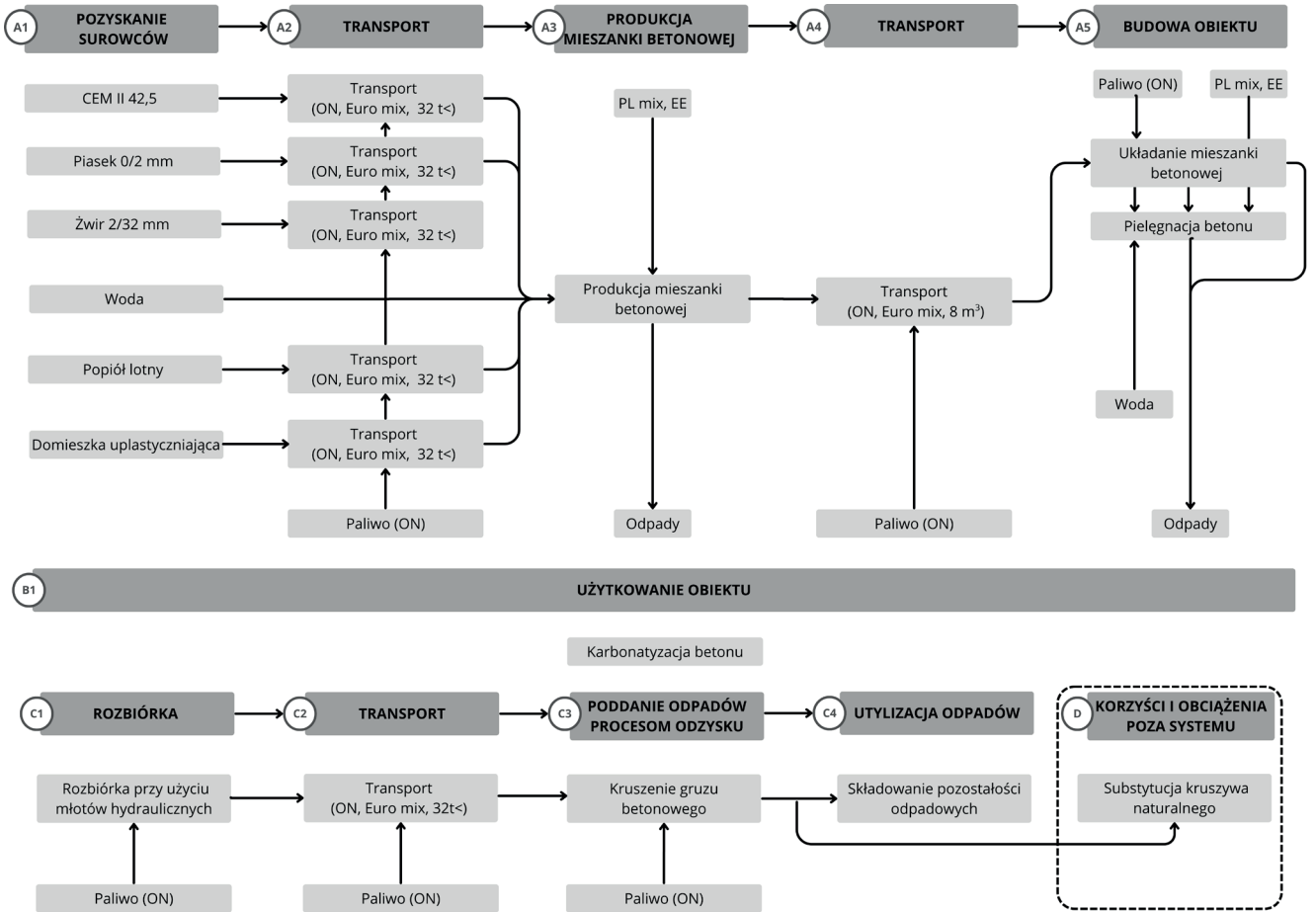
4.3.1. Opis zastosowanego modelu środowiskowego

Ocena środowiskowa została przeprowadzona dla 16 rodzajów mieszanek betonowych (opisanych w podrozdziale 3.4) oraz dla stali zbrojeniowej. Analizę wykonano z wykorzystaniem oprogramowania Sphera LCA, zgodnie z podejściem LCA oraz normami PN-EN 15978:2012, PN-EN 15804+A2:2020 i PN-EN 16757:2023. Przyjęto następujące założenia:

- zakres analizy – „od kołyski do grobu" z uwzględnieniem modułu D (moduły A1–A5, B1–B7, D);
- jednostka funkcjonalna – dla betonu: 1 m³, dla stali zbrojeniowej: 1 tona.

Model środowiskowy dla betonu

Poglądowy model środowiskowy jednej z analizowanych mieszanek betonowych został przedstawiony na rysunku 4.10.



Rys. 4.10. Model cyklu życia betonu dla jednej z analizowanych mieszanek (M2)

W module A1 dane o materiałach wejściowych do produkcji betonu pozyskano z bazy LCA Database – Sphera (Sphera 2025) oraz z deklaracji środowiskowych typu III (EPD). W pierwszej kolejności wykorzystano dane europejskie, reprezentatywne dla warunków technologicznych i geograficznych typowych dla rynku europejskiego. Użycie danych uśrednionych ogranicza ryzyko zniekształcenia wyników LCA, mogącego wynikać z nadmiernego uwzględnienia specyfiki pojedynczej lokalizacji lub producenta. W sytuacjach, gdy brakowało reprezentatywnych danych europejskich dla danego składnika, korzystano z deklaracji EPD.

W tabeli 4.7 zestawiono źródła danych środowiskowych przypisane do głównych komponentów analizowanych mieszanek betonowych. Składniki te zagregowano do poziomu szczegółowości odpowiadającego strukturze dostępnych danych.

W przypadku kruszyw pochodzących z recyklingu wykorzystywanych w mieszankach betonowych nie przypisuje się im wpływów środowiskowych w module A1. Gruz budowlany traktuje się jako odpad w systemie, w którym został wygenerowany. Po przetworzeniu (przekruszeniu) traci status odpadu i może zostać zaklasyfikowany jako surowiec wtórny, możliwy do ponownego wykorzystania w innym systemie. W efekcie od momentu jego wprowadzenia do nowego cyklu życia, materiał ten uznawany jest za pozbawiony wcześniejszych obciążeń środowiskowych.

Tabela 4.7

Źródła danych wykorzystanych w analizie LCA

Składnik	Źródło
CEM I 32,5	LCA Database – Sphera
CEM I 42,5	LCA Database – Sphera
CEM I 52,5	LCA Database – Sphera
CEM II 42,5	LCA Database – Sphera
CEM II 52,5	LCA Database – Sphera
CEM III 32,5	LCA Database – Sphera
CEM III 42,5	LCA Database – Sphera
CEM III 52,5	LCA Database – Sphera
woda	LCA Database – Sphera
piasek 0/2	LCA Database – Sphera
żwir 2/32	LCA Database – Sphera
kruszywo łamane	LCA Database – Sphera
domieszki uplastyczniające (plastyfikator/superplastyfikator)	EPD
domieszki reologiczne	EPD
domieszki redukujące wodę	EPD
popiół lotny	EPD
mikrokrzemionka	EPD

Moduł A2 obejmuje transport wszystkich surowców i materiałów pomocniczych z miejsc ich pozyskania do zakładu produkcji betonu. W analizie zastosowano model transportowy dostępny w bazie LCA Database – Sphera. Modele transportowe uwzględniają wiele parametrów, takich jak dystans (km), rodzaj paliwa, ładowność czy stopień obciążenia ładunkiem. Transport materiałów modelowano przy użyciu typowego samochodu ciężarowego typu EURO MIX o ładowności powyżej 32 t, zgodnie z wytycznymi zawartymi w Zaleceniach Komisji (UE) 2021/2279 z dnia 15 grudnia 2021 r. (Zalecenie Komisji UE 2021/2279 z dnia 15 grudnia 2021 r.). Uwzględniono zarówno przejazd z ładunkiem do zakładu, jak i powrót bez ładunku. Przyjęto, że paliwem wykorzystywanym w transporcie jest olej napędowy. W podstawowym modelu dla wszystkich składników przyjęto wartość referencyjną odległości transportowej, 130 km transportu drogowego, zgodnie z Zaleceniami Komisji Europejskiej, jako uśredniony dystans dla dostaw produktów od producenta do zakładu.

Moduł A3 obejmuje etap produkcji betonu w zakładzie betoniarskim. Dane środowiskowe do analizy zaczerpnięto z publikacji Heravi, Nafisi et al. (2016), w której przedstawiono jednostkowe nakłady energetyczne wymagane do realizacji podstawowych operacji technologicznych podczas wytwarzania mieszanki betonowej. Według tej publikacji całkowite zużycie energii potrzebne do wyprodukowania 1 m³ betonu wynosi 0,106 GJ. Wartość ta obejmuje: transport kruszywa i cementu wewnątrz zakładu, mieszanie kruszywa, cementu i wody w węźle betoniarskim, załadunek gotowej mieszanki do betonowozu. Do obliczenia wpływów związanych ze zużyciem energii zastosowano miks energetyczny Polski z 2021 r.

Moduł A4 obejmuje transport gotowej mieszanki betonowej z zakładu produkcyjnego na plac budowy. W analizie środowiskowej wykorzystano model transportowy oparty na danych z bazy Sphera LCA. Do transportu mieszanki betonowej przyjęto model pojazdu EURO MIX o maksymalnej ładowności odpowiadającej typowemu przewozowi ~8 m³ mieszanki. Przyjęta odległość transportu wynosiła 20 km.

Moduł A5 obejmuje etap wbudowania mieszanki betonowej na placu budowy. Dane dotyczące procesów takich jak rozładunek i rozprowadzenie betonu, zużycie wody do pielęgnacji, czyszczenie betonowozu oraz pompy do betonu przyjęto na podstawie dostępnych źródeł, głównie deklaracji środowiskowych (EPD) z uśrednionymi wartościami. Dla mieszanek wymagających zagęszczania uwzględniono także ten proces. W analizie przyjęto następujące jednostkowe zapotrzebowanie na zasoby dla 1 m³ mieszanki betonowej:

– olej napędowy: 1,667 l/m³,
– energia elektryczna: 3 kWh/m³,
– woda: 669 l/m³.

W ramach modułów A1–A5 globalnie uwzględniono straty materiałowe na poziomie 5%.

Karbonatyzację w module B1 oszacowano metodą uproszczoną, zgodnie ze wzorem:

$$CO_2 = U_{tcc} \cdot 0{,}15 \tag{4.4}$$

W zależności od rodzaju zastosowanego cementu przyjęto następujące wskaźniki absorpcji CO_2:

– CEM I – 0,07 kg CO_2/kg cementu,
– CEM II – 0,06 kg CO_2/kg cementu,
– CEM III – 0,02 kg CO_2/kg cementu.

Na podstawie zawartości cementu i klinkieru w mieszance określono wartość pochłaniania CO_2 w wyniku karbonatyzacji, w przeliczeniu na 1 m³ betonu. Obliczenia wykonano indywidualnie dla każdej analizowanej mieszanki.

W fazie C przyjęto scenariusz, w którym konstrukcja jest rozbierana na placu budowy, a następnie gruz betonowy trafia do dalszego przetworzenia poza terenem budowy w celu uzyskania kruszywa wtórnego. Straty materiałowe określono na poziomie 5%.

W ramach modułu C1 uwzględniono proces wyburzania konstrukcji żelbetowej z wykorzystaniem młotów hydraulicznych. Oszacowanie zużycia paliwa oraz związanych z nim emisji zanieczyszczeń oparto na dostępnych danych literaturowych (Sagan 2018). Przyjęto, że zapotrzebowanie na energię oraz efektywność rozbiórki zależą od klasy wytrzymałości betonu, dlatego analizowany materiał podzielono na trzy grupy: C30/37, C50/60 oraz C80/95. Wydajność rozbiórki (h/m³) maleje wraz ze wzrostem klasy wytrzymałości betonu, co wynika z jego rosnącej gęstości i odporności na oddziaływania mechaniczne. Skutkuje to wyższym jednostkowym zużyciem paliwa oraz większymi emisjami środowiskowymi w trakcie rozbiórki obiektów wykonanych z betonów wysokiej klasy wytrzymałościowej.

Wydajność techniczną W_{th} (m³/h) dla młotów hydraulicznych uzależniono od grubości elementu poddawanego rozbiórce (x) oraz klasy betonu, zgodnie ze wzorami:

C80/95 $$W_{th}(x) = 8 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 0{,}0135 \cdot x^2 + 0{,}589 \cdot x + 1{,}3862 \tag{4.5}$$

C50/60 $$W_{th}(x) = 2 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 0{,}0069 \cdot x^2 + 0{,}5829 \cdot x + 6{,}258 \tag{4.6}$$

C30/37 $$W_{th}(x) = -1 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 0{,}0032 \cdot x^2 + 0{,}5977 \cdot x + 7{,}3226 \tag{4.7}$$

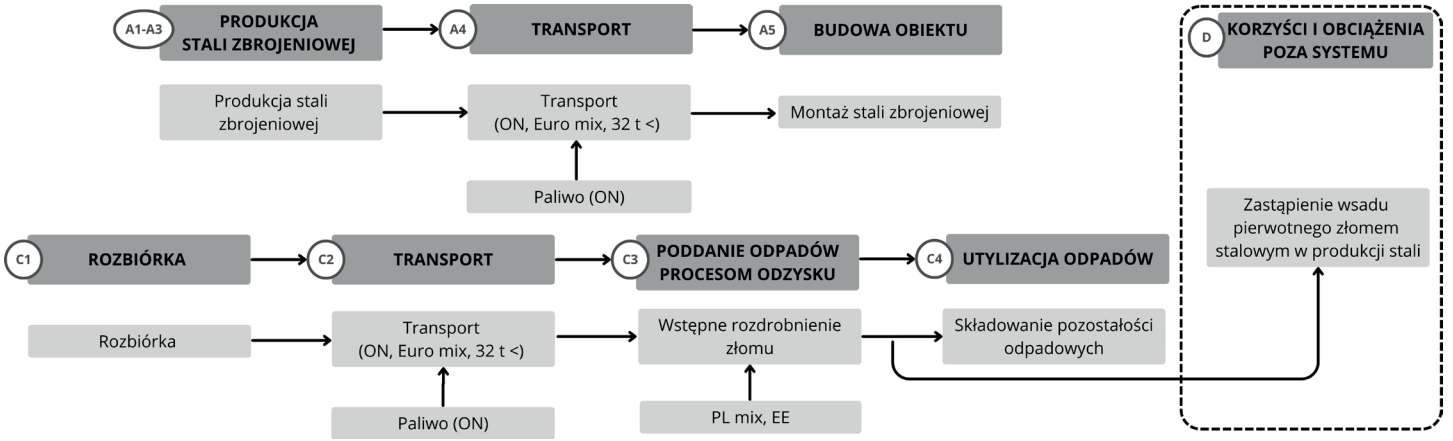
Wydajność techniczna została następnie skorygowana przy użyciu współczynnika uwzględniającego rzeczywiste warunki pracy na placu budowy, co pozwoliło uzyskać wydajność eksploatacyjną. Na tej podstawie określono czas pracy maszyn, niezbędny do wykonania założonego zakresu robót.

Na podstawie uzyskanego czasu pracy oraz parametrów eksploatacyjnych obliczono emisje poszczególnych zanieczyszczeń (wzór (4.8)), stosując model Tier 3 na podstawie EMEP/EEA (Winther i Dore 2023), rekomendowany do szacowania emisji dla maszyn poza ruchem drogowym (NRMM).

$$E = N \cdot HRS \cdot P \cdot (1 + DFA) \cdot LFA \cdot EF_{Base} \tag{4.8}$$

gdzie:

- E – całkowita masa emisji zanieczyszczenia danego zanieczyszczenia w okresie inwentaryzacyjnym [g],
- N – liczba jednostek (np. silników/maszyn),
- HRS – roczna liczba godzin pracy [h],
- P – moc silnika [kW],
- DFA – współczynnik korekcyjny zużycia (uwzględnia pogorszenie emisji w czasie),
- LFA – współczynnik obciążenia (określa, z jakim obciążeniem przeciętnie pracuje maszyna),
- EF_{Base} – bazowy wskaźnik emisji zależny od technologii i rodzaju zanieczyszczenia [g/kWh].



Rys. 4.11. Model cyklu życia stali zbrojeniowej

Gęstość nasypową gruzu określono na podstawie literatury i przyjęto następująco: dla klasy C30/37 – 1,7 t/m^3, C50/60 – 1,8 t/m^3 oraz C80/95 – 1,9 t/m^3 (Sagan 2018).

Założono transport odpadów rozbiórkowych na odległość 50 km, przy wykorzystaniu środka transportowego zgodnego z modelem EURO MIX o ładowności powyżej 32 t (analogicznie jak w przypadku modelu A2). W module C3 przyjęto mechaniczne kruszenie odpadów betonowych w stacjonarnych kruszarkach, przy czym zapotrzebowanie energetyczne określono na podstawie danych literaturowych (Estévez et al. 2003). Wydajność kruszenia zróżnicowano malejąco wraz ze wzrostem klasy betonu. W module C4 założono, że 5% masy odpadów trafia na składowisko.

Model środowiskowy dla stali zbrojeniowej

Model cyklu życia dla stali zbrojeniowej przedstawiono na rysunku 4.11.

Dane środowiskowe dla modułu A1–A3 stali zbrojeniowej przyjęto jako wartość reprezentatywną dla Europy na podstawie bazy danych Sphera LCA. W przypadku transportu stali zbrojeniowej zastosowano analogiczne założenia jak dla pozostałych surowców – wykorzystano samochód ciężarowy EURO MIX o ładowności powyżej 32 t, a odległość transportową określono na 130 km. Proces budowy (moduł A5) nie wymaga istotnych nakładów związanych z przygotowaniem zbrojenia na placu budowy. Faza użytkowania (moduł B) nie obejmuje żadnych procesów mających wpływ na środowisko.

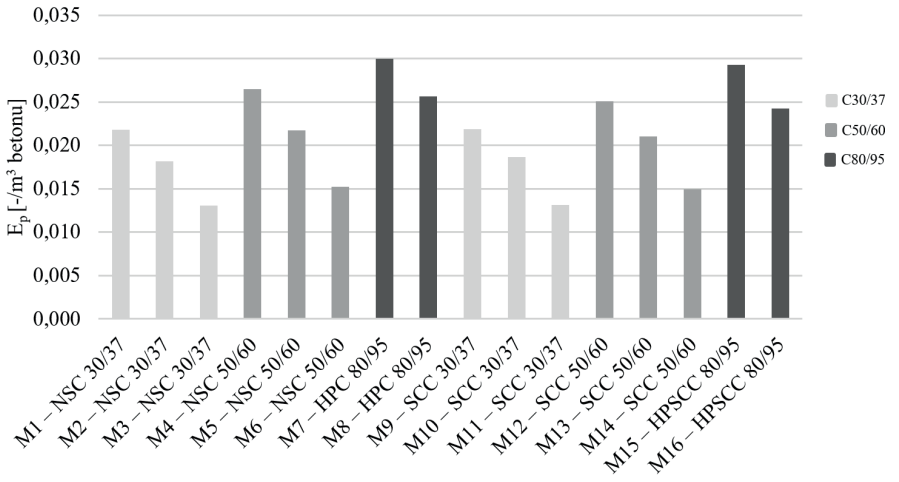
W fazie C konieczne jest oddzielenie stali od gruzu betonowego podczas rozbiórki konstrukcji. Założono wykorzystanie mechanicznych narzędzi rozbiórkowych (moduł C1), takich jak koparki z młotami hydraulicznymi. Zużycie paliwa oraz emisje z tego etapu przypisano do modelu betonu, natomiast wpływ stali zbrojeniowej na emisje uznano za pomijalny. W module C2 założono transport odzyskanej stali do zakładu przetwórczego (np. złomowiska lub huty) na odległość 100 km (Zalecenie Komisji UE 2021/2279 z dnia 15 grudnia 2021 r.). Pozostałe parametry transportu przyjęto analogicznie do modułu A4. W module C3 stal zbrojeniowa jest oddzielana magnetycznie z gruzu betonowego i kierowana do dalszego przetworzenia. Uwzględniono podstawowe operacje przygotowawcze, takie jak cięcie złomu – 6,8 kWh/t (Johnson et al. 2008). Straty materiałowe podczas całego procesu odzysku oszacowano na 5%, co oznacza, że 95% stali nadaje się do ponownego użycia w procesach hutniczych. W module C4 przyjęto, że pozostałe 5% materiału, którego nie uda się odzyskać, trafia na składowisko odpadów.

4.3.2. Analiza wpływu środowiskowego mieszanek betonowych

Na podstawie analizy 16 opracowanych mieszanek betonowych określono ich wpływ środowiskowy w cyklu życia (moduły A1–C4), z wyłączeniem modułu D znajdującego się poza granicami systemu oceny.

W dalszej analizie wykorzystano zagregowany wskaźnik Ecopoint (E_p), będący syntetycznym miernikiem całkowitego oddziaływania środowiskowego analizowanego materiału lub konstrukcji w całym cyklu życia. Wskaźnik E_p określono dla 1 m^3 betonu (rys. 4.12 i tab. 4.8).

Najniższe wskaźniki E_p odnotowano dla mieszanek M3 – NSC 30/37 oraz M11 – SCC 30/37, dla których wartość wyniosła 0,0131. Z kolei najwyższy wpływ środowiskowy stwierdzono w przypadku mieszanki M7 – HPC 80/95, dla której wartość E_p wyniosła 0,03.



Rys. 4.12. Wartości wskaźnika E_p dla poszczególnych mieszanek betonowych w cyklu życia

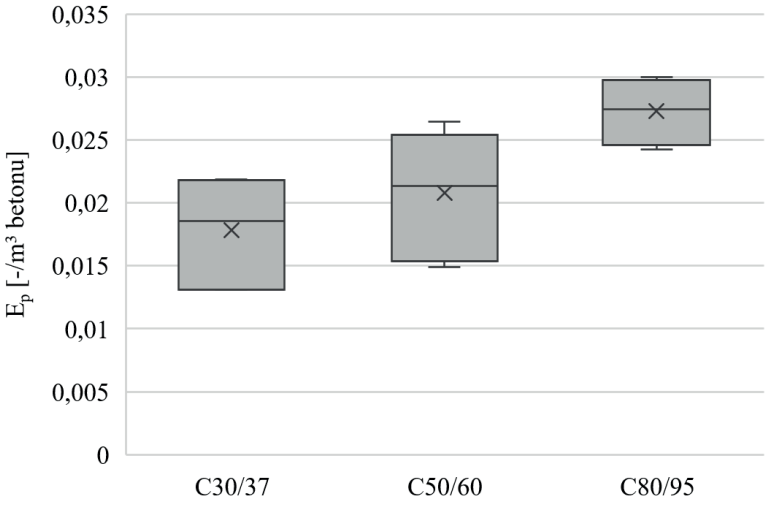
Wyniki potwierdzają ogólnie znaną tendencję wzrostu wartości E_p wraz ze wzrostem klasy betonu. Najniższe wartości E_p charakteryzują betony klasy C30/37, które wymagają mniej intensywnych procesów produkcyjnych, głównie ze względu na niższe zużycie cementu oraz dodatków chemicznych. Pośrednie wartości oddziaływania środowiskowego notuje się dla klasy C50/60, natomiast najwyższe wskaźniki E_p występują w betonach klasy C80/95. Wynika to bezpośrednio z bardziej wymagających receptur, konieczności stosowania większej ilości cementów wysokich klas oraz specjalistycznych domieszek chemicznych. Analiza porównawcza wyników dla mieszanek betonów tradycyjnych (NSC) i samozagęszczalnych (SCC) w obrębie tej samej klasy wytrzymałości nie wykazała jednoznacznej zależności. W niektórych przypadkach wartości wskaźnika E_p dla betonów SCC były wyższe niż dla ich konwencjonalnych odpowiedników, a w innych – niższe. Samo zastosowanie technologii SCC nie przesądza o wielkości wpływu środowiskowego, a ocena powinna być każdorazowo prowadzona indywidualnie.

Na rysunku 4.13 przedstawiono wykres ramka–wąsy obrazujący zakres zmienności wartości E_p w obrębie poszczególnych klas betonu, ilustrujący różnice wynikające ze stosowanych receptur mieszanek. Pomimo ogólnej prawidłowości wzrostu wskaźnika E_p wraz z klasą betonu, istotny jest również wyraźny rozrzut wartości E_p wewnątrz poszczególnych klas. Zjawisko to wskazuje na znaczny potencjał optymalizacji składu mieszanek betonowych ze względów środowiskowych. Średnie wartości E_p pomiędzy poszczególnymi klasami wytrzymałości są zróżnicowane, jednak w obrębie klas C30/37 i C50/60 i szeroki zakres wyników znajduje się na tym samym poziomie. Przykładowo, mieszanka M6 – NSC 50/60 wykazuje niższy wpływ środowiskowy niż mieszanki M1 i M2 – NSC 30/37, mimo że należy do wyższej klasy.

Tabela 4.8

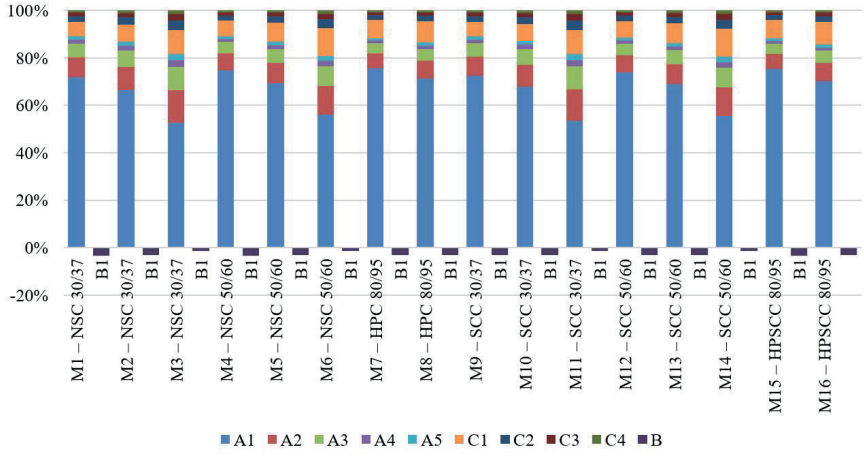
Wartości wskaźnika E_p dla poszczególnych mieszanek betonowych z podziałem na fazy cyklu życia

Rodzaj mieszanki betonowej	E_p całkowite	E_p w poszczególnych fazach cyklu życia									
		A1	A2	A3	A4	A5	B	C1	C2	C3	C4
M1 – NSC 30/37	$2{,}18 \cdot 10^{-2}$	$1{,}62 \cdot 10^{-2}$	$1{,}86 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$	$3{,}42 \cdot 10^{-4}$	$-7{,}22 \cdot 10^{-4}$	$1{,}35 \cdot 10^{-3}$	$5{,}44 \cdot 10^{-4}$	$3{,}53 \cdot 10^{-4}$	$1{,}99 \cdot 10^{-4}$
M2 – NSC 30/37	$1{,}82 \cdot 10^{-2}$	$1{,}24 \cdot 10^{-2}$	$1{,}86 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$	$3{,}42 \cdot 10^{-4}$	$-5{,}52 \cdot 10^{-4}$	$1{,}35 \cdot 10^{-3}$	$5{,}44 \cdot 10^{-4}$	$3{,}53 \cdot 10^{-4}$	$1{,}99 \cdot 10^{-4}$
M3 – NSC 30/37	$1{,}31 \cdot 10^{-2}$	$6{,}99 \cdot 10^{-3}$	$1{,}85 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$	$3{,}42 \cdot 10^{-4}$	$-1{,}78 \cdot 10^{-4}$	$1{,}35 \cdot 10^{-3}$	$5{,}44 \cdot 10^{-4}$	$3{,}53 \cdot 10^{-4}$	$1{,}99 \cdot 10^{-4}$
M4 – NSC 50/60	$2{,}65 \cdot 10^{-2}$	$2{,}05 \cdot 10^{-2}$	$1{,}93 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$	$3{,}42 \cdot 10^{-4}$	$-8{,}78 \cdot 10^{-4}$	$1{,}79 \cdot 10^{-3}$	$5{,}76 \cdot 10^{-4}$	$3{,}74 \cdot 10^{-4}$	$2{,}11 \cdot 10^{-4}$
M5 – NSC 50/60	$2{,}17 \cdot 10^{-2}$	$1{,}55 \cdot 10^{-2}$	$1{,}93 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$	$3{,}42 \cdot 10^{-4}$	$-6{,}86 \cdot 10^{-4}$	$1{,}79 \cdot 10^{-3}$	$5{,}76 \cdot 10^{-4}$	$3{,}74 \cdot 10^{-4}$	$2{,}11 \cdot 10^{-4}$
M6 – NSC 50/60	$1{,}52 \cdot 10^{-2}$	$8{,}67 \cdot 10^{-3}$	$1{,}83 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$	$3{,}42 \cdot 10^{-4}$	$-2{,}23 \cdot 10^{-4}$	$1{,}79 \cdot 10^{-3}$	$5{,}76 \cdot 10^{-4}$	$3{,}74 \cdot 10^{-4}$	$2{,}11 \cdot 10^{-4}$
M7 – HPC 80/95	$3{,}00 \cdot 10^{-2}$	$2{,}34 \cdot 10^{-2}$	$1{,}99 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$	$3{,}42 \cdot 10^{-4}$	$-9{,}56 \cdot 10^{-4}$	$2{,}36 \cdot 10^{-3}$	$6{,}08 \cdot 10^{-4}$	$3{,}95 \cdot 10^{-4}$	$2{,}23 \cdot 10^{-4}$
M8 – HPC 80/95	$2{,}56 \cdot 10^{-2}$	$1{,}89 \cdot 10^{-2}$	$1{,}98 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$	$3{,}42 \cdot 10^{-4}$	$-7{,}86 \cdot 10^{-4}$	$2{,}36 \cdot 10^{-3}$	$6{,}08 \cdot 10^{-4}$	$3{,}95 \cdot 10^{-4}$	$2{,}23 \cdot 10^{-4}$
M9 – SCC 30/37	$2{,}19 \cdot 10^{-2}$	$1{,}64 \cdot 10^{-2}$	$1{,}77 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$	$3{,}29 \cdot 10^{-4}$	$-7{,}22 \cdot 10^{-4}$	$1{,}35 \cdot 10^{-3}$	$5{,}44 \cdot 10^{-4}$	$3{,}53 \cdot 10^{-4}$	$1{,}99 \cdot 10^{-4}$
M10 – SCC 30/37	$1{,}87 \cdot 10^{-2}$	$1{,}30 \cdot 10^{-2}$	$1{,}78 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$	$3{,}29 \cdot 10^{-4}$	$-5{,}86 \cdot 10^{-4}$	$1{,}35 \cdot 10^{-3}$	$5{,}44 \cdot 10^{-4}$	$3{,}53 \cdot 10^{-4}$	$1{,}99 \cdot 10^{-4}$
M11 – SCC 30/37	$1{,}31 \cdot 10^{-2}$	$7{,}11 \cdot 10^{-3}$	$1{,}76 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$	$3{,}29 \cdot 10^{-4}$	$-1{,}84 \cdot 10^{-4}$	$1{,}35 \cdot 10^{-3}$	$5{,}44 \cdot 10^{-4}$	$3{,}53 \cdot 10^{-4}$	$1{,}99 \cdot 10^{-4}$
M12 – SCC 50/60	$2{,}51 \cdot 10^{-2}$	$1{,}92 \cdot 10^{-2}$	$1{,}81 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$	$3{,}29 \cdot 10^{-4}$	$-8{,}20 \cdot 10^{-4}$	$1{,}79 \cdot 10^{-3}$	$5{,}76 \cdot 10^{-4}$	$3{,}74 \cdot 10^{-4}$	$2{,}11 \cdot 10^{-4}$
M13 – SCC 50/60	$2{,}10 \cdot 10^{-2}$	$1{,}50 \cdot 10^{-2}$	$1{,}81 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$	$3{,}29 \cdot 10^{-4}$	$-6{,}52 \cdot 10^{-4}$	$1{,}79 \cdot 10^{-3}$	$5{,}76 \cdot 10^{-4}$	$3{,}74 \cdot 10^{-4}$	$2{,}11 \cdot 10^{-4}$
M14 – SCC 50/60	$1{,}49 \cdot 10^{-2}$	$8{,}41 \cdot 10^{-3}$	$1{,}80 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$	$3{,}29 \cdot 10^{-4}$	$-2{,}06 \cdot 10^{-4}$	$1{,}79 \cdot 10^{-3}$	$5{,}76 \cdot 10^{-4}$	$3{,}74 \cdot 10^{-4}$	$2{,}11 \cdot 10^{-4}$
M15 – HPSCC 80/95	$2{,}92 \cdot 10^{-2}$	$2{,}27 \cdot 10^{-2}$	$1{,}93 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$	$3{,}29 \cdot 10^{-4}$	$-9{,}76 \cdot 10^{-4}$	$2{,}36 \cdot 10^{-3}$	$6{,}08 \cdot 10^{-4}$	$3{,}95 \cdot 10^{-4}$	$2{,}23 \cdot 10^{-4}$
M16 – HPSCC 80/95	$2{,}43 \cdot 10^{-2}$	$1{,}76 \cdot 10^{-2}$	$1{,}91 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$	$3{,}29 \cdot 10^{-4}$	$-7{,}70 \cdot 10^{-4}$	$2{,}36 \cdot 10^{-3}$	$6{,}08 \cdot 10^{-4}$	$3{,}95 \cdot 10^{-4}$	$2{,}23 \cdot 10^{-4}$



Rys. 4.13. Zmiana wartości wskaźnika E_p w poszczególnych klasach betonu

Na rysunku 4.14 przedstawiono procentowy udział poszczególnych faz cyklu życia mieszanki betonowej, obejmujących moduły A1–A5, B oraz C1–C4, w jej całkowitym wpływie środowiskowym. Głównym źródłem oddziaływań środowiskowych jest etap produkcji materiałów (moduły A1–A3), przy czym szczególnie istotny jest moduł A1 (pozyskiwanie surowców i produkcja podstawowych składników), którego udział w całkowitym bilansie środowiskowym mieści się zazwyczaj w przedziale 53–78%. Faza C odpowiada za 11–19% całkowitego wpływu środowiskowego. Choć udział ten jest zauważalny, pozostaje znacząco niższy w porównaniu z wpływem generowanym w fazie A.

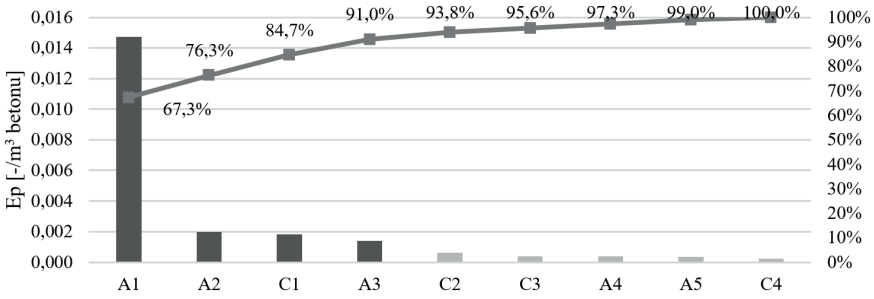


Rys. 4.14. Udział poszczególnych modułów cyklu życia w wartości E_p

Charakterystycznym elementem cyklu życia betonu jest obecność ujemnego oddziaływania w module B1, wynikającego z procesu karbonatyzacji. W analizie przyjęto podejście uproszczone, umożliwiające oszacowanie ilości pochłoniętego CO_2 w odniesieniu do masy cementu w mieszance betonowej. Choć efekt ten ma charakter ujemny (tj. redukuje całkowity ślad środowiskowy betonu), jego udział w ogólnym bilansie jest niewielki w porównaniu z wpływami generowanymi w innych fazach i wynosi średnio 2,7%. Karbonatyzacja jest zatem procesem korzystnym z punktu widzenia równowagi emisji, jednak jej znaczenie jest zbyt małe, aby w istotny sposób zmienić końcowy wynik oceny środowiskowej. Bilans ten pozostaje zdominowany przez wysokie zużycie surowców oraz emisje związane z ich produkcją.

W celu wyodrębnienia kluczowych etapów cyklu życia przeprowadzono analizę istotności opartą na średnich wartościach wskaźnika E_p, obliczonych dla analizowanych mieszanek betonowych. Zgodnie z wytycznymi ISO 14044:2006 przyjęto, że istotne są moduły odpowiadające łącznie za co najmniej 90% skumulowanego wpływu środowiskowego. Takie podejście pozwala wskazać etapy, które powinny stanowić punkt wyjścia do dalszych analiz, działań optymalizacyjnych oraz oceny scenariuszy alternatywnych. Dopuszcza się stosowanie progów istotności, o ile są jasno określone i odpowiednio uzasadnione w dokumentacji (Laurent et al. 2020). Przyjęcie progu istotności na poziomie 90% jest uzasadnione w analizach, w których pozostałe moduły wykazują niski i porównywalny wpływ środowiskowy, a ich pominięcie nie prowadzi do zniekształcenia końcowych wyników.

Z przeprowadzonej analizy (rys. 4.15) wynika, że moduły A1, A2, C1 oraz A3 odpowiadają łącznie za 91% całkowitej wartości E_p. Kolejne moduły (C2, C3, A4, A5, C4) cechują się niskim, indywidualnym wpływem środowiskowym (poniżej 3%) oraz wykazują systematycznie malejące znaczenie. W związku z tym uznano je za nieistotne z punktu widzenia dalszych analiz i działań optymalizacyjnych. Moduł B1 nie został uwzględniony w analizie istotności, ponieważ jego wartość jest ujemna i nie spełnia kryterium znaczącego dodatniego wkładu środowiskowego. Uwzględnienie tej wartości mogłoby zaburzyć przejrzystość wykresu skumulowanego, którego celem jest wskazanie modułów o największym wpływie.

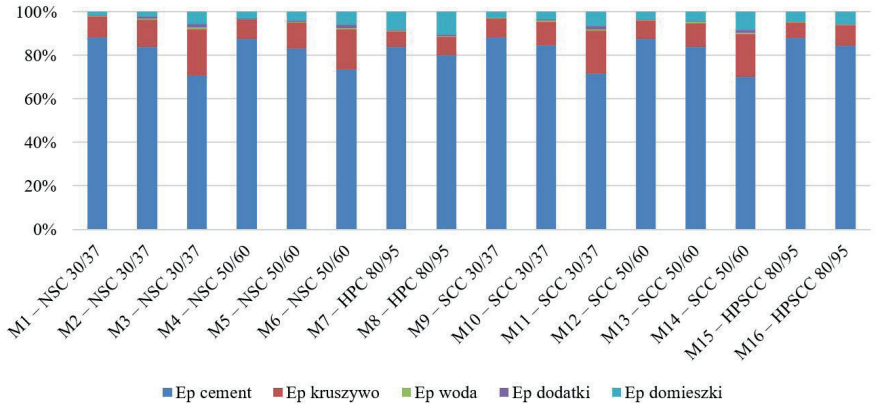


Rys. 4.15. Analiza istotności modułów cyklu życia (A1–C4) dla mieszanki betonowej

Dla modułów uznanych za istotne (A1–A3 oraz C1) przeprowadzono szczegółową analizę czynników wpływających na poziom ich oddziaływania środowiskowego.

Moduł A1 – wpływ składników betonu

Na rysunku 4.16 przedstawiono procentowy udział poszczególnych składników mieszanki betonowej w łącznej wartości wskaźnika E_p dla modułu A1.



Rys. 4.16. Udział składników mieszanek betonowych w wartości E_p w fazie A1

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że cement jest dominującym składnikiem kształtującym całkowity ślad środowiskowy mieszanki w tej fazie. Udział cementu w wartości E_p we wszystkich 16 mieszankach betonowych wynosi od ok. 70% do ponad 90%. Na drugim miejscu pod względem udziału w E_p znajdują się kruszywa, których wpływ mieści się w przedziale 5–20%. Choć kruszywa charakteryzują się jednostkowo niższym wpływem środowiskowym, ich duże zużycie w recepturze mieszanki przekłada się na zauważalny udział w wartości końcowego wskaźnika.

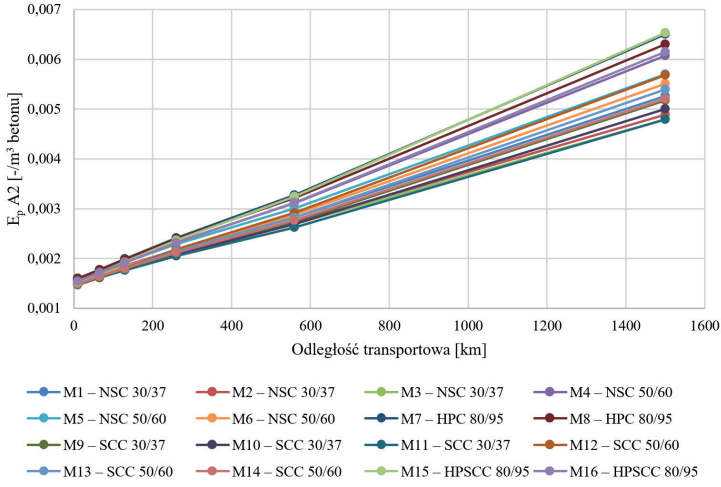
Pozostałe składniki, takie jak woda, dodatki mineralne oraz domieszki chemiczne, mają znacznie mniejszy udział w całkowitej wartości E_p. W większości mieszanek ich łączny udział nie przekracza 5%, choć w niektórych przypadkach, takich jak mieszanka 8 czy 14, udział domieszek jest nieco wyższy, m.in. ze względu na zastosowanie większych ilości domieszek chemicznych wynikające ze specyfiki betonu samozagęszczalnego (SCC). Dodatkowo większy udział innych składników może wynikać z zastosowania cementów o obniżonym śladzie środowiskowym, takich jak CEM III. W efekcie, choć wpływ pozostałych składników w ujęciu bezwzględnym niekoniecznie rośnie, ich udział procentowy w całkowitym E_p staje się większy.

Najistotniejszym elementem wpływającym na wartość E_p w fazie A1 jest cement. W związku z tym działania optymalizacyjne, mające na celu zmniejszenie całkowitego wpływu środowiskowego mieszanek betonowych, powinny koncentrować się przede wszystkim na ograniczeniu ilości cementu, jego częściowej zamianie na dodatki mineralne (np. popiół lotny czy żużel) lub zastosowaniu cementów o niższym śladzie środowiskowym (z większym udziałem dodatków mineralnych). Potencjał redukcji wpływu przez modyfikację pozostałych składników jest ograniczony ze względu na ich niewielki udział w całkowitej wartości E_p.

Moduł A2 – transport materiałów (cement + kruszywo)

W ramach modułu A2, obejmującego transport surowców do wytwórni, przeprowadzono ocenę wpływu długości trasy transportowej na całkowity wynik E_p. Analizę wykonano oddzielnie dla kruszywa i cementu, dwóch głównych składników o istotnym udziale masowym w mieszance betonowej (ok. 73% kruszywa i ok. 17% cementu). Zakres analizy ograniczono do zmiany odległości transportowej, przy założeniu niezmienionego środka transportu. Jako wartość referencyjną przyjęto dystans 130 km, natomiast w analizie uwzględniono dodatkowe scenariusze obejmujące odległości 10, 65, 260, 520 i 1500 km. Celem analizy było określenie odległości transportu wywierającej istotny wpływ na wartość E_p. Za istotną przyjęto wartość, w której zmiana odległości skutkuje zmianą E_p o co najmniej 5% względem wartości bazowej.

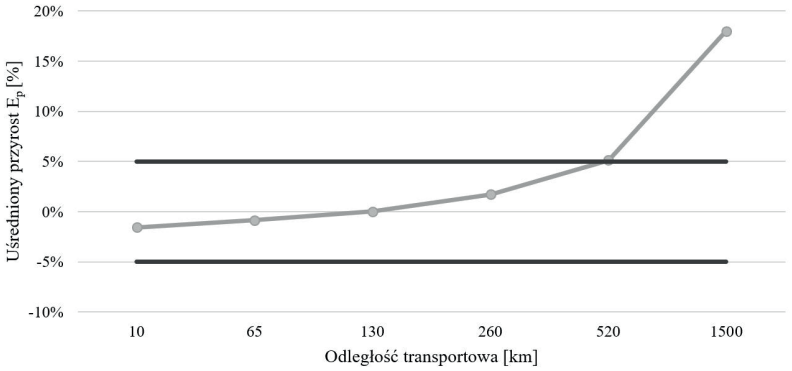
Na rysunku 4.17 przedstawiono wpływ zmiany odległości transportu cementu w module A2 na wartość E_p. Analizowana zależność ma charakter liniowy, co wskazuje na proporcjonalny wzrost jednostkowego wpływu środowiskowego wraz ze zwiększaniem odległości. W przypadku krótkich tras różnice pomiędzy mieszankami są niewielkie, a udział cementu w całkowitej wartości E_p pozostaje zbliżony. Wraz ze wzrostem odległości zauważalne stają się różnice wynikające z zawartości cementu w poszczególnych recepturach, a tym samym z transportowanej jego ilości.



Rys. 4.17. Wpływ odległości transportu cementu na wartość wskaźnika E_p (moduł A2) dla 16 mieszanek betonowych

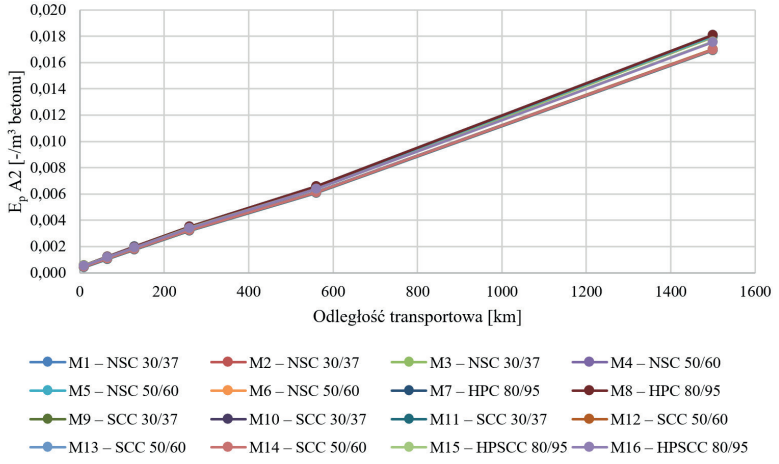
Na rysunku 4.18 przedstawiono uśredniony procentowy przyrost wskaźnika E_p w zależności od długości drogi transportu cementu, w odniesieniu do wartości bazowej (130 km). Wykres umożliwia identyfikację punktu, w którym wzrost odległości zaczyna istotnie wpływać na ogólny wynik środowiskowy. Z przeprowadzonej analizy wynika, że istotny wzrost (powyżej 5%) następuje dopiero przy odległościach transportu cementu przekraczających 520 km. Można zatem stwierdzić, że w warunkach regionalnych, typowych dla lokalnego zaopatrzenia w cement, wpływ transportu na całkowitą wartość E_p pozostaje ograniczony. W przypadku

projektów realizowanych z wykorzystaniem surowców transportowanych na duże odległości (np. z odległych regionów lub spoza kraju), wpływ ten może stać się znaczący. W takich sytuacjach zasadne jest przeprowadzenie analizy alternatywnych źródeł dostaw lub środków transportu jako elementu optymalizacji środowiskowej.



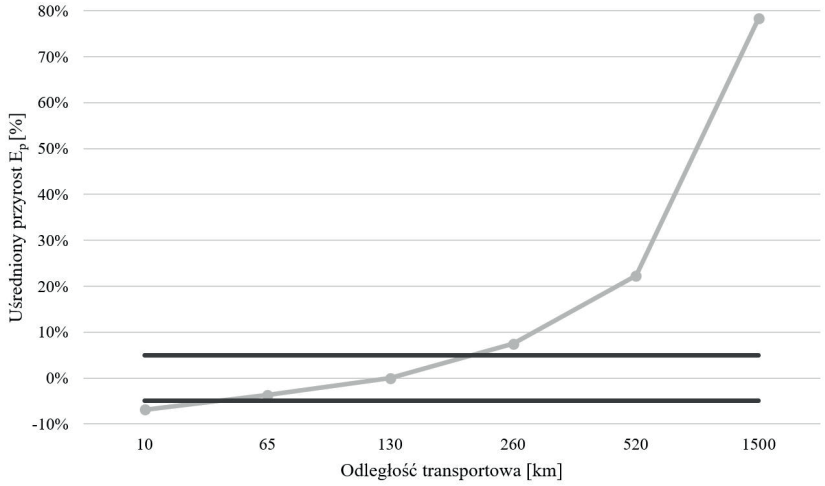
Rys. 4.18. Zmiana całkowitego E_p w zależności od długości transportu cementu, względem wartości bazowej (130 km)

Analogicznie przeprowadzono ocenę wpływu długości trasy transportu kruszywa na oddziaływanie środowiskowe mieszanek betonowych. Na rysunku 4.19 przedstawiono wartości E_p modułu A2 kruszywa w analizowanych mieszankach betonowych w funkcji długości trasy transportowej. Wszystkie przebiegi mają charakter liniowy. Rozbieżności pomiędzy poszczególnymi mieszankami są niewielkie, co odzwierciedla zbliżony udział kruszywa we wszystkich recepturach.



Rys. 4.19. Wpływ odległości transportu kruszywa na wartość wskaźnika E_p (moduł A2) dla 16 mieszanek betonowych

Rysunek 4.20 obrazuje uśredniony procentowy przyrost całkowitej wartości E_p względem wartości bazowej (130 km). Analiza wskazuje, że próg istotności (zdefiniowany jako zmiana ≥5% względem wartości referencyjnej) zostaje przekroczony przy odległości transportowej ok. 200 km. Jednocześnie obserwuje się wyraźny spadek wpływu środowiskowego w przypadku lokalizacji źródła surowca w odległości <40 km.



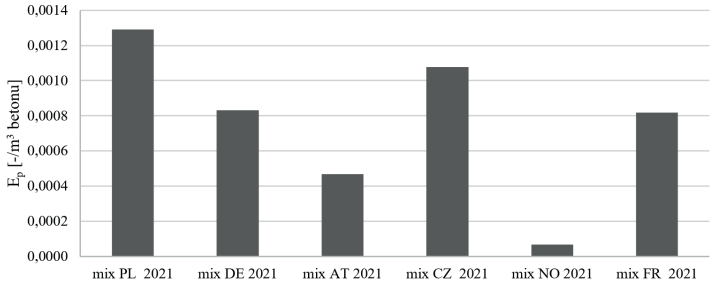
Rys. 4.20. Zmiana całkowitego E_p w zależności od długości transportu kruszywa, względem wartości bazowej (130 km)

W porównaniu z cementem transport kruszywa wywiera większy wpływ przy znacznych odległościach transportowych ze względu na jego duży udział masowy w mieszance betonowej. W praktyce oznacza to, że logistyka dostaw kruszywa ma większy potencjał do modyfikacji wyniku środowiskowego niż logistyka dostaw cementu, zwłaszcza w przypadku stosowania materiału pochodzącego z odległych lokalizacji.

Moduł A3 – miks energetyczny

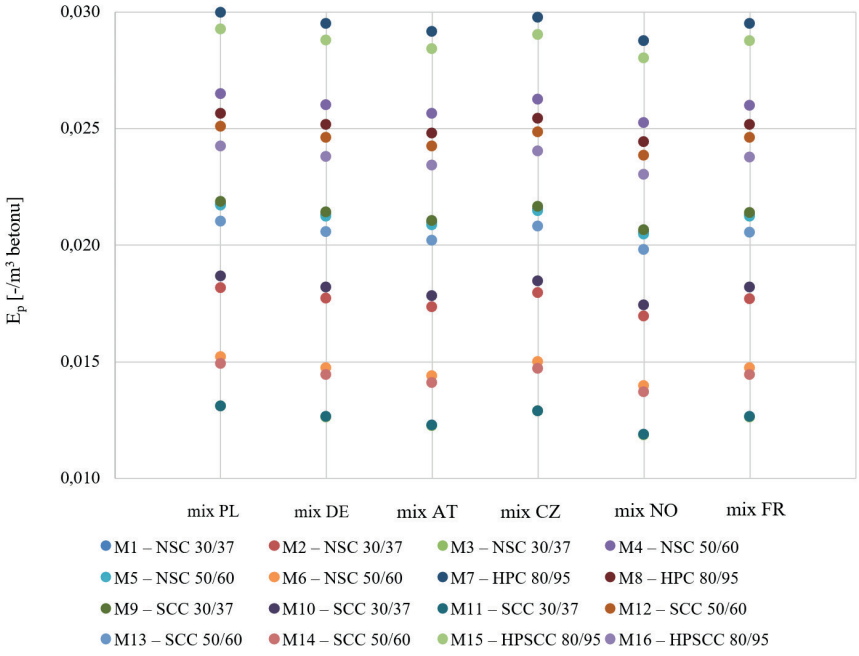
Aby ocenić znaczenie lokalnych miksów energetycznych w analizie środowiskowej betonu, przeprowadzono porównanie dla sześciu krajów europejskich: Polski, Niemiec, Austrii, Czech, Norwegii i Francji (stan na 2021 r.). Wybrane państwa reprezentują odmienne struktury wytwarzania energii – od miksów wysokoemisyjnych (opartych na węglu brunatnym lub kamiennym) po niemal całkowicie bazujące na OZE lub elektrowniach jądrowych. Jako punkt odniesienia w analizie przyjęto miks energetyczny Polski, charakteryzujący się najwyższą emisyjnością spośród analizowanych przypadków.

W pierwszym kroku analizowano wartość E_p przypisaną wyłącznie do modułu A3 (rys. 4.21). Wyniki wykazały wyraźne różnice między krajami. Najwyższą wartość E_p odnotowano w Polsce, gdzie dominuje produkcja energii z węgla. Z kolei najniższe wartości występują w Norwegii, korzystającej niemal wyłącznie z energetyki wodnej. Różnice między skrajnymi przypadkami przekraczają dziesięciokrotność.



Rys. 4.21. Wartość wskaźnika E_p w module A3 dla różnych miksów energetycznych

Choć różnice w module A3 są wyraźne, ich udział w całkowitej wartości E_p jest ograniczony (rys. 4.22). W zależności od zastosowanego miksu energetycznego zmiana całkowitej wartości E_p mieści się w przedziale od ok. 1% do 6% względem miksu referencyjnego (Polska). Oznacza to, że wpływ miksu staje się istotny jedynie w przypadku skrajnych różnic, takich jak w porównaniu Polski i Norwegii. W pozostałych przypadkach jego oddziaływanie ma charakter drugorzędny i nie wpływa istotnie na końcowy bilans środowiskowy analizowanych mieszanek betonowych.



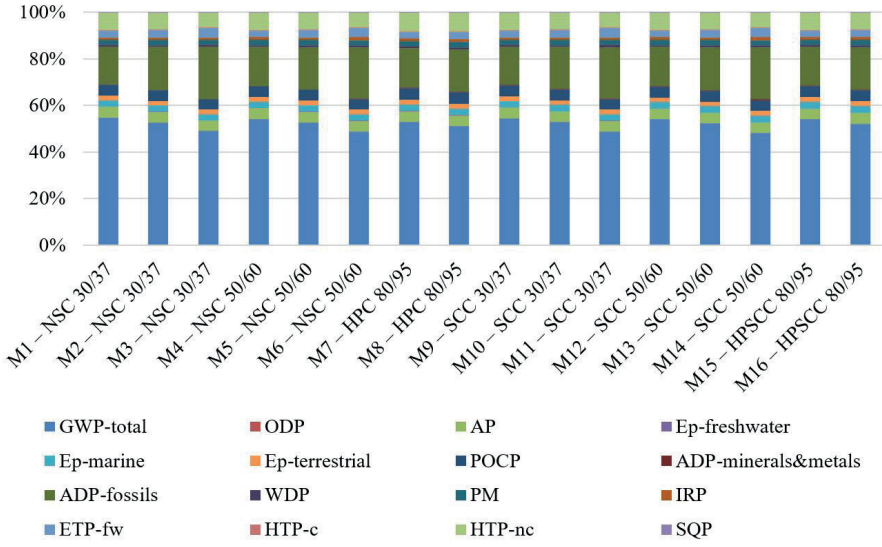
Rys. 4.22. Zmiana wartości całkowitej E_p w zależności od miksu energetycznego (2021) dla różnych betonów

Moduł C1 – rozbiórka

W analizie przyjęto, że rozbiórka konstrukcji żelbetowych realizowana jest z wykorzystaniem młotów hydraulicznych, co stanowi powszechnie stosowaną i reprezentatywną metodę w praktyce inżynierskiej. Metoda ta charakteryzuje się wysoką efektywnością przy demontażu konstrukcji wielkogabarytowych oraz umożliwia częściowy odzysk materiałów budowlanych. Alternatywne technologie rozbiórkowe, takie jak metoda ręczna czy stosowanie materiałów wybuchowych, są wykorzystywane rzadziej, głównie w specyficznych przypadkach, np. w obszarach gęstej zabudowy miejskiej, przy rozbiórce obiektów przemysłowych lub o szczególnej wartości historycznej.

W kontekście przedstawionej analizy wybór metody rozbiórki z użyciem młotów hydraulicznych uznano za uzasadniony ze względu na jej dominującą pozycję w typowych działaniach budowlanych oraz reprezentatywność w ocenie cyklu życia. Z tego względu nie przeprowadzono dodatkowej analizy fazy C1 w kontekście alternatywnych sposobów rozbiórki. Należy zauważyć, że wskaźniki środowiskowe w tej fazie, w tym wskaźnik E_p dla 1 m³ mieszanki betonowej, wykazują jedynie niewielkie różnice w odniesieniu do klasy betonu, co przedstawiono w tabeli 4.8.

Udział poszczególnych kategorii wpływu w całkowitej wartości E_p przedstawiono na rysunku 4.23.

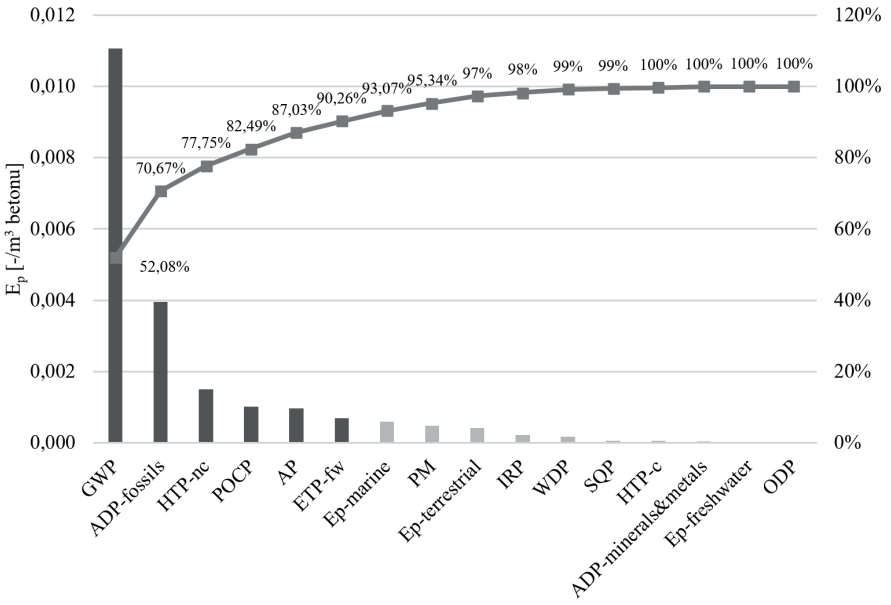


Rys. 4.23. Udział poszczególnych kategorii wpływu w całkowitej wartości E_p

Struktura udziałów poszczególnych kategorii jest podobna we wszystkich analizowanych mieszankach. Dominującą kategorią wpływu jest GWP-total (globalne ocieplenie, ślad węglowy), którego udział w E_p wynosi 48–55%. Znaczący jest również udział kategorii ADP-fossils (wyczerpywanie zasobów abiotycznych – paliwa kopalne), mieszczący się

w przedziale 16,4–22,4%. Kolejne kategorie o zauważalnym wpływie to HTP-nc (toksyczność dla ludzi – skutki rakotwórcze) z udziałem 6,1–8,0% oraz POCP (tworzenie ozonu fotochemicznego) z udziałem 4,5–4,9%. Dla kategorii AP (zakwaszenie) udział w całkowitym E_p wynosi 4,4–4,7%, natomiast dla ETP-fw (ekotoksyczność – wody słodkie) kształtuje się na poziomie 2,8–4,0%. Warto podkreślić, że dla kategorii HTP-nc i ETP-fw literatura wskazuje na dużą niepewność metodologiczną (PN-EN 15804+A2:2020). Pomimo zauważalnego udziału tych kategorii w ogólnym E_p ich interpretacja powinna być prowadzona z ostrożnością i, w miarę możliwości, wspierana dodatkowymi źródłami danych. Dlatego też kategorie te pominięto w dalszej analizie.

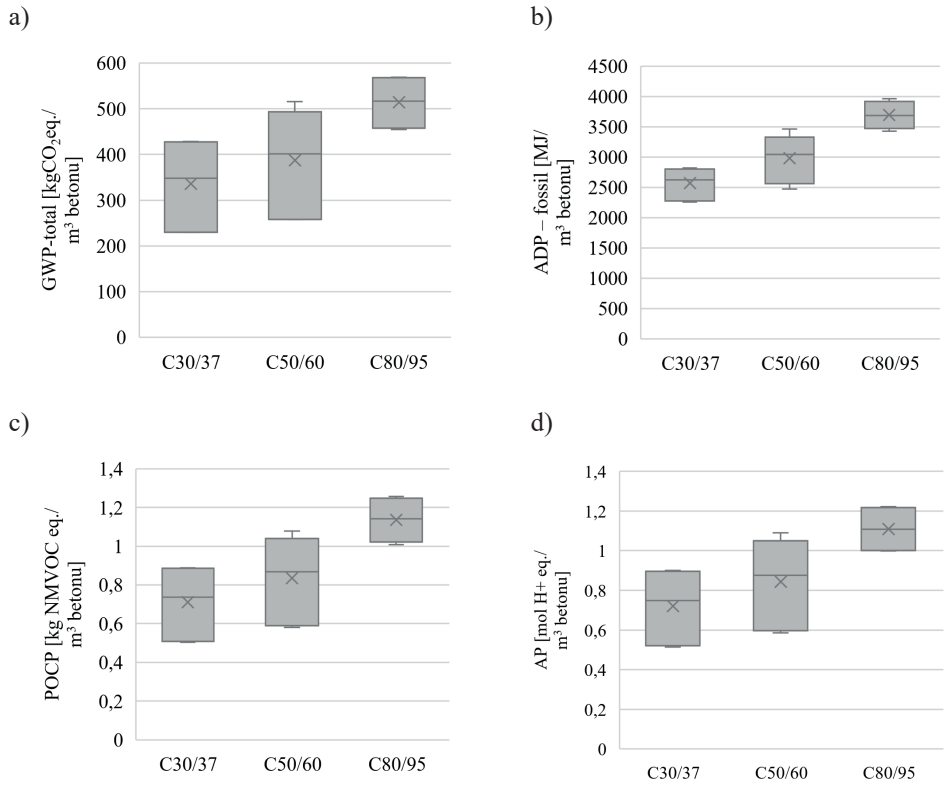
Analogicznie jak w przypadku analizy faz cyklu życia przeprowadzono ocenę istotności poszczególnych kategorii wpływu środowiskowego, przyjmując próg skumulowanego wpływu E_p na poziomie 90% (rys. 4.24). Z analizy wynika, że dominującymi kategoriami w analizowanym zakresie są GWP-total, ADP-fossils, HTP-nc, POCP, AP oraz ETP-fw.



Rys. 4.24. Analiza istotności kategorii wpływu dla betonu w średniej wartości E_p

W analizowanych kategoriach wpływu (rys. 4.25) obserwuje się ogólną tendencję wzrostu wartości poszczególnych wskaźników środowiskowych wraz ze wzrostem klasy wytrzymałości betonu. Zakresy wartości wielu wskaźników środowiskowych dla klas C30/37 i C50/60 w dużym stopniu się nakładają. Oznacza to, że niektóre mieszanki klasy C50/60 mogą charakteryzować się porównywalnym, a nawet niższym poziomem oddziaływania środowiskowego niż mieszanki klasy C30/37. Brak jednoznacznego rozdzielenia wartości między tymi klasami wskazuje na potencjał optymalizacji środowiskowej w obrębie danej klasy przez odpowiedni dobór surowców i dodatków. Analiza kategorii wpływu stanowi w tym

przypadku rozwinięcie wcześniejszej oceny skumulowanej wartości E_p, w której również zaobserwowano znaczną zmienność w klasie C50/60. W przypadku klasy C80/95 wartości wskaźników są wyraźnie wyższe i bardziej jednorodne, co sugeruje mniejsze możliwości redukcji oddziaływania. Zjawisko to potwierdza, że sam wzrost klasy wytrzymałości nie przesądza jednoznacznie o wyższym obciążeniu środowiskowym.



Rys. 4.25. Zmiana wartości w zależności od klasy betonu:
a) GWP-total; b) ADP-fossils; c) POCP; d) AP

4.3.3. Analiza wpływu środowiskowego stali zbrojeniowej

Przeprowadzono porównanie wpływu środowiskowego stali zbrojeniowej pochodzącej od różnych europejskich dostawców, uwzględniające zróżnicowany udział złomu stalowego w procesie produkcyjnym oraz krajowe uwarunkowania energetyczne. W przemyśle stalowym dominują dwie główne technologie (Hetmański et al. 2024; Raport WSA 2024):

1. Metoda wielkiego pieca i konwertora tlenowego (ang. *blast furnace–basic oxygen furnace*, BF–BOF), opierająca się głównie na rudzie żelaza oraz koksie jako nośniku energii

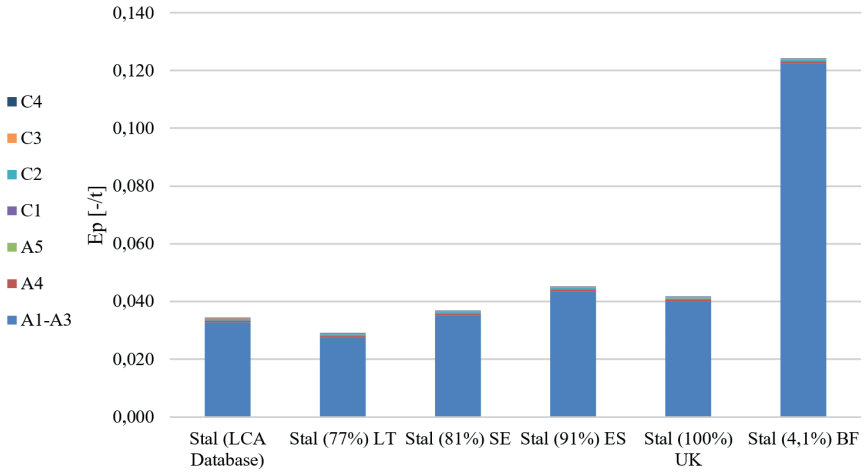
i reduktorze. Proces ten charakteryzuje się wysoką emisyjnością CO_2, ponieważ redukcja rudy żelaza zachodzi w warunkach wysokotemperaturowych przy wykorzystaniu węgla. Udział złomu stalowego w tej technologii jest ograniczony ze względu na wymagania procesowe.

2. Metoda z wykorzystaniem pieca łukowego (ang. *electric arc furnace*, EAF), bazująca niemal wyłącznie na recyklingu złomu stalowego. Charakteryzuje się ona znacznie niższym śladem węglowym w porównaniu z BF–BOF, jednak jej efektywność środowiskowa silnie zależy od struktury stosowanego miksu energetycznego.

Zgodnie z danymi World Steel Association (Raport WSA 2024) globalny udział stali produkowanej metodą BF–BOF wynosi 71,1%, natomiast udział stali z pieców łukowych (EAF) – 28,9%. Według danych dla Polski 49,8% stali produkowane jest metodą BF–BOF, co oznacza, że udział technologii EAF przekracza 50% (Bocian et al. 2024). Emisje CO_2 dla technologii BF–BOF wynoszą ok. 2,2 t CO_2 na tonę stali surowej (CS), podczas gdy dla technologii EAF, bazującej na złomie stalowym, emisje te są znacznie niższe – ok. 0,3 t CO_2/t CS (Su et al. 2022).

Choć brak szczegółowych statystyk dotyczących produkcji stali zbrojeniowej, przegląd dostępnych deklaracji środowiskowych typu EPD wskazuje, że dominującą technologią w tym segmencie jest EAF. Dostępne są jednak także deklaracje EPD stali zbrojeniowej oparte na produkcji w technologii BF–BOF.

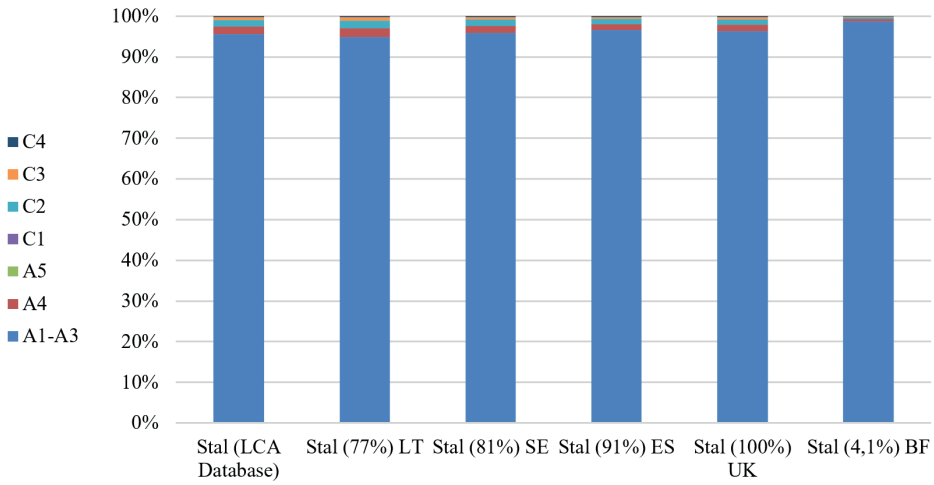
Na rysunku 4.26 przedstawiono wartość E_p dla stali zbrojeniowej w podziale na poszczególne moduły cyklu życia. Analizę przeprowadzono dla sześciu wariantów stali zbrojeniowej, różniących się lokalizacją zakładów produkcyjnych (odmienna struktura miksów energetycznych) oraz zawartością złomu (77–100%). Pięć pierwszych wariantów odnosi się do stali wyprodukowanej w piecu łukowym (EAF), natomiast szósty dotyczy stali zbrojeniowej wytwarzanej metodą BF–BOF.



Rys. 4.26. Wartość E_p dla stali zbrojeniowej

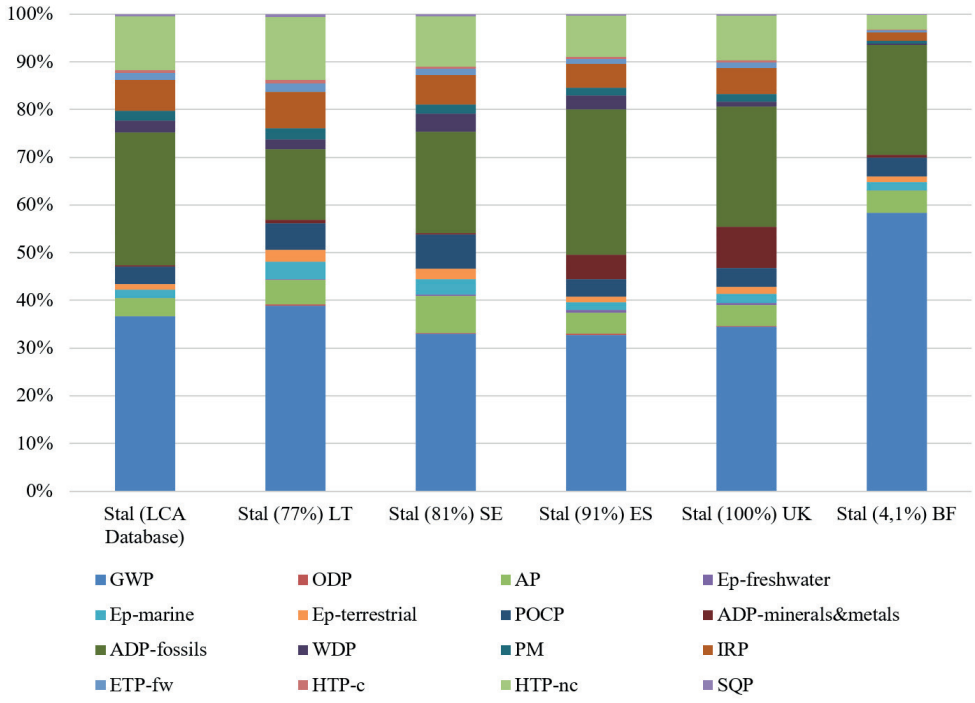
Jednym z kluczowych czynników różnicujących wpływ środowiskowy analizowanych wariantów jest technologia produkcji stali. Stal zbrojeniowa wytwarzana metodą BF–BOF charakteryzuje się niemal trzykrotnie wyższą wartością E_p w porównaniu z wariantami opartymi na metodzie EAF. Wśród analizowanych wariatów wytwarzanych metodą EAF wyniki wskazują, że większy udziału złomu nie zawsze przekłada się na niższą wartość E_p. Stal zbrojeniowa produkowana na Litwie (LT) wykazała najniższą wartość E_p, mimo najmniejszego udziału złomu stalowego w produkcji. Ostateczny wpływ środowiskowy stali zależy więc nie tylko od rodzaju wykorzystanych surowców, ale przede wszystkim od struktury miksu energetycznego danego zakładu produkcyjnego.

Analizując strukturę wpływu środowiskowego w podziale na poszczególne fazy cyklu życia (rys. 4.27), należy zauważyć, że moduły A1–A3 odpowiadają za zdecydowaną większość całkowitej wartości E_p – w analizowanych wariantach udział ten przekracza 95%. Pozostałe fazy cyklu życia (moduły A4–C4), obejmujące transport, montaż, użytkowanie i koniec życia produktu, mają znacznie mniejsze znaczenie środowiskowe, stanowiąc łącznie jedynie kilka procent wpływu.



Rys. 4.27. Udział poszczególnych faz cyklu życia w całkowitej wartości E_p stali zbrojeniowej

W analizowanych wariantach produkcji stali, mimo różnic technologicznych i lokalizacyjnych, obserwuje się podobną strukturę dominujących kategorii wpływu środowiskowego (rys. 4.28). Największy udział w całkowitej wartości E_p mają kategorie GWP-total (potencjał globalnego ocieplenia), stanowiący 33–58% całkowitego wpływu w zależności od wariantu, oraz ADP-fossils (zużycie zasobów abiotycznych – paliwa kopalne) z udziałem 14,8–30,4%. W dalszej kolejności udziały w całkowitej wartości E_p mają kategorie HTP-nc (toksyczność dla ludzi – skutki nierakotwórcze) mieszcząca się w przedziale 3,1–13,3%, IRP (potencjał promieniowania jonizującego) na poziomie 1,8–7,6% oraz ADP-minerals&metals (zużycie zasobów abiotycznych – minerały i metale) z udziałem 0,2–8,5%.



Rys. 4.28. Udział poszczególnych kategorii wpływu w całkowitej wartości E_p analizowanych wariantów stali zbrojeniowej

4.3.4. Zyski i straty poza systemowe

Moduł D obejmuje potencjalne korzyści środowiskowe osiągane po zakończeniu cyklu życia produktu, wynikające z jego ponownego wykorzystania, recyklingu lub odzysku energetycznego. W przypadku betonu dotyczy to przede wszystkim odzysku kruszywa z rozbiórki i jego ponownego zastosowania jako surowca wtórnego w innych procesach budowlanych.

Wartości w module D pokazują, jakiej produkcji surowców pierwotnych (np. kruszywa naturalnego) udało się uniknąć dzięki wykorzystaniu odzyskanego materiału. Uwzględnia się tu m.in. emisje i zużycie energii, które zostałyby wygenerowane przy wykorzystaniu materiałów pierwotnych.

W przypadku gdy w danej mieszance betonowej zastosowano już kruszywo z recyklingu, wartość w module D jest odpowiednio zredukowana, aby uniknąć podwójnego uwzględniania tych korzyści. Oznacza to, że korzyści są pomniejszane o tę część, która została już uwzględniona we wcześniejszej fazie cyklu życia produktu (w module A1). Wartości modułu D dla analizowanych betonów przedstawiono w tabeli 4.9. Uzyskane różnice w wartościach wskaźników środowiskowych betonów wynikają z ich odmiennego składu oraz zróżnicowanej gęstości nasypowej gruzu betonowego, zależnej od pierwotnej klasy betonu.

Tabela 4.9

Wartości wskaźników środowiskowych (zysków) w module D
dla betonów pochodzących z analizowanych mieszanek betonowych

	Rodzaj betonu				
Wskaźnik	**M1-M2 – NSC 30/37 M9-M11 – SCC 30/37**	**M3 – NSC 30/37**	**M4-M5 – NSC 50/60 M12-M14 – SCC 50/60**	**M6 – NSC 50/60**	**M7-M8 – HPC 80/95 M15-M16 – HPSCC 80/95**
GWP-total	−9,31	−6,88	−9,86	−8,03	$-1{,}04 \cdot 10^{1}$
ODP	$-1{,}04 \cdot 10^{-10}$	$-7{,}65 \cdot 10^{-11}$	$-6{,}49 \cdot 10^{-2}$	$-5{,}29 \cdot 10^{-2}$	$-6{,}85 \cdot 10^{-2}$
AP	$-2{,}91 \cdot 10^{-2}$	$-2{,}15 \cdot 10^{-2}$	$-1{,}10 \cdot 10^{-10}$	$-8{,}93 \cdot 10^{-11}$	$-1{,}16 \cdot 10^{-10}$
Ep-freshwater	$-2{,}21 \cdot 10^{-5}$	$-1{,}64 \cdot 10^{-5}$	$-3{,}08 \cdot 10^{-2}$	$-2{,}51 \cdot 10^{-2}$	$-3{,}25 \cdot 10^{-2}$
Ep-marine	$-1{,}09 \cdot 10^{-2}$	$-8{,}02 \cdot 10^{-3}$	$-2{,}34 \cdot 10^{-5}$	$-1{,}91 \cdot 10^{-5}$	$-2{,}48 \cdot 10^{-5}$
Ep-terrestrial	$-1{,}23 \cdot 10^{-1}$	$-9{,}12 \cdot 10^{-2}$	$-1{,}15 \cdot 10^{-2}$	$-9{,}37 \cdot 10^{-3}$	$-1{,}21 \cdot 10^{-2}$
POCP	$-2{,}52 \cdot 10^{-2}$	$-1{,}86 \cdot 10^{-2}$	$-1{,}31 \cdot 10^{-1}$	$-1{,}07 \cdot 10^{-1}$	$-1{,}38 \cdot 10^{-1}$
ADP-minerals &metals	$-1{,}29 \cdot 10^{-6}$	$-9{,}50 \cdot 10^{-7}$	$-2{,}67 \cdot 10^{-2}$	$-2{,}17 \cdot 10^{-2}$	$-2{,}82 \cdot 10^{-2}$
ADP-fossils	$-1{,}54 \cdot 10^{2}$	$-1{,}14 \cdot 10^{2}$	$-1{,}36 \cdot 10^{-6}$	$-1{,}11 \cdot 10^{-6}$	$-1{,}44 \cdot 10^{-6}$
WDP	−4,47	−3,30	$-1{,}63 \cdot 10^{2}$	$-1{,}33 \cdot 10^{2}$	$-1{,}72 \cdot 10^{2}$
PM	$-9{,}48 \cdot 10^{-7}$	$-7{,}00 \cdot 10^{-7}$	$-1{,}00 \cdot 10^{-6}$	$-8{,}17 \cdot 10^{-7}$	$-1{,}06 \cdot 10^{-6}$
IRP	−2,41	−1,78	−2,55	−2,08	−2,70
ETP-fw	$-9{,}18 \cdot 10^{1}$	$-6{,}78 \cdot 10^{1}$	$-9{,}72 \cdot 10^{1}$	$-7{,}92 \cdot 10^{1}$	$-1{,}03 \cdot 10^{2}$
HTP-c	$-2{,}50 \cdot 10^{-9}$	$-1{,}84 \cdot 10^{-9}$	$-2{,}64 \cdot 10^{-9}$	$-2{,}15 \cdot 10^{-9}$	$-2{,}79 \cdot 10^{-9}$
HTP-nc	$-8{,}86 \cdot 10^{-8}$	$-6{,}54 \cdot 10^{-8}$	$-9{,}38 \cdot 10^{-8}$	$-7{,}64 \cdot 10^{-8}$	$-9{,}90 \cdot 10^{-8}$
SQP	$-6{,}24 \cdot 10^{1}$	$-4{,}61 \cdot 10^{1}$	$-6{,}61 \cdot 10^{1}$	$-5{,}39 \cdot 10^{1}$	$-6{,}98 \cdot 10^{1}$

W przypadku stali moduł D uwzględnia potencjalne korzyści wynikające z jej wysokiej zdolności do recyklingu. Stal niemal w całości może zostać odzyskana po zakończeniu użytkowania wyrobu budowlanego, a następnie wykorzystana jako wsad do produkcji nowej stali w piecu elektrycznym (EAF). Należy jednak podkreślić, że ze względu na przyjęcie w analizie modelu produkcji stali w technologii EAF z wykorzystaniem 100% złomu, potencjalne korzyści wynikające z dalszego recyklingu zostały już w pełni uwzględnione w module A1. W związku z tym moduł D dla stali nie wykazuje dodatkowych korzyści środowiskowych.

5. Kryterium ekonomiczne w zrównoważonej ocenie konstrukcji żelbetowych

5.1. Analiza kosztów cyklu życia LCC obiektów budowlanych

Analiza kosztów cyklu życia (LCC) obiektów budowlanych jest złożonym i interdyscyplinarnym zagadnieniem – wymaga uwzględnienia wszystkich kosztów w całym wieloletnim cyklu istnienia obiektu, od fazy projektowania i realizacji, przez eksploatację i utrzymanie, aż po rozbiórkę (Bull 1993; Gluch i Baumann 2004). Dzięki temu możliwe jest porównywanie alternatywnych rozwiązań projektowych pod kątem ich długoterminowej opłacalności, co wspomaga podejmowanie racjonalnych decyzji inwestycyjnych (Sterner 2000). Złożoność problematyki analiz LCC wynika m.in. z konieczności prognozowania odległych w czasie nakładów i uwzględniania niepewności co do przyszłych warunków technicznych i ekonomicznych (Kośmieja i Dziadosz 2016; Krzemiński 2020). Literatura przedmiotu wskazuje, że faza eksploatacji budynku bywa najdłuższa i najbardziej kosztochłonna, co utrudnia pełną ocenę ekonomiczną inwestycji na etapie jej planowania (Grzyl et al. 2017; Zima et al. 2020; Plebankiewicz et al. 2022). Jednocześnie podkreśla się potrzebę integrowania LCC z analizą ryzyka – niepewność danych wejściowych i przyszłych warunków (np. długości życia elementów konstrukcyjnych i ich trwałości czy cen energii) stanowi bowiem istotną barierę szerszego stosowania tej metody (Fregonara et al. 2018). W odpowiedzi na te wyzwania opracowano podejścia uwzględniające m.in. analizę wrażliwości oraz modele probabilistyczne i rozmyte, które pozwalają ująć wpływ ryzyka na analizę kosztów w cyklu życia (Oduyemi et al. 2016; Plebankiewicz et al. 2016; 2020; Wieczorek et al. 2019).

Monolityczne konstrukcje żelbetowe stanowią podstawę wielu obiektów inżynieryjnych i kubaturowych. Dzięki jednolitej formie charakteryzują się wysoką sztywnością i trwałością, co czyni je atrakcyjnymi z punktu widzenia bezpieczeństwa i długowieczności (Renne et al. 2022). Pełna ocena takich konstrukcji powinna uwzględniać wszystkie aspekty – występujące od momentu projektowania aż po ewentualną rozbiórkę. W tym kontekście coraz większe znaczenie zyskuje analiza kosztów cyklu życia obiektu, która obejmuje koszty związane z obiektem budowlanym od etapu jego powstania, przez użytkowanie, aż do fazy końca życia (Reisinger et al. 2022; Dormohamadi et al. 2024). Celem takich analiz jest określenie łącznych kosztów, jakie generuje konstrukcja w zadanym horyzoncie czasu (Kristowski et al. 2021), przy czym sposób ich prowadzenia zależy od tego, czemu mają służyć. Najczęściej spotykane

są analizy służące oszacowaniu kosztu cyklu życia obiektu (np. na potrzeby budżetowania i planowania finansowego) oraz porównaniu wariantów (np. różnych technologii wykonania konstrukcji lub zastosowania różnych materiałów) w celu wyboru rozwiązania o najniższym koszcie całkowitym (Obolewicz i Okuń 2021; Renne et al. 2022). W przypadku konstrukcji monolitycznych celem może być porównanie tradycyjnej technologii żelbetowej z alternatywnym rozwiązaniem, np. konstrukcją prefabrykowaną, lub ocena opłacalności dodatkowych inwestycji (np. lepszej ochrony przeciwkorozyjnej) z perspektywy długoterminowej (Singh Kushwaha et al. 2014).

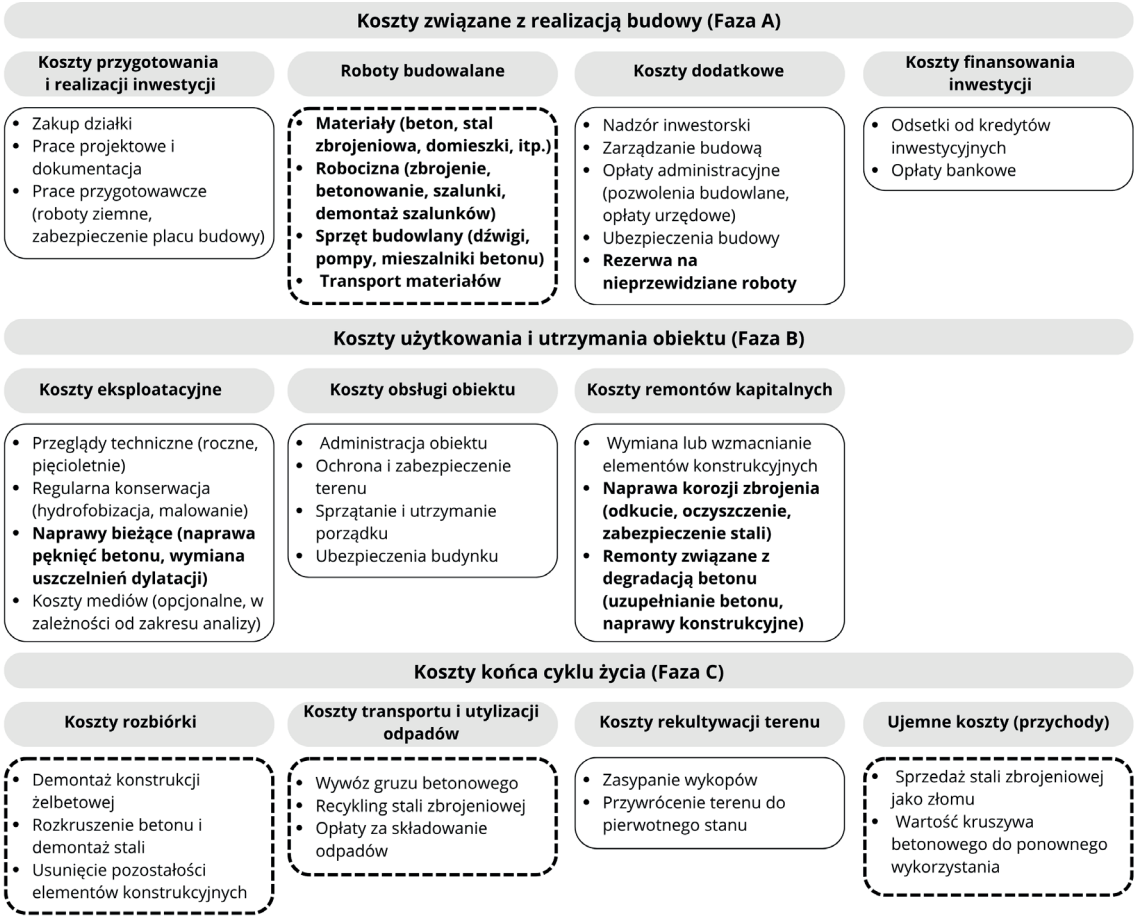
W zakresie analizy należy zdefiniować granice systemu – określić, które elementy i koszty zostaną wliczone, a które pominięte (np. czy obejmujemy tylko konstrukcję nośną, czy cały budynek wraz z instalacjami), a także wskazać okres analizy oraz przyjęte procedury kalkulacji. Zakres powinien odpowiadać celowi – np. w analizie kosztów cyklu życia żelbetowej konstrukcji monolitycznej pomija się koszty niezwiązane z konstrukcją (takie jak media czy wyposażenie), koncentrując się na kosztach budowy, konserwacji i rozbiórki. Z kolei w pełnej analizie ekonomicznej budynku należy uwzględnić wszystkie istotne koszty właściciela (tzw. koszty posiadania), określić sposób typowego użytkowania obiektu (tzw. scenariusz użytkowania) oraz przyjąć założenia dotyczące standardu utrzymania (Dodd i Donatello 2021).

Niezbędnym etapem analizy jest identyfikacja wszystkich kosztów występujących we wcześniej zdefiniowanych fazach cyklu życia (zob. rozdz. 2 rys. 2.2). Należy sporządzić szczegółową strukturę podziału kosztów (ang. *cost breakdown structure*, CBS), przyporządkowując poszczególne wydatki do etapów życia obiektu (Leśniak i Zima 2018). Typowe kategorie kosztowe w poszczególnych fazach cyklu życia obiektu budowlanego, a tym samym konstrukcji monolitycznej, obejmują koszty budowy, koszty użytkowania i utrzymania oraz koszty końca życia. Przykładową strukturę kosztów przedstawiono na rysunku 5.1. Linią przerywaną i pogrubieniem oznaczono moduły bezpośrednio związane z technologią monolityczną żelbetową, natomiast pozostałe koszty w przybliżeniu kształtują się podobnie, niezależnie od typu konstrukcji obiektu budowlanego. Warto podkreślić, że w przypadku analizy konstrukcji żelbetowej istotne różnice pojawiają się jedynie w modułach związanych z realizacją obiektu oraz końcem jego życia.

5.1.1. Koszty budowy

Koszty budowy obejmują wszystkie nakłady konieczne do realizacji inwestycji i oddania obiektu do użytkowania. W przypadku budynku są to m.in.:

- koszty przygotowania inwestycji (zakup działki, prace przygotowawcze, projektowanie i dokumentacja);
- koszty robót budowlanych – materiały (np. beton, stal zbrojeniowa), robocizna (układanie mieszanki betonowej, montaż zbrojenia, rozbiórka szalunków itp.), sprzęt i transport;
- koszty nadzoru, zarządzania budową i wymagane opłaty (np. pozwolenia, ubezpieczenia w trakcie budowy, rezerwy na nieprzewidziane roboty);
- podatki (np. VAT od nakładów inwestycyjnych) i inne koszty transakcyjne;
- koszty finansowania w trakcie budowy (np. odsetki od kredytów budowlanych).



Rys. 5.1. Przykładowa struktura podziału kosztów w przypadku konstrukcji monolitycznej

Sumaryczny koszt budowy stanowi koszt nabycia obiektu K_n w formule LCC. W przypadku konstrukcji monolitycznych może być nieco wyższy niż w technologiach alternatywnych (np. prefabrykacji) ze względu na dłuższy czas realizacji i intensywną pracę na miejscu budowy, jednak często jest kompensowany przez większą trwałość i niższe koszty napraw w przyszłości. Na etapie identyfikacji kosztów budowy należy zatem zebrać wszystkie składowe nakładów inwestycyjnych. Źródłem danych mogą być kosztorysy inwestorskie, oferty wykonawców lub dane historyczne z podobnych realizacji.

5.1.2. Koszty eksploatacji

Faza eksploatacji jest zazwyczaj najdłuższym okresem cyklu życia i generuje zarówno powtarzalne koszty operacyjne, jak i okresowe koszty utrzymaniowo-remontowe. W przypadku obiektów budowlanych należy uwzględnić zarówno koszty codziennego użytkowania, jak i wydatki na zachowanie lub odtworzenie wymaganej sprawności technicznej w trakcie projektowanego okresu ich trwałości. Typowe składowe kosztów eksploatacji i utrzymania obejmują m.in. (Plebankiewicz 2019):

- koszty mediów i użytkowania – wydatki na energię elektryczną, ogrzewanie/chłodzenie, wodę itp.;
- koszty obsługi obiektu – np. bieżące sprzątanie, ochrona, ubezpieczenia, administracja;
- koszty przeglądów technicznych i konserwacji planowej – regularne roczne i pięcioletnie kontrole stanu technicznego budynku zgodnie z przepisami oraz okresowe konserwacje oraz zabezpieczenia;
- koszty napraw bieżących – usuwanie drobnych uszkodzeń i nieszczelności, wymiana elementów, które uległy zużyciu;
- koszty remontów kapitalnych i wymian – większe interwencje w trakcie życia obiektu, np. naprawa uszkodzeń strukturalnych, wzmocnienia elementów, wymiana zużytych instalacji czy elementów wykończeniowych, jeżeli wpływają na użytkowanie konstrukcji.

Wymienione koszty odpowiadają w formule LCC kosztom posiadania obiektu K_p, ponoszonym podczas użytkowania. W przypadku konstrukcji monolitycznych kluczowe znaczenie ma przewidywana trwałość elementów żelbetowych – projektuje się je zazwyczaj na okres użytkowania 50–100 lat (zgodnie z wymaganiami norm projektowych). Trwałość tę można jednak wydłużyć lub skrócić w zależności od zastosowanych rozwiązań technicznych i warunków eksploatacji.

Odporność konstrukcji na degradację środowiskową (karbonatyzację betonu, korozję chlorkową zbrojenia, działanie mrozu, agresję chemiczną itp.) ma bezpośredni wpływ na harmonogram i zakres prac utrzymaniowych. Na etapie identyfikacji kosztów powinno się uwzględnić m.in. scenariusz konserwacji: przy założeniu standardowego środowiska (XC1 – niewielka karbonatyzacja) z dużym prawdopodobieństwem wystarczą drobne naprawy ochronne co kilkadziesiąt lat, natomiast w środowisku agresywnym (XD3/XS3 – oddziaływanie chlorków) należy przewidzieć naprawy betonu i zabezpieczenia zbrojenia już po kilkunastu–kilkudziesięciu latach. Typowe scenariusze utrzymania mogą obejmować: regularne malowanie lub hydrofobizację powierzchni betonowych co 10 lat, kontrolę stanu zbrojenia co 5 lat oraz wymianę uszczelnień dylatacji co 15 lat itp. Wszystkie takie działania powinny być wyszczególnione wraz z przewidywaną częstością i jednostkowym kosztem.

Wpływ parametrów technicznych konstrukcji na długoterminowe koszty eksploatacji może być znaczący. Przykładowo, zwiększona grubość otuliny betonowej i zastosowanie betonu wysokiej jakości podnoszą koszt budowy, ale znacząco opóźniają wystąpienie korozji zbrojenia, redukując sumaryczne koszty napraw w cyklu życia. Podobnie, w przypadku wysokiej agresji chemicznej wybór stali zbrojeniowej o wyższej odporności (np. stali nierdzewnej lub zbrojenia kompozytowego) eliminuje lub ogranicza konieczność napraw konstrukcji w trakcie eksploatacji, obniżając koszty utrzymania w całym okresie użytkowania.

5.1.3. Koszty końca cyklu życia

Każdy obiekt budowlany w pewnym momencie osiąga koniec swojej przydatności do eksploatacji, po którym następuje faza likwidacji. W analizie LCC należy uwzględnić następujące elementy kosztów końcowych:

- koszt rozbiórki konstrukcji – demontaż elementów budynku (np. rozkruszenie żelbetu), cięcie i usunięcie elementów oraz koszty robocizny i sprzętu (np. młoty wyburzeniowe, ciężki sprzęt);
- koszt transportu i utylizacji odpadów – np. wywóz gruzu betonowego i innych odpadów, ich składowanie lub recykling zgodnie z przepisami (opłaty za składowanie, recykling);
- koszt rekultywacji terenu – w razie potrzeby przywrócenie go do stanu pierwotnego (zasypanie wykopów po fundamentach, wyrównanie terenu, nasadzenia itp.);
- przychody z odzysku materiałów – np. wartość odzyskanej stali zbrojeniowej jako złomu (sprzedaż w cenie złomu stalowego) oraz wartość pokruszonego betonu, który może zostać wykorzystany jako kruszywo wtórne lub materiał podsypkowy. Również elementy wyposażenia lub instalacji zdemontowane przed rozbiórką mogą mieć pewną wartość na rynku wtórnym.

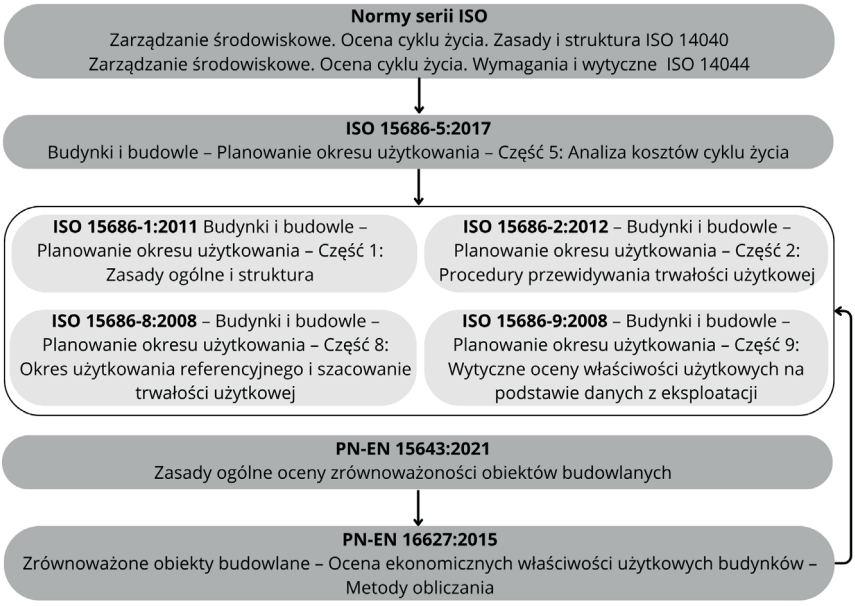
Suma powyższych pozycji stanowi koszty likwidacji obiektu K_l. Wartość rezydualna W_r to wartość pozostała po zakończeniu okresu analizy – może ona wynikać z wartości materiałów odzyskanych przy rozbiórce lub z wartości samego obiektu, jeśli okres analizy nie obejmuje pełnej fizycznej żywotności budynku, lecz jedynie wybrany horyzont czasowy. W klasycznym ujęciu LCC wartość rezydualna traktowana jest jako ujemny koszt, pomniejszający sumę kosztów cyklu życia. Przykładowo, w analizie przy horyzoncie czasowym 50 lat można założyć, że budynek będzie nadal sprawny w 20% (tj. posłuży jeszcze określony czas lub można go sprzedać). Pozostałą wartość, oszacowaną np. metodą proporcjonalną lub wg wartości rynkowej, należy ująć jako dodatni strumień pieniężny w ostatnim roku analizy. Analogicznie, w przypadku rozbiórki przychody z odzysku materiałów należy odjąć od kosztów wyburzenia.

W kontekście konstrukcji monolitycznych warto zauważyć, że żelbet nie poddaje się recyklingowi tak efektywnie jak konstrukcje stalowe. Beton po rozbiórce, w zależności od scenariusza (zob. rozdz. 2), można wykorzystać jako kruszywo wtórne, przy czym najczęściej jest to kruszywo niższej jakości. Z kolei odzyskane zbrojenie, po odpowiednim oczyszczeniu, stanowi surowiec wtórny. W analizie LCC wartość rezydualna konstrukcji żelbetowej pochodzi zwykle od złomu stalowego, a w mniejszym stopniu z destruktu betonowego. Niektóre rozwiązania mogą zwiększać wartość rezydualną – np. zbrojenie ze stali nierdzewnej ma wysoką cenę skupu po zakończeniu użytkowania, co częściowo rekompensuje jego wysoki

koszt początkowy. Wszystkie te elementy należy oszacować na podstawie stawek rozbiórkowych, cen złomu, kosztów transportu i utylizacji odpadów oraz przewidywanego stanu obiektu pod koniec jego cyklu życia.

5.2. Normowe zasady analizy kosztów w cyklu życia

Analiza LCC znajduje bezpośrednie odzwierciedlenie w normach serii ISO oraz CEN (rys. 5.2). Norma ramowa PN-EN 15643:2021 określa m.in. ogólne zasady oceny ekonomicznej obiektów budowlanych w kontekście zrównoważonego rozwoju. Standard ISO 15686-5:2017 definiuje zasady planowania okresu użytkowania obiektów budowlanych, uwzględniające kalkulację kosztów cyklu życia, natomiast norma PN-EN 16627:2015 precyzuje metody obliczeniowe oparte na LCC do oceny ekonomicznej budynków oraz sposoby raportowania tych wyników. Standard ten obejmuje wszystkie etapy cyklu życia budynku – od budowy, przez eksploatację, aż po koniec istnienia – co ma zapewnić pełną i spójną ocenę ekonomiczną już na etapie projektowania inwestycji. Zastosowanie jednolitej metodologii LCC sprzyja podejmowaniu racjonalnych decyzji ekonomicznych, umożliwiając porównywanie różnych wariantów technologicznych i projektowych nie tylko pod kątem kosztów początkowych, lecz także długofalowych konsekwencji finansowych (Grzyl et al. 2017). Uwzględnienie pełnego cyklu życia konstrukcji (w tym monolitycznej) chroni przed pozornymi oszczędnościami, które na etapie eksploatacji mogą przekształcić się w znaczne obciążenia budżetowe.



Rys. 5.2. Schemat najważniejszych dokumentów normalizacyjnych dotyczących analizy ekonomicznej obiektów budowlanych

Norma ISO 15686-5:2017 „Budynki i budowle – Planowanie trwałości użytkowej – Część 5: Analiza kosztów cyklu życia" stanowi podstawowy międzynarodowy standard opisujący metodykę LCC dla obiektów budowlanych. Zakres normy obejmuje wykonywanie analiz kosztów cyklu życia budynków i innych obiektów budowlanych (oraz ich części), zarówno nowych, jak i istniejących. Norma określa wymagania i wytyczne dotyczące identyfikowania i szacowania wszystkich kosztów ponoszonych w cyklu życia obiektu. Celem ISO 15686-5:2017 jest dostarczenie ujednoliconej metodologii umożliwiającej kwantyfikację kosztów cyklu życia jako danych wejściowych do procesu decyzyjnego lub oceny wariantów projektowych, tak, aby inwestorzy i projektanci mogli podejmować świadome decyzje ekonomiczne z uwzględnieniem długoterminowych konsekwencji finansowych.

Norma wprowadza precyzyjne definicje związane z analizą kosztów cyklu życia:

– „koszt cyklu życia" – koszt obiektu budowlanego (lub jego części) ponoszony w trakcie całego cyklu życia, przy założeniu spełnienia wymagań dotyczących funkcjonalności i jakości użytkowej obiektu;
– „analiza kosztów cyklu życia" – metodyka systematycznej oceny ekonomicznej kosztów cyklu życia obiektu w zadanym horyzoncie czasowym.

Horyzont analizy może obejmować cały cykl życia obiektu lub wybrane jego okresy. W praktyce oznacza to, że LCC może być przeprowadzana dla pełnego okresu istnienia obiektu (od budowy do rozbiórki) lub dla okresu ograniczonego (np. 20–30 lat użytkowania, okres dzierżawy), w zależności od potrzeb porównawczych. Norma zaleca, aby już na początku wyraźnie określić granice analizy – wskazując, które koszty uwzględniono, a które pominięto – w uzgodnieniu z zainteresowanymi stronami (np. inwestorem).

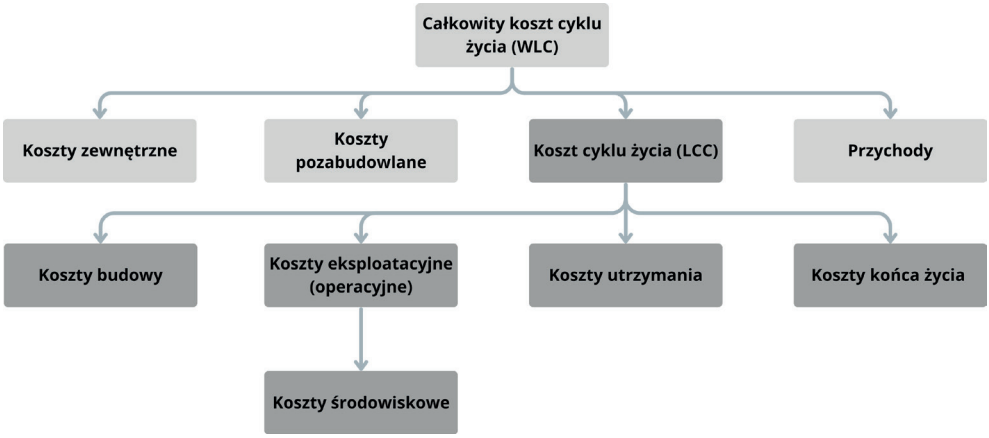
W normie ISO 15686-5:2017 zdefiniowano również poszczególne kategorie kosztów ponoszonych w cyklu życia. Wyróżniono m.in.:

– koszty nabycia (ang. *acquisition cost*) – nakłady inwestycyjne na zakup lub realizację obiektu, z wyłączeniem kosztów eksploatacji i likwidacji);
– koszty kapitałowe – nakłady początkowe na budowę i przystosowanie obiektu);
– koszty eksploatacyjne (operacyjne) – związane z użytkowaniem obiektu, w tym opłaty za media, konserwację, administrację itp.;
– koszty utrzymania (ang. *maintenance*) – działania utrzymujące obiekt w sprawności (przeglądy, naprawy, sprzątanie, remonty);
– koszty końca życia (ang. *end of life*) – związane z likwidacją obiektu po zakończeniu okresu użytkowania, obejmujące m.in. demontaż, rozbiórkę, utylizację odpadów i rekultywację terenu;
– koszty unieszkodliwienia (ang. *disposal cost*) – składowa kosztów końca życia, dotycząca usuwania elementów obiektu po zakończeniu użytkowania.

Norma dopuszcza również uwzględnianie w analizie przepływów finansowych wykraczających poza same wydatki, takich jak wartość rezydualna obiektu lub jego elementów (wartość możliwa do uzyskania ze sprzedaży majątku pozostałego na koniec okresu analizy), a także potencjalne dochody w trakcie cyklu życia oraz koszty zewnętrzne związane z użytkowaniem obiektu.

Wprowadza się tu rozróżnienie między *life cycle costing* – koncentrującym się typowo na przepływach kosztowych ponoszonych przez właściciela lub użytkownika, a szerszym pojęciem *whole-life costing* (WLC), obejmującym „wszystkie istotne bieżące i przyszłe koszty oraz korzyści związane z obiektem podczas całego jego cyklu życia" (rys. 5.3). W praktyce WLC może uwzględniać np. dochody z wynajmu lub sprzedaży, a także koszty nieponoszone bezpośrednio przez właściciela (np. straty produktywności użytkowników budynku, koszty środowiskowe), o ile są one istotne dla analizowanego przypadku i zostaną jawnie zidentyfikowane w ramach analizy. Norma ISO 15686-5:2017 zaleca, by tego typu elementy (korzyści, przychody) były wyraźnie oznaczane w wynikach analizy, ponieważ klasyczny LCC koncentruje się na kosztach bezpośrednich.

Metodyka zawarta w ISO 15686-5:2017 opiera się na zasadach rachunku zdyskontowanego – wszystkie przyszłe koszty występujące w różnych momentach cyklu życia powinny zostać sprowadzone do wartości obecnej (np. za pomocą stawek dyskontowych realnych lub nominalnych). Norma wskazuje na potrzebę rozróżnienia pomiędzy kosztami nominalnymi (uwzględniającymi przewidywaną inflację cen poszczególnych składników) a kosztami realnymi (w ujęciu stałych cen bazowych) oraz odpowiedniego doboru stóp dyskontowych (realnej lub nominalnej) do dokonania aktualizacji.



Rys. 5.3. Struktura całkowitego kosztu cyklu życia (WLC) wg normy ISO 15686-5:2017

Analizowana norma dostarcza również wytycznych dotyczących porównywania wariantów za pomocą LCC (np. w celu wyboru opcji projektowej o najniższych kosztach całkowitych) oraz prowadzenia analizy wrażliwości na zmiany założeń (np. stopy dyskontowej, okresu analizy, kosztów energii). Interpretacja wyników LCC powinna zawsze uwzględniać cel przeprowadzenia analizy (np. czy chodzi o optymalizację kosztów utrzymania, ocenę opłacalności inwestycji z perspektywy inwestora czy też porównanie wariantów technologicznych).

Z kolei norma PN-EN 15643:2021, omawiająca zrównoważenie obiektów budowlanych, nie wprowadza konkretnych metod kalkulacji kosztów, ale definiuje zakres i strukturę ocen ekonomicznych, tak aby były one kompatybilne z ocenami środowiskowymi i społecznymi.

Norma ta tworzy ramy koncepcyjne, zapewniające że ocena ekonomiczna budynku zostanie przeprowadzona z uwzględnieniem cyklu życia oraz w powiązaniu z analogicznymi ocenami innych aspektów. Zakres i granice oceny przedmiotowej normy wskazują, że ocena ekonomiczna budynku powinna obejmować cykl życia obiektu w przypadku budynku nowego, natomiast dla budynku istniejącego – jego pozostały okres użytkowania oraz fazę końcową (likwidacji). Podkreśla się konieczność powiązania oceny z charakterystyką techniczną i funkcjonalną budynku – co oznacza, że przy porównywaniu wyników ekonomicznych należy uwzględniać, czy analizowane obiekty lub warianty zapewniają ten sam ekwiwalent funkcjonalny. Norma wyznacza granice systemu dla oceny ekonomicznej analogicznie jak w ocenie środowiskowej – obiektem oceny jest budynek jako całość (ewentualnie wyodrębniona część budynku lub zespół budynków, jeśli tak zdefiniowano), łącznie z procesami i produktami budowlanymi w obrębie placu budowy, natomiast wyklucza się wpływy poza terenem danego obiektu. Oznacza to, że np. koszty związane z infrastrukturą zewnętrzną (drogi dojazdowe, sieci komunalne poza działką) oraz koszty transportu użytkowników budynku nie są włączane do oceny ekonomicznej budynku w rozumieniu tej normy.

W ramach PN-EN 15643:2021 przyjmuje się, że ocena ekonomiczna powinna obejmować wszystkie fazy cyklu życia budynku, analogicznie jak w ocenie LCA. W praktyce oznacza to uwzględnienie kosztów związanych z fazą przygotowania (moduł A0) i budowy (w tym produkcją materiałów, transportem, wykonawstwem – co odpowiada modułom A1–A5 w metodologii LCA), fazą eksploatacji (utrzymanie, naprawy, użytkowanie, zużycie energii i mediów – moduły B1–B7) oraz fazą końca życia (rozbiórka, przetwarzanie odpadów – moduły C1–C4). Dodatkowo, podobnie jak w LCA, rozważa się fazę poza systemem (moduł D), która obejmuje potencjalne korzyści i obciążenia poza granicami systemu – w kontekście ekonomicznym mogą to być np. wartości rezydualne elementów budynku czy koszty uniknięte dzięki recyklingowi materiałów po zakończeniu życia obiektu.

Norma ramowa określa ogólne wymagania dotyczące przedstawiania wyników oceny ekonomicznej. Zaleca, by wyniki (np. łączny koszt cyklu życia budynku, koszt roczny na jednostkę powierzchni itp.) były raportowane przejrzyście, z podaniem przyjętych założeń (okresu analizy, stopy dyskontowej, zakresu kosztów włączonych do LCC). Wymagana jest spójność raportu z analogicznymi raportami z oceny środowiskowej i społecznej – stąd format prezentacji wyników powinien umożliwiać łatwe porównanie między filarami (np. przez odniesienie wyników do wspólnej jednostki funkcjonalnej, takiej jak 1 m² powierzchni użytkowej rocznie). PN-EN 15643:2021 nie wprowadza jednak konkretnych progów ani kryteriów oceny (np. nie mówi, jaki poziom kosztu czy wskaźnika jest „dobry" lub „zły") – pozostaje normą narzędziową, a nie normą klasyfikacyjną.

Z kolei norma PN-EN 16627:2015 przedstawia metodologię obliczania wskaźników ekonomicznych budynków w analizie zrównoważonego rozwoju; jest to więc standard opisujący, jak przeprowadzić LCC dla budynku oraz jak raportować wyniki takiej oceny. Norma ta została przygotowana przez Komitet Techniczny CEN nr 350: Zrównoważone budownictwo (ang. *sustainability of construction works*) i zatwierdzona w grudniu 2015 r. (BSI EN 16627:2015), po czym wdrożona jako norma krajowa we wszystkich krajach UE (w Polsce jako PN-EN 16627:2015-10. Stanowi ona uzupełnienie normy ramowej PN-EN 15643-4:2012 (aktualnie PN-EN 15643:2021), przekładając ogólne zasady na konkretny algorytm obliczeń

i wymagania dotyczące wykorzystywanych danych. Norma PN-EN 16627:2015 wykorzystuje podejście, definicje oraz metodologię analizy kosztów cyklu życia ujętą w ISO 15686-5:2017, dostosowując ją do specyficznych wymagań europejskich związanych ze zrównoważonym rozwojem, szczególnie w zakresie raportowania oraz zgodności z systemami oceny budynków.

W praktyce PN-EN 16627:2015 wskazuje, jakie dane są potrzebne do przeprowadzenia LCC, jak zdefiniować granice analizy i procedurę obliczeń, jakie wskaźniki należy obliczyć oraz jak przedstawić wyniki. Celem jest uzyskanie jednolitego podejścia, pozwalającego na porównywanie wyników oceny ekonomicznej różnych budynków lub wariantów. Norma szczególnie mocno akcentuje pełny horyzont cyklu życia – stwierdza, że ocena powinna obejmować wszystkie etapy cyklu życia budynku oraz wszystkie produkty, procesy i usługi związane z budynkiem w tym cyklu. Podejście to jest zgodne z metodologią LCA na poziomie budynku i zapewnia spójność między ocenami LCC i LCA. Interpretacja i wartościowanie wyników (czyli np. decyzja, czy dany wynik LCC jest akceptowalny lub który wariant jest najlepszy) pozostają poza zakresem normy.

Norma PN-EN 16627:2015 wprowadza usystematyzowaną strukturę analizy kosztów cyklu życia, ściśle powiązaną ze strukturą ocen określoną w normie ramowej PN-EN 15643:2021. Podział procesu inwestycyjno-użytkowego budynku na moduły odpowiadające kolejnym fazom cyklu życia jest analogiczny jak w ocenie środowiskowej, a różnicą pojawiającą się w ocenie kosztowej jest uwzględnienie modułu A0, który pozwala ująć w LCC wszystkie wydatki ponoszone przed rozpoczęciem właściwej budowy. Każdemu modułowi przyporządkowano odpowiednie scenariusze i dane wejściowe niezbędne do obliczeń. PN-EN 16627:2015 wymaga np., aby dla faz użytkowania (B1–B7) zdefiniować scenariusze dotyczące częstotliwości konserwacji, wymiany elementów, okresów użytkowania urządzeń technicznych oraz trendów kosztów energii itp. Dla fazy końcowej (C1–C4) należy założyć scenariusz demontażu i utylizacji (np. procent odzysku materiałów, koszty rozbiórki w przeliczeniu na m²). W module D można uwzględnić np. wartość rezydualną budynku lub jego części po zakończeniu okresu analizy (np. wartość gruntu czy materiałów możliwych do sprzedaży), zdyskontowaną do wartości bieżącej. Analogicznie jak w normie ISO 15686-5:2017, długość okresu analizy LCC w PN-EN 16627:2015 nie jest narzucona z góry i może być uzgodniona z inwestorem oraz dostosowana do celu oceny.

Norma definiuje metodę obliczania globalnego kosztu cyklu życia budynku w określonym okresie analizy. Sprowadza się ona do sumowania zdyskontowanych kosztów w poszczególnych latach cyklu życia, z podziałem na kategorie kosztów (inwestycyjne, operacyjne, końcowe) oraz odjęcia wartości rezydualnej (jeśli występuje) na koniec okresu analizy. Normatywnym wskaźnikiem jest tutaj tzw. koszt całkowity w okresie analizy (ang. *net present cost* lub *global cost*). Poza całkowitym kosztem cyklu życia norma wprowadza także inne mierniki ekonomiczne pomocne w ocenie, np.:

- *net present value* (NPV) – wartość bieżącą netto;
- *net present cost* (NPC) – synonim kosztu całkowitego (gdy uwzględnia się tylko wydatki);
- *annualised cost* lub *annual equivalent value* (AEV) – roczny ekwiwalent kosztów (tj. równa roczna kwota, która zdyskontowana przez przyjęty okres daje NPC – przydatna do porównań z rocznymi korzyściami).

Dopuszczalne jest także stosowanie innych wskaźników (jak np. stopa zwrotu, okres zwrotu), jeśli dodaje się analizę opłacalności. Podstawowym wynikiem pozostaje jednak zdyskontowany koszt całkowity.

Normy serii ISO 15686, a w szczególności ISO 15686-1:2011 oraz ISO 15686-2:2012, stanowią kluczowe źródła informacji dla normy PN-EN 16627:2015 w zakresie prognozowania trwałości oraz planowania cyklu życia elementów budynków. Istotną rolę w ocenie ekonomicznej odgrywają również normy ISO 15686-8:2010 i ISO 15686-9:2008, które dostarczają wskazówek dotyczących okresu referencyjnej trwałości użytkowej (RSL) poszczególnych elementów. Na przykład, jeśli okres analizy wynosi 60 lat, a referencyjna trwałość użytkowa pokrycia dachowego wynosi 30 lat, analiza LCC musi uwzględnić co najmniej jedną wymianę takiego pokrycia. Norma PN-EN 16627:2015 wskazuje ponadto konkretne źródła danych niezbędnych do wykonania analizy kosztów cyklu życia, takie jak normy kosztorysowe, dane eksploatacyjne od producentów materiałów, statystyki kosztów energii, a także zaleca korzystanie z deklaracji środowiskowych produktu (EPD).

Raport z analizy powinien zawierać m.in. opis obiektu i jego ekwiwalentu funkcjonalnego, założone granice systemu i scenariusze, źródła danych oraz wyniki w postaci obliczonych wskaźników. Wymagana jest prezentacja wyników co najmniej w formie łącznego kosztu cyklu życia oraz, opcjonalnie, ich rozbicia na poszczególne etapy. Norma zaleca także podawanie wyników w przeliczeniu na jednostkę funkcjonalną (np. 1 m² powierzchni użytkowej budynku na rok) w celu ułatwienia porównań między różnymi obiektami.

Norma PN-EN 16627:2015 jest w praktyce wykorzystywana do wykonywania ocen ekonomicznych, m.in. w certyfikacji zrównoważonych budynków, a ponadto znalazła zastosowanie w implementacji przepisów UE. Przykładowo, metodologia analiz koszt-optymalnych dla wymagań energetycznych budynków (zgodnie z dyrektywą EPBD) posługuje się pojęciem globalnego kosztu, niemal identycznym z definicją PN-EN 16627:2015. W Polsce pewne elementy LCC przeniknęły także do prawa zamówień publicznych. Nowelizacja z 2016 r. umożliwiła wykorzystanie kryterium kosztu cyklu życia przy ocenie ofert, precyzując, że na koszt cyklu życia mogą składać się koszty nabycia, użytkowania (w szczególności zużycia energii i innych zasobów), utrzymania oraz wycofania z eksploatacji. Choć ustawa nie odwołuje się bezpośrednio do PN-EN 16627:2015, zakres wymienionych kategorii pokrywa się z zakresem normy, co wskazuje na jej wpływ na kształt praktyki.

5.3. Rachunek LCC w odniesieniu do obiektów budowlanych

W praktyce analizy ekonomicznej kosztów cyklu życia obiektów budowlanych stosuje się zazwyczaj jedną z dwóch podstawowych metod kalkulacyjnych (Plebankiewicz i Zając 2022):

- metodę prostą (uproszczoną) – bazującą na sumowaniu nominalnych kosztów bez ich dyskontowania;
- metodę złożoną (dokładną) – uwzględniającą dyskontowanie przyszłych kosztów.

Obie metody różnią się stopniem szczegółowości oraz precyzją otrzymywanych wyników, a wybór odpowiedniej metody zależy od celu analizy, wymaganego poziomu dokładności oraz dostępnych danych. Normy ISO 15686-5:2017 oraz PN-EN 16627:2015 dopuszczają stosowanie uproszczonej metody wyłącznie w przypadku analiz wstępnych lub porównawczych o niskim poziomie dokładności; w pozostałych przypadkach zalecana jest metoda dokładna.

Metoda prosta opiera się na sumowaniu kosztów ponoszonych na każdym etapie cyklu życia konstrukcji, w tym kosztów nabycia, kosztów eksploatacji (takich jak media, konserwacje, naprawy i remonty) oraz kosztów związanych z likwidacją obiektu, obejmujących rozbiórkę oraz utylizację materiałów.

Koszt cyklu życia (LCC) według metody prostej określa się za pomocą wzoru:

$$LCC = K_n + K_p + K_l \tag{5.1}$$

gdzie:

K_n – koszty nabycia,
K_p – koszty posiadania,
K_l – koszty likwidacji.

Aktualnie proponuje się uzupełnienie tego podejścia przez odjęcie wartości rezydualnej, np. wartości odzyskanych materiałów (czasem także wartości sprzedaży gruntu mimo że w świetle norm jest to już poza granicą systemu) po zakończeniu użytkowania obiektu, co wyraża wzór (5.2) (Dziadosz 2013; Kristowski et al. 2021):

$$LCC = K_n + K_p + K_l - W_r \tag{5.2}$$

gdzie W_r to wartość rezydualna.

Najważniejszą zaletą metody prostej jest jej przejrzystość, szybkość oraz brak potrzeby wykorzystania zaawansowanych narzędzi ekonomiczno-finansowych, co czyni ją szczególnie przydatną podczas wstępnych ocen inwestycji. Metoda pomija jednak dyskontowanie oraz nie uwzględnia zmian cen, np. energii czy materiałów, co może prowadzić do błędnych wniosków o ekonomicznej opłacalności wariantu inwestycyjnego.

Metoda złożona rachunku LCC uwzględnia zmienną wartość pieniądza w czasie przez stosowanie odpowiedniej stopy dyskontowej, umożliwiającej przeliczenie przyszłych kosztów na wartości bieżące (wartość bieżąca netto – NPV). Podejście to jest zgodne z wymaganiami norm międzynarodowych ISO 15686-5:2017 oraz PN-EN 16627:2015. Procedura, analogicznie jak w metodzie prostej, wymaga identyfikacji oraz oszacowania wszystkich kosztów, które pojawiają się na różnych etapach życia konstrukcji, tj. kosztów inwestycyjnych (budowy), kosztów eksploatacji (użytkowania i konserwacji) oraz kosztów końca życia (rozbiórki i odzysku materiałów). Następnym krokiem jest przyjęcie odpowiedniej stopy dyskontowej (np. realnej stopy na poziomie 3–5%), odzwierciedlającej koszty kapitału oraz ryzyko inwestycyjne. Dyskontowanie kosztów przyszłych do wartości bieżącej odbywa się przez mnożenie kosztów ponoszonych w przyszłości przez odpowiedni współczynnik dyskontowy, który uwzględnia upływ czasu oraz przyjętą stopę dyskontową. Ostatnim krokiem jest sumowanie zdyskontowanych wartości kosztowych z ewentualnym

uwzględnieniem wartości rezydualnej, co daje pełny obraz kosztu cyklu życia obiektu (LCC) zgodnie ze wzorem:

$$LCC = K_n + \sum_{j=1}^{T} \frac{K_j}{(1+i)^j} + \frac{K_l}{(1+i)^T} - \frac{RV}{(1+i)^T} \tag{5.3}$$

gdzie:

K_n – koszty początkowe (koszt budowy, koszt zakupu itp.),
K_j – koszty ponoszone w roku j (koszty eksploatacyjne, remontowe itp.),
K_l – koszty likwidacji w rozpatrywanym okresie T (koszty rozbiórki, rekultywacji terenu itp.),
RV – wartość rezydualna na koniec okresu analizy (w rozpatrywanym okresie T),
i – stopa dyskontowa [%],
j – poszczególne lata eksploatacji obiektu,
T – długość rozpatrywanego okresu.

W przypadku analiz krótszych perspektyw czasowych, np. eksploatacji przez okres 30 lat, koszty likwidacji oraz wartość rezydualną uwzględnia się jedynie wtedy, gdy po zakończeniu tego okresu zakłada się likwidację obiektu, jego częściową modernizację albo sprzedaż. Jeżeli analizowany okres nie kończy się likwidacją ani znaczącą zmianą stanu obiektu, koszty likwidacji oraz wartość rezydualna mogą zostać pominięte lub powinny być określone odpowiednio do przewidywanego stanu obiektu po zakończeniu analizy.

Zaletami metody złożonej są realistyczne odzwierciedlenie ekonomicznych warunków inwestycji, pełna zgodność z normami oraz wysoka dokładność uzyskanych wyników, szczególnie istotna przy długookresowych analizach typowych dla konstrukcji budowlanych. Do wad tej metody należą natomiast wysokie wymagania dotyczące jakości oraz dostępności danych wejściowych, złożoność procesu obliczeniowego (zwłaszcza przy bardziej rozbudowanych scenariuszach) oraz duża wrażliwość wyników na wybór stopy dyskontowej.

Szczegółową metodę kalkulacji kosztów cyklu życia budynków oraz sposób prezentowania tych informacji określa Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii (Dz.U. 2021 poz. 2276). Rozporządzenie wskazuje, że koszty cyklu życia należy obliczać jako sumę kosztów nabycia, użytkowania i utrzymania obiektu w 30-letnim okresie obliczeniowym, z zastosowaniem określonych wzorów i danych wejściowych. Dokument precyzuje zasady ustalania cen jednostkowych energii, wody i wyrobów budowlanych, sposób uwzględniania gwarancji oraz liczbę cykli użytkowania poszczególnych elementów, a także zawiera formularz służący do zestawienia wyników kalkulacji.

Należy zauważyć, że w praktyce inwestycyjnej analiza kosztów cyklu życia obiektów budowlanych jest najczęściej dostosowywana do standardów kosztorysowania, co oznacza, że podstawowym punktem odniesienia są wartości kosztorysowe i ceny jednostkowe, a nie rzeczywiste koszty. Konieczne wydaje się również zastosowanie współczynników dyskontowych lub indeksów inflacyjnych, które umożliwiają przeliczenie wartości kosztorysowych na wartość bieżącą netto.

W Polsce zakres i sposób sporządzania kosztorysu inwestorskiego określa rozporządzenie ministra rozwoju i technologii z dnia 20 grudnia 2021 r. (Dz.U. 2021 poz. 2458) stanowiące podstawę prawną do wyznaczania planowanych kosztów robót budowlanych i prac projektowych. Podstawową formą kalkulacji stosowaną w kosztorysach inwestorskich jest kalkulacja uproszczona (wzór (5.4)):

$$W_k = \sum\left(L_j \cdot C_j\right) \tag{5.4}$$

gdzie:

w_k – wartość kosztorysowa robót,
L_j – liczba jednostek przedmiarowych robót podstawowych,
C_j – cena jednostkowa roboty podstawowej.

Cena jednostkowa robót budowlanych C_j może być określana na dwa sposoby. W pierwszej kolejności zaleca się stosowanie cen jednostkowych opartych na danych rynkowych, w szczególności pochodzących z wcześniej zawartych umów, analiz rynku budowlanego oraz aktualnych, powszechnie stosowanych publikacji cenowych. Jeżeli jednak nie ma możliwości pozyskania wiarygodnych danych rynkowych, dopuszcza się zastosowanie kalkulacji szczegółowej, polegającej na wyznaczeniu ceny jednostkowej na podstawie składowych nakładów rzeczowych oraz cen czynników produkcji, zgodnie ze wzorami:

$$C_j = \sum\left(n \cdot c\right) + K_{pj} + Z_j \tag{5.5}$$

$$n \cdot c = \sum n_r \cdot C_r + \sum n_m \cdot C_m + \sum n_s \cdot C_s \tag{5.6}$$

gdzie:

n – jednostkowe nakłady rzeczowe: robocizny – n_r, materiałów – n_m, pracy sprzętu – n_s;
c – ceny czynników produkcji: robocizny – C_r, materiałów – C_m, pracy sprzętu – C_s;
$n \cdot c$ – koszty bezpośrednie jednostki przedmiarowej robót;
K_{pj} – koszty pośrednie na jednostkę przedmiarową robót (wzór (5.7));
Z_j – zysk kalkulacyjny na jednostkę przedmiarową robót, obliczany jako iloczyn wskaźnika narzutu zysku oraz podstawy jego naliczania, określonej w założeniach wyjściowych do kosztorysowania, np. suma kosztów robocizny i sprzętu, do której stosuje się ustalony procentowy narzut zysku.

$$K_{pj} = \frac{W_{kp} \cdot \left(R_j + S_j\right)}{100\%} \tag{5.7}$$

gdzie:

W_{kp} – wskaźnik narzutu kosztów pośrednich [%],
R_j – koszt robocizny na jednostkę przedmiarową robót,
S_j – koszt pracy sprzętu na jednostkę przedmiarową robót.

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 20 grudnia 2021 r. przy sporządzaniu kosztorysu inwestorskiego zaleca się, aby ceny jednostkowe robót, jednostkowe nakłady rzeczowe, stawki i ceny czynników produkcji, a także wskaźniki narzutów

kosztów pośrednich i zysku kalkulacyjnego były w pierwszej kolejności ustalane na podstawie aktualnych danych rynkowych, obejmujących m.in. dane z wcześniej zawartych umów, wyniki analiz własnych, wywiadów branżowych oraz lokalnych badań cen. W dalszej kolejności należy stosować katalogi normatywnych oraz ogólnych wskaźników publikowanych w literaturze fachowej i bazach kosztorysowych.

W sytuacjach niewystarczających danych do obliczenia W_k (np. w przypadku braku dokumentacji projektowej na etapie opracowywania programu funkcjonalno-użytkowego) stosuje się metodę wskaźnikową, zgodnie ze wzorem:

$$W_{RB} = \left(W_{Ci} \cdot n_i\right) \tag{5.8}$$

gdzie:

W_{RB} – wartość planowanych kosztów robót budowlanych;
W_{Ci} – wskaźnik cenowy *i*-tego składnika kosztów;
n_i – liczbę jednostek odniesienia dla *i*-tego składnika kosztów.

Zarówno koszty posiadania K_p, rozumiane jako koszty ewentualnych remontów i napraw, jak i koszty likwidacji K_l, mogą być szacowane przy wykorzystaniu przedstawionych metod kalkulacyjnych stosowanych w kosztorysach.

5.4. Analiza ryzyka w ocenie kosztów cyklu życia

Najczęściej uwzględniane rodzaje ryzyka w analizie LCC to ryzyko technologiczne, eksploatacyjne, środowiskowe, finansowe i regulacyjne. Ryzyko technologiczne dotyczy awarii urządzeń, zastosowania materiałów o niższej niż oczekiwana trwałości, a także problemów związanych z realizacją robót budowlanych. Ryzyko eksploatacyjne obejmuje koszty związane z bieżącym utrzymaniem, konserwacją i remontami, których częstotliwość oraz wysokość mogą znacząco odbiegać od założonych prognoz. Ryzyko środowiskowe wiąże się ze zmianami przepisów ekologicznych, które mogą wymagać dodatkowych inwestycji lub modyfikacji obiektu. Ryzyko finansowe dotyczy m.in. zmian stóp procentowych, inflacji, cen energii i materiałów, natomiast ryzyko regulacyjne obejmuje nieoczekiwane zmiany przepisów prawa budowlanego i wymagań technicznych (Wieczorek et al. 2019).

Wszystkie te aspekty podkreślają normy ISO 15686-5:2017, PN-EN 16627:2015 oraz PN-EN 15643:2021, choć każda z nich czyni to z różnym stopniem szczegółowości. Norma ISO 15686-5:2017 przedstawia najbardziej kompleksowe wytyczne dotyczące uwzględniania ryzyka w analizach LCC, przedstawiając precyzyjną metodologię realizacji tego procesu.

Zgodnie z ISO 15686-5:2017 przyszłe koszty związane z obiektami budowlanymi obarczone są niepewnością wynikającą m.in. z inflacji, zmienności kosztów energii, zmian regulacyjnych, starzenia się elementów konstrukcyjnych oraz zmiennych warunków eksploatacji. W celu efektywnego zarządzania ryzykiem norma zaleca stosowanie podejścia etapowego. Tabela 5.1 przedstawia zestawienie metod i oczekiwanych rezultatów na każdym etapie analizy ryzyka.

Tabela 5.1

Analiza ryzyka na podstawie wymagań ISO 15686-5:2017

Etap analizy	Opis	Metody/narzędzia	Rezultaty
Identyfikacja czynników ryzyka	określenie potencjalnych źródeł ryzyka wpływających na LCC	– wywiady eksperckie, – analiza danych historycznych	lista czynników ryzyka
Szacowanie wpływu czynników ryzyka	ocena wpływu każdego czynnika na koszty cyklu życia	– analiza wrażliwości, – analiza scenariuszowa, – symulacja Monte Carlo	wartości szacunkowe wpływu ryzyka na koszty
Ocena prawdopodobieństwa	oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia każdego czynnika ryzyka	– ekspertyzy, – analizy statystyczne	prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń
Kwantyfikacja ryzyka	obliczenie oczekiwanych wartości kosztów uwzględniających niepewność	– symulacja Monte Carlo, – modelowanie statystyczne	rozkłady kosztów, przedziały ufności
Interpretacja wyników	analiza uzyskanych wyników w celu określenia ryzyka i podjęcia decyzji	– wizualizacja wyników (wykresy, histogramy), – wyznaczenie kluczowych wskaźników (np. VaR)	raport ryzyka, rekomendacje decyzyjne
Zarządzanie ryzykiem	dobór strategii do ograniczenia lub zarządzania zidentyfikowanym ryzykiem	– unikanie ryzyka, – redukcja ryzyka, – transfer ryzyka, – akceptacja ryzyka	plan zarządzania ryzykiem

Najczęściej stosowanymi metodami uwzględniania ryzyka w LCC są analiza wrażliwości oraz analiza scenariuszowa. Analiza wrażliwości polega na identyfikacji kluczowych czynników wpływających na koszty cyklu życia i ocenie, jak zmiany tych czynników wpływają na ostateczne wyniki. Analiza scenariuszowa pozwala na uwzględnienie różnych wariantów przyszłych wydarzeń (optymistycznego, realistycznego, pesymistycznego), pomagając inwestorom w lepszym przygotowaniu na potencjalne zmiany sytuacji rynkowej, technologicznej czy regulacyjnej.

W celu zobrazowania wyników analizy ryzyka powszechnie stosuje się macierz ryzyk, przedstawiającą zależność między prawdopodobieństwem wystąpienia danego ryzyka a jego potencjalnym wpływem na koszty cyklu życia. Taka macierz pozwala na wizualne uszeregowanie ryzyk i określenie priorytetów w działaniach zaradczych, co znacząco usprawnia proces podejmowania decyzji i planowania długoterminowego zarządzania ryzykiem (Acebes et al. 2024). W tabeli 5.2 przedstawiono opracowaną przez autora macierz ryzyk mogących występować w cyklu życia żelbetowych konstrukcji monolitycznych, z uwzględnieniem faz cyklu życia, w których dane ryzyko może się pojawić.

Tabela 5.2

Przykładowa macierz ryzyk mogących występować w cyklu życia żelbetowych konstrukcji monolitycznych

Wpływ na wynik LCC	**Prawdopodobieństwo**				
	bardzo niskie (0–0,2)	**niskie (0,2–0,4)**	**średnie (0,4–0,6)**	**wysokie (0,6–0,8)**	**bardzo wysokie (0,8–1)**
Bardzo wysoki	–	– korozja stali zbrojeniowej (fazy B2–B4); – błędy projektowe (faza A0, A5)	– ograniczenie dostępności składników mieszanki betonowej (fazy A1–A3); – zwiększona agresywność środowiska (fazy B2–B5)	–	–
Wysoki	– uszkodzenia (np. klęski żywiołowe) (fazy B2, B3, B5)	–	– błędy wykonawcze (np. zagęszczenie betonu) (faza A5)	– pęknięcia betonu (fazy B3)	– zmienność cen materiałów (fazy A1–A3)
Średni	– problemy administracyjne, własnościowe (faza A0)	– opóźnienia logistyczne (fazy A4–A5)	– skurcz i pełzanie betonu (fazy A5 i B2–B4); – odpryski betonu (mróz, sole) (fazy B2–B3)	– wzrost kosztów robocizny (fazy A5, B3–B5); – wahania kursów walutowych fazy A1–A3)	–
Niski	– niedoszacowanie obciążeń eksploatacyjnych (faza A0)	– błędy specyfikacji materiałów (fazy A3)	– zmiany przepisów i norm (fazy A–C)	–	–
Bardzo niski	– oddziaływania środowiskowe na budowie (faza A5)	–	–	–	–

Przedstawiona macierz ryzyk ma charakter przykładowy i nie może być uznana za uniwersalną, ponieważ nie odnosi się do konkretnej inwestycji – jej lokalizacji, skali, klasy ekspozycji ani planowanego okresu użytkowania. Niemniej jednak można zauważyć, że ryzyka rozkładają się dość równomiernie pomiędzy fazy realizacji i użytkowania obiektu.

Na etapie realizacji inwestycji czynniki, takie jak zmienność cen materiałów czy ograniczona dostępność surowców mogą mieć istotne znaczenie, a ich uwzględnienie w analizie LCC jest niezbędne. Z kolei ryzyka o bardzo niskim prawdopodobieństwie wystąpienia, takie jak niedoszacowanie obciążeń eksploatacyjnych, zazwyczaj nie są brane pod uwagę w tego rodzaju analizach. Na etapie eksploatacji najistotniejsze są ryzyka związane ze zwiększoną agresywnością środowiska i pęknięciami betonu, a w dalszej kolejności – innego rodzaju uszkodzenia. W tej fazie praktycznie nie występują czynniki o marginalnym znaczeniu, co wynika ze specyfiki żelbetowych konstrukcji monolitycznych. Charakteryzuje je wysoka odporność, która zmniejsza prawdopodobieństwo wystąpienia ryzyk. Jednak w przypadku ich zaistnienia konsekwencje są zazwyczaj poważne.

Analiza ryzyk w kontekście LCC jest kluczowa, gdy celem opracowania jest szczegółowa ocena ekonomiczna cyklu życia konkretnego obiektu budowlanego. W takim przypadku identyfikacja, ocena i zarządzanie ryzykami umożliwiają uwzględnienie specyfiki inwestycji, jej lokalizacji, technologii wykonania oraz unikalnych uwarunkowań eksploatacyjnych, co znacząco zwiększa precyzję prognozowanych kosztów (Oduyemi et al. 2016). Niemniej jednak gdy analiza LCC ma charakter porównawczy i odnosi się do koncepcyjnych wariantów, podobnych pod względem czynników ryzyka, szczegółowe uwzględnianie każdego z nich traci na znaczeniu. W takim przypadku można przyjąć w uproszczeniu, że wpływ ryzyk na różnice w kosztach cyklu życia pomiędzy wariantami będzie znikomy, co uprości proces analityczny, nie wpływając istotnie na jakość podejmowanych decyzji (Albuja-Sánchez i Damián-Chalán 2024).

5.5. Analiza cen jednostkowych mieszanek betonowych oraz stali zbrojeniowej

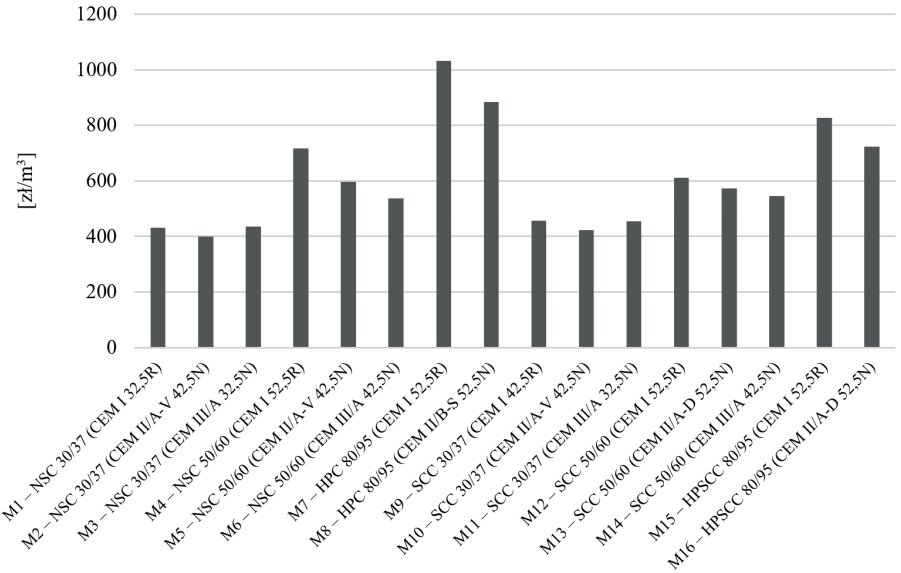
Dla 16 analizowanych mieszanek betonowych (przedstawionych w rozdziale 3) przeprowadzono kalkulację ceny jednostkowej materiału [zł/m³]. Wartość ta została określona na podstawie składu każdej mieszanki oraz jednostkowych cen poszczególnych komponentów. Ceny składników wykorzystanych w kalkulacji ustalono na podstawie aktualnych danych rynkowych obejmujących cenniki producentów, zapytania ofertowe, wywiady branżowe oraz publikacje cenowe, takie jak Intercenbud i Bistyp.

W przypadku stali zbrojeniowej analogicznie przyjęto średnią cenę jednostkową opartą na danych rynkowych. W Europie, w tym także w Polsce, stal zbrojeniowa produkowana jest niemal wyłącznie w piecach elektrycznych (EAF) z wykorzystaniem złomu stalowego jako głównego surowca. Z tego względu nie rozważano cen wyrobów pochodzących z technologii wielkopiecowo-konwertorowej (BF-BOF), mającej w przypadku tego asortymentu mniejsze znaczenie rynkowe.

Celem analizy cen jednostkowych materiałów było określenie zróżnicowania wynikającego z udziału poszczególnych składników. Z tego względu na tym etapie uwzględniono

wyłącznie fazy A1–A3, zarówno dla mieszanek betonowych, jak i stali zbrojeniowej. Kalkulacje obejmujące pozostałe fazy cyklu życia konstrukcji żelbetowych przedstawiono w dalszej części pracy.

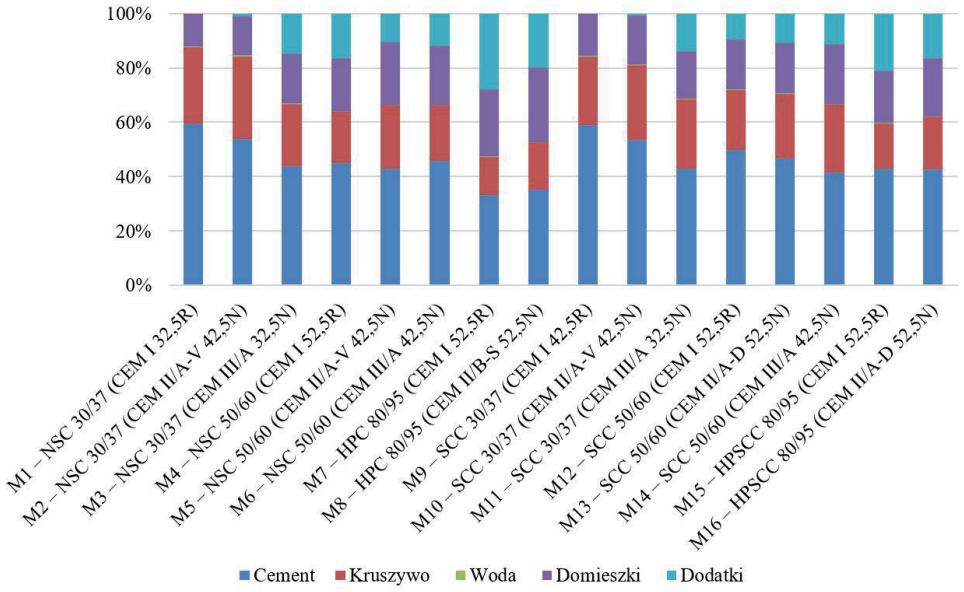
Na rysunku 5.4 przedstawiono wartości jednostkowej ceny materiału [zł/m³] dla każdej z mieszanek wraz z określonym typem zastosowanego cementu. Cena jednostkowa waha się od ok. 400 zł/m³ do ponad 1000 zł/m³. Najwyższe ceny jednostkowe występują dla betonów wyższych klas (np. M7, M8), natomiast najniższe wartości dotyczą betonów niższych klas (np. M1, M2). Należy jednak podkreślić, że rzeczywiste ceny jednostkowe u producentów mogą się różnić w zależności od wielkości zamówienia, lokalizacji inwestycji, marży i innych czynników.



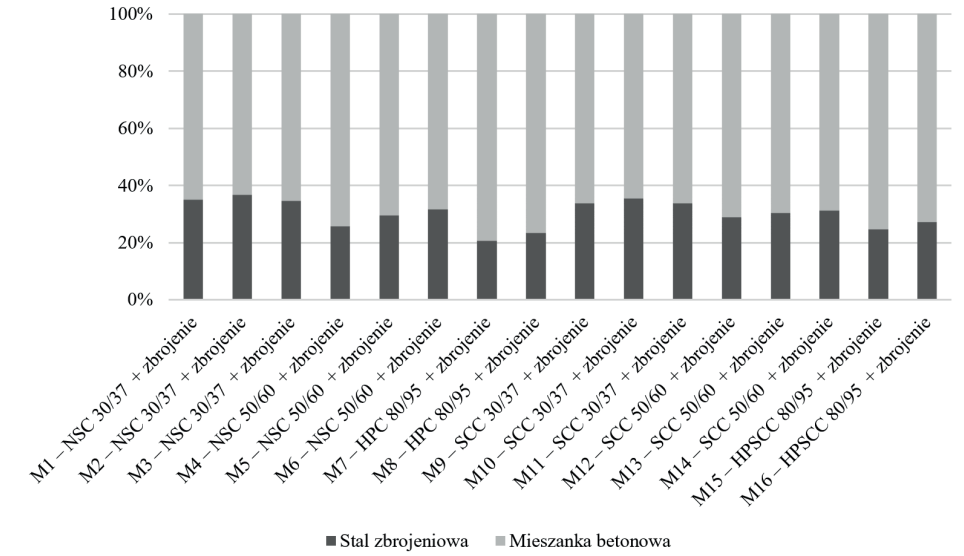
Rys. 5.4. Ceny jednostkowe materiału analizowanych mieszanek betonowych

Na rysunku 5.5 przedstawiono udział poszczególnych komponentów w jednostkowej cenie mieszanki betonowej. Największy udział mają cement (średnio 46%) i kruszywo (średnio 23%). Domieszki i dodatki, mimo niewielkiego udziału ilościowego w składzie, mogą znacząco podnosić cenę jednostkową mieszanki. W niektórych przypadkach ich łączny udział w całkowitych cenach jednostkowych przekracza 30%, co szczególnie widoczne jest w przypadku mieszanek betonów samozagęszczalnych i mieszanek betonów wysokowartościowych.

Na rysunku 5.6 przedstawiono udział procentowy ceny mieszanki betonowej oraz stali zbrojeniowej w łącznej cenie jednostkowej konstrukcji żelbetowej dla różnych klas betonu. W zależności od klasy betonu i rodzaju mieszanki udział stali zbrojeniowej w cenie jednostkowej waha się od ok. 21% do 37%. Najwyższy względny udział ceny jednostkowej stali odnotowano w wariantach o niższej klasie betonu (np. C30/37). W przypadku mieszanek wyższych klas (C80/95), mimo znacząco wyższych cen mieszanki betonowej, udział stali zbrojeniowej utrzymuje się na poziomie ok. 30%.



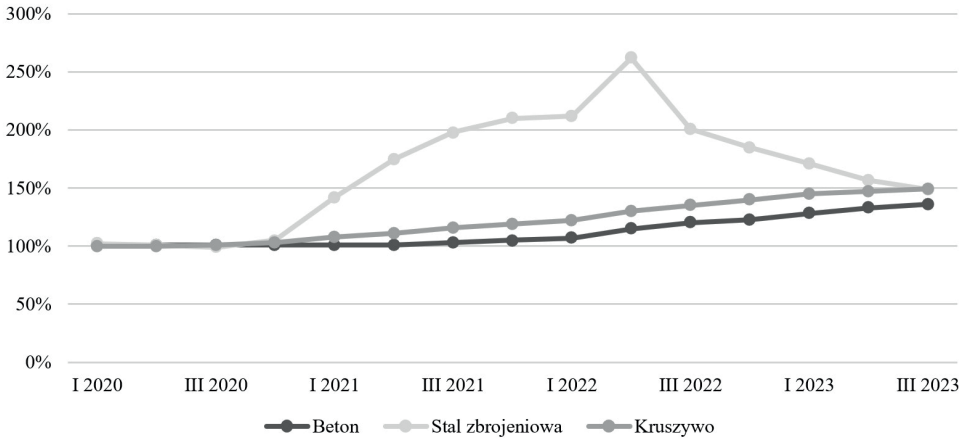
Rys. 5.5. Udział poszczególnych składników mieszanki betonowej w jej całkowitej cenie jednostkowej



Rys. 5.6. Struktura jednostkowej ceny m³ żelbetu

Na podstawie danych rynkowych (Raport CAS 2023) przeanalizowano zmiany cen jednostkowych betonu, stali zbrojeniowej oraz kruszywa (rys. 5.7). Jako punkt odniesienia

przyjęto IV kwartał 2019 r. Analiza obejmowała okres od początku 2020 r. do III kwartału 2023 r. Uwzględniono okres od początku 2020 r. do III kwartału 2023 r., czyli m.in. czas istotnych zmian gospodarczych wywołanych pandemią COVID-19 i jej skutkami.



Rys. 5.7. Zmiany cen jednostkowych betonu, stali zbrojeniowej i kruszywa w okresie od I kw. 2020 r. do III kw. 2023 r. (względem IV kw. 2019 r.) (Raport CAS 2023)

Warto zauważyć, że w analizowanym okresie, mimo globalnej niestabilności gospodarczej, ceny jednostkowe betonu oraz kruszywa wykazywały relatywnie stabilny wzrost. Wahania w tych dwóch grupach materiałowych były minimalne, a zmiany miały charakter stopniowy i względnie jednorodny.

Inaczej wyglądała sytuacja w przypadku stali zbrojeniowej, której cena jednostkowa w analizowanym okresie charakteryzowała się dużą zmiennością. Od początku 2021 r. odnotowano gwałtowny wzrost, który osiągnął szczyt w II kwartale 2022 r. Następnie nastąpiła stopniowa korekta, jednak nawet pod koniec 2023 r. ceny jednostkowe stali pozostawały istotnie wyższe niż w okresie odniesienia. Można przypuszczać, że na tak dużą zmienność wpłynęły czynniki zewnętrzne, takie jak globalne zakłócenia w łańcuchach dostaw, wzrost kosztów energii, a także wahania popytu na rynkach międzynarodowych.

Analiza wskazuje, że cena stali zbrojeniowej jest bardziej wrażliwa na zmiany rynkowe niż ceny materiałów o lokalnych łańcuchach dostaw, takich jak beton i kruszywo, co powinno być uwzględniane w prowadzonych analizach kosztów, m.in. w analizie ryzyka.

6. Kryterium społeczne w zrównoważonej ocenie konstrukcji żelbetowych

6.1. Standardy i wytyczne dotyczące oceny społecznej

Badania w obszarze zrównoważonego rozwoju w przedsięwzięciach budowlanych koncentrują się obecnie na aspektach technicznych, środowiskowych i kosztowych w cyklu życia, natomiast znacznie mniejsza grupa prac dotyczy aspektów społecznych, mimo że ich oddziaływanie może być znaczące (Abdel-Raheem i Ramsbottom 2016). Występowanie oraz zakres oddziaływania przedsięwzięcia budowlanego na społeczeństwo powinny być analizowane w formie usystematyzowanej oceny, analogicznie do procedur stosowanych przy ocenie oddziaływań środowiskowych i kosztowych.

Pierwsze globalne wytyczne dotyczące społecznej analizy cyklu życia produktów (S-LCA) zostały opublikowane przez UNEP w 2009 r. Dokument został opracowany przez Program Środowiskowy ONZ (UNEP) we współpracy z Towarzystwem Toksykologii Środowiskowej i Chemii (SETAC). Celem wytycznych było opracowanie ram metodologicznych umożliwiających przeprowadzanie analiz S-LCA w sposób spójny, porównywalny i praktyczny – zarówno w badaniach naukowych, jak i w zastosowaniach przemysłowych. Obecnie dostępne są zaktualizowane wytyczne (Raport UNEP 2021), określające interesariuszy, których należy uwzględnić w ocenie. Wskazują one oddziaływania społeczne istotne dla poszczególnych grup oraz formalizują metodyczne podejście do oceny. Kategorie interesariuszy to podstawowe grupy społeczne, dla których przeprowadza się analizę wpływu w ramach zdefiniowanych podkategorii oddziaływania społecznego (tab. 6.1).

Analiza powinna obejmować cykl życia produktu – od wydobycia surowców, przez produkcję, użytkowanie, aż po utylizację – oraz może być dostosowywana do różnych kontekstów społeczno-gospodarczych. Metodyka ta opiera się na dwóch podejściach (Raport UNEP 2021):

– *Reference Scale Assessment* (RS S-LCIA) − podejście polega na porównywaniu obserwowanych warunków społecznych z uznanymi normami i standardami. Metoda ta nie modeluje ścieżek przyczynowo-skutkowych, a stosowane progi referencyjne określają minimalnie akceptowalne warunki.
– *Impact Pathway Assessment* (IP S-LCIA) − metoda oparta na modelowaniu zależności przyczynowo-skutkowych. Polega na analizie, w jaki sposób działalność gospodarcza wpływa na konkretne skutki społeczne, takie jak dobrostan społeczeństwa, zdrowie czy kapitał społeczny. W podejściu tym wyróżnia się tzw. punkty pośrednie (ang. *midpoints*)

oraz punkty końcowe (ang. *endpoints*) oddziaływań. Metoda ta wymaga wykorzystania danych ilościowych oraz próby odtworzenia powiązań pomiędzy działaniami przedsiębiorstwa a ich wpływem społecznym.

Metodyka S-LCA opracowana przez UNEP/SETAC stanowi narzędzie oceny aspektów społecznych w cyklu życia produktów przemysłowych (Santos et al. 2019). Mimo że narzędzie to jest wykorzystywane w różnych kontekstach i zastosowaniach, ogólny odsetek stosowania tych wytycznych jest niski – wynosi około 8% (Larsen et al. 2022). Barierą w stosowaniu tej metody może być jej obszerny zakres i trudności w pozyskaniu danych do rzetelnego przeprowadzenia oceny.

Tabela 6.1

Kategorie interesariuszy i podkategorie oceny S-LCA
(opracowanie własne na podstawie Raport UNEP 2021)

Kategoria interesariuszy		**Podkategorie**
1.	pracownicy	1.1. Wolność zrzeszania się i rokowania zbiorowe. 1.2. Praca dzieci. 1.3. Godziwe wynagrodzenie. 1.4. Godziny pracy. 1.5. Praca przymusowa. 1.6. Równość szans / dyskryminacja. 1.7. Zdrowie i bezpieczeństwo. 1.8. Świadczenia socjalne / zabezpieczenia społeczne. 1.9. Relacja zatrudnienia. 1.10. Molestowanie seksualne. 1.11. Drobni rolnicy/plantatorzy
2.	społeczność lokalna	2.1. Dostęp do zasobów materialnych. 2.2. Dostęp do zasobów niematerialnych. 2.3. Delokalizacja i migracja. 2.4. Dziedzictwo kulturowe. 2.5. Bezpieczne i zdrowe warunki życia. 2.6. Poszanowanie praw ludności rdzennej. 2.7. Zaangażowanie społeczności. 2.8. Lokalna zatrudnialność. 2.9. Bezpieczne warunki życia
3.	podmioty w łańcuchu wartości	3.1. Uczciwa konkurencja. 3.2. Promowanie odpowiedzialności społecznej. 3.3. Relacje z dostawcami. 3.4. Poszanowanie praw własności intelektualnej. 3.5. Dystrybucja dochodów
4.	konsumenci	4.1. Zdrowie i bezpieczeństwo. 4.2. Mechanizmy informacji zwrotnej. 4.3. Prywatność konsumentów. 4.4. Przejrzystość. 4.5. Odpowiedzialność za koniec życia produktu

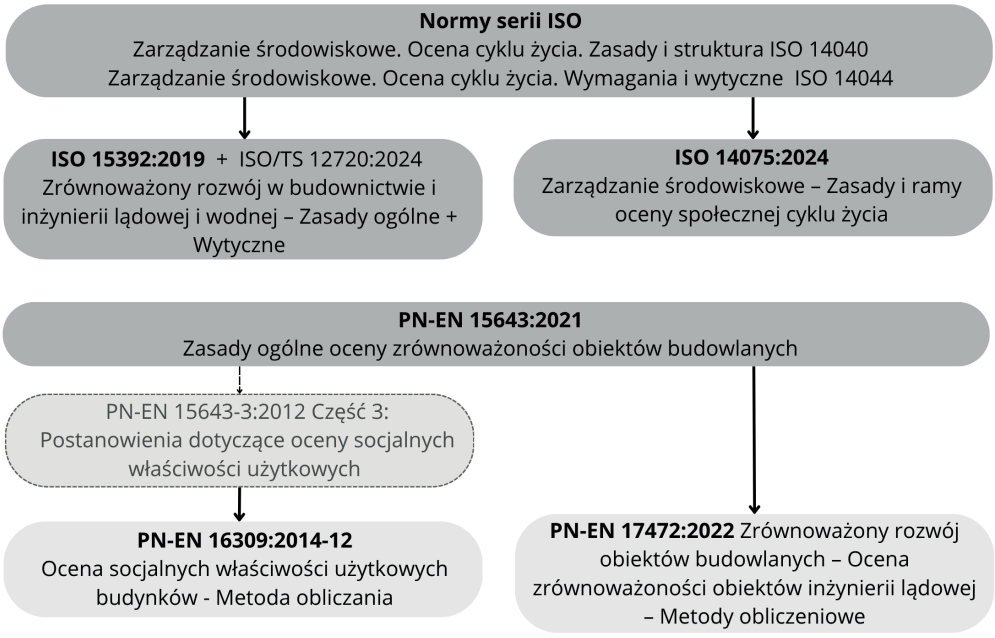
Tabela 6.1 cd.

Kategoria interesariuszy		Podkategorie
5.	społeczeństwo ogółem	5.1. Publiczne zobowiązania w kwestiach zrównoważonego rozwoju. 5.2. Wkład w rozwój gospodarczy. 5.3. Zapobieganie konfliktom zbrojnym. 5.4. Rozwój technologii. 5.5. Korupcja. 5.6. Etyczne traktowanie zwierząt. 5.7. Łagodzenie ubóstwa
6.	dzieci	6.1. Edukacja w społeczności lokalnej. 6.2. Zdrowie dzieci jako konsumentów. 6.3. Kwestie dzieci w kontekście praktyk marketingowych

Produkcja budowlana w wielu aspektach sugeruje podobieństwo do produkcji przemysłowej, co wskazuje na możliwość stosowania ogólnych ram oceny społecznej. Niemniej jednak ze względu na cechy sektora budowlanego podejście to może okazać się niewystarczające. Produkcja w budownictwie charakteryzuje się stosunkowo długim czasem realizacji, a sam produkt, jakim jest obiekt budowlany, cechuje się bardzo długim cyklem życia. Przedsięwzięcia budowlane mają najczęściej jednostkowy i zindywidualizowany charakter, są silnie zróżnicowane pod względem skali i funkcji, realizowane w zmiennej lokalizacji i odmiennych warunkach, co wyraźnie odróżnia je od standardowych zadań produkcyjnych.

Obecnie ocena S-LCA w budownictwie jest rozpatrywana z punktu widzenia różnych stron (interesariuszy) przedsięwzięcia budowlanego oraz przy zastosowaniu odmiennych zbiorów kryteriów oceny społecznej. Wskazuje się m.in. na potrzebę prowadzenia oceny pod kątem dobrostanu pracowników i przyszłych użytkowników obiektów budowlanych, z uwzględnieniem takich aspektów, jak emocje, spokój, satysfakcja, bezpieczeństwo i komfort, umiejętności, zdrowie, wiedza i motywacja (Abidin 2009). Jako wskaźniki aspektów społecznych w ocenie zrównoważonego budownictwa wskazuje się także: równość, zdrowie, prawa człowieka, edukację, wymogi projektowe dotyczące przestrzeni użytkowej, bezpieczeństwo, kulturę, dostępność i udział interesariuszy (Kamaruddin et al. 2020). Można również znaleźć poszerzoną listę interesariuszy, która – oprócz pracowników, lokalnej społeczności oraz użytkownika obiektu – wyszczególnia również uczestników łańcucha wartości, społeczeństwo i dzieci. W ich przypadku w kryteriach oceny uwzględniono prawa człowieka, warunki pracy, zdrowie i bezpieczeństwo, dziedzictwo kulturowe, ład korporacyjny oraz skutki społeczno-ekonomiczne (Barbero et al. 2024). Różnorodność tych podejść świadczy o braku jednolitej metodyki w zakresie społecznej oceny cyklu życia w sektorze budowlanym. Jak wskazują badania Arcese et al. (2018) brak jest dominującego stanowiska w odniesieniu do metodologii S-LCA, a sam obszar badawczy pozostaje silnie rozproszony.

Normy i wytyczne dotyczące oceny społecznego cyklu życia (S-LCA) w budownictwie (rys. 6.1) pozostają obecnie na poziomie ogólnym i nie obejmują szczegółowych wymagań niezbędnych do kompleksowej oceny. Mimo to stanowią one punkt odniesienia dla analiz z zakresu społecznego wymiaru zrównoważonego rozwoju. Kluczowe zasady i struktura oceny cyklu życia (LCA), pierwotnie ujęte w normach ISO 14040:2006 oraz ISO 14044:2006, odnoszą się przede wszystkim do aspektów środowiskowych produktów, usług i procesów. Metodologia przedstawiona w tych normach jest obecnie rozszerzana na analizę aspektów społecznych. Norma ISO 14075:2024 stanowi rozwinięcie tego podejścia, przedstawiając dostosowanie klasycznego LCA do specyfiki społecznej oceny cyklu życia produktu. Natomiast norma ISO 15392:2019 stanowi ogólne podstawy teoretyczne i definicyjne dla zrównoważonego rozwoju w budownictwie i inżynierii lądowej, obejmując trzy filary: środowiskowy, społeczny i ekonomiczny, nie wskazując jednak szczegółów oceny społecznej – nie definiuje konkretnych wskaźników ani metod pomiaru.



Rys. 6.1. Podstawy normatywne dla oceny S-LCA

Szczególne znaczenie dla praktycznej realizacji ocen społecznych w budownictwie ma norma PN-EN 16309+A1:2014, uszczegóławiająca wcześniejszą PN-EN 15643-3:2012 (zastąpioną przez ogólną normę PN-EN 15643:2021). Norma ta dotyczy oceny efektywności społecznej wszystkich typów budynków – zarówno nowych, jak i istniejących. Ocena ta koncentruje się wyłącznie na fazie użytkowania budynku (moduły B1–B7). Mimo że norma

ta ogranicza ocenę do etapu użytkowania, rzeczywiste wyniki i efektywność społeczna budynku są w dużej mierze uzależnione od decyzji podejmowanych już na wczesnych etapach procesu inwestycyjnego – w fazie przedprojektowej i projektowej. Ocena aspektów społecznych na etapie użytkowania dotyczy m.in. dostępności, adaptowalności i utrzymania obiektów (Radziejowska 2021). Kryteria główne i podrzędne w ocenie społecznej według normy PN-EN 16309+A1:2014 przedstawiono w tabeli 6.2.

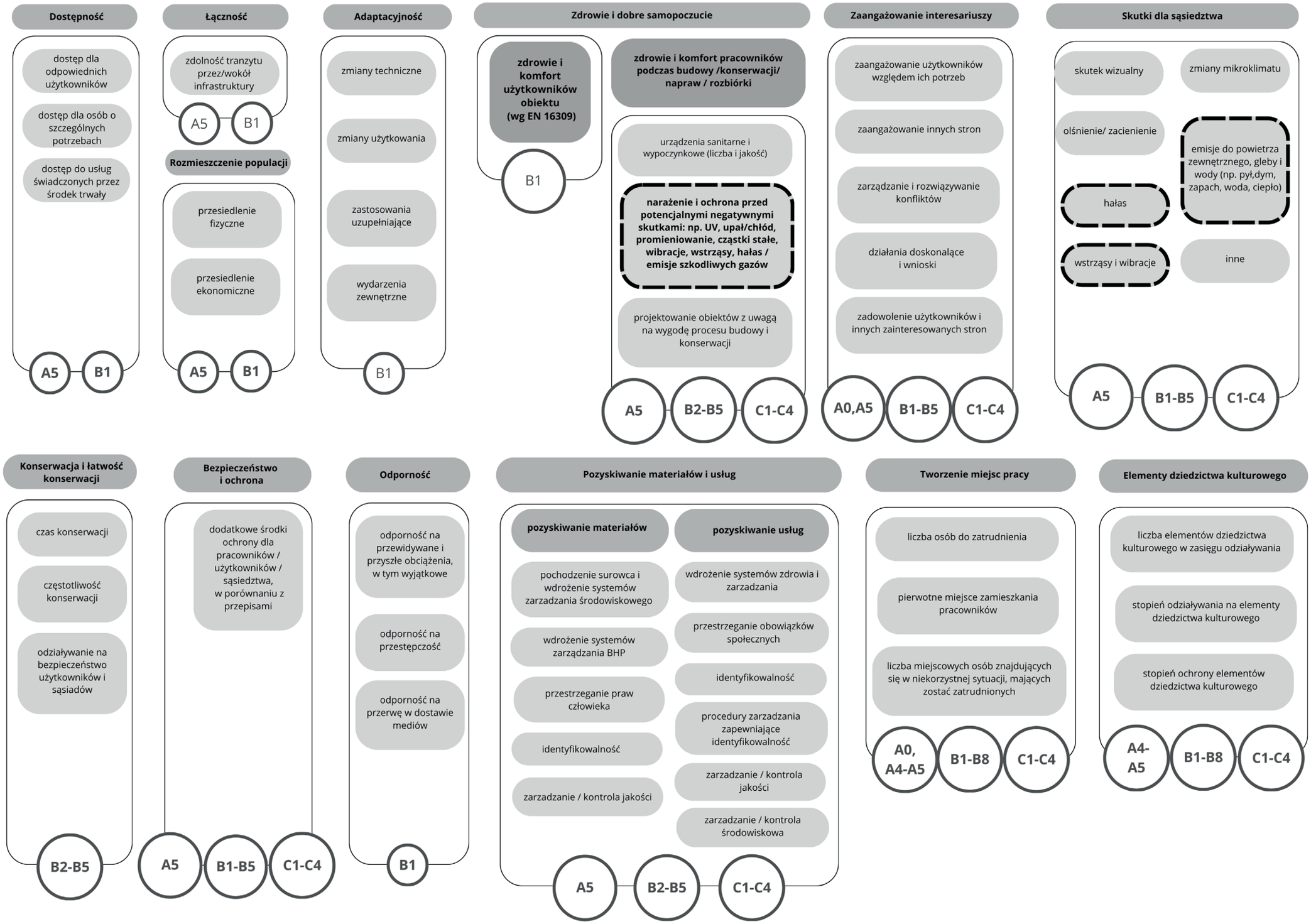
W normie PN-EN 16309:2014+A1 wskazano, że analiza aspektów społecznych w przyszłości powinna obejmować także dwie kolejne kategorie: pozyskiwanie materiałów i usług oraz zaangażowanie interesariuszy. W załączniku C tej normy znajdują się propozycje kryteriów, które obejmują dodatkowo fazy produkcji oraz wyjścia obiektu z użytkowania. W zakresie oceny pozyskiwanych materiałów i usług analiza ma uwzględniać m.in. legalność pochodzenia i produkcji materiałów, uprawnienia do świadczenia usług, bezpieczeństwo pracy oraz aspekty jakościowe i środowiskowe. Osobną kategorią oceny społecznej ma być zaangażowanie interesariuszy, obejmujące zapewnienie możliwości udziału zainteresowanych stron w procesie podejmowania decyzji dotyczących realizacji budynku. Do tej pory jednak nie powstała nowelizacja tej normy, a wskazania załącznika mogą stanowić jedynie sugestie dotyczące uwzględnienia faz innych niż użytkowanie konstrukcji w analizie S-LCA.

Szerszy zestaw kryteriów oceny wpływów społecznych inwestycji infrastrukturalnych został ujęty w normie PN-EN 17472:2022, dedykowanej obiektom budowlanym inżynierii lądowej[3]. Na rysunku 6.2 (na wklejce) przedstawiono zestawienie kategorii i kryteriów wraz z ich przyporządkowaniem do odpowiednich modułów cyklu życia. Kategorie te obrazują szeroki zakres analizy wpływów społecznych, zgodny z ramowymi założeniami oceny społecznej cyklu życia według zaleceń UNEP/SETAC (2009). Norma uwzględnia różne grupy interesariuszy, w tym pracowników, użytkowników, społeczność lokalną oraz uczestników łańcucha wartości. Odnosi się do konkretnych kategorii wpływu społecznego, takich jak zdrowie, prawa człowieka, partycypacja społeczna czy warunki pracy, oraz obejmuje pełny cykl życia analizowanego obiektu.

Pomimo kompleksowego podejścia do zagadnienia zrównoważenia infrastruktury, zastosowanie normy PN-EN 17472:2022 w zakresie oceny aspektów społecznych napotyka w praktyce na liczne bariery. Wysoka złożoność procesu oceny oraz szczegółowość wymaganych danych ograniczają możliwości jej praktycznego wdrożenia.

Podejście S-LCA nie dysponuje jeszcze w pełni ugruntowanymi standardami interpretacyjnymi ani prostymi, dostępnymi narzędziami ilościowego pomiaru. Ponadto brak określonych wartości progowych wskaźników społecznych powoduje trudności w porównywaniu wyników ocen, co obniża praktyczną użyteczność normy. Dotychczasowe zastosowania normy w tym zakresie mają charakter raczej eksperymentalny lub akademicki, co wyraźnie wskazuje na potrzebę dalszego rozwoju i doprecyzowania normy, tak aby mogła stać się powszechnie stosowanym narzędziem w codziennej praktyce inżynierskiej.

[3] Budowle inne niż budynki, które są trwale związane z gruntem i pełnią funkcje infrastrukturalne, techniczne lub przemysłowe (PN-EN 17472:2022).



Rys. 6.2. Zestaw kryteriów oceny socjalnej wg PN-EN 17472:2022 dedykowanej obiektom inżynierskim

Tabela 6.2

Zakres S-LCA wg PN-EN 16309+A1:2014

Kategoria		Podkategoria	Opis
1.	dostępność	– dostępność dla osób ze szczególnymi potrzebami, – dostęp do usług budynkowych	Ocenie podlega stopień dostępności budynku i jego otoczenia dla osób o ograniczonej sprawności. Uwzględnia się m.in. dojazd, dojście, podjazdy, wejścia, windy, szerokość korytarzy i schodów, a także dostępność infrastruktury wewnętrznej – sanitariatów, instalacji i systemów komunikacyjnych. Istotne jest także położenie względem transportu publicznego i parkingów
2.	adaptowalność	– łatwość przystosowania do innego sposobu użytkowania	Oceniana jest możliwość zmiany aranżacji pomieszczeń (np. przestawne ściany działowe), funkcji przestrzeni (np. lokal mieszkalny na użytkowy), dobudowy lub nadbudowy. Sprawdza się też łatwość dostosowania do indywidualnych potrzeb (np. montaż windy, poręczy) oraz możliwość modernizacji instalacji technicznych bez gruntownej przebudowy. Istotna jest również trwałość materiałów umożliwiająca wielokrotne remonty
3.	zdrowie i komfort	– charakterystyka cieplna, – jakość powietrza wewnętrznego, – charakterystyka akustyczna, – komfort wizualny, – charakterystyka przestrzenna	Kategoria ta obejmuje kluczowe parametry środowiska wewnętrznego wpływające na zdrowie i komfort. Ocenia się: komfort termiczny (temperatura, wilgotność, brak przeciągów), jakość powietrza (wentylacja, poziom CO_2, zapachy), akustykę (izolacyjność i pogłos), komfort wizualny (oświetlenie, widoki) oraz warunki przestrzenne (ergonomia, układ pomieszczeń)
4.	oddziaływanie na otoczenie	– hałas, – emisje, – lśnienie/zacienienie, – wstrząsy/wibracje	Oceniane są potencjalne uciążliwości budynku dla otoczenia, takie jak: hałas (z urządzeń lub wnętrza), emisje zanieczyszczeń (dym, zapachy, pyły), uciążliwości świetlne (nocne oświetlenie, odblaski), przysłanianie światła słonecznego oraz wibracje i wstrząsy. Uwzględnia się też wpływ na estetykę otoczenia i infrastrukturę lokalną
6.	bezpieczeństwo i ochrona	– odporność na zmiany klimatu, – odporność na zdarzenia losowe (trzęsienia ziemi, wybuchy, pożary, zderzenia drogowe), – bezpieczeństwo osobiste i ochrona przed wtargnięciem oraz wandalizmem, – ochrona przed przerwami w dostawach mediów	Kategoria ta dotyczy bezpieczeństwa konstrukcji, ludzi i mienia. Ocenia się m.in.: niezawodność dostaw mediów (np. awaryjne zasilanie), odporność na zmiany klimatu i katastrofy (np. wichury, powodzie), zabezpieczenia przeciwpożarowe (czujki, wyjścia ewakuacyjne), ochronę przed włamaniem (monitoring, ogrodzenia) oraz codzienne bezpieczeństwo użytkowania (balustrady, antypoślizgowe posadzki)

Tabela 6.2 cd.

Kategoria		Podkategoria	Opis
5.	utrzymanie	– konserwacja	Ocena obejmuje łatwość konserwacji i organizację prac utrzymaniowych: czyszczenie i dostęp do elementów budynku, możliwość prowadzenia prac bez zakłóceń dla użytkowników, częstotliwość i czas trwania konserwacji, bezpieczeństwo prac oraz dostępność urządzeń i dokumentacji technicznej

6.2. Czynniki wpływające na ocenę społeczną konstrukcji żelbetowych

Mimo szerokiego zakresu aspektów społecznych podlegających znormalizowanej ocenie – zarówno dla budynków (PN-EN 16309+A1:2014), jak i dla obiektów budowlanych inżynierii lądowej (PN-EN 17472:2022) – tylko nieliczne z nich będą ulegały zróżnicowaniu na etapie projektowania konstrukcji żelbetowych. Znacząca część kryteriów, np. z kategorii dostępności, łączności czy adaptacyjności, będzie determinowana przed wszystkim w fazie koncepcyjnej przedsięwzięcia budowlanego, na etapie decyzji projektowych dotyczących formy i funkcji obiektu, jego układu przestrzennego czy standardu użytkowego. Z kolei za skalę oddziaływań społecznych w obszarze tworzenia miejsc pracy, pozyskiwania materiałów i usług oraz zaangażowania interesariuszy odpowiadać będą decyzje podejmowane na szczeblu kierowniczym w fazie realizacji inwestycji.

Analizując zbiór aspektów społecznych w procesie oceny konstrukcji żelbetowych, na które realny wpływ mają decyzje projektanta konstrukcji (przy założonym wcześniej ekwiwalencie funkcjonalno-użytkowym), mierzalnymi i różnicującymi wybrane warianty konstrukcyjno-materiałowe będą przede wszystkim kryteria: hałas, wibracje i zapylenie (oznaczone na rysunku 6.2 linią przerywaną – rysunek na wklejce). Zbiór tych kryteriów wraz z modułami, w których mogą wystąpić, przedstawiono w tabeli 6.3.

Tabela 6.3

Wybrane kryteria oceny S-LCA do zintegrowanej oceny konstrukcji żelbetowych

Kryterium	Podkryterium	Uzasadnienie
Zdrowie i dobre samopoczucie (zdrowie i komfort pracowników)	hałas	A5 – hałas z procesu pompowania i zagęszczania mieszanki betonowej C1–C4 – hałas z procesu rozbiórki i kruszenia betonu
	wibracje	A5 – wibracje z procesu zagęszczania mieszanki betonowej C1–C4 – wibracje z procesu rozbiórki i kruszenia gruzu
	zapylenie	C1–C4 – zapylenie z procesu rozbiórki i kruszenia betonu
Skutki dla sąsiedztwa	hałas	A5 – hałas z procesu pompowania i zagęszczania mieszanki betonowej C1–C4 – hałas z procesu rozbiórki i kruszenia betonu
	zapylenie	C1–C4 – zapylenie z procesu rozbiórki i kruszenia betonu

6.2.1. Hałas

Hałas generowany podczas realizacji prac budowlanych, szczególnie w procesie układania mieszanki betonowej, stanowi istotne źródło uciążliwości społecznych i zagrożeń zdrowotnych. Nadmierna ekspozycja na hałas może prowadzić do negatywnych skutków dla zdrowia fizycznego i psychicznego pracowników, takich jak pogorszenie słuchu, stres, zaburzenia snu oraz spadek koncentracji. Jednocześnie hałas stanowi czynnik zakłócający codzienne funkcjonowanie społeczności lokalnych, wpływając na komfort ich życia i postrzeganie inwestycji budowlanej (Engel 1993).

Wskaźnik hałasu może być uwzględniony w analizie S-LCA za pośrednictwem dawki ekspozycji na hałas wyznaczanej zgodnie ze wzorem:

$$D = 100\% \cdot \frac{T}{T_{ref}} \cdot 2^{\frac{L_p - L_{gr}}{3}} \tag{6.1}$$

gdzie:

T_{ref} – czas odniesienia (np. 8 h dla pracy),
T – czas ekspozycji na hałas,
L_p – modelowy poziom dźwięku [dB],
L_{gr} – poziom odniesienia (normowy poziom hałasu) [dB].

Wzór (6.1) wywodzi się z modelu krotności normatywnej ekspozycji na hałas. Model opiera się na założeniu, że przyrost poziomu dźwięku o 3 dB odpowiada podwojeniu energii hałasu, co stanowi powszechnie przyjmowaną zasadę w akustyce środowiskowej i zawodowej. Model ten uwzględnia zarówno czas trwania ekspozycji, jak i wartość poziomu dźwięku w odniesieniu do dopuszczalnych limitów, co umożliwia oszacowanie skumulowanego ryzyka oddziaływania hałasu na pracownika (Rączkowski 2009; Sobotka i Sagan 2021).

Poziom dźwięku na stanowisku pracy L_p lub w sąsiedztwie budowy można obliczyć na podstawie charakterystyki źródła dźwięku i odległości od tego źródła, przy założeniu propagacji fali kulistej ograniczonej przez powierzchnię ziemi, zgodnie ze wzorem (Rączkowski 2009):

$$L_p = L_{WA} + 10\lg\Phi - 10\lg\Omega - 20\lg\frac{r}{r_0} \tag{6.2}$$

gdzie:

L_{WA} – równoważny poziom mocy akustycznej źródła dźwięku skorygowany charakterystyką A (charakterystyka sprzętu) [dB],
Φ – współczynnik kierunkowości źródła (w tym przypadku $\Phi = 2$),
Ω – kąt bryłowy, w którym zachodzi propagacja dźwięku (dla przyjętego modelu 2π),
r_0 – promień odniesienia ($r_0 = 1$ m).
r – odległość od źródła do odbiorcy hałasu.

W przypadku pracy kilku źródeł jednocześnie, należy obliczyć łączny poziom ciśnienia akustycznego L_{eq} (Everest i Pohlmann 2020), definiowany wzorem:

$$L_{eq} = 10 \cdot \lg\left(\sum_i 10^{0{,}1 \cdot L_i}\right) \tag{6.3}$$

gdzie L_i oznacza sumowane poziomy hałasu [dB].

Dopuszczalny poziom ekspozycji na hałas dla pracowników, odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy, nie może przekroczyć 85 dB (Dz.U. 2018, poz. 1286), natomiast dopuszczalny poziom hałasu w środowisku zależy od rodzaju zabudowy terenu i należy go przyjmować adekwatnie do charakteru sąsiedztwa – w zakresie od 45 dB do 55 dB (tab. 6.4).

Tabela 6.4

Dopuszczalne poziomy hałasu w środowisku (Dz.U. 2014 poz. 112)

Rodzaj terenu	Dopuszczalny poziom hałasu [dB]
– strefa ochronna „A" uzdrowiska, – tereny szpitali poza miastem	45
– tereny zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej, – tereny zabudowy związanej ze stałym lub czasowym pobytem dzieci i młodzieży, – tereny domów opieki społecznej, – tereny szpitali w miastach	50
– tereny zabudowy mieszkaniowej wielorodzinnej i zamieszkania zbiorowego, – tereny zabudowy zagrodowej, – tereny rekreacyjno-wypoczynkowe, – tereny mieszkaniowo-usługowe, – tereny w strefie śródmiejskiej miast powyżej 100 tys. mieszkańców	55

6.2.2. Wibracje

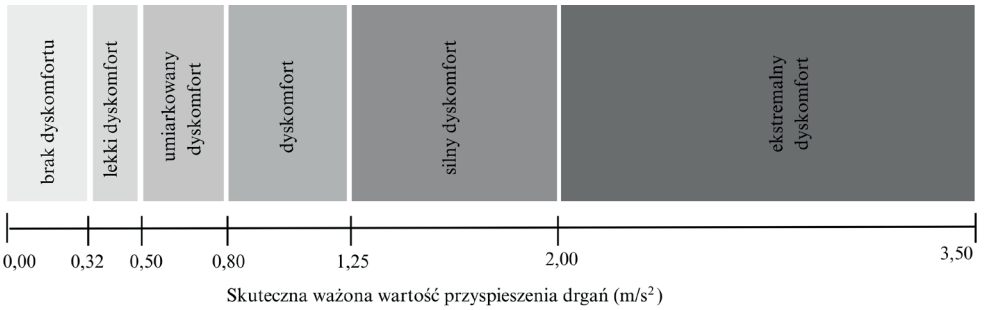
Wibracje mechaniczne oddziałujące na ciało człowieka w środowisku pracy są uznawane za czynnik szkodliwy, mogący prowadzić do poważnych skutków zdrowotnych. Długotrwała ekspozycja na drgania, szczególnie o charakterze miejscowym (oddziałujące na kończyny górne) lub ogólnym (przenoszone przez stopy, nogi lub tułów w pozycji siedzącej), może prowadzić do zaburzeń układu mięśniowo-szkieletowego, krążeniowego i nerwowego, a także powodować zmęczenie oraz spadek wydolności psychofizycznej (Rączkowski 2009). Typowym parametrem oceny wpływu wibracji na pracownika jest skuteczne, skorygowane (ważone) przyspieszenie drgań, analizowane z punktu widzenia drgań przenoszonych przez kończyny górne oraz drgań oddziałujących na całe ciało. Wartość skuteczną przyspieszenia ważonego drgań działających na człowieka podczas 8-godzinnego dnia pracy, można wyznaczyć na podstawie wzoru (6.4) (PN-EN 14253:2003):

$$A(8) = a_{hw} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0}} \tag{6.4}$$

gdzie:

T – rzeczywisty czas ekspozycji (w sekundach),
a_{hw} – skuteczna wartość ważona przyspieszenia drgań (m/s^2),
T_0 – czas odniesienia (8 h = 28 800 s).

Klasyfikację poziomu komfortu w odniesieniu do ważonego przyspieszenia skutecznego drgań całego ciała według normy ISO 2631-1:1997 przedstawiono na rysunku 6.3. Wartości do 0,32 m/s² klasyfikowane są jako brak dyskomfortu, natomiast wartości przyspieszenia powyżej 2,0 m/s² – jako ekstremalny dyskomfort, wskazujący na znaczne pogorszenie warunków użytkowania.



Rys. 6.3. Klasyfikacja poziomu komfortu
(opracowanie własne na podstawie ISO 2631-1:1997)

6.2.3. Zapylenie

Zapylenie powietrza w środowisku pracy stanowi zagrożenie zdrowotne dla pracowników budowlanych oraz czynnik uciążliwości dla otoczenia inwestycji. Pyły zawieszone, szczególnie należące do frakcji respirabilnej ($PM_{2,5}$) i wdychalnej (PM_{10}), mogą penetrować drogi oddechowe, prowadząc do schorzeń układu oddechowego, pogorszenia funkcji płuc, przewlekłych stanów zapalnych oraz zwiększonego ryzyka chorób sercowo-naczyniowych (Rączkowski 2009). Zanieczyszczenie powietrza pyłem stanowi istotny czynnik wpływający na postrzeganie inwestycji przez społeczność lokalną, obniżając jakość życia w jej otoczeniu.

Dopuszczalne stężenia pyłów w kontekście bezpieczeństwa i higieny pracy są określane przez akty prawne i normy ustalające najwyższe dopuszczalne stężenia (NDS) substancji chemicznych i pyłów w środowisku pracy. W Polsce podstawowym dokumentem regulującym te kwestie jest Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. 2018, poz. 1286). W regulacjach tych wyróżnia się dwa rodzaje pyłów:

– pyły całkowite (frakcja całkowita),
– pyły respirabilne (frakcja respirabilna) – cząstki zdolne do penetracji dolnych dróg oddechowych.

W przypadku pyłów niespecyficznych dopuszczalne średnie stężenie pyłu respirabilnego wynosi 3,0 mg/m³, natomiast dla pyłu całkowitego – 10,0 mg/m³.

6.3. Jednostkowa ocena społeczna konstrukcji żelbetowych w cyklu życia

6.3.1. Model oceny oddziaływania hałasu

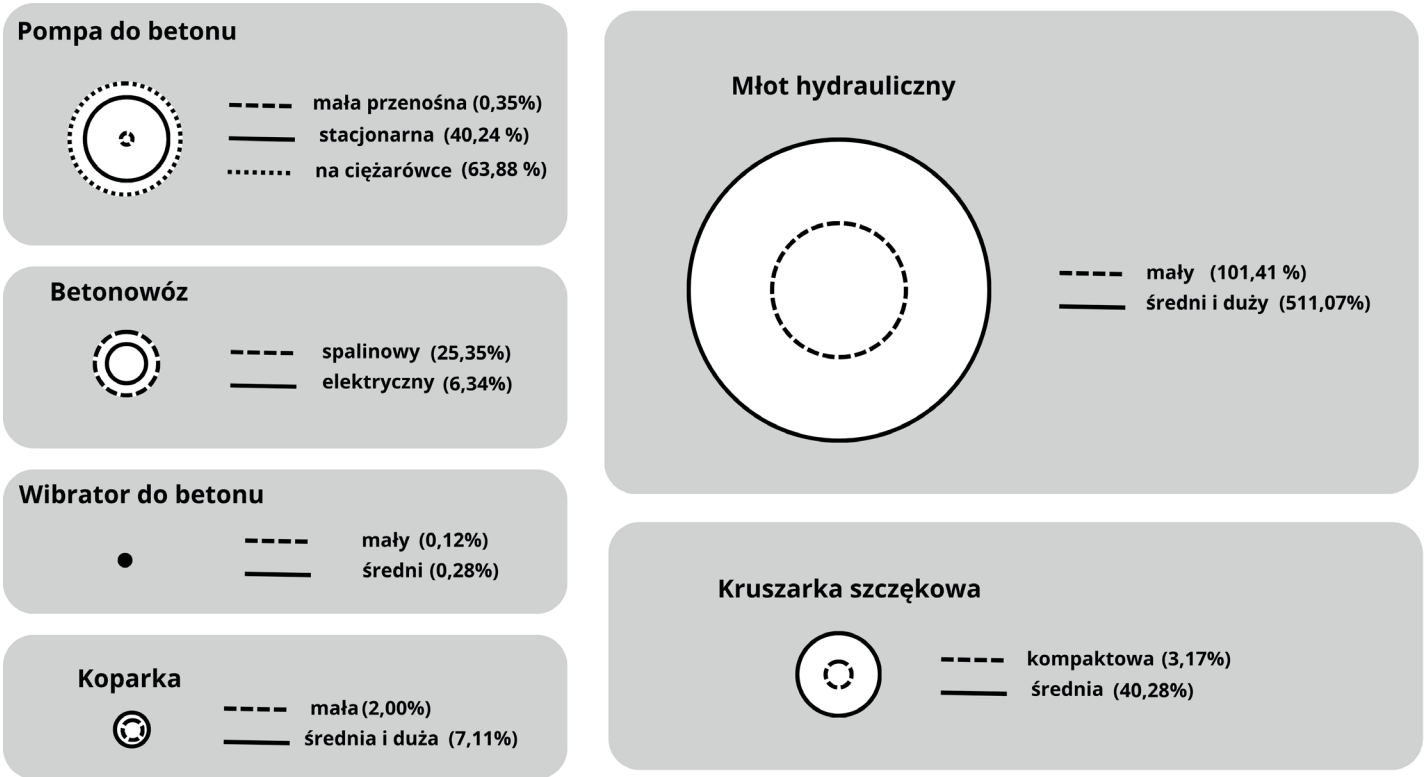
W ocenie konstrukcji żelbetowych istotnym czynnikiem społecznym jest poziom hałasu generowanego podczas realizacji robót budowlanych, wpływający zarówno na warunki pracy, jak i na otoczenie inwestycji. W tabeli 6.5 zestawiono przykładowe charakterystyki wydajnościowe i akustyczne sprzętu stosowanego podczas robót związanych z układaniem mieszanki betonowej, a także prac rozbiórkowych i procesów kruszenia betonu, określone na podstawie danych katalogowych i literaturowych.

Tabela 6.5

Wybrane parametry techniczne maszyn i urządzeń budowlanych

Rodzaj	Typ	Wydajność techniczna [m^3/h]	Poziom mocy akustycznej [dB]
Pompa do betonu	małe pompy przenośne	20–50	74–103
	pompy stacjonarne	30–100	105–113
	pompy montowane na ciężarówkach	70–160	107–115
Betonowóz	spalinowy	–	102–112
	elektryczny	–	98–104
Wibrator do betonu	mały (elektryczny)	5–10	76–92
	średni	15–30	80–95
Młot hydrauliczny na koparce	małe	3–5	110–116
	średnie i duże	5–8	116–124
Kruszarka szczękowa	kompaktowa	42–83	96–100
	średnia	83–146	108–110
Koparka	mała	20–40	94–98
	średnia i duża	40–150	97–106

Dane wskazują na zróżnicowanie poziomu mocy akustycznej generowanej przez poszczególne rodzaje sprzętu budowlanego, co może stanowić istotny czynnik przy ocenie ich wpływu społecznego. Najwyższe poziomy hałasu generują młoty hydrauliczne montowane na koparkach, zwłaszcza o dużej i średniej wydajności.



Rys. 6.4. Dawka hałasu dla różnych maszyn budowlanych w czasie 1 h pracy

Istotnymi źródłami hałasu są również pompy do betonu i kruszarki szczękowe, charakteryzujące się wysokim poziomem i szerokim zakresem wartości mocy akustycznej. Mniejsze oddziaływanie mają betonowozy, przy czym wersje spalinowe generują wyższy hałas niż ich nowoczesne elektryczne odpowiedniki. Koparki natomiast charakteryzują się stosunkowo niewielkim zróżnicowaniem mocy akustycznej w zależności od wielkości. Należy pamiętać, że ze względu na logarytmiczny charakter skali decybelowej zmiana poziomu mocy akustycznej o 1 dB nie powoduje liniowej zmiany oddziaływania hałasu na otoczenie. Skalę oddziaływania hałasu zobrazowano na rysunku 6.4, przedstawiając zależność dawki hałasu w odniesieniu do 1 godziny pracy poszczególnych maszyn wykorzystywanych w cyklu życia konstrukcji żelbetowych, przy stałej odległości odbiorcy od źródła wynoszącej 5 m.

Ekspozycję pracownika na hałas $D_{h,skum}$ wykorzystywaną w ocenie oddziaływania społecznego w kontekście konstrukcji żelbetowej, można wyrazić wzorem:

$$D_{h,skum} = 100\% \cdot \frac{V}{8q} \cdot 2^{\frac{L_{wa} - 4{,}96 - 20 \cdot \log(r) - 85}{3}} \tag{6.5}$$

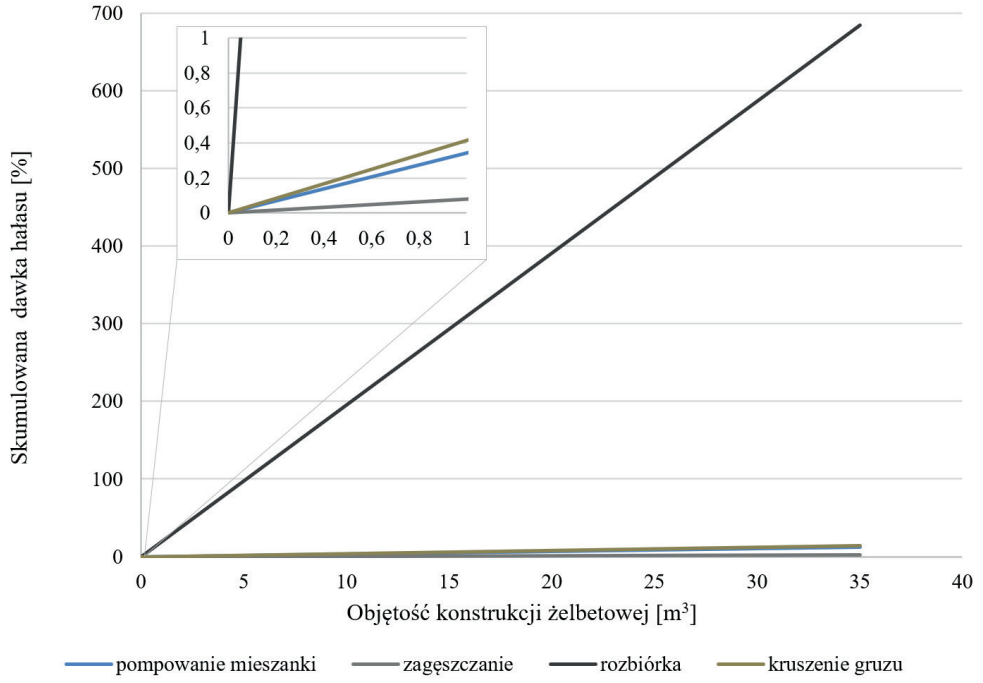
gdzie:

V – objętość konstrukcji żelbetowej [m^3],
q_k – wydajność eksploatacyjna maszyny [m^3/h],
L_{wa} – równoważny poziom mocy akustycznej źródła dźwięku, skorygowany charakterystyką A (charakterystyka sprzętu) [dB],
r – odległość od źródła dźwięku do pracownika,
85 dB – przyjęty normatywny poziom dopuszczalny ekspozycji w środowisku pracy,
8 h – standardowy czas pracy.

Dawkę hałasu najczęściej oblicza się na podstawie udziału godzin ekspozycji na hałas w stosunku do dnia pracy. Zaproponowany wskaźnik $D_{h,skum}$ nie ogranicza się do analizy jednego dnia – jego wartość w kolejnych dniach może odzwierciedlać skumulowany charakter uciążliwości. Wskaźnik ten może być zatem wykorzystany jako miara stopnia uciążliwości hałasu w odniesieniu do czynności związanych z cyklem życia konstrukcji żelbetowej.

Przy założeniu stałych parametrów emisji hałasu przez sprzęt (przyjęto wartości średnie dla maszyn i urządzeń z tabeli 6.5) oraz ustalonej odległości pracownika od źródła (tab. 6.6) możliwe jest wyznaczenie wskaźnika jednostkowego hałasu, zależnego od objętości realizowanych robót, co przedstawiono na rysunku 6.5.

Dla wybranych maszyn i urządzeń, przy założeniu modelowej odległości pracownika od źródła hałasu, wyznaczono dawkę hałasu oddziałującego na pracownika na 1 m^3 wykonania robót (tab. 6.6). Odległości przyjęto na podstawie powszechnej praktyki inżynierskiej związanej z wykonywaniem określonych typów robót. W analizie uwzględniono wartości środkowe przedziałów wydajności i poziomu mocy akustycznej źródła (maszyn i urządzeń). Wartości przedziałów wyznaczono na podstawie przeglądu katalogów producentów oraz raportów branżowych dotyczących poziomów hałasu maszyn budowlanych. W praktyce zarówno wydajność, jak i moc akustyczna stanowią indywidualne cechy poszczególnych modeli urządzeń.



Rys. 6.5. Dawka hałasu na pracownika w funkcji objętości robót

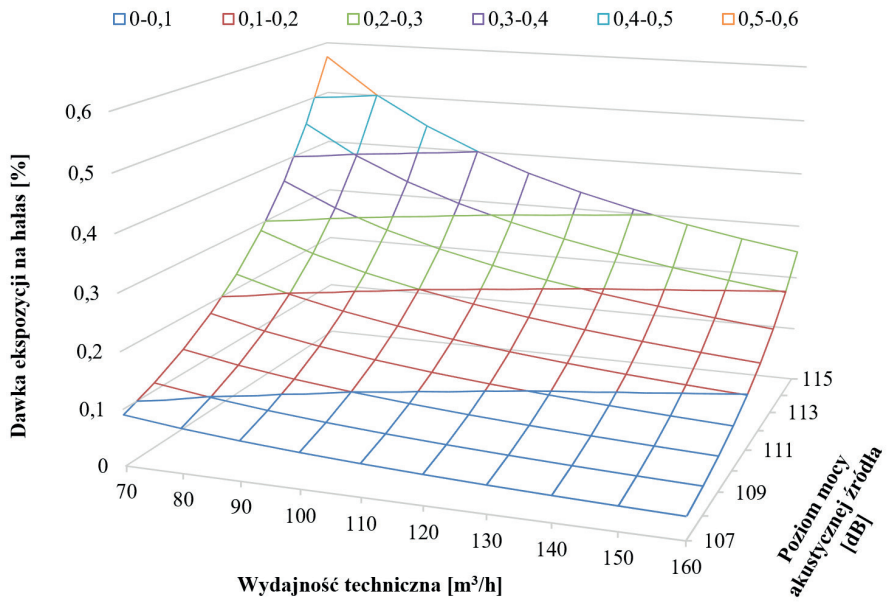
Tabela 6.6

Jednostkowa dawka hałasu dla pracownika

Nazwa procesu	Rodzaj sprzętu	Modelowa odległość pracownika od źródła [m]	Jednostkowa dawka hałasu na pracownika [% dziennej normy]
Pompowanie mieszanki	pompa do betonu + betonowóz	10	0,34
Zagęszczanie	wibrator do betonu	2	0,08
Rozbiórka	młot hydrauliczny na koparce	10	19,56
Kruszenie gruzu	kruszarka do betonu + koparka	5	0,41

Na rysunku 6.6 przedstawiono, jak jednostkowa dawka ekspozycji na hałas dla pompy do betonu zmienia się w zależności od jej wydajności i poziomu mocy akustycznej. Analiza ujawnia wyraźną zależność odwrotną między wydajnością a poziomem narażenia: im wyższa

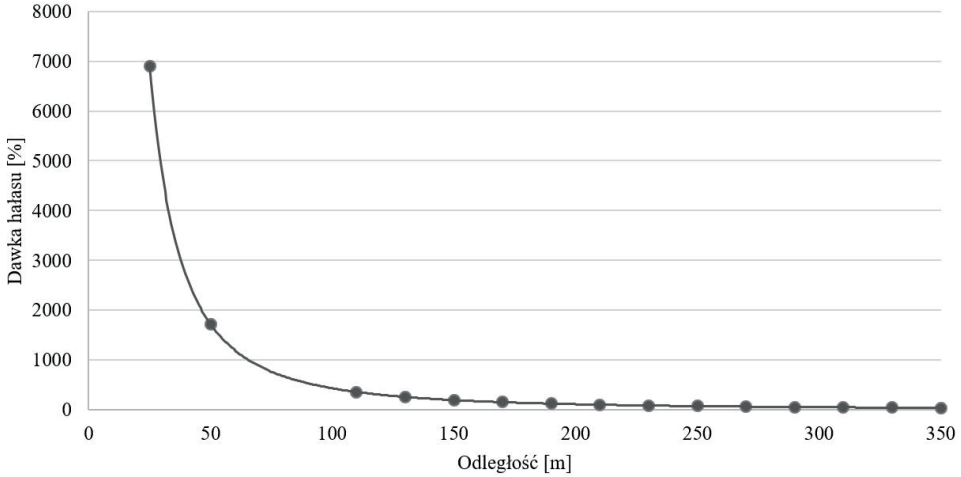
wydajność urządzenia, tym mniejsza dawka hałasu przypadająca na jednostkę wykonanej pracy. Jednocześnie wzrost poziomu mocy akustycznej powoduje istotne zwiększenie ekspozycji. Taka analiza umożliwia porównanie alternatywnych rozwiązań sprzętowych i wskazuje, że racjonalny dobór sprzętu, uwzględniający zarówno wydajność, jak i emisję hałasu, może znacząco ograniczyć narażenie pracowników na czynniki szkodliwe podczas realizacji robót budowlanych.



Rys. 6.6. Zależność jednostkowej dawki hałasu od wydajności technicznej pompy do betonu oraz poziomu mocy akustycznej źródła

Dla oceny oddziaływania hałasu na sąsiedztwo należy uwzględnić zarówno czas pracy, jak i odległość sąsiedztwa od miejsca prowadzenia procesów budowlanych. Odległość ta stanowi indywidualny parametr każdego przedsięwzięcia budowlanego. Na rysunku 6.7 przedstawiono zależność dawki hałasu emitowanego do środowiska od odległości od źródła przy robotach rozbiórkowych, stanowiących najbardziej uciążliwe źródło hałasu spośród wyszczególnionych procesów.

Wykres przedstawia wyraźną zależność malejącej dawki hałasu od wzrostu odległości od źródła emisji, co jest zgodne z fizyczną zasadą tłumienia fal akustycznych. Największy spadek obserwuje się w pierwszych 100 m, natomiast dalsze zwiększanie odległości (powyżej 150 m) powoduje stosunkowo niewielki, stabilizujący się spadek dawki hałasu. Można zatem stwierdzić, że kluczowe w ocenie oddziaływania hałasu jest najbliższe sąsiedztwo. W dalszej analizie jako odległość referencyjną do oceny wpływu procesów na sąsiedztwo przyjęto 200 m; dla tych założeń obliczono jednostkowy wskaźnik hałasu przedstawiony w tabeli 6.7. Należy jednak pamiętać, że odległość ta powinna być ustalana indywidualnie dla każdej analizowanej inwestycji.



Rys. 6.7. Przykładowa zależność dawki hałasu od odległości odbiorcy od źródła

Tabela 6.7

Jednostkowa dawka hałasu dla sąsiedztwa (200 m)

Nazwa procesu	Rodzaj sprzętu	Jednostkowa dawka hałasu dla sąsiedztwa (200 m) [% dziennej normy]
Pompowanie mieszanki	pompa do betonu + betonowóz	0,85
Zagęszczanie	wibrator do betonu VIBRASTAR	0,01
Rozbiórka	młot hydrauliczny na koparce	49,06
Kruszenie gruzu	kruszarka do betonu + koparka	0,26

Zastosowany model uwzględnia następujące uproszczenia:

- przyjęto model rozchodzenia się fali dźwiękowej w przestrzeni ograniczonej wyłącznie powierzchnią ziemi (bez uwzględniania innych obiektów);
- przyjęto wartości średnie przedziałów wydajności i poziomu mocy akustycznej źródeł;
- model uwzględnia uciążliwość jedynie dla głównego pracownika w procesie, na którego oddziałuje hałas;
- obliczenia oparto na wydajności technicznej maszyn, różniącej się od ich wydajności eksploatacyjnej.

Mimo tych uproszczeń przedstawiony model umożliwia odwzorowanie charakteru uciążliwości hałasu, a jego doszczegółowienie może stanowić kierunek dalszych badań. Na podstawie przeprowadzonej analizy można sformułować wniosek, że roboty wykonywane młotem hydraulicznym (rozbiórkowe) generują znacznie większe uciążliwości niż pozostałe

analizowane roboty oraz że istnieje możliwość ograniczenia uciążliwości hałasu przez odpowiedni dobór sprzętu, harmonogramowanie robót i organizację realizacji prac.

6.3.2. Model oceny oddziaływania wibracji

W rozpatrywanym cyklu życia konstrukcji żelbetowej pracownicy narażeni są na działanie drgań głównie podczas układania mieszanki betonowej oraz w trakcie robót rozbiórkowych i kruszenia betonu. Szczególnie istotnym źródłem narażenia jest stosowanie buławy wibracyjnej, przy której drgania przenoszą się bezpośrednio na kończyny górne operatora. Należy przy tym podkreślić, że długotrwałe oddziaływanie tych drgań może prowadzić do chorób zawodowych, co wymaga stosowania odpowiednich środków ochronnych i kontroli stanowisk pracy. Zgodnie z obowiązującymi przepisami (Dz.U. 2018, poz. 1286) analizę wpływu drgań przenoszonych na organizm człowieka przez ręce wykonuje się w dwóch wariantach ekspozycji:

– ekspozycja dzienna (do 8 h) – wartość dopuszczalna: 2,8 m/s²;
– ekspozycja krótkotrwała (do 30 min) – wartość dopuszczalna: 11,2 m/s².

W przypadku robót rozbiórkowych i procesów kruszenia betonu wibracje oddziałują na całe ciało operatorów maszyn, a obowiązujące normy w tym zakresie bardziej rygorystyczne i wynoszą:

– ekspozycja dzienna (do 8 h) – wartość dopuszczalna: 0,8 m/s²;
– ekspozycja krótkotrwała (do 30 min) – wartość dopuszczalna: 3,2 m/s².

Stopień oddziaływania wibracji na człowieka ocenia się na podstawie wartości skutecznej ważonej przyspieszenia drgań, będącej fizycznym parametrem określającym intensywność drgań mechanicznych oddziałujących bezpośrednio na organizm operatora maszyny. Wartość średnioważona przyspieszenia drgań zależy od budowy sprzętu, stopnia eksploatacji maszyn oraz warunków pracy. W tabeli 6.8 zaprezentowano przykładowy zakres wartości dla maszyn wykorzystywanych w procesach cyklu życia konstrukcji żelbetowej, ustalony na podstawie danych katalogowych i literaturowych.

Tabela 6.8

Skuteczne ważone przyspieszenia drgań dla wybranych maszyn

Rodzaj sprzętu	Proces	Wartość średnioważona przyspieszenia drgań [m/s²]	Zakres oddziaływań na operatora
Wibrator ręczny	zagęszczanie mieszanki	2,50–5,00	kończyna górna
Koparka	rozbiórka	2,95–3,63	całe ciało
	załadunek	0,13–0,47	całe ciało
Kruszarka	kruszenie	0,30–1,20	całe ciało

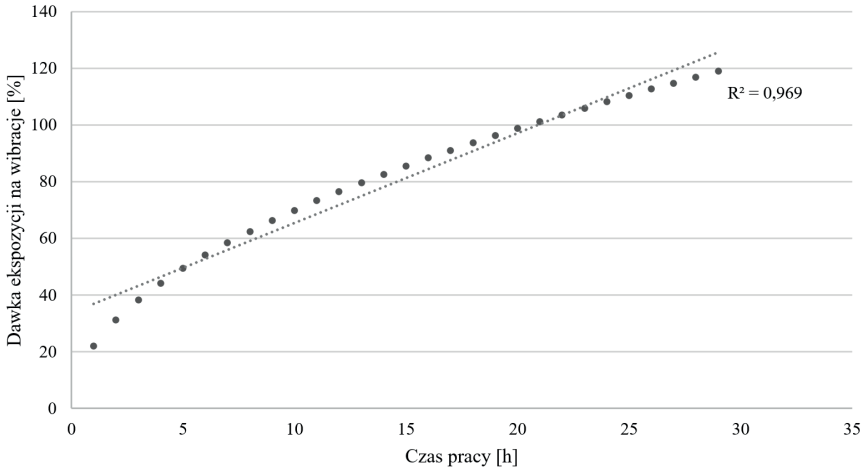
Analogicznie jak w przypadku obciążenia hałasem można zaproponować odzwierciedlenie poziomu wibracji za pomocą wskaźnika skumulowanej dawki wibracji , który można wyrazić wzorem:

$$D_{w,skum} = 100\% \cdot \frac{a_{hw} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0}}}{A_{dop}} \tag{6.6}$$

gdzie:

T – rzeczywisty czas ekspozycji [s];
a_{kw} – wartość ważona przyspieszenia drgań (m/s^2);
T_0 – czas odniesienia (8 h = 28 800 s);
A_{dop} – dopuszczalny poziom ekspozycji dziennej (dla 8 h pracy).

Na rysunku 6.8 zaprezentowano, jak zmienia się poziom dawki ekspozycji na wibracje w czasie, przy założonej wartości skutecznej ważonej przyspieszenia drgań równej 0,5 m/s^2. Czas pracy zależy od objętości robót, jak i od wydajności procesu. Decyzje projektanta konstrukcji, związane z wyborem rodzaju betonu oraz wymiarowaniem elementów, wpływają na objętość betonu do wbudowania, a tym samym warunkują skumulowaną dawkę ekspozycji podczas opisanych procesów. Analizowana funkcja nie ma charakteru idealnie liniowego, jednak dobrana linia trendu, charakteryzuje się zadowalającym współczynnikiem determinacji (R^2 = 0,97). Dlatego w dalszej części pracy zastosowano uproszczenie, posługując się wskaźnikiem jednostkowej dawki wibracji.



Rys. 6.8. Dawka ekspozycji na wibracje w funkcji czasu procesu

Na podstawie wzoru (6.6) wyznaczono modelową jednostkową dawkę ekspozycji na działanie wibracji, odniesioną do 1 m^3 betonu, wykorzystując medianę wydajności maszyn oraz ważonego przyspieszenia drgań (tab. 6.8). Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 6.9.

Tabela 6.9

Modelowa dawka ekspozycji na działanie wibracji

Nazw sprzętu	Proces	Jednostkowa dawka wibracji na pracownika [%]
Wibrator ręczny	zagęszczanie mieszanki	9,98
Koparka	rozbiórka	57,03
	załadunek	1,24
Kruszarka	kruszenie	3,10

Przedstawiony sposób oceny ekspozycji na wibracje (wzór (6.6)), wyrażający skumulowaną dawkę drgań w odniesieniu do normatywnego poziomu ekspozycji dziennej, umożliwia ilościową ocenę uciążliwości procesu zależną od modelowego czasu pracy i wartości ważonego przyspieszenia drgań. Zastosowany model zawiera następujące uproszczenia:

– przyjęto medianę wartości przyspieszeń drgań i wydajności procesów na podstawie danych katalogowych;
– nie uwzględniono wpływu czynników środowiskowych i ergonomicznych (np. pozycji operatora);
– model odnosi się do jednego operatora maszyny lub pracownika obsługującego urządzenie w danym procesie.

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że najwyższy poziom uciążliwości od wibracji występuje przy robotach rozbiórkowych wykonywanych koparką z młotem hydraulicznym, natomiast zagęszczanie mieszanki, jednoznacznie kojarzone z wibracjami, przy użyciu ręcznego wibratora generuje umiarkowane drgania o charakterze miejscowym. Podobnie jak w przypadku hałasu, ekspozycję na wibracje można ograniczyć przez dobór sprzętu o niższych poziomach emisji drgań, zastosowanie ograniczników transmisji drgań oraz optymalizację harmonogramu pracy. Dobór betonów samozagęszczalnych może przyczynić się do redukcji oddziaływania wibracji na pracowników, jednak kluczowe w ocenie pozostają oddziaływania związane z rozbiórką obiektu.

W przedstawionej analizie oddziaływania społecznego nie uwzględniono wpływu drgań generowanych podczas zagęszczania mieszanki betonowej ani typowych prac rozbiórkowych na sąsiedztwo prowadzonego przedsięwzięcia. Intensywność drgań propagowanych do otoczenia maleje wraz ze wzrostem odległości od źródła emisji, zazwyczaj osiągając poziomy poniżej istotnych wartości już w niewielkiej odległości – kilkunastu do kilkudziesięciu metrów. W efekcie oddziaływanie tych drgań na obiekty sąsiednie oraz komfort ich użytkowników uznano za pomijalne w kontekście niniejszej oceny społecznej.

6.3.3. Model oceny oddziaływania zapylenia

W procesach budowlanych związanych z cyklem życia konstrukcji żelbetowej zapylenie występuje przede wszystkim podczas rozbiórki betonowych elementów konstrukcji oraz w trakcie późniejszego przetwarzania gruzu betonowego. Obecnie w literaturze brak

jest danych dotyczących wskaźników emisji pyłów dla procesów rozbiórki konstrukcji żelbetowej i kruszenia gruzu betonowego, wyrażonych w odniesieniu do 1 m^3 betonu. Do oceny wielkości zapylenia posłużono się więc średnim wskaźnikiem emisji pyłu całkowitego dla procesów kruszenia skał twardych (granit, bazalt, piaskowiec), wynoszącym 2,7 g/Mg (US EPA, 2025). Do analizy przyjęto, że stężenie pyłu respirabilnego stanowi 7% masy pyłu całkowitego (Singhal i Goel 2022).

W celu oszacowania względnej wielkości dawki pyłu emitowanego podczas robót rozbiórkowych niezbędne było określenie jego stężenia w powietrzu. W tym celu wyznaczono kubaturę strefy roboczej, przyjmując jej objętość jako półelipsoidę o promieniach 10 m i 5 m. Założono, że proces rozbiórki konstrukcji żelbetowej będzie prowadzony przy równoczesnym zraszaniu wodą, co według dostępnych badań (Ham et al. 2024) pozwala ograniczyć emisję pyłu nawet o 85%. Ze względu na warunki robocze oraz realia prowadzenia procesu przyjęto, że redukcja poziomu zapylenia wyniesie 50%. Na podstawie powyższych założeń obliczono jednostkowe wskaźniki emisji pyłu na stanowisku roboczym dla procesów rozbiórki i kruszenia betonu, przedstawione w tabeli 6.10.

Tabela 6.10

Modelowa dawka ekspozycji na działanie pyłów

Proces	Rodzaj zapylenia	Jednostkowa dawka zapylenia [%]	Średnia jednostkowa dawka zapylenia [%]
Rozbiórka	pył całkowity	30,94	19,08
	pył respirabilny	7,22	
Kruszenie	pył całkowity	61,89	38,16
	pył respirabilny	14,44	

Zapylenie pochodzące z procesów budowlanych oddziałuje również na obszary sąsiadujące z miejscem realizacji inwestycji. W praktyce inżynierskiej do oceny jego poziomu w określonej odległości od źródła emisji stosuje się uproszczony model opisany równaniem (De Nevers 2017):

$$C(r) = C_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r} \right)^n \tag{6.7}$$

gdzie:

$C(r)$ – stężenie pyłu w odległości r od źródła,
C_0 – stężenie początkowe w odległości r_0,
N – wykładnik spadku zapylenia (typowo n = 1 do 2, w zależności od warunków środowiskowych).

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu (Dz.U. 2021 poz. 845) średnioroczny dopuszczalny poziom stężenia pyłów wynosi odpowiednio 25 µg/m^3 dla pyłu $PM_{2,5}$ oraz 40 µg/m^3

dla pyłu PM_{10}. Wartości te wykorzystano do określenia jednostkowej dawki ekspozycji na pył dla sąsiedztwa, przedstawionej w tabeli 6.11. Przyjęto odległość odbiorców od źródła emisji równą 200 m oraz wykładnik spadku zapylenia o wartości 1,5. W celu wyznaczenia udziału pyłu PM_{10} w całkowitym zapyleniu powietrza uwzględniono wyniki badań Kirkeskov, Hanskov i Brauer (2016), które wskazują, że frakcja PM_{10} stanowi od 40% do 70% pyłu całkowitego. W prezentowanych obliczeniach przyjęto wartość średnią równą 55%.

Tabela 6.11

Jednostkowa dawka zapylenia dla sąsiedztwa (odległość 200 m)

Proces	Rodzaj zapylenia	Jednostkowa dawka zapylenia dla sąsiedztwa [%]	Średnia jednostkowa dawka zapylenia [%]
Rozbiórka	pył całkowity (PM_{10})	38,68	21,5
	pył respirabilny ($PM_{2,5}$)	4,33	
Kruszenie	pył całkowity (PM_{10})	42,55	25,6
	pył respirabilny ($PM_{2,5}$)	8,66	

Harmonogram realizacji robót budowlanych i rozbiórkowych istotnie wpływa na poziom zapylenia środowiska pracy oraz obszarów sąsiadujących. Poziom stężeń pyłów w powietrzu zależy od intensywności i czasu prowadzenia operacji pyłotwórczych oraz od bieżących warunków meteorologicznych. Najwyższe stężenia pyłów występują podczas mechanicznego kruszenia betonu, zwłaszcza w fazie wzmożonej aktywności rozbiórkowej. Realizacja tego typu prac równocześnie na wielu stanowiskach lub ich prowadzenie w przestrzeniach zamkniętych bez odpowiedniego rozłożenia w czasie może prowadzić do efektu kumulacji zapylenia. Taka sytuacja zwiększa ryzyko ekspozycji pracowników na frakcję pyłu respirabilnego, co przekłada się na wzrost zagrożenia chorobami układu oddechowego. Właściwe opracowanie harmonogramu uwzględniającego sekwencjonowanie robót pyłotwórczych (np. realizację operacji kruszenia poza okresami wzmożonej obecności ludzi), wprowadzenie przerw technologicznych umożliwiających sedymentację pyłu oraz prowadzenie tych robót w sprzyjających warunkach meteorologicznych lub z zastosowaniem urządzeń zraszających może skutecznie obniżyć poziom zapylenia i ograniczyć ekspozycję zarówno pracowników, jak i osób postronnych.

Przeprowadzona analiza emisji pyłu podczas prac rozbiórkowych została wykonana niezależnie od klasy betonu zastosowanego w konstrukcji. Można jednak przypuszczać, że ilość emitowanego pyłu będzie się różniła w zależności od klasy betonu, głównie ze względu na różnice w składzie mieszanki, jej wytrzymałości, a tym samym podatności na kruszenie. Należy zaznaczyć, że obecnie w literaturze przedmiotu brakuje szczegółowych danych ilościowych pozwalających precyzyjnie określić wpływ klasy betonu na poziom emisji pyłów w trakcie prac rozbiórkowych.

6.3.4. Analiza oceny społecznej konstrukcji żelbetowej

W celu ilościowej oceny aspektów społecznych, na które wpływ mają decyzje podejmowane na etapie projektowania konstrukcji żelbetowej, zaproponowano metodykę uwzględniającą trzy główne wskaźniki: hałas, wibracje i zapylenie. Dla każdego aspektu określono jednostkowe wskaźniki ekspozycji, odniesione do obowiązujących wartości normatywnych, przy jednoczesnym uwzględnieniu parametrów technicznych używanych maszyn oraz przyjętych warunków środowiskowych.

Aby umożliwić porównywanie rozwiązań konstrukcyjnych z perspektywy skumulowanego oddziaływania społecznego, zaproponowano wskaźnik Socpoint, uwzględniający zarówno wpływ na pracowników, jak i na otoczenie prowadzonej inwestycji. Wskaźnik ten obliczany jest zgodnie ze wzorem (6.8) jako suma ważona trzech składowych, reprezentujących kategorie uciążliwości społecznej uwzględniane w ocenie:

$$S = \frac{\left(w_{Hp} \cdot S_{Hp} + w_{wp} \cdot S_{wp} + w_{pp} \cdot S_{pp}\right) + \left(w_{Hs} \cdot S_{Hs} + w_{ps} \cdot S_{ps}\right)}{2} \tag{6.8}$$

gdzie:

S_{Hp}, w_{sp}, S_{pp} – wskaźniki hałasu, wibracji, zapylenia dla pracownika,
S_{Hs}, S_{ps} – wskaźniki hałasu i zapylenia dla sąsiedztwa,
w_{Hp}, w_{wp}, w_{pp} – wagi dla uciążliwości hałasu, wibracji, zapylenia dla pracowników,
w_{Hs}, w_{ps} – wagi dla uciążliwości hałasu i zapylenia dla sąsiedztwa,

przy czym:

$$S_x = \sum_{i=1}^{n} V_i \cdot s_i \tag{6.9}$$

gdzie:

S_x – skumulowana wartość danego rodzaju uciążliwości w cyklu życia,
s_i – jednostkowy wskaźnik (np. dawka hałasu, wibracji, zapylenia) dla *i*-tego procesu w cyklu życia [% normy/m³],
V_i – objętość robót dla danego procesu *i*-tego.

Wagi przypisane poszczególnym rodzajom uciążliwości zostały znormalizowane zgodnie z założeniami wzorów:

$$w_{Hp} + w_{wp} + w_{pp} = 1 \tag{6.10}$$

$$w_{Hs} + w_{ps} = 1 \tag{6.11}$$

W tabeli 6.12 zestawiono wyniki wskaźników jednostkowych dla pracowników i sąsiedztwa oraz sumaryczny wskaźnik jednostkowy uciążliwości w cyklu życia konstrukcji żelbetowej, obliczony dla założonych wartości technicznych maszyn i urządzeń oraz odległości pracowników i sąsiedztwa od źródeł.

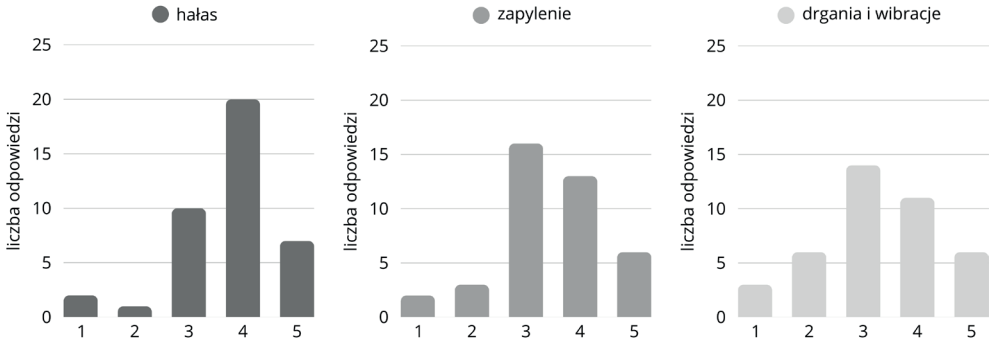
Tabela 6.12

Wskaźniki jednostkowe uciążliwości s_i

Wskaźnik / proces			Pompowanie betonu	Zagęszczanie	Rozbiórka	Kruszenie	Sumaryczny wskaźnik jednostkowy *i*-tej uciążliwości w cyklu życia
Pracownik	hałas	[% normy/m^3 betonu]	0,34	0,08	19,56	0,41	20,39
	wibracje		–	9,98	57,03	3,10	70,11
	zapylenie		–	–	19,08	38,16	57,24
Sąsiedztwo	hałas		0,85	0,01	49,06	0,26	50,18
	zapylenie		–	–	21,50	25,60	47,10

W celu określenia względnej istotności poszczególnych uciążliwości społecznych w analizie S-LCA konstrukcji żelbetowych przeprowadzono dwa niezależne badania ankietowe. Badaniami objęto dwie grupy interesariuszy: kierowników i inżynierów budowy oraz przedstawicieli społeczności lokalnej. Respondentów poproszono o ocenę trzech czynników: hałasu, wibracji i zapylenia w skali od 0 (brak uciążliwości) do 5 (najwyższy poziom uciążliwości).

Pierwszą grupę stanowili kierownicy i inżynierowie budów, których doświadczenie zawodowe pozwala na rzetelną ocenę wpływu wymienionych czynników na warunki pracy na placu budowy. Ankietę skierowano do 120 absolwentów kierunku budownictwo na Akademii Górniczo-Hutniczej, uzyskując 40 kompletnych odpowiedzi (rys. 6.9).

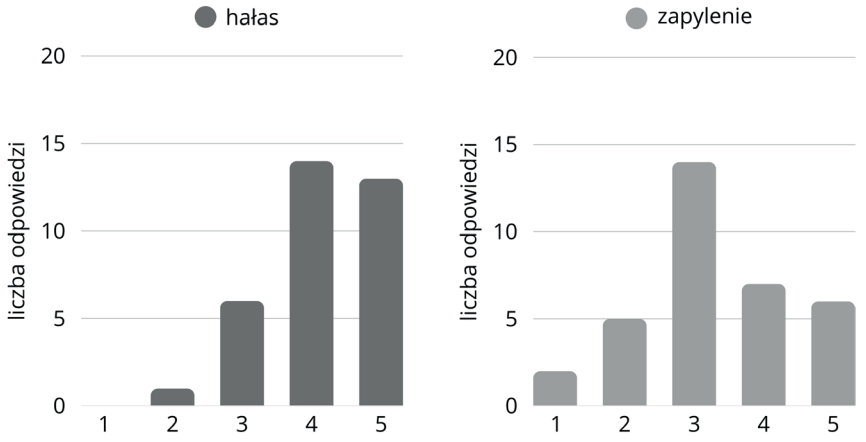


Rys. 6.9. Ocena kierowników budów uciążliwości hasłu, zapylenia i wibracji dla pracowników

Druga ankieta została skierowana do osób fizycznych (społeczności lokalnej) w celu uzyskania subiektywnej oceny uciążliwości analizowanych czynników z perspektywy otoczenia. W badaniu wzięło udział 100 osób, z czego uzyskano 34 kompletne odpowiedzi (rys. 6.10).

Na podstawie uzyskanych rezultatów obliczono średnie wartości ocen dla każdego kryterium, a następnie je znormalizowano, co posłużyło do wyznaczenia jednostkowych wskaźników

oceny społecznej konstrukcji żelbetowych, zestawionych w tabeli 6.13. Wskaźniki wyznaczono osobno dla betonu zwykłego i betonu samozagęszczalnego, którego oddziaływanie w obszarze hałasu i wibracji jest mniejsze ze względu na brak procesu zagęszczania mieszanki betonowej.



Rys. 6.10. Ocena respondentów uciążliwości hasłu i zapylenia dla otoczenia budowy

Tabela 6.13

Obliczenia ważonych sumarycznych wskaźników jednostkowych uciążliwości

Rodzaj betonu	Grupa	Wskaź-nik	Waga	Sumaryczny wskaźnik jednostkowy uciążliwości w cyklu życia	Ważony sumaryczny wskaźnik jednostkowy uciążliwości w cyklu życia	Jednostkowy wskaźnik oceny socjalnej (na 1 m^3 betonu)
Beton zwykły	pracownik	hałas	0,35	20,39	48,01	48,17
		wibracje	0,33	70,11		
		zapylenie	0,31	57,24		
	sąsiedztwo	hałas	0,55	50,18	48,32	
		zapylenie	0,44	47,10		
Beton samo-zagęszczalny	pracownik	hałas	0,35	20,31	44,69	46,50
		wibracje	0,33	60,13		
		zapylenie	0,31	57,24		
	sąsiedztwo	hałas	0,55	50,17	48,31	
		zapylenie	0,44	47,10		

Przedstawiona analiza ilościowej oceny oddziaływania hałasu, wibracji i zapylenia ma ograniczenia wynikające z przyjętych uproszczeń modelowych i założeń metodycznych. W analizie zastosowano uśrednione wartości emisji hałasu oraz wibracji dla wybranych typów maszyn budowlanych oraz przyjęto typowe odległości między źródłem emisji a odbiorcami. W praktyce parametry te mogą się znacznie różnić w przypadku innych obiektów budowlanych i odmiennych warunków lokalizacyjnych. Przyjęte uśrednione wartości współczynników zapylenia mogą nie odzwierciedlać rzeczywistych warunków konkretnej inwestycji, zwłaszcza ze względu na brak dokładnych danych ilościowych dotyczących wpływu klasy betonu na emisję pyłu. Aby precyzyjnie odwzorować oddziaływania społeczne w innych konstrukcjach żelbetowych, należałoby dostosować parametry analizy do specyficznych warunków danej inwestycji, uwzględniając rzeczywiste odległości, charakterystykę sprzętu oraz szczegółowe warunki środowiskowe i organizacyjne. Dalsze badania i pozyskanie szczegółowych danych eksperymentalnych mogłyby znacząco zwiększyć dokładność i użyteczność zaproponowanej metodyki oceny społecznej.

7. Systemy wspomagania decyzji w zrównoważonej ocenie konstrukcji żelbetowych

7.1. Podstawowe kryteria wyboru wariantu projektowego

Współczesne budownictwo stoi przed wyzwaniem zrównoważonego rozwoju, wymagającym jednoczesnego uwzględnienia aspektów środowiskowych, ekonomicznych i społecznych inwestycji. Według prognoz Fundacji Ellen MacArthur, jeśli obecne trendy się utrzymają, do 2050 r. nowe budynki mogą odpowiadać za niemal połowę emisji CO_2 sektora budowlanego (wzrost z ok. 28% obecnie), a globalne zużycie surowców może osiągnąć 90 mld ton rocznie, przekraczając możliwości regeneracyjne planety (Sánchez-Garrido et al. 2022).

Tradycyjnie decyzje projektowe koncentrowały się przede wszystkim na kryteriach technicznych (nośności, trwałości) oraz ekonomicznych, natomiast kwestie środowiskowe i społeczne traktowano drugorzędnie. W ostatnich latach rośnie jednak świadomość, że osiągnięcie celów zrównoważonego rozwoju wymaga równoczesnego uwzględnienia trzech filarów – środowiska, ekonomii i społeczeństwa. W odpowiedzi na te potrzeby pojawiły się metody szacowania oddziaływań w cyklu życia obiektu w trzech obszarach: analiza kosztów cyklu życia, analiza oddziaływań środowiskowych oraz dopiero rozwijana społeczna ocena cyklu życia. Choć metody S-LCA wymagają dalszych badań, integracja kryteriów społecznych z tradycyjnymi kryteriami projektowymi staje się coraz istotniejsza dla pełnej oceny wariantów konstrukcyjnych. Konieczne jest zatem zastosowanie metod umożliwiających ocenę wariantów w sposób wielokryterialny, uwzględniający równocześnie aspekty środowiskowe, kosztowe i społeczne, przy jednoczesnym zachowaniu właściwości technicznych (Ibadov 2020). W tym celu można zastosować szereg metod wspomagania decyzji wielokryterialnych (ang. *Multi-Criteria Decision Making*, MCDM), pozwalających porównywać alternatywne rozwiązania według zdefiniowanych kryteriów i wybierać rozwiązania optymalne (Trzaskalik 2014; Radziszewska-Zielina 2016; Nowotarski et al. 2021).

7.2. Złożone metody wspomagania decyzji stosowane w budownictwie

Wielokryterialna analiza decyzyjna stanowi uporządkowane podejście do rozwiązywania problemów decyzyjnych z wieloma (nierzadko konfliktowymi) kryteriami oceny (Alam Bhuiyan i Hammad 2023). W literaturze opisano wiele metod MCDA – od klasycznych

technik po współczesne podejścia hybrydowe – łączących różne metody w celu uwzględnienia zarówno danych ilościowych, jak i subiektywnych preferencji decydentów. Typowy proces MCDA obejmuje: sformułowanie zbioru alternatywnych wariantów decyzji, zdefiniowanie kryteriów oceny, ocenę każdego wariantu pod względem tych kryteriów, określenie ich ważności oraz agregację wyników w celu uszeregowania lub wyboru najlepszej alternatywy.

Procedura analizy wielokryterialnej rozpoczyna się od określenia celu, względem którego nastąpi rankingowanie wariantów W_i. Cel analizy decyzyjnej w projektach budowlanych jednoznacznie określa, jakie kryteria zostaną wykorzystane do oceny wariantów, co bezpośrednio wpływa na końcowy wynik (Yau 2009). Określony cel determinuje zbiór kryteriów oceny K_j, ułatwiający poszukiwanie rozwiązania najkorzystniejszego w danych warunkach. Każdy wariant jest reprezentowany przez wartość x_{ij}, stanowiącą jego miarę względem kryterium K_j. Zdefiniowanie kryteriów wymaga analizy problemu decyzyjnego z różnych perspektyw, wskazujących istotne z punktu widzenia celu badań warunki, jakie powinny spełniać przyjęte warianty. Praktyka inżynierska wskazuje, że osiągnięcie wyniku spełniającego wszystkie kryteria jednocześnie jest niezwykle trudne. Ostateczny rezultat analizy wielokryterialnej jest więc efektem kompromisu pomiędzy przyjętymi kryteriami, co jest typowe w projektach budowlanych (Jaini i Utyuzhnikov 2017).

Następnie przeprowadzana jest identyfikacja alternatyw, obejmująca wskazanie wariantów, które zostaną poddane analizie, ocenę ich względem przyjętych kryteriów i porównanie ich pod kątem stopnia realizacji nadrzędnego celu (Nithya et al. 2024). Liczba analizowanych wariantów może być różna w zależności od celu analizy. W projektach budowlanych kluczowym elementem jest wyraźne określenie dostępnych opcji projektowych lub technologicznych, umożliwiających porównanie i wybór najlepszej alternatywy. Jeżeli celem jest ranking elementów określonego zbioru, zaleca się uwzględnienie wszystkich możliwych wariantów. W sytuacji, gdy celem jest wybór jednej najlepszej alternatywy, często możliwe jest wykluczenie mniej korzystnych opcji już na wczesnym etapie. Zazwyczaj etap identyfikacji alternatyw sprowadza się do wskazania przez decydenta kilku możliwych rozwiązań wraz z krótkim uzasadnieniem ich wyboru. Wynik analizy wielokryterialnej pomaga wówczas w wyborze najlepszej opcji spośród wybranych, co niekoniecznie musi być tożsame z wynikiem uzyskanym po analizie wszystkich możliwych wariantów.

Analizowane kryteria mogą mieć charakter ilościowy lub jakościowy, dlatego alternatywy oceniane są zarówno na podstawie parametrów mierzalnych, jak i niemierzalnych. Aby możliwe było ich porównanie, każdemu kryterium przypisuje się niemianowane wartości liczbowe w procesie normalizacji (Krishnan 2022). Normalizacja stanowi niezbędny krok w analizie wielokryterialnej, gdyż umożliwia zestawienie różnorodnych danych i ich porównanie na wspólnej skali. Ważne jest przy tym uwzględnienie charakteru zmiennych oraz kierunku ich optymalizacji, tj. minimalizacji destymulant i maksymalizacji stymulant.

Ostatni etap to rankingowanie wariantów, realizowane po zgromadzeniu danych o wariantach, kryteriach oceny oraz wartościach miar tych kryteriów dla każdej alternatywy (Warrad et al. 2021). W zależności od wybranej metody analizy zestawienie to można uzupełnić o wagi poszczególnych kryteriów, odpowiadające ich znaczeniu w realizacji celu

głównego. Na tej podstawie przeprowadza się analizę wielokryterialną, której efektem jest ustalenie hierarchii wariantów i wskazanie najbardziej korzystnego rozwiązania w danych warunkach. Końcowy ranking pozwala jednoznacznie zidentyfikować najkorzystniejsze rozwiązanie dla konkretnego przedsięwzięcia budowlanego, z uwzględnieniem wszystkich założonych kryteriów.

W ostatnich dekadach zaobserwowano dynamiczny wzrost zastosowań metod MCDA w inżynierii lądowej, m.in. przy planowaniu infrastruktury, doborze materiałów i technologii, ocenie zrównoważenia projektów czy zarządzaniu przedsięwzięciami (Fedorczak-Cisak et al. 2019; Kafel et al. 2019; Szafranko 2019; Sánchez-Garrido et al. 2022). W budownictwie najczęściej stosuje się metody takie jak proces hierarchii analitycznej (AHP) oraz technikę preferencji kolejności (TOPSIS) – często w połączeniu z technikami rozmytymi, aby uwzględnić niepewność ocen i różnorodność opinii ekspertów. Stosuje się także inne podejścia, m.in. metody relacji przewagi (np. rodzina metod ELECTRE i pokrewne PROMETHEE), metody kompromisowe (np. VIKOR) oraz proste metody sumaryczne (SAW) wraz z ich modyfikacjami opracowanymi na potrzeby decyzji inżynierskich.

7.2.1. Metoda AHP

Metoda AHP (ang. *Analytic Hierarchy Process*) została zaproponowana przez Thomasa Saaty'ego (1977) jako sposób strukturyzacji złożonych problemów decyzyjnych w hierarchię cel–kryteria–alternatywy oraz określania wag za pomocą porównań parami. Decydent porównuje parami elementy na każdym poziomie hierarchii (np. kryteria względem celu głównego, a następnie alternatywy względem każdego kryterium), przypisując im względne preferencje w przyjętej skali numerycznej. Na podstawie macierzy porównań parami wyznaczane są lokalne wagi elementów, które następnie agreguje się w celu obliczenia globalnych wag kryteriów i końcowych ocen alternatyw. AHP zyskała dużą popularność dzięki swojej intuicyjności i możliwości uwzględnienia subiektywnego osądu ekspertów. Jest to jedna z najczęściej stosowanych technik MCDA – w literaturze opisano liczne jej zastosowania w budownictwie, m.in. przy wyborze technologii wykonania przedsięwzięcia (Skibniewski i Chao 1992), priorytetyzacji kryteriów (Szabo et al. 2021; Skrzypczak et al. 2024) czy ocenie wariantów materiałowych (Apollo i Grzyl 2022; Leśniak i Górka 2022). Można również znaleźć rozwinięcia tej metody w innych zagadnieniach budowlanych (Leśniak et al. 2018). Do wad AHP należą m.in. zjawisko odwrócenia rankingu przy dodaniu lub zmianie zbioru opcji oraz ograniczenie wynikające z założenia niezależności kryteriów, które częściowo można rozwiązać za pomocą rozszerzenia ANP (ang. *Analytic Network Process*) dla układów o zależnych elementach (Saaty 1990).

Procedura obliczeniowa dla klasycznej metody AHP przedstawia się następująco:

1. Budowa hierarchii decyzyjnej – ustalenie struktury hierarchii:
   - cel główny (wybór najlepszego wariantu),
   - kryteria oceny wariantów (np. środowiskowe, ekonomiczne, społeczne),
   - warianty decyzyjne (np. warianty konstrukcyjno-materiałowe).

2. Porównanie parami kryteriów (wyznaczenie wag kryteriów) – eksperci porównują kryteria parami, odpowiadając na pytanie: „które kryterium jest ważniejsze i o ile?”. Na tej podstawie tworzy się macierz porównań parami (A):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & 3 & \dots & 1 \end{bmatrix} \tag{7.1}$$

gdzie:

a_{ij} – stopień preferencji kryterium i nad kryterium j,

obowiązuje $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$, a na przekątnej $a_{ii} = 1$.

Skala Saaty’ego wykorzystywana do porównań została przedstawiona w tabeli 7.1. Możliwe są również wartości pośrednie: 2, 4, 6, 8:

Tabela 7.1

Skala Saaty’ego

Skala	Opis
1	równa ważność
3	umiarkowanie ważniejsze
5	silnie ważniejsze
7	bardzo silnie ważniejsze
9	absolutnie ważniejsze

3. Obliczenie wag kryteriów z macierzy porównań – obliczanie wag kryteriów metodą średniej geometrycznej:

– obliczanie średniej geometrycznej wierszy:

$$G_i = \left(\prod_{j=1}^{n} a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \tag{7.2}$$

– normalizacja wag kryteriów:

$$w_i = \frac{G_i}{\sum_{i=1}^{n} G_i} \tag{7.3}$$

gdzie:

w_i – waga kryterium i.

4. Sprawdzenie spójności ocen (ang. *Consistency Ratio*, CR) – ocena spójności macierzy:
   – obliczanie wektora ważonego Aw,
   – obliczanie współczynnika λ_{max}:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(Aw)_i}{w_i} \tag{7.4}$$

   – wyznaczanie współczynnika spójności CI:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \tag{7.5}$$

   – wyznaczanie współczynnika spójności CR:

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{7.6}$$

   gdzie RI to indeks losowy, który zależy od liczby kryteriów (np. 0,58 dla 3 kryteriów, 0,9 dla 4 kryteriów).
   Akceptowalny CR ≤ 0,1. Jeśli CR > 0,1, oceny wymagają korekty.

5. Porównanie parami wariantów względem każdego kryterium – tworzenie macierzy porównań dla wariantów, dla każdego kryterium osobno (analogicznie jak dla kryteriów):

$$B^{(k)} = \begin{bmatrix} 1 & b_{12}^{(k)} & \dots & b_{1m}^{(k)} \\ b_{21}^{(k)} & 1 & \dots & b_{2m}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1}^{(k)} & b_{m2}^{(k)} & \dots & 1 \end{bmatrix} \tag{7.7}$$

   gdzie $b_{ij}^{(k)}$ oznacza stopień preferencji wariantu i nad j, dla kryterium k.

6. Agregacja wyników (ocena końcowa wariantów) – określenie ostatecznej wartości dla wariantu i jest sumą ważoną ocen względem kryteriów:

$$S_i = \sum_{k=1}^{n} w_k \cdot u_{ik} \tag{7.8}$$

   gdzie:
   S_i – ostateczna ocena wariantu i,
   w_k – waga kryterium k,
   u_{ik} – ocena wariantu i względem kryterium k.

Ostatecznie analizowane warianty szereguje się od najwyższej do najniższej wartości S_i. Metoda AHP umożliwia kompleksową analizę decyzji z uwzględnieniem subiektywnych ocen ekspertów, wag kryteriów oraz spójności dokonywanych ocen.

7.2.2. Metoda TOPSIS

Metoda TOPSIS (ang. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) została zaproponowana przez Hwanga i Yoona w 1981 r. Istota metody TOPSIS polega na przyjęciu koncepcji rozwiązania idealnego oraz antyidealnego: alternatywa idealna charakteryzuje się najlepszymi możliwymi wartościami wszystkich kryteriów, zaś antyidealna – najgorszymi. Każdy rozważany wariant jest oceniany przez obliczenie jego odległości od ideału oraz od antyideału w przestrzeni kryteriów – wariant położony najbliżej ideału (a jednocześnie najdalej od antyideału) uznaje się za najlepszy w rankingu. Procedura TOPSIS obejmuje najczęściej: normalizację wartości kryteriów (aby umożliwić porównywanie różnych jednostek) i ich ważenie, wyznaczenie wektora wartości idealnych (najlepszych zaobserwowanych) i antyidealnych (najgorszych zaobserwowanych), obliczenie odległości każdego wariantu od ideału i antyideału (np. metryką euklidesową) oraz wyznaczenie miary bliskości do ideału (Hwang i Yoon 1981). Ze względu na nieskomplikowane obliczenia i klarowną interpretację metoda TOPSIS znalazła szerokie zastosowanie w inżynierii lądowej – m.in. przy ocenie zrównoważonych materiałów konstrukcyjnych (Elshoubaky et al. 2023), wyborze lokalizacji inwestycji (Broniewicz i Dziurdzikowska 2017), optymalizacji wariantów projektów publicznych (Nascimento et al. 2023) czy ocenie scenariuszy eksploatacji obiektów (Gaspars-Wieloch 2023).

Procedura obliczeniowa metody TOPSIS przedstawia się następująco:

1. Utworzenie macierzy decyzyjnej – zawiera ona oceny wszystkich wariantów według poszczególnych kryteriów:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{7.9}$$

gdzie:
x_{ij} – wartość kryterium j dla wariantu i,
m – liczba wariantów,
n – liczba kryteriów.

2. Normalizacja macierzy decyzyjnej – stosuje się normalizację wektorową:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \tag{7.10}$$

gdzie r_{ij} to znormalizowana wartość kryterium j dla wariantu i.

3. Ważenie znormalizowanej macierzy – znormalizowane oceny mnożone są przez przypisane wagi kryteriów w_j:

$$\upsilon_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \tag{7.11}$$

gdzie:
w_j – waga kryterium j, $\sum_{j=1}^{n} w_j = 1$

4. Wyznaczenie rozwiązania idealnego i antyidealnego – dla każdego kryterium identyfikuje się rozwiązania idealne (A^+) i antyidealne (A^-):
   – rozwiązanie idealne $A+$:

$$A^+ = \left\{ \upsilon_1^+, \upsilon_2^+, \ldots, \upsilon_n^+ \right\} \tag{7.12}$$

   – rozwiązanie antyidealne A^-:

$$A^- = \left\{ \upsilon_1^-, \upsilon_2^-, \ldots, \upsilon_n^- \right\} \tag{7.13}$$

   gdzie:
   – dla kryteriów maksymalizowanych: $\upsilon_j^+ = max_i\left(\upsilon_{ij}\right), \upsilon_j^- = min_i\left(\upsilon_{ij}\right)$,
   – dla kryteriów minimalizowanych: $\upsilon_j^+ = max_i\left(\upsilon_{ij}\right), \upsilon_j^- = min_i\left(\upsilon_{ij}\right)$,

5. Obliczanie odległości od rozwiązania idealnego i antyidealnego – obliczanie odległości euklidesowej dla każdego wariantu:
– odległość od rozwiązania idealnego D_i^+:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (\upsilon_{ij} - \upsilon_j^+)^2} \tag{7.14}$$

– odległość od rozwiązania antyidealnego D_i^-:

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (\upsilon_{ij} - \upsilon_j^-)^2} \tag{7.15}$$

6. Obliczenie współczynnika bliskości (indeks TOPSIS) C_i:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, \quad 0 \le C_i \le 1 \tag{7.16}$$

   gdzie im wyższa wartość C_i, tym lepszy wariant (najbliżej rozwiązania idealnego).

7. Uporządkowanie wariantów malejąco względem wartości współczynnika bliskości C_i:

$$C_{najlepszy} = \max\,(C_i) \tag{7.17}$$

Metoda TOPSIS pozwala na przejrzystą analizę decyzyjną, uwzględniającą różne typy kryteriów (minimalizowane oraz maksymalizowane), co ułatwia podjęcie decyzji na podstawie danych ilościowych.

7.2.3. Metody ELECTRE

Rodzina metod ELECTRE (fr. *ÉLimination et Choix Traduisant la Réalité*) należy do klasycznych technik MCDA, zapoczątkowanych w latach 60. XX w. Metody te wykorzystują koncepcję relacji przewagi (ang. *outranking*) – pozwalają na bezpośrednie porównanie par alternatyw na podstawie zbioru kryteriów, ustalając, w jakim stopniu jedna alternatywa jest preferowana nad drugą (Taherdoost i Madanchian 2023). W przeciwieństwie do metod agregujących (np. AHP czy TOPSIS), ELECTRE jest podejściem niekompensacyjnym. Oznacza to, że poważna wada jednej alternatywy na danym kryterium nie może być w pełni zrekompensowana zaletami w innych kryteriach, jeśli przekracza ustalony próg akceptacji. Procedura ELECTRE opiera się na obliczeniu indeksów zgodności (ang. *concordance*) i niezgodności (ang. *discordance*) dla każdej pary opcji – określających, w jakim stopniu jedna opcja dominuje drugą, biorąc pod uwagę wagę kryteriów przemawiających na jej korzyść oraz znaczenie ewentualnych kryteriów, w których wypada znacznie gorzej. Istnieje kilka wersji tej metody (ELECTRE I, II, III, IV, IS), różniących się szczegółami algorytmu oraz sposobem prezentacji wyników. W zależności od wersji rezultat może przybrać postać rankingu lub podzbioru tzw. rozwiązań niedominowanych (czyli takich, które nie wykazują względem siebie silnej przewagi).

Metody ELECTRE pozwalają uwzględnić progi wrażliwości decydenta na różnice w kryteriach i sprawdzają się dobrze, gdy dane są częściowo porządkowe lub trudno porównywalne ilościowo. W budownictwie mogą być stosowane np. do wspomagania wyboru i oceny materiałów budowlanych (Kurinjimalar et al. 2023), ale także w innych problemach inżynierskich wymagających uwzględnienia jakościowych przewag, np. w planowaniu zaopatrzenia w wodę czy wyborze wariantów modernizacji infrastruktury (Marzouk 2011; Skorupka et al. 2012; Trojan i Morais 2012). Zbliżonym podejściem do ELECTRE są metody PROMETHEE (ang. *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation*), w których wprowadza się funkcje preferencji dla każdego kryterium i na tej podstawie oblicza tzw. przepływy preferencji rangi. PROMETHEE I umożliwia uzyskanie częściowego porządku rozwiązań, a PROMETHEE II – pełnego rankingu (Goswami 2020).

Ogólna procedura obliczeniowa dla metody ELECTRE:

1. Utworzenie macierzy decyzyjnej – macierzy ocen wariantów względem kryteriów:

$$X = \left[x_{ij} \right]_{m \times n} \tag{7.18}$$

gdzie:
x_{ij} – wartość kryterium j dla wariantu i,
m – liczba wariantów,
n – liczba kryteriów.

2. Ustalenie wag kryteriów – każdemu kryterium j przypisuje się wagę w_j:

$$\sum_{j=1}^{n} w_j = 1, \quad w_j \geq 0 \tag{7.19}$$

3. Wyznaczenie macierzy zgodności (ang. *concordance*) – wskaźnik zgodności określa, jaką część wag kryteriów spełnia przewaga wariantu *a* nad wariantem *b*:

$$C(a,b) = \frac{\sum_{j \in J^+} w_j}{\sum_{j=1}^{n} w_j} \tag{7.20}$$

gdzie:

J^+ – zbiór kryteriów, dla których wariant *a* jest co najmniej równie dobry jak wariant *b*:

- dla kryteriów maksymalizowanych: $x_{aj} \geq x_{bj}$,
- dla kryteriów minimalizowanych: $x_{aj} \leq x_{bj}$.

Macierz zgodności:

$$C = \left[C(a,b) \right]_{m \times m}, \quad C(a,a) = - \tag{7.21}$$

4. Wyznaczenie macierzy niezgodności (ang. *discordance*) – wskaźnik niezgodności określa, jak bardzo wariant *a* jest mniej korzystny od wariantu *b* na najbardziej niekorzystnym kryterium:

$$D(a,b) = \frac{max_{j \in J^-} \left| x_{aj} - x_{bj} \right|}{max_{j=1,\ldots,n} \left| x_{aj} - x_{bj} \right|} \tag{7.22}$$

gdzie:

J – zbiór kryteriów, dla których wariant *a* jest gorszy od wariantu *b*:

- dla kryteriów maksymalizowanych: $x_{aj} < x_{bj}$,
- dla kryteriów minimalizowanych: $x_{aj} > x_{bj}$.

Macierz niezgodności:

$$D = \left[D(a,b) \right]_{m \times m}, \quad D(a,a) = - \tag{7.23}$$

5. Określenie progów zgodności i niezgodności:
   - próg zgodności C^*, np. średnia wartość wskaźników zgodności:

$$C^* = \frac{\sum_a \sum_{b \neq a} C(a,b)}{m(m-1)} \tag{7.24}$$

   - próg niezgodności D^*, np. średnia wartość wskaźników niezgodności:

$$D^* = \frac{\sum_a \sum_{b \neq a} D(a,b)}{m(m-1)} \tag{7.25}$$

6. Wyznaczenie macierzy przewagi (dominacji) – określenie, czy wariant *a* przewyższa (dominuje) wariant *b*:
   – wariant *a* dominuje wariant *b*, jeżeli spełnione są jednocześnie warunki:

$$C(a,b) \geq C^* \quad \text{oraz} \quad D(a,b) \leq D^* \tag{7.26}$$

Macierz dominacji:

$$E = \left[e(a,b) \right]_{m \times m}, \quad \text{gdzie:} \quad e(a,b) = \begin{cases} 1 \text{ gdy } a \text{ dominuje } b \\ 0 \text{ w pozostałych przypadkach} \end{cases} \tag{7.27}$$

7. Wyznaczenie końcowego rankingu wariantów
   – zliczanie sumy wierszy macierzy dominacji *E*:

$$S(a) = \sum_{b=1}^{m} e(a,b) \tag{7.28}$$

Wariant o największej wartości $S(a)$ zajmuje najwyższe miejsce w rankingu. Metoda ta sprawdza się szczególnie dobrze w sytuacjach, gdy nie wszystkie kryteria mogą się wzajemnie kompensować.

7.2.4. Inne metody wielokryterialne

Spośród innych metod MCDA stosowanych w inżynierii lądowej warto wymienić metodę VIKOR (ang. *Multi-Criteria Compromise Ranking*). Jest to technika kompromisowa zaproponowana przez Opricovicia w 1998 r., oparta na koncepcji punktu idealnego. W odróżnieniu od TOPSIS metoda VIKOR kładzie nacisk na osiągnięcie rozwiązania kompromisowego – wprowadza miarę „regret", reprezentującą maksymalną względną stratę danej alternatywy względem innych, oraz dąży do minimalizacji tej straty (Opricovic i Tzeng 2004). Metoda VIKOR wyznacza ranking opcji oraz może wskazać jedną lub kilka „najlepszych kompromisowych" alternatyw, zapewniających zrównoważony układ korzyści pomiędzy kryteriami. Technika ta była stosowana m.in. do oceny zrównoważonych wariantów projektów mostowych i materiałów konstrukcyjnych, często w połączeniu z metodami wag (np. AHP lub entropią Shannona) w celu określenia znaczenia kryteriów (Gao et al. 2019).

Najprostszym podejściem wielokryterialnym jest metoda sumy ważonej, określana również jako metoda wartości użyteczności globalnej lub SAW (ang. *Simple Additive Weighting*). Polega ona na zsumowaniu ustandaryzowanych ocen każdego wariantu, pomnożonych przez wagi kryteriów. Mimo prostoty i przejrzystości metoda SAW ma pewne ograniczenia – wymaga bowiem uprzedniej normalizacji lub przekształcenia kryteriów minimalnych (takich jak np. koszty czy emisje) na maksymalne, aby można je było dodawać do kryteriów beneficjalnych (Taherdoost 2023). Ponadto w przypadku kryteriów o bardzo różnych skalach i rozkładach zwykła suma ważona może nie oddawać w pełni istotnych różnic między wariantami. Z tego powodu powstała modyfikacja tej metody – COPRAS (ang. *Complex Proportional Assessment*) – zaproponowana przez Zavadskasa i in. (1994). Metoda ta dzieli wpływ kryteriów na pozytywny (korzystny) i negatywny, oceniając oddzielnie sumaryczny efekt kryteriów wymagających maksymalizacji i minimalizacji. Dzięki temu lepiej radzi sobie

np. z uwzględnianiem kryteriów kosztowych czy emisyjnych, które obniżają ocenę wariantu (Taherdoost i Mohebi 2024). Zarówno metoda SAW, jak i COPRAS były wielokrotnie stosowane w problemach decyzyjnych inżynierii lądowej, m.in. jako punkty odniesienia przy weryfikacji wyników bardziej złożonych metod (Podvezko 2011).

Procedura obliczeniowa dla metody SAW przedstawia się następująco:

1. Utworzenie macierzy decyzyjnej – macierzy ocen wariantów według kryteriów:

$$X = \left[x_{ij} \right]_{m \times n} \tag{7.29}$$

gdzie:
- x_{ij} – wartość kryterium j dla wariantu i,
- m – liczba wariantów,
- n – liczba kryteriów.

2. Określenie wag kryteriów – każdemu kryterium j przypisuje się wagę w_j:

$$\sum_{j=1}^{n} w_j = 1, \quad w_j \geq 0 \tag{7.30}$$

3. Normalizacja wartości kryteriów – najczęściej stosuje się normalizację min-max:
   - dla kryteriów maksymalizowanych (im większe tym lepsze):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}} \tag{7.31}$$

   - dla kryteriów minimalizowanych (im mniejsze tym lepsze):

$$r_{ij} = \frac{x_j^{max} - x_{ij}}{x_j^{max} - x_j^{min}} \tag{7.32}$$

gdzie:

$x_j^{max} = \max_i \left(x_{ij} \right)$ – najlepsza wartość w kryterium j,

$x_j^{min} = \min_i \left(x_{ij} \right)$ – najgorsza wartość w kryterium j.

Macierz po normalizacji:

$$R = \left[r_{ij} \right]_{m \times n}, \quad 0 \leq r_{ij} \leq 1 \tag{7.33}$$

4. Obliczenie sum ważonych ocen wariantów – obliczanie sumy ważonej dla każdego wariantu:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_j \cdot r_{ij} \tag{7.34}$$

gdzie:
- S_i – suma ważona (ocena końcowa wariantu i),
- w_j – waga kryterium j,
- r_{ij} – znormalizowana wartość kryterium j dla wariantu i.

Warianty szereguje się malejąco według sum ważonych S_i. Metoda SAW najlepiej sprawdza się w stosunkowo prostych analizach, w których decydent potrzebuje klarownej interpretacji wyników, a wszystkie kryteria mogą się wzajemnie kompensować.

W praktyce decyzyjnej coraz częściej łączy się różne techniki, tworząc podejścia hybrydowe. Przykładowo, metoda AHP służy do wyznaczania wag kryteriów, a do właściwego rankingu alternatyw stosuje się metody TOPSIS lub VIKOR. Inną stosowaną kombinacją jest wykorzystanie teorii zbiorów rozmytych do ujęcia nieprecyzyjnych ocen jakościowych (np. Fuzzy AHP, Fuzzy TOPSIS), gdzie zamiast ostrych wartości preferencji stosuje się trójkątne lub trapezowe liczby rozmyte reprezentujące niepewność w opiniach ekspertów (Radziszewska-Zielina i Śladowski 2015; Leśniak et al. 2018; Plebankiewicz et al. 2020; Skrzypczak et al. 2020).

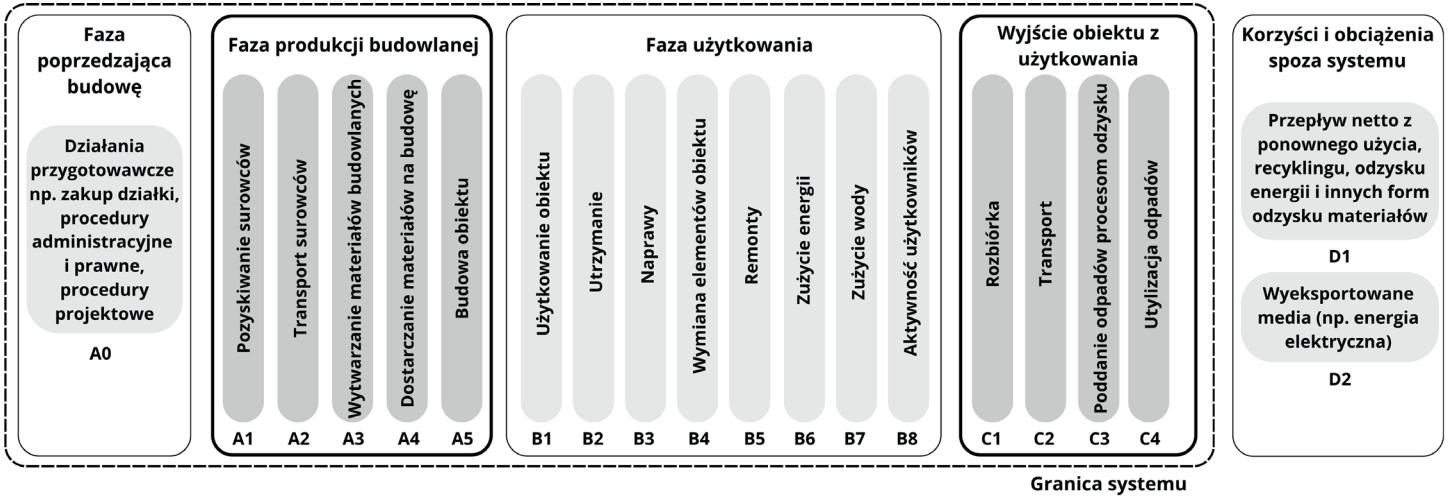
Warto zauważyć, że wybór konkretnej metody MCDA może wpływać na wyniki oceny wariantów. Obecnie nie ma konsensusu co do tego, która technika jest „najlepsza" – różne metody mogą prowadzić do nieco odmiennych rankingów, zwłaszcza gdy profile alternatyw są zróżnicowane (Więckowski i Sałabun 2023). Dlatego w przypadku ważnych decyzji zaleca się przeprowadzanie analiz wrażliwości na dobór metody oraz ewentualne zastosowanie kilku podejść równolegle (tzw. *robust decision making*) (Mohammadi i Rezaei 2020). W literaturze pojawiają się nawet propozycje agregacji wyników wielu metod w jeden uśredniony indeks rankingowy, w celu zwiększenia obiektywizmu oceny (Alves et al. 2024).

7.3. Metodyka zrównoważonej oceny konstrukcji żelbetowych

Na podstawie przeprowadzonych analiz i doświadczeń można stwierdzić, że zrównoważona ocena konstrukcji żelbetowej, zwłaszcza w kontekście wyboru optymalnego wariantu konstrukcyjno-materiałowego, wymaga szczególnego uwzględnienia fazy produkcji budowlanej oraz fazy końca cyklu życia obiektu, czyli jego wycofania z użytkowania. Fazy oznaczone linią przerywaną na rysunku 7.1.

W autorskim podejściu do kompleksowej, zrównoważonej oceny wariantów konstrukcyjno-materiałowych, przedstawionym na rysunku 7.2 (na wklejce), zastosowano koncepcję ekwiwalentu funkcjonalnego. Jest to kluczowe założenie, umożliwiające jednoznaczne porównanie analizowanych wariantów przez określenie jednolitego zestawu parametrów funkcjonalnych na etapie koncepcyjnym projektu.

Analiza środowiskowa wykorzystuje metodologię LCA, obejmującą kluczowe fazy życia materiałów i elementów konstrukcyjnych. Procesy te obejmują zarówno etap wytwarzania materiałów (fazy A1–A3), transport (fazy A4, C), realizację procesów budowlanych (faza A5), jak i końcową rozbiórkę (faza C). W analizie tej celowo pomija się fazę użytkowania (faza B), ponieważ wpływ tego etapu w przypadku konstrukcji żelbetowych jest niewielki i zazwyczaj nie różni się pomiędzy wariantami. Wyniki analizy środowiskowej podlegają procedurom normalizacji i ważenia, które umożliwiają uzyskanie jednopunktowego wskaźnika efektów środowiskowych Ecopoint, znacząco ułatwiającego interpretację i porównywanie wyników.

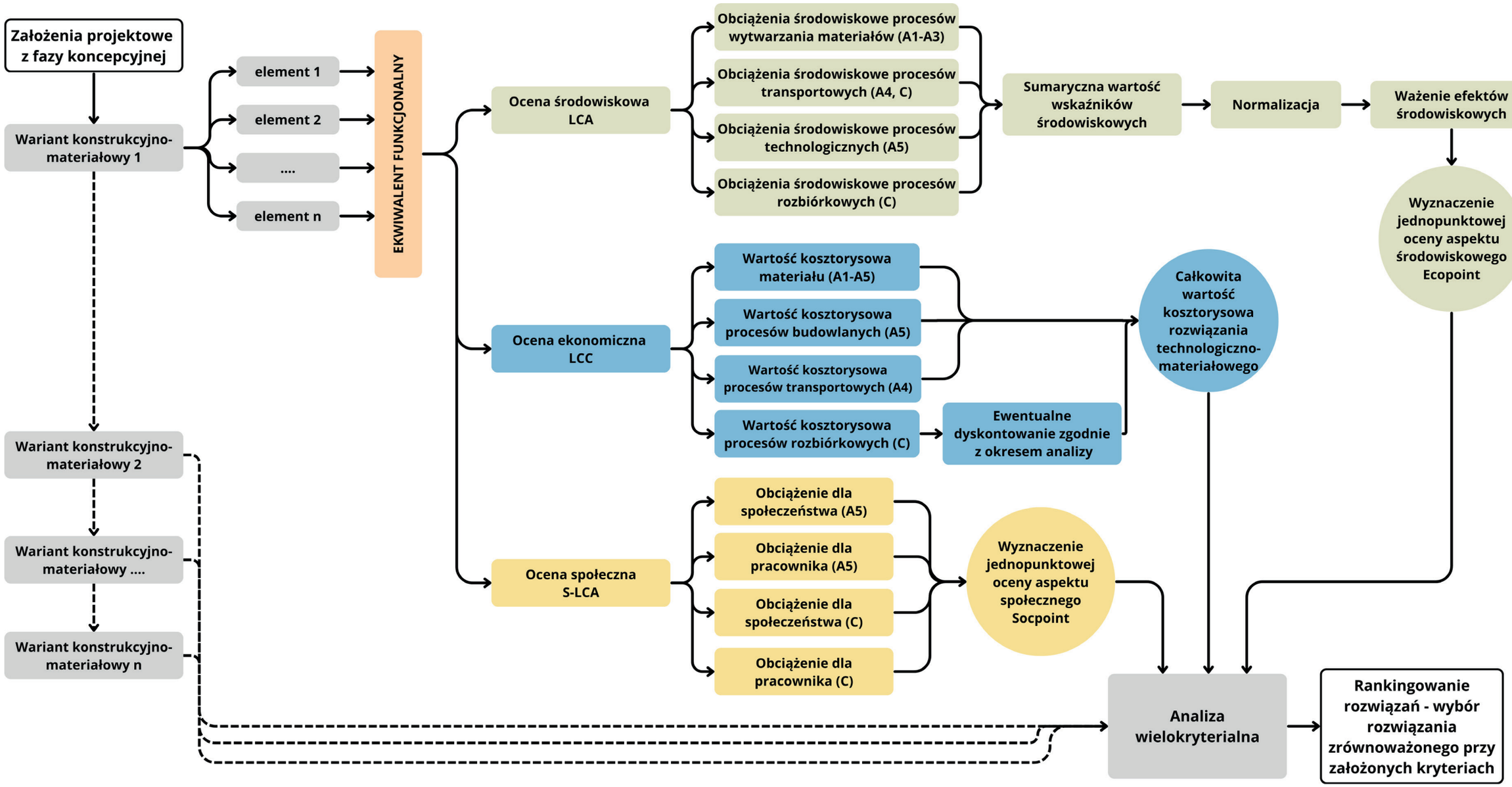


Rys. 7.1. Struktura systemu budynku – moduły informacyjne wg PN-EN 15643:2021

Kolejnym krokiem jest analiza ekonomiczna z wykorzystaniem założeń metody LCC, uwzględniająca m.in. koszty materiałów, ceny i nakłady realizacji robót budowlanych, transportu oraz procesów rozbiórkowych. Analiza ta, ze względów praktycznych, może być prowadzona na podstawie standardów kosztorysowania, czyli wartości kosztorysowych. Ceny i nakłady związane z fazą końcową (faza C) mogą być dyskontowane zgodnie z przyjętym okresem analizy, a końcowy wynik stanowi łączną wartość kosztorysową analizowanego rozwiązania technologiczno-materiałowego. Koszty eksploatacji są zazwyczaj podobne dla różnych wariantów konstrukcji żelbetowych, dlatego pomija się je w szczegółowej analizie porównawczej, chyba że przedmiotem oceny są konstrukcje narażone na ekstremalne warunki środowiskowe, np. obiekty infrastruktury nadmorskiej.

Równolegle prowadzona jest ocena społeczna na podstawie metodologii S-LCA, która identyfikuje i kwantyfikuje obciążenia społeczne występujące w fazie realizacji budowy (faza A5) oraz rozbiórki (faza C). Szczególną uwagę zwraca się na aspekty, takie jak hałas, zapylenie i drgania, które bezpośrednio oddziałują na społeczeństwo (sąsiedztwo) oraz pracowników.

Ostatnim etapem jest analiza wielokryterialna, integrująca wskaźniki środowiskowe, ekonomiczne oraz społeczne. Dzięki temu podejściu możliwy jest racjonalny wybór optymalnego, zrównoważonego rozwiązania konstrukcyjno-materiałowego, zgodnego z celami strategicznymi oraz operacyjnymi projektu. Efektem analizy wielokryterialnej jest ranking wariantów pod kątem ich ogólnego poziomu zrównoważenia względem przyjętych wag kryteriów, który wspiera podejmowanie świadomych decyzji.



Rys. 7.2. Schemat metodyki zrównoważonej oceny konstrukcji żelbetowych

8. Zrównoważona ocena przykładowej konstrukcji obiektu budowlanego

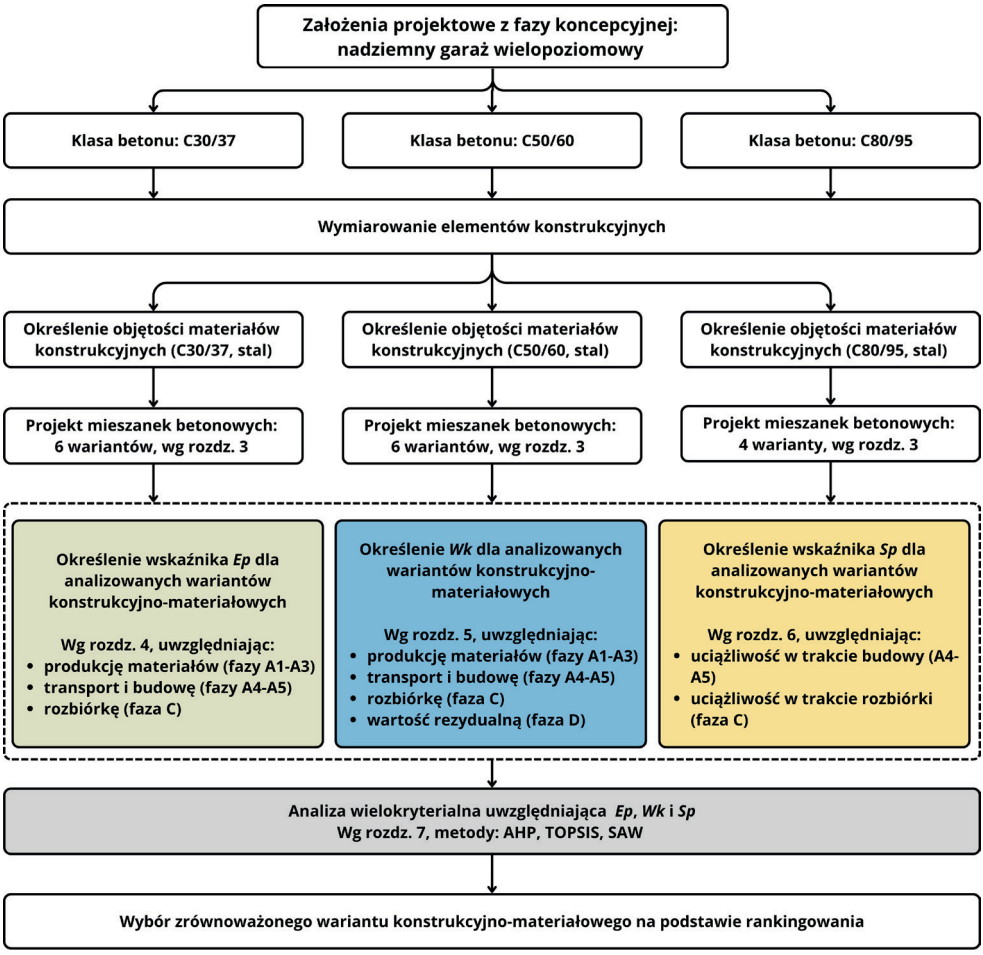
8.1. Wprowadzenie

Głównym celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie autorskiej metodyki zrównoważonej oceny konstrukcji żelbetowych w ramach zintegrowanego projektowania cyklu życia wybranego obiektu budowlanego. Metodyka łączy ocenę środowiskową LCA, analizę ekonomiczną LCC oraz analizę społeczną S-LCA, a także wymagania funkcjonalno-techniczne. Badany obiekt ma cztery kondygnacje oraz rampę spiralną umożliwiającą dojazd na wyższe poziomy. Przyjęto, że obiekt będzie pełnił funkcję parkingu przez 50 lat użytkowania, a wszystkie rozważane warianty konstrukcyjno-materiałowe spełniają wymagania nośności i użytkowalności zgodnie z zaleceniami norm PN-EN 1990:2010 oraz PN-EN 1992-1-1:2008.

W analizie porównano trzy warianty konstrukcyjno-materiałowe różniące się klasą betonu (C30/37, C50/60, C80/95), przy niezmienionej stali zbrojeniowej RB500W. Poszczególne warianty zoptymalizowano pod kątem minimalnego zużycia materiałów (betonu i stali). Wyższe klasy betonu umożliwiły redukcję przekrojów elementów, a tym samym zmniejszenie zużycia betonu nawet o ok. 15%. Wariant z betonem klasy C30/37 przyjęto jako referencyjny, odpowiadający minimalnej klasie wymaganej dla danej ekspozycji środowiskowej, przy zastosowaniu odpowiednich zabezpieczeń antykorozyjnych. Dla każdego wariantu przeprowadzono analizy LCA, LCC i S-LCA. Ocena LCA obejmowała etapy od produkcji materiałów (A1–A3), przez transport i procesy budowy (A4–A5), aż po rozbiórkę (faza C) danego segmentu konstrukcji. Następnie znormalizowano i zagregowano wyniki środowiskowe do jednego wskaźnika Ecopoint, co umożliwiło porównanie wariantów pod względem łącznego wpływu na środowisko.

Analiza kosztów cyklu życia, uwzględniająca standardy kosztorysowania stosowane w praktyce inwestycyjnej, opierała się na wartościach kosztorysowych i cenach jednostkowych zamiast kosztach rzeczywistych. Zakres analizy objął ceny materiałów oraz wykonania konstrukcji (fazy A1–A5), a także ceny związane z końcem życia obiektu budowlanego (faza C), przy jednoczesnym uwzględnieniu wartości rezydualnej odzyskanych materiałów (kruszywo z recyklingu betonu oraz złom stali). Ceny związane z fazą C zostały zdyskontowane do wartości bieżącej z uwagi na przyjęty 50-letni horyzont czasowy analizy, przy zastosowaniu stóp dyskontowych na poziomie 3% i 5%. Umożliwiło to ocenę wrażliwości wyników na zmiany wartości pieniądza w czasie.

Analiza S-LCA dotyczyła uciążliwości społecznych w fazach budowy i rozbiórki – uwzględniono oddziaływania, takie jak hałas, drgania i zapylenie generowane podczas prac, odnosząc je zarówno do pracowników budowlanych, jak i społeczności lokalnej. Dla każdego wariantu obliczono skumulowany, jednopunktowy wskaźnik społeczny Socpoint, stanowiący miarę łącznego obciążenia społecznego.



Rys. 8.1. Schemat blokowy procedury zrównoważonej oceny monolitycznej konstrukcji żelbetowej nadziemnego garażu wielopoziomowego

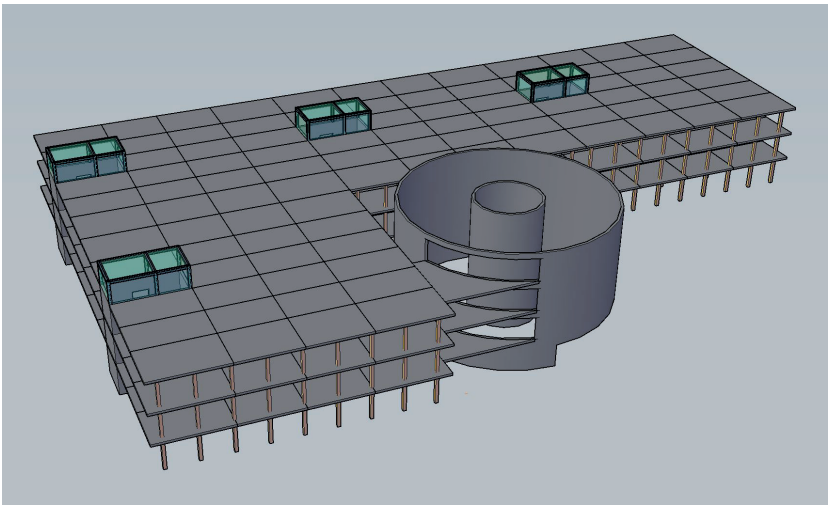
Uzyskane wyniki cząstkowe (Ecopoint, LCC, Socpoint) dla wszystkich wariantów poddano ostatecznej ocenie wielokryterialnej, aby wyznaczyć wariant optymalny w ujęciu zrównoważonym. Wykorzystano do tego różne metody rankingowe (m.in. AHP, TOPSIS, SAW), co umożliwiło wieloaspektowe porównanie rozwiązań oraz analizę wrażliwości przy różnych założeniach wag kryteriów. W efekcie takiego zintegrowanego podejścia możliwe było wskazanie wariantu konstrukcyjno-materiałowego dla analizowanego budynku, który osiąga

kompromis między kryteriami technicznymi, ekologicznymi, ekonomicznymi i społecznymi. Wszystkie etapy procesu – od koncepcji, przez projektowanie i obliczenia konstrukcji, po wielokryterialną ocenę wariantów – zilustrowano na schemacie (rys. 8.1), przedstawiającym pełny obraz procedury zrównoważonej oceny konstrukcji w cyklu życia.

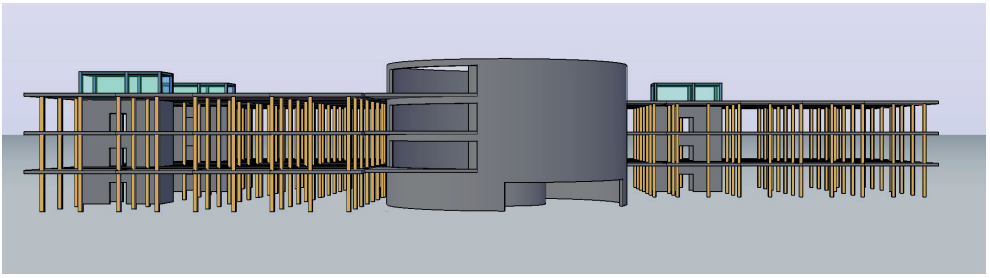
8.2. Charakterystyka analizowanego obiektu budowlanego

Na potrzeby przeprowadzenia analizy przyjęto, że rozpatrywany nadziemny garaż wielopoziomowy o monolitycznej konstrukcji żelbetowej stanowi czterokondygnacyjny obiekt budowlany, podzielony dylatacjami na cztery niezależnie pracujące segmenty konstrukcyjne i uzupełniony o część najazdową w formie spiralnej pochylni (rys. 8.2–8.4). Każdy z wydzielonych segmentów, o wymiarach w rzucie 28 m × 30 m i wysokości pojedynczej kondygnacji równej 4 m, zaprojektowano w konstrukcji słupowo-płytowej z trzonem. Założono, że budynek będzie niepodpiwniczony, bez przestrzeni parkingowej poniżej poziomu terenu, i zostanie posadowiony na gruncie nośnym, na płycie fundamentowej.

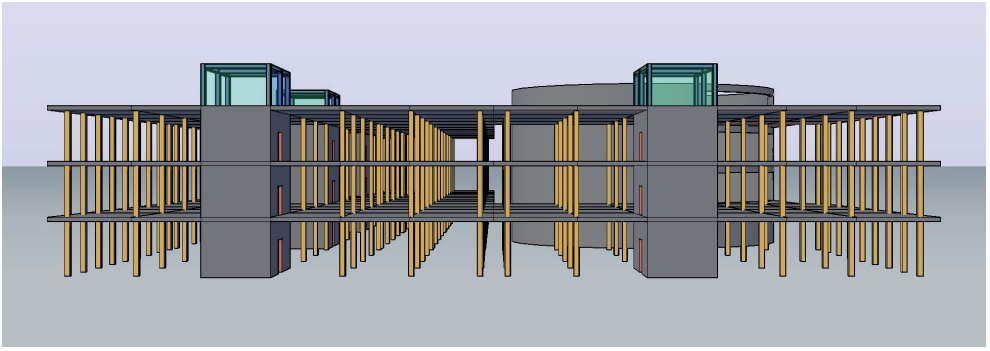
Przyjęto, że analizowany budynek będzie pełnił funkcję parkingu dla samochodów osobowych o masie całkowitej do 3,5 t i wysokości nieprzekraczającej 2,5 m. Najwyższa kondygnacja została zaprojektowana bez zadaszenia i ma stanowić nieosłoniętą powierzchnię parkingową. Założono, że transport pojazdów na wyższe i niższe kondygnacje będzie odbywał się za pomocą spiralnej pochylni zlokalizowanej przy jednym z segmentów. Ponadto w trzonach poszczególnych segmentów zaprojektowano oddzielne szyby windowe i klatki schodowe dla pieszych. Budynek zaprojektowano tak, aby zapewnić ok. 150 miejsc do parkowania prostopadłego na każdej kondygnacji – łącznie ok. 600 miejsc parkingowych. Łączna powierzchnia użytkowa wynosi ok. 16 000 m^2.



Rys. 8.2. Model budynku parkingu wielopoziomowego



Rys. 8.3. Widok od strony pochylni spiralnej budynku parkingu wielopoziomowego



Rys. 8.4. Widok od strony trzonów komunikacyjnych budynku parkingu wielopoziomowego

8.3. Analiza kryterium technicznego zrównoważonej oceny

Na potrzeby analizy rozpatrzono możliwość zastosowania trzech klas wytrzymałościowych betonu: C30/37, C50/60 oraz C80/95, przy różnych przekrojach elementów konstrukcyjnych wynikających z konieczności spełnienia podstawowych wymogów stanów granicznych nośności (SGN) i użytkowalności (SGU) wg Eurokodu 2 (PN-EN 1992-1-1:2008). Założono, że zbrojenie zostanie wykonane z prętów stalowych RB500W. Analizie dotyczącej optymalizacji konstrukcji pod względem minimalnego zużycia materiałów konstrukcyjnych, tj. betonu i stali zbrojeniowej dla danych klas betonu, poddano elementy słupowe, płyty stropowe oraz trzony. Z analizy wyłączono część najazdową parkingu oraz płytę fundamentową.

Niezależnie od zastosowanej klasy betonu siatkę słupów zaprojektowano w jednolitym układzie modularnym. W kierunku dłuższego boku modułu rozstaw słupów w osiach zewnętrznych stanowi połowę rozstawu przyjętego dla osi wewnętrznych. Ze względów statycznych i konstrukcyjnych wydłużono krawędzie płyt poza linię podpór. Dodatkowo, ze względów bezpieczeństwa, na każdej kondygnacji założono konieczność wykonania krawężników przy zewnętrznych krawędziach stropu.

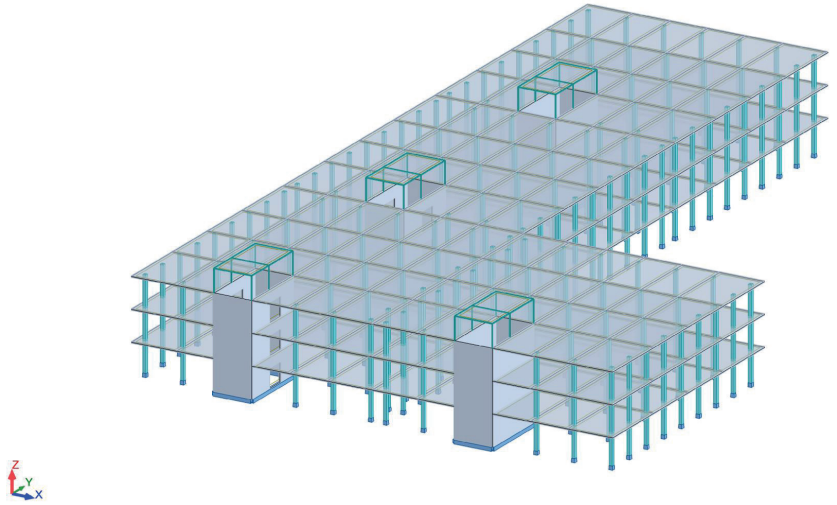
Ostateczne wymiary słupów, płyt stropowych oraz trzonów określono w procesie wymiarowania wg Eurokodu 2, uwzględniając poszczególne klasy betonu. Przyjęto kategorię S4 konstrukcji w odniesieniu do projektowanego okresu eksploatacji – 50 lat. W analizowanym przykładzie jako klasę referencyjną przyjęto betonu C30/37 zarówno dla płyt, jak i słupów. Należy podkreśli, że dla płyt stropowych narażonych na działanie chlorków typowych dla środowiska parkingowego zalecana jest klasa ekspozycji XD3. Zgodnie z tablicą 4.1 normy PN-EN 1992-1-1 minimalna klasa betonu dla ekspozycji XD3 wynosi C45/55. Norma dopuszcza jednak możliwość obniżenia jej o jedną klasę w przypadku zastosowania betonu napowietrzonego o zawartości powietrza powyżej 4%, a także przy zapewnieniu odpowiedniego nadzoru technologicznego oraz pod warunkiem, że elementem konstrukcyjnym jest płyta. Spełnienie tych trzech warunków umożliwia obniżenie klasy betonu do C30/37, co przyjęto w analizowanym przykładzie ze względu na założony cel analizy. W przypadku słupów przyjęto klasę ekspozycji XC3, odpowiadającą warunkom umiarkowanego zawilgocenia w obecności powietrza. Minimalna klasa betonu dla tej klasy środowiska wynosi C35/45, jednak również w tym przypadku norma dopuszcza jej obniżenie o jedną klasę, jeśli zastosowane zostaną odpowiednie procedury kontroli jakości. W związku z tym dla słupów analogicznie przyjęto jako klasę referencyjną beton C30/37. W obliczeniach uwzględniono wymogi normowe dotyczące minimalnego otulenia zbrojenia ze względu na konieczność zapewnienia odpowiedniej trwałości konstrukcji w przewidywanych warunkach eksploatacyjnych.

Analizowany budynek, jako garaż otwarty, którego najwyższy poziom parkowania znajduje się nie wyżej niż 25 m nad poziomem otaczającego terenu, może zostać zgodnie z rozporządzeniem zaklasyfikowany do klasy D odporności pożarowej. Elementy budynku, odpowiednio do tej klasy, powinny spełniać co najmniej następujące wymagania: główna konstrukcja nośna – R30, strop – REI 30. W związku z tym w obliczeniach uwzględniono minimalną grubość otuliny słupów i płyt stropowych, zgodnie z tymi wymaganiami.

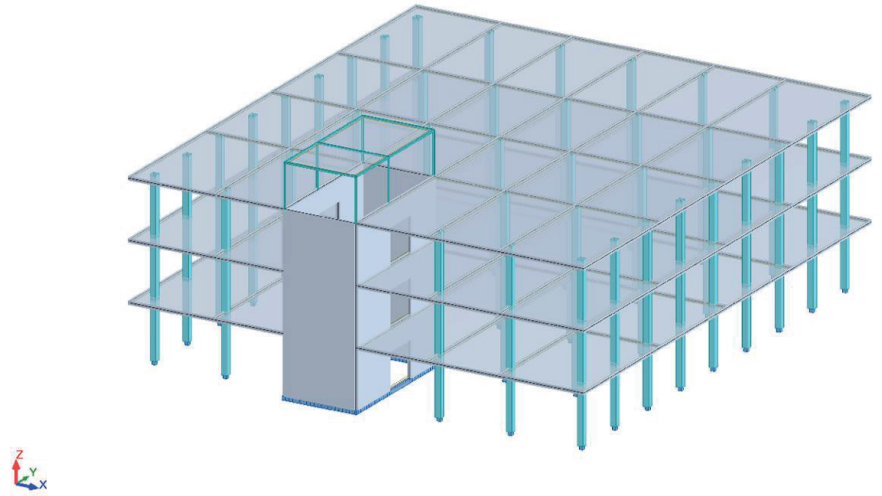
8.3.1. Obliczenia statyczne i wymiarowanie

Konstrukcję parkingu zaprojektowano jako powtarzalną, składającą się z czterech segmentów (rys. 8.5). Obliczenia przeprowadzono dla jednego z nich, przyjmując że w pozostałych segmentach występują analogiczne warunki obciążeniowe (rys. 8.6). Przyjęto, że stropy poszczególnych kondygnacji podparte są na słupach oraz monolitycznych żelbetowych ścianach trzonów. Układ słupowo-płytowy pojedynczej kondygnacji przedstawiono na rysunku 8.7.

Obliczenia statyczne i wymiarowanie poszczególnych elementów konstrukcyjnych wykonano w programie Autodesk Robot Structural Analysis 2023, na podstawie obowiązujących norm i przepisów budowlanych. W programie obliczeniowym uwzględniono obciążenie stałe wynikające z ciężaru własnego konstrukcji. Obciążenie od warstw wykończeniowych wraz z ewentualnymi instalacjami przyjęto jako stałe obciążenie powierzchniowe o wartości 0,5 kN/m^2 (rys. 8.8). Obciążenie eksploatacyjne płyty parkingu przyjęto na podstawie wytycznych normy PN-EN 1991-1-1:2010 jako powierzchniowe o wartości 2,5 kN/m^2, rozłożone w układach szachownicowych, oraz skupione o wartości 20 kN.

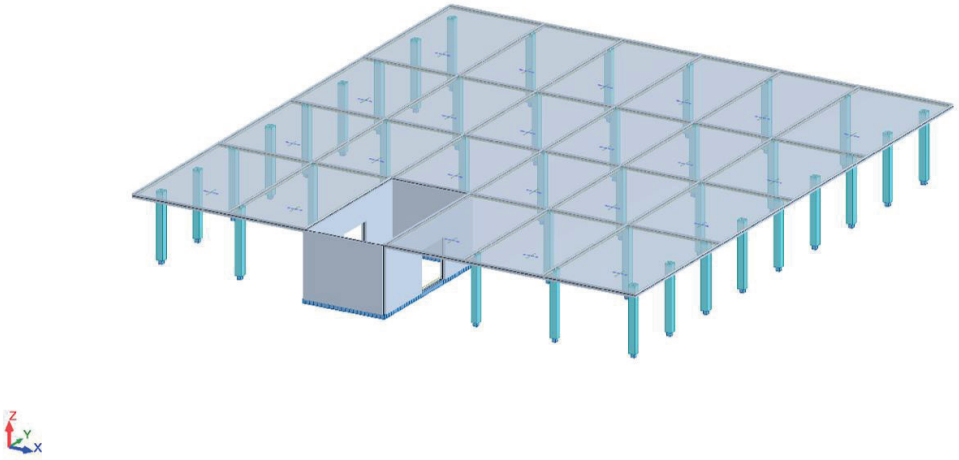


Rys. 8.5. Model obliczeniowy budynku parkingu wielopoziomowego

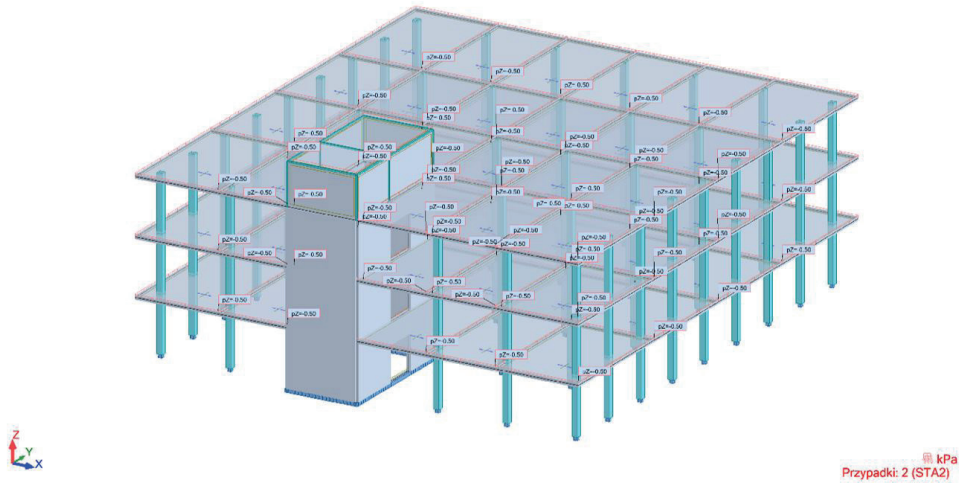


Rys. 8.6. Model obliczeniowy pojedynczego segmentu budynku parkingu wielopoziomowego

Przyjęto, że obciążenia poziome pochodzące od działania wiatru (PN-EN 1991-1-4:2010) oraz siły poziome od hamowania będą przenoszone przez trzony. Obciążenie wiatrem symulowano automatycznie w wykorzystywanym oprogramowaniu, przy założeniu pierwszej strefy wiatrowej i IV kategorii terenu. W obliczeniach uwzględniono obciążenia śniegiem działające na płytę parkingową najwyższej kondygnacji garażu, zgodnie z PN-EN 1991-1-3:2015, o wartości 0,96 kN/m^2.

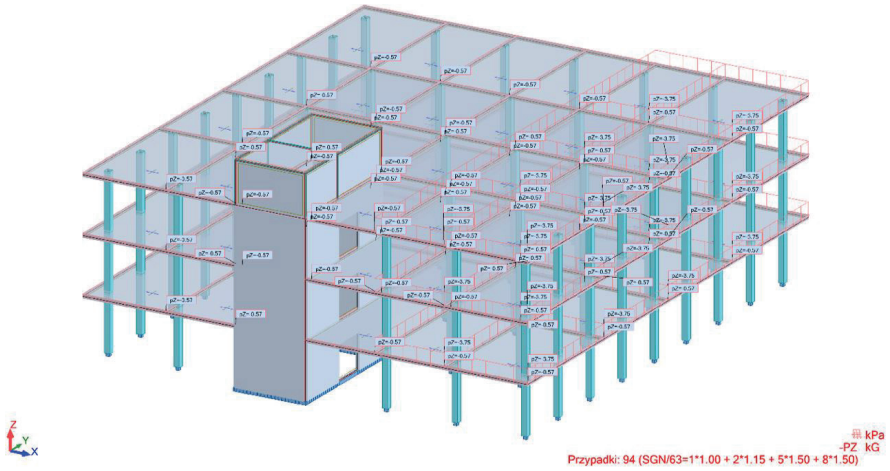


Rys. 8.7. Model elementów płytowych pojedynczego segmentu budynku parkingu wielopoziomowego – kondygnacja I



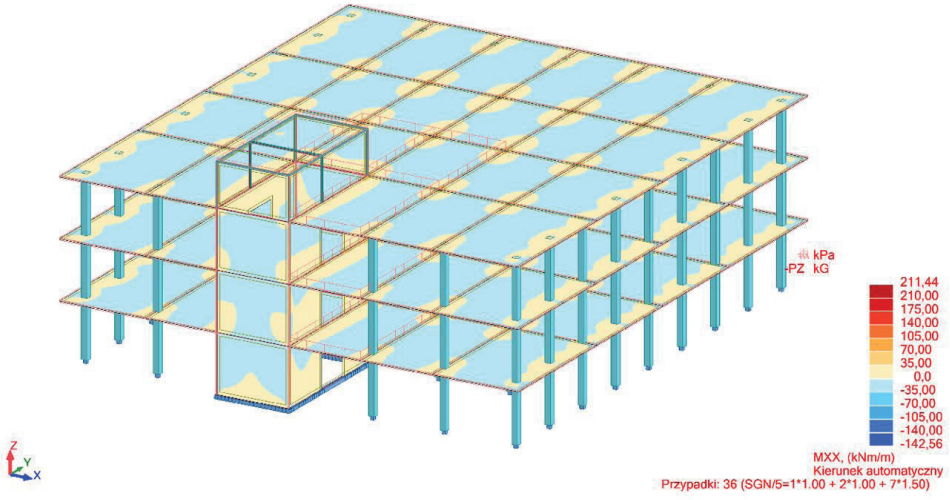
Rys. 8.8. Przykład działania charakterystycznego obciążenia stałego niekonstrukcyjnego (STA2) związanego z obciążeniem warstw wykończeniowych

Obciążenia pochodzące od ciężaru własnego konstrukcji i warstw wykończeniowych rozłożono równomiernie na powierzchni każdego z paneli. Obciążenia eksploatacyjne podzielono na sześć przypadków i rozmieszczono na wydzielonych panelach w różnych konfiguracjach, w celu uzyskania najbardziej niekorzystnego oddziaływania na konstrukcję. W obliczeniach statycznych uwzględniono także jednoczesne działanie poszczególnych obciążeń, definiując odpowiednie kombinacje normowe zgodnie z PN-EN 1990:2010 (rys. 8.9).

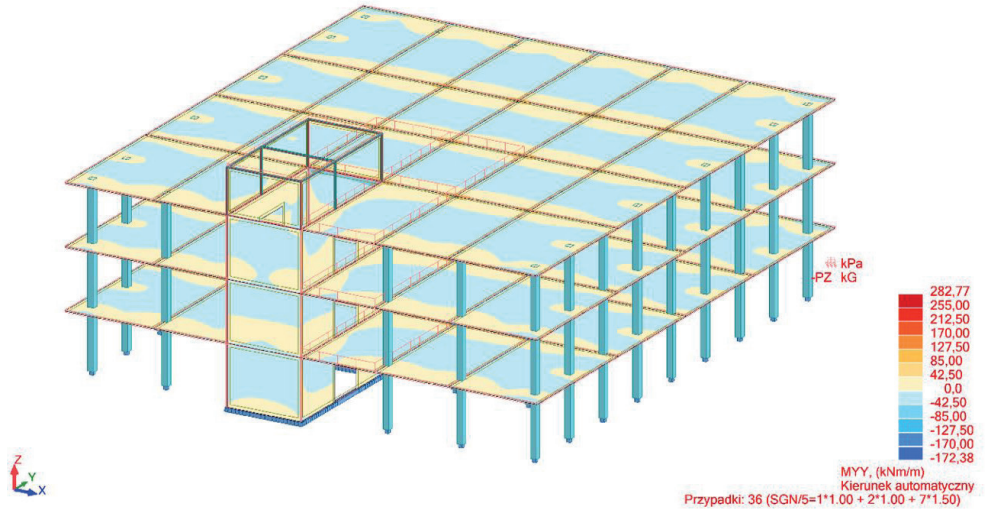


Rys. 8.9. Przykładowa kombinacja działania obciążeń w stanie granicznym nośności

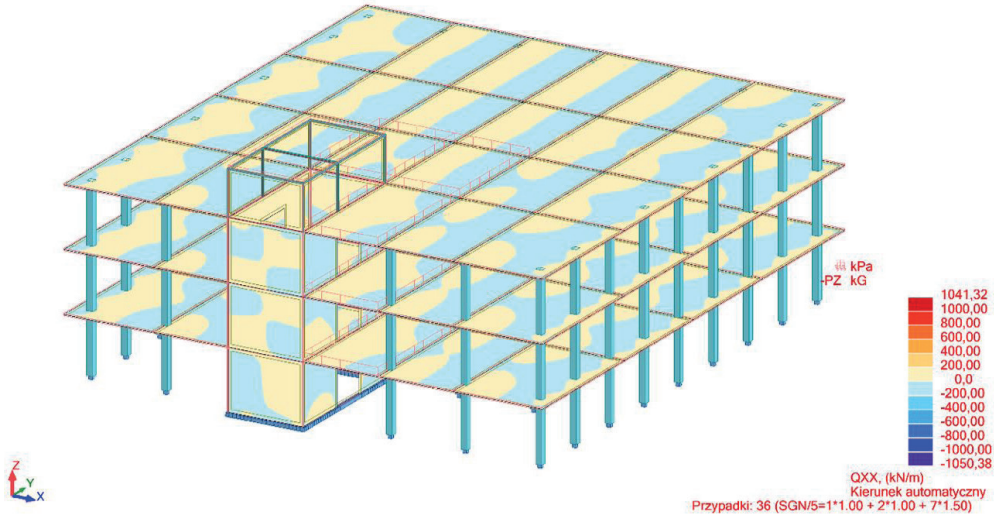
Przeprowadzone obliczenia wszystkich przypadków obciążeń pozwoliły określić maksymalne (dodatnie i ujemne) wartości sił przekrojowych w elementach konstrukcyjnych analizowanego budynku. Obliczenia wykonano dla wszystkich wariantów materiałowych. Uzyskane wyniki w poszczególnych wariantach nie różniły się jakościowo między sobą, ze względu na nieznaczną różnicę wartości obciążeń, wynikającą wyłącznie z ciężaru własnego elementów związanego z ich przekrojami. W związku z tym, w celu zobrazowania wyników obliczeń statycznych, na rysunkach 8.10–8.13 przedstawiono mapy momentów oraz sił tnących od przykładowych kombinacji obciążeń działających na konstrukcję.



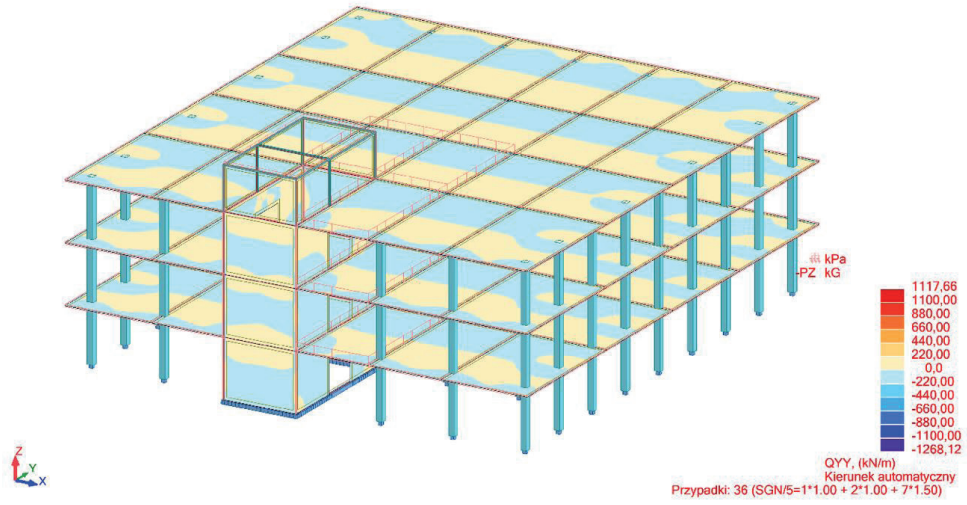
Rys. 8.10. Mapa momentów gnących M_x dla przykładowej kombinacji obciążeń w SGN



Rys. 8.11. Mapa momentów gnących M_y dla przykładowej kombinacji obciążeń w SGN



Rys. 8.12. Mapa sił tnących Q_x dla przykładowej kombinacji obciążeń w SGN



Rys. 8.13. Mapa sił tnących Q_y dla przykładowej kombinacji obciążeń w SGN

Przeprowadzone obliczenia statyczne wszystkich przypadków obciążeń pozwoliły określić obwiednie sił przekrojowych w elementach konstrukcyjnych analizowanego budynku.

Proces wymiarowania płyt stropowych analizowanego garażu wielopoziomowego przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy Eurokod 2. Pierwszym etapem było przyjęcie grubości płyt dla poszczególnych wariantów materiałowych, na podstawie szczegółowej analizy wymagań użytkowalności konstrukcji, w szczególności ograniczeń dotyczących ugięć. Grubości płyt przyjęto z uwzględnieniem rodzaju obciążeń, rozpiętości przęseł oraz przewidywanego sposobu użytkowania garażu.

W dalszej kolejności przeprowadzono obliczenia nośności płyt na zginanie, pozwalające na określenie wymaganego stopnia zbrojenia. W analizie poszczególnych wariantów materiałowych jako stałą przyjęto średnicę prętów zbrojenia dolnego i górnego, modyfikując ich rozstaw w zależności od obciążeń. Uwzględniono przy tym minimalne oraz maksymalne stopnie zbrojenia, co zapewniło właściwą współpracę stali z betonem oraz umożliwiło kontrolę zarysowania w konstrukcji. Wykonano również wymiarowanie płyt stropowych na przebicie w strefach podparcia słupów, gdzie naprężenia ścinające osiągały najwyższe wartości. Przeprowadzone analizy obejmowały sprawdzenie nośności i dobór niezbędnego dodatkowego zbrojenia na przebicie. Dokonano również weryfikacji warunków użytkowalności konstrukcji, w szczególności szerokości rozwarcia rys oraz ugięć krótkotrwałych i długotrwałych. Analiza ugięć, obejmująca wpływ pełzania i skurczu betonu, wykazała, że przyjęte rozwiązania konstrukcyjne skutecznie ograniczyły ugięcia do poziomów akceptowalnych dla zakładanej funkcji obiektu.

Wymiarowanie słupów konstrukcji żelbetowej rozpoczęto od doboru ich przekrojów poprzecznych. Uwzględniono wartości przenoszonych obciążeń pionowych pochodzących od płyt stropowych, związanych przede wszystkim z przekazywaniem obciążeń użytkowych oraz wpływem trzonu usztywniającego. Analiza obejmowała szczegółowe obliczenia wytrzymałościowe, z uwzględnieniem kryteriów nośności i użytkowalności. Dobór wymiarów

przekrojów poprzecznych słupów, w zależności od założonej klasy betonu, pozwolił na optymalne dostosowanie ich do charakteru obciążeń, zapewniając jednocześnie efektywność materiałową i spełnienie kryteriów technicznych.

W kolejnym etapie przeprowadzono wymiarowanie zbrojenia podłużnego i poprzecznego słupów. Proces ten przeprowadzono, wykorzystując wbudowany w programie Autodesk Robot Structural Analysis 2023 moduł wymiarowania słupów. Zbrojenie podłużne słupów dobrano, uwzględniając zarówno minimalny, jak i maksymalny stopień zbrojenia, co pozwoliło uniknąć nadmiernego zagęszczenia prętów. Obliczenia obejmowały analizę interakcji sił osiowych i momentów gnących. Przeprowadzono również wymiarowanie zbrojenia poprzecznego w postaci strzemion, w zakresie ich odpowiedniego rozstawu oraz średnic, co pozwoliło skutecznie ograniczyć ryzyko wyboczenia prętów podłużnych oraz zwiększyć odporność na siły poprzeczne. Dodatkowo, tam gdzie wynikało to z analizy, zastosowano zagęszczenie strzemion na zakładach i pod belkami w strefach przypodporowych, szczególnie w miejscach o podwyższonych wartościach naprężeń stycznych. W trakcie wymiarowania przeprowadzono również szczegółową analizę wpływu efektów drugiego rzędu. Analiza ta obejmowała ocenę wpływu mimośrodów wynikających zarówno z przenoszenia obciążeń pionowych, jak i oddziaływań poziomych (takich jak wiatr oraz siły hamowania pojazdów).

W dalszym etapie przeprowadzono weryfikację wymiarowania zbrojenia poprzecznego ścian trzonów, mającą na celu zapewnienie skutecznego przenoszenia sił tnących oraz zachowanie wymaganej sztywności i stabilności geometrycznej elementów. Analizę oparto na aktualnych wymaganiach normowych, w szczególności dotyczących nośności na ścinanie oraz zapobiegania wyboczeniu prętów zbrojenia podłużnego. Uwzględniono rzeczywiste warunki pracy konstrukcji, w tym występowanie sił poziomych pochodzących od hamowania. W strefach przypodporowych, narażonych na lokalne koncentracje naprężeń, zastosowano zagęszczone zbrojenie poprzeczne w postaci strzemion i/lub siatek zamkniętych, co znacząco zwiększyło odporność na siły tnące oraz poprawiło współpracę betonu i stali w warunkach złożonego stanu obciążenia. Na podstawie wyników analizy przyjęto jednakową grubość ścian trzonu we wszystkich wariantach materiałowych oraz określono wymagane zbrojenie pionowe i poziome. Wymiarowanie zbrojenia pionowego trzonu przeprowadzono, uwzględniając wpływ sił osiowych w połączeniu z momentami zginającymi, co pozwoliło ująć oddziaływania mimośrodowe. Przyjęto zarówno minimalne, jak i maksymalne wartości stopnia zbrojenia, co pozwoliło zapewnić nośność, ograniczyć szerokość rozwarcia rys oraz zoptymalizować koszty materiałowe.

8.3.2. Rezultaty wymiarowania konstrukcji

Dla wariantu o najniższej klasie betonu (C30/37) zaprojektowano słupy o największym przekroju 40 cm × 40 cm oraz płyty stropowe o grubości 28 cm. Sumaryczna objętość betonu wynosi 1 077,84 m³, z czego największy udział stanowią płyty (900,90 m³). Zapotrzebowanie na stal zbrojeniową dla całego segmentu wynosi 61 521,8 kg, z czego dominującą część stanowi zbrojenie płyt (54 789,5 kg). Słupy w tym wariancie charakteryzują się także najwyższym zapotrzebowaniem na stal – 1 311,9 kg dla słupów wewnętrznych oraz 2 623,9 kg dla zewnętrznych.

Zastosowanie betonu wyższej klasy (C50/60) pozwoliło na zmniejszenie wymiarów przekroju słupów do 35 cm × 35 cm oraz redukcję grubości płyty stropowej do 26 cm, co przełożyło się na spadek ogólnego zapotrzebowania na beton do 995,94 m³. Redukcja objętości betonu w porównaniu z wariantem I, wynosi około 8%. Zapotrzebowanie na stal zbrojeniową nie uległo jednak znacznemu zmniejszeniu, wynosząc 60 930,5 kg, czyli ok. 1% mniej niż w wariancie I. Oznacza to, że mimo znacznej redukcji ilości betonu konieczność zapewnienia odpowiedniej nośności i sztywności konstrukcji wymaga podobnej ilości zbrojenia.

Najkorzystniejszym pod względem redukcji wymiarów okazał się wariant III, w którym zastosowano beton najwyższej klasy – C80/95. Przekrój słupów zmniejszono do 30 cm × 30 cm, a grubość płyt stropowych do 24 cm, osiągając najmniejszą objętość betonu – 917,55 m³. Oznacza to oszczędność ok. 15% względem wariantu I oraz ok. 8% względem wariantu II. Zapotrzebowanie na stal zbrojeniową wynosi w tym przypadku 60 908,3 kg i jest zbliżone do wartości w wariancie II. Należy podkreślić, że określone wymiary poprzeczne słupów, ze względów przeciwpożarowych, w rzeczywistych warunkach mogłyby wymagać dodatkowych zabezpieczeń lub wzmocnień.

W analizie przyjęto stałe wymiary trzonów (gr. 30 cm) oraz płyty fundamentowej (gr. 100 cm) w poszczególnych wariantach, przy czym ze względu na zakres i cel prowadzonej analizy płyty fundamentowej nie uwzględniono. Przyjęte w analizie wymiary słupów, płyt stropowych i trzonów oraz odpowiadające im objętości betonu i stali zbrojeniowej dla pojedynczego segmentu zestawiono w tabeli 8.1.

Tabela 8.1

Zestawienie materiałów konstrukcyjnych w analizowanym segmencie konstrukcji żelbetowej garażu wielopoziomowego

Wariant konstrukcyjno-materiałowy	Grubość płyt stropowych [cm]	Wymiary słupów [cm]	Klasa betonu	Beton [m³]	Stal zbrojeniowa [kg]
I	28	40 × 40	C30/37	1 077,84	61 521,82
II	26	35 × 35	C50/60	995,94	60 930,59
III	24	30 × 30	C80/95	917,55	60 908,39

W odniesieniu do analizowanego obiektu budowlanego można zauważyć, że wraz ze wzrostem klasy betonu następuje redukcja wymiarów przekrojów elementów konstrukcyjnych, co skutkuje zmniejszeniem zapotrzebowania na beton, przy niewielkich różnicach w ilości zużywanej stali zbrojeniowej. Pomimo znacznej redukcji ilości betonu, zużycie stali pozostaje stosunkowo stabilne, co wynika z wymogów dotyczących nośności i odkształcalności oraz współpracy elementów konstrukcyjnych. Wyniki uzyskane w procesie wymiarowania poszczególnych wariantów konstrukcyjno-materiałowych są zgodne z aktualnymi trendami optymalizacji konstrukcji i zrównoważonego budownictwa, dążącymi do minimalizacji ilości materiałów konstrukcyjnych przy zachowaniu pełnej funkcjonalności i bezpieczeństwa użytkowania obiektów budowlanych.

8.3.3. Ekwiwalent funkcjonalny

W odniesieniu do przyjętego celu prowadzonej oceny, zgodnie z normą PN-EN 15643:2021, należy ją realizować w oparciu o ekwiwalent funkcjonalny, definiowany jako zbiór ilościowo określonych wymagań funkcjonalnych i technicznych dla budynku, obiektu inżynieryjnego lub ich części. W przypadku analizowanego garażu wielopoziomowego można założyć stałe elementy ekwiwalentu funkcjonalnego, takie jak: rodzaj obiektu, jego podstawowa funkcja, wymagania techniczne i funkcjonalne (w tym wymiary) oraz referencyjny okres analizy, utożsamiany w tym przypadku z okresem eksploatacji wynoszącym 50 lat. Założono również jednakowe zabezpieczenia powierzchni poziomych elementów betonowych, ze względu na konieczność zachowania ich trwałości w danym środowisku, oraz zabezpieczenia pozostałych powierzchni betonowych ze względów przeciwpożarowych. W związku z tym zrównoważoną ocenę założonych wariantów konstrukcyjno-materiałowych odniesiono do:

- zmiennej klasy betonu: C30/37, C50/60 i C80/95,
- proporcjonalnej do danej klasy ilości betonu i stali zbrojeniowej (tab. 8.2),
- składu mieszanek betonowych w poszczególnych klasach,
- technologii zabudowy poszczególnych rodzajów mieszanek betonowych: betonu zwykłego i betonu samozagęszczalnego,
- sposobu zagospodarowania kruszywa pochodzącego z rozbiórki analizowanej konstrukcji: kruszywa o niskich parametrach użytkowych, na podbudowę lub do ponownego wykorzystania w betonie.

Tabela 8.2

Ekwiwalent funkcjonalny dla zrównoważonej oceny konstrukcji żelbetowej analizowanego garażu wielopoziomowego (wartości w nawiasach odnoszą się do 4 segmentów)

Wariant	Klasa betonu	Zużycie betonu [m^3]	Zużycie stali zbrojeniowej [kg]	Rodzaj betonu	Rodzaj mieszanki	Zagospodarowanie po rozbiórce
W-I	C30/37	1 077,8 (4311,3)	61 521,8 (246 087,2)	zwykły	M1 – NSC 30/37	materiał wypełniający o niskich wymaganiach jakościowych
					M2 – NSC 30/37	
					M3 – NSC 30/37	
				samozagęszczalny	M9 – NSC 30/37	
					M10 – NSC 30/37	
					M11 – NSC 30/37	
W-II	C50/60	995,9 (3983,7)	60 930,6 (243 722,4)	zwykły o podwyższonej klasie	M4 – NSC 50/60	kruszywo do produkcji betonu
					M5 – NSC 50/60	
					M6 – NSC 50/60	
				samozagęszczalny o podwyższonej klasie	M12 – SCC 50/60	
					M13 – SCC 50/60	
					M14 – SCC 50/60	

Tabela 8.2 cd.

Wariant	Klasa betonu	Zużycie betonu [m³]	Zużycie stali zbrojeniowej [kg]	Rodzaj betonu	Rodzaj mieszanki	Zagospodarowanie po rozbiórce
W-III	C80/95	917,5 (3670,2)	60 908,4 (243 633,6)	wysokowartościowy	M7 – HPC 80/95	kruszywo do podbudowy / produkcji betonu
					M8 – HPC 80/95	
				wysokowartościowy samoagęszczalny	M15 – HPSCC 80/95	
					M16 – HPSCC 80/95	

Ocenę zrównoważoną przeprowadzono dla mieszanek betonowych, dla których wykonano m.in. szczegółową ocenę LCA i S-LCA oraz określono wartości kosztorysowe zgodnie z rozdziałami 5–7. Ze względu na parametry użytkowe kruszywa pochodzącego z rozbiórki betonów określonych klas, jego zagospodarowanie przyjęto jako materiał wypełniający o niskich wymaganiach jakościowych (dla klasy C30/37) lub alternatywnie jako kruszywo na podbudowę bądź do ponownego wykorzystania w mieszankach betonowych (dla klas C50/60 i C80/95). W przypadku betonów samozagęszczalnych dodatkowo uwzględniono brak konieczności zagęszczania mieszanki podczas zabudowy.

Analizę cyklu życia konstrukcji żelbetowej przeprowadzono przy następujących założeniach:

– zakres analizy – od kołyski do grobu, z uwzględnieniem fazy D (moduły A1–A5, B1–B7, faza D);
– jednostka funkcjonalna – dla betonu i żelbetu: 1 m³, dla stali zbrojeniowej: 1 t.

Szczegółowy opis zakresu analizy dla poszczególnych mieszanek betonowych i stali zbrojeniowej przedstawiono w rozdziałach 5–7.

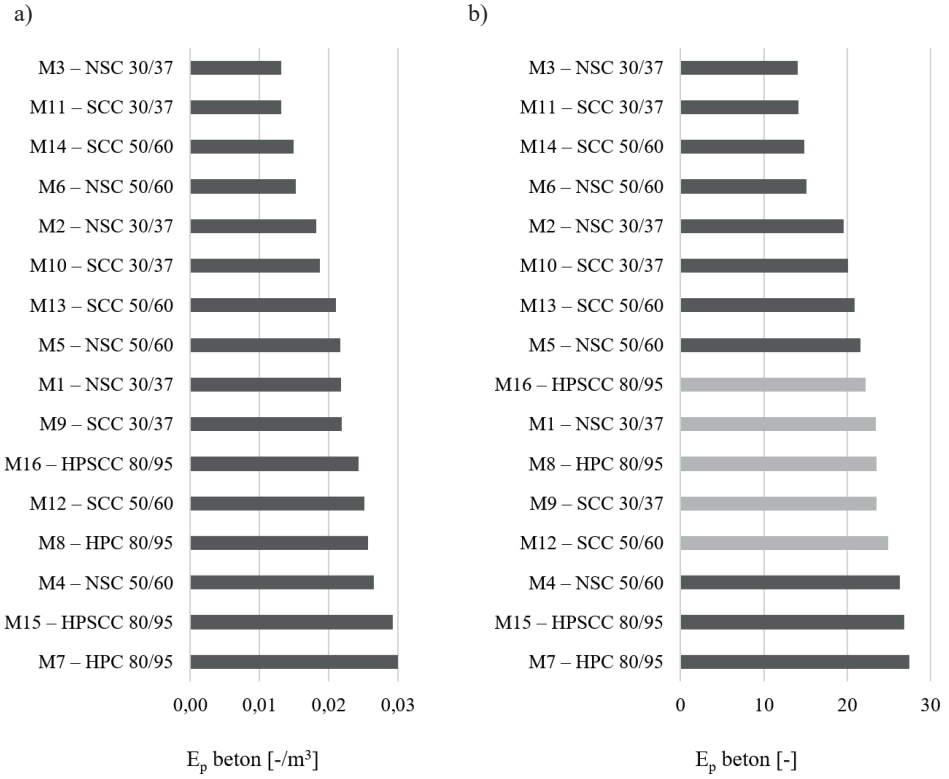
8.4. Analiza kryterium środowiskowego zrównoważonej oceny

8.4.1. Wskaźnik Ecopoint dla mieszanek betonowych

W ramach przeprowadzonej analizy dokonano szczegółowej oceny wybranych mieszanek betonowych pod kątem ich wpływu na środowisko, posługując się wartościami wskaźnika Ecopoint zarówno w odniesieniu do jednostki objętości betonu (1 m³), jak i sumarycznie dla konstrukcji pojedynczego segmentu.

Celem przeprowadzonych obliczeń było wskazanie mieszanek betonowych o najwyższej efektywności środowiskowej oraz porównanie wyników w ujęciu jednostkowym i sumarycznym. Umożliwiło to interpretację oraz wskazanie kluczowych trendów i zależności między klasą wytrzymałości betonu, jego rodzajem (zwykłym, samozagęszczalnym,

wysokowartościowym) a wartością wskaźnika. Wyniki rankingowania mieszanek betonowych, określonych na podstawie przeprowadzonej analizy LCA, przedstawiono na rysunku 8.14.



Rys. 8.14. Porównanie rankingu mieszanek betonowych ze względu na wartość E_p: a) w odniesieniu do 1 m³ betonu; b) w odniesieniu do konstrukcji

Maksymalna różnica procentowa wskaźnika E_p dla 1 m³ betonu wynosi 56,3%, co potwierdza duże zróżnicowanie wpływu środowiskowego mieszanek w skali jednostkowej. W zestawieniu (rys. 8.14) wyraźnie wyróżniają się dwie mieszanki betonowe klasy C30/37: M3 (beton zwykły) i M11 (SCC – beton samozagęszczalny). Charakteryzują się one najniższym poziomem oddziaływania środowiskowego, równym 0,013 E_p/m³, co potwierdza ich korzystny profil wśród analizowanych mieszanek. Najmniej korzystne pod względem środowiskowym okazały się mieszanki klasy C80/95: M15 (beton HPSCC) i M7 (beton HPC), których wartość wskaźnika zbliża się do 0,03 E_p/m³.

Analiza wskaźnika Ecopoint dla całego segmentu konstrukcji ukazuje zbliżony trend, przy czym maksymalna różnica spada do 48,7%. Można zatem stwierdzić, że różnice we wpływie środowiskowym różnych mieszanek są mniej wyraźne, choć nadal istotne. Mieszanki M3 i M11 ponownie osiągnęły najniższe wartości całkowite, odpowiednio 14,11 i 14,13 Ecopoint, potwierdzając swoją wysoką pozycję w rankingu efektywności środowiskowej.

Warto zauważyć, że różnica między tymi wartościami jest minimalna, co może wskazywać na brak istotnego wpływu typu mieszanki (beton zwykły vs. beton samozagęszczalny) w ramach analizowanej klasy wytrzymałościowej C30/37 na poziom ich oddziaływania środowiskowego. Betony o najwyższej klasie wytrzymałościowej (C80/95) pozostały na końcu rankingu zarówno w analizie jednostkowej, jak i sumarycznej. Najwyższe wartości wskaźnika dla tych mieszanek (M7 – HPC i M15 – HPSCC) mieszczą się w przedziale 26,84–27,50 E_p w zestawieniu sumarycznym. Tak wysokie wartości wynikają przede wszystkim z zastosowania większej ilości materiałów cementowych oraz specjalnych dodatków niezbędnych do osiągnięcia wysokich właściwości mechanicznych.

Pomimo ogólnej zgodności obu analizowanych rankingów, szczegółowa analiza ujawnia zmiany wartości bezwzględnych i względnych, wynikające z różnic w objętości zastosowanych mieszanek w całej konstrukcji. Podkreśla to konieczność uwzględnienia nie tylko jednostkowej efektywności środowiskowej, ale przede wszystkim całkowitego zużycia materiałów podczas projektowania konstrukcji. Dobrze ilustruje to procentowa różnica między mieszankami M3 (1. pozycja w rankingu) a M14 (3. pozycja), która w analizie jednostkowej wynosi 13%, a w analizie całego segmentu konstrukcji już tylko 5,9%.

8.4.2. Wskaźnik Ecopoint dla stali

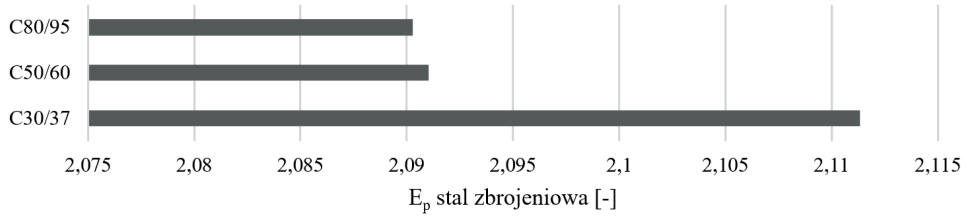
Analiza sumarycznych wartości wskaźnika Ecopoint dla zużycia stali zbrojeniowej została przeprowadzona przy założeniu jednostkowej wartości wskaźnika Ecopoint dla stali, wynoszącej 0,0343 E_p/t. Założenie to wynika z zastosowania jednolitego rodzaju stali oraz identycznej metody jej produkcji we wszystkich analizowanych wariantach konstrukcyjno-materiałowych. Mimo stałej wartości wskaźnika jednostkowego, w analizie całkowitej uwidoczniły się różnice wynikające z odmiennego zapotrzebowania na stal, zależnego od zastosowanej klasy betonu.

Najwyższe sumaryczne wartości wskaźnika Ecopoint (2,11) odnotowano dla wariantów konstrukcyjnych opartych na mieszankach betonowych klasy C30/37. Wyższy wskaźnik wynika bezpośrednio z konieczności użycia większej ilości stali zbrojeniowej w celu zapewnienia odpowiednich parametrów mechanicznych przy betonie tej klasy, co przekłada się na większe obciążenie środowiskowe.

W przypadku wariantów opartych na mieszankach betonowych o wyższych klasach wytrzymałości (C50/60 i C80/95) uzyskano niższe wartości wskaźnika Ecopoint (ok. 2,09), wynikające z mniejszego całkowitego zużycia stali zbrojeniowej. Różnica między klasami C50/60 i C80/95 była marginalna i znacznie mniejsza niż między klasami C30/37 a C50/60. Całkowita różnica między najkorzystniejszym a najmniej korzystnym wariantem wynosi ok. 1%. Wniosku tego jednak nie można uogólniać, ponieważ redukcja ilości stali w konstrukcji silnie zależy od jej schematu statycznego.

Wyniki analizy potwierdzają znaczenie właściwego doboru klasy betonu w kontekście równoważenia efektów ekologicznych i konstrukcyjnych. Pomimo stałej wartości jednostkowego wskaźnika ekologicznego dla stali, sumaryczne wartości Ecopoint dla konstrukcji są bezpośrednio powiązane z efektywnością konstrukcyjną i optymalizacją zużycia stali,

wynikającą z zastosowania różnych klas betonu. Ranking wariantów, opracowany w odniesieniu do zastosowanych mieszanek betonowych i oparty na wskaźniku Ecopoint dla stali zbrojeniowej, przedstawiono na rysunku 8.15.



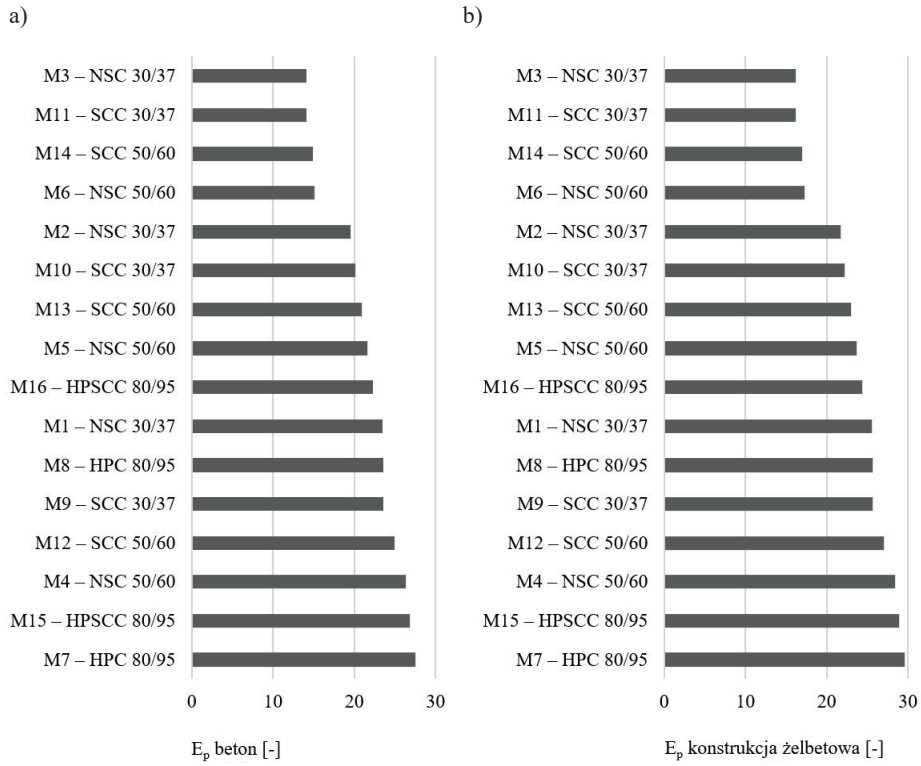
Rys. 8.15. Ranking mieszanek betonowych ze względu na wartość E_p dla stali zbrojeniowej w odniesieniu do całej konstrukcji

8.4.3. Wskaźnik Ecopoint dla konstrukcji żelbetowej

Przeprowadzona analiza sumarycznego oddziaływania środowiskowego konstrukcji, uwzględniająca łącznie zużycie mieszanki betonowej i stali zbrojeniowej, pozwoliła na ustalenie rankingu najkorzystniejszych rozwiązań pod względem efektywności środowiskowej. Na rysunku 8.16 przedstawiono porównanie rankingu E_p uzyskanego dla betonu oraz dla betonu i stali w segmencie konstrukcji.

W przypadku konstrukcji żelbetowej powtórzyły się wyniki uzyskane w analizie samego betonu. Najkorzystniejsze pod względem środowiskowym okazały się warianty konstrukcyjno-materiałowe oparte na mieszankach betonowych klasy C30/37: M3 (beton zwykły) i M11 (SCC – beton samozagęszczalny), a najmniej korzystne – warianty oparte na mieszankach klasy C80/95 (M7 i M15). Pomimo mniejszego zużycia stali w przeliczeniu na jednostkę objętości betonu w wariantach konstrukcyjnych opartych na klasach C50/60 i C80/95, ich całkowity wpływ środowiskowy pozostaje wysoki ze względu na obciążenia wynikające z produkcji samego betonu. Nieznacznie zmniejszyła się różnica między 1. a 3. pozycją w rankingu: w przypadku samego betonu wynosiła 5,9%, a w ujęciu konstrukcji żelbetowej – 4,5%.

Mieszanki betonowe niższych klas wytrzymałości (np. C30/37) są często korzystniejsze środowiskowo i powinny być wybierane, o ile wymagania techniczne pozwalają na ich zastosowanie. Z kolei mieszanki wysokowytrzymałościowe, choć technicznie atrakcyjne, wiążą się z wyższym obciążeniem środowiskowym, co wymaga szczegółowej oceny przy ich wyborze. Pośrednie klasy betonu (np. C50/60) mogą stanowić kompromis między wymaganiami technicznymi a aspektami ekologicznymi, dlatego ich stosowanie może być zasadne w kontekście równoważenia uwarunkowań konstrukcyjnych i środowiskowych. Kluczowym elementem pozostaje zatem optymalny dobór klasy i rodzaju mieszanki betonowej, uwzględniający zarówno wymagania techniczne, jak i ekologiczne aspekty realizacji inwestycji budowlanych.



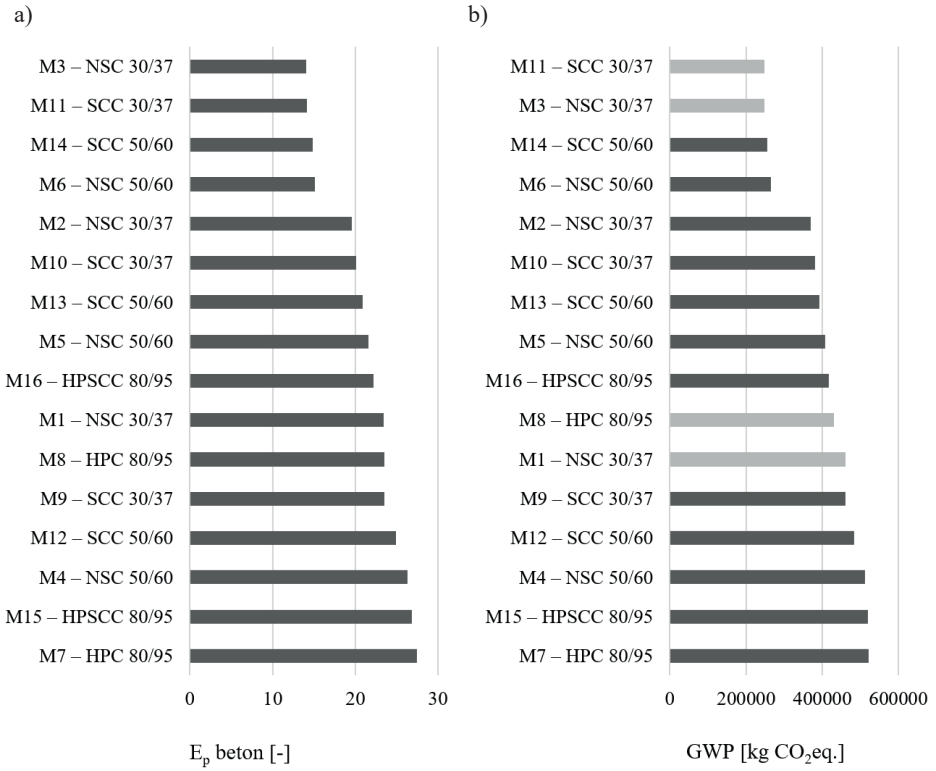
Rys. 8.16. Porównanie rankingu wariantów konstrukcyjno-materiałowych ze względu na wartość E_p: a) dla betonu w konstrukcji; b) dla konstrukcji z uwzględnieniem stali zbrojeniowej

8.4.4. Wskaźniki GWP i ADP-fossils dla konstrukcji żelbetowej

Dodatkowo przeprowadzono rankingowanie w ramach analizy środowiskowej opartej na pojedynczych wskaźnikach oddziaływania ekologicznego, takich jak GWP, reprezentujący ślad węglowy konstrukcji, oraz ADP-fossils, odnoszący się do zużycia nieodnawialnych surowców kopalnych. Celem analizy była ocena zgodności rankingów mieszanek betonowych, uzyskanych na podstawie uproszczonych wskaźników środowiskowych, z kompleksowym rankingiem wyznaczonym na podstawie sumarycznego wskaźnika Ecopoint dla całej konstrukcji. Wyniki rankingowania analizowanych mieszanek względem wartości wskaźników GWP i ADP-fossils przedstawiono na rysunkach 8.17 i 8.18.

Przeprowadzona analiza, oparta wyłącznie na wskaźniku śladu węglowego (GWP), wykazała znaczną zgodność z kompleksowym rankingiem mieszanek betonowych uzyskanym na podstawie sumarycznego wskaźnika Ecopoint. Najkorzystniejsze pod względem oddziaływania na środowisko, podobnie jak w przypadku wskaźnika Ecopoint, okazały się mieszanki betonu klasy C30/37: M11 – SCC (248 083,5 kg CO_2 eq) oraz M3 – beton zwykły (248 137,4 kg CO_2 eq). Nastąpiła wprawdzie zmiana ich kolejności w rankingu,

jednak różnica w wynikach wynosi jedynie 0,02%. W porównaniu z najbardziej niekorzystnymi mieszankami wysokowytrzymałościowymi klasy C80/95, tj. M7 – HPC (522 097,1 kg CO_2 eq) i M15 – HPSCC (519 980,3 kg CO_2 eq), generują one o około 52% mniejszy ślad węglowy, co podkreśla istotne korzyści środowiskowe wynikające ze stosowania betonu o umiarkowanej wytrzymałości.

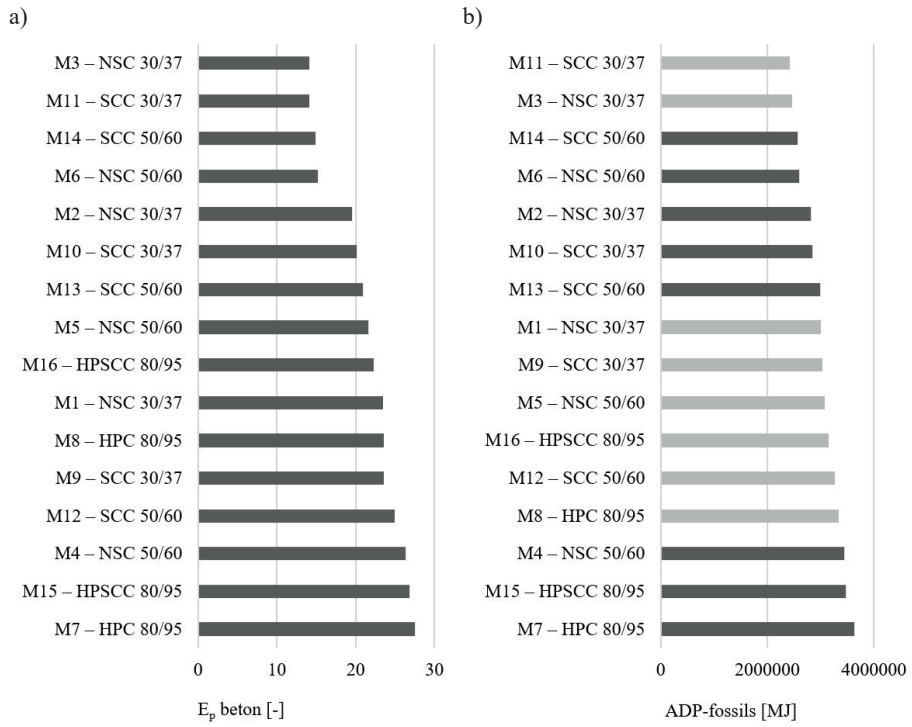


Rys. 8.17. Porównanie rankingu mieszanek betonowych ze względu na wartość: a) E_p dla betonu w odniesieniu do konstrukcji; b) GWP w odniesieniu do konstrukcji

Potwierdzono zasadniczą spójność wyników obu analizowanych podejść, choć zauważalne są pewne różnice w pozycjach pośrednich mieszanek betonowych. W szczególności w analizie GWP różnice między mieszankami klasy C50/60 stały się bardziej wyraźne niż w analizie wskaźnika Ecopoint. Zjawisko to wynika z odmiennej wagi przypisywanej poszczególnym składnikom mieszanki w zależności od ocenianej kategorii wpływu.

Przeprowadzona analiza porównawcza mieszanek betonowych z wykorzystaniem wskaźnika ADP-fossils, będącego miarą zużycia nieodnawialnych zasobów kopalnych, wykazała zgodność trendów z wcześniejszymi wynikami opartymi na wskaźnikach Ecopoint i GWP. Najkorzystniejsze rezultaty uzyskały mieszanki betonowe M11 i M3, odpowiednio o wartościach wskaźnika ADP-fossils równych 2 429 150 MJ i 2 464 784 MJ (różnica rzędu 1,5%).

Z kolei najwyższymi wartościami wskaźnika ADP-fossils charakteryzują się mieszanki wysokowytrzymałościowe klasy C80/95, w tym M7 (3 637 501 MJ) oraz M15 (3 468 225 MJ). W porównaniu z mieszankami M3 i M11, wskaźniki te są wyższe o ok. 48%, co wynika z dużego udziału energochłonnych składników (zwłaszcza cementu), wymagających znacznych nakładów energetycznych związanych ze zużyciem paliw kopalnych.



Rys. 8.18. Porównanie rankingu mieszanek betonowych ze względu na wartość:
a) E_p dla betonu w odniesieniu do konstrukcji; b) ADP-fossils w odniesieniu do konstrukcji

Analiza rankingów mieszanek betonowych uzyskanych z wykorzystaniem wskaźnika ADP-fossils potwierdziła ogólną spójność trendów obserwowanych w analizach opartych na wskaźnikach Ecopoint i GWP. Mieszanki niższych klas wytrzymałości konsekwentnie zajmują pozycje najbardziej korzystne środowiskowo, natomiast mieszanki wysokowytrzymałościowe pozostają na końcu rankingu.

Mimo wyraźnej spójności rankingów należy zauważyć pewne różnice, wynikające z ograniczonego zakresu pojedynczych wskaźników środowiskowych, takich jak GWP i ADP-fossils, które koncentrują się odpowiednio na emisjach gazów cieplarnianych oraz zużyciu zasobów kopalnych. Wskaźniki zintegrowane, takie jak Ecopoint, pozwalają na kompleksowe uwzględnienie większej liczby kategorii oddziaływania, co potwierdza zasadność stosowania tego typu narzędzi analitycznych dla pełniejszej oceny ekologicznej efektywności mieszanek betonowych na etapie projektowania i wyboru materiałów w praktyce budowlanej.

Niemniej jednak, na etapie wstępnych analiz wykorzystanie pojedynczych wskaźników środowiskowych może stanowić wystarczające przybliżenie wyniku.

8.5. Analiza kryterium ekonomicznego zrównoważonej oceny

8.5.1. Założenia do analizy

Analiza LCC, analogicznie jak analiza LCA, została ograniczona do dwóch faz cyklu życia rozpatrywanego obiektu: fazy A (budowa) oraz fazy C (likwidacja), ponieważ w przypadku konstrukcji żelbetowej w fazie B (użytkownie), zgodnie z przyjętym celem analizy, nie występują istotne koszty eksploatacyjne. Ze względu na to, że w praktyce inwestycyjnej analiza kosztów cyklu życia obiektów budowlanych jest najczęściej dostosowywana do standardów kosztorysowania, analizę LCC odniesiono do wartości kosztorysowych i cen jednostkowych. Obliczenia wartości kosztorysowej poszczególnych faz przeprowadzono metodą uproszczoną, opierając się na jednostkowych cenach określonych na podstawie analizy indywidualnej oraz przy wykorzystaniu kalkulacji szczegółowej (Dz.U. 2021, poz. 2458). Podstawę do określenia nakładów rzeczowych stanowiły publikacje naukowe oraz katalogi nakładów rzeczowych (KNR):

- KNR 2-02 – Konstrukcje budowlane,
- KNR 0-20 – Konstrukcje betonowe i żelbetowe monolityczne w deskowaniu PERI,
- KNR-W 4-01 – Roboty remontowe budowlane.

Ceny jednostkowe robocizny, materiałów i sprzętu określono na podstawie analizy rynku budowlanego, obejmującej:

- dane z publikacji cenowych (Intercenbud oraz Bistyp, I kwartał 2025 r.),
- wyniki konsultacji z praktykami i ekspertami branżowymi,
- informacje uzyskane podczas wywiadów środowiskowych i przeglądu ofert firm wykonawczych.

Narzuty ustalono na jednolitym poziomie, na podstawie publikacji cenowych z I kwartału 2025 r.

Zakres fazy A obejmował wszystkie zasadnicze etapy realizacji konstrukcji żelbetowej. W ramach kalkulacji wartości kosztorysowej ujęto: przygotowanie i montaż stali zbrojeniowej, montaż deskowania systemowego, a także układanie i pielęgnację mieszanki betonowej. W przypadku wariantów konstrukcyjno-materiałowych opartych na betonie samozagęszczalnym pominięto proces zagęszczania mieszanki betonowej.

W ramach fazy C uwzględniono procesy związane z rozbiórką konstrukcji żelbetowej. Zakres prac obejmował rozbiórkę elementów konstrukcyjnych z wykorzystaniem młotów hydraulicznych, a następnie załadunek i transport gruzu betonowego poza teren budowy. W kalkulacji uwzględniono procesy kruszenia betonu, mające na celu przygotowanie odpadu do ponownego wykorzystania jako kruszywa z recyklingu. W kalkulacji przyjęto zróżnicowanie normatywów pracy w zależności od klasy wytrzymałości betonu. Wyższa klasa wytrzymałości

betonu skutkuje zwiększonym nakładem robocizny oraz większym zapotrzebowaniem na energię i czas, co wynika z trudności w jego rozbiórce i kruszeniu.

W końcowej kalkulacji wartość kosztorysową fazy C ujęto w następujących wariantach:
- wartość kosztorysowa bez uwzględniania zmian wartości pieniądza w czasie;
- wartość kosztorysowa z uwzględnianiem kapitalizacji cen (*future value*) przy stopie procentowej 2,5%;
- wartość kosztorysowa z uwzględnieniem dyskontowania (*present value*) przy stopach dyskontowych 3% i 5%.

Dodatkowo wyznaczono wartość rezydualną kruszywa oraz złomu stalowego odzyskanych z rozbiórki konstrukcji żelbetowych w ramach fazy D cyklu życia analizowanego obiektu budowlanego (fazy poza granicami systemu). Wartość ta została skalkulowana na podstawie założonej ilości kruszywa i złomu stalowego pozyskanych z rozbiórki poszczególnych wariantów konstrukcyjno-materiałowych oraz przyjętej jakości kruszywa. Wartość rynkową określono wariantowo, analogicznie jak w przypadku wartości kosztorysowej fazy C, w odniesieniu do jej dyskontowania.

Przykładową, kompleksową kalkulację wartości kosztorysowej dla jednego z rozpatrywanych wariantów przedstawiono w załączniku 2. Dla pozostałych wariantów przedstawiono tabelaryczne podsumowania przeprowadzonych kalkulacji.

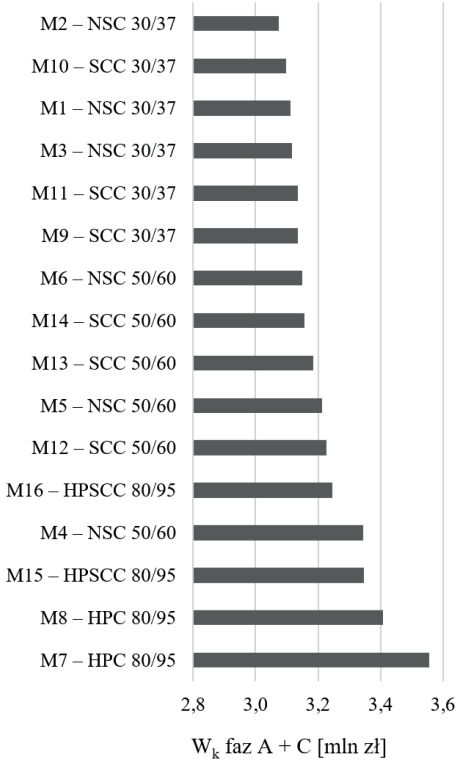
8.5.2. Analiza wartości kosztorysowej fazy A i C

Analiza wartości kosztorysowej (W_k) wariantów konstrukcyjno-materiałowych w cyklu życia, określonych według cen aktualnych (rys. 8.19), wskazuje na różnice cenowe pomiędzy wariantami dla poszczególnych klas wytrzymałości betonu i technologii ich produkcji. Najbardziej efektywne ekonomicznie okazały się warianty na bazie mieszanki M2 (NSC 30/37, beton zwykły), której całkowita wartość kosztorysowa wyniosła 3 074 955 zł, oraz mieszanki M10 (SCC 30/37, beton zwykły), która generuje wartość kosztorysową wynoszącą 3 097 625 zł (0,74% więcej niż wariant M2). Inne warianty konstrukcyjno-materiałowe w tej samej klasie wytrzymałości betonu, niezależnie od technologii, zwiększają W_k o około 2%.

Wyraźny wzrost wartości kosztorysowej jest widoczny w przypadku wariantów na bazie betonów wyższych klas wytrzymałości. W obrębie wariantów konstrukcyjno-materiałowych na bazie betonów klasy C50/60 najtańszą opcją okazał się wariant M6 (NSC 50/60), z W_k wynoszącą 3 149 350 zł, co oznacza wzrost o ok. 2,4% w stosunku do wariantu na bazie mieszanki M2 (NSC 30/37). Rozrzut wartości dla wariantów na bazie tej klasy betonu jest znaczny. Wariant M4 (NSC 50/60, beton zwykły), którego wartość kosztorysowa osiągnęła 3 344 318 zł, stanowi odpowiednio W_k o 8,7% i 6,2% większą względem najtańszego wariantu w klasach C30/37 i C50/60.

Wartości kosztorysowe w wariantach na bazie betonu klasy C80/95 są wyższe, co jest związane z koniecznością zastosowania specjalistycznych dodatków oraz bardziej złożonej technologii produkcji. Najdroższym analizowanym wariantem konstrukcyjno-materiałowym jest M7 (HPC 80/95, beton zwykły), którego W_k wynosi 3 555 238 zł, co stanowi o 9,5% więcej niż najtańsza mieszanka w klasie C80/95 oraz o 15,6% więcej niż wariant o najniższej wartości kosztorysowej.

Wraz ze wzrostem klasy betonu różnice wartości stają się wyraźniejsze. Zastosowanie betonów specjalistycznych (SCC, HPC, HPSCC) wiąże się ze zwiększeniem wartości kosztorysowych w porównaniu z betonami zwykłymi, jednak może być uzasadnione z punktu widzenia cyklu życia obiektu, w kontekście analizy środowiskowej lub społecznej.

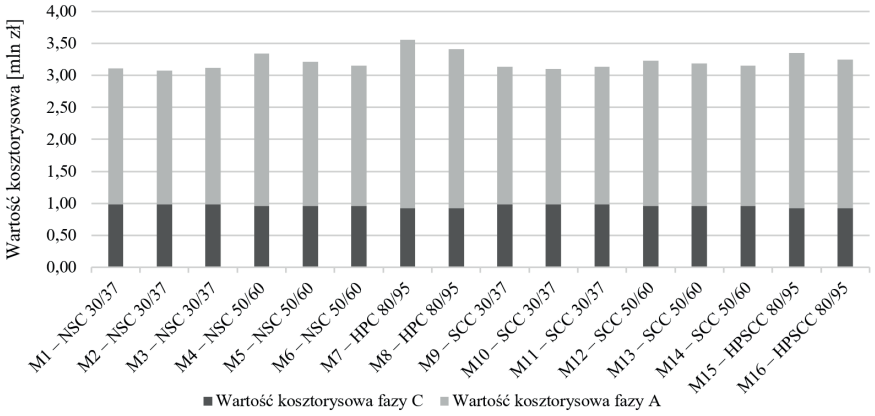


Rys. 8.19. Ranking wariantów konstrukcyjno-materiałowych ze względu na wartości kosztorysowe fazy A + C

Analiza wartości kosztorysowej fazy C, czyli końcowej fazy cyklu życia, wskazuje na różnice w procentowym udziale tej fazy w W_k poszczególnych wariantów konstrukcyjno-materiałowych, w zależności od rodzaju i klasy mieszanek betonowych (rys. 8.20). Najwyższe wartości kosztorysowe fazy C odnotowano dla wariantów na bazie mieszanek niższej klasy wytrzymałości (C30/37), wynoszące 985 145 zł. Dla tej grupy mieszanek udział wartości kosztorysowej fazy C w całkowitej W_k cyklu życia jest znaczący i wynosi 46%–47%. Oznacza to, że niemal połowa całkowitej W_k cyklu życia mieszanek betonu niższej klasy jest związana z ich końcowym zagospodarowaniem.

Dla wariantów konstrukcyjno-materiałowych na bazie betonu klasy C50/60 wartości kosztorysowe fazy C są nieco niższe (957 895 zł), a ich udział procentowy w całkowitej W_k jest mniejszy i wynosi 40–44%. Oznacza to tendencję spadku udziału fazy C wraz ze wzrostem klasy wytrzymałości mieszanek betonowych.

Najniższe wartości kosztorysowe fazy C zaobserwowano dla wariantów konstrukcyjno-materiałowych na bazie betonów klasy C80/95, wynoszące 926 541 zł. W tym przypadku udział procentowy W_k fazy C w całkowitej wartości kosztorysowej cyklu życia mieszanek był najmniejszy, oscylując w zakresie 35–40%. Wskazuje to wyraźny trend spadku znaczenia W_k fazy C wraz z rosnącym zaawansowaniem technologicznym i wytrzymałościowym mieszanek.



Rys. 8.20. Udział wartości kosztorysowej faz A i C w całkowitej W_k (analiza bez uwzględniania zmian wartości pieniądza w czasie)

8.5.3. Analiza wartości kosztorysowej fazy A oraz kapitalizowanej fazy C

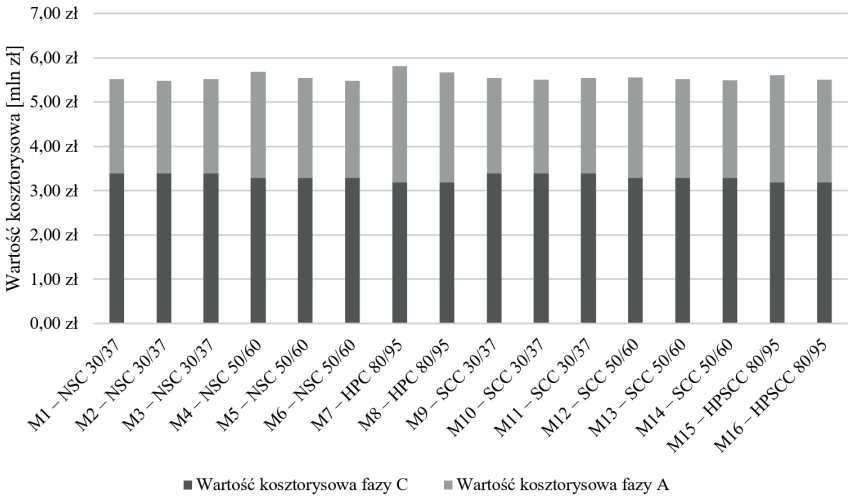
Analiza wartości kosztorysowej dla wariantów konstrukcyjno-materiałowych w fazach A i C, uwzględniająca kapitalizację wartości kosztorysowej fazy C w okresie 50 lat, została przedstawiona na rysunkach 8.21 i 8.22. Wzrost W_k dla wariantów na bazie mieszanek niższych klas (C30/37) jest stosunkowo większy niż dla wariantów na bazie mieszanek wyższych klas. Po 50 latach wartość kosztorysowa faz A i C dla wariantu M1 (NSC 30/37) wzrasta do 5 512 395 zł, co stanowi wzrost o 77% względem wartości początkowej. Podobnie, warianty M2 oraz M3 osiągają wzrosty odpowiednio o około 78% i 77%.

Dla wariantów na bazie betonu klasy C50/60 wariant M4 (NSC 50/60) osiąga najwyższą wartość kosztorysową, wynoszącą 5 678 813 zł, co odpowiada wzrostowi o około 69%. Najniższą końcową wartość kosztorysową w tej klasie osiąga wariant M6 (NSC 50/60), z W_k 5 483 845 zł, co stanowi wzrost o około 74% względem wartości początkowej.

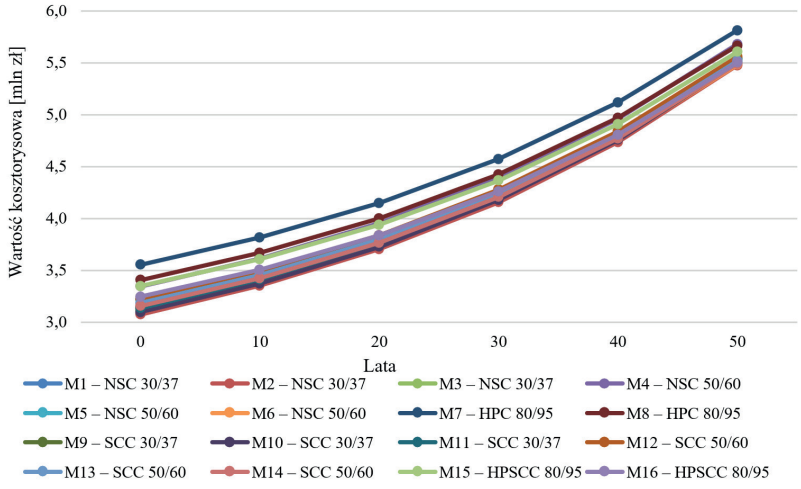
Mieszanki najwyższych klas (C80/95) wykazują bardziej stabilne tendencje wzrostowe. Dla mieszanki M7 (HPC 80/95) W_k po 50 latach wynosi 5 813 322 zł, co stanowi wzrost o ok. 63%. Podobnie, dla mieszanki M16 (HPSCC 80/95) wartość kosztorysowa wzrasta z początkowej 3 244 850 zł do 5 502 934 zł, co odpowiada wzrostowi o ok. 69%.

Długoterminowa analiza wskazuje, że warianty konstrukcyjno-materiałowe na bazie mieszanek betonowych niższych klas, choć początkowo tańsze, wykazują znacznie większy względny wzrost końcowej wartości kosztorysowej. Beton wysokich klas wytrzymałości,

mimo wyższych początkowych nakładów inwestycyjnych, charakteryzuje się bardziej umiarkowanymi wzrostami W_k kapitalizowanej w długim okresie.



Rys. 8.21. Udział wartości kosztorysowej faz A i C w całkowitej W_k
(analiza z uwzględnianiem kapitalizacji cen fazy C – stopa procentowa 2,5%)



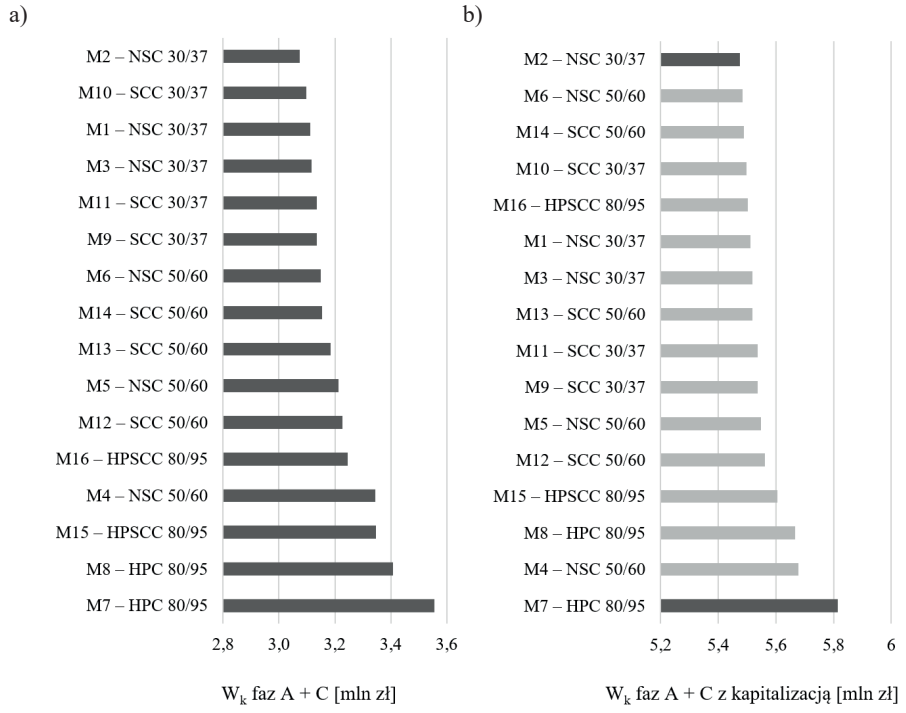
Rys. 8.22. Zmiana całkowitej wartości kosztorysowej z uwzględnieniem kapitalizacji cen fazy C
(stopa procentowa 2,5%)

Porównanie rankingów wartości kosztorysowych mieszanek betonowych, z uwzględnieniem kapitalizacji fazy C oraz bez kapitalizacji (rys. 8.23), wykazuje pewne różnice, podkreślające znaczenie długookresowego spojrzenia na ekonomikę materiałów budowlanych.

W rankingu bez kapitalizacji fazy C najniższe wartości kosztorysowe cyklu życia mają warianty na bazie mieszanek klasy C30/37, szczególnie mieszanka M2 (NSC 30/37, beton zwykły), której całkowita W_k wynosi 3 074 955 zł. Warianty na bazie mieszanek klas C80/95 są zdecydowanie droższe, osiągając W_k dla mieszanki M7 (HPC 80/95, beton zwykły) na poziomie 3 555 238 zł.

W przypadku uwzględnienia kapitalizacji wartości kosztorysowej fazy C sytuacja znacząco się zmienia. Mieszanka M2 (NSC 30/37) nadal pozostaje najbardziej ekonomiczna (5 475 863 zł), jednak różnice wartości kosztorysowej między nią a mieszankami innych klas wytrzymałości są mniej wyraźne. Niektóre mieszanki klasy C50/60, takie jak M6 (NSC 50/60), prezentują się wyjątkowo konkurencyjnie, zajmując drugą pozycję z wartością 5 483 845 zł, co sugeruje, że w perspektywie długoterminowej bardziej zaawansowane mieszanki betonu mogą stanowić równie korzystne, a nawet bardziej opłacalne rozwiązanie.

Największe zmiany w rankingu po kapitalizacji dotyczą wariantów opartych na betonach najwyższych klas. Mieszanka M16 (HPSCC 80/95), której początkowa wartość kosztorysowa bez kapitalizacji plasowała ją na 12. miejscu, po kapitalizacji fazy C zajmuje 5. miejsce w rankingu. Podobnie, mieszanka M14 (SCC 50/60) awansuje na 3. pozycję po kapitalizacji, co wskazuje, że wysokie początkowe wartości kosztorysowe bardziej zaawansowanych technologicznie betonów są rekompensowane przez niższe wartości W_k kapitalizowanej dla utrzymania i zagospodarowania końcowego w fazie C.



Rys. 8.23. Porównanie rankingu wariantów konstrukcyjno-materiałowych ze względu na wartości kosztorysowe: a) fazy A + C; b) fazy A oraz poddanych kapitalizacji W_k fazy C

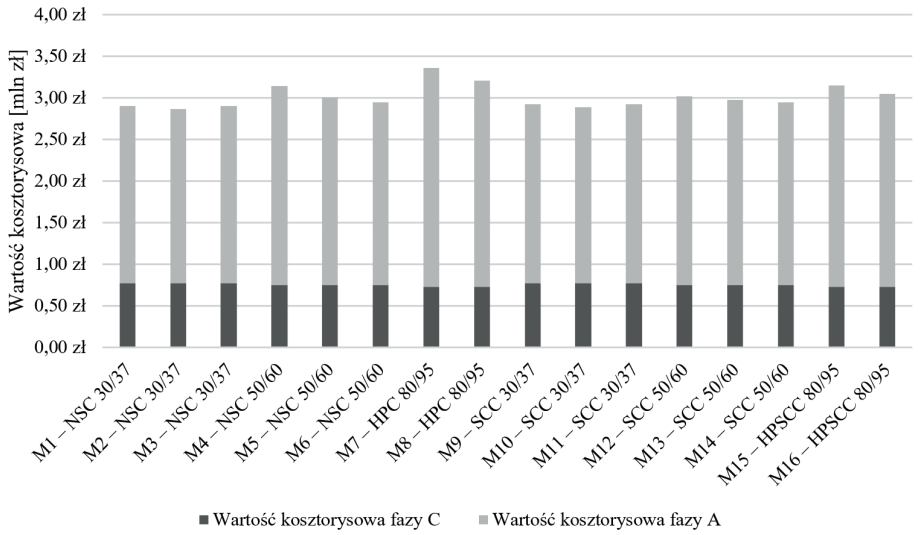
8.5.4. Analiza wartości kosztorysowej fazy A oraz zdyskontowanej fazy C

Analiza wartości kosztorysowej poszczególnych wariantów konstrukcyjno-materiałowych, z zastosowaniem metody dyskontowania W_k fazy C, pozwala ocenić efekt finansowy związany z końcowym zagospodarowaniem materiałów w perspektywie 50 lat, uwzględniając wartość pieniądza w czasie.

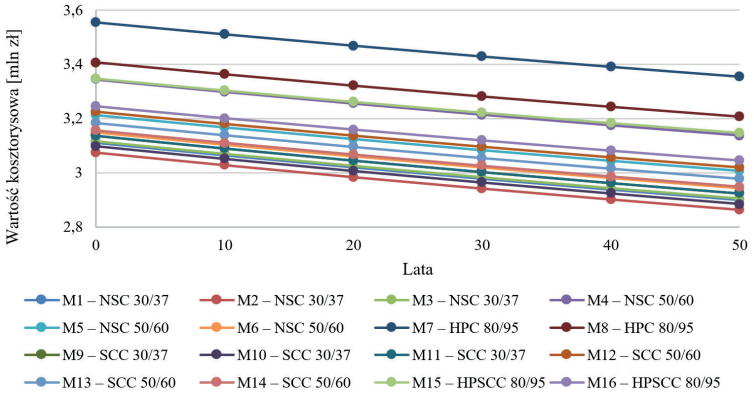
Przy stopie dyskontowej 3%, po 50 latach, wskutek zastosowania dyskontowania widoczny jest spadek efektywnej wartości kosztorysowej (rys. 8.24, 8.25). Największe spadki W_k odnotowano dla wariantu opartego na mieszance M7 (HPC 80/95), którego wartość zdyskontowana po 50 latach wynosi 3 355 132 zł, co oznacza redukcję o około 5,6% w porównaniu z wartością początkową. Podobną tendencję obserwuje się w przypadku innych wariantów opartych na mieszankach wysokowartościowych, takich jak M15 (HPSCC 80/95), gdzie W_k maleje z 3 347 902 zł do 3 147 796 zł, co oznacza redukcję o ok. 6%.

Największą procentową redukcję wartości kosztorysowej na skutek dyskontowania odnotowano w wariantach konstrukcyjno-materiałowych opartych na mieszankach betonu klasy C30/37, gdzie dla M1 spadek wyniósł ok. 6,8%, a dla M2 ok. 7%. W wariantach opartych na betonie klasy C50/60, takich jak M4 (NSC 50/60), redukcja W_k z 3 344 319 zł do 3 137 441 zł wynosi ok. 6,2%. Podobny efekt dyskontowania obserwuje się również w mieszankach typu SCC tej samej klasy.

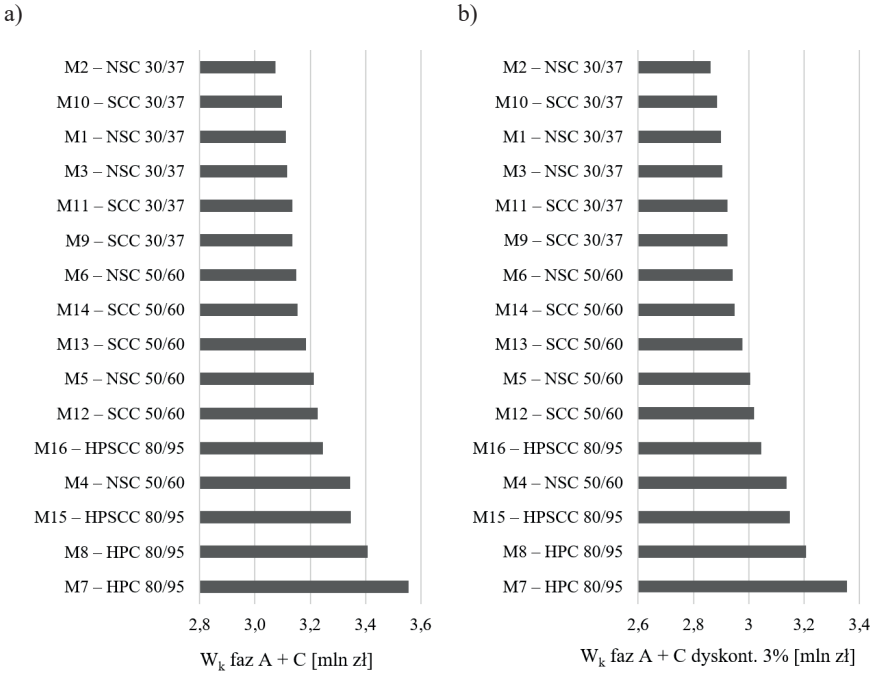
Porównując ranking wariantów konstrukcyjno-materiałowych, z uwzględnieniem dyskontowania wartości kosztorysowej fazy C, z rankingiem bez zastosowania dyskontowania (rys. 8.26), można dostrzec pewne różnice wynikające z uwzględnienia wartości pieniądza w czasie, jednak sama kolejność wariantów w rankingu nie ulega zmianie.



Rys. 8.24. Udział wartości kosztorysowej faz A i C w całkowitej W_k
(analiza z uwzględnianiem dyskontowania cen fazy C – stopa dyskontowa 3%)

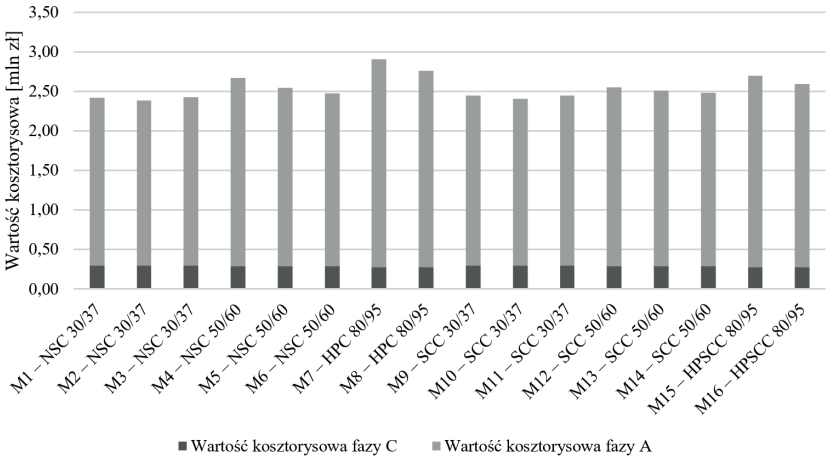


Rys. 8.25. Zmiana całkowitej W_k
z uwzględnieniem dyskontowania fazy C (stopa dyskontowa 3%)

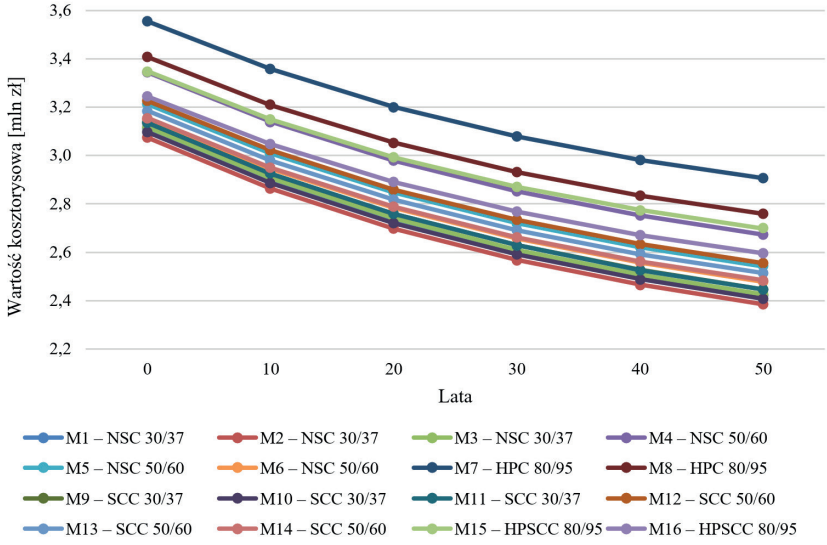


Rys. 8.26. Porównanie wariantów konstrukcyjno-materiałowych
ze względu na wartości kosztorysowe: a) faza A + C; b) faza A + faza C dyskontowana
(stopa dyskontowa 3%)

Przy zastosowaniu 5% stopy dyskontowej dla wartości kosztorysowej fazy C w odniesieniu do całkowitej W_k analizowanych wariantów konstrukcyjno-materiałowych (rys. 8.27 i 8.28) można zauważyć wyraźne zmniejszenie bezwzględnych wartości W_k w porównaniu z analizą nieuwzględniającą dyskontowania.



Rys. 8.27. Udział wartości kosztorysowej faz A i C w całkowitej W_k
(analiza z uwzględnianiem dyskontowania cen fazy C – stopa dyskontowa 5%)

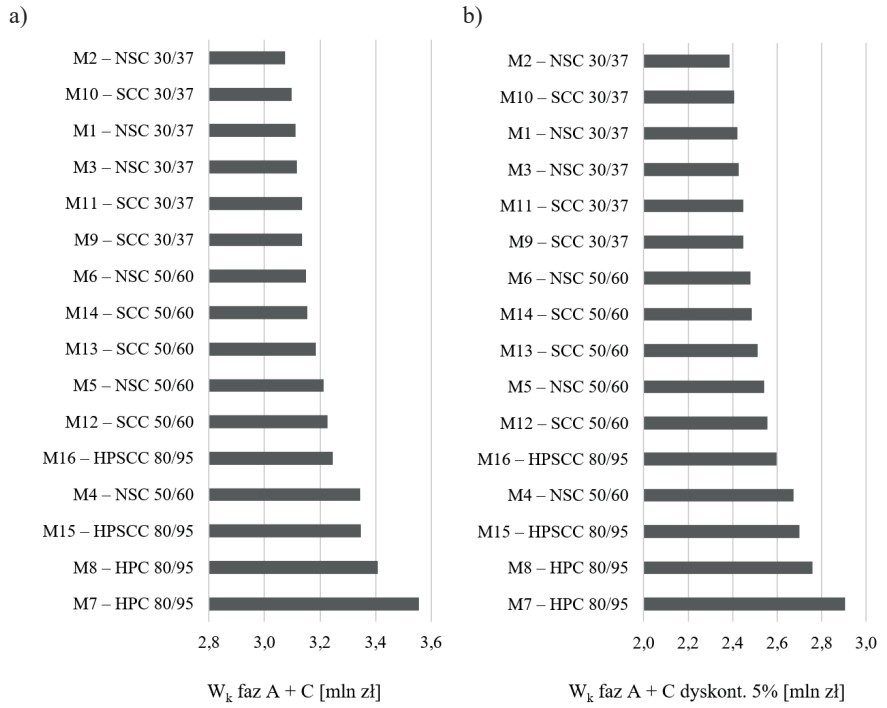


Rys. 8.28. Zmiana całkowitej W_k
z uwzględnieniem dyskontowania cen fazy C (stopa dyskontowa 5%)

W przypadku wariantu o najniższej wartości kosztorysowej – M2 (NSC 30/37, beton zwykły), całkowita W_k cyklu życia spadła z pierwotnych 3 074 955 zł do 2 385 086 zł (o ok. 22,4%). Podobną skalę obniżenia wartości kosztorysowej obserwuje się także w przypadku innych wariantów konstrukcyjno-materiałowych opartych na mieszankach klasy C30/37. Znaczne obniżenie W_k, o ok. 21%, dotyczyło także wariantów opartych na mieszankach klasy C50/60, takich jak M6 (NSC 50/60), którego całkowita wartość kosztorysowa zmniejszyła się

z 3 149 350 zł do 2 478 564 zł. Analogicznie, zastosowanie wyższej stopy dyskontowej miało także wpływ na warianty oparte na betonach najwyższych klas (C80/95), które początkowo charakteryzowały się najwyższymi wartościami kosztorysowymi cyklu życia, jednak spadek ten był nieznacznie mniejszy. Przykładowo, wariant oparty na mieszance M7 (HPC 80/95), pierwotnie najdroższy, z W_k równą 3 555 238 zł, po dyskontowaniu wykazał znaczną redukcję wartości kosztorysowej do 2 906 408 zł, co oznacza spadek o ok. 18,2%.

Uwzględnienie 5-procentowej stopy dyskontowej dla wartości kosztorysowej fazy C (analogicznie jak przy stopie 3-procentowej) nie powoduje zmian w kolejności wariantów konstrukcyjno-materiałowych w analizowanym rankingu (rys. 8.29). Wszystkie warianty utrzymują swoje pierwotne pozycje, jednak zastosowanie dyskontowania prowadzi do obniżenia całkowitej wartości kosztorysowej każdego z nich. Choć hierarchia wariantów pozostaje niezmieniona, różnice w wartościach absolutnych stają się bardziej wyrównane, co jest szczególnie zauważalne w przypadku mieszanek o najwyższych początkowych kosztach. Wyniki te wskazują, że nawet przy znaczącej redukcji wartości kosztorysowych w czasie struktura ekonomicznej opłacalności poszczególnych mieszanek betonowych pozostaje niezmieniona. W związku z tym, w odniesieniu do założonego celu prowadzenia zrównoważonej oceny monolitycznych konstrukcji żelbetowych w aspekcie kryterium ekonomicznego, wystarczające wydają się analizy oparte na kalkulacjach wartości kosztorysowych z uwzględnieniem aktualnych cen wszystkich faz cyklu życia tych konstrukcji.



Rys. 8.29. Porównanie wariantów konstrukcyjno-materiałowych ze względu na wartości kosztorysowe: a) faza A + C; b) faza A + faza C dyskontowana (stopa dyskontowa 5%)

8.5.5. Analiza wartości rezydualnej w ramach fazy D

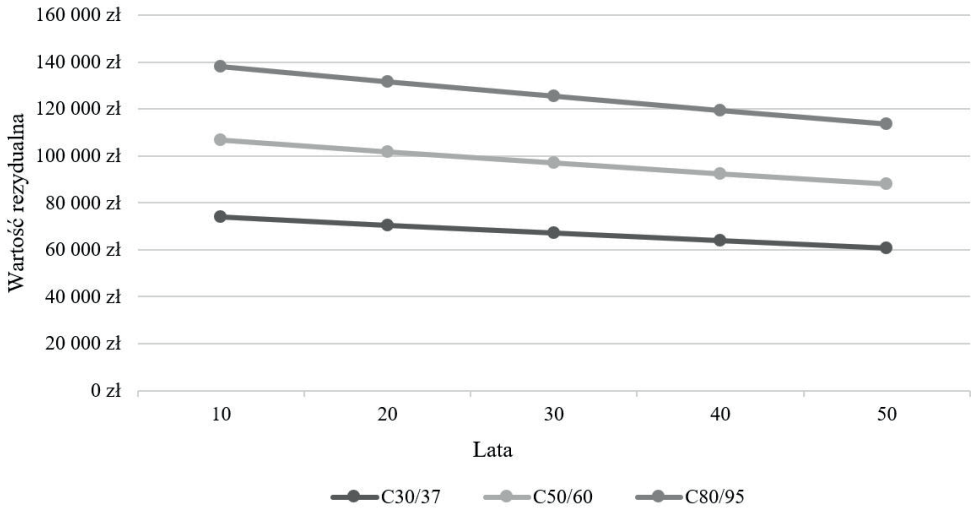
W celu oszacowania wartości rezydualnej kruszywa z recyklingu analizowanych klas betonów (C30/37, C50/60 oraz C80/95) określono ilość materiału możliwą do pozyskania w wyniku rozdrobnienia i przesiewania gruzu betonowego z tych konstrukcji. W analizie uwzględniono straty materiałowe wynikające z przewidywanych procesów kruszenia i przesiewania. Przyjęte średnie ceny jednostkowe kruszywa recyklingowego uwzględniają przewidywane parametry użytkowe tego materiału, bezpośrednio związane z klasą betonu stanowiącego jego pierwotne źródło. W konsekwencji założono, że kruszywo odzyskane z betonu klasy C30/37 może być stosowane przede wszystkim jako materiał o niższych wymaganiach jakościowych, pełniąc rolę wypełniacza w zasypach wykopów czy podsypkach. W przypadku betonów klasy C50/60 zakłada się możliwość wykorzystania kruszywa jako pełnowartościowego surowca do produkcji nowych mieszanek betonowych, natomiast dla klasy C80/95 kruszywo może być wykorzystane w analogiczny sposób lub jako materiał na podbudowy konstrukcyjne. Dodatkowo w analizie uwzględniono wartość rezydualną wynikającą z odzysku stali zbrojeniowej w postaci złomu (przyjęto 5% strat materiałowych). Wyniki uzyskanych wartości rezydualnych dla poszczególnych klas betonów przedstawiono w tabeli 8.3.

Tabela 8.3

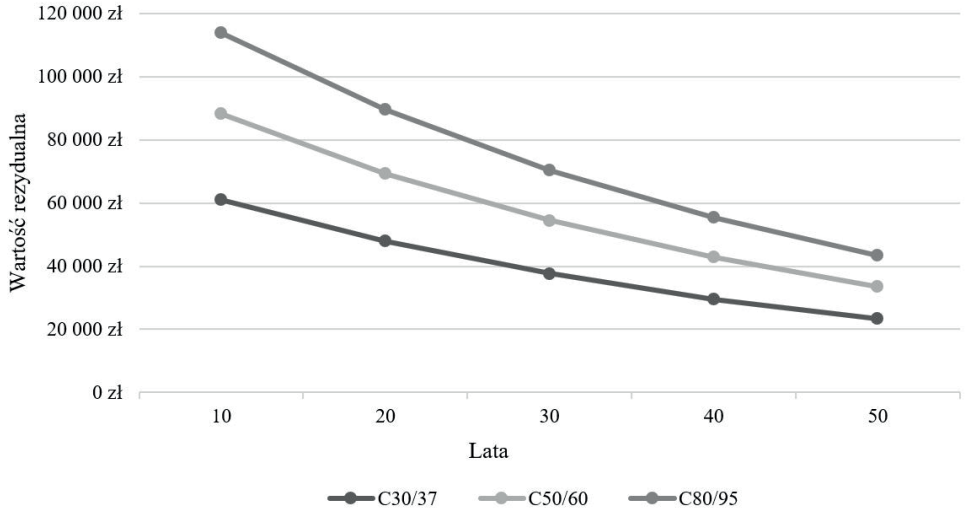
Wartości rezydualne określone dla kruszywa z recyklingu oraz złomu stalowego analizowanych klas betonów

Klasa betonu	Masa kruszywa z recyklingu [t]	Aktualna cena jednostkowa [zł/t]	Wartość rezydualna dla kruszywa z recyklingu [zł]	Masa złomu stalowego [kg]	Aktualna cena jednostkowa [zł/kg]	Wartość rezydualna dla stali zbrojeniowej [zł]	Wartość rezydualna całkowita [zł]
C30/37	1 832,3	20	36 647	58 446	0,7	40 912	77 559
C50/60	1 792,7	40	71 708	57 884	0,7	40 519	112 227
C80/95	1 743,4	60	104 601	57 863	0,7	40 504	145 105

Największa ilość kruszywa zostanie uzyskana z betonu klasy C30/37, jednak będzie to materiał niskiej jakości, co przy aktualnej cenie jednostkowej wynoszącej 20,0 zł/t daje łączną wartość rezydualną 36 647 zł. Mimo że ilość uzyskanego kruszywa z betonów klas C50/60 oraz C80/95 będzie niższa, to w związku z jego wyższą jakością, a tym samym znacząco wyższymi cenami jednostkowymi (40,0 zł/t oraz 60,0 zł/t), wartość rezydualna okaże się znacznie wyższa (odpowiednio 71 708 zł i 104 601 zł). Pierwotna klasa betonu, determinując potencjalne parametry użytkowe kruszywa z recyklingu, bezpośrednio wpływa na jego cenę rynkową, co odzwierciedla znaczne różnice wartości rezydualnej. Wartość rezydualna uzyskana ze sprzedaży złomu stalowego dla wszystkich klas betonów była na zbliżonym poziomie, wynosząc ok. 40,5–40,9 tys. zł.



Rys. 8.30. Zmiana wartości rezydualnej (kruszywa z recyklingu i złomu stalowego) – stopa dyskontowa 3%



Rys. 8.31. Zmiana wartości rezydualnej (kruszywa z recyklingu i złomu stalowego) – stopa dyskontowa 5%

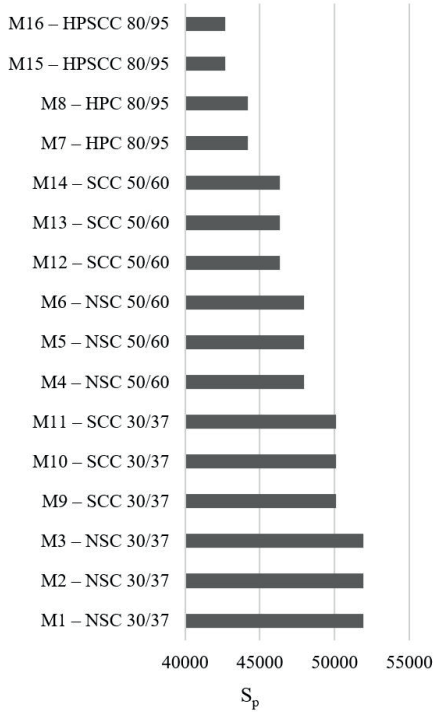
Należy podkreślić, że choć wartości rezydualne kruszyw pozyskanych z recyklingu betonów klas C30/37, C50/60 oraz C80/95, a także stali zbrojeniowej, osiągnęły poziom od ok. 77,6 tys. zł do ok. 145,1 tys. zł, są to kwoty stosunkowo niewielkie względem całości wartości kosztorysowych faz A i C cyklu życia konstrukcji, które średnio wynoszą ok. 3 200 000 zł. Oznacza to, że uzyskane oszczędności stanowią jedynie niewielką część całkowitych nakładów finansowych związanych z wytworzeniem i utylizacją badanych konstrukcji żelbetowych. Nabiera to jeszcze większego znaczenia, jeśli uzyskane wartości odniesie się do wartości pieniądza w czasie, przy założonym cyklu życia wynoszącym 50 lat. Zmiany wartości rezydualnych w czasie, dyskontowane stopą dyskontową na poziomie 3% i 5%, przedstawiono na rysunkach 8.30 i 8.31.

8.6. Analiza kryterium społecznego zrównoważonej oceny

Analiza aspektów społecznych S-LCA dla przedmiotowych mieszanek betonowych, w rozpatrywanych wariantach konstrukcyjno-materiałowych, pozwoliła ocenić oddziaływanie socjalne w trakcie cyklu życia konstrukcji (fazy A i C). Analiza ta opierała się na jednostkowych wskaźnikach uciążliwości, takich jak hałas, wibracje i zapylenie, uwzględniając zarówno grupę pracowników budowlanych, jak i społeczność lokalną. Metodykę analizy przedstawiono w rozdziale 6. Uzyskane wyniki rankingu wariantów konstrukcyjno-materiałowych, określonych na podstawie przeprowadzonej analizy S-LCA, przedstawiono na rysunku 8.32.

Na podstawie uzyskanych wyników analizy można stwierdzić, że w aspekcie społecznym najlepsze rezultaty osiągają warianty konstrukcyjno-materiałowe oparte na mieszankach samozagęszczalnych klasy C80/95 – HPSCC (mieszanki M15 i M16), które uzyskały najniższe wartości całkowitego wskaźnika Socpoint (S_p = 42 666). Równie dobre rezultaty uzyskały warianty SCC klasy C50/60 (mieszanki M12, M13 i M14, S_p = 46 311). Korzystne wartości wskaźników społecznych wynikają bezpośrednio ze specyficznych właściwości mieszanek samozagęszczalnych, eliminujących m.in. konieczność mechanicznego zagęszczania, co ogranicza poziomy generowanego hałasu i wibracji, zwiększając komfort i bezpieczeństwo pracy oraz zmniejszając negatywny wpływ na społeczność lokalną. Dodatkowo, w przypadku betonów wyższych klas uzyskuje się mniej uciążliwe oddziaływanie poszczególnych robót ze względu na mniejszą łączną objętość betonu w porównaniu z konstrukcjami projektowanymi z betonów klas niższych, co szczególnie widoczne jest w wariantach konstrukcyjno-materiałowych opartych na betonie wysokowartościowym M7 i M8, dla których wskaźnik Socpoint jest nieznacznie wyższy (S_p = 44 198) niż w wariantach opartych na mieszankach samozagęszczalnych tej samej klasy.

Z kolei najwyższe wartości (najbardziej niekorzystne z punktu widzenia społecznego) osiągnęły warianty konstrukcyjno-materiałowe oparte na mieszankach z betonu zwykłego (NSC klasy C30/37, mieszanki M1, M2 i M3), dla których wskaźnik społeczny wynosi 51 919. Wartości te wynikają z wyższych wskaźników jednostkowych uciążliwości – szczególnie wibracji i hałasu – generowanych podczas intensywnych prac związanych z zagęszczaniem betonu oraz z większej objętości materiału w konstrukcjach projektowanych z betonów niższych klas.



Rys. 8.32. Ranking mieszanek betonowych ze względu na wartość S_p dla całej konstrukcji

Uzyskane wyniki pokazują przewagę wariantów opartych na betonie samozagęszczalnym w redukcji oddziaływań społecznych, a tym samym rolę, jaką może odgrywać ten rodzaj mieszanki w kontekście zrównoważonego budownictwa, szczególnie w projektach realizowanych w gęsto zaludnionych obszarach miejskich lub w miejscach wrażliwych na oddziaływania społeczne.

Zróżnicowanie uzyskanych wyników w poszczególnych grupach wariantów konstrukcyjno-materiałowych jest niewielkie. Warianty oparte na mieszankach HPC klasy C80/95 (M7 i M8) wykazują wartości o ok. 3,6% wyższe od najniższej wartości wskaźnika (M15 i M16). Z kolei warianty oparte na mieszankach samozagęszczalnych klasy C50/60 (M12, M13, M14) mają wartości wskaźnika wyższe o ok. 8,5%. Warianty oparte na mieszankach betonu zwykłego klasy C50/60 (M4, M5, M6) wykazują różnicę wynoszącą ok. 12,4%. Największą różnicę odnotowano dla wariantów opartych na betonie klasy C30/37: 17,5% dla typu samozagęszczalnego (M9, M10, M11) oraz 21,7% dla betonu zwykłego (M1, M2, M3).

Analiza wskaźnika społecznego S_p ujawniła różnice procentowe między poszczególnymi wariantami konstrukcyjno-materiałowymi. Wartości bezwzględne tego wskaźnika różnią się między sobą o ponad 21%. W praktyce, w obrębie faz A i C, przy porównaniu różnych wariantów konstrukcyjno-materiałowych w ramach tej samej technologii, np. monolitycznej, uzyskiwane różnice wynikają w dużej mierze z objętości robót. Większe zróżnicowanie wyników zapewne uzyskano by przy porównaniu zdecydowanie różnych technologii, takich jak monolityczna i prefabrykowana.

Ze względu na niewielkie różnice między wynikami poszczególnych wariantów konstrukcyjno-materiałowych w aspekcie społecznym można uznać, że w całościowej ocenie zrównoważonej, uwzględniającej aspekty środowiskowe, ekonomiczne i społeczne, aspekt społeczny nie będzie odgrywał wiodącej roli różnicującej wyniki. Kryterium społeczne, choć istotne z perspektywy całościowej oceny zrównoważenia, ze względu na niewielkie różnice między analizowanymi wariantami, powinno być traktowane jako wspierające aspekty środowiskowe i ekonomiczne, a nie jako główny czynnik determinujący ostateczny wybór technologii materiałowej. Należy pamiętać, że w kontekście oceny społecznej szczególnie istotne będą decyzje podejmowane na etapie określania ekwiwalentu funkcjonalnego, gdyż mają one zasadniczy wpływ na zakres i charakter oddziaływania budynku na społeczności w fazie użytkowania (faza B) jego cyklu życia.

8.7. Zrównoważona ocena analizowanych wariantów konstrukcyjno-materiałowych

Etapem pozwalającym na ocenę wariantów konstrukcyjno-materiałowych w ujęciu zrównoważony jest analiza wielokryterialna, integrująca wskaźniki środowiskowe (w postaci jednopunktowego Ecopoint – E_p), ekonomiczne (wartość kosztorysowa) oraz społeczne (w postaci jednopunkowego Socpoint – S_p). Dzięki takiemu podejściu możliwy jest racjonalny wybór zrównoważonego rozwiązania konstrukcyjno-materiałowego, zgodnego z celami strategicznymi i operacyjnymi danego projektu.

Jak przedstawiono w rozdziale 7, wybór danej metody MCDA może wpływać na wynik oceny wariantów, w związku z czym w niniejszym przykładzie zdecydowano się na przeprowadzenie kilku podejść równolegle. W tabeli 8.4 zestawiono wyniki poddane analizie wielokryterialnej. Każdy z analizowanych aspektów ma charakter minimalizacyjny, tj. im niższy wynik, tym lepsza ocena, np. im niższy koszt, tym korzystniejszy wynik.

Tabela 8.4

Zestawienie końcowych wyników ujętych w analizach wielokryterialnych

Wariant konstrukcyjno-materiałowy	Całkowita wartość kosztorysowa [zł]	E_p	S_p
M1 – NSC 30/37	3 111 487	25,58	51 919,5
M2 – NSC 30/37	3 074 955	21,70	51 919,5
M3 – NSC 30/37	3 116 925	16,22	51 919,5
M4 – NSC 50/60	3 344 318	28,46	47 974,4
M5 – NSC 50/60	3 213 037	23,70	47 974,4
M6 – NSC 50/60	3 149 350	17,24	47 974,4
M7 – HPC 80/95	3 555 238	29,59	44 198,3

Tabela 8.4 cd.

Wariant konstrukcyjno-materiałowy	Całkowita wartość kosztorysowa [zł]	E_p	S_p
M8 – HPC 80/95	3 407 308	25,61	44 198,3
M9 – SCC 30/37	3 136 275	25,69	50 119,5
M10 – SCC 30/37	3 097 625	22,22	50 119,5
M11 – SCC 30/37	3 136 044	16,24	50 119,5
M12 – SCC 50/60	3 226 146	27,07	46 311,2
M13 – SCC 50/60	3 184 365	23,03	46 311,2
M14 – SCC 50/60	3 155 322	16,95	46 311,2
M15 – HPSCC 80/95	3 347 902	28,93	42 666,0
M16 – HPSCC 80/95	3 244 850	24,34	42 666,0
Suma	**51 501 156**	**372,56**	**762 703,1**
Suma kwadratów	**166 035 948 313 160**	**8985,62**	**36 509 435 151,3**
Wartość minimalna	**3 074 955**	**16,22**	**42 666,0**
Wartość maksymalna	**3 555 238**	**29,59**	**51 919,5**

Przyjęto założenie wstępnych preferencji wagowych dla poszczególnych analizowanych kryteriów. W świetle założeń zrównoważonego rozwoju umiarkowane lub silniejsze zaakcentowanie wagi kryterium kosztowego odzwierciedla potrzebę znalezienia równowagi między efektywnością ekonomiczną a minimalizacją oddziaływań środowiskowych i społecznych, z uwzględnieniem ograniczeń budżetowych charakterystycznych dla praktycznych realizacji inwestycyjnych. Warto zauważyć, że preferencje wagowe mogą zmieniać się w czasie, np. w świetle nowych przepisów i rozporządzeń.

8.7.1. Ocena wariantów konstrukcyjno-materiałowych uproszczoną metodą AHP

W celu przeprowadzenia analizy, zgodnie z podrozdziałem 7.2.1, zastosowano dwie odrębne macierze porównań parami, odpowiadające dwóm scenariuszom ważności kryteriów: umiarkowanej oraz silnej przewadze wartości kosztorysowej. W pierwszym scenariuszu (tab. 8.5) kryterium ekonomiczne uznano za umiarkowanie ważniejsze od obciążenia środowiskowego E_p (wartość 3 w skali Saaty'ego) oraz znacznie ważniejsze od obciążenia społecznego S_p (wartość 5). W rezultacie obliczeń metodą średniej geometrycznej (wzór (7.2)) otrzymano wagi kryteriów wynoszące odpowiednio: 63,7% dla wartości kosztorysowej, 25,8% dla obciążenia środowiskowego (E_p) oraz 10,5% dla obciążenia społecznego (S_p). Drugi scenariusz (tab. 8.6) zakładał silniejszą przewagę kryterium ekonomicznego (wartość 5 wobec E_p oraz 7 wobec S_p w skali Saaty'ego). W tym przypadku uzyskane wagi wyniosły: 73,1% dla wartości kosztorysowej, 18,8% dla E_p oraz 8,1% dla S_p. Dokonano sprawdzenia spójności ocen, uzyskując wartość współczynnika CR znacząco mniejszą od 0,1, co oznacza, że oceny nie wymagają korekty.

Tabela 8.5

Macierz porównań parami i wagi kryteriów dla umiarkowanej ważności kosztu

Kryterium	Ekonomiczne	Obciążenie środowiskowe E_p	Obciążenie społeczne S_p	Wagi kryteriów
Ekonomiczne	1	3	5	0,637
Obciążenie środowiskowe E_p	$\frac{1}{3}$	1	3	0,258
Obciążenie społeczne S_p	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	1	0,105

Tabela 8.6

Macierz porównań parami i wagi kryteriów dla silnej ważności kosztu

Kryterium	Ekonomiczne	Obciążenie środowiskowe E_p	Obciążenie społeczne S_p	Wagi kryteriów
Ekonomiczne	1	5	7	0,731
Obciążenie środowiskowe E_p	$\frac{1}{5}$	1	3	0,188
Obciążenie społeczne S_p	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{3}$	1	0,081

Aby umożliwić porównanie wyników poszczególnych wariantów, dokonano normalizacji wartości każdego z kryteriów. Kryterium ekonomiczne znormalizowano, tworząc iloraz minimalnej wartości kosztorysowej i wartości kosztorysowej danej mieszanki. Analogicznie, kryteria E_p oraz S_p znormalizowano, dzieląc najniższe wartości tych kryteriów przez wartości uzyskane dla każdego wariantu (tab. 8.7). Ze względu na dużą liczbę wariantów uproszczono etap porównań parami, stosując bezpośrednią normalizację wartości kryteriów dla każdego wariantu. To uproszczone podejście umożliwiło efektywne przeprowadzenie analizy bez konieczności wykonywania szczegółowych porównań każdego wariantu z każdym dla poszczególnych kryteriów, co przy liczbie 16 wariantów byłoby nieefektywne.

Tabela 8.7

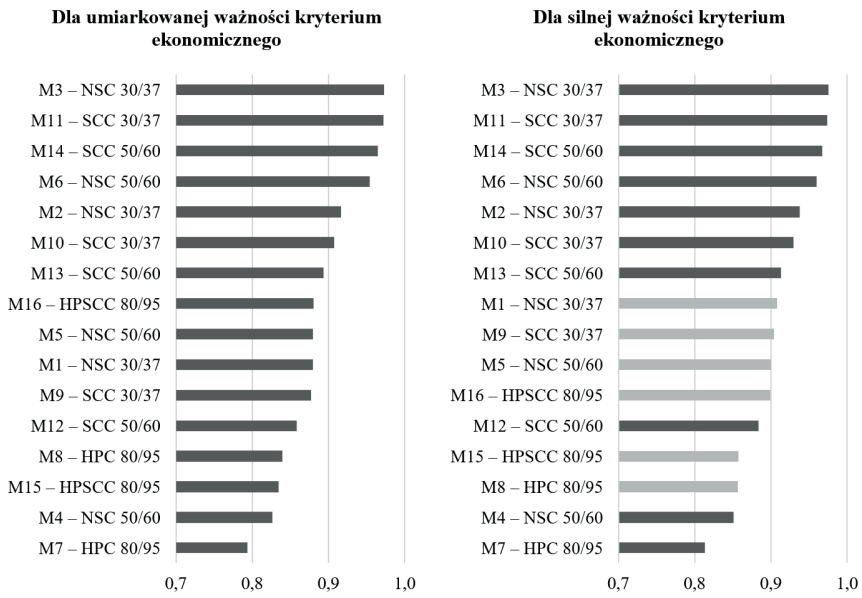
Zestawienie znormalizowanych wyników dla poszczególnych wariantów (metoda AHP)

Wariant	Kryterium ekonomiczne	Obciążenie środowiskowe E_p	Obciążenie społeczne S_p
M1 – NSC 30/37	0,988	0,634	0,822
M2 – NSC 30/37	1,000	0,747	0,822
M3 – NSC 30/37	0,987	1,000	0,822
M4 – NSC 50/60	0,919	0,570	0,889
M5 – NSC 50/60	0,957	0,684	0,889

Tabela 8.7 cd.

Wariant	Kryterium ekonomiczne	Obciążenie środowiskowe E_p	Obciążenie społeczne S_p
M6 – NSC 50/60	0,976	0,924	0,889
M7 – HPC 80/95	0,865	0,548	0,965
M8 – HPC 80/95	0,902	0,633	0,965
M9 – SCC 30/37	0,980	0,631	0,851
M10 – SCC 30/37	0,993	0,719	0,851
M11 – SCC 30/37	0,981	0,999	0,851
M12 – SCC 50/60	0,953	0,599	0,921
M13 – SCC 50/60	0,966	0,704	0,921
M14 – SCC 50/60	0,975	0,957	0,921
M15 – HPSCC 80/95	0,918	0,561	1,000
M16 – HPSCC 80/95	0,948	0,666	1,000

Ostateczne oceny poszczególnych wariantów konstrukcyjno-materiałowych określono z wykorzystaniem metody agregacji ważonej, polegającej na przemnożeniu znormalizowanych wartości każdego wariantu przez odpowiadające im wagi, a następnie zsumowaniu uzyskanych w ten sposób wyników cząstkowych. W efekcie otrzymano końcową wartość wskaźnika oceny (AHP Score), która umożliwiła uszeregowanie analizowanych wariantów od najbardziej do najmniej korzystnych pod względem przyjętych kryteriów oceny (rys. 8.33).



Rys. 8.33. Rankingowanie wyników oceny zrównoważonej metodą AHP dla scenariuszy 1 i 2

Przeprowadzona analiza AHP dla dwóch scenariuszy umożliwiła porównanie wpływu różnych wariantów przypisania wag kryteriów, zgodnie ze skalą Saaty'ego, na końcowy ranking ocenianych mieszanek betonowych. W pierwszym wariancie, zakładającym umiarkowaną ważność kryterium ekonomicznego, najwyżej oceniono warianty M3, M11 i M14. Wskazuje to, że wymienione warianty oferują najkorzystniejsze połączenie umiarkowanej wartości kosztorysowej z wysokimi wskaźnikami jakościowymi reprezentowanymi przez kryteria E_p i S_p. W drugim analizowanym wariancie, w którym kryterium ekonomiczne uzyskało silną przewagę wagową nad pozostałymi kryteriami, odnotowano utrzymanie czołowych pozycji przez te same warianty. Niezależnie od scenariusza, najniższy wynik uzyskały warianty M4 i M5. Zróżnicowane wyniki (zmiany w kolejności rankingu) odnotowano między pozycjami 8 a 14 w obu rankingach, przy czym różnice te są bardzo niewielkie.

8.7.2. Ocena wariantów konstrukcyjno-materiałowych metodą TOPSIS

W celu przeprowadzenia analizy, zgodnie z podrozdziałem 7.2.2, przyjęto wagi analogiczne jak w metodzie AHP. Pierwszy wariant odzwierciedla umiarkowaną istotność kryterium ekonomicznego, przy czym waga wartości kosztorysowej wyniosła 0,637, a wagi pozostałych kryteriów ustalono odpowiednio na 0,258 dla aspektu środowiskowego oraz 0,105 dla aspektu społecznego. Drugi wariant odzwierciedlał silniejszy nacisk na aspekt ekonomiczny, przy wadze wartości kosztorysowej wynoszącej 0,731 oraz wagach 0,188 dla kryterium środowiskowego i 0,081 dla kryterium społecznego.

W pierwszym kroku analizy TOPSIS przeprowadzono normalizację wektorową macierzy decyzyjnej (wzór (7.10)), co umożliwiło porównywalność poszczególnych kryteriów (tab. 8.8). Następnie obliczono iloczyny wartości znormalizowanych i ustalonych wag, otrzymując macierz ważoną.

Tabela 8.8

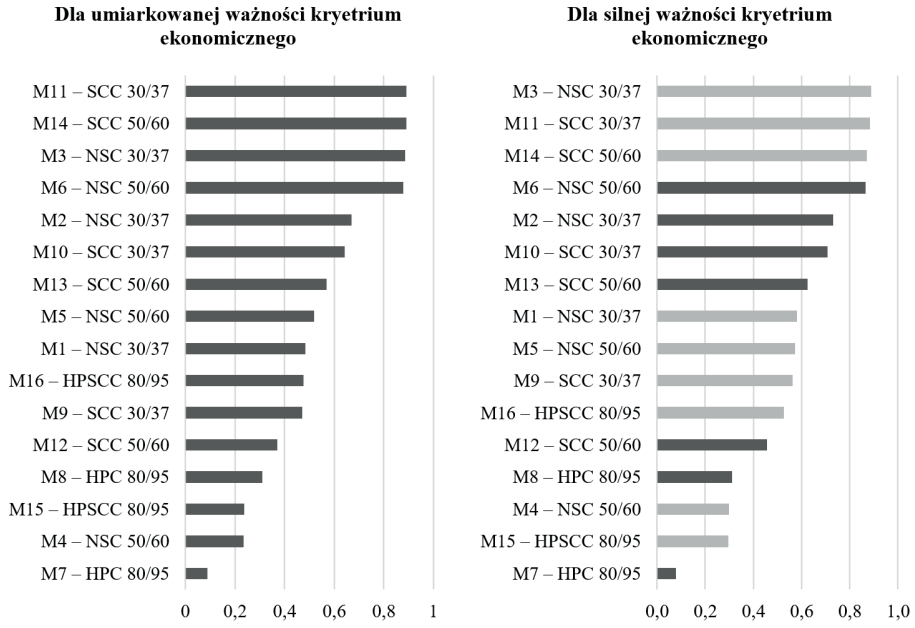
Zestawienie znormalizowanych wyników dla poszczególnych wariantów (metoda TOPSIS)

Wariant	Kryterium ekonomiczne	Obciążenie środowiskowe E_p	Obciążenie społeczne S_p
M1 – NSC 30/37	0,241	0,270	0,272
M2 – NSC 30/37	0,239	0,229	0,272
M3 – NSC 30/37	0,242	0,171	0,272
M4 – NSC 50/60	0,260	0,300	0,251
M5 – NSC 50/60	0,249	0,250	0,251
M6 – NSC 50/60	0,244	0,182	0,251
M7 – HPC 80/95	0,276	0,312	0,231
M8 – HPC 80/95	0,264	0,270	0,231
M9 – SCC 30/37	0,243	0,271	0,262

Tabela 8.8 cd.

Wariant	Kryterium ekonomiczne	Obciążenie środowiskowe E_p	Obciążenie społeczne S_p
M10 – SCC 30/37	0,240	0,234	0,262
M11 – SCC 30/37	0,243	0,171	0,262
M12 – SCC 50/60	0,250	0,286	0,242
M13 – SCC 50/60	0,247	0,243	0,242
M14 – SCC 50/60	0,245	0,179	0,242
M15 – HPSCC 80/95	0,260	0,305	0,223
M16 – HPSCC 80/95	0,252	0,257	0,223

W kolejnym etapie wyznaczono rozwiązania idealne i antyidealne dla każdego kryterium. Rozwiązanie idealne stanowiło zbiór najmniejszych wartości dla kryteriów minimalizowanych, natomiast antyidealne – zbiór największych wartości. Na podstawie wyznaczonych rozwiązań idealnych i antyidealnych obliczono odległości euklidesowe poszczególnych wariantów od tych punktów odniesienia. Na tej podstawie ustalono współczynniki bliskości, określające względną bliskość każdego wariantu do rozwiązania idealnego – im wyższa wartość współczynnika, tym wariant jest bardziej preferowany. Na tej podstawie sporządzono rankingi rozwiązań według metody TOPSIS (rys. 8.34).



Rys. 8.34. Rankingowanie wyników oceny zrównoważonej metodą TOPSIS dla scenariuszy 1 i 2

Uzyskane wyniki dla pierwszego wariantu wagowego wskazały, że najkorzystniejszymi rozwiązaniami są warianty M11, M14, M3 i M6 – różnice w wynikach oceny między tymi wariantami są bardzo niewielkie. Charakteryzują się one niskimi wartościami kosztorysowymi oraz umiarkowanymi poziomami pozostałych wskaźników. Najmniej korzystnym rozwiązaniem okazał się wariant M7. W analizie przeprowadzonej według drugiego scenariusza wagowego, w którym zwiększono znaczenie kryterium ekonomicznego, odnotowano podobne tendencje. Warianty M3, M11, M14 i M6 ponownie okazały się najlepsze, choć nastąpiła nieznaczna zmiana kolejności preferencji. Najbardziej niekorzystnym rozwiązaniem pozostał wariant M7.

8.7.3. Ocena wariantów konstrukcyjno-materiałowych metodą SAW

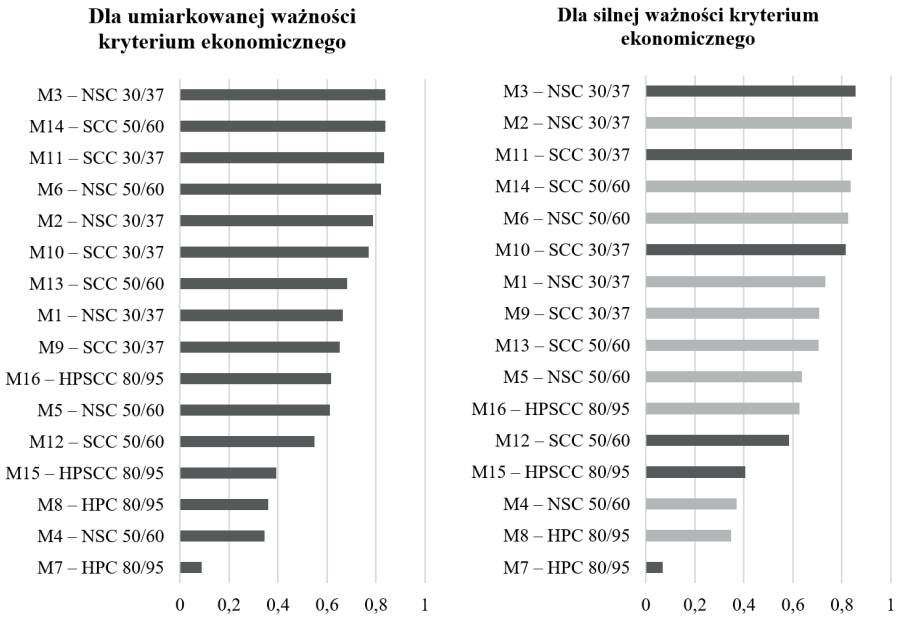
Analiza wariantów metodą SAW została przeprowadzona z wykorzystaniem tych samych dwóch zestawów wag kryteriów, które ustalono wcześniej metodą AHP (podrozdział 8.7.1). W celu porównania wariantów w ramach metody SAW dokonano wstępnej normalizacji wartości poszczególnych kryteriów przedstawionych w tabeli 8.9. Normalizacji dokonano metodą min-max, zgodnie ze wzorem (7.32).

Tabela 8.9

Zestawienie znormalizowanych wyników dla poszczególnych wariantów (metoda SAW)

Wariant	Kryterium ekonomiczne	Obciążenie środowiskowe E_p	Obciążenie społeczne S_p
M1 – NSC 30/37	0,92	0,30	0,00
M2 – NSC 30/37	1,00	0,59	0,00
M3 – NSC 30/37	0,91	1,00	0,00
M4 – NSC 50/60	0,44	0,08	0,43
M5 – NSC 50/60	0,71	0,44	0,43
M6 – NSC 50/60	0,85	0,92	0,43
M7 – HPC 80/95	0,00	0,00	0,83
M8 – HPC 80/95	0,31	0,30	0,83
M9 – SCC 30/37	0,87	0,29	0,19
M10 – SCC 30/37	0,95	0,55	0,19
M11 – SCC 30/37	0,87	1,00	0,19
M12 – SCC 50/60	0,69	0,19	0,61
M13 – SCC 50/60	0,77	0,49	0,61
M14 – SCC 50/60	0,83	0,95	0,61
M15 – HPSCC 80/95	0,43	0,05	1,00
M16 – HPSCC 80/95	0,65	0,39	1,00

Ocena wariantów metodą SAW polegała na przemnożeniu uzyskanych znormalizowanych wartości przez przypisane im wcześniej wagi kryteriów, a następnie na zsumowaniu tych wyników, co pozwoliło na wyznaczenie wskaźnika końcowego. Na tej podstawie uszeregowano analizowane warianty od najbardziej do najmniej korzystnych pod względem przyjętych kryteriów oceny (rys. 8.35).



Rys. 8.35. Rankingowanie wyników oceny zrównoważonej metodą SAW dla scenariuszy 1 i 2

Podobnie jak w analizach AHP i TOPSIS, w scenariuszu pierwszym, uwzględniającym umiarkowaną ważność kryterium ekonomicznego, najwyższe wyniki uzyskały warianty M3, M14 oraz M11. W drugim scenariuszu, zakładającym dominację kryterium ekonomicznego, na najwyższych pozycjach również utrzymały się warianty M3, M11 i M14, choć nastąpiły zmiany w ich kolejności; dodatkowo na wysokiej pozycji rankingowej pojawił się wariant M2. Najniższą ocenę ponownie uzyskał wariant M7. Analiza SAW w dużej mierze potwierdziła spójność z rezultatami metod AHP i TOPSIS.

8.7.4. Wpływ wag kryteriów na ocenę wariantów konstrukcyjno-materiałowych

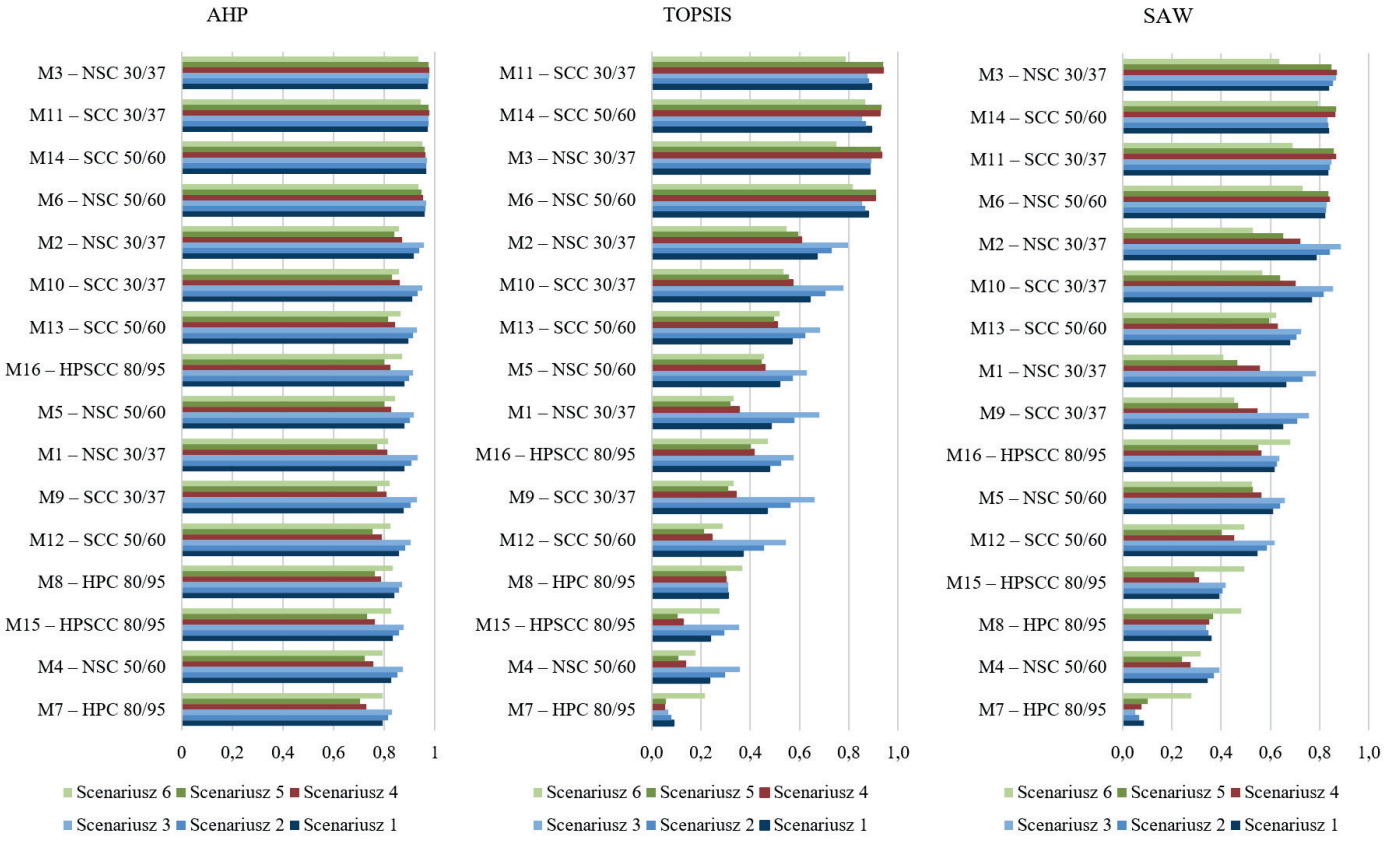
Wyniki oceny wariantów konstrukcyjno-materiałowych przeprowadzone metodą SAW, podobnie jak w analizach AHP i TOPSIS, są silnie uzależnione od przyjętych wag kryteriów i metody normalizacji. Waga kryteriów, ustalona na podstawie macierzy porównań parami metodą Saaty'ego, bezpośrednio wpływa na końcową klasyfikację wariantów, natomiast sposób normalizacji determinuje ich porównywalność i skalę wartości.

Przeprowadzono dodatkową analizę wpływu różnych konfiguracji macierzy Saaty'ego na wyniki uzyskane w ramach analizowanych metod. Oprócz dwóch wcześniej analizowanych scenariuszy przyjęto cztery dodatkowe, odwzorowujące priorytety odmienne od wcześniej rozpatrywanych. Scenariusze wraz z uzyskanymi wagami zestawiono w tabeli 8.10. Scenariusze 1–3 premiują kryterium ekonomiczne przy coraz mniejszym udziale kryteriów środowiskowego i społecznego (pierwsze dwa były już analizowane wcześniej). Scenariusz 4 traktuje na równi kryteria ekonomiczne i środowiskowe, scenariusz 5 premiuje kryterium środowiskowe, natomiast scenariusz 6 odpowiada równej wadze wszystkich kryteriów.

Tabela 8.10

Zestawienie scenariuszy z wagami kryteriów

Scenariusze priorytetów decydentów	Waga dla kryterium		
	ekonomicznego	środowiskowego	społecznego
1. Umiarkowana ważność kosztu w stosunku do oddziaływania na środowisko, jednocześnie silnie ważniejszy koszt od oddziaływania społecznego i umiarkowanie ważniejsze oddziaływanie środowiskowe od społecznego	0,637	0,258	0,105
2. Silna dominacja kosztu w stosunku do oddziaływania na środowisko, jednocześnie bardzo silna dominacja kosztu nad oddziaływaniem społecznym i umiarkowanie ważniejsze oddziaływanie środowiskowe od społecznego	0,731	0,188	0,081
3. Ekstremalnie silna dominacja kosztu nad oddziaływaniem środowiskowym i społecznym, przy zachowanej umiarkowanie większej ważności oddziaływania środowiskowego względem społecznego	0,808	0,129	0,062
4. Równa ważność kosztu i oddziaływania środowiskowego, z jednoczesną silną dominacją tych dwóch kryteriów nad oddziaływaniem społecznym	0,454	0,454	0,090
5. Umiarkowana ważność oddziaływania środowiskowego w stosunku do kosztu, jednocześnie ważniejsze oddziaływanie środowiskowe od oddziaływania społecznego i ważniejszy koszt od oddziaływania społecznego	0,326	0,550	0,123
6. Równa ważność kosztu, oddziaływania środowiskowego i społecznego	0,333	0,333	0,333



Rys. 8.36. Rankingowanie wyników oceny zrównoważonej różnymi metodami dla scenariuszy 1–6

Przeprowadzono analogiczne procedury analizy wielokryterialnej jak w podrozdziałach 8.7.1–8.7.3, z uwzględnieniem wag dla poszczególnych scenariuszy (tab. 8.10). Wyniki w postaci rankingów przedstawiono na rysunku 8.36.

Elementem różnicującym wyniki uzyskane za pomocą zastosowanych metod wielokryterialnych (AHP, TOPSIS i SAW) jest technika normalizacji danych. Uproszczona metoda AHP wykorzystuje normalizację w postaci ilorazu wartości danego wariantu i wartości minimalnej, co zapewnia stabilność wyników, lecz ogranicza wrażliwość na drobne różnice między ocenianymi wariantami. Metoda TOPSIS, opierająca się na normalizacji wektorowej, wyraźniej uwidacznia różnice między wariantami, co zwiększa jej wrażliwość na zmiany priorytetów wagowych. Z kolei metoda SAW wykorzystuje prostą normalizację liniową (min-max), zapewniając umiarkowaną wrażliwość na zmiany wartości kryteriów oraz przejrzystość interpretacji wyników.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

1. Dominacja kryterium ekonomicznego (scenariusze 1–3) prowadzi do preferencji wariantów konstrukcyjno-materiałowych opartych na mieszankach o niższych i średnich klasach wytrzymałości, niezależnie od ich wyników środowiskowych i społecznych.
2. Zrównoważenie wag kryteriów ekonomicznych oraz środowiskowych (scenariusz 4) skutkuje przesunięciem preferencji w stronę wariantów opartych na mieszankach o umiarkowanej wytrzymałości, lecz charakteryzujących się korzystniejszymi wskaźnikami środowiskowymi i społecznymi.
3. Zwiększenie znaczenia aspektów środowiskowych i społecznych (scenariusze 5 i 6) poprawia pozycję wariantów opartych na betonach wysokowartościowych (np. wariant M15 – HPSCC 80/95), które charakteryzują się lepszymi wskaźnikami końcowymi, pomimo wyższych wartości kosztorysowych.

Warto jednak pamiętać, że końcowa ocena silnie zależy także od wolumenu betonu i zużycia stali w danym wariancie konstrukcyjno-materiałowym, a zatem powyższe wnioski nie będą uniwersalne dla wszystkich żelbetowych konstrukcji monolitycznych.

Metoda SAW wydaje się wystarczającym narzędziem wspomagającym podejmowanie decyzji w zakresie wyboru najkorzystniejszego rozwiązania konstrukcyjno-materiałowego. Metodę cechują nieskomplikowane obliczenia, dobra interpretowalność wyników oraz skuteczne uwzględnianie kluczowych różnic między ocenianymi wariantami.

Kluczowe znaczenie ma ustalenie wag kryteriów przez decydenta, zgodnie z jego priorytetami. Sugeruje się wykorzystanie macierzy porównań parami zgodnej z metodą Saaty'ego, co umożliwia decydentowi na świadome i transparentne przypisanie priorytetów poszczególnym aspektom oceny.

9. Podsumowanie i wnioski

Rozwój koncepcji zrównoważonego budownictwa, szczególnie w obszarze konstrukcji żelbetowych, stanowi jedno z kluczowych wyzwań współczesnej inżynierii budowlanej. Niniejsza monografia przedstawia kompleksowe ujęcie problematyki oceny takich konstrukcji w kontekście zasad zrównoważonego rozwoju, integrując cztery podstawowe aspekty: środowiskowy, ekonomiczny, społeczny oraz techniczny. Przeprowadzone analizy potwierdziły zasadność wykorzystania metod oceny cyklu życia – LCA, LCC i S-LCA – jako podstawy projektowania zrównoważonych konstrukcji żelbetowych. Pomimo rosnącego zainteresowania środowisk naukowych oraz praktyki inżynierskiej koncepcją zrównoważonego budownictwa, implementacja metod oceny cyklu życia w rzeczywistych procesach projektowych wciąż napotyka istotne bariery. Do najważniejszych barier należą brak kompleksowych, zintegrowanych metodologii oceny oraz ograniczenia o charakterze legislacyjnym i proceduralnym.

Dotychczasowe podejście do projektowania konstrukcji skupiało się głównie na spełnieniu wymogów funkcjonalnych i konstrukcyjnych. Obecnie obserwuje się jednak rosnącą świadomość potrzeby uwzględniania także wpływów środowiskowych, ekonomicznych i społecznych. W odpowiedzi na tę potrzebę rozwijają się narzędzia oceny cyklu życia – LCA, LCC i S-LCA – coraz częściej integrowane w ramach kompleksowej oceny zrównoważonej.

Podstawowe ramy formalne dla takich ocen w kontekście budownictwa określono w normie PN-EN 15643:2021, która definiuje zasady oceny zrównoważenia obiektów budowlanych w całym cyklu ich życia. Dokument ten integruje aspekty środowiskowe, społeczne i ekonomiczne, zapewniając spójność i porównywalność wyników, jednak jako norma ramowa nie precyzuje szczegółowej metodyki oceny.

W analizie cyklu życia kluczowe znaczenie ma prawidłowe wyznaczenie granic systemu oraz etapów oceny, dostosowane do celu i zakresu analizy. W monografii szczegółowo omówiono podział cyklu życia obiektów budowlanych: od fazy projektowej (moduł A0), przez fazy realizacji, użytkowania, aż po koniec życia obiektu i potencjalnez korzyści poeksploatacyjne (moduł D).

Uwzględniając zrealizowany zakres badań i przeprowadzonych analiz oraz opracowaną autorską metodykę oceny, sformułowano następujące wnioski ogólne:

1. Analiza różnych rodzajów betonów, w tym wysokowartościowych (HPC, UHPC), samozagęszczalnych (SCC), fibrobetonów, geopolimerowych oraz z kruszywami recyklingowymi, wskazuje na ich rosnącą rolę w nowoczesnym budownictwie inżynieryjnym. Każdy z tych materiałów charakteryzuje się odmiennymi właściwościami technicznymi,

obejmującymi m.in. podwyższoną wytrzymałość na ściskanie, zwiększoną trwałość eksploatacyjną, odporność na działanie czynników agresywnych (chemicznych i środowiskowych) oraz łatwiejsze formowanie i zagęszczanie mieszanki w warunkach budowy. Stosowanie dodatków mineralnych i domieszek chemicznych umożliwia modyfikację właściwości reologicznych oraz dostosowanie parametrów do wymagań użytkowych. Kluczowym aspektem pozostaje właściwy dobór klasy wytrzymałości betonu oraz technologii wykonawczej, z uwzględnieniem trwałości, nośności oraz efektywności ekonomicznej rozwiązań. Wdrażanie zaawansowanych technologii betonowych jest zgodne z aktualnymi wymaganiami techniczno-normatywnymi i przyczynia się do zapewnienia wysokiej jakości, bezpieczeństwa i zgodności projektowanych konstrukcji z zasadami zrównoważonego rozwoju. Ocena środowiskowa 16 mieszanek betonowych o klasach wytrzymałości C30/37, C50/60 oraz C80/95 ujawniła istotne różnice w poziomie oddziaływań środowiskowych między analizowanymi wariantami. W toku analizy zidentyfikowano kluczowe źródła wpływu, związane przede wszystkim z rodzajem i ilością cementu oraz zastosowaniem domieszek chemicznych i mineralnych. Wyniki jednoznacznie wskazują, że odpowiedni dobór składników oraz optymalizacja składu mieszanki betonowej mogą znacząco ograniczyć całkowite obciążenie środowiskowe konstrukcji.

2. Przeprowadzone analizy wykazały, że dominującymi etapami cyklu życia konstrukcji żelbetowych pod względem wartości wskaźnika E_p są moduły A1–A3 (produkcja materiałów) oraz C1 (demontaż), które łącznie odpowiadają za około 91% całkowitego oddziaływania środowiskowego. Udział pozostałych modułów, takich jak A4 (transport na plac budowy), A5 (montaż), C2–C4 (transport, odzysk, unieszkodliwianie odpadów), pozostaje marginalny. W module A1 kluczowym źródłem obciążeń środowiskowych jest cement, którego udział w wartości wskaźnika E_p mieści się w przedziale od około 70% do ponad 90%, w zależności od składu analizowanej mieszanki betonowej.
3. Spośród wszystkich składników mieszanki betonowej kruszywo charakteryzuje się najwyższą wrażliwością środowiskową na zmiany odległości transportu, co wynika z jego największego udziału masowego w składzie. Analiza wykazała, że przy dystansach przekraczających 200 km wartość wskaźnika E_p wzrasta o ponad 5%. Wskazuje to, że efektywność logistyczna dostaw kruszywa stanowi istotny czynnik kształtujący końcowy wpływ środowiskowy rozwiązania konstrukcyjno-materiałowego.
4. Wpływ struktury źródeł energii na wartość wskaźnika E_p, w porównaniu ze scenariuszem referencyjnym (Polska), mieścił się w przedziale od 1% do 6%. Największe różnice zaobserwowano między krajami o znacznie odmiennej strukturze wytwarzania energii – np. między Polską, gdzie dominują paliwa kopalne, a Norwegią, opierającą się głównie na odnawialnych źródłach energii. W przypadku krajów o zbliżonym profilu energetycznym wpływ ten był nieznaczny i nie miał istotnego znaczenia dla końcowego wyniku oceny środowiskowej.
5. Analiza porównawcza mieszanek samozagęszczalnych (SCC) i zwykłych (NSC) w obrębie tych samych klas wytrzymałości nie wykazała jednoznacznej zależności w zakresie oddziaływań środowiskowych. W części przypadków betony SCC charakteryzowały się niższymi wartościami wskaźnika Ecopoint w porównaniu z odpowiednikami NSC, natomiast w innych – wartości te były wyższe. Brak spójnej tendencji sugeruje, że wpływ

zastosowania technologii samozagęszczalnej na wynik oceny środowiskowej zależy od składu mieszanki oraz warunków jej wykorzystania. W związku z tym każdorazowa ocena powinna być przeprowadzana z uwzględnieniem pełnego kontekstu technologicznego i funkcjonalnego.

6. Zaobserwowano istotne zróżnicowanie wartości wskaźnika Ecopoint między poszczególnymi klasami wytrzymałości betonu. W niektórych przypadkach mieszanki klasy C50/60 wykazywały porównywalne, a nawet niższe oddziaływanie środowiskowe niż mieszanki klasy C30/37. Wskazuje to na możliwość optymalizacji składu mieszanek w ramach tej samej klasy wytrzymałości, co pozwala na ograniczenie wpływu środowiskowego bez pogorszenia właściwości technicznych.
7. W analizowanych przypadkach największy udział w całkowitej wartości wskaźnika Ecopoint stwierdzono dla kategorii GWP-total (Global Warming Potential), której wartość przekraczała 51%. Choć wartości dla pozostałych kategorii – takich jak ADP-fossils (zużycie zasobów kopalnych), HTP-nc (toksyczność dla ludzi – działanie niekancerogenne), POCP (tworzenie ozonu przyziemnego), AP (zakwaszenie) oraz ETP-fw (toksyczność dla ekosystemów wodnych) – były relatywnie niższe, ich wkład pozostawał istotny. Wyniki te podkreślają konieczność uwzględniania szerokiego spektrum kategorii oddziaływań środowiskowych w ramach kompleksowej oceny.
8. Wyniki analizy ekonomicznej mieszanek betonowych wskazują, że głównymi składnikami kształtującymi cenę jednostkową są cement i kruszywo, których średni udział wynosi odpowiednio 46% i 23%. Mimo niewielkiego udziału ilościowego, domieszki i dodatki mogą znacząco podnosić cenę jednostkową, szczególnie w przypadku mieszanek samozagęszczalnych, w których ich udział w całkowitej cenie może przekraczać 30%.
9. Istotnym komponentem kosztowym w przypadku konstrukcji żelbetowych jest również stal zbrojeniowa, której udział w cenie jednostkowej wykonania konstrukcji mieści się w przedziale od 21% do 37%, w zależności od klasy i rodzaju zastosowanego betonu. Najwyższy względny udział ceny stali obserwuje się w przypadku betonów o niższej wytrzymałości (np. C30/37), jednak nawet w mieszankach wysokowartościowych (np. C80/95) udział ten utrzymuje się na poziomie ok. 30%, pomimo znacznie wyższej ceny betonu. W odróżnieniu od oceny środowiskowej, w której wpływ stali był mniej istotny, w analizie ekonomicznej jej znaczenie jest wyraźnie większe i bezpośrednio wpływa na końcową wartość kosztorysową konstrukcji. Stal zbrojeniowa charakteryzuje się ponadto relatywnie wysoką wrażliwością na zmienność cen rynkowych, co dodatkowo komplikuje prognozowanie kosztów inwestycyjnych.
10. Społeczna analiza cyklu życia (S-LCA) stanowi istotny element kompleksowej oceny zrównoważonego budownictwa, jednak jej praktyczne zastosowanie pozostaje ograniczone, głównie z powodu trudności w dostępie do wiarygodnych danych oraz wysokiej złożoności metodycznej. Prawidłowo przeprowadzona analiza społeczna powinna obejmować szerokie spektrum interesariuszy, w tym pracowników zaangażowanych w realizację inwestycji, społeczność lokalną oraz użytkowników końcowych obiektu. W odniesieniu do etapów A (produkcyjnych i wykonawczych) oraz C (końcowego cyklu życia) zaleca się uwzględnienie oddziaływań, takich jak hałas, wibracje i emisja pyłów, które mogą bezpośrednio wpływać na zdrowie oraz jakość życia pracowników i społeczności w otoczeniu inwestycji.

11. Największe obciążenia środowiska pracy odnotowano podczas prac rozbiórkowych z wykorzystaniem młotów hydraulicznych, gdzie jednostkowa ekspozycja na hałas może sięgać 19,5% dopuszczalnej dziennej dawki odniesionej do 1 m³ betonu, natomiast ekspozycja na wibracje wynosi 57% normatywnego limitu dobowego. Zastosowanie betonów samozagęszczalnych (SCC) istotnie ogranicza narażenie pracowników na czynniki szkodliwe związane z wibracjami, co skutkuje obniżeniem jednostkowych wskaźników średnio o ok. 14%. Emisja pyłu, zwłaszcza frakcji respirabilnej, stanowi istotną uciążliwość podczas mechanicznego kruszenia gruzu betonowego – w tym przypadku jednostkowa dawka pyłu może osiągać 14,4% dopuszczalnej dziennej normy, co podkreśla konieczność wdrażania skutecznych środków ochrony indywidualnej oraz technologii ograniczających zapylenie.
12. W kontekście oddziaływań społecznych szczególnie istotne dla społeczności lokalnych są emisje hałasu i zapylenia powstające w trakcie realizacji prac budowlanych, zwłaszcza w fazie rozbiórki. Analizy wykazały, że w odległości 200 m od placu budowy natężenie hałasu generowanego przez procesy rozbiórkowe może odpowiadać 49% dopuszczalnej dziennej dawki hałasu określonej dla środowiska zamieszkania. Wysokie wartości wskaźników ekspozycji na czynniki uciążliwe podkreślają konieczność stosowania technologii niskoemisyjnych, właściwych osłon akustycznych oraz racjonalnego planowania harmonogramu robót w celu ograniczenia negatywnego wpływu na otoczenie społeczne.
13. Redukcja uciążliwości społecznych generowanych w trakcie realizacji inwestycji budowlanych może być osiągnięta przez zastosowanie działań techniczno-organizacyjnych. Kluczowe znaczenie mają: właściwy dobór technologii wykonawczych (np. zastosowanie betonów samozagęszczalnych eliminujących potrzebę intensywnego zagęszczania), optymalizacja harmonogramu prac w celu ograniczenia emisji hałasu i drgań w porach newralgicznych dla otoczenia, selektywne stosowanie sprzętu o obniżonym poziomie emisji oraz wdrażanie skutecznych środków kontroli zapylenia, takich jak systematyczne zraszanie terenu. Kompleksowe podejście w tym zakresie przyczynia się do ograniczenia ekspozycji społeczności lokalnych na czynniki uciążliwe oraz wzmacnia społeczny wymiar zrównoważonego budownictwa.

Na podstawie przeprowadzonych badań, opracowanej metodyki oceny oraz sformułowanych wniosków ogólnych poddano szczegółowej analizie przykład obliczeniowy dotyczący różnych wariantów konstrukcyjno-materiałowych monolitycznej konstrukcji żelbetowej garażu wielopoziomowego. Celem było zweryfikowanie praktycznej użyteczności zaproponowanego podejścia oraz identyfikacja zależności między przyjętymi rozwiązaniami projektowymi a ich konsekwencjami technicznymi, środowiskowymi, ekonomicznymi i społecznymi w cyklu życia obiektu. Na podstawie przeprowadzonej analizy sformułowano następujące wnioski szczegółowe:

1. Analizy techniczne wykazały, że wraz ze wzrostem klasy betonu (C30/37, C50/60, C80/95) możliwe jest zmniejszenie wymiarów elementów konstrukcyjnych, co skutkuje redukcją zużycia betonu o około 15%. Zmniejszenie zużycia stali zbrojeniowej jest natomiast nieznaczne i wynosi średnio ok. 1%, co wynika z konieczności zapewnienia wymaganej nośności i sztywności całej konstrukcji. Warto podkreślić, że efektywność techniczna i materiałowa danego rozwiązania konstrukcyjno-materiałowego w dużym stopniu zależy od rodzaju dominujących obciążeń. Przykładowo, w elementach pracujących

głównie na ściskanie (takich jak słupy, filary czy obudowy tuneli) zastosowanie betonów wysokowartościowych może przynieść istotne korzyści techniczne, ekonomiczne, środowiskowe i społeczne – znacznie większe niż w przypadku elementów poddawanych zginaniu – co potwierdzono w przeprowadzonej analizie.

2. Analiza środowiskowa rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych wykazała, że konstrukcje wykonane z betonu klasy C30/37 charakteryzują się najniższym poziomem oddziaływania na środowisko – sumaryczny wskaźnik Ecopoint wyniósł około 16,22. Dla rozwiązań z zastosowaniem betonu klasy C80/95 wartości te były istotnie wyższe – maksymalny wskaźnik Ecopoint osiągnął 29,59, co oznacza niemal dwukrotnie większe oddziaływanie środowiskowe. Szczegółowa analiza wskaźników GWP (emisja ekwiwalentu CO_2) oraz ADP-fossils (zużycie zasobów kopalnych) potwierdziła uzyskanie korzystniejszych wartości dla rozwiązań z uwzględnieniem betonów niższych klas wytrzymałości, głównie w wyniku ograniczonego zużycia cementu oraz mniejszego udziału materiałów wysokoenergetycznych.
3. Analiza ekonomiczna w ujęciu kosztów cyklu życia (wartości kosztorysowej), obejmująca zarówno nakłady inwestycyjne, jak i koszty rozbiórki, wykazała, że konstrukcje z betonu niższej klasy (C30/37) charakteryzowały się najniższymi początkowymi wartościami kosztorysowymi (ok. 3 mln PLN). W dłuższej perspektywie, po uwzględnieniu kapitalizacji i dyskontowania, różnice ekonomiczne między konstrukcjami z różnych klas betonu uległy wyraźnemu zmniejszeniu.
4. W odniesieniu do oceny społecznej (S-LCA) konstrukcje z betonów samozagęszczalnych (SCC, HPSCC) klasy C80/95 osiągnęły najbardziej korzystne wartości wskaźników, co wynikało przede wszystkim z istotnego ograniczenia uciążliwości prac budowlanych, w tym hałasu, drgań oraz zapylenia – dzięki mniejszej objętości betonu w konstrukcji oraz eliminacji potrzeby intensywnego zagęszczania.
5. Analiza wielokryterialna przeprowadzona z wykorzystaniem metod AHP, TOPSIS oraz SAW, wykazała istotne uzależnienie wyników końcowych od przyjętego systemu wag przypisanych poszczególnym kryteriom decyzyjnym. Scenariusze premiujące aspekt ekonomiczny wskazywały jako korzystniejsze rozwiązania konstrukcyjne oparte na betonach niższej klasy wytrzymałości, natomiast scenariusze akcentujące znaczenie aspektów środowiskowych i społecznych prowadziły do wyższej oceny mieszanek klas pośrednich i wysokowartościowych. Uzyskane rankingi należy interpretować w kontekście celów projektowych oraz przyjętych priorytetów decyzyjnych.

Przeprowadzone badania i analizy dotyczące zrównoważonej oceny monolitycznej konstrukcji żelbetowej w całym cyklu życia, na przykładzie garażu wielopoziomowego, pozwoliły sformułować wnioski końcowe o charakterze ogólnym oraz wskazać obszary wymagające dalszych badań i potencjalne kierunki wdrożeń praktycznych. Należy podkreślić, że ze względu na przyjęty ekwiwalent funkcjonalny oraz specyficzne rozwiązania projektowe analizowanego obiektu uzyskane wyniki nie mogą być bezpośrednio odnoszone do innych typów konstrukcji budowlanych. Poniżej przedstawiono kluczowe rekomendacje wynikające z przeprowadzonych analiz:

1. Wdrożenie wyników analiz LCA, LCC i S-LCA w praktyce projektowej powinno opierać się na podejściu zintegrowanym, uwzględnianym już na etapie wstępnego projektowania. Projektanci i wykonawcy powinni uwzględniać nie tylko wymagania techniczne, lecz

także wpływ planowanej inwestycji na środowisko, trwałość materiałową oraz społeczne konsekwencje decyzji konstrukcyjno-materiałowych. Rekomenduje się systematyczne stosowanie metod oceny cyklu życia w procesach projektowych oraz uwzględnianie kryteriów zrównoważonego rozwoju w procedurach przetargowych i projektach inżynieryjno-architektonicznych.

2. Kierunki dalszych badań powinny obejmować rozwój betonów niskoemisyjnych, w tym mieszanek geopolimerowych oraz betonów z kruszywem pochodzącym z recyklingu. W szczególności należy dążyć do minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych właściwości mechanicznych i trwałości konstrukcyjnej.
3. Jednym z istotnych wyzwań badawczych pozostaje rozszerzenie zakresu analiz o kryteria trudne do jednoznacznego ujęcia ilościowego, takie jak aspekty społeczne i zdrowotne w cyklu życia obiektów budowlanych. Metodyka społecznej oceny cyklu życia (S-LCA) znajduje się obecnie w fazie rozwoju wymaga dostosowania do specyfiki sektora budowlanego. Umożliwiłoby to bardziej obiektywną, porównywalną i systematyczną ocenę zagadnień takich, jak wpływ inwestycji na społeczność lokalną, warunki pracy czy poziom akceptacji społecznej.
4. Efektywne wdrażanie zasad zrównoważonego projektowania konstrukcji wymaga rozwoju narzędzi oceny wspierających proces podejmowania decyzji projektowych. Kluczowe znaczenie ma w tym kontekście standaryzacja metodyk i baz danych wykorzystywanych w analizach LCSA, rozwój deklaracji środowiskowych typu III (EPD), integracja narzędzi oceny z modelowaniem informacji o budynku (BIM), a także zastosowanie zaawansowanych technik optymalizacji wielokryterialnej opartych na algorytmach sztucznej inteligencji i metodach ewolucyjnych. Upowszechnienie uproszczonych i częściowo zautomatyzowanych narzędzi może znacząco ułatwić wdrażanie ocen zrównoważonych w codziennej praktyce inżynierskiej.

Monolityczne konstrukcje żelbetowe mogą być projektowane i realizowane w sposób zrównoważony, łącząc wysoką jakość techniczną z dbałością o środowisko oraz aspekty ekonomiczne i społeczne. Osiągnięcie tego celu wymaga jednak odejścia od jednostronnego podejścia i zastosowania podejścia interdyscyplinarnego, integrującego wiedzę z zakresu materiałoznawstwa, mechaniki konstrukcji, nauk o środowisku, ekonomii i nauk społecznych już na etapie koncepcji i projektowania. Przedstawiona w pracy metodyka zintegrowanej oceny cyklu życia oferuje taką wieloaspektową perspektywę, umożliwiając podejmowanie decyzji inżynierskich w sposób bardziej świadomy i odpowiedzialny. Wdrożenie wynikających z niej zaleceń może przyczynić się do zwiększenia trwałości i bezpieczeństwa obiektów, ograniczenia ich śladu środowiskowego, optymalizacji kosztów w całym okresie użytkowania, a także poprawy społecznej akceptacji inwestycji budowlanych. Można oczekiwać, że wyniki niniejszych badań znajdą zastosowanie zarówno w dalszych pracach naukowych, jak i w praktyce inżynierskiej, realnie wspierając wdrażanie zasad zrównoważonego rozwoju w budownictwie.

Bibliografia

Abbas Y.M., Iqbal Khan M., 2016: *Fiber–Matrix Interactions in Fiber-Reinforced Concrete: A Review*. Arabian Journal for Science and Engineering, 41 (4), 1183–1198.

Abdel-Raheem M., Ramsbottom C., 2016: *Factors Affecting Social Sustainability in Highway Projects in Missouri*. Procedia Engineering, 145, 548–555.

Abidin N.Z., 2009: *Sustainable Construction in Malaysia-Developers' Awareness*. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, 53, 807–814.

Acebes F., González-Varona J.M., López-Paredes A., Pajares J., 2024: *Beyond probability-impact matrices in project risk management: A quantitative methodology for risk prioritisation*. Humanities and Social Sciences Communications, 11 (1), 1–13.

Afzal M., Liu Y., Cheng J.C.P., Gan V.J.L., 2020: *Reinforced concrete structural design optimization: A critical review*. Journal of Cleaner Production, 260, 120623.

Aggarwal P., Aggarwal Y., 2020: *Strength properties of SCC*. [w:] R. Siddique (ed.), *Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications*. Woodhead Publishing, 83–115.

Agrawal D., Waghe U., Ansari K., Amran M., Gamil Y., Alluqmani A.E., Thakare N., 2024: *Optimization of eco-friendly concrete with recycled coarse aggregates and rubber particles as sustainable industrial byproducts for construction practices*. Heliyon, 10 (4), e25923.

Ahmad J., Zhou Z., 2022: *Mechanical Properties of Natural as well as Synthetic Fiber Reinforced Concrete: A Review*. Construction and Building Materials, 333, 127353.

Ahmed H., Tiznobaik M., Huda S.B., Islam M.S., Alam M.S., 2020: *Recycled aggregate concrete from large-scale production to sustainable field application*. Construction and Building Materials, 262, 119979.

Ajdukiewicz A., 2006: *Zintegrowana ocena konstrukcji betonowych w projektowaniu na okres użytkowania*. [w:] P. Kijowski, J. Deja (red.), *Dni Betonu: tradycja i nowoczesność: konferencja, Wisła, 9–11 października 2006*, Polski Cement. Kraków, 1063–1072.

Alajmi A.F., 2021: *Implementing the Integrated Design Process (IDP) to design, construct and monitor an eco-house in hot climate*. International Journal of Sustainable Engineering, 14 (4), 630–646.

Alam Bhuiyan M.M., Hammad A., 2023: *A Hybrid Multi-Criteria Decision Support System for Selecting the Most Sustainable Structural Material for a Multistory Building Construction*. Sustainability, 15 (4), 3128.

Albuja-Sánchez J., Damián-Chalán A., 2024: *Leveraging Life Cycle Cost Analysis (LCCA) for Optimized Decision Making in Adobe Construction Materials*. Applied Sciences, 14 (5), 1760.

Albuja-Sánchez J., Damián-Chalán A., Escobar D., 2024: *Experimental Studies and Application of Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) in Civil Infrastructure Systems: A State-of-the-Art Review*. Polymers, 16 (2), 250.

Almutairi W., 2017: *Optimization of Concrete Mixtures for Use in Structural Elements*. University of Arkansas, Fayetteville. Graduate Theses and Dissertations, https://scholarworks.uark.edu/etd/2482.

Alves M.A., Oliveira B.A.S., Guimarães F.G., 2024: *Ensemble ranking: An aggregation of multiple multicriteria methods and scenarios and its application to power generation planning*. Decision Analytics Journal, 10, 100435.

Amir O., 2013: *A topology optimization procedure for reinforced concrete structures*. Computers & Structures, 114, 46–58.

Amran M., Al-Fakih A., Chu S.H., Fediuk R., Haruna S., Azevedo A., Vatin N., 2021: *Long-term durability properties of geopolymer concrete: An in-depth review*. Case Studies in Construction Materials, 15, e00661.

Andrew R.M., 2019: *Global CO2 emissions from cement production, 1928–2018*. Earth System Science Data, 11 (4), 1675–1710.

AP-42: Compilation of Air Emissions Factors from Stationary Sources US EPA. Dostępne pod adresem: https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors-stationary-sources.

Apollo M., Grzyl B., 2022: *Zastosowanie analizy wielokryterialnej do oceny i wyboru rozwiązania pokrycia dachowego*. Materiały Budowlane, 600 (8), 78–81.

Arcese G., Lucchetti M.C., Massa I., Valente C., 2018: *State of the art in S-LCA: integrating literature review and automatic text analysis*. International Journal of Life Cycle Assessment, 23 (3), 394–405.

Asdrubali F., Fronzetti Colladon A., Segneri L., Gandola D.M., 2024: *LCA and energy efficiency in buildings: Mapping more than twenty years of research*. Energy and Buildings, 321, 114684.

Attia S., Gratia E., De Herde A., Hensen J.L.M., 2012: *Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design*. Energy and Buildings, 49, 2–15.

Aydın B., Stecuła K., Olczak P., Kulpa J., Stecuła B., 2025: *Exploring the Green Horizon: Recent Research on Renewable Energy in Poland – A Review*. Energies, 18 (7), 1695.

Azeem A., Ahmad S., Hanif A., 2023: *Wastewater utilization for concrete production: Prospects, challenges, and opportunities*. Journal of Building Engineering, 80, 108078.

Azhar S., Carlton W.A., Olsen D., Ahmad I., 2011: *Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis*. Automation in Construction, 20 (2), 217–224.

Backes J.G., Traverso M., 2024: *Social Life Cycle Assessment in the Construction Industry: Systematic Literature Review and Identification of Relevant Social Indicators for Carbon Reinforced Concrete*. Environment, Development and Sustainability, 26 (3), 7199–7233.

Bai G., Zhu C., Liu C., Liu B., 2020: *An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties*. Construction and Building Materials, 240, 117978.

Baic I., Kozioł W., Miros A., 2024: *30 lat wydobycia kruszyw budowlanych w Polsce – analiza zmian i prognozy*. Materiały Budowlane, 623 (7), 30–37.

Bajno D., Grzybowska A., Mrozik Ł., 2020: *Domieszki w technologii wysokowartościowych betonów mostowych*. Mosty, 1, 62–65.

Bank L.C., 2006: *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. John Wiley & Sons.

Barbero I., Rezgui Y., Beach T., Petri I., 2024: *Social Life Cycle Assessment in the construction sector: current work and directions for future research*. International Journal of Life Cycle Assessment, 29, 1827–1845.

Barbhuiya S., Bhusan B., Dibyendu D., Kanish A., Mohammad K., 2025: *Low carbon concrete : advancements, challenges and future directions in sustainable construction*. Discover Concrete and Cement, 1, 3.

Benoît C., Mazijn B., 2009: *Guidelines for social life cycle assessment of products*. United Nations Environment Programme.

Blazy J., Blazy R., Drobiec Ł., 2022: *Glass Fiber Reinforced Concrete as a Durable and Enhanced Material for Structural and Architectural Elements in Smart City – A Review*. Materials, 15 (8), 2754.

Bocian K., Błachowiak M., Bukowski M., 2024: *Na rozdrożu. Szanse i wyzwania transformacji polskiego sektora stalowego*. WiseEuropa. Warszawa.

Bortoli A. de, 2023: *Understanding the environmental impacts of virgin aggregates: Critical literature review and primary comprehensive life cycle assessments*. Journal of Cleaner Production, 415, 137629.

Bos U., Horn R., Beck T., Lindner J., Fischer M., 2016: *LANCA. Characterization Factors for Life Cycle Impact Assessment, Version 2.0*. Fraunhofer Verlag. Stuttgart.

Boulay A.M., Bare J., Benini L., Berger M., Lathuillière M.J., Manzardo A., Margni M., Motoshita M., Núñez M., Pastor A.V., Ridoutt B., Oki T., Worbe S., Pfister S., 2018: *The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE)*. International Journal of Life Cycle Assessment, 23 (2), 368–378.

Brandt A.M., 2008: *Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering*. Composite Structures, 86 (1–3), 3–9.

Broniewicz E., Dziurdzikowska E., 2017: *Multi-criteria methods in balancing socio-economic processes*. Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, 491, 53–62.

Bruno S., Loprencipe G., Di Mascio P., Cantisani G., Fiore N., Polidori C., Riccio G., D'Andrea A., Moretti L., 2024: *Eco-efficient asphalt recycling for urban slow mobility*. Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 9 (2), 957–964.

BSI EN 16627:2015*: Sustainability of construction works – Assessment of economic performance of buildings – Calculation methods*. International Standard.

Bull J.W., 1993: *Life Cycle Costing for Construction*. Chapman & Hall. London.

Caro D., Lodato C., Damgaard A., Cristóbal J., Foster G., Flachenecker F., Tonini D., 2024: *Environmental and socio-economic effects of construction and demolition waste recycling in the European Union*. Science of The Total Environment, 908, 168295.

Cavalett O., Watanabe M.D.B., Voldsund M., Roussanaly S., Cherubini F., 2024: *Paving the way for sustainable decarbonization of the European cement industry*. Nature Sustainability, 7 (5), 568–580.

Cemesova A., Hopfe C.J., McLeod R.S., 2015: *PassivBIM: Enhancing interoperability between BIM and low energy design software*. Automation in Construction, 57, 17–32.

Cen X., Wang Q., Shi X., Su Y., Qiu J., 2019: *Optimization of concrete mixture design using adaptive surrogate model*. Sustainability, 11 (7), 1991.

Chardon S., Brangeon B., Bozonnet E., Inard C., 2016: *Construction cost and energy performance of single family houses: From integrated design to automated optimization*. Automation in Construction, 70, 1–13.

Chen A., Lin X., Zhao Z.L., Xie Y.M., 2023: *Layout optimization of steel reinforcement in concrete structure using a truss-continuum model*. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 17 (5), 669–685.

Chen L., Chen Z., Xie Z., Wei L., Hua J., Huang L., Yap P.S., 2023: *Recent developments on natural fiber concrete: A review of properties, sustainability, applications, barriers, and opportunities*. Developments in the Built Environment, 16, 100255.

Cheng D., Reiner D.M., Yang F., Cui C., Meng J., Shan Y., Liu Y., Tao S., Guan D., 2023: *Projecting future carbon emissions from cement production in developing countries*. Nature Communications, 14, 8213.

Cole R.J., Sterner E., 2000: *Reconciling theory and practice of life-cycle costing*. Building Research and Information, 28 (5–6), 368–375.

Cosme N., Verones F., Hauschild M.Z., 2020: *Marine eutrophication. – LC-IMPACT Version 1: A Spatially Differentiated Life Cycle Impact Assessment Approach*. Dostępne pod adresem: https://www.lc-impact.eu/EQmarine_eutrophication.html

Cudecka-Purina N., Kuzmina J., Butkevics J., Olena A., Ivanov O., Atstaja D., 2024: *A Comprehensive Review on Construction and Demolition Waste Management Practices and Assessment of This Waste Flow for Future Valorization via Energy Recovery and Industrial Symbiosis*. Energies, 17 (21), 5506.

De B., Bera M., Bhattacharjee D., Ray B.C., Mukherjee S., 2024: *A comprehensive review on fiber-reinforced polymer composites: Raw materials to applications, recycling, and waste management*. Progress in Materials Science, 146, 101326.

De Nevers N., 2017: *Air Pollution Control Engineering*. Waveland Press. Long Grove, Illinois.

Dhull B.N., 2024: *Analyzing the Lifecycle of Sustainable Building Materials*. Dostępne pod adresem: https://www.azobuild.com/article.aspx?ArticleID=8684.

Dodd N., Donatello S., 2021: *Level(s) indicator 6.1: Life cycle costs user manual: introductory briefing, instructions and guidance (Publication version 1.1)*. European Commission Joint Research Centre. Seville.

Domagała L., 2020: *Durability of structural lightweight concrete with sintered fly ash aggregate*. Materials, 13 (20), 4565.

Dormohamadi M., Rahimnia R., Bunster V., 2024: *Life cycle assessment and life cycle cost analysis of different walling materials with an environmental approach (comparison between earth-based vs. conventional construction techniques in Iran)*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 29, 355–379.

Durastanti C., Moretti L., 2024: *Assessing the climate effects of clinker production: A statistical analysis to reduce its environmental impacts*. Cleaner Environmental Systems, 14, 100204.

Dybeł P., Kucharska M., 2019: *New Generation Concretes – Properties and Applications*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 603, 032016.

Dziadosz A., 2013: *The Influence of Solutions Adopted at the Stage of Planning the Building Investment on the Accuracy of Cost Estimation*. Procedia Engineering, 54, 625–635.

Dz.U. 2001 62 poz. 627: *Ustawa Prawo ochrony środowiska z dnia 27 kwietnia 2001 r. z późniejszymi zmianami*.

Dz.U. 2013 poz. 21 z późn. zm.: *Ustawa o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 r. z późniejszymi zmianami*.

Dz.U. 2014 poz. 112: *Obwieszczenie Ministra Środowiska z dnia 15 października 2013 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku*.

Dz.U. 2016 poz. 1987: *Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 7 listopada 2016 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o odpadach*.

Dz.U. 2018 poz. 1286: *Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy*.

Dz.U. 2021 poz. 845: *Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 12 kwietnia 2021 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu*.

Dz.U. 2021 poz. 2276: *Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 23 listopada 2021 r. w sprawie metody kalkulacji kosztów cyklu życia budynków oraz sposobu przedstawiania informacji o tych kosztach*.

Dz.U. 2021 poz. 2458: *Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 20 grudnia 2021 r. w sprawie określenia metod i podstaw sporządzania kosztorysu inwestorskiego, obliczania planowanych kosztów prac projektowych oraz planowanych kosztów robót budowlanych określonych w programie funkcjonalno-użytkowym*.

Dz.U. 2022 poz. 1225: *Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie*.

Elshoubaky S., Elbeltagi E., Elrahman M.A., Elmasoudi I., 2023: *System Dynamics and TOPSIS Models for Sustainable Building Materials Selection Considering Life Cycle Assessment*. Mansoura Engineering Journal, 48 (1), 1–19.

Engel Z., 1993: *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa.

Environmental Footprint Methods, 2025: *Environmental Footprint Methods – European Commission*. Dostępne pod adresem: https://green-forum.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods_en.

Estévez B., Aguado A., Josa A., 2003: *Environmental Impact of Concrete Recycling, Coming From Construction and Demolition Waste (C&DW)*. Deconstruction and Materials Reuse, 3, 165-175.

Everest A., Pohlmann A., 2020: *Podręcznik akustyki*. Sonia Draga. Katowice

Faustmann S., Wolf A., Fischer O., 2024: *Development of an enhanced damage law for typical steel fiber reinforced concrete based on uniaxial compression and tension tests*. Materials and Structures / Materiaux et Constructions, 57, 150.

Fedorczak-Cisak M., Kowalska A., Radziszewska-Zielina E., Śladowski G., Pachla F., Tatara T., 2019: *A multi-criteria approach for selecting the utility function of the historical building „Stara Polana" located in Zakopane*. MATEC Web of Conferences, 262, 07002.

Feehan A., Nagpal H., Marvuglia A., Gallagher J., 2021: *Adopting an integrated building energy simulation and life cycle assessment framework for the optimisation of facades and fenestration in building envelopes*. Journal of Building Engineering, 43, 103138.

Ferrara M., Sirombo E., Fabrizio E., 2018: *Automated optimization for the integrated design process: the energy, thermal and visual comfort nexus*. Energy and Buildings, 168, 413–427.

Firoozi A.A., Oyejobi D.O., Firoozi A.A., 2025: *Innovations in energy-efficient construction: Pioneering sustainable building practices*. Cleaner Engineering and Technology, 26, 100957.

Fregonara E., Ferrando D.G., Pattono S., 2018: *Economic-environmental sustainability in building projects: Introducing risk and uncertainty in LCCE and LCCA*. Sustainability, 10 (6), 1091.

Frischknecht R., Braunschweig A., Hofstetter P., Suter P., 2000: *Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment*. Environmental Impact Assessment Review, 20 (2), 159–189.

Fukuda-Parr S., 2016: *From the Millennium Development Goals to the Sustainable Development Goals: shifts in purpose, concept, and politics of global goal setting for development*. Gender & Development, 24 (1), 43–52.

Fuller S.K., Petersen S.R., 1996: *Life-Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program*. National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg, MD.

Gao Z., Liang R.Y., Xuan T., 2019: *VIKOR method for ranking concrete bridge repair projects with target-based criteria*. Results in Engineering, 3, 100018.

Garbacz A., Urbańska P., 2021: *Ślad Węglowy Betonu*. Budownictwo, Technologie, Architektura, 4, 56–61.

Gaspars-Wieloch H., 2023: *Scenario planning as a new application area for TOPSIS*. Operations Research and Decisions, 33 (2), 23–34.

Geryło R., 2022: *Deklaracje środowiskowe i taksonomia wyrobów i obiektów budowlanych*. Przegląd Budowlany, 93 (11–12), 69–74.

Gicala M., Halicka A., 2019: *The influence of the demolition process on the environmental impact of reinforced concrete structures based on recycled aggregate*. Czasopismo Techniczne, 116 (9), 81–96.

Gluch P., Baumann H., 2004: *The life cycle costing (LCC) approach: A conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making*. Building and Environment, 39 (5), 571–580.

Gołaszewski J., 2021: *Współczesna technologia betonu i kierunki jej rozwoju w aspektach technicznym, ekonomicznym i ekologicznym*. Przegląd Budowlany, 92 (7–8), 54–60.

Gołaszewski J., Cygan G., 2009: *The effect of temperature on the rheological properties of self-compacting concrete*. [w:] A.M. Brandt, J. Olek, I.H. Marshall (eds.), *Proceedings of the ninth international symposium on brittle matrix composites (BMC 9)*, IFTR and Woodhead Publishing, 359–368.

Goswami S.S., 2020: *Outranking Methods: PROMETHEE I and PROMETHEE II*. Foundations of Management, 12 (1), 93–110.

Grzyl B., Apollo M., Iszewska-Urbańska E., Kristowski A., 2017: *Zarządzanie eksploatacją obiektu w ujęciu kosztów cyklu życia*. Acta Scientiarum Polonorum – Architektura i Budownictwo, 16 (2), 85–89.

Hafez H., Bajić P., Aidarov S., Malija X., Drewniok M., Purnell P., Tošić N., 2024: *Parametric study on the decarbonization potential of structural system and concrete mix design choices for mid-rise concrete buildings*. Materials and Structures, 57 (4), 1–15.

Halicka A., Ciurej H., Gicala M., 2019: *Using the genetic algorithm for environmental optimization of 3-span reinforced concrete beam*. [w:] W. Derkowski, P. Gwoździewicz, Ł. Hojdys, P. Krajewski, M. Pańtak (eds.), *Concrete – innovations in materials, design and structures. FIB symposium 2019. Kraków, Poland 27–29 May 2019. Book of abstracts*. Fédération Internationale du Béton (FIB), 611–612.

Ham Y.-B., Cheriyan D., Kim H.-U., Han J.-G., Kim Y.H., Janani Priyanka P.R., Choi J., 2024: *Particulate matter reduction efficiency analysis of sprinkler system as targeted control measures for construction activity*. Heliyon, 10 (7), e27765.

Hasnaoui A., Ghorbel E., Wardeh G., 2021: *Performance of metakaolin/slag-based geopolymer concrete made with recycled fine and coarse aggregates*. Journal of Building Engineering, 42, 102813.

Helmy S.H., Tahwia A.M., Mahdy M.G., Abd Elrahman M., Abed M.A., Youssf O., 2023: *The Use of Recycled Tire Rubber, Crushed Glass, and Crushed Clay Brick in Lightweight Concrete Production: A Review*. Sustainability, 15 (13), 10060.

Heravi G., Nafisi T., Mousavi R., 2016: *Evaluation of energy consumption during production and construction of concrete and steel frames of residential buildings*. Energy and Buildings, 130, 244–252.

Hetmański M., Laskowski K., Kulbacki M., Kopeć J., 2024: *Stal nisko- czy zeroemisyjna? Jak zdekarbonizować produkcję stali w Polsce*. Instrat. Warszawa.

Hossain K.M.R., Mutsuddy R., 2023: *The Formulation of Self-Compacting Concrete Mixtures Incorporating Diverse Cement Types*. Engineering Proceedings, 56 (1), 41.

Hottle T., Hawkins T.R., Chiquelin C., Lange B., Young B., Sun P., Elgowainy A., Wang M., 2022: *Environmental life-cycle assessment of concrete produced in the United States*. Journal of Cleaner Production, 363, 131834.

Hunt R.G., 1974: *Resource and environmental profile analysis of nine beverage container alternatives, final report*. Environmental Protection Agency. Washington.

Hwang C.-L., Yoon K., 1981: *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*. Springer. Berlin, Heidelberg.

Ibadov N., 2020: *Ecology of building solutions in the engineering of construction projects*. Arabian Journal of Geosciences, 13, 551.

Ige O.E., Von Kallon D.V., Desai D., 2024: *Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model*. Clean Technologies and Environmental Policy, 26 (3), 579–597.

Ikudayisi A.E., Chan A.P.C., Darko A., Adegun O.B., 2022: *Integrated design process of green building projects: A review towards assessment metrics and conceptual framework*. Journal of Building Engineering, 50, 104180.

IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution of to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Islam N., Sandanayake M., Muthukumaran S., Navaratna D., 2024: *Review on Sustainable Construction and Demolition Waste Management – Challenges and Research Prospects*. Sustainability, 16 (8), 3289.

ISO 14040:2006: *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*.

ISO 14044:2006: *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*.
ISO 14046:2014: *Zarządzanie środowiskowe – Ślad wodny – Zasady, wymagania i wytyczne*.
ISO 14075:2024: *Principles and framework for social life cycle assessment*.
ISO 15392:2019: *Sustainability in buildings and civil engineering works – General principles*.
ISO 15686-1:2011: *Buildings and constructed assets – Service life planning Part 1: General principles and framework*.
ISO 15686-2:2012: *Buildings and constructed assets – Service life planning Part 2: Service life prediction procedures*.
ISO 15686-5:2008: *Buildings and constructed assets – Service-life planning Part 5: Life-cycle costing. Ed. I*.
ISO 15686-5:2017: *Buildings and constructed assets – Service-life planning Part 5: Life-cycle costing. Ed. II*.
ISO 15686-8:2010: *Buildings and constructed assets – Service-life planning Part 8: Reference service life and service-life estimation*.
ISO 15686-9:2008: *Buildings and constructed assets – Service-life planning Part 9: Guidance on assessment of service-life data*.
ISO 2631-1:1997: *Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General requirements*.
Jaini N., Utyuzhnikov S., 2017: *Trade-off ranking method for multi-criteria decision analysis*. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 24 (3–4), 121–132.
Jamil S., Idrees M., Akbar A., Ahmed W., 2025: *Investigating the Mechanical and Durability Properties of Carbonated Recycled Aggregate Concrete and Its Performance with SCMs*. Buildings, 15 (2), 201.
Jhatial A.A., Sohu S., Bhatti N.-K., Lakhiar M.T., Oad R., 2018: *Effect of steel fibres on the compressive and flexural strength of concrete*. International Journal of Advanced and Applied Sciences, 5 (10), 16–21.
Johnson J., Reck B.K., Wang T., Graedel T.E., 2008: *The energy benefit of stainless steel recycling*. Energy Policy, 36 (1), 181–192.
Jong E. de, Vijge M.J., 2021: *From Millennium to Sustainable Development Goals: Evolving discourses and their reflection in policy coherence for development*. Earth System Governance, 7, 100087.
Kadri E.H., Aggoun S., Kenai S., Kaci A., 2012: *The compressive strength of high-performance concrete and ultrahigh-performance*. Advances in Materials Science and Engineering, 2012 (1), 361857.
Kafel K., Lesniak A., Zima K., 2019: *Multicriteria comparative analysis of pillars strengthening of the historic building*. Open Engineering, 9 (1), 18–25.
Kamaruddin T., Adul Hamid R., Abd Ghani S., 2020: *Social aspect implementation in sustainable construction*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 849, 012036.
Kars F., Ozcan G., Gulbandilar E., Kocak Y., 2024: *Prediction of Compressive Strength and Design Parameters of C30/37, C35/45 and C40/50 Concrete Classes by ANN*. Journal of Civil Engineering and Urbanism, 14 (4), 356–367.
Kasprowicz T., 2010: *Proces analizy koncepcyjnej, projektowania, organizacji i realizacji przedsięwzięć budowlanych*. Czasopismo Techniczne, 107, 177–189.

Kirkeskov L., Hanskov D.J.A., Brauer C., 2016: *Total and respirable dust exposures among carpenters and demolition workers during indoor work in Denmark*. Journal of Occupational Medicine and Toxicology, 11, 45.

Konkov V., 2013: *Principle approaches to high performance concrete application in construction*. Procedia Engineering, 57, 589–596.

Korentz J., 2023: *Właściwości zapraw cementowych z dodatkiem rozdrobnionego GFRP z recyklingu łopat turbin wiatrowych*. Materiały Budowlane, 615 (11), 32–35.

Kosior-Kazberuk M., Krassowska J., 2019: *Fracture toughness of concrete with basalt fiber*. MATEC Web of Conferences, 265, 01008.

Kośmieja M., Dziadosz A., 2016: *Elastyczność rachunku kosztów w cyklu życia obiektu*. Materiały Budowlane, 6, 118–119.

Krassowska J., Kosior-Kazberuk M., Słowik M., Akram A., 2024: *Sustainable future of construction: the potential of concrete with basalt mini-bars as reinforcement*. Economics and Environment, 88 (1), 776.

Krishnan A.R., 2022: *Past efforts in determining suitable normalization methods for multi-criteria decision-making: A short survey*. Frontiers in Big Data, 5, 990699.

Kristowski A., Grzyl B., Szczepański M., Jakubczyk-Gałczyńska A., 2021: *Model obliczania kosztu cyklu życia obiektu na przykładzie budynku mieszkalnego jednorodzinnego*. Przegląd Budowlany, 92, 137–141.

Krzemiński M., 2020: *Multiple-Criteria Cost Analysis for Simulated Life Cycle of Office Building*. [w:] C. Serrat, J.R. Casa, V.G. Armengol (eds.), *Current Topics and Trends on Durability of Building Materials and Components*. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE).

Kurda R., de Brito J., Silvestre J.D., 2019: *CONCRETop – A multi-criteria decision method for concrete optimization*. Environmental Impact Assessment Review, 74, 73–85.

Kurinjimalar R., Sathiyaraj C., Ramachandran M., Manjula S., 2023: *Evaluation of Three Common Green Building Materials Using ELECTRE Method*. Building Materials and Engineering Structures, 1 (1), 30–40.

Larsen V.G., Tollin N., Sattrup P.A., Birkved M., Holmboe T., 2022: *What are the challenges in assessing circular economy for the built environment? A literature review on integrating LCA, LCC and S-LCA in life cycle sustainability assessment, LCSA*. Journal of Building Engineering, 50, 104203.

Larsson N., 2009: *The Integrated Design Process; History and Analysis*. International Initiative for a Sustainable Built Environment (iiSBE).

Laurent A., Weidema B.P., Bare J., Liao X., de Souza D.M., Pizzol M., Sala S., Schreiber H., Thonemann N., Verones F., 2020: *Methodological review and detailed guidance for the life cycle interpretation phase*. Journal of Industrial Ecology, 24 (5), 986–1003.

Lélé S.M., 1991: *Sustainable development: A critical review*. World Development, 19 (6), 607–621.

Leoto R., Lizarralde G., 2019: *Challenges in evaluating strategies for reducing a building's environmental impact through Integrated Design*. Building and Environment, 155, 34–46.

Leśniak A., Górka M., 2022: *Wielokryterialna ocena wybranych rozwiązań elewacji wentylowanych*. Materiały Budowlane, 602 (10), 24–26.

Leśniak A., Zima K., 2018: *Cost calculation of construction projects including sustainability factors using the Case Based Reasoning (CBR) method*. Sustainability, 10 (5), 1608.

Leśniak A., Kubek D., Plebankiewicz E., Zima K., Belniak S., 2018: *Fuzzy AHP application for supporting contractors' bidding decision*. Symmetry, 10 (11), 642.

Li L., Xuan D., Sojobi A.O., Liu S., Poon C.S., 2021: *Efficiencies of carbonation and nano silica treatment methods in enhancing the performance of recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 308, 125080.

Li Z., Tian M., Zhu X., Xie S., He X., 2022: *A Review of Integrated Design Process for Building Climate Responsiveness*. Energies, 15 (19), 7133.

Liu Min, Zhu G., Tian Y., 2024: *The historical evolution and research trends of life cycle assessment*. Green Carbon, 2 (4), 425–437.

Liu Mo, Dai W., Jin W., Li M., Yang X., Han Y., Huang M., 2024: *Mix proportion design and carbon emission assessment of high strength geopolymer concrete based on ternary solid waste*. Scientific Reports, 14, 24989.

Liu Z., Lu Y., Shen M., Peh L.C., 2021: *Transition from building information modeling (BIM) to integrated digital delivery (IDD) in sustainable building management: A knowledge discovery approach based review*. Journal of Cleaner Production, 291, 125223.

Mach A., Wałach D., 2024: *Implementation of Integrated Life Cycle Design Principles in Ground Improvement and Piling Methods – A Review*. Sustainability, 16 (2), 659.

Mahboubizadeh S., Sadeq A., Arzaqi Z., Ashkani O., Samadoghli M., 2024: *Advancements in fiber-reinforced polymer (FRP) composites: an extensive review*. Discover Materials, 4, 22.

Maqbool R., Arul T., Ashfaq S., 2023: *A mixed-methods study of sustainable construction practices in the UK*. Journal of Cleaner Production, 430, 139087.

Marzouk M.M., 2011: *ELECTRE III model for value engineering applications*. Automation in Construction, 20 (5), 596–600.

McNeil K., Kang T.H.K., 2013: *Recycled Concrete Aggregates: A Review*. International Journal of Concrete Structures and Materials, 7 (1), 61–69.

Medeiros G.F. de, Kripka M., 2014: *Optimization of reinforced concrete columns according to different environmental impact assessment parameters*. Engineering Structures, 59, 185–194.

Mehta K.P., Monteiro P.J.M., 2014: *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials 4th ed.* McGraw-Hill Education. New York.

Mensah J., 2019: *Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review*. Cogent Social Sciences, 5, 1653531.

Miller S.A., Horvath A., Monteiro P.J.M., 2018: *Impacts of booming concrete production on water resources worldwide*. Nature Sustainability, 1, 69–76.

Mohamed O.A., 2023: *Effects of the Curing Regime, Acid Exposure, Alkaline Activator Dosage, and Precursor Content on the Strength Development of Mortar with Alkali-Activated Slag and Fly Ash Binder: A Critical Review*. Polymers, 15 (5), 1248.

Mohammadi M., Rezaei J., 2020: *Ensemble ranking: Aggregation of rankings produced by different multi-criteria decision-making methods*. Omega, 96, 102254.

Moins B., France C., van den Bergh W., Audenaert A., 2020: *Implementing life cycle cost analysis in road engineering: A critical review on methodological framework choices*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 133, 110284.

Mokhlesian S., Holmén M., 2012: *Business model changes and green construction processes*. Construction Management and Economics, 30 (9), 761–775.

Moosavi S., Chamoret D., Tie Bi S., Sabkhi N., Culnard Y., 2021: *Topology optimization considering additive manufacturing constraints in an industrial context*. [w:] *World Congress in Computational Mechanics and ECCOMAS Congress*. European Community on Computational Methods in Applied Sciences.

Mostafaei H., Badarloo B., Chamasemani N.F., Rostampour M.A., Lehner P., 2023: *Investigating the Effects of Concrete Mix Design on the Environmental Impacts of Reinforced Concrete Structures*. Buildings, 13 (5), 1313.

Mukherjee S.P., Vesmawala G., 2013: *Literature Review on Technical Aspect of Sustainable Concrete*. International Journal of Engineering Science Invention, 2 (8), 1–9.

Munir Q., Lahtela V., Kärki T., Koivula A., 2024: *Assessing life cycle sustainability: A comprehensive review of concrete produced from construction waste fine fractions*. Journal of Environmental Management, 366, 121734.

Nadir Y., Sujatha A., 2018: *Durability Properties of Coconut Shell Aggregate Concrete*. KSCE Journal of Civil Engineering, 22 (5), 1920–1926.

Nascimento C.R.S.M.S., de Almeida-Filho A.T., Palha R.P., 2023: *A TOPSIS-Based Decision Model to Establish Priorities for Sequencing the Design of Construction Projects in the Public Sector*. Mathematical Problems in Engineering, 2023 (1), 1414294.

Negrin I., Kripka M., Yepes V., 2023: *Multi-criteria optimization for sustainability-based design of reinforced concrete frame buildings*. Journal of Cleaner Production, 425, 139115.

Nehdi M.L., Marani A., Zhang L., 2024: *Is net-zero feasible: Systematic review of cement and concrete decarbonization technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 191, 114169.

Neville A.M., 2011: *Properties of Concrete*. Pearson Education Limited. Essex.

Neville A.M., Brooks J.J., 2010: *Concrete Technology*. J. Wiley. Harlow, Essex, UK.

Nilimaa J., 2023: *Smart materials and technologies for sustainable concrete construction*. Developments in the Built Environment, 15, 100177.

Nithya N.S., Thota S., Rathour L., Shanmugasundaram P., 2024: *A new multi-criteria decision making method for the selection of construction contractors using interval valued fuzzy set*. BMC Research Notes, 17, 113.

Nowotarski P., Pasławski J., Dallasega P., 2021: *Multi-criteria assessment of lean management tools selection in construction*. Archives of Civil Engineering, 67 (1), 711–726.

Ntziachristos L., Samaras Z., 2023: *1.A.3.b.i-iv. Road transport 2023*. [w:] *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023.* European Environment Agency.

Obolewicz J., Okuń M., 2021: *Cykl życia obiektu budowlanego*. Przegląd Budowlany, 92 (9), 24–31.

Obrecht T.P., Jordan S., Legat A., Ruschi Mendes Saade M., Passer A., 2021: *An LCA methodology for assessing the environmental impacts of building components before and after refurbishment*. Journal of Cleaner Production, 327, 129527.

Oduyemi O., Okoroh M., Fajana O.S., 2016: *Risk assessment methods for life cycle costing in buildings*. Sustainable Buildings, 1, 3.

Okafor F.O., 1988: *Palm kernel shell as a lightweight aggregate for concrete*. Cement and Concrete Research, 18 (6), 901–910.

Okasha N.M., Alzo'ubi A.K., Mughieda O., Kewalramani M., Almasri A.H., 2024: *A near-optimum multi-objective optimization approach for structural design*. Ain Shams Engineering Journal, 15 (2), 102388.

Opricovic S., Tzeng G.H., 2004: *Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS*. European Journal of Operational Research, 156 (2), 445–455.

Orozco C., Babel S., Tangtermsirikul S., Sugiyama T., 2024: *Comparison of environmental impacts of fly ash and slag as cement replacement materials for mass concrete and the impact of transportation*. Sustainable Materials and Technologies, 39, e00796.

Ortiz-Reyes E., Anex R.P., 2018: *A life cycle impact assessment method for freshwater eutrophication due to the transport of phosphorus from agricultural production*. Journal of Cleaner Production, 177, 474–482.

Ostrowski K., Kinasz R., Cieślik J., Wałach D., Ahmida B., 2016: *Nośność elementów osiowo ściskanych na przykładzie kolumn z betonu i fibrobetonu wysokowartościowego wzmocnionych włóknami węglowymi*. Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, 63 (3), 309-316.

Osuma G., Yusuf N., 2025: *Towards an Optimal Renewable Energy Mix for the European Union: Enhancing Energy Security and Sustainability*. Journal of the Knowledge Economy.

Pizzol M., Laurent A., Sala S., Weidema B., Verones F., Koffler C., 2017: *Normalisation and weighting in life cycle assessment: quo vadis?*. International Journal of Life Cycle Assessment, 22 (6), 853–866.

Plebankiewicz E., 2019: *Planowanie i szacowanie kosztów cyklu życia budynków biurowych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków.

Plebankiewicz E., Zając K., 2022: *Wpływ metody kalkulacji na wartość kosztów cyklu życia budynku*. Materiały Budowlane, 602 (10), 60–63.

Plebankiewicz E., Zima K., Wieczorek D., 2016: *Life Cycle Cost Modelling of Buildings with Consideration of the Risk*. Archives of Civil Engineering, 62 (2), 149–166.

Plebankiewicz E., Meszek W., Zima K., Wieczorek D., 2020: *Probabilistic and fuzzy approaches for estimating the life cycle costs of buildings under conditions of exposure to risk*. Sustainability, 12 (1), 226.

Plebankiewicz E., Leśniak A., Vitkova E., Hromadka V., 2022: *Models for estimating costs of public buildings maintaining – Review and assessment*. Archives of Civil Engineering, 68 (1), 335–351.

PN-EN 14253:2003: *Wibracje mechaniczne – Pomiar i obliczanie narażenia człowieka na drgania przenoszone przez całe ciało – Wytyczne praktyczne dla pomiaru w miejscu pracy*.

PN-EN 15603:2008: *Energetyczne właściwości użytkowe budynków – Całkowite zużycie energii i definicja energii znamionowej*.

PN-EN 15643:2021: *Zrównoważenie obiektów budowlanych – Struktura oceny budynków i obiektów inżynieryjnych*.

PN-EN 15643-3:2012: *Zrównoważone obiekty budowlane – Ocena budynków – Część 3: Postanowienia dotyczące oceny socjalnych właściwości użytkowych*.

PN-EN 15643-4:2012: *Zrównoważone obiekty budowlane – Ocena budynków – Część 4: Postanowienia dotyczące właściwości ekonomicznych*.

PN-EN 15804+A2:2020: *Zrównoważenie obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych*.

PN-EN 15978:2012: *Zrównoważone obiekty budowlane – Ocena środowiskowych właściwości użytkowych budynków – Metoda obliczania*.

PN-EN 16309+A1:2014: *Zrównoważoność obiektów budowlanych – Ocena socjalnych właściwości użytkowych budynków – Metodyka obliczania*.
PN-EN 16485:2014: *Drewno okrągłe i tarcica – Środowiskowe deklaracje wyrobu – Reguły kategorii wyrobu dla drewna i wyrobów drewnopochodnych stosowanych w budownictwie*.
PN-EN 16627:2015: *Zrównoważoność obiektów budowlanych – Ocena ekonomicznych właściwości użytkowych budynków – Metody obliczania*.
PN-EN 16757:2023: *Zrównoważone podejście do obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Zasady dotyczące kategorii wyrobów w odniesieniu do betonu i elementów betonowych*.
PN-EN 16783:2024: *Wyroby do izolacji cieplnej – Deklaracje środowiskowe wyrobu (EPD) – Zasady kategoryzacji wyrobu (PCR) uzupełniające do EN 15804, dotyczące wyrobów produkowanych fabrycznie i formowanych in situ*.
PN-EN 17160:2019: *Zasady kategoryzacji płytek ceramicznych*.
PN-EN 17472:2022: *Zrównoważoność obiektów budowlanych – Ocena zrównoważonego rozwoju budowli inżynierskich – Zasady ogólne*.
PN-EN 197-1:2011: *Cement – Część 1: Skład, specyfikacje i kryteria zgodności dla cementów zwykłych*.
PN-EN 1990:2010: *Podstawy projektowania konstrukcji*.
PN-EN 1991-1-1:2010: *Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-1: Oddziaływania ogólne – Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach*.
PN-EN 1991-1-3:2015: *Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-3: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem*.
PN-EN 1991-1-4:2010: *Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru*.
PN-EN 1991-1-5:2010: *Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-5: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania termiczne*.
PN-EN 1991-1-7:2015: *Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-7: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wyjątkowe*.
PN-EN 1992-1-1:2008: *Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*.
PN-EN 1992-1-2:2008: *Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-2: Reguły ogólne – Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe*.
PN-EN 1998-1:2014: *Projektowanie konstrukcji poddanych oddziaływaniom sejsmicznym – Część 1: Reguły ogólne, oddziaływania sejsmiczne i reguły dla budynków*.
PN-EN 206+A2:2021: *Beton – Część 1: Specyfikacja, właściwości, wytwarzanie i zgodność*.
PN-EN ISO 14067-10:2018: *Gazy cieplarniane – Ślad węglowy wyrobów – Wymagania i wytyczne dotyczące kwantyfikacji*.
PN-EN ISO 52000-1:2017: *Energetyczne właściwości użytkowe budynków – Nadrzędna ocena EPB – Część 1: Ogólne ramy i procedury*.
Podvezko V., 2011: *The comparative analysis of MCDA methods SAW and COPRAS*. Engineering Economics, 22 (2), 134–146.
Posch M., Seppälä J., Hettelingh J.-P., Johansson M., Margni M., Jolliet O., 2008: *The role of atmospheric dispersion models and ecosystem sensitivity in the determination of characterisation*

factors for acidifying and eutrophying emissions in LCIA. International Journal of Life Cycle Assessment, 13, 477–486.
Provis J.L., van Deventer J.S.J. (eds.), 2014: *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report*. Springer Dordrecht.
Purvis B., Mao Y., Robinson D., 2019: *Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins*. Sustainability Science, 14 (3), 681–695.
Qureshi J., 2022: *A Review of Fibre Reinforced Polymer Structures*. Fibers, 10 (3), 27.
Radziejowska A., 2021: *The assessment of the social performance of residential buildings*. Archives of Civil Engineering, 67 (3), 543–564.
Radziszewska-Zielina E., 2016: *The application of multi-criteria analysis in the evaluation of partnering relations and the selection of a construction company for the purposes of cooperation*. Archives of Civil Engineering, 62 (2), 167–182.
Radziszewska-Zielina E., Śladowski G., 2015: *Fuzzy inference system assisting the choice of a variant of adaptation of a historical building*. International Journal of Contemporary Management, 14, 131–148.
Rakoczy B., Karpus K., Szalewska M., Walas M. (red.), 2015: *Zasada zrównoważonego rozwoju w wymiarze gospodarczym i ekonomicznym*. Wydział Prawa i Administracji UMK. Toruń.
Ramesh T., Prakash R., Shukla K.K., 2010: *Life cycle energy analysis of buildings: An overview*. Energy and Buildings, 42 (10), 1592–1600.
Raport AIB, 2024: *European Residual Mixes 2023*. Association of Issuing Bodies.
Raport CAS, 2023: *Raport o kosztach w budownictwie 2016–2023*. Contract Advisory Services.
Raport EEA, 2022: *Transport and environment report 2021: Decarbonising road transport – the role of vehicles, fuels and transport demand*. European Environment Agency.
Raport EEA, 2025: *Circular material use rate in Europe*. European Environment Agency.
Raport ERA/CNG, 2019: *Research Report Carbon Footprint Of Construction Equipment*. European Rental Association and Climate Neutral Group.
Raport EUROFER, 2015: *Steel and the Circular Economy*. European Steel Association.
Raport UNEP, 2009: *Guidelines for social life cycle assessment of products : Social and socio-economic LCA guidelines complementing environmental LCA and Life Cycle Costing, contributing to the full assessment of goods and services within the context of sustainable development*. United Nations Environment Programme.
Raport UNEP, 2011: *Towards a Life Cycle Sustainability Assessment: Making informed choices on products*. United Nations Environment Programme. Global Status Report for Buildings and Construction.
Raport UNEP, 2021: *Methodological Sheets for Subcategories in Social life cycle assessment (S-LCA) 2021*. United Nations Environment Programme.
Raport UNEP, 2024: *Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations – Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. United Nations Environment Programme. Nairobi.
Raport UNEP/SETAC, 2016: *Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators: Volume 1*. United Nations Environment Programme.
Raport WMO/UNEP, 2014: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014*. World Meteorological Organization. Geneva.

Raport WSA, 2024: *2024 World Steel in Figures*. World Steel Association.

Rączkowski B., 2009: *BHP w praktyce*. Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr. Gdańsk.

Redclift M., 2005: *Sustainable development (1987–2005): an oxymoron comes of age*. Sustainable Development, 13 (4), 212–227.

Reisinger J., Kugler S., Kovacic I., Knoll M., 2022: *Parametric Optimization and Decision Support Model Framework for Life Cycle Cost Analysis and Life Cycle Assessment of Flexible Industrial Building Structures Integrating Production Planning*. Buildings, 12 (2), 162.

Ren Q., Ding L., Dai X., Li C., Li C., Jiang Z., 2024: *Optimizing mix design of concrete with manufactured sand for low embodied carbon and desired strength using machine learning*. Construction and Building Materials, 457, 139407.

Renne N., De Maeijer P.K., Craeye B., Buyle M., Audenaert A., 2022: *Sustainable Assessment of Concrete Repairs through Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Cost Analysis (LCCA)*. Infrastructures, 7 (10), 128.

Research and Markets, 2024: *Cement – Market Share Analysis, Industry Trends & Statistics, Growth Forecasts (2024–2030)*. Dostępne pod adresem: https://www.researchandmarkets.com/reports/5937768/cement-market-share-analysis-industry-trends.

Rosenbaum R.K., Bachmann T.M., Gold L.S., Huijbregts M.A.J., Jolliet O., Juraske R., Koehler A., Larsen H.F., MacLeod M., Margni M., McKone T.E., Payet J., Schuhmacher M., van de Meent D., Hauschild M.Z., 2008: *USEtox – The UNEP-SETAC toxicity model: Recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment*. International Journal of Life Cycle Assessment, 13 (7), 532–546.

Rozporządzenie Rady (UE) 333/2011 z dnia 31 marca 2011 r.: *Rozporządzenie Rady (UE) 333/2011 z dnia 31 marca 2011 r. ustanawiające kryteria określające, kiedy pewne rodzaje złomu przestają być odpadami na mocy dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE*. Dz.U. L 94 z 8.4.2011.

Rudnicki T., 2021: *Functional method of designing self-compacting concrete*. Materials, 14 (2), 267.

Saaty T.L., 1990: *An Exposition on the AHP in Reply to the Paper „Remarks on the Analytic Hierarchy Process"*. Management Science, 36 (3), 259–268.

Sabău M., Bompa D. V., Silva L.F.O., 2021: *Comparative carbon emission assessments of recycled and natural aggregate concrete: Environmental influence of cement content*. Geoscience Frontiers, 12 (6), 101235.

Sabbrojjaman M., Liu Y., Tafsirojjaman T., 2024: *A comparative review on the utilisation of recycled waste glass, ceramic and rubber as fine aggregate on high performance concrete: Mechanical and durability properties*. Developments in the Built Environment, 17, 100371.

Sadowski Ł., 2018: *Towards the utilization of waste glass powder in sustainable cement based overlays*. MATEC Web of Conferences, 163, 03001.

Sagan J., 2018: *Wspomaganie decyzji w logistyce odzysku odpadów betonowych*. Rozprawa doktorska, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza. Kraków.

Sala S., Cerutti A.K., Pant R., 2018: *Development of a weighting approach for the Environmental Footprint*. Publications Office of the European Union. Luxembourg.

Sánchez-Garrido A.J., Navarro I.J., Yepes V., 2022: *Multi-criteria decision-making applied to the sustainability of building structures based on Modern Methods of Construction*. Journal of Cleaner Production, 330, 129724.

Santos A.C., Mendes P., Ribau Teixeira M., 2019: *Social life cycle analysis as a tool for sustainable management of illegal waste dumping in municipal services*. Journal of Cleaner Production, 210, 1141–1149.

Sarja A., 1998: *Integrated life cycle design of materials and structures*. Proceedings CIB World Building Congress.

Schneider M., 2019: *The cement industry on the way to a low-carbon future*. Cement and Concrete Research, 124, 105792.

Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M., 2018: *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry*. Cement and Concrete Research, 114, 2–26.

Seo M., Lee S.Y., Lee C., Cho S.S., 2019: *Recycling of cement kiln dust as a raw material for cement*. Environments, 6 (10), 113.

Seppälä J., Posch M., Johansson M., Hettelingh J.-P., 2006: *Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 11, 403–416.

Shi C., Wu Z., Lv K., Wu L., 2015: *A review on mixture design methods for self-compacting concrete*. Construction and Building Materials, 84, 387–398.

Shibeika A., Khoukhi M., Khatib O. Al, Alzahmi N., Tahnoon S., Dhahri M. Al, Alshamsi N., 2021: *Integrated design process for high-performance buildings; a case study from Dubai*. Sustainability, 13 (15), 8529.

Siekierski J., Rutkowska M., 2008: *Zrównoważony rozwój jako koncepcja w naukach ekonomicznych*. Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania, 8, 359–368.

Silva R. V., De Brito J., Dhir R.K., 2014: *Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production*. Construction and Building Materials, 65, 201–217.

Singaravel D.A., Veerapandian P., Rajendran S., Dhairiyasamy R., 2024: *Enhancing high-performance concrete sustainability: integration of waste tire rubber for innovation*. Scientific Reports, 14, 4635.

Singh Kushwaha S., Singh Baghel S., Kushwaha S.S., Baghel S.S., 2014: *Life-Cycle Cost Analysis of Concrete Structures.* International Journal of Multidisciplinary Approach & Studies, 1 (4), 312–318.

Singhal A., Goel S., 2022: *Impact of Sandstone Quarrying on the Health of Quarry Workers and Local Residents: A Case Study of Keru, Jodhpur, India*. [w:] D. Sengupta, B.K. Dubey, S. Goel (eds.), *Treatment and Disposal of Solid and Hazardous Wastes*. Springer Cham, 97–118.

Siwowski T., 2013: *Zintegrowana analiza cyklu życia w utrzymaniu mostów*. [w:] M. Kaszyńska (red.), *Awarie budowlane. Zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje. XXVI konferencja naukowo-techniczna, Szczecin–Międzyzdroje, 21–24 maja 2013*. Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego. Szczecin.

Skibniewski M.J., Chao L.-C., 1992: *Evaluation of Advanced Construction Technology with AHP Method*. Journal of Construction Engineering and Management, 118 (3), 577–593.

Skorupka D., Duchaczek A., Szleszyński A., 2012: *Optymalizacja doboru środków transportowych w logistyce magazynowej materiałów budowlanych*. Scientific Journal of the Military University of Land Forces, 166 (4), 137–145.

Skrzypczak I., Kokoszka W., Zięba J., Leśniak A., Bajno D., Bednarz Ł., 2020: *A proposal of a method for ready-mixed concrete quality assessment based on statistical-fuzzy approach*. Materials, 13 (24), 5674.

Skrzypczak I., Leśniak A., Jasiński R., Natividade E., 2024: *Prioritization of the Requirements Formulated in the European Standard EN 206 in Assessment of Concrete Quality – Multicriteria Analysis Using the AHP Method*. Civil and Environmental Engineering Reports, 34 (1), 104–115.

Sobotka A., Sagan J., 2017: *An environmental life-cycle assessment of selected concrete recycling processes*. Czasopismo Techniczne, 10, 123–130.

Sobotka A., Sagan J., 2021: *Decision support system in management of concrete demolition waste*. Automation in Construction, 128, 103734.

Soust-Verdaguer B., Hoxha E., LLatas C., Passer A., 2022: *How Transport Modelling affects the building Life Cycle Assessment (LCA) results: A Case Study Analysis*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1078, 012096.

Sphera, 2025: *LCA Database – Sphera*. Dostępne pod adresem: https://lcadatabase.sphera.com/.

Steel for Life, 2021: *Industry CPD: Structural steel and the circular economy*. The Structural Engineer, 99 (3), 26–29.

Sterner E., 2000: *Life-cycle costing and its use in the Swedish building sector*. Building Research and Information, 28 (5–6), 387–393.

Su Z., Anderson C.G., Long H., Suer J., Traverso M., Jäger N., 2022: *Review of Life Cycle Assessments for Steel and Environmental Analysis of Future Steel Production Scenarios*. Sustainability, 14 (21), 14131.

Szabo Z.K., Szádoczki Z., Bozóki S., Stanciulescu G.C., Szabo D., 2021: *An analytic hierarchy process approach for prioritisation of strategic objectives of sustainable development*. Sustainability, 13 (4), 2254.

Szafranko E., 2019: *Analiza wielokryterialna w ocenie wariantów organizacyjnych inwestycji budowlanych*. Acta Scientiarum Polonorum – Architektura i Budownictwo, 18 (1), 77–82.

Ślusarczyk K., Duda Ł., Durlej P., Bajorek G., Plewako Z., Budziński R., Nykiel D., 2023: *Funkcjonalność technologiczna i środowiskowa betonów wysokowartościowych (BWW)*. [w:] *XII Konferencja „Dni Betonu"*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, 345–366.

Taherdoost H., 2023: *Analysis of Simple Additive Weighting Method (SAW) as a MultiAttribute Decision-Making Technique: A Step-by-Step Guide*. Journal of Management Science & Engineering Research, 6 (1), 21–24.

Taherdoost H., Madanchian M., 2023: *A Comprehensive Overview of the ELECTRE Method in Multi Criteria Decision-Making*. Journal of Management Science & Engineering Research, 6 (2), 5–16.

Taherdoost H., Mohebi A., 2024: *A Comprehensive Guide to the COPRAS method for Multi-Criteria Decision Making*. Journal of Management Science & Engineering Research, 7 (2), 1–14.

Tao J.C., Wang X.Z., Yao B., Pei W.W., Jiren G., He W.Q., Li L., 2025: *Comparison of rheology and durability of geopolymer and Portland cement concrete at the same strength levels*. Construction and Building Materials, 461, 139958.

Task Group 3.7, 2013: *Integrated life-cycle assessment of concrete structures (fib Bulletin No. 71)*. International Federation for Structural Concrete. Lausanne.

Task Group 9.3, 2007: *FRP reinforcement in RC structures*.

The Joint Research Centre: EU Science Hub, 2016: *Well-to-Wheels Analyses*. Dostępne pod adresem: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/welcome-jec-website/jec-activities/well-wheels-analyses_en.

Tome S., Nana A., Tchakouté H.K., Temuujin J., Rüscher C.H., 2024: *Mineralogical evolution of raw materials transformed to geopolymer materials: A review*. Ceramics International, 50 (19), 35855–35868.

Trojan F., Morais D.C., 2012: *Using electre tri to support maintenance of water distribution networks*. Pesquisa Operacional, 32 (2), 423–442.

Trzaskalik T., 2014: *Wielokryterialne wspomaganie decyzji. Przegląd metod i zastosowań*. Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie, Politechnika Śląska, 74, 239–263.

Uchwała 96 z dnia 12 czerwca 2023 r.: *Uchwała 96 Rady Ministrów z dnia 12 czerwca 2023 r. w sprawie Krajowego planu gospodarki odpadami 2028*. M.P. 2023 poz. 702.

Van Oers L., Guinée J., 2016: *The Abiotic Depletion Potential: Background, Updates, and Future*. Resources, 5 (1), 16.

Van Oers L., Koning A., Guinée J., Huppes G., 2002: *Abiotic resource depletion in LCA*. Road and Hydraulic Engineering Institute. Amsterdam.

Van Roijen E., Sethares K., Kendall A., Miller S.A., 2024: *The climate benefits from cement carbonation are being overestimated*. Nature Communications, 15, 4848.

Vourliotakis G., Platsakis O., 2023: *Greenhouse gas intensities of transport fuels in the EU in 2021*. European Environment Agency.

Wałach D., 2014: *Możliwości powtórnego wykorzystania kruszywa pochodzącego z recyklingu betonów wysokowartościowych*. Logistyka, 6, 14855–14864.

Wałach D., 2016: *Impact of separated bottom ashes on the parameters of concrete mix and hardened concrete*. E3S Web of Conferences, 10, 00099.

Wałach D., 2021: *Analysis of factors affecting the environmental impact of concrete structures*. Sustainability, 13 (1), 204.

Wałach D., Mach A., 2023: *Effect of Concrete Mix Composition on Greenhouse Gas Emissions over the Full Life Cycle of a Structure*. Energies, 16 (7), 3229.

Wałach D., Sagan J., Jaskowska-Lemańska J., 2017: *Environmental assessment in the integrated life cycle design of buildings*. Czasopismo Techniczne, 8, 143–151.

Wałach D., Dybeł P., Sagan J., Gicala M., 2019: *Environmental performance of ordinary and new generation concrete structures – a comparative analysis*. Environmental Science and Pollution Research, 26, 3980–3990.

Wang J., Dong H., 2024: *Preparation and application of multi-source solid wastes as clean aggregates: A comprehensive review*. Construction and Building Materials, 418, 135414.

Warrad I.O., Abdulaal R.M., Bafail O.A., 2021: *Application of Integrated MCDM Models for Construction Contractors' Selection at Al-Quds University*. International Journal of Advanced Engineering Research and Applications, 7 (06), 79–93.

Wieczorek D., Plebankiewicz E., Zima K., 2019: *Model estimation of the whole life cost of a building with respect to risk factors*. Technological and Economic Development of Economy, 25 (1), 20–38.

Więckowski J., Sałabun W., 2023: *Sensitivity analysis approaches in multi-criteria decision analysis: A systematic review*. Applied Soft Computing, 148, 110915.

Winther M., Dore C., 2023: *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 1.A.4 Non road mobile machinery 2023*. European Environment Agency.

Wu S., Shao Z., Andrew R.M., Bing L., Wang J., Niu L., Liu Z., Xi F., 2024: *Global CO_2 uptake by cement materials accounts 1930–2023*. Scientific Data, 11 (1), 1409.

Xiao J., Cheng Z., Zhou Z., Wang C., 2022: *Structural engineering applications of recycled aggregate concrete: Seismic performance, guidelines, projects and demonstrations*. Case Studies in Construction Materials, 17, e01520.

Yaseen N., Alcivar-Bastidas S., Irfan-ul-Hassan M., Petroche D.M., Qazi A.U., Ramirez A.D., 2024: *Concrete incorporating supplementary cementitious materials: Temporal evolution of compressive strength and environmental life cycle assessment*. Heliyon, 10 (3), e25056.

Yasmin T., Clark J., Sambrook Smith G., Daham A., Nicholas A., Gasparotto A., 2024: *Towards sustainable governance of freshwater sand – A resource regime approach*. Earth System Governance, 22, 100228.

Yau Y., 2009: *Multi-criteria decision making for urban built heritage conservation: Application of the analytic hierarchy process*. Journal of Building Appraisal, 4 (3), 191–205.

Yücel M., Nigdeli S.M., Bekdaş G., 2022: *Generation of sustainable models with multi-objective optimum design of reinforced concrete (RC) structures*. Structures, 40, 223–236.

Zalecenie Komisji (UE) 2021/2279 z dnia 15 grudnia 2021 r.: *Zalecenie Komisji (UE) 2021/2279 z dnia 15 grudnia 2021 r. w sprawie stosowania metod oznaczania śladu środowiskowego do pomiaru efektywności środowiskowej w cyklu życia produktów i organizacji oraz informowania o niej*. Dz.U. L 471 z 30.12.2021.

Zavadskas E., Kaklauskas A., Saraka A., 1994: *The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects*. Technological and Economic Development of Economy, 1 (3), 131–139.

Zelm R. van, Huijbregts M.A.J., den Hollander H.A., van Jaarsveld H.A., Sauter F.J., Struijs J., van Wijnen H.J., van de Meent D., 2008: *European characterization factors for human health damage of PM_{10} and ozone in life cycle impact assessment*. Atmospheric Environment, 42 (3), 441–453.

Ženíšek M., Pešta J., Tipka M., Kočí V., Hájek P., 2020: *Optimization of RC structures in terms of cost and environmental impact – case study*. Sustainability, 12 (20), 8532.

Zhang B., Senouci A., Medvedev V., Pustovgar A., 2023: *A Review of Concrete Carbonation and Approaches to Its Research under Irradiation*. Buildings, 13 (8), 1998.

Zhang Q., Zhang B., Wang D., 2022: *Environmental Benefit Assessment of Blended Cement with Modified Granulated Copper Slag*. Materials, 15 (15), 5359.

Zheng W., Shui Z., Xu Z., Gao X., Zhang S., 2023: *Multi-objective optimization of concrete mix design based on machine learning*. Journal of Building Engineering, 76, 107396.

Zima K., Wieczorek D., Przesmycka A., 2020: *Impact of the selected building maintenance strategy on costs and service life*. Świat Nieruchomości, 112 (2), 40–57.

Ziolkowski P., 2025: *Influence of Optimization Algorithms and Computational Complexity on Concrete Compressive Strength Prediction Machine Learning Models for Concrete Mix Design*. Materials, 18 (6), 1386.

Załącznik 1
Metodyka zebrania danych bibliograficznych przedstawionych w rozdziale 1

Wszystkie wykorzystane dane pochodzą z bazy Scopus, analizowano dane za lata 1990–2024 (dostęp: marzec 2025).

1. Dane dotyczące ilości prac naukowych (rys. 1.2)

Dane pozyskano metodą wyszukiwania „TITLE-ABS-KEY", metoda ta wyszukuje zadane frazy słów kluczowych znajdujących się w tytule publikacji (TITLE), w abstrakcie publikacji (ABS) oraz wszystkich słów kluczowych przypisanych do publikacji (zarówno autorskich, jak i tych wygenerowanych przez bazę danych czy indeksowych – KEY). Dane pozyskane były z wykorzystaniem następującej sekwencji słów kluczowych:

a) dla serii oznaczonej „Zrównoważone budownictwo" wybrany zestaw słów kluczowych to *sustainable construction* lub *sustainable building* lub *built environment*;
b) dla serii „Zrównoważone budownictwo betonowe" wybrany zestaw słów kluczowych to *sustainable construction* lub *sustainable building* lub *built environment* i *concrete* lub *cement* lub *sustainable concrete* lub *concrete construction*.

Dane nie podlegały dodatkowym ograniczeniom, gdyż posłużył wyłącznie do zobrazowania skali wzrostu liczby publikacji, a nie szczegółowych analiz.

2. Mapa powiązań słów kluczowych (rys. 1.3)

Do wykonania mapy powiązań słów kluczowych wykorzystano dane analogiczne jak dla serii „Zrównoważone budownictwo betonowe". Do wykonania mapy wykorzystano moduł Co-occurrence w programie Vosviewer. Mapa powstała na bazie danych z 5013 indeksowanych dokumentów. Słowa kluczowe zostały przetworzone z wykorzystaniem programu OpenRefine przez połączenie synonimów i skrótów oraz ujednolicenie odmiany i liczb mnogich w wyniku czego uzyskano 9133 niepowtarzalnych słów kluczowych. W celu uzyskania czytelnej mapy współwystępowania słów kluczowych jako minimum liczby wystąpień (wartość poniżej, której słowa kluczowe nie są uwzględniane w analizie) przyjęto wartość 30, uzyskując tym samym serię 65 słów kluczowych posiadających wzajemne powiązania.

Załącznik 2
Kalkulacja wartości kosztorysowej W_k dla jednego z rozpatrywanych wariantów konstrukcyjno-materiałowych – wariant W-1 M1 – NSC 30/37

Stawka roboczogodziny: 45,70 zł

NARZUTY

Koszty pośrednie [Kp]: 71,00 % R+S
Zysk [Z]: 14,00 % R+S+Kp(R+S)

Lp.	Podstawa	Opis	jm	Koszt jednostkowy
1		**Faza A**		
1.1		**Słupy żelbetowe C30/37**		
1 d.1.1	KNR 2-02 0290-02	Przygotowanie i montaż zbrojenia elementów budynków i budowli – pręty żebrowane przedmiar = 3,936 t	t	
1*		-- R -- robocizna 42,88 rg/t · 45,70 zł/rg	rg	1 959,616
2*		-- M -- pręty żebrowane 8–14 mm 1,02 t/t · 4070,00 zł/t	t	4 151,400
3*		materiały pomocnicze 1,5% (od M)	%	62,271
4*		-- S -- prościarka do prętów 4,3 mg/t · 7,50 zł/mg	mg	32,250
5*		nożyce do prętów 5,8 mg/t · 9,68 zł/mg	mg	56,144
6*		giętarka do prętów 4,8 mg/t · 9,14 zł/mg	mg	43,872
7*		wyciąg 0,8 mg/t · 24,15 zł/mg	mg	19,320
8*		środek transportowy 1,6 mg/t · 175,76 zł/mg	mg	281,216
Razem koszty bezpośrednie: Razem z narzutami: Cena jednostkowa:		26 001,57 34 941,64 8 877,45		6 606,089 8 877,450

2 d.1.1	KNR 0-20 0269-04 analogia	Słupy żelbetowe o wys. do 4 m i stosunku deskowanego obwodu do przekroju do 10 w deskowaniu PERI „TRIO” wariant II (transport betonu pompą) przedmiar = 72,540 m^3	m^3	
1*		-- R -- robocizna 7,4217 rg/m^3 · 45,70 zł/rg	rg	339,172
2*		-- M -- beton C30/37 1,02 m^3/m^3 · 462,67 zł/m^3	m^3	471,923
3*		środek antyadhezyjny 1,16 kg/m^3 · 8,88 zł/kg	kg	10,301
4*		materiały pomocnicze 1,5% (od M)	%	7,233
5*		-- S -- deskowanie PERI „TRIO” kpl. 2,453 mg/m^3 · 0,50 zł/mg	mg	1,227
6*		żuraw wieżowy torowy 0,212 mg/m^3 · 115,09 zł/mg	mg	24,399
7*		środek transportowy 0,558 mg/m^3 · 175,76 zł/mg	mg	98,074
8*		pompa do betonu na samochodzie 0,1195 mg/m^3 · 348,41 zł/mg	mg	41,635
9*		wibrator 0,42 mg/m^3 · 7,94 zł/mg	mg	3,335
Razem koszty bezpośrednie: Razem z narzutami: Cena jednostkowa:		72 344,06 107 318,58 1 479,44		997,299 1 479,440
3 d.1.1	wycena indywidualna	Wynajem deskowań przedmiar = 217,620 m^2	m^2	
1*		-- S -- deskowanie PERI „TRIO” kpl. 100 mg/m^2 · 0,50 zł/mg	mg	50,000
Razem koszty bezpośrednie: Razem z narzutami: Cena jednostkowa:		10 881,00 21 211,42 97,47		50,000 97,470
Razem dział: Słupy żelbetowe C30/37 Razem koszty bezpośrednie: Razem z narzutami:				 109 226,63 163 471,64

1.2		**Trzony żelbetowe C30/37**		
4 d.1.2	KNR 2-02 0290-02	Przygotowanie i montaż zbrojenia elementów budynków i budowli – pręty żebrowane o śr. 8–14 mm przedmiar = 2,796 t	t	
1*		-- R -- robocizna 42,88 rg/t · 45,70 zł/rg	rg	1 959,616
2*		-- M -- pręty żebrowane 8–14 mm 1,02 t/t · 4070,00 zł/t	t	4 151,400
3*		materiały pomocnicze 1,5% (od M)	%	62,271

Lp.	Podstawa	Opis	jm	Koszt jednostkowy
		-- S --		
4*		prościarka do prętów 4,3 mg/t · 7,50 zł/mg	mg	32,250
5*		nożyce do prętów 5,8 mg/t · 9,68 zł/mg	mg	56,144
6*		giętarka do prętów 4,8 mg/t · 9,14 zł/mg	mg	43,872
7*		wyciąg 0,8 mg/t · 24,15 zł/mg	mg	19,320
8*		środek transportowy 1,6 mg/t · 175,76 zł/mg	mg	281,216
Razem koszty bezpośrednie: Razem z narzutami: Cena jednostkowa:		18 470,63 24 821,35 8 877,45		6 606,089 8 877,450
5 d.1.2	KNR 0-20 0267-01 0267-03 analogia	Ściany żelbetowe o gr. 30 cm i wys. do 4 m w deskowaniu PERI „TRIO" wariant II (transport betonu pompą) przedmiar = 313,200 m^2	m^2	
		-- R --		
1*		robocizna 1,8028 rg/m^2 · 45,70 zł/rg	rg	82,388
		-- M --		
2*		beton C30/37 0,1015 + 23 · 0,01015 = 0,33495 m^3/m^2 · 462,67 zł/m^3	m^3	154,971
3*		bale iglaste obrzynane kl. II 0,00018 m^3/m^2 · 1406,79 zł/m^3	m^3	0,253
4*		środek antyadhezyjny 0,2 kg/m^2 · 8,88 zł/kg	kg	1,776
5*		materiały pomocnicze 1,5% (od M)	%	2,355
		-- S --		
6*		deskowanie PERI „TRIO" kpl. 0,5369 + 20 · 0,0009 = 0,5549 mg/m^2 · 0,50 zł/mg	mg	0,277
7*		żuraw wieżowy torowy 0,0286 mg/m^2 · 115,09 zł/mg	mg	3,292
8*		środek transportowy 0,046 mg/m^2 · 175,76 zł/mg	mg	8,085
9*		wibrator 0,04 + 20 · 0,0022 = 0,084 mg/m^2 · 7,94 zł/mg	mg	0,667
10*		pompa do betonu na samochodzie 0,024 + 20 · 0,0017 = 0,058 mg/m^2 · 348,41 zł/mg	mg	20,208
Razem koszty bezpośrednie: Razem z narzutami: Cena jednostkowa:		85 901,99 120 071,48 383,37		274,272 383,370
6 d.1.2	wycena indywidualna	Wynajem deskowań przedmiar = 626,400 m^2	m^2	
		-- S --		
1*		deskowanie PERI „TRIO" kpl. 100 mg/m^2 · 0,50 zł/mg	mg	50,000
Razem koszty bezpośrednie: Razem z narzutami: Cena jednostkowa:		31 320,00 61 055,21 97,47		50,000 97,470

Razem dział: Trzony żelbetowe C30/37	
Razem koszty bezpośrednie:	135 692,62
Razem z narzutami:	205 948,04

1.3		**Płyta żelbetowa C30/37**		
7 d.1.3	KNR 2-02 0290-02	Przygotowanie i montaż zbrojenia elementów budynków i budowli – pręty żebrowane o śr. 8–14 mm przedmiar = 54,790 t	t	
1*		-- R -- robocizna 42,88 rg/t · 45,70 zł/rg	rg	1 959,616
2*		-- M -- pręty żebrowane 8-14 mm 1,02 t/t · 4070,00 zł/t	t	4 151,400
3*		materiały pomocnicze 1,5% (od M)	%	62,271
4*		-- S -- prościarka do prętów 4,3 mg/t · 7,50 zł/mg	mg	32,250
5*		nożyce do prętów 5,8 mg/t · 9,68 zł/mg	mg	56,144
6*		giętarka do prętów 4,8 mg/t · 9,14 zł/mg	mg	43,872
7*		wyciąg 0,8 mg/t · 24,15 zł/mg	mg	19,320
8*		środek transportowy 1,6 mg/t · 175,76 zł/mg	mg	281,216
Razem koszty bezpośrednie: Razem z narzutami: Cena jednostkowa:		361 947,62 486 395,49 8 877,45		6 606,089 8 877,450
8 d.1.3	KNR 0-20 0268-02 0268-04 analogia	Płyta stropowa o gr. 28 cm i pow. między ścianami lub belkami do 10 m^2 w deskowaniu PERI „MULTIFLEX” wariant II (transport betonu pompą) przedmiar = 3 217,500 m^2	m^2	
1*		-- R -- robocizna 1,88201 rg/m^2 · 45,70 zł/rg	rg	86,008
2*		-- M -- beton C30/37 0,102 + 17,4·0,0102 = 0,27948 m^3/m^2 · 462,67 zł/m^3	m^3	129,307
3*		sklejka wodoodporna gr. 22 mm 0,00144 m^3/m^2 · 6010,39 zł/m^3	m^3	8,655
4*		środek antyadhezyjny 0,1 kg/m^2 · 8,88 zł/kg	kg	0,888
5*		materiały pomocnicze 1,5% (od M)	%	2,083
6*		-- S -- deskowanie PERI „MULTIFLEX” kpl. 0,3985 + 18 · 0,0008 = 0,4129 mg/m^2 · 0,17 zł/mg	mg	0,070
7*		żuraw wieżowy torowy 0,0154 mg/m^2 · 115,09 zł/mg	mg	1,772
8*		środek transportowy 0,062 mg/m^2 · 175,76 zł/mg	mg	10,897
9*		wibrator	mg	0,413

Lp.	Podstawa	Opis	jm	Koszt jednostkowy
10*		0,025 + 18 · 0,0015 = 0,052 mg/m^2 · 7,94 zł/mg pompa do betonu na samochodzie 0,0153 + 18 · 0,0014 = 0,0405 mg/m^2 · 348,41 zł/mg	mg	14,111
Razem koszty bezpośrednie: Razem z narzutami: Cena jednostkowa:		817 901,37 1 163 898,45 361,74		254,204 361,740
9 d.1.3	wycena indywidu-alna	Wynajem deskowań przedmiar = 3 217,500 m^2	m^2	
1*		-- S -- deskowanie PERI „MULTIFLEX” kpl. 100 mg/m^2 · 0,17 zł/mg	mg	17,000
Razem koszty bezpośrednie: Razem z narzutami: Cena jednostkowa:		54 697,50 106 627,95 33,14		17,000 33,140
Razem dział: Płyta żelbetowa C30/37 Razem koszty bezpośrednie: Razem z narzutami:				 1 234 546,49 1 756 921,89
Razem dział: Faza A Razem koszty bezpośrednie: Razem z narzutami:				 1 479 465,74 2 126 341,57

2		**Faza C**		
10 d.2	wycena indywidualna	Rozbiórka elementów konstrukcji żelbetowych przedmiar = 1 077,840 m^3	m^3	
Razem koszty bezpośrednie: Razem z narzutami: Cena jednostkowa:		948 499,20 880,00		880,000
11 d.2	wycena indywidualna	Kruszenie gruzu betonowego przedmiar = 1 832,328 t	t	
Razem koszty bezpośrednie: Razem z narzutami: Cena jednostkowa:		36 646,56 20,00		20,000
Razem dział: Faza C Razem koszty bezpośrednie: Razem z narzutami:				 0,00 985 145,76
Wartość kosztorysowa robót bez podatku VAT:				**3 111 487,33**

Tabela elementów scalonych

Lp.	Nazwa	Robocizna	Materiały	Sprzęt	K_p	Z	Uproszczone	Razem
1	Faza A	447 697,70	798 100,58	233 667,46	483 759,80	163 116,03		2 126 341,57
1.1	Słupy żelbetowe C30/37	32 316,59	52 090,21	24 819,83	40 566,63	13 678,38		163 471,64
1.2	Trzony żelbetowe C30/37	31 283,01	61 691,41	42 718,20	52 539,87	17 715,55		205 948,04
1.3	Płyta żelbetowa C30/37	384 098,10	684 318,96	166 129,43	390 653,30	131 722,10		1 756 921,89
2	Faza C	–	–	–	0,00	0,00	985 145,76	985 145,76
	RAZEM	447 697,70	798 100,58	233 667,46	483 759,80	163 116,03	985 145,76	3 111 487,33

Podsumowanie tabelaryczne przeprowadzonych kalkulacji

Zakres robót	Składniki wartości kosztorysowej [zł]						
	R	M	S	K_p	Z	Uproszczone	Razem
W-1 M1 – NSC 30/37							
1. Faza A	447 697,70	798 100,58	233 667,46	483 7590,80	163 116,03	0,00	2 126 341,57
1.1. Słupy żelbetowe C30/37	32 316,59	52 090,21	24 819,83	40 566,63	13 678,38	0,00	163 471,64
1.2. Trzony żelbetowe C30/37	31 283,01	61 691,41	42 718,20	52 539,87	17 715,55	0,00	205 948,04
1.3. Płyta żelbetowa C30/37	384 098,10	684 318,96	166 129,43	390 653,30	131 722,10	0,00	1 756 921,89
2. Faza C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	985 145,76	985 145,76
Razem	447 697,70	798 100,58	233 667,46	483 759,80	163 116,03	985 145,76	–
Wartość kosztorysowa razem							**3 111 487,33**

Zakres robót	Składniki wartości kosztorysowej [zł]						
	R	***M***	***S***	K_p	***Z***	**Uproszczone**	**Razem**
W-2 M2 – NSC 30/37							
1. Faza A	447 697,70	761 561,49	233 667,46	483 765,42	163 117,98	0,00	2 089 810,05
1.1. Słupy żelbetowe C30/37	32 316,59	49 582,73	24 819,83	40 566,97	13 678,54	0,00	160 964,66
1.2. Trzony żelbetowe C30/37	31 283,01	58 135,96	42 718,20	52 540,34	17 715,71	0,00	202 393,22
1.3. Płyta żelbetowa C30/37	384 098,10	653 842,80	166 129,43	390 658,11	131 723,73	0,00	1 726 452,17
2. Faza C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	985 145,76	985 145,76
Razem	447 697,70	761 561,49	233 667,46	483 765,42	163 117,98	985 145,76	–
Wartość kosztorysowa razem							**3 074 955,81**
W-3 M3 – NSC 30/37							
1. Faza A	447 697,70	803 513,62	233 667,46	483 778,42	163 122,49	0,00	2 131 779,69
1.1. Słupy żelbetowe C30/37	32 316,59	52 461,98	24 819,83	40 566,87	13 678,50	0,00	163 843,77
1.2. Trzony żelbetowe C30/37	31 283,01	62 218,52	42 718,20	52 541,31	17 716,31	0,00	206 477,35
1.3. Płyta żelbetowa C30/37	384 098,10	688 833,12	166 129,43	390 670,24	131 727,68	0,00	1 761 458,57
2. Faza C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	985 145,76	985 145,76
Razem	447 697,70	803 513,62	233 667,46	483 778,42	163 122,49	985 145,76	–
Wartość kosztorysowa razem							**3 116 925,45**
W-4 M4 – NSC 50/60							
1. Faza A	449 389,65	1 067 155,17	227 359,25	480 502,10	162 017,56	0,00	2 386 423,73
1.1. Słupy żelbetowe C50/60	34 322,73	56 432,47	21 511,43	39 642,21	13 366,66	0,00	165 275,50
1.2. Trzony żelbetowe C50/60	31 465,25	94 595,93	42 758,45	52 698,32	17 768,99	0,00	239 286,94
1.3. Płyta żelbetowa C50/60	383 601,67	916 126,77	163 089,37	388 161,57	130 881,91	0,00	1 981 861,29
2. Faza C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	957 895,09	957 895,09
Razem	449 389,65	1 067 155,17	227 359,25	480 502,10	162 017,56	957 895,09	–
Wartość kosztorysowa razem							**3 344 318,82**

W-5 M5 – NSC 50/60							
1. Faza A	449 389,65	935 882,31	227 359,25	480 495,78	162 015,73	0,00	2 255 142,72
1.1. Słupy żelbetowe C50/60	34 322,73	49 053,64	21 511,43	39 642,39	13 366,75	0,00	157 896,94
1.2. Trzony żelbetowe C50/60	31 465,25	80 795,09	42 758,45	52 699,04	17 769,51	0,00	225 487,34
1.3. Płyta żelbetowa C50/60	383 601,67	806 033,58	163 089,37	388 154,35	130 879,47	0,00	1 871 758,44
2. Faza C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	957 895,09	957 895,09
Razem	449 389,65	935 882,31	227 359,25	480 495,78	162 015,73	957 895,09	–
Wartość kosztorysowa razem							**3 213 037,81**
W-6 M6 – NSC 50/60							
1. Faza A	449 389,65	872 181,95	227 359,25	480 505,69	162 019,07	0,00	2 191 455,61
1.1. Słupy żelbetowe C50/60	34 322,73	45 473,18	21 511,43	39 642,44	13 366,76	0,00	154 316,54
1.2. Trzony żelbetowe C50/60	31 465,25	74 098,56	42 758,45	52 699,28	17 769,59	0,00	218 791,13
1.3. Płyta żelbetowa C50/60	383 601,67	752 610,21	163 089,37	388 163,97	130 882,72	0,00	1 818 347,94
2. Faza C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	957 895,09	957 895,09
Razem	449 389,65	872 181,95	227 359,25	480 505,69	162 019,07	957 895,09	–
Wartość kosztorysowa razem							**3 149 350,70**
W-7 M7 – HPC 80/95							
1. Faza A	449 860,50	1 318 899,64	222 030,88	477 051,41	160 854,42	0,00	2 628 696,85
1.1. Słupy żelbetowe C80/95	35 576,11	58 293,88	19 283,09	38 950,08	13 133,32	0,00	165 236,48
1.2. Trzony żelbetowe C80/95	31 545,59	130 682,40	42 776,18	52 768,47	17 792,92	0,00	275 565,56
1.3. Płyta żelbetowa C80/95	382 738,80	1 129 923,36	159 971,61	385 332,86	129 928,18	0,00	2 187 894,81
2. Faza C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	926 541,99	926 541,99
Razem	449 860,50	1 318 899,64	222 030,88	477 051,41	160 854,42	926 541,99	–
Wartość kosztorysowa razem							**3 555 238,84**

Zakres robót	Składniki wartości kosztorysowej [zł]						
	R	***M***	***S***	K_p	***Z***	**Uproszczone**	**Razem**
W-8 M8 – HPC 80/95							
1. Faza A	449 860,50	1 170 965,95	222 030,88	477 053,94	160 855,25	0,00	2 480 766,52
1.1. Słupy żelbetowe C80/95	35 576,11	51 562,27	19 283,09	38 949,97	13 133,27	0,00	158 504,71
1.2. Trzony żelbetowe C80/95	31 545,59	113 775,56	42 776,18	52 768,70	17 792,99	0,00	258 659,02
1.3. Płyta żelbetowa C80/95	382 738,80	1 005 628,12	159 971,61	385 335,27	129 928,99	0,00	2 063 602,79
2. Faza C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	926 541,99	926 541,99
Razem	449 860,50	1 170 965,95	222 030,88	477 053,94	160 855,25	926 541,99	–
Wartość kosztorysowa razem							**3 407 308,51**
W-9 M9 – SCC 30/37							
1. Faza A	447 697,70	826 342,65	231 887,81	482 508,67	162 693,06	0,00	2 151 129,89
1.1. Słupy żelbetowe C30/37	32 316,59	54 028,64	24 577,91	40 395,35	13 620,63	0,00	164 939,12
1.2. Trzony żelbetowe C30/37	31 283,01	64 439,73	42 509,30	52 392,65	17 666,09	0,00	208 290,78
1.3. Płyta żelbetowa C30/37	384 098,10	707 874,28	164 800,60	389 720,67	131 406,34	0,00	1 777 899,99
2. Faza C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	985 145,76	985 145,76
Razem	447 697,70	826 342,65	231 887,81	482 508,67	162 693,06	985 145,76	–
Wartość kosztorysowa razem							**3 136 275,65**
W-10 M10 – SCC 30/37							
1. Faza A	447 697,70	787 704,34	231 887,81	482 499,40	162 690,83	0,00	2 112 480,08
1.1. Słupy żelbetowe C30/37	32 316,59	51 376,78	24 577,91	40 395,20	13 620,58	0,00	162 287,06
1.2. Trzony żelbetowe C30/37	31 283,01	60 679,76	42 509,30	52 393,82	17 666,49	0,00	204 532,38
1.3. Płyta żelbetowa C30/37	384 098,10	675 647,80	164 800,60	389 710,38	131 403,76	0,00	1 745 660,64
2. Faza C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	985 145,76	985 145,76
Razem	447 697,70	787 704,34	231 887,81	482 499,40	162 690,83	985 145,76	–
Wartość kosztorysowa razem							**3 097 625,84**

W-11 M11 – SCC 30/37							
1. Faza A	447 697,70	826 103,45	231 887,81	482 513,54	162 695,74	0,00	2 150 898,24
1.1. Słupy żelbetowe C30/37	32 316,59	54 012,09	24 577,91	40 395,25	13 620,60	0,00	164 922,44
1.2. Trzony żelbetowe C30/37	31 283,01	64 416,56	42 509,30	52 393,58	17 666,41	0,00	208 268,86
1.3. Płyta żelbetowa C30/37	384 098,10	707 674,80	164 800,60	389 724,71	131 408,73	0,00	1 777 706,94
2. Faza C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	985 145,76	985 145,76
Razem	447 697,70	826 103,45	231 887,81	482 513,54	162 695,74	985 145,76	–
Wartość kosztorysowa razem							**3 136 044,00**
W-12 M12 – SCC 50/60							
1. Faza A	449 389,65	952 229,49	225 702,26	479 313,09	161 617,39	0,00	2 268 251,88
1.1. Słupy żelbetowe C50/60	34 322,73	49 972,52	21 314,95	39 502,70	13 319,64	0,00	158 432,54
1.2. Trzony żelbetowe C50/60	31 465,25	82 513,62	42 549,55	52 551,55	17 719,68	0,00	226 799,65
1.3. Płyta żelbetowa C50/60	383 601,67	819 743,35	161 837,76	387 258,84	130 578,07	0,00	1 883 019,69
2. Faza C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	957 895,09	957 895,09
Razem	449 389,65	952 229,49	225 702,26	479 313,09	161 617,39	957 895,09	–
Wartość kosztorysowa razem							**3 226 146,97**
W-13 M13 – SCC 50/60							
1. Faza A	449 389,65	910 450,13	225 702,26	479 311,69	161 616,77	0,00	2 226 470,50
1.1. Słupy żelbetowe C50/60	34 322,73	47 624,05	21 314,95	39 502,59	13 319,60	0,00	156 083,92
1.2. Trzony żelbetowe C50/60	31 465,25	78 121,31	42 549,55	52 550,26	17 719,09	0,00	222 405,46
1.3. Płyta żelbetowa C50/60	383 601,67	784 704,77	161 837,76	387 258,84	130 578,08	0,00	1 847 981,12
2. Faza C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	957 895,09	957 895,09
Razem	449 389,65	910 450,13	225 702,26	479 311,69	161 616,77	957 895,09	–
Wartość kosztorysowa razem							**3 184 365,59**

Zakres robót	Składniki wartości kosztorysowej [zł]						
	R	***M***	***S***	K_p	***Z***	**Uproszczone**	**Razem**
W-14 M14 – SCC 50/60							
1. Faza A	449 389,65	881 400,77	225 702,26	479 316,88	161 618,11	0,00	2 197 427,67
1.1. Słupy żelbetowe C50/60	34 322,73	45 991,30	21 314,95	39 502,67	13 319,62	0,00	154 451,27
1.2. Trzony żelbetowe C50/60	31 465,25	75 067,61	42 549,55	52 550,26	17 719,09	0,00	219 351,76
1.3. Płyta żelbetowa C50/60	383 601,67	760 341,86	161 837,76	387 263,95	130 579,40	0,00	1 823 624,64
2. Faza C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	957 895,09	957 895,09
Razem	449 389,65	881 400,77	225 702,26	479 316,88	161 618,11	957 895,09	–
Wartość kosztorysowa razem							**3 155 322,76**
W-15 M15 – HPSCC 80/95							
1. Faza A	449 860,50	1 114 649,69	220 449,27	475 924,94	160 475,63	0,00	2 421 360,03
1.1. Słupy żelbetowe C80/95	35 576,11	48 999,46	19 084,77	38 809,31	13 085,84	0,00	155 555,49
1.2. Trzony żelbetowe C80/95	31 545,59	107 338,67	42 567,28	52 620,98	17 743,08	0,00	251 815,60
1.3. Płyta żelbetowa C80/95	382 738,80	958 311,56	158 797,22	384 494,65	129 646,71	0,00	2 013 988,94
2. Faza C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	926 541,99	926 541,99
Razem	449 860,50	1 114 649,69	220 449,27	475 924,94	160 475,63	926 541,99	–
Wartość kosztorysowa razem							**3 347 902,02**
W-16 M16 – HPSCC 80/95							
1. Faza A	449 860,50	1 011 593,08	220 449,27	475 928,52	160 476,69	0,00	2 318 308,06
1.1. Słupy żelbetowe C80/95	35 576,11	44 310,11	19 084,77	38 809,14	13 085,77	0,00	150 865,90
1.2. Trzony żelbetowe C80/95	31 545,59	95 560,78	42 567,28	52 619,92	17 742,58	0,00	240 036,15
1.3. Płyta żelbetowa C80/95	382 738,80	871 722,19	158 797,22	384 499,46	129 648,34	0,00	1 927 406,01
2. Faza C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	926 541,99	926 541,99
Razem	449 860,50	1 011 593,08	220 449,27	475 928,52	160 476,69	926 541,99	–
Wartość kosztorysowa razem							**3 244 850,05**

ISSN 0867-6631
ISBN 978-83-68219-71-5 (print)
ISBN 978-83-68219-72-2 (PDF)