

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

Local environmental impact categories in the life cycle assessment of geotechnical works

Lokalne kategorie wpływu środowiskowego w ocenie cyklu życia robót geotechnicznych

DOI: 10.15199/33.2025.11.18

Abstract. The aim of the study was to adapt weighting methods for environmental impact categories used in geotechnical assessments to local Polish conditions. Acidification, water use and particulate matter were found to be most significant. The results may improve environmental assessments and support decisions aligned with sustainable development principles.

Keywords: geotechnics; LCA; environment; weighting; sustainable development.

Streszczenie. Artykuł dotyczy dostosowania metod ważenia kategorii środowiskowych wykorzystywanych w ocenie robót geotechnicznych do specyfiki warunków lokalnych Polski. Wykazano, że największą lokalną istotność mają: zakwaszenie, użytkowanie wody oraz emisja pyłów. Uzyskane wyniki mogą poprawić jakość oceny oddziaływań środowiskowych w geotechnice i wspierać podejmowanie decyzji zgodnych z zasadami zrównoważonego rozwoju.

Słowa kluczowe: geotechnika; LCA; środowisko; wagi; zrównoważony rozwój.

Life Cycle Assessment (LCA) constitutes a widely applied tool within the construction sector, serving to analyze the environmental impacts of buildings, materials, and construction processes throughout all stages of their life cycle [1]. Within the LCA framework, various environmental impact categories are employed to quantitatively evaluate potential environmental burdens. These categories may be classified as global or local. Local categories pertain to impacts affecting specific regions and may differ in significance depending on geographical and economic conditions. Consequently, the appropriate allocation of weighting factors to impact categories in LCA allows for a more accurate consideration of national or sectoral specificities. Table 1 presents the principal impact categories defined in EN 15804+A2 [2] along with the weighting factors proposed by the European Commission (EC) [3] for the respective categories.

The aim of the article is to determine methods for weighting environmental impact categories to be applied in the assessment of geotechnical works, in accordance with the specific characteristics of national local conditions, i.e., those typical for the entire territory of Poland. The research results may be used to improve the quality of environmental assessment of geotechnical works and to support decision-making processes aimed at promoting the sustainable development of the construction sector.

Materials and Methods

The study focuses on the core environmental impact categories defined in the EN 15804+A2 standard, for which both environmental data and weighting factors developed by

Ocena cyklu życia (LCA) jest powszechnie stosowana w budownictwie do analizy wpływu środowiskowego obiektów, materiałów oraz procesów budowlanych na wszystkich etapach ich cyklu życia [1]. W ramach LCA stosuje się różne kategorie wpływu środowiskowego, które pozwalają na ilościową ocenę potencjalnych obciążeń dla środowiska. Kategorie te można podzielić na globalne i lokalne. Kategorie lokalne odnoszą się do wpływu na konkretne regiony i mogą mieć różne znaczenie w zależności od uwarunkowań geograficznych i gospodarczych. W związku z tym odpowiednie przypisanie wag kategoriom wpływu w analizie LCA pozwala lepiej uwzględnić specyfikę krajową lub sektorową. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe kategorie wpływu określone w normie EN 15804+A2 [2] oraz zaproponowane przez Komisję Europejską (KE) [3] wagi dotyczące przedmiotowych kategorii.

W artykule określono metody ważenia kategorii środowiskowych do zastosowania w ocenie robót geotechnicznych, adekwatnie do specyfiki krajowych warunków lokalnych, tj. do uwarunkowań charakterystycznych dotyczących całej Polski. Wyniki badań mogą zostać wykorzystane do poprawy jakości oceny środowiskowej robót geotechnicznych oraz wspierać podejmowanie decyzji na rzecz zrównoważonego rozwoju w budownictwie.

Materiały i metody analizy

Skupiono się na podstawowych kategoriach wpływu środowiskowego zdefiniowanych w normie EN 15804+A2, w przypadku których dostępne były zarówno dane środowiskowe, jak i opracowane przez Komisję Europejską wartości wag. Umożliwiło to rozpoczęcie oceny od spójnej, porównywalnej podstawy. W pierwszej kolejności analizie

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

Table 1. Core environmental indicators and weight based on EN 15804+A2 [2] and report [3]

Tabela 1. Podstawowe wskaźniki środowiskowe i ich wagi wg normy EN 15804+A2 [2] oraz raportu [3]

Own elaboration

Opracowanie własne

Id.	Impact category/Kategoria wpływu	Skala/Skala	Weight/Waga
GWP – total	climate change – total/zmiana klimatu – całkowita [kg CO ₂ eq.]	global/globalna	22,19
GWP – fossil	climate change – fossil/zmiana klimatu – emisja z paliw kopalnych [kg CO ₂ eq.]		
GWP – biogenic	climate change – biogenic/zmiana klimatu – emisja biogeniczna [kg CO ₂ eq.]		
GWP – luluc	climate change – land use and land use change [kg CO ₂ eq.]/zmiana klimatu – użytkowanie i zmiana użytkowania gruntów [kg CO ₂ eq.]		
ODP	ozone depletion [kg CFC –11 eq.]/zubożenie warstwy ozonowej [kg CFC –11 eq.]	global/globalna	6,75
AP	acidification [Mol H ⁺ eq.]/zakwaszenie [Mol H ⁺ eq.]	local/regional/global/globalna	6,64
EP – freshwater	eutrophication aquatic freshwater [kg N eq.]/eutrofizacja wód słodkich [kg N eq.]	local/lokalna	2,95
EP – marine	eutrophication aquatic marine [kg PO ₄]/eutrofizacja wód morskich [kg PO ₄]		3,12
EP – terrestrial	eutrophication, terrestrial [mol N eq.]/eutrofizacja lądowa [mol N eq.]		3,91
POCP	photochemical ozone formation, human health [kg NMVOC eq.]/tworzenie ozonu fotochemicznego (wpływ na zdrowie ludzi) [kg NMVOC eq.]	local/lokalna	5,1
ADP – minerals & metals	depletion of abiotic resources – minerals and metals [kg Sb eq.]/wyczerpywanie zasobów abiotycznych – minerały i metale [kg Sb eq.]	global/globalna	8,08
ADP – fossil	depletion of abiotic resources – fossil fuels [MJ], net caloric values/wyczerpywanie zasobów abiotycznych – paliwa kopalne [MJ]	global/globalna	8,92
WDP*	water use [m ³] world eq. deprived/zużycie wody [m ³]	global/local/globalna/lokalna	9,03
PM	particulate matter emissions disease inc./emisja pyłów zawieszonych (materii cząsteczkowej)	local/lokalna	9,54
IRP	ionizing radiation, human health [kgBq U–235 eq.]/promieniowanie jonizujące – wpływ na zdrowie ludzi [kgBq U–235 eq.]	global/globalna	5,37
SQP	land use related impacts/soil quality [dimensionless]/wpływ na użytkowanie gruntów i jakość gleby	local/lokalna	8,42

* in the literature, WDP is also sometimes interpreted as dependent on local conditions, despite the use of a global characterization factor/w literaturze WDP bywa również interpretowana jako zależna od warunków lokalnych, mimo globalnego przelicznika

the European Commission were available. This approach enabled the assessment to begin from a consistent and comparable basis. In the first stage, the analysis focused on local impact categories, such as acidification (AP), eutrophication (EP – freshwater, EP – marine, EP – terrestrial), photochemical ozone formation (POCP), particulate matter emissions (PM), water use (WDP), and land use (SQP). Based on the available data, an assessment was carried out to determine which of these categories represent environmental issues under Polish conditions. The analysis was conducted using data obtained, among others, from EUROSTAT [4], the Chief Inspectorate of Environmental Protection [5], the Joint Research Centre of the European Commission (JRC) [6] and the European Environment Agency (EEA) [7]. The evaluation of the occurrence of specific environmental issues in Poland was based on the standards and guidelines of international organizations, including the WHO, the UN, and the European Union. As a result of the conducted analysis, the significance of individual impact categories was determined on a 0 – 3 scale.

In order to incorporate local environmental conditions into the LCA analysis for Poland, two approaches (Method A and Method B) were considered for modifying the weighting factors assigned to individual environmental impact categories. Under Method A, it was assumed that the weights of global impact categories remain unchanged and retain the reference values published by the European Commission (EC). In contrast, local impact categories were modified to better reflect the environmental conditions prevailing in Poland. The modification process was carried out in two stages:

poddano kategorii wpływu (lokalne), takie jak: zakwaszenie (AP); eutrofizacja (EP – freshwater, EP – marine, EP – terrestrial); tworzenie ozonu fotochemicznego (POCP); emisja pyłów (PM); użytkowanie wody (WDP) oraz użytkowanie gruntów (SQP). Na podstawie dostępnych danych przeprowadzono ocenę, które z tych kategorii sprawiają problemy środowiskowe w warunkach polskich. Analiza została przeprowadzona m.in. na podstawie dostępnych danych Eurostatu [4], Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (GIOŚ) [5], Wspólnego Centrum Badawczego Komisji Europejskiej (JRC) [6] oraz Europejskiej Agencji Środowiska (EEA) [7]. Ocena występowania określonych problemów środowiskowych w Polsce bazowała na standardach i wytycznych organizacji międzynarodowych: WHO; ONZ oraz Unii Europejskiej. W wyniku przeprowadzonej analizy określono znaczenie poszczególnych kategorii wpływu w skali 0 – 3.

W celu uwzględnienia lokalnych uwarunkowań środowiskowych w analizie LCA dotyczącej Polski, rozważono dwa podejścia (metody A i B) do modyfikacji wag przypisanych poszczególnym kategoriom wpływu środowiskowego. W ramach metody A przyjęto, że wagi kategorii wpływu o charakterze globalnym pozostają niezmiennione i przyjmują wartości referencyjne, opublikowane przez Komisję Europejską (KE). Kategorie wpływu o charakterze lokalnym zostały natomiast zmodyfikowane w celu lepszego odzwierciedlenia warunków środowiskowych panujących w Polsce. Proces modyfikacji przebiegał w dwóch etapach:

- w przypadku kategorii uznanych za mało istotne w kontekście lokalnym przypisano minimalną wagę – równą najniższej

- for the categories considered less significant in the local context, a minimum weight was assigned – equal to the lowest reference weight among the local categories established by the EC;
- the remaining portion of the total weight of local categories, which was „released” as a result of the weight reduction, was redistributed among the remaining local impact categories proportionally to their original shares within the EC weighting system.

In Method B, the environmental impact categories were divided into two independent groups: global and local. Within each group, the weights were rescaled separately so that their sum equaled 100%. For the global categories, the original proportional relationships of the reference weights defined by the European Commission were preserved and subsequently converted into percentage values within a closed scale (100%). In the case of the local categories, the weights were assigned in proportion to the local environmental significance ratings developed in the present study (on a 0 – 3 scale). This approach allowed the weight distribution to reflect the actual importance of individual categories in the context of the environmental conditions prevailing in Poland.

Local Impact Categories

Acidification (AP). The problem of acidification in Europe is multifaceted and concerns both terrestrial and aquatic ecosystems. It primarily results from the emissions of sulfur compounds, nitrogen oxides, volatile organic compounds, and ammonia. Soil acidification, largely associated with nitrogen fertilization in agriculture, leads to a significant loss of nutrients and the deterioration of soil quality [8]. The identification of areas affected by acidification was carried out based on data from [9], using the *Average Accumulated Exceedance* (AAE) indicator, which represents the mean accumulated exceedance of critical loads of acidifying substances in ecosystems. This indicator is expressed in equivalents of H^+ ions per hectare per year – the higher its value, the greater the risk of harmful soil acidification and negative effects on ecosystems. For Poland, the AAE indicator for the year 2020 was reported at 74 eq H^+ /ha/year, placing the country fourth among the European Union member states in terms of the exceedance of critical loads of acidifying substances.

Eutrophication (EP – marine, EP – freshwater, EP – terrestrial). The eutrophication impact category comprises three main areas of influence: marine eutrophication (EP – marine), freshwater eutrophication (EP – freshwater) and terrestrial eutrophication (EP – terrestrial). In aquatic ecosystems, an excess of nutrients – primarily nitrogen and phosphorus compounds – leads to the rapid growth of algae and cyanobacteria, resulting in decreased oxygen levels and a deterioration of water quality [10]. In terrestrial environments, eutrophication is associated with excessive nitrogen enrichment of soils, which may cause alterations in ecosystem structure.

The assessment of marine eutrophication was carried out using Eurostat data for the Marine waters affected by eutrophication indicator for the year 2023 [11]. This indicator defines the share of eutrophic waters within the Exclusive

spośród referencyjnych wag przypisanych kategoriom lokalnym przez KE;

- pozostałą część łącznej wagi lokalnych kategorii, która została „uwolniona” w wyniku redukcji wag, rozdzielono między pozostałe lokalne kategorie wpływu proporcjonalnie do ich pierwotnych udziałów w systemie wag KE.

W metodzie B dokonano podziału kategorii wpływu środowiskowego na dwie niezależne grupy: globalne oraz lokalne. W obrębie każdej z tych grup wagi zostały przeskalowane osobno, tak aby ich suma wynosiła 100%. W przypadku kategorii globalnych zachowano oryginalne proporcje wag referencyjnych, określonych przez Komisję Europejską, które następnie przekształcono w wartości procentowe w ramach zamkniętej skali (100%). W przypadku kategorii lokalnych przypisano wagi proporcjonalnie do ocen lokalnej istotności środowiskowej, opracowanych w prezentowanym badaniu (w skali 0 – 3). Dzięki temu rozkład wag odzwierciedla rzeczywiste znaczenie poszczególnych kategorii w kontekście warunków panujących w Polsce.

Lokalne kategorie wpływu

Zakwaszenie (AP). Problem zakwaszenia w Europie ma charakter wieloaspektowy i dotyczy zarówno ekosystemów lądowych, jak i wodnych. Jest on głównie wynikiem emisji związków siarki, tlenków azotu, lotnych związków organicznych oraz amoniaku. Zakwaszenie gleb, w dużym stopniu związane z nawożeniem azotowym w rolnictwie, prowadzi do znacznej utraty składników odżywczych oraz pogorszenia jakości gleby [8]. Identyfikacja obszarów zmagających się z zakwaszeniem została przeprowadzona na podstawie danych z [9], wykorzystując wskaźnik średniego skumulowanego przekroczenia krytycznych ładunków substancji powodujących zakwaszenie w ekosystemach (ang. *Average Accumulated Exceedance*, AAE). Wskaźnik ten wyrażany jest w ekwiwalentach jonów H^+ na hektar rocznie. Im większa jest jego wartość, tym większe ryzyko szkodliwego zakwaszenia gleby oraz negatywnych skutków dla ekosystemów. Wskaźnik AAE w przypadku Polski 2020 r. był na poziomie 74 eq H^+ /ha/rok. Taki poziom klasyfikuje Polskę na czwartym miejscu wśród krajów Unii Europejskiej pod względem przekroczenia krytycznych ładunków substancji powodujących zakwaszenie.

Eutrofizacja (EP – marine, EP – freshwater, EP – terrestrial). Ta kategoria wpływu obejmuje trzy główne obszary oddziaływania: eutrofizację wód morskich (EP – marine); wód śródlądowych (EP – freshwater) oraz lądową (EP – terrestrial). W ekosystemach wodnych nadmiar biogenów, głównie związków azotu i fosforu, prowadzi do intensywnego rozwoju glonów i sinic, co skutkuje spadkiem zawartości tlenu oraz pogorszeniem jakości wód [10]. W środowiskach lądowych eutrofizacja wiąże się z nadmiernym wzbogaceniem gleby w azot, co może prowadzić do zmian w strukturze ekosystemów.

Ocena eutrofizacji wód morskich została przeprowadzona na podstawie danych Eurostatu dotyczących wskaźnika marine waters affected by eutrophication w 2023 r. [11]. Wskaź-

Economic Zone (EEZ). An area is considered eutrophic if, for more than 25% of observation days in a given year, chlorophyll concentrations – as an indirect indicator – exceed the 90th percentile of reference values from the years 1998 – 2017. This indicator generally exhibits very low values in most European countries, which results from both its methodological specificity and the applied assessment approach. For Poland, the value amounts to 0.02%, indicating the presence of a marine eutrophication problem.

The assessment of freshwater and terrestrial eutrophication was performed using the Average Accumulated Exceedance (AAE) indicator, which measures the exceedance of critical nitrogen loads in terrestrial ecosystems. For Poland, the AAE value equals 223 eq N/ha/year, placing the country above the EU average. Although Poland is not among the most severely affected countries, the obtained result indicates a potential environmental risk associated with excessive nitrogen inflow into soils and waters.

Photochemical Ozone Formation (POCP). The POCP impact category refers to the emissions of substances that participate in atmospheric photochemical reactions leading to the formation of tropospheric ozone. Unlike stratospheric ozone, which serves a protective function, tropospheric ozone constitutes an air pollutant. The key precursors of this process include nitrogen oxides (NO_x), non-methane volatile organic compounds (NMVOC), carbon monoxide (CO) and methane (CH_4) [12]. With regard to air quality, the European Union has established concentration limits for tropospheric ozone. The EU has adopted $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ as the maximum 8-hour average concentration, which should not be exceeded on more than 25 days per year (calculated as a three-year running average). Between 2013 and 2023, the number of such days in Poland ranged from 5 to 23 (Figure 1) [5]. In the remaining years, lower values were recorded, although noticeable temporal fluctuations were observed.

Based on the available data, it can be concluded that the phenomenon of tropospheric ozone formation does occur in Poland; however, its magnitude does not currently indicate a significant environmental threat, as it remains below the permissible limit. Therefore, in the national context, the POCP category is not considered critical, although it requires continued monitoring.

Particulate Matter emissions (PM). The PM impact category accounts for both direct emissions of suspended particles and the precursors of secondary aerosols, which contribute to their formation in the atmosphere. In addition to the commonly analyzed PM10 and PM2.5 fractions, the assessment also considers the total particulate content

nik ten określa udział wód eutroficznych w wyłącznej strefie ekonomicznej (EEZ). Obszar uznaje się za eutroficzny, jeśli przez ponad 25% dni obserwacyjnych w danym roku stężenie chlorofilu – jako wskaźnika pośredniego – przekracza 90% wartości referencyjnych z lat 1998 – 2017. Wskaźnik ten przyjmuje na ogół bardzo małe wartości w większości państw europejskich, co wynika m.in. z jego specyfiki oraz przyjętej metody oceny. W przypadku Polski wartość wynosi 0,02%, co wskazuje, że problem eutrofizacji wód morskich w Polsce występuje.

Do oceny eutrofizacji w środowisku śródlądowym i lądowym wykorzystano wskaźnik AAE, który mierzy przekroczenie krytycznych ładunków azotu w ekosystemach lądowych. W Polsce wartość tego wskaźnika wynosi 223 eq N/ha/rok, co plasuje kraj powyżej średniej UE. Choć Polska nie znajduje się w ścisłej czołówce państw najbardziej dotkniętych eutrofizacją, uzyskany wynik wskazuje na potencjalne zagrożenie środowiskowe, wynikające z nadmiernego dopływu azotu do gleb i wód.

Tworzenie ozonu fotochemicznego (POCP). Kategoria wpływu POCP odnosi się do emisji substancji, które w atmosferze uczestniczą w reakcjach fotochemicznych, prowadzących do powstawania ozonu troposferycznego. Ozon ten, w odróżnieniu od stratosferycznego, nie pełni funkcji ochronnej, lecz stanowi zanieczyszczenie powietrza. Kluczowe prekursorzy tego procesu to tlenki azotu (NO_x), niemetanowe lotne związki organiczne (NMVOC), tlenek węgla (CO) oraz metan (CH_4) [12]. W odniesieniu do jakości powietrza, UE określa normy stężenia ozonu troposferycznego: przyjęto $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ jako maksymalną wartość ośmiogodzinną, która nie powinna być przekraczana przez więcej niż 25 dni w roku (liczona jako średnia krocząca z trzech lat). W latach 2013 – 2023 liczba takich dni wynosiła 5 – 23 (rysunek 1), a wartość progowa (25 dni) została przekroczona w 2015 r. [5]. W pozostałych latach odnotowano wartości mniejsze, jednak z wyraźnymi wahaniami w czasie.

Na podstawie dostępnych danych stwierdzono, że zjawisko tworzenia ozonu troposferycznego w Polsce występuje, ale jego skala nie wskazuje obecnie na istotne zagrożenie środowiskowe (poniżej dopuszczalnej wartości). W kontekście krajowym kategoria POCP nie jest więc uznawana za kluczową, choć wymaga dalszego monitorowania.

Emisja pyłów (PM). W kategorii wpływu PM uwzględnia się zarówno bezpośrednią emisję pyłów zawieszonych, jak i prekursorzy aerozoli wtórnych, które w atmosferze prowadzą do ich wtórnego powstawania. Oprócz powszechnie analizowanych frakcji PM10 i PM2.5, bierze się także pod uwagę całkowitą za-

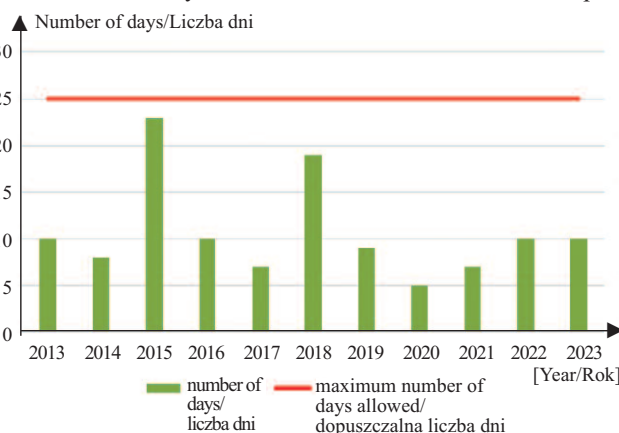


Fig. 1. Number of days exceeding the $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ threshold (daily maximum 8-hour average) of tropospheric ozone concentration at rural background stations in Poland between 2013 and 2023

Rys. 1. Liczba dni z przekroczeniem poziomu $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ stężenia ozonu troposferycznego w stacjach tła wiejskiego w Polsce w latach 2013 – 2023

and the emissions of gaseous compounds that undergo chemical reactions leading to the formation of secondary PM [13].

In the present analysis, two data sources were used:

- for PM2.5 – the national average exposure indicator for PM2.5 for the years 2013 – 2023, calculated in accordance with the EU methodology as a three-year average derived from selected urban background stations [14];

- for PM10 – annual average concentrations from monitoring stations in Poland for the years 2013 – 2023 [5].

The reference values were adopted in accordance with WHO recommendations [15] and the regulations of the European Union [16], amounting to:

- PM2.5: 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO) i 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (EU);

- PM10: 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO) i 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (EU).

The trends in PM2.5 and PM10 levels for the years 2013 – 2023 are illustrated in Figure 2, which presents the annual values relative to the corresponding WHO and EU threshold limits.

wartość pyłów oraz emisje związków gazowych, które w wyniku reakcji chemicznych tworzą wtórne cząstki PM [13].

W analizie wykorzystano dwa źródła danych:

- w przypadku PM2.5 – krajowy wskaźnik średniego narażenia na pył PM2.5 w latach 2013 – 2023, obliczany zgodnie z metodą unijną jako trzyletnia średnia z wybranych stacji tła miejskiego [14];

- w przypadku PM10 – średnie roczne stężenia ze stacji pomiarowych w Polsce w latach 2013 – 2023 [5].

Wartości odniesienia przyjęto zgodnie z zaleceniami WHO [15] oraz regulacjami Unii Europejskiej [16], wynoszące:

- PM2.5: 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO) i 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (UE);

- PM10: 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO) i 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (UE).

Trendy zmian poziomu PM2.5 i PM10 w latach 2013 – 2023 zilustrowano na rysunku 2, który przedstawia roczne wartości odniesione do odpowiednich progów WHO i UE.

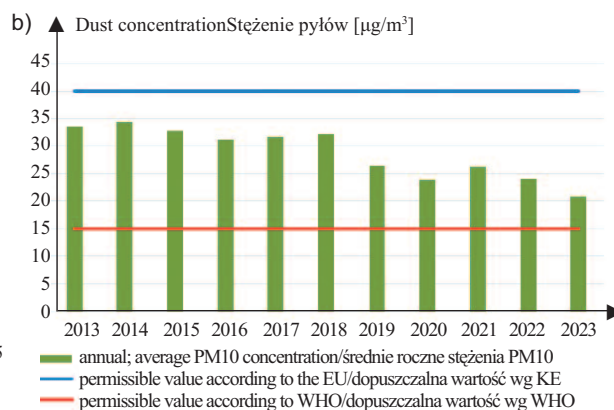
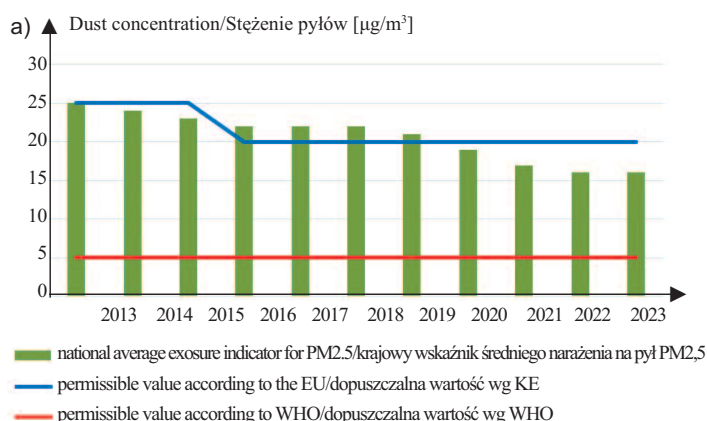


Fig. 2. Annual average concentrations of particulate matter in Poland from 2013 to 2023: a) PM2.5; b) PM10

Fig. own elaboration based on [5,14]

Rys. 2. Średnie roczne stężenie pyłów zawieszonych w Polsce w latach 2013 – 2023: a) PM2.5; b) PM10

Rys. opracowanie własne na podstawie [5,14]

During the analyzed period, a gradual decrease in particulate matter levels was observed in Poland. Despite this improvement, PM2.5 concentrations exceeded the WHO recommendations in most years, although they remained below the EU permissible limit. Similarly, for PM10, annual values stayed below the EU standard but were clearly higher than the levels recommended by the WHO. These findings confirm the significance of the PM impact category in the context of Poland's local environmental conditions.

Water use (WDP). The Water Use impact category was determined based on Eurostat data concerning renewable freshwater resources per capita ($\text{m}^3/\text{person}/\text{year}$) [17]. These resources include both surface and groundwater, and their levels depend on climatic conditions, precipitation, evaporation, and transboundary flows. According to the United Nations definition, the minimum amount of renewable freshwater resources ensuring water security is 1,700 m^3 per person per year [18]. In the case of Poland, this indicator – 1,570 m^3 per person – is below the water security threshold and significantly lower than the EU average, which ranges from approximately 4,000 to 5,000 $\text{m}^3/\text{person}/\text{year}$. This indicates that Poland belongs to the group of countries

W analizowanym okresie obserwuje się stopniowy spadek poziomu pyłu zawieszonego w Polsce. Mimo tej poprawy, stężenie PM2.5 przez większość lat przekraczało zalecenia WHO, choć mieściło się poniżej dopuszczalnego limitu UE. Podobnie w przypadku PM10, wartości roczne pozostawały poniżej normy UE, lecz wyraźnie przewyższały poziom rekomendowane przez WHO. Wyniki te potwierdzają istotność kategorii wpływu PM w kontekście lokalnych uwarunkowań środowiskowych Polski.

Zużycie wody (WDP). Kategoria wpływu Water Use została określona na podstawie danych z Eurostatu dotyczących odnawialnych zasobów słodkiej wody w przeliczeniu na mieszkańca ($\text{m}^3/\text{os.}/\text{rok}$) [17]. Zasoby te uwzględniają zarówno wody powierzchniowe, jak i podziemne, a ich poziom zależy od warunków klimatycznych, opadów, parowania oraz przepływów transgranicznych. Zgodnie z definicją ONZ, minimalna ilość odnawialnych zasobów słodkiej wody, zapewniająca bezpieczeństwo wodne, wynosi 1700 m^3 na mieszkańca rocznie [18]. W przypadku Polski wskaźnik ten (1570 m^3 na mieszkańca) jest mniejszy niż próg bezpieczeństwa i znacznie odbiega od średniej państw członkowskich UE, która wynosi 4 – 5 tys. $\text{m}^3/\text{os.}/\text{rok}$. Oznacza to, że Polska znajduje

with relatively low water availability, confirming the relevance of including this category as significant in the environmental assessment context. Additionally, the structure of water use in Poland highlights the dominant role of industry, which accounts for approximately 70% of total water consumption [19].

Land use related impacts / Soil quality (SQP). The Land Use impact category refers to land transformations and changes in land use patterns that may lead to environmental degradation and the loss of ecosystem functions. In LCA analyses, this impact encompasses both direct land occupation (e.g., for infrastructure development) and long-term effects on soil quality, biodiversity, carbon balance, and water retention capacity [20].

In the present study, the Soil Sealing Index (SSI) was applied to assess land use impacts. This indicator quantifies the share of land surface covered by impermeable materials. Due to its sensitivity to urbanization and infrastructure development processes, the SSI effectively reflects anthropogenic pressure on soils and the loss of their environmental functions, making it a valuable tool in environmental assessments within the construction sector.

The Soil Sealing Index enables a quantitative evaluation of the degree of soil surface coverage by impermeable materials, which affects both soil functions and ecosystem services. In this analysis, Eurostat data from 2018 were used, in which the index represents the percentage of a country's total area that is sealed [21]. According to Eurostat, in 2018, the average soil sealing level in Europe was 2.3%, while in Germany it reached 5.1%, the highest value in Europe. In this context, the 2.55% index recorded for Poland indicates a moderate level of soil sealing.

Assessment of the Significance of Local Impact Categories. The summary presented in Figure 3 illustrates the assessment of the significance of selected environmental impact categories under Polish conditions, based on quantitative indicators and threshold values established by international institutions (EU, WHO, UN). The highest local significance was identified for the categories of acidification (AP), water use (WDP), and particulate matter emissions (PM). A moderate level of significance was assigned to eutrophication, land use (SQP), and Photochemical ozone formation (POCP), with the latter being potentially relevant mainly at the regional level.

je się w grupie krajów o relatywnie małych zasobach wodnych, co potwierdza zasadność uwzględnienia tej kategorii jako istotnej w kontekście oceny środowiskowej. Dodatkowo, struktura wykorzystania wody w Polsce wskazuje na dominującą rolę przemysłu, który odpowiada za ok. 70% całkowitego zużycia wody [19].

Użytkowanie gruntów i jakość gleby (SQP). Kategoria wpływu Land Use odnosi się do przekształceń terenu oraz zmian w sposobie użytkowania gruntów, które mogą prowadzić do degradacji środowiska i utraty funkcji ekosystemów. W analizach LCA wpływ ten obejmuje zarówno bezpośrednie zajmowanie terenu (np. pod inwestycje infrastrukturalne), jak i długoterminowe skutki dotyczące jakości gleby, bioróżnorodności, bilansu węglowego oraz zdolności retencyjnych [20].

Do oceny wpływu użytkowania gruntów zastosowano Soil Sealing Index (SSI) – wskaźnik uszczelnienia gleby, który ilościowo określa udział powierzchni pokrytej materiałami nieprzepuszczalnymi. Ze względu na czułość na procesy urbanizacji i rozwoju infrastruktury, SSI dobrze odzwierciedla presję antropogeniczną na gleby i utratę ich funkcji środowiskowych, co czyni go przydatnym narzędziem w analizach środowiskowych sektora budowlanego.

W analizie wykorzystano dane Eurostatu z 2018 r., w których wskaźnik ten wyraża, jaki procent całkowitej powierzchni danego obszaru (kraj) został uszczelniony [21]. Z danych tych wynika, że w 2018 r. średni poziom uszczelnienia gleby w Europie wynosił 2,3%, podczas gdy w Niemczech osiągnął 5,1%, co jest najwyższym wskaźnikiem w Europie. W kontekście tych wartości, wskaźnik 2,55% odnotowany w Polsce wskazuje na umiarkowany poziom uszczelnienia gleby.

Ocena istotności lokalnych kategorii wpływu. Rysunek 3 ilustruje ocenę istotności wybranych kategorii wpływu środowiskowego w warunkach polskich na podstawie wskaźników ilościowych oraz wartości progowych określonych przez instytucje międzynarodowe (UE, WHO, ONZ). Najwyższą istotność lokalną wykazano w kategoriach: zakwaszenie (AP); użytkowanie wody (WDP) oraz emisja pyłów (PM). Średni poziom istotności przypisano eutrofizacji, użytkowaniu gruntów (SQP) oraz tworzeniu ozonu fotochemicznego (POCP), przy czym w ostatnim przypadku problem może mieć znaczenie głównie regionalne.

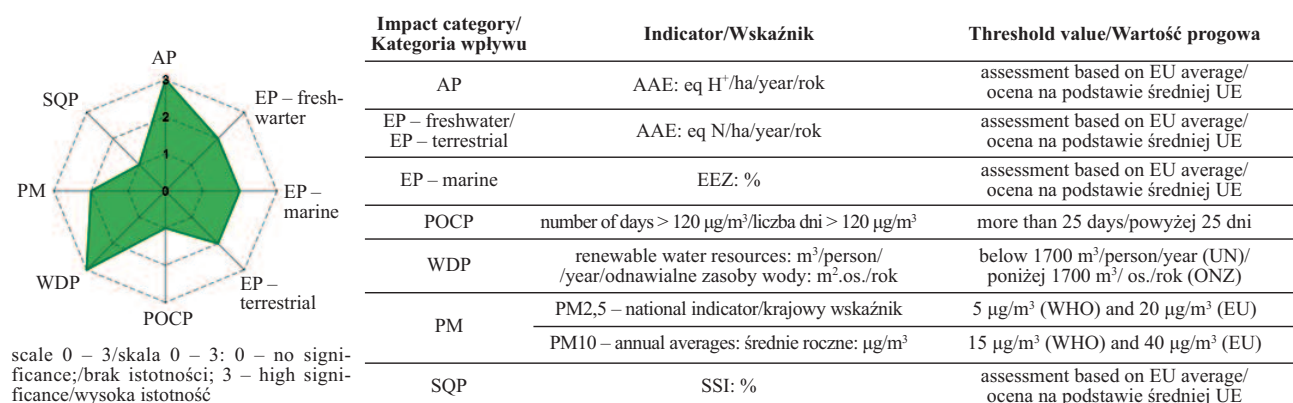


Fig. 3. Evaluation of the local significance of selected environmental impact categories in Poland
Rys. 3. Ocena lokalnej istotności wybranych kategorii wpływu środowiskowego w Polsce

Own elaboration
Opracowanie własne

Adjustment of Weighting Factors to the Significance of Local Impact Categories in Poland

Table 2 presents the results of the adjustment of environmental weighting factors according to two proposed approaches, taking into account the local environmental conditions of Poland. The applied approaches differ in the extent of weight modification and the degree of integration with the European Commission's reference system. Each approach is characterized by specific advantages and limitations, depending on the intended purpose of the analysis. Method A, involving a partial modification of the EC weighting factors, assumes the retention of weights for global categories and the adjustment of the distribution of weights among local categories based on the results of the assessment of their environmental significance under Polish conditions. This solution enables the adaptation of the assessment to the national context without compromising consistency with the existing normalization framework, making it suitable for analyses in which alignment with European methodology is essential. However, the limitation of this approach lies in the lack of full autonomy in modeling local impacts, as they remain embedded within the reference weighting structure.

Method B is based on a completely independent re-scaling of weights for the groups of global and local impact categories. This approach allows for a comprehensive reflection of local environmental conditions and facilitates independent assessment of global and regional impacts. It is particularly relevant for analyses focused on national or sector-specific contexts, such as the environmental impact assessment of geotechnical works. Nevertheless, it should be noted that the independence of the weighting system in Method B may limit the comparability of results across regions and countries, due to the lack of reference to standardized frameworks.

Summary

The proposed approaches may serve as a practical tool supporting environmental analyses in the construction sector, enabling a better alignment of the assessment model with national specificities. The highest local significance was identified for the categories of acidification (AP), water use (WDP), and particulate matter emissions (PM). The application of locally adjusted weighting factors in LCA analyses may enhance the relevance and usefulness of results in decision-making processes related to sustainable development.

Dostosowanie wag do istotności lokalnych kategorii wpływu w Polsce

W tabeli 2 przedstawiono wyniki dostosowania wag środowiskowych wg dwóch zaproponowanych podejść, z uwzględnieniem lokalnych uwarunkowań środowiskowych Polski. Zastosowane podejścia różnią się zakresem modyfikacji wag oraz stopniem integracji z systemem referencyjnym Komisji Europejskiej. Każde z nich charakteryzuje się określonymi zaletami i ograniczeniami, zależnymi od przyjętego celu analizy. Metoda A, polegająca na częściowej modyfikacji wag KE, zakłada zachowanie wag w przypadku kategorii globalnych oraz korektę rozkładu wag wśród kategorii lokalnych na podstawie wyników oceny ich istotności środowiskowej w warunkach polskich. Przyjęte rozwiązanie umożliwia dostosowanie oceny do kontekstu krajowego bez naruszenia zgodności z istniejącym systemem normalizacji, co czyni je adekwatnym w przypadku analiz, w których istotna jest spójność z metodyką europejską. Ograniczeniem tego podejścia jest jednak brak pełnej autonomii w modelowaniu wpływów lokalnych, które pozostają osadzone w strukturze wag referencyjnych.

Metoda B polega na całkowicie niezależnym skalowaniu wag dotyczących grup kategorii globalnych i lokalnych. Takie rozwiązanie pozwala na pełne odzwierciedlenie lokalnych uwarunkowań środowiskowych oraz umożliwia niezależną ocenę oddziaływań globalnych i regionalnych. Podejście to znajduje szczególne zastosowanie w analizach ukierunkowanych na kontekst krajowy lub sektorowy, takich jak ocena wpływu środowiskowego robót geotechnicznych. Należy jednak zaznaczyć, że niezależność systemu wag w metodzie B może prowadzić do ograniczenia możliwości porównań międzyregionalnych i transnarodowych, ze względu na brak odniesienia do standardowych ram referencyjnych.

Table 2. Comparison of environmental impact category weights defined in the reference system of the European Commission (EC) with weights adapted to Polish conditions according to Method A and Method B

Tabela 2. Porównanie wag środowiskowych określonych w systemie referencyjnym Komisji Europejskiej (KE) z wagami dostosowanymi do warunków polskich wg metody A i B

Id.	Weight according to the CE/ Waga wg KE	Method A/ Metoda A	Method B/Metoda B	
			global/globalna	local/lokalna
GWP-total	22,19	22,19	43,25	
ODP	6,75	6,75	13,16	
AP	6,64	8,08		18,75
EP – freshwater	2,95	3,59		12,5
EP – marine	3,12	3,80		12,5
EP – terrestrial	3,91	4,76		12,5
POCP	5,10	2,95		6,25
ADP – minerals & metals	8,08	8,08	15,75	
ADP – fossil	8,92	8,92	17,38	
WDP	9,03	10,99		18,75
PM	9,54	11,61	10,47	12,5
IRP	5,37	5,37		
SQP	8,42	2,95		6,25

Podsumowanie

Zaproponowane podejścia mogą stanowić praktyczne narzędzie, wspomagające prowadzenie analiz środowiskowych w sektorze budowlanym, umożliwiając lepsze dopasowanie modelu oceny do specyfiki krajowej. Największą istotność lokalną wykazano w kategoriach: zakwaszenie (AP); użytkowanie wody (WDP) oraz emisja pyłów (PM). Zastosowanie lokalnie dostosowanych wag w analizach LCA może przyczynić się do zwiększenia trafności i użyteczności wyników w procesach decyzyjnych związanych ze zrównoważonym rozwojem.

Importantly, the presented methodology may constitute a starting point for developing sector-specific environmental guidelines for particular branches of the construction industry – similarly to the existing guidelines established for concrete or electrical installations. Introducing comparable standards for geotechnical engineering could significantly improve the consistency and comparability of environmental analyses in this field. Moreover, such an approach could have practical applications, for instance, by being incorporated into environmental criteria within public procurement procedures.

Certain limitations of the conducted analysis should also be noted. The present study adopted a national-level approach, which enabled a general assessment of the importance of individual categories under Polish conditions as a whole. Future research should consider a more detailed regional approach, accounting for the variability of environmental issues among specific regions (e.g., voivodeships). In some cases, the analysis faced limited data availability, such as the absence of permissible values for certain environmental indicators. In such instances, average (European) data were used, which should be taken into account when interpreting the results. Given the changing environmental conditions and the potential influence of regulatory, investment, or technological measures, it is recommended to periodically update the assessment of local impact category significance to ensure that it reflects the current state of the environment and ongoing development trends.

Received: 28.07.2025
Revised: 29.08.2025
Published: 21.11.2025

Przedstawione metody mogą stanowić punkt wyjścia do opracowywania branżowych wytycznych środowiskowych dotyczących konkretnych branż budownictwa – analogicznie jak ma to już miejsce w przypadku betonu czy instalacji elektrycznych. Wprowadzenie podobnych standardów w geotechnice może znacznie podnieść poziom spójności i porównywalności analiz środowiskowych w tym obszarze. Ponadto może znaleźć zastosowanie w praktyce, m.in. przez uwzględnienie w kryteriach środowiskowych w postępowaniach przetargowych w ramach zamówień publicznych.

Należy również zaznaczyć pewne ograniczenia przeprowadzonej analizy. W niniejszym opracowaniu przyjęto podejście krajowe, co pozwoliło na ogólną ocenę znaczenia poszczególnych kategorii w warunkach Polski jako całości. W przyszłości warto rozważyć bardziej szczegółowe podejście regionalne, uwzględniające zróżnicowanie problemów środowiskowych pomiędzy poszczególnymi regionami, np. województwami. Ponadto, w niektórych przypadkach napotkano ograniczoną dostępność danych – na przykład brak wartości dopuszczalnych dla niektórych wskaźników środowiskowych. W takich sytuacjach kierowano się danymi średnimi (europejskimi), co należy uwzględnić przy interpretacji wyników. Ze względu na zmieniające się warunki środowiskowe oraz możliwy wpływ działań regulacyjnych, inwestycyjnych lub technologicznych, wskazane jest okresowe aktualizowanie ocen lokalnej istotności kategorii wpływu, tak aby odzwierciedlały one aktualny stan środowiska oraz kierunki rozwoju.

Artykuł wpłynął do redakcji: 28.07.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 29.08.2025 r.
Opublikowano: 21.11.2025 r.

Literature

[1] Mach A, Wałach D. Implementation of Integrated Life Cycle Design Principles in Ground Improvement and Piling Methods – A Review, Sustainability. 2024; <https://doi.org/10.3390/su16020659>.
[2] EN 15804:2012+A2:2019 Sustainability of construction works – Environmental product declarations. 2019.
[3] 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>.
[4] Eurostat. Accessed: 2025. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/en/>.
[5] Bank danych pomiarowych – GIOŚ. Accessed: 2025. [Online]. Available: <https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/archives>.
[6] The Joint Research Centre: EU Science Hub. Accessed: 2025. [Online]. Available: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/index_en?prefLang=pl.
[7] European Environment Agency. Accessed: 2025. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en>.
[8] Zamanian K et al. Acidification of European croplands by nitrogen fertilization: Consequences for carbonate losses, and soil health. Sci Total Environ, 2024; <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.171631>.
[9] European Environment Agency. Exposure of Europe's ecosystems to acidification, eutrophication and ozone. Accessed: 2025. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/exposure-of-ecosystems-to-acidification-14/assessment-1>.
[10] Sedyaw P, V. V. R. Bhatkar VVR, Sawant AN. A review on effects of eutrophication in aquatic ecosystem. Int J Dev Res. 2024; <https://doi.org/10.37118/ijdr.28143.04.2024>.
[11] Eurostat. Marine waters affected by eutrophication (sdg_14_60). Accessed: 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.2908/SDG_14_60.
[12] Elshorbany Y et al. Tropospheric ozone precursors: global and regional distributions, trends, and variability. Atmos Chem Phys. 2024; <https://doi.org/10.5194/ACP-24-12225-2024>.

[13] Prasad NVK, Madhavi N, Nagendrasarma MSSRK, Babu TA. Impact of Particulate Matter Concentration on Human Health: A Glance of Review. Curr Appl Sci Technol. 2023; <https://doi.org/10.55003/CAST.2023.06.23.011>.
[14] Badania zanieczyszczenia powietrza pyłem PM2,5 pod kątem monitorowania wskaźnika średniego narażenia – GIOŚ. Accessed: 2025. [Online]. Available: https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/content/exposure_dust_pm.
[15] Geneva: World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. 2021. Accessed: 2025. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.
[16] Council of the European Communities. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. Accessed: 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj/eng>.
[17] Eurostat. Renewable freshwater resources – long term annual averages. Accessed: 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wat_ltaa/default/table?lang=en.
[18] United Nations. The United Nations World Water Development Report 2024: water for prosperity and peace. UNESCO, Paris. Accessed: 2025. [Online]. Available: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2024>.
[19] Eurostat. Renewable freshwater resources – long term annual averages (env_wat_ltaa). Accessed: 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.2908/ENV_WAT_LTAA.
[20] Scherer L et al. Biodiversity Impact Assessment Considering Land Use Intensities and Fragmentation, Environ Sci Technol. 2023; <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c04191>.
[21] European Environment Agency (EEA). Soil sealing index (sdg_15_41). Accessed: 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.2908/SDG_15_41.