

mgr inż. Aleksandra Mach¹⁾
ORCID: 0000-0002-7236-2567

Environmental assessment of electric or diesel-powered construction equipment

Ocena środowiskowa sprzętu budowlanego z napędem elektrycznym lub spalinowym

DOI: 10.15199/33.2026.09.18

Abstract. This paper presents a comparative environmental assessment of diesel- or electric-powered construction equipment under different electricity production structures. The results show that the environmental benefits of electrification depend on the electricity production structure and machinery efficiency. The sensitivity analysis showed a significant effect of the assumed electricity demand conversion factor on the assessment results.

Keywords: construction equipment; electrification; environmental assessment; sustainability.

In recent years, increasing emphasis has been placed on reducing the negative environmental impact of the construction sector, as reflected both in regulatory requirements and industry practices. Construction activities are associated with emissions resulting from the use of materials, transportation, and energy consumption. One of the sources of environmental impacts is construction equipment classified as non-road mobile machinery (NRMM). Depending on the type of construction activity, the contribution of emissions associated with the operation of construction machinery varies, with particularly high impacts observed in earthworks and foundation works [1]. At the same time, diesel-powered machinery, based on the use of diesel fuel, remains the dominant type of propulsion in the construction equipment sector [2].

Increasing regulatory requirements and the development of electric propulsion technologies are driving growing interest in the transformation of construction equipment fleets toward low-emission solutions. Unlike in previous years, electric construction equipment is no longer merely a theoretical concept but is becoming increasingly available on the market. Based on the database of electric construction equipment maintained by [3] machines were grouped according to their intended applications. This made it possible to characterize the current structure of the electric construction equipment fleet (Figure 1), taking into account the number of available models and manufacturers. The analysis indicates that the greatest availability is observed for equipment used in earthworks as well as in transport and loading operations. At the same time, the emergence of the first electric solutions in the foundation and geotechnical works segment,

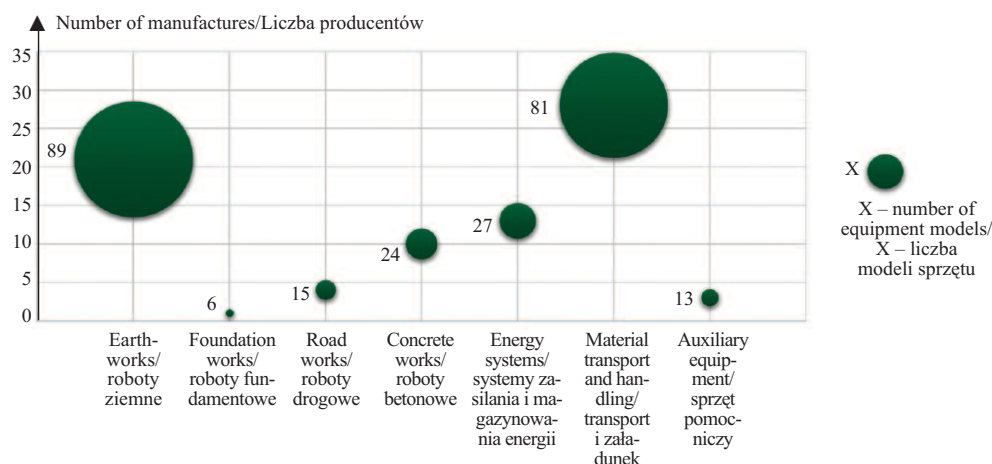
Streszczenie. Artykuł przedstawia porównawczą ocenę środowiskową pracy sprzętu budowlanego z napędem spalinowym lub elektrycznym z uwzględnieniem różnych struktur produkcji energii elektrycznej. Wyniki wskazują, że korzyści środowiskowe elektryfikacji zależą od struktury wytwarzania energii oraz efektywności pracy maszyn. Analiza wrażliwości wykazała istotny wpływ na wyniki oceny przyjętego przelicznika zapotrzebowania na energię elektryczną.

Słowa kluczowe: sprzęt budowlany; elektryfikacja; ocena środowiskowa; zrównoważony rozwój.

W ostatnich latach obserwuje się coraz silniejszy nacisk na ograniczanie negatywnego wpływu sektora budownictwa na środowisko naturalne, co znajduje odzwierciedlenie zarówno w regulacjach prawnych, jak i w praktykach branżowych. Proces realizacji robót budowlanych wiąże się z emisjami wynikającymi z wykorzystania materiałów, transportu oraz zużycia energii. Jednym ze źródeł oddziaływań środowiskowych jest sprzęt budowlany zaliczany do kategorii NRMM (ang. non-road mobile machinery). W zależności od rodzaju realizowanych prac udział emisji związanych z eksploatacją maszyn budowlanych jest zróżnicowany, przy czym jego szczególnie duży wpływ obserwuje się w przypadku robót ziemnych i fundamentowych [1]. Jednocześnie dominującym sposobem zasilania sprzętu budowlanego pozostaje napęd wysokoprężny z wykorzystaniem oleju napędowego [2].

Zwiększające się wymagania regulacyjne oraz rozwój technologii napędów elektrycznych prowadzą do coraz większego zainteresowania transformacją parku maszynowego w kierunku rozwiązań niskoemisyjnych. W przeciwieństwie do lat wcześniejszych, elektryczny sprzęt budowlany nie stanowi już jedynie koncepcji teoretycznej, lecz jest coraz szerzej dostępny jako rozwiązanie rynkowe. Na podstawie ewidencji sprzętu elektrycznego prowadzonej przez [3] dokonano agregacji maszyn wg sposobu ich wykorzystania. Pozwoliło to na przedstawienie dostępnej struktury elektrycznego parku maszynowego (rysunek 1), uwzględniającej liczbę modeli oraz producentów sprzętu budowlanego. Analiza wskazuje, że największa dostępność dotyczy sprzętu wykorzystywanego w robotach ziemnych oraz w procesach transportu i załadunku. Pojawienie się pierwszych rozwiązań w segmencie robót fundamentowych (geotechnicznych), mimo ich wysokich wymagań energetycznych, sugeruje, że elektryfikacja może

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



Earthworks: excavators; backhoe loaders; mini excavators; rammers; plate compactors. **Foundation works:** piling rigs; slurry wall equipment; drilling rigs. **Road construction:** asphalt pavers; road pavers; rollers. **Concrete works:** mixers; truck mixers; concrete pumps; vibrators; trowels. **Energy systems:** generators; hydrogen generators, etc. **Transport and handling:** loaders; material handling equipment; skid steer loaders; lifts; forklifts; dumpers; cranes. **Auxiliary equipment:** light towers; air compressors. **Roboty ziemne:** koparki; koparko-ladowarki; minikoparki; ubijaki; zagęszczarki płytowe. **Roboty fundamentowe:** palownice; sprzęt do ścian szczelinowych; wiertnice. **Roboty drogowe:** rozścielacze; układarki; walce. **Roboty betonowe:** betoniarki; betonowozy; pompy do betonu; wibratory; zacieraczki. **Systemy zasilania i magazynowania energii:** agregaty; generatory wodoru itp. **Transport i załadunek:** ladowarki; maszyny przeładunkowe; miniładowarki; podnośniki; wózki widłowe; wozidła; żurawie. **Sprzęt pomocniczy:** maszyny oświetleniowe; sprzętarki

Fig. 1. Variation in the availability of electric construction equipment across different functional groups *Fig. own elaboration based on [3]*
Rys. 1. Zróżnicowanie dostępności elektrycznego sprzętu budowlanego w zależności od jego przeznaczenia *Rys. opracowano na podstawie [3]*

despite the high energy requirements of such applications, suggests that electrification may also be gradually introduced for more energy-intensive construction machinery.

Previous studies on the electrification of construction equipment have often focused primarily on carbon footprint assessment [4], whereas multicriteria environmental assessments have been conducted less frequently. The literature also highlights the need to extend such analyses to different electricity generation structures [5]. However, the number of studies combining multicriteria environmental assessment with a comparison of different electricity systems remains limited. To address this research gap, a diesel-powered scenario was compared with five electric power supply scenarios, considering 16 environmental impact categories and a sensitivity analysis of the results to the assumed energy conversion factor.

Materials and methods

The analysis was conducted for six construction equipment power supply scenarios. Five of them involved electric machines powered by electricity generated under different electricity production structures, while one scenario referred to diesel-powered machines using diesel fuel. The scope of the analysis was limited to environmental impacts associated with the energy source used to operate the machinery. For the electric scenarios, impacts related to electricity generation were included, while no direct emissions were assumed during machine operation, as such emissions do not occur at the point of use. For the diesel scenario, both diesel fuel production and emissions generated during fuel combustion in the engine were taken into account. The production, maintenance, and end-of-life stages of the construction equipment itself were excluded from the analysis, including battery production, replacement, and disposal in the electric scenarios. Inclusion

być stopniowo wdrażana także w przypadku bardziej wymagających maszyn budowlanych.

Dotychczasowe badania nad elektryfikacją sprzętu budowlanego często koncentrują się przede wszystkim na śladzie węglowym [4], natomiast wielokryterialne oceny środowiskowe są wykonywane rzadziej. W literaturze wskazuje się również potrzebę rozszerzenia analiz na różne struktury wytwarzania energii elektrycznej [5]. Nadal ograniczona jest liczba badań łączących wielokryterialną ocenę środowiskową z porównaniem zróżnicowanych systemów energetycznych. W odpowiedzi na tę lukę porównano wariant spalinywy z pięcioma scenariuszami zasilania elektrycznego, uwzględniając 16 kategorii wpływu środowiskowego oraz ocenę wrażliwości wyników na przyjęty przelicznik energetyczny.

Materiały i metody analizy

Przeprowadzono analizę sześciu wariantów zasilania sprzętu budowlanego. Pięć z nich dotyczyło maszyn elektrycznych zasilanych energią elektryczną, pochodzącą z różnych struktur wytwarzania, natomiast jeden scenariusz odnosił się do maszyn spalinowych zasilanych olejem napędowym. Zakres analizy ograniczono do oddziaływań środowiskowych związanych ze źródłem zasilania wykorzystywanym do pracy maszyn. W wariantach elektrycznych uwzględniono oddziaływanie wynikające z wytworzenia energii elektrycznej, bez emisji bezpośrednich na etapie pracy maszyn (nie występują). W wariantach spalinowych uwzględniono produkcję oleju napędowego oraz emisje powstające podczas jego spalania w silniku. Poza zakresem analizy pozostawiono produkcję, obsługę techniczną oraz koniec życia sprzętu budowlanego, w tym produkcję, wymianę i utylizację baterii w wariantach elektrycznych. Uwzględnienie tych procesów wy-

of these processes would require assumptions specific to the particular type and configuration of the equipment.

The electric scenarios were developed based on electricity production mix data for selected European countries, representing the shares of individual energy sources in electricity generation. The selected countries allowed different energy systems to be represented, including systems dominated by renewable energy sources (RE), nuclear power (NO), fossil fuels (FO), and systems with a mixed generation structure. The following scenarios for 2022 and 2024 were included in the analysis (Figure 2): Austria (AT, 2024) – a system dominated by renewable energy sources; France (FR, 2024) – a system based predominantly on nuclear power; Slovenia (SI, 2024) – a system characterized by a diversified electricity generation structure; Poland (PL, 2022) – a system with a high share of fossil fuels; Poland (PL, 2024) – a system with a high share of fossil fuels.

Two scenarios for Poland were included to demonstrate how changes in the shares of individual energy sources in electricity generation affect the results of the environmental assessment. Electricity production mix data were compiled based on data provided by the Association of Issuing Bodies (AIB) [6]. Pollutant emissions generated by NRMM in the European Union are regulated under the Stage emission standards, which define permissible emission levels depending on engine power and fuel type. The system comprises successive stages of increasingly stringent emission requirements, with Stage V currently representing the most advanced level. In the diesel scenario, direct emissions resulting from diesel fuel combustion were modelled based on European Environment Agency (EEA) inventory data for NRMM, following the Tier 2 approach [2].

The comparative analysis was conducted assuming equivalent operational performance of electric machines and their diesel-powered counterparts. To ensure comparability between the scenarios, a reference unit corresponding to the operation of a diesel-powered machine associated with the consumption of 1 litre of diesel fuel was adopted. For the electric scenarios, a conversion factor was applied to determine the amount of electricity required to perform an equivalent amount of work. A baseline value of 4.0 kWh of electricity per 1 litre of diesel fuel was adopted based on literature data [7]. This value does not represent the physical energy equivalent of the chemical energy contained in the fuel, but rather an approximation of the relationship between energy consumption by electric and diesel-powered machines when performing a comparable amount of work.

The environmental analysis was conducted using LCA for Experts software. For the analyzed power supply scenarios, environmental models were developed based on AIB data on electricity generation structures, EEA emission data for

magaloby przyjęcia założeń specyficznych dotyczących konkretnego typu i konfiguracji sprzętu.

Scenariusze elektryczne opracowano na podstawie danych production mix z wybranych krajów europejskich, czyli udziału poszczególnych źródeł w produkcji energii elektrycznej. Dóbr krajów pozwolił uwzględnić zróżnicowane systemy energetyczne: o dominującym udziale odnawialnych źródeł energii (ang. *renewable energy* – RE); energetyki jądrowej (ang. *nuclear* – NO); paliw kopalnych (ang. *fossil fuels* – FO) oraz o strukturze mieszanej. W analizie uwzględniono następujące warianty dotyczące lat 2022 i 2024 (rysunek 2): Austria (AT, 2024) – system o dominującym udziale odnawialnych źródeł energii; Francja (FR, 2024) – system oparty głównie na energetyce jądrowej; Słowenia (SI, 2024) – system o zdywersyfikowanej strukturze wytwarzania energii elektrycznej; Polska (PL, 2022) – system o dużym udziale paliw kopalnych; Polska (PL, 2024) – system o dużym udziale paliw kopalnych.

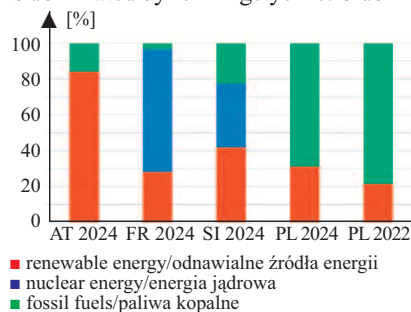


Fig. 2. Structure of the electricity mix for the analyzed scenarios

Fig. own elaboration based on [6]

Rys. 2. Struktura mixu energetycznego w przypadku analizowanych wariantów

Rys. opracowano na podstawie [6]

Dwa scenariusze dotyczące Polski uwzględniono dlatego, aby pokazać, jak zmiany udziału poszczególnych źródeł w produkcji energii elektrycznej wpływają na wyniki oceny środowiskowej. Dane dotyczące production mix opracowano na podstawie danych z Association of Issuing Bodies (AIB) [6]. Emisje zanieczyszczeń generowane przez maszyny NRMM w Unii Europejskiej regulowane są w ramach systemu norm emisyjnych Stage, określających dopuszczalne poziomy emisji w zależności od mocy silnika oraz rodzaju stosowanego paliwa. System ten obejmuje kolejne etapy zastrzania wymagań emisyjnych, a Stage V stanowi obecnie najbardziej zaawansowany poziom tych wymagań. W scenariuszu spalinowym emisje bezpośrednie ze spalania oleju napędowego odwzorowano na podstawie danych inwentaryzacyjnych EEA (ang. *European Environment Agency*) dotyczących maszyn NRMM, zgodnych z podejściem Tier 2 [2].

Analiza porównawcza została przeprowadzona przy założeniu równoważnej wydajności operacyjnej maszyn elektrycznych i ich odpowiedników z napędem spalinowym. W celu zapewnienia porównywalności wariantów przyjęto jednostkę odniesienia odpowiadającą pracy maszyny spalinowej związanej z zużyciem 1 litra oleju napędowego. W przypadku wariantów elektrycznych zastosowano przelicznik określający zapotrzebowanie na energię elektryczną niezbędną do wykonania pracy równoważnej. Wartość bazową 4,0 kWh energii elektrycznej na 1 litr oleju napędowego przyjęto na podstawie danych literaturowych [7]. Nie jest ona fizycznym ekwiwalentem energii chemicznej zawartej w paliwie, lecz przybliżeniem relacji między zużyciem energii w maszynie elektrycznej i spalinowej przy założeniu wykonania porównywalnego zakresu pracy maszyn.

Analizę środowiskową przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania LCA for Experts. W przypadku analizowanych wariantów zasilania opracowano modele środowiskowe na podstawie danych dotyczących struktury wytwarzania energii elektrycznej AIB, danych emisyjnych dotyczących maszyn

NRMM, and unit processes available in the software databases. On this basis, **environmental indicator values** were determined for the impact categories defined in accordance with the Environmental Footprint (EF) method and presented in Table 1. These categories provide a quantitative representation of different aspects of environmental impact, including issues such as climate change, acidification, and eutrophication [8].

Table 1. Core environmental indicators and weight based on EN 15804+A2 [9] and reports [10, 11]

Tabela 1. Podstawowe wskaźniki środowiskowe i ich wagi wg normy EN 15804+A2 [9] oraz raportów [10, 11]

Impact category (indicator)/Kategoria wpływu k (wskaźnik)	Normalization factors R_k /Normalizacja R_k	Unit/Jednostka	Weighting factors w_k /Waga w_k
Climate change – total (GWP – total)/Zmiana klimatu – ogółem/ślad węglowy (GWP – total)	$7,55 \times 10^3$	kg CO ₂ eq./person/osobę	$2,11 \times 10^{-1}$
Ozone depletion (ODP)/Zubożenie warstwy ozonowej (ODP)	$5,23 \times 10^{-2}$	kg CFC-11 eq./person/osobę	$6,31 \times 10^{-2}$
Acidification (AP)/Zakwaszenie (AP)	$5,56 \times 10^1$	mol H ⁺ eq./person/osobę	$6,20 \times 10^{-2}$
Eutrophication aquatic freshwater (EP – freshwater)/Eutrofizacja wód słodkich (EP – freshwater)	$1,61 \times 10^0$	kg P eq./person/osobę	$2,80 \times 10^{-2}$
Eutrophication aquatic marine (EP – marine)/Eutrofizacja wód morskich (EP – marine)	$1,95 \times 10^1$	kg N eq./person/osobę	$2,96 \times 10^{-2}$
Eutrophication terrestrial (EP – terrestrial)/Eutrofizacja lądowa (EP – terrestrial)	$1,77 \times 10^2$	mol N eq./person/osobę	$3,71 \times 10^{-2}$
Photochemical ozone formation (POCP)/Tworzenie ozonu fotochemicznego (POCP)	$4,09 \times 10^1$	kg NMVOC eq./person/osobę	$4,78 \times 10^{-2}$
Depletion of abiotic resources – minerals and metals (ADP – minerals & metals)/Zubożenie zasobów abiotycznych – minerały i metale (ADP – minerals & metals)	$6,36 \times 10^{-2}$	kg Sb eq./person/osobę	$7,55 \times 10^{-2}$
Depletion of abiotic resources – fossil fuels (ADP – fossil)/Zubożenie zasobów abiotycznych – paliwa kopalne (ADP – fossil)	$6,50 \times 10^4$	MJ/person/osobę	$8,32 \times 10^{-2}$
Water use (WDP)/Zużycie wody (WDP)	$1,15 \times 10^4$	m ³ water eq of deprived water/person/ m ³ ekwiwalentu zużytej wody/osobę	$8,51 \times 10^{-2}$
Particulate matter emissions (PM)/Emisja pyłów zawieszonych (PM)	$5,95 \times 10^{-4}$	disease incidences/person/ liczba przypadków chorób/osobę	$8,96 \times 10^{-2}$
Ionizing radiation, human health (IRP)/Promieniowanie jonizujące – wpływ na zdrowie ludzi (IRP)	$4,22 \times 10^3$	kBq U-235 eq./person/osobę	$5,01 \times 10^{-2}$
Eco – toxicity (freshwater) (ETP – fw)/Ekotoksyczność (woda słodka) (ETP – fw)	$5,67 \times 10^4$	CTUe/person/osobę	$1,92 \times 10^{-2}$
Human toxicity, cancer effects (HTP-c)/Toksyczność dla ludzi, efekty rakotwórcze (HTP-c)	$1,73 \times 10^{-5}$	CTUh/person/osobę	$2,13 \times 10^{-2}$
Human toxicity, non-cancer effects (HTP-nc)/Toksyczność dla ludzi, efekty nierakotwórcze (HTP-nc)	$1,29 \times 10^{-4}$	CTUh/person/osobę	$1,84 \times 10^{-2}$
Land use-related impacts/soil quality (SQP)/Wpływ na użytkowanie gruntów i jakość gleby (SQP)	$8,19 \times 10^5$	dimensionless/person/ bezwymiarowy/osobę	$7,94 \times 10^{-2}$

The obtained results were subjected to normalization and weighting, which **enabled the calculation of an aggregated environmental indicator** (Equation 1), expressed as the EcoPoint value. A higher indicator value corresponds to a greater negative environmental impact.

$$\text{EcoPoint} = \sum_k E_k = \sum_k (N_k \cdot w_k) = \sum_k ((S_k/R_k) \cdot w_k) \quad (1)$$

where:

k – impact category;

N_k – normalized result;

w_k – weighting factor assigned to impact category k;

S_k – value characterizing the environmental impact;

R_k – reference value.

Due to variations in the actual energy efficiency of electric machines, depending, among other factors, on equipment type, operating conditions, and load level, a sensitivity analysis was conducted for different values of the electricity demand conversion factor. The adopted conversion factors of 4.0, 4.3, 5.0, and 5.4 kWh per 1 litre of diesel fuel were determined based on data declared by manufacturers [12].

NRMM opracowanych przez EEA oraz procesów jednostkowych dostępnych w bazach danych programu. Na tej podstawie **wyznaczono wartości wskaźników środowiskowych** w kategoriach wpływu zgodnych z metodą Environmental Footprint (EF), przedstawionych w tabeli 1. Kategorie te stanowią ilościową reprezentację różnych aspektów oddziaływania na środowisko, odnosząc się m.in. do takich problemów, jak zmiany klimatu, zakwaszenie i eutrofizacja [8].

Uzyskane wyniki poddano procesowi normalizacji oraz ważenia, co umożliwiło **wyznaczenie zagregowanego wskaźnika środowiskowego** (wzór 1), określanego jako wartość EcoPoint. Im wyższa wartość wskaźnika, tym większy negatywny wpływ na środowisko.

$$\text{EcoPoint} = \sum_k E_k = \sum_k (N_k \cdot w_k) = \sum_k ((S_k/R_k) \cdot w_k) \quad (1)$$

gdzie:

k – kategoria wpływu;

N_k – wynik znormalizowany;

w_k – współczynnik wagowy przypisany kategorii wpływu k;

S_k – wartość charakteryzująca oddziaływanie środowiskowe;

R_k – wartość odniesienia.

Ze względu na zróżnicowanie rzeczywistej efektywności energetycznej maszyn elektrycznych, zależne m.in. od typu sprzętu, warunków pracy i poziomu obciążenia, przeprowadzono analizę wrażliwości w przypadku różnych wartości przelicznika zapotrzebowania na energię elektryczną. Przyjęte wartości przelicznika, wynoszące: 4,0; 4,3; 5,0 oraz 5,4 kWh na 1 litr oleju napędowego, określono na podstawie

This analysis made it possible to assess the influence of the assumption regarding equivalent machine performance on the final environmental results.

Results

The analysis of the aggregated EcoPoint indicator (Table 2) enabled the analyzed scenarios to be ranked in terms of their overall environmental impact. The lowest value was obtained for the AT 2024 scenario, whereas the highest value was observed for the Stage V scenario.

The differences among the electric scenarios were pronounced and depended on the structure of the electricity production mix. The lowest EcoPoint value was obtained for the AT 2024 scenario, representing a system dominated by renewable energy sources. This value was approximately 83 – 86% lower than those obtained for the PL 2024 and PL 2022 scenarios, which were characterized by a high share of fossil fuels. The FR 2024 and SI 2024 scenarios achieved similar values, approximately 43 – 54% lower than those of the scenarios with a high share of fossil fuels. The difference of approximately 15% between PL 2022 and PL 2024 indicates that even a partial shift in the electricity generation structure toward sources other than fossil fuels may lead to a noticeable change in environmental results. The results confirm that the electrification of construction equipment can reduce environmental impacts; however, the magnitude of these benefits depends on the characteristics of the electricity generation system used to power the machines.

danych deklarowanych przez producentów [12]. Analiza ta pozwoliła ocenić wpływ przyjętego założenia dotyczącego równoważności pracy maszyn na końcowe wyniki środowiskowe.

Wyniki analizy

Analiza zagregowanego wskaźnika EcoPoint (tabela 2) pozwoliła uszeregować rozpatrywane warianty pod względem całkowitego wpływu na środowisko. Najmniejszą wartość uzyskano w przypadku scenariusza AT 2024 reprezentującego system o dominującym udziale odnawialnych źródeł energii, natomiast największą w przypadku wariantu Stage V.

Wartość EcoPoint w przypadku AT 2024 była o 83 – 86% mniejsza w porównaniu ze scenariuszami PL 2024 i PL 2022, bazującymi na dużym udziale paliw kopalnych. Scenariusze FR 2024 i SI 2024 osiągnęły zbliżone wartości. Były one mniejsze o 43 – 54% od scenariuszy o dużym udziale paliw kopalnych. Różnica pomiędzy PL 2022 i PL 2024, wynosząca ok. 15% wskazuje, że nawet częściowa zmiana struktury wytwarzania energii w kierunku źródeł innych niż paliwa kopalne może prowadzić do zauważalnej zmiany wyników środowiskowych. Wyniki potwierdzają, że elektryfikacja sprzętu budowlanego może ograniczać oddziaływania środowiskowe, ale skala tych korzyści zależy od charakterystyki produkcji energii elektrycznej wykorzystywanej do zasilania maszyn.

Należy jednak podkreślić, że wynik zagregowany nie odzwierciedla w pełni zróżnicowania obserwowanego na poziomie poszczególnych kategorii wpływu. Mimo że wariant Stage V uzyskał największą wartość wskaźnika *EcoPoint*, to nie

Table 2. Environmental impact assessment results for the analyzed construction equipment energy scenarios; minimum and maximum values within each row are highlighted in green and orange, respectively

Own elaboration: author

Tabela 2. Wyniki oceny wpływu środowiskowego w przypadku analizowanych wariantów zasilania sprzętu budowlanego; wartości minimalne i maksymalne wyznaczono w obrębie poszczególnych kategorii wpływu (wierszy) i oznaczono odpowiednio kolorem zielonym oraz pomarańczowym

Opracowanie: autorka

	AT 2024	FR 2024	SI 2024	PL 2024	PL 2022	Stage V
GWP-total [kg CO ₂ eq.]	4.18 × 10 ⁻¹	1.18 × 10 ⁻¹	9.82 × 10 ⁻¹	2.69 × 10 ⁰	3.21 × 10 ⁰	3.16 × 10 ⁰
ODP [kg CFC-11 eq.]	2.34 × 10 ⁻¹³	5.77 × 10 ⁻¹¹	4.98 × 10 ⁻¹¹	1.15 × 10 ⁻¹⁰	8.45 × 10 ⁻¹¹	1.47 × 10 ⁻¹³
AP [mol H ⁺ eq.]	5.59 × 10 ⁻⁴	5.50 × 10 ⁻⁴	1.75 × 10 ⁻³	5.07 × 10 ⁻³	6.07 × 10 ⁻³	4.13 × 10 ⁻³
EP-freshwater [kg P eq.]	6.51 × 10 ⁻⁸	6.83 × 10 ⁻⁷	3.77 × 10 ⁻⁷	1.18 × 10 ⁻⁶	1.08 × 10 ⁻⁶	7.92 × 10 ⁻⁶
EP-marine [kg N eq.]	1.75 × 10 ⁻⁴	1.66 × 10 ⁻⁴	4.42 × 10 ⁻⁴	1.15 × 10 ⁻³	1.34 × 10 ⁻³	1.55 × 10 ⁻³
EP-terrestrial [mol N eq.]	1.93 × 10 ⁻³	1.83 × 10 ⁻³	4.86 × 10 ⁻³	1.30 × 10 ⁻²	1.50 × 10 ⁻²	1.63 × 10 ⁻²
POCP [kg NMVOC eq.]	5.72 × 10 ⁻⁴	3.43 × 10 ⁻⁴	1.27 × 10 ⁻³	3.11 × 10 ⁻³	3.65 × 10 ⁻³	4.71 × 10 ⁻³
ADP-minerals & metals [kg Sb eq.]	1.28 × 10 ⁻⁷	1.79 × 10 ⁻⁷	2.24 × 10 ⁻⁷	3.66 × 10 ⁻⁷	2.11 × 10 ⁻⁷	2.26 × 10 ⁻⁷
ADP-fossil [MJ]	5.64 × 10 ⁰	3.09 × 10 ¹	2.60 × 10 ¹	2.88 × 10 ¹	3.35 × 10 ¹	4.08 × 10 ¹
WDP [m ³ water eq.]	1.97 × 10 ⁻²	1.03 × 10 ⁻¹	1.13 × 10 ⁻²	2.16 × 10 ⁻²	2.14 × 10 ⁻²	1.27 × 10 ⁻²
PM [disease incidences]	4.33 × 10 ⁻⁹	4.47 × 10 ⁻⁹	2.48 × 10 ⁻⁸	5.13 × 10 ⁻⁸	6.20 × 10 ⁻⁸	5.76 × 10 ⁻⁸
IRP [kBq U-235 eq.]	8.30 × 10 ⁻⁴	2.66 × 10 ⁰	3.76 × 10 ⁻¹	2.13 × 10 ⁻³	1.92 × 10 ⁻³	8.37 × 10 ⁻³
ETP-fw [CTUe]	1.18 × 10 ⁰	1.60 × 10 ⁰	1.89 × 10 ⁰	8.44 × 10 ⁰	1.03 × 10 ¹	3.51 × 10 ¹
HTP-c [CTUh]	2.07 × 10 ⁻¹⁰	1.69 × 10 ⁻¹⁰	5.89 × 10 ⁻¹¹	3.47 × 10 ⁻¹⁰	2.96 × 10 ⁻¹⁰	8.22 × 10 ⁻¹⁰
HTP-nc [CTUh]	1.08 × 10 ⁻⁹	2.76 × 10 ⁻⁹	3.27 × 10 ⁻⁹	9.32 × 10 ⁻⁹	1.00 × 10 ⁻⁸	3.62 × 10 ⁻⁸
SQP [-]	9.99 × 10 ⁰	3.43 × 10 ⁰	1.82 × 10 ⁰	6.54 × 10 ⁰	5.97 × 10 ⁰	1.09 × 10 ¹
EcoPoint [-]	2.36 × 10 ⁻⁶	7.91 × 10 ⁻⁶	7.57 × 10 ⁻⁶	1.39 × 10 ⁻⁴	1.64 × 10 ⁻⁴	1.85 × 10 ⁻⁴

It should be emphasized, however, that the aggregated result does not fully reflect the variation observed across individual impact categories. Although the Stage V scenario achieved the highest EcoPoint value, this does not mean that it was the least favorable option in all analyzed categories. For selected indicators, such as ODP (ozone depletion), WDP (water use), and IRP (ionizing radiation), the electric scenarios showed higher values than the diesel-powered scenario, which exhibited the lowest level of impact in some of these categories. The results of the sensitivity analysis for the adopted electricity conversion factors are presented in Figure 3.

The results indicate that the adopted conversion factor has a significant influence on the final assessment. As the electricity demand assigned to work equivalent to the consumption of 1 litre of diesel fuel increases, the EcoPoint value also increases for all analyzed electric scenarios. This effect is particularly pronounced for scenarios based on more emission-intensive electricity generation structures. At lower conversion factor values, the electric scenarios may perform more favorably than Stage V diesel-powered equipment. However, as the assumed electricity demand increases, these differences gradually decrease, and for scenarios characterized by a high share of fossil fuels, the ranking may shift in favor of the diesel-powered scenario. The most stable results were obtained for scenarios based on low-emission electricity generation structures. In these cases, even an increase in the analyzed conversion factor did not worsen the results to an extent that would alter the overall interpretation.

The sensitivity analysis therefore **indicates that the assumption regarding the equivalence of work performed by electric and diesel-powered machines should not be treated as a secondary parameter**. It may substantially affect the aggregated result and, in extreme cases, may also alter the comparative assessment of the technologies. For this reason, environmental assessments of construction equipment should account for uncertainty related to the actual operational efficiency of electric machines, particularly when the results are used as a basis for formulating recommendations. The present analysis is model-based and does not include validation using field measurements. Future research should therefore include validation of the adopted relationships based on actual fuel and electricity consumption for different machine types and operating conditions. This would make it possible to derive more representative conversion factors for specific equipment groups or power ranges, thereby improving the reliability and generalizability of conclusions drawn from comparative analyses. It should also be emphasized that the adoption of the Stage V standard in the diesel-powered scenario represents the use of newer-generation equipment complying with current emission requirements. In practice, the construction equipment fleet is more diverse and also includes older-generation machines characterized by higher pollutant emission levels.

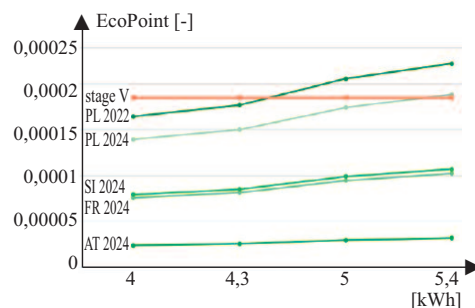


Fig. 3. Effect of assumed electricity demand on EcoPoint indicator value for the analyzed scenarios

Fig. own elaboration: author

Rys. 3. Wpływ przyjętego zapotrzebowania na energię elektryczną na wartość wskaźnika EcoPoint w przypadku analizowanych wariantów

Rys.: opracowanie autorka

oznacza, że był on najmniej korzystny we wszystkich analizowanych kategoriach. W wybranych wskaźnikach, takich jak ODP (zubożenie warstwy ozonowej), WDP (zużycie wody) czy IRP (promieniowanie jonizujące), scenariusze elektryczne osiągały większe wartości niż wariant spaliny, który w części z tych kategorii charakteryzował się najniższym poziomem oddziaływania. Wyniki analizy wrażliwości przyjętych wartości przelicznika na energię elektryczną przedstawiono na rysunku 3.

Wyniki wskazują, że przyjęta wartość przelicznika ma istotny wpływ

na ocenę końcową. Wraz ze wzrostem zapotrzebowania na energię elektryczną przypisanego do pracy równoważnej zużyciu 1 litra oleju napędowego, zwiększa się wartość wskaźnika EcoPoint wszystkich analizowanych wariantów elektrycznych. Szczególnie wyraźnie widoczne jest to w przypadku wariantów bazujących na emisyjnych strukturach wytwarzania energii elektrycznej. Przy mniejszych wartościach przelicznika warianty elektryczne mogą wypadać korzystniej niż sprzęt spalinowy Stage V. Wraz ze wzrostem przyjętego zapotrzebowania na energię elektryczną różnice te jednak stopniowo maleją, a w przypadku wariantów charakteryzujących się dużym udziałem paliw kopalnych ranking może ulec zmianie na korzyść wariantu spalinowego. Najbardziej stabilne wyniki uzyskano w przypadku wariantów bazujących na niskoemisyjnych strukturach wytwarzania energii elektrycznej. Wzrost analizowanego przelicznika nie prowadzi wówczas do pogorszenia wyników w stopniu zmieniającym ogólną interpretację.

Analiza wrażliwości wskazuje zatem, że **założenie dotyczące równoważności pracy maszyny elektrycznej i spalinowej nie powinno być traktowane jako parametr drugorzędny**. Może ono w istotny sposób wpływać na wynik zagregowany, a w skrajnych przypadkach zmieniać ocenę porównawczą technologii. Z tego względu w analizach środowiskowych sprzętu budowlanego konieczne jest uwzględnianie niepewności związanej z rzeczywistą efektywnością pracy maszyn elektrycznych, szczególnie gdy wyniki stanowią podstawę do formułowania takiej rekomendacji. Przeprowadzona analiza ma charakter modelowy i nie obejmuje walidacji na podstawie pomiarów terenowych. Dalsze badania powinny zatem obejmować walidację przyjętych zależności na podstawie rzeczywistego zużycia paliwa i energii w przypadku różnych typów maszyn i warunków ich eksploatacji. Pozwoliłoby to na wyznaczenie bardziej reprezentatywnych przeliczników dotyczących określonych grup sprzętu lub przedziałów mocy, a tym samym na zwiększenie trafności i możliwości uogólnienia wniosków z analiz porównawczych. Należy również podkreślić, że przyjęcie normy Stage V w wariantcie spalinowym odpowiada wykorzystaniu sprzętu nowych generacji, spełniającego obecne wymagania emisyjne. W praktyce struktura eksploatowanego sprzętu budowlanego jest bardziej zróżnicowana i obejmuje również maszyny starszych generacji, charakteryzujące się wyższymi poziomami emisji zanieczyszczeń.

Conclusions

It cannot be unequivocally stated that electric construction equipment always represents a more environmentally advantageous alternative to diesel-powered machinery. In terms of the aggregated EcoPoint indicator, electric scenarios achieved more favorable results when based on low-emission electricity generation structures. Under such conditions, the advantage of electric propulsion is clear, although it does not consistently extend to all individual impact categories.

For more emission-intensive electricity generation structures, the advantage of electric equipment becomes less pronounced and depends on the adopted modelling assumptions, particularly on the electricity demand conversion factor. The sensitivity analysis showed that, as the value of this factor increases, the environmental benefits associated with electrification decrease. In scenarios characterized by a high share of fossil fuels, this may lead to a shift in the relative performance of the alternatives in favor of the diesel-powered scenario. In practice, sensitivity analysis can therefore support the identification of cases in which the comparison remains stable, as well as those in which changes in the adopted assumptions may affect the final assessment and justify a more detailed analysis of specific equipment. The results indicate that the use of electric propulsion should not automatically be equated with improved environmental performance. Future research should include validation of the adopted relationships for different equipment groups and power ranges, as well as an extension of the system boundaries to include the remaining life cycle stages of the equipment, including battery production and end-of-life.

Projekt badawczy finansowany ze środków programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza w AGH”.

Received: 14.04.2026

Revised: 04.06.2026

Published: 23.09.2026

Podsumowanie

Nie można jednoznacznie stwierdzić, że sprzęt elektryczny stanowi zawsze korzystniejsze środowiskowo rozwiązanie w porównaniu z maszynami zasilanymi olejem napędowym. W ujęciu zagregowanego wskaźnika EcoPoint warianty elektryczne uzyskały korzystniejsze wyniki w scenariuszach bazujących na niskoemisyjnej strukturze produkcji energii elektrycznej. W takich warunkach przewaga napędu elektrycznego jest wyraźna, choć nie przekłada się jednoznacznie na wszystkie pojedyncze kategorie wpływu.

W przypadku bardziej emisyjnych struktur produkcji energii elektrycznej przewaga sprzętu elektrycznego ulega ograniczeniu i staje się zależna od przyjętych założeń modelowych, a przede wszystkim od przelicznika zapotrzebowania na energię elektryczną. Analiza wrażliwości wykazała, że wraz ze zwiększeniem wartości tego przelicznika korzyści środowiskowe wynikające z elektryfikacji ulegają zmniejszeniu. W scenariuszach z dużym udziałem paliw kopalnych może to prowadzić do zmiany relacji między wariantami na korzyść wariantu spalowego. W praktyce analiza wrażliwości może zatem wspomagać identyfikację przypadków, w których wynik porównania jest stabilny oraz tych, w przypadku których zmiana założeń może wpływać na ocenę końcową i uzasadnia potrzebę bardziej szczegółowej analizy konkretnego sprzętu. Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowanie napędu elektrycznego nie oże być automatycznie utożsamiane z poprawą wyniku środowiskowego. Dalsze badania powinny obejmować walidację przyjętych zależności dotyczących różnych grup i zakresów mocy maszyn oraz rozszerzenie granic systemu o pozostałe etapy cyklu życia sprzętu, w tym produkcję i koniec życia baterii.

Projekt badawczy finansowany ze środków programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza w AGH”.

Artykuł wpłynął do redakcji: 14.04.2026 r.

Otrzymał poprawiony po recenzjach: 04.06.2026 r.

Opublikowano: 23.09.2026 r.

Literature

- [1] Mach A. Economic and Environmental Evaluation of TRENCHMIX Technology and Soil Replacement. Materiały Budowlane. 2024; <https://doi.org/10.15199/33.2024.09.06>.
- [2] Winther M, Dore C. EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2023 1. A. 4 Non Road Mobile Machinery. 2023. Accessed: 2026. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-4-non-road/view>.
- [3] Bellona. Database: Emission-Free Construction Equipment (by Manufacturer). 2025. Accessed: 2026. [Online]. Available: <https://bellona.org/database-emission-free-construction-equipment-by-manufacturer>.
- [4] Wang Y, Liang X, Hou J, Tian J, Cheng Y, Wan Y. Decarbonizing construction machinery: Data-driven lifecycle assessment of a hydraulic excavator using electrified and alternative-fuel hybrid power systems. Applied Energy. 2026; <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2026.127641>.
- [5] Khan AU, Huang L, Bruland A. Transitioning to Zero Emission Construction: A Comparative Study of Diesel and Electric Loaders and Trucks in Norwegian Tunnel Construction. Tunn Undergr Space Technol. 2025; <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106847>.

- [6] Association of Issuing Bodies. European Residual Mix. Accessed: 2026. [Online]. Available: <https://www.aib-net.org/facts/european-residual-mix>.
- [7] Christiaens W, Weken H, van Gijlswijk R, Zult M. The Construction Site of Tomorrow: Results of 3 Years of Field-Testing Electric Excavators. World Electr Veh J. 2026; <https://doi.org/10.3390/wevj17020062>.
- [8] Mach A. Local Environmental Impact Categories in the Life Cycle Assessment of Geotechnical Works. Materiały Budowlane. 2025; <https://doi.org/10.15199/33.2025.11.18>.
- [9] PN-EN 15804+A2: 2020-03 Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products. 2020.
- [10] Sala S, Cerutti AK, Pant R. Development of a weighting approach for the Environmental Footprint. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018; <https://doi.org/10.2760/446145>.
- [11] Sala S, Crenna E, Secchi M, Pant R. Global Normalisation Factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017; <https://doi.org/10.2760/88930>.
- [12] BAUER Maschinen GmbH. EBG 33 H All Electric. Accessed: 2026. [Online]. Available: <https://equipment.bauer.de/en/drilling-rig-ebg-33-h-all-electric>.