

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

Economic and environmental evaluation of TRENCHMIX technology and soil replacement

Technologie TRENCHMIX i wymiany gruntów w świetle oceny ekonomiczno-środowiskowej

DOI: 10.15199/33.2024.09.06

Abstract. The article presents the costs and carbon footprint assessment of two soil improvement techniques: TRENCHMIX and soil replacement. The results show that TRENCHMIX technology is more economically viable, but is associated with higher greenhouse gas emissions. Soil replacement, on the other hand, shows a smaller carbon footprint, which is beneficial from a climate and environmental policy perspective.

Keywords: cost assessment; carbon footprint; TRENCHMIX; soil replacement.

Streszczenie. Artykuł prezentuje koszty i ocenę śladu węglowego dwóch technik wzmocnienia podłoża gruntowego: TRENCHMIX i wymiany gruntu. Wyniki wskazują, że technologia TRENCHMIX jest bardziej opłacalna ekonomicznie, lecz wiąże się z wyższymi emisjami gazów cieplarnianych. Z kolei wymiana gruntu wykazuje mniejszy ślad węglowy, co jest korzystne z perspektywy polityki klimatycznej i ochrony środowiska.

Słowa kluczowe: ocena kosztowa; ślad węglowy; TRENCHMIX; wymiana gruntu.

Geotechnical works, due to their energy and material intensity, can have a significant impact on the efficiency of sustainable construction practices. A wide range of geotechnical methods is available, ranging from very traditional techniques, such as foundation piles (e.g., CFA piles, Franki piles), to various advanced ground improvement technologies (e.g., jet grouting). The diversity includes a variety of equipment, materials, and techniques used within these methods. Some methods may utilize prefabricated elements, which can reduce construction time and decrease waste on the construction site. Other technologies may require the use of binders, such as cement (e.g., DSM), while some employ only aggregates (e.g., gravel columns). All these differences can lead to difficulties in selecting the optimal technology for a specific project without conducting a detailed analysis. This challenge is compounded by the possibility of using some of these technologies interchangeably.

The aim of this article is to analyze the costs and assess the environmental impact of two ground improvement methods: TRENCHMIX (Variant I – Figure 1) and soil replacement (Variant II – Figure 2) for a sample project involving the foundation of bridge abutments.

Technology characteristics

The TRENCHMIX technology, also known as the Continuous Deep Mixing Method (CDMM), TRMX, FMI system, or Power Blender, is a ground improvement method from the Deep Mixing Method (DMM) group that involves the creation of vertical soil-cement panels. The process (Figure 1)

Prace geotechniczne, z uwagi na swoją energochłonność i materiałochłonność, mogą mieć istotny wpływ na efektywność zrównoważonych praktyk budowlanych. Istnieje wiele dostępnych metod geotechnicznych, począwszy od tradycyjnych, takich jak pale fundamentowe (np. pale CFA, pale Franki), po różnego rodzaju zaawansowane technologie wzmocnienia podłoża gruntowego (np. jet grouting). Różnice wynikają z różnorodności sprzętu, materiałów i technik stosowanych w ramach poszczególnych metod. W przypadku niektórych z nich można korzystać z elementów prefabrykowanych, co skraca czas budowy i zmniejsza ilość odpadów. Inne technologie mogą wymagać zastosowania spoiwa, takiego jak cement (np. DSM), podczas gdy część wykorzystuje samo kruszywo (np. kolumny żwirowe). Wszystkie te różnice utrudniają wybór optymalnej technologii do konkretnego projektu, bez przeprowadzenia pogłębionej analizy, tym bardziej że niektóre z technologii można stosować w sposób zamienny.

Celem artykułu jest analiza kosztów i ocena środowiskowa dwóch metod wzmocnienia podłoża gruntowego: TRENCHMIX (Wariant I – rysunek 1) oraz wymiany gruntu (Wariant II – rysunek 2) w przypadku projektu przykładowego posadowienia przyczółków mostowych.

Charakterystyka technologii

Technologia TRENCHMIX, znana również jako Continuous Deep Mixing Method (CDMM), TRMX, FMI system i Power Blender, to metoda wzmocnienia podłoża gruntowego z grupy DMM (*Deep Mixing Method*), która polega na wykonywaniu pionowych paneli cemento-gruntowych. Proces (rysunek 1) rozpoczyna się od prac przygotowawczych, które obejmują karczowanie terenu oraz usunięcie humusu. Następnie ma-

¹⁾ Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami; amach@agh.edu.pl

begins with preparatory works, including site clearance and the removal of topsoil. Next, the trenchmixer machine is positioned along the axis of the future barrier, and the soil mixing process begins. The equipment is equipped with a specially designed cutting blade, featuring a rotating chain with cutting knives, adapted for the delivery of the cement slurry and enabling uniform soil mixing along the entire height of the panels, as well as controlled injection of the cement slurry with specific chain speeds on the blade and blade feed rates into the soil [1–2]. As a result of this process, a panel with uniformly modified strength and filtration parameters across its entire profile is created in a deliberate and controlled manner. The chain speeds on the blade, the blade feed rates in the soil, and the parameters of the binder material supplied are adjusted according to the type of soil being processed. A crucial element is the comprehensively equipped construction base, which includes cement storage silos, water tanks, mixing units, and pumps, all connected to the trenchmixer by pressure hoses. This setup allows the cement slurry to be prepared on-site and delivered directly to the equipment, ensuring efficiency and precision in project execution. TRENCHMIX provides an alternative to other geotechnical techniques such as DSM, soil replacement, CFA bored piles, gravel columns, and gravel piles.

Soil replacement [3] is a method involving the partial or complete replacement of weak soil layers with construction embankment material. The backfill material may consist of natural aggregate, crushed stone, or anthropogenic material. The replacement may involve: **partial soil replacement** – replacing the upper, surface layers of weak soils while leaving the lower layers in place, **complete soil replacement** above the groundwater table, **complete soil replacement below the groundwater table** – carried out by displacement or dredging methods.

In case of a risk of excavation wall instability, it is possible to secure the walls, for example, by using sheet piling. In the analyzed project, some of the steel sheet piles were temporarily installed to facilitate the soil replacement process, while a portion of the sheet piles, as shown in Figure 2, remained permanently embedded in the structure.

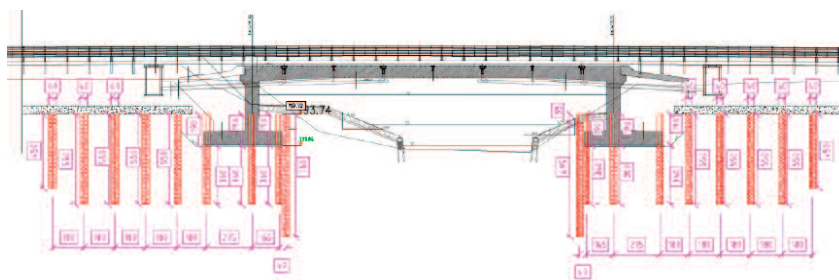


Fig. 1. Project under review – TRENCHMIX technology. Base on „Technological design for ground reinforcement under the MD-1 structure and on the approaches to the structure using soil-cement panels in CDMM technology” for an investment to extend voivodship road 878

Rys. 1. Projekt poddawany analizie – technologia TRENCHMIX. Na podstawie „Projektu technologicznego wzmocnienia podłoża pod obiektem MD-1 i na dojazdach do obiektu panelami gruntobetonowymi w technologii CDMM” w przypadku rozbudowy drogi wojewódzkiej nr 878

szyna robocza, tzw. trenchmixer, ustawiana jest w osi przyszłej przesłony i rozpoczyna się proces mieszania gruntu. Urządzenie robocze wyposażone jest w miecz o specjalnej konstrukcji, z obracającym się łańcuchem i nożami urabiającymi, przystosowany do podawania zaczynu cementowego oraz umożliwiający wykonywanie jednorodnego mieszania gruntu na całej wysokości paneli i iniekcję zaczynu cementowego w kontrolowany sposób, tj. z zadaną prędkością łańcucha na mieczu i posuwu miecza w gruncie [1, 2]. W wyniku tego procesu powstaje jednorodny w całym profilu panel o zmodyfikowanych parametrach wytrzymałościowych i filtracyjnych, w zamierzony i kontrolowany sposób. Prędkość łańcucha na mieczu i posuwu miecza w gruncie oraz parametry dostarczanego materiału wiążącego dostosowywane są do urabianego gruntu. Istotnym elementem jest kompleksowo wyposażone zaplecze budowy. Składa się ono z silosów do przechowywania cementu, zbiorników wodnych oraz agregatów mieszających i pomp, które są połączone z maszyną roboczą za pomocą przewodów ciśnieniowych. Dzięki temu zaczyn cementowy jest przygotowywany na miejscu i dostarczany bezpośrednio do urządzenia, co zapewnia efektywność i precyzję w realizacji projektu. TRENCHMIX stanowi alternatywę dla innych technik geotechnicznych, takich jak DSM, wymiana gruntu, pale wiercone CFA, kolumny żwirowe oraz pale żwirowe.

Wymiana gruntu [3] to metoda polegająca na częściowej lub pełnej wymianie warstw słabonośnych gruntu na nasyp budowlany. Materiał zasypowy może stanowić zarówno kruszywo naturalne, łamane, jak i materiał antropogeniczny. Wymiana może obejmować: **częściową wymianę gruntu** – wymianę górnych, stropowych partii słabonośnych osadów z pozostawieniem dolnych warstw w podłożu; **całkowitą wymianę gruntu** powyżej lustra wody gruntowej; **całkowitą wymianę gruntu poniżej lustra wody gruntowej**, prowadzoną metodą wypierania lub metodą bagrowania.

W razie ryzyka utraty stateczności ścian wykopu istnieje możliwość jego zabezpieczenia np. przez zastosowanie ścianek szczelnych. W analizowanym projekcie część grodzic stalowych została zastosowana tymczasowo, aby umożliwić przeprowadzenie wymiany gruntów, natomiast część grodzic, widoczna na rysunku 2, pozostała na stałe w strukturze budowlanej.

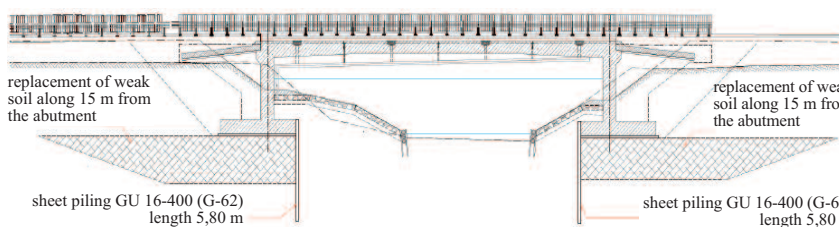


Fig. 2. Project under review – soil replacement. Based on the design documentation for the MD-1 facility for the provincial road 878 extension project

Rys. 2. Projekt poddawany analizie – wymiana gruntu. Na podstawie dokumentacji projektowej obiektu MD-1 w przypadku rozbudowy drogi wojewódzkiej nr 878

Materials and methods of analysis

The environmental assessment was primarily conducted by analyzing the carbon footprint (CF) in accordance with the requirements of the PN-EN ISO 14067 standard [4]. The carbon footprint is defined as the total amount of greenhouse gas (GHG) emissions generated and absorbed by a product. It is expressed in terms of carbon dioxide equivalent (CO₂e) and is based on a full life cycle assessment (phases A-C). The carbon footprint value for individual gases is calculated by multiplying the mass of the emitted gas by its global warming potential over a 100-year time horizon (GWP₁₀₀) (Table 1).

The life cycle of a construction object consists of four main phases: the production of materials (A1 – A3), the constructionstage (A4 – A5), use (B1 – B7), and end-of-life (C1 – C4). The analysis conducted covered the entire life cycle of the CDMM panels and soil replacement, assuming that phases B and C do not require any processes. In ground improvement methods, the first two stages play a key role and are critical for environmental assessment (as well as cost assessment), often serving as its sole basis. Upon the completion of the construction phase, the resulting structures typically do not require further actions during the use phase or at the end-of-life phase – most underground structures remain an integral part of the soil or are utilized as foundations for new structures. Figure 3 illustrates the system boundaries covered in the analysis. The site preparation process (removal of topsoil) was omitted due to the same scope of work being required for both technologies.

Greenhouse gas emissions for the individual phases were assessed as follows:

- Phase A1 – A3 – GHG emissions were estimated based on Type III Environmental Product Declarations (EPD) [6 – 9];

Materiały i metody analizy

Ocena środowiskowa została przeprowadzona przede wszystkim z uwzględnieniem analizy śladu węglowego CF (Carbon Footprint) zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 14067 [4].

Ślad węglowy jest jako suma emisji gazów cieplarnianych GHG (Greenhouse gases) generowanych oraz absorbowanych przez produkt. Jest wyrażany w ekwiwalencie dwutlenku węgla (CO₂e) i bazuje na ocenie pełnego cyklu życia (fazy A-C). Wartość śladu węglowego w przypadku poszczególnych gazów cieplarnianych (tabela 1) jest obliczana przez pomnożenie masy emitowanego gazu przez jego wskaźnik globalnego ocieplenia w okresie stuletnim GWP₁₀₀ (ang. Global Warming Potential).

Cykl życia obiektu budowlanego składa się z czterech głównych faz: wyrobu (A1 – A3); budowy (A4 – A5); użytkowania (B1 – B7) oraz końca życia (C1 – C4). Przeprowadzona analiza obejmowała cały cykl życia paneli CDMM oraz wymiany gruntu, przy czym założono, że fazy B i C nie wymagają żadnych procesów. W metodach wzmocnienia podłoża kluczową rolę odgrywają pierwsze dwa etapy, które są istotne w ocenie środowiskowej (podobnie kosztowej), często stanowiąc jej jedyną podstawę. Po zakończeniu fazy budowy, powstałe konstrukcje zazwyczaj nie wymagają dalszych działań w fazie użytkowania i przy wycofywaniu z eksploatacji. Większość konstrukcji podziemnych pozostaje integralną częścią gruntu lub jest wykorzystywana jako fundamenty nowych obiektów. Rysunek 3 ilustruje granice systemu objęte analizą. Proces przygotowania terenu (usunięcie humusu) został pominięty ze względu na ten sam zakres prac w przypadku obu stosowanych technologii.

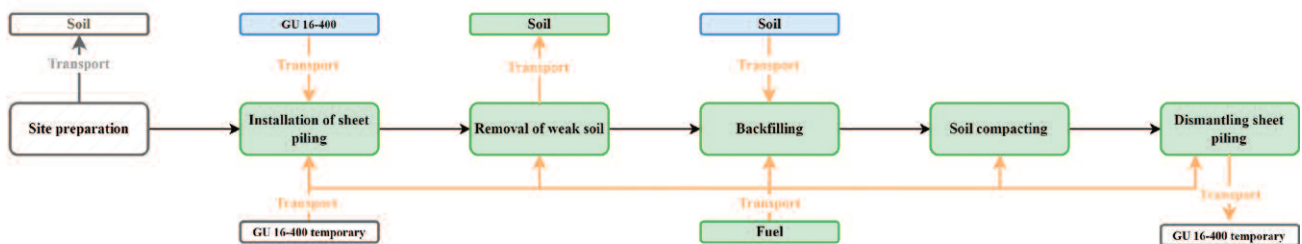
Emisję gazów cieplarnianych w przypadku poszczególnych faz cyklu życia obiektu oceniono w następujący sposób:

- faza A1 – A3 – oszacowanie emisji GHG na podstawie deklaracji środowiskowych typu III (EPD) [6 – 9];

Table 1. GWP₁₀₀ use in analyse [5]
Tabela 1. Wartości wskaźników GWP₁₀₀ gazów cieplarnianych uwzględnianych w analizie [5]

Greenhouse gas/Gaz cieplarniany	GWP ₁₀₀
CO ₂	1
CH ₄ – fossil origin/pochodzenia kopalnego	29,8
CH ₄ – non fossil origin/pochodzenia niekopalnego	27,2
NO ₂	273

SOIL REPLACEMENT



TRENCHMIX

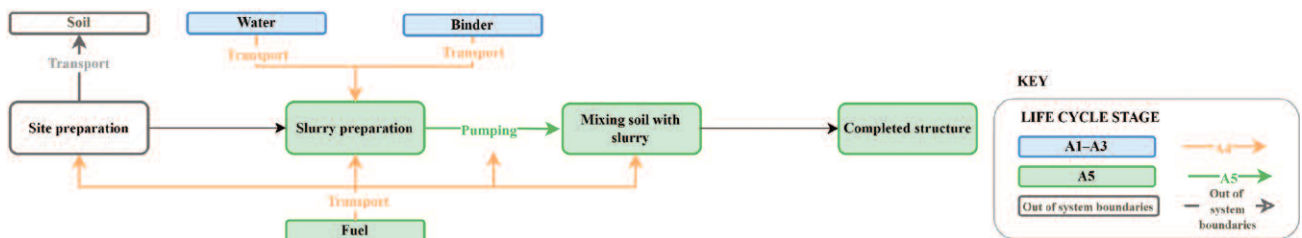


Fig. 3. Boundaries of the system considered in the CF
Rys. 3. Granice systemu uwzględniane w analizie CF

Fig. Own elaboration
Rys. Opracowanie własne

■ Phase A4 – GHG emissions were estimated using the Well-To-Wheel (WTW) method, which includes two stages: Well-To-Tank (WTT) and Tank-To-Wheel (TTW). The first stage accounts for environmental burdens associated with the extraction and processing of raw materials for fuel production, as well as its storage and distribution. This impact was considered using an emission factor of 0.679 kgCO₂e/l [10]. The second stage, TTW, concerns the environmental impacts associated with fuel combustion. This impact was estimated using the Tier 2 method from the EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023, 1.A.3.b.i-iv Road transport [11];

■ Phase A5 – Emissions were estimated similarly to Phase A4, except that fuel combustion emissions were determined using the Tier 2 method for non-road vehicles, based on the EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 – 1.A.4 Non-road mobile machinery 2023 [12].

The inventory data used in the analysis are presented in Table 2. For the CDMM method, data were obtained from records kept during the implementation of the project. In the case of soil replacement, material consumption was determined based on the design documentation, while data on equipment operation were based on KNR 9-06 *Sheet pile walls made of G62 sheet piles, KNR 2-01 (WACETOB) Earthworks and structures*, and equipment specifications.

The cost assessment considered the costs associated with the execution of the works, without including costs related to operation or demolition. For the CDMM method, the cost value of the works was estimated based on an individual calculation using the contractor's data regarding labor standards, equipment operation, and material consumption. Meanwhile, the cost value of the works related to soil replacement was estimated using KNR 9-06 *Steel sheet pile walls made of G62 sheet piles, KNR 2-01 (WACETOB) Earthworks and structures*, and individual calculations. Unit prices for the various cost components were determined based on the available price lists from the third quarter of 2023.

■ faza A4 – oszacowanie emisji GHG z wykorzystaniem metody WTW (*Well-To-Wheel*), która obejmuje dwa etapy: WTT (*Well-To-Tank*) oraz TTW (*Tank-To-Wheel*). Pierwszy etap uwzględnia obciążenia środowiskowe związane z wydobyciem i przetwarzaniem surowców do produkcji paliwa, jego magazynowaniem i dystrybucją. Wpływ ten uwzględniono przy użyciu wskaźnika emisji na poziomie 0,679 kgCO₂e/l [10]. Drugi etap WTT dotyczy wpływów środowiskowych związanych ze spalaniem paliwa. Wpływ ten został oszacowany na podstawie metody Tier 2 z EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 1.A.3.b.i-iv Road transport [11];

■ faza A5 – oszacowano analogicznie jako fazę A4, z tym że emisję ze spalania paliwa określono przy użyciu metody Tier 2 dla pojazdów typu non-road na podstawie EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 – 1. A.4 Non-road mobile machinery 2023 [12].

Dane inwentarzowe wykorzystane w analizie przedstawiono w tabeli 2. W przypadku metody CDMM dane pochodzą z rejestru prowadzonego podczas realizacji inwestycji. W przypadku wymiany gruntu, zużycie materiałów określono na podstawie dokumentacji projektowej, natomiast dane dotyczące pracy sprzętu bazują na KNR 9-06 *Ścianki szczelne stalowe z grodziec G62, KNR 2-01. Budowle i roboty ziemne (WACETOB)* oraz specyfikacjach sprzętowych.

Ocena kosztowa uwzględniła koszty związane z wykonaniem robót, przy jednoczesnym braku kosztów związanych z eksploatacją czy rozbiórką. W przypadku metody CDMM, wartość kosztorysową robót oszacowano na podstawie indywidualnej kalkulacji, wykorzystując dane wykonawcy dotyczące norm pracochłonności, pracy sprzętu oraz zużycia materiałów. Natomiast wartość kosztorysową robót związanych z wymianą gruntu oszacowano z użyciem KNR 9-06. Ceny jednostkowe poszczególnych składników kosztów określono na podstawie dostępnych cenników z III kwartału 2023 r.

Table 2. Inventory data used in the analysis [6 – 12]

Tabela 2. Dane inwentarzowe wykorzystane w analizie [6 – 12]

A1 – A3 Product stage/A1 – A3 Faza wyrobu			A4 Transport				A5 Construction stage/A5 faza budowy		
Type/Rodzaj	Amount [t]/ Przedmiar [t]	CF [kgCO ₂ e/t]	Cargo/Ladunek	Type of transport/ Rodzaj środka transportowego	Standard/ Norma	Distance [km]/ Dystans [km]	Equipment/Sprzęt	Group/Standard/ Fuel type/Grupa/ Norma/Typ paliwa	Fuel consumption [l]/ Zużycie paliwa [l]
TRENCHMIX									
CEM I	324	812,00	cement	diesel 16 – 32 t		12240	excavator/koparka		430
CEM II	245	648,00	water/woda	diesel 16 – 32 t	Euro 6 a/b/c	250	slurry preparation/ wytwórnia zaczynu	1.A.2.g vii/stage IV/diesel	867
Water/Woda	398	10,60	fuel/paliwo	diesel ≤7,5 t		120	Trenchmixer		1374
Soil replacement/Wymiana gruntu									
GU 16-400	75	409,00	GU 16-400	diesel 16 – 32 t		4590	excavator/koparka		1155
GU 16-400 (temporary/tymczasowe)	57,5	–	soil/grunt nienośny	diesel >32 t	Euro 6 a/b/c	18240	crane/dźwig		815
Backfill material/ Materiał zasypowy	5595	1,32	backfill material/ materiał zasypowy	diesel 16 – 32 t		14000	vibro hammer/ wibromłot	1.A.2.g vii/stage IV/diesel	3880
			fuel/paliwo	diesel ≤7,5 t		320	bulldozer/spycharka compactor/zagęszczarka		490 1205

Analysis of results

The analysis showed that the CDMM technology is more advantageous from a financial perspective, as presented in Table 3. The process of forming CDMM panels is virtually waste-free and utilizes native soil, which reduces costs, limits the consumption of natural resources, and accelerates project completion time. An additional advantage of this technology is the absence of vibrations. The carbon footprint for Variant I of the project implementation was approximately 445602 kgCO₂e (Figure 4 and 5). A significant factor contributing to GHG emissions in the TRENCHMIX technology is the use of cement (95%), whose production is highly energy-intensive. A potential direction for reducing greenhouse gases could involve replacing cement with other binding materials, such as those derived from waste [13, 14]. Unfortunately, such solutions are not always feasible due to the limitations related to the strength parameters of these materials.

The soil replacement variant performs better in terms of greenhouse gas emissions, with approximately 96211 kgCO₂e (Figure 4 and 5). In this case, GHG emissions are at similar levels across all analyzed phases, with the largest contribution coming from materials, which account for 40%. When analyzing the costs of soil replacement,

Analiza wyników

Analiza wykazała, że technologia CDMM jest korzystna z finansowego punktu widzenia, co przedstawiono w tabeli 3. Proces formowania paneli CDMM jest praktycznie bezodpadowy i wykorzystuje grunt rodzimy, co ogranicza koszty, ale także zużycie zasobów naturalnych oraz przyspiesza czas realizacji. Dodatkową zaletą tej technologii jest brak drgań. Ślad węglowy wariantu I wykonania inwestycji wyniósł ok. 445 602 kgCO₂e (rysunki 4 i 5). Istotnym czynnikiem wpływającym na emisję GHG w technologii TRENCHMIX jest użycie cementu (95%), którego produkcja jest energochłonna. Kierunek redukcji gazów cieplarnianych może obejmować zastąpienie cementu innym materiałem wiążącym, np. pochodzenia odpadowego [13, 14]. Niestety, takie rozwiązania nie zawsze są możliwe ze względu na ograniczenia związane z parametrami wytrzymałościowymi tych materiałów.

Wariant wymiany gruntu prezentuje się lepiej pod względem emisji gazów cieplarnianych – ok. 96 211 kgCO₂e (rysunek 4 i 5). W tym przypadku emisja GHG wszystkich analizowanych faz jest na podobnym poziomie, z największym udziałem materiałów, które stanowią 40%. Analizując koszty wykonania wymiany gruntu, prace związane z montażem

Table 3. Results of the cost analysis for the options analysed

Tabela 3. Wyniki analizy kosztów analizowanych wariantów

Variant/Wariant	Stage/Etap	Estimated cost [PLN]/Wartość kosztorysowa [zł]
TRENCHMIX	soil mixing with CEM I/ mieszanie gruntu CEM I	423 550
	soil mixing with CEM II/ mieszanie gruntu CEM II	365 551
	total/suma	789 101
Soil Replacement/Wymiana gruntu	driving steel sheet piles/wbijanie ścianek szczelnych stalowych z grodzie G-62	481 406
	excavation work/wykonanie wykopu	83 845
	transport and disposal of excavated material/wywóz i utylizacja urobku	173 837
	purchase and delivery of aggregate/zakup i dostawa kruszywa	110 900
	backfilling the excavation with material/zasypanie wykopu materiałem	3 431
	soil compaction/zagęszczenie gruntu	11 578
	extraction of steel sheet piles/wyciąganie ścianek szczelnych stalowych z grodzie G-62	54 214
	total/suma	919 211

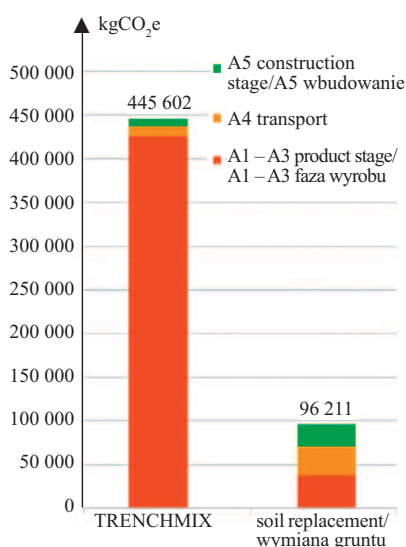


Fig. 4. Carbon footprint for TRENCHMIX technology and soil replacement

Fig. Own elaboration

Rys. 4. Ślad węglowy technologii TRENCHMIX oraz wymiany gruntu

Rys. Opracowanie własne

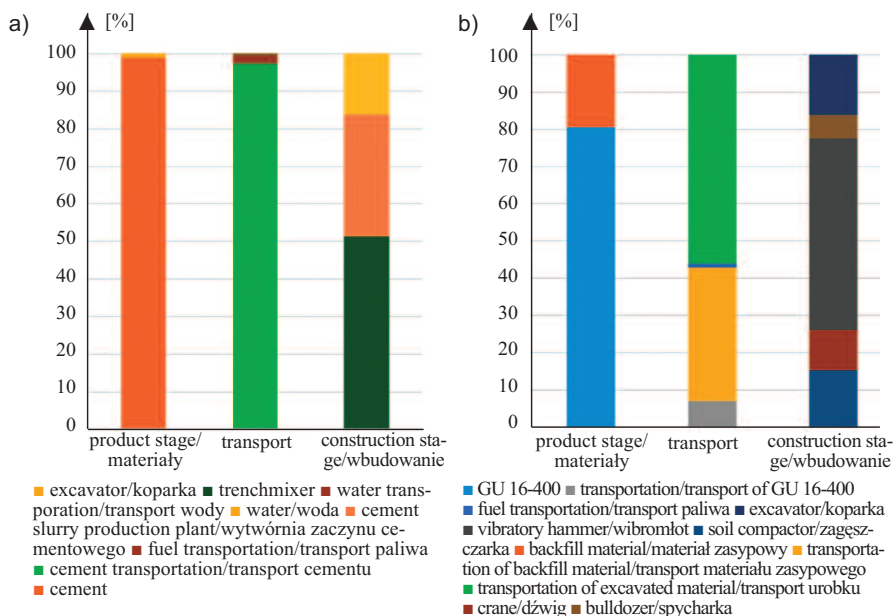


Fig. 5. Share of individual emission sources in the life cycle phases analysed: a) TRENCHMIX; b) soil replacement

Fig. Own elaboration

Rys. 5. Udział poszczególnych źródeł emisji w analizowanych fazach cyklu życia: a) TRENCHMIX; b) wymiana gruntu

Rys. Opracowanie własne

the work related to the installation and removal of steel sheet piles represents a significant portion (58%). However, this is not always a mandatory stage of this technology and depends on the specifics of the project, including soil and water conditions. This fact can significantly reduce the costs of this method and increase its cost effectiveness. Fees related to the disposal of excavated soil also have a notable impact on costs (19%).

From an environmental impact perspective, it is worth considering an additional analysis of other impact categories, such as abiotic depletion, especially given the use of aggregate, which can significantly affect local ecosystems and natural resources.

Summary

This comparative analysis of the CDMM technology and the soil replacement method demonstrates that each has its specific advantages and limitations, which must be considered in the context of a particular project. The CDMM technology is more financially advantageous and has a lower impact on the local environment by minimizing vibrations and waste production. On the other hand, the highly energy-intensive process of cement production, a key component in this technology, results in a higher carbon footprint. The soil replacement variant performs better in terms of greenhouse gas emissions, which is crucial from the perspective of environmental goals and climate policy. Additionally, when excavation support is not required, this method is characterized by simplicity in execution.

Received: 08.07.2024

Revised: 02.08.2024

Published: 23.08.2024

i demontażem grodzie stalowych stanowią udział 58%, ale nie zawsze są obowiązkowym etapem tej technologii i zależą od specyfiki inwestycji, w tym warunków gruntowych i wodnych. Może to znacznie obniżyć koszty tej metody i zwiększyć opłacalność. Opłaty związane z utylizacją wydobytego gruntu mają też niewątpliwie wpływ na koszty (19%).

Pod kątem wpływu na środowisko warto rozważyć dodatkową analizę innych kategorii wpływu, takich jak wyczerpanie się zasobów abiotycznych, szczególnie biorąc pod uwagę wykorzystanie kruszywa, które może mieć istotny wpływ na lokalne ekosystemy i zasoby naturalne.

Podsumowanie

Analiza porównawcza technologii CDMM i metody wymiany gruntowej wykazała, że każda z nich ma specyficzne zalety i ograniczenia, które należy rozważać w kontekście konkretnego projektu. Technologia CDMM jest korzystniejsza finansowo i charakteryzuje się mniejszym wpływem na lokalne środowisko przez minimalizację drgań i produkcji odpadów. Z drugiej strony energochłonny proces produkcji cementu, kluczowego składnika w tej technologii, przekłada się na duży ślad węglowy. Wariant wymiany gruntowej prezentuje się lepiej w kontekście emisji gazów cieplarnianych, co jest kluczowe z punktu widzenia celów środowiskowych i polityki klimatycznej. Ponadto, metoda ta odznacza się prostotą wykonania, gdy nie ma potrzeby stosowania zabezpieczeń wykopu.

Wpłynął do redakcji: 08.07.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 02.08.2024 r.

Opublikowano: 23.08.2024 r.

Literatura

- [1] Hoffmann M. GEOMIX® i TRENCHMIX® Innowacyjne technologie głębokiego mieszania gruntu firmy Soletanche Polska. *Geoinżynieria drogi mosty tunele*. 2008; 2, no. 17: 68 – 72.
- [2] Hanke R, Trybocka K, Jończyk-Szostek M, Kanty P. Innowacyjna technologia mieszania gruntu. *Materiały Budowlane*. 2020; DOI: 10.15199/33.2020.02.03.
- [3] Łęcki P, Różański M. Wzmacnianie podłoża gruntowego budowli drogowych. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*. 2015.
- [4] PN-EN ISO 14067:2018-10 – Gazy cieplarniane. Ślad węglowy wyrobów. Wymagania i wytyczne dotyczące kwantyfikacji. 2018.
- [5] Forster P et al. The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity, in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, NY, 2021, pp. 923–1054. DOI: 10.1017/9781009157896.009.
- [6] The International EPD® System. Environmental Product Declaration EcoSheetPile™ Plus – Steel Sheet Piles, S-P-11071. Accessed: 2024. [Online]. Available: <https://sheetpiling.arcelormittal.com/download-center/epd-lca-download/>.
- [7] The International EPD® System. Environmental Product Declaration Land-won aggregates S-P-04282. [Online]. Available: www.zvyras.lt.

- [8] Instytut Techniki Budowlanej ITB. Deklaracja Środowiskowa III Typu-EPD Cementy CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V produkowane w Polsce 116/2020. [Online]. Available: www.itb.pl.
- [9] A WINT White paper. The Carbon Impact of Water. Accessed: 2024. [Online]. Available: <https://wint.ai/blog/the-carbon-footprint-of-water/>.
- [10] Prussi M, Yugo M, De Prada L, Padella M, Edwards R, Lonza L. JEC Well-to-Tank report v5. EUR 30269 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 2020; DOI: 10.2760/959137.
- [11] Ntziachristos L, Samaras Z. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 1. A.3.b.i-iv Road transport 2023. European Environment Agency. Accessed: 2024. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view>.
- [12] Winther M, Dore C. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 1.A. 4 Non road mobile machinery 2023. European Environment Agency. Accessed: 2024. [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>.
- [13] Wałach D. Economic and environmental assessment of new generation concretes. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*. 2020; vol. 960, no. 042013. DOI: 10.1088/1757-899X/960/4/042013.
- [14] Wałach D. Wpływ składu mieszanek betonowych nowej generacji na ich ślad węglowy. *Materiały Budowlane*. 2023; DOI: 10.15199/33.2023.06.07.