

# Wybrane przykłady emisji CO<sub>2</sub> w pracach geoinżynierskich

Selected examples of CO<sub>2</sub> emissions in geoenineering works

mgr inż. Artur Gaszewski, mgr inż. Marcin Sternalski, Keller Polska sp. z o.o.

DOI 10.5604/01.3001.0053.8518

**Streszczenie:** Cały sektor budownictwa w skali globalnej odpowiada za 40% zużycia energii oraz aż za 38% globalnej emisji dwutlenku węgla. W artykule wskazano dwie główne bariery stojące na drodze w osiągnięciu niskoemisyjności w geotechnice: znaczny koszt badań i opracowań służących do wdrożenia niskoemisyjnych praktyk projektowych i technologii budowlanych, jak również trudności w określaniu wpływu niektórych działań geotechnicznych na ogólną trwałość projektu w aspekcie niskoemisyjności. W artykule przedstawiono zastosowanie ogólnodostępnego kalkulatora opracowanego przy udziale Europejskiego Stowarzyszenia Wykonawców Fundamentów Specjalnych (EFCC) w odniesieniu do trzech projektów budowlanych, tożsamy pod względem technicznym, ale zrealizowanych przy zastosowaniu różnych technologii i produktów. Na podstawie kalkulacji śladu węglowego wykazano, iż technologie wzmocnienia gruntu, które nie wykorzystują betonu i cementu, zazwyczaj wykazują się zdecydowanie niższą emisją CO<sub>2</sub>.

**Słowa kluczowe:** niskoemisyjność w geotechnice, kolumny żwirowe, wzmacnianie gruntu.

**Abstract:** The entire construction sector on a global scale is responsible for 40% of energy consumption and as much as 38% of global carbon dioxide emission. In the article there were stated two main barriers to achieving low-carbon geotechnics: the significant cost of research and scientific descriptions made to implement low-emission design practices and construction technologies, as well as the difficulties in determining the impact of certain geotechnical activities on the overall sustainability of the project in the aspect of low-emission. In the article's title there was presented the use of a publicly available calculator developed with the participation of The European Federation of Foundation Contractors (EFCC) in relation to three construction projects, identical in technical terms, but realised using different technologies and products. Based on carbon footprint calculations it was shown, that soil improvement technologies not using concrete and cement usually have significantly lower CO<sub>2</sub> emissions.

**Keywords:** low emission in geotechnics, stone columns, soil improvement.

## 1. Wprowadzenie

Ponieważ budownictwo, budowle i budynki pośrednio i bezpośrednio odpowiadają za największą ze wszystkich branż przemysłu emisję dwutlenku węgla, stąd ogromna rola i odpowiedzialność wszystkich stron procesu budowlanego za zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub>. Obecni uczestnicy polskiego rynku budowlanego rzadko podejmują decyzje o zastosowaniu technologii czy produktu na podstawie emisyjności czy wpływie na środowisko. Przykładem takich działań może być stosowanie w geotechnice technologii i produktów niskoemisyjnych. W niniejszym artykule, na bazie doświadczeń firmy Keller, porównaliśmy kilka przykładów wzmocnienia gruntu i posadowienia obiektów zrealizowanych na przestrzeni ostatnich kilku lat. Przy użyciu kalkulatora opracowanego przez EFCC (Europejskie Stowarzyszenie Wykonawców Fundamentów Specjalnych) oszacowana została wielkość emisji CO<sub>2</sub> dla rozwiązań równorzędnych pod względem technicznym, ale różniących się sposobem wykonania. Analiza wykazała, że główne źródła emisji CO<sub>2</sub> w trakcie prac geotechnicznych to wykorzystanie wysokoemisyjnych materiałów (stali,

cementu, betonu), w następnej kolejności – transport pracowników, transport materiałów oraz spalanie paliwa przez maszyny budowlane. Zastosowanie technologii wykorzystujących naturalne materiały (np. kolumny żwirowe, dynamiczne ubijanie, dynamiczna wymiana gruntu) zmniejsza kilkukrotnie emisję CO<sub>2</sub> w porównaniu do produktów z użyciem stali, betonu i cementu (pale i kolumny żelbetowe). Drugim czynnikiem pozwalającym znacznie ograniczyć emisję CO<sub>2</sub> jest redukcja transportu, czyli korzystanie z lokalnych dostawców, podwykonawców. Trzecim pod względem udziału jest spalanie paliwa przez maszyny budowlane. W tym przypadku alternatywą jest korzystanie z paliw alternatywnych (HVO, biopaliwa) lub wykorzystanie maszyn z silnikami elektrycznymi. Koniecznym warunkiem do podejmowania świadomych decyzji jest jednak całościowa analiza i kalkulacja śladu węglowego dla inwestycji budowlanej.

## 2. Budownictwo jako główny emitent CO<sub>2</sub>

Zgodnie z danymi opublikowanymi na Światowym Forum Ekonomicznym odbywającym się styczniu 2023 roku

istniejące budynki, budowle oraz cały sektor budownictwa łącznie odpowiadają za 40% zużycia energii oraz aż za 38% globalnej emisji CO<sub>2</sub>, 28% globalnej emisji CO<sub>2</sub> związane jest z ogrzewaniem, klimatyzacją i oświetleniem budynków, a pozostałe 10% dotyczy produkcji materiałów budowlanych. Ograniczenie emisji w budownictwie stanowi zatem kluczowy element strategii osiągnięcia celu neutralności.

Wysiłki mające na celu zmniejszenie emisji w Polsce, w sektorze budownictwa są kierowane głównie na poprawę efektywności energetycznej budynków. W tym przypadku chodzi przede wszystkim o termomodernizację istniejących budynków. Rząd Polski w strategii na lata 2020–2030 zaplanował modernizację około ćwierć miliona budynków rocznie. Z energochłonnością budynków szczególnie nowo budowanych, zasilanych zresztą coraz częściej energią ze źródeł odnawialnych, będzie więc coraz mniejszy problem. Większym wyzwaniem pozostaje tzw. „wbudowany” ślad węglowy, który jest zawarty przede wszystkim w materiałach budowlanych, czyli w betonie, prefabrykacjach, stali, aluminium, szkłe czy wreszcie całym wyposażeniu budynków. Sprzyja temu obecny stan przepisów, które głównie dotyczą emisji związanych z ogrzewaniem i zasilaniem budynków, a pomijają ślad „wbudowany”.

Ten problem dotyczy w dużej mierze produkcji cementu, głównego składnika betonu, który jest drugim co do wielkości przemysłowym emitentem gazów cieplarnianych na świecie. Biorąc pod uwagę różne etapy produkcji, 4 miliardy ton cementu produkowanego każdego roku (ponad połowę wytwarzają Chiny) odpowiada za 8% antropogenicznych emisji CO<sub>2</sub> na świecie. W Polsce produkcja cementu stanowi jedną piątą całkowitej emisji polskiego przemysłu. Produkcja stali odpowiada za kolejne 9% tych emisji. Szacuje się, że konieczna dekarbonizacja sektora budowlanego wymaga zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub> do 2030 roku o 60%.

### 3. Główne bariery dla niskoemisyjnej praktyki w inżynierii geotechnicznej

Obecnie głównymi przeszkodami uniemożliwiającymi przyjęcie bardziej zrównoważonych praktyk w inżynierii geotechnicznej są brak świadomości i motywacji oraz koszty. Ponadto złożoność i fragmentacja obecnego łańcucha budowlanego utrudnia całościową ocenę skutków zastosowania różnych technologii, produktów, rozwiązań i procedur. Niektóre z obecnych barier dla zrównoważonego budownictwa geotechnicznego oraz podejścia, które można przyjąć w celu przezwyciężenia każdej z nich przedstawiono w tabeli 1.

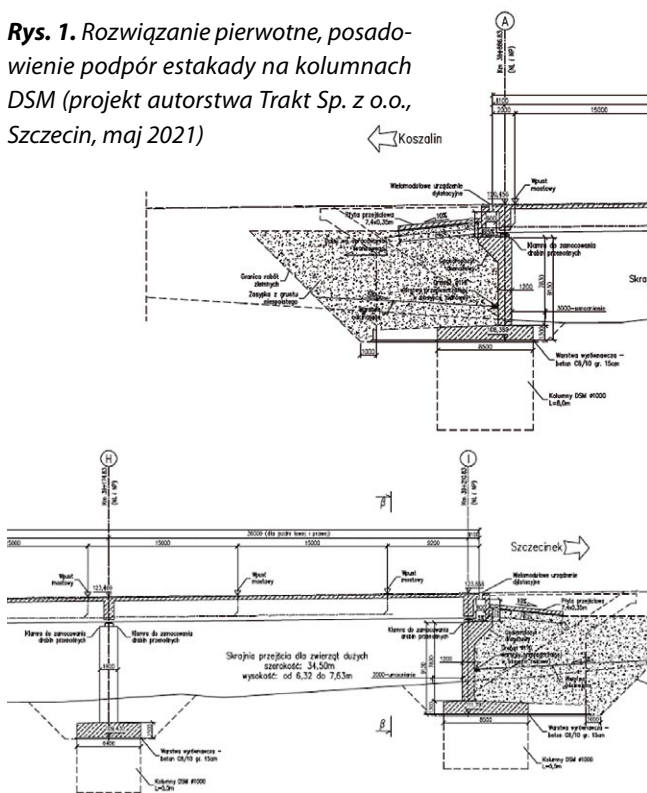
**Tabela 1.** Główne bariery dla niskoemisyjności geotechniki (na podstawie: *How to integrate sustainability into geotechnical practice*. L. Villoria & D. Sandilands)

| Rodzaj bariery | Opis bariery  | Możliwe sposoby likwidacji barier   |
|----------------|---|---|
| Kosztowy       | Wysoki koszt badań, opracowania i wdrożenia zasad wspierających niskoemisyjne praktyki projektowe i technologie budowlane. Wyższe koszty stosowania niskoemisyjnych technologii i produktów. Długoterminowy zwrot ze stosowania niskoemisyjnych projektów i technologii.  | Wdrożenie nowych metod projektowania i specyfikacji nowych materiałów w sektorze geotechnicznym w celu wyeliminowania dodatkowego czasu i kosztów związanych z nowymi technologiami i materiałami. Rozważenie wieloaspektowych ocen kosztów w porównaniu z prostszymi, pojedynczymi analizami korzyści. Zachęty rynkowe i rządowe, zwiększone zapotrzebowanie użytkowników na zrównoważony rozwój.  |
| Techniczny     | Problemy z określeniem wpływu niektórych działań geotechnicznych na ogólną trwałość konstrukcji. Wczesne zaangażowanie praktyków geotechniki (i wszystkich innych dyscyplin) przy opracowywaniu strategii zrównoważonego budownictwa dla projektu. Wprowadzenie nowych umiejętności i technologii, które mogą zwiększyć ryzyko budowlane. Menadżerowie i projektanci, którzy kierują projektem, zazwyczaj nie są specjalistami w dziedzinie geotechniki, co nieco zmniejsza skuteczność inicjatyw geotechnicznych. Awersja do ryzyka, specjaliści są mniej skłonni do projektowania/specyfikacji nowych rozwiązań i materiałów, z którymi nie mają doświadczenia i które nie są sprawdzone. | Zachęty rządowe w połączeniu z odpowiednimi szkoleniami. Inwestycje rządowe w okresowe przeglądy norm i wytycznych, otwartość/zachęcanie do stosowania nowych rozwiązań i materiałów. Prace geotechniczne mają miejsce zazwyczaj na wczesnym etapie cyklu życia projektu, np. wstępne badania gruntu w celu oceny wykonalności projektu oraz oceny wpływu na środowisko. Rozwiązania dotyczące zrównoważonego rozwoju w dziedzinie geotechniki mogą być zatem brane pod uwagę przez osoby decyzyjne na wczesnym etapie projektu. Zwiększenie badań, zasobów szkoleniowych i transferu wiedzy w ramach sektora geotechnicznego i inżynierskiego. Zarówno rząd, jak i firmy prywatne muszą promować zrównoważony rozwój i upoważnić pracowników do jego realizacji. |
|                | Specjaliści z dziedziny geotechniki nie mają świadomości lub są niepewni co do nowych technologii, procesów i materiałów. Przewaga myślenia konwencjonalnego.   | Zwiększenie liczby badań, zasobów szkoleniowych i transferu wiedzy w ramach sektora geotechnicznego. Zarówno rząd, jak i firmy prywatne muszą promować zrównoważony rozwój i upoważnić pracowników do jego realizacji.  |

#### 4. Porównanie rozwiązań geotechnicznych pod kątem emisji CO<sub>2</sub> dla wybranych projektów. Przykłady

Aktualny stan wiedzy geotechnicznej w połączeniu z dostępnymi narzędziami do kalkulacji śladu węglowego pozwala w prosty i szybki sposób porównać alternatywne rozwiązania wzmocnienia gruntu czy też posadowienia budowli. Równorzędne pod względem poprawności technicznej, bezpieczeństwa konstrukcji, a nawet podobne kosztowo mogą się znacznie różnić jeśli chodzi o emisję CO<sub>2</sub>. Oczywiście równoważne pod względem geotechnicznym rozwiązania mogą determinować różnice w konstrukcji budowli, ale dla nich również stosunkowo łatwo jest oszacować ślad węglowy. Stosowanym coraz powszechniej narzędziem jest kalkulator opracowany przy udziale EFFC (Europejskie Stowarzyszenie Wykonawców Fundamentów Specjalnych), które zrzesza krajowe organizacje w tym Polskie Zrzeszenie Wykonawców Fundamentów Specjalnych. Kalkulator (ogólnie dostępny) pozwala oszacować konkretną wartość emisji CO<sub>2</sub> powodowaną przez różne technologie wzmocnienia gruntu, posadowienia pośredniego (palowania) lub zabezpieczenia wykopu, biorąc pod uwagę m.in. użyte materiały, logistykę transportów i dostaw oraz powstały urobek technologiczny. Z dość dużą dokładnością możemy przyjrzyć się, jaki udział w produkcji śladu węglowego mają poszczególne procesy, ale również wbudowywane materiały budowlane. Tego typu analizy porównawcze są już prowadzone przez niektórych wykonawców geotechnicznych dla wybranych projektów. W zależności od charakteru projektu, technologii, miejsca

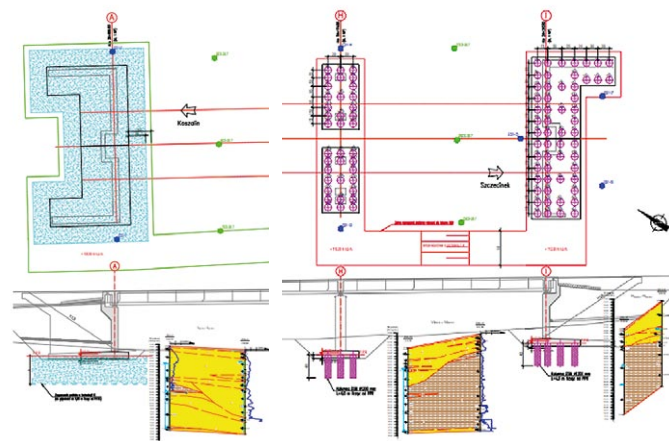
**Rys. 1.** Rozwiązanie pierwotne, posadowienie podpór estakady na kolumnach DSM (projekt autorstwa Trakt Sp. z o.o., Szczecin, maj 2021)



wykonywania prac udział poszczególnych procesów się zmienia. Kilka przykładów kalkulacji śladu węglowego dla tożsamyh pod względem technicznym rozwiązań ale przy zastosowaniu różnych technologii i produktów przedstawiamy poniżej.

**Przykład 1: Budowa drogi S11 Koszalin Zachód – Bobolice. Posadowienie estakady ES-39.14**

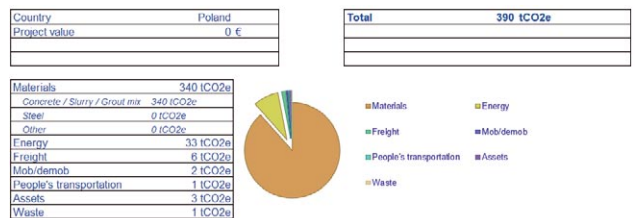
Pierwotne rozwiązanie zakładało posadowienie estakady na kolumnach DSM (Deep Soil Mixing) Ø1000 mm o długościach od 5,5 do 8,0 m, w liczbie 519 szt. i długości całkowitej 3436 mb. Wykonawca (Keller) zastosował alternatywne kombinowane rozwiązanie. Na części podpór wykonano kolumny DSM, a tam gdzie warunki gruntowe pozwalały dla wzmocnienia gruntu, użył zagęszczania impulsowego IC



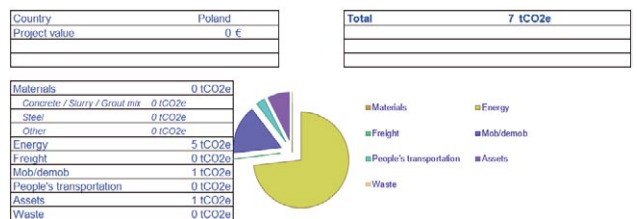
**Rys. 2.** Rozwiązanie alternatywne, posadowienie podpór estakady na podłożu wzmocnionym ubijaniem impulsowym i kolumnami DSM (projekt autorstwa Keller Polska Sp. z o.o., Szczecin, sierpień 2021)

**Tabela 2.** Porównanie emisji CO<sub>2</sub>, kalkulacja emisji dla obu rozwiązań

Kalkulacja emisji CO<sub>2</sub> dla posadowienia na kolumnach DSM



Kalkulacja emisji CO<sub>2</sub> dla posadowienia na gruncie wzmocnionym w technologii IC oraz kolumnami DSM



(Impact Compaction). Sumarycznie wykonano ok. 3005 m<sup>2</sup> zagęszczania impulsowego oraz 95 szt. kolumn DSM Ø1200 mm o całkowitej długości 380 mb.

Zastąpienie częściowe kolumn DSM dynamicznym ubijaniem pozwoliło ograniczyć emisję CO<sub>2</sub> na tym projekcie o ponad 98% tj. o 383 tony. W przypadku rozwiązania pierwotnego największy udział w emisji CO<sub>2</sub> miało użycie cementu. Największy udział w śladzie węglowym w technologii zagęszczania impulsowego wynikał ze spalania oleju napędowego do zapewnienia pracy sprzętu budowlanego.

**Przykład 2: S1 Kosztowy – Bielsko Biała odc. II Oświęcim – Dankowice. Posadowienie nasypów drogowych**

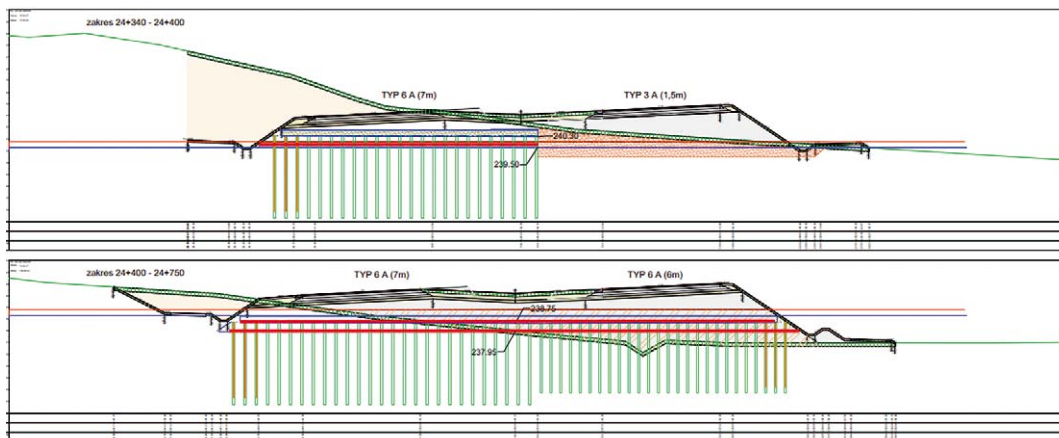
Projekt pierwotny wzmocnienia 400-metrowego odcinka drogi o powierzchni 18030 m<sup>2</sup> zakładał wykonanie kolumn

przemieszczeniowych CMC (Controlled Modulus Columns), o łącznej długości 21200 mb.

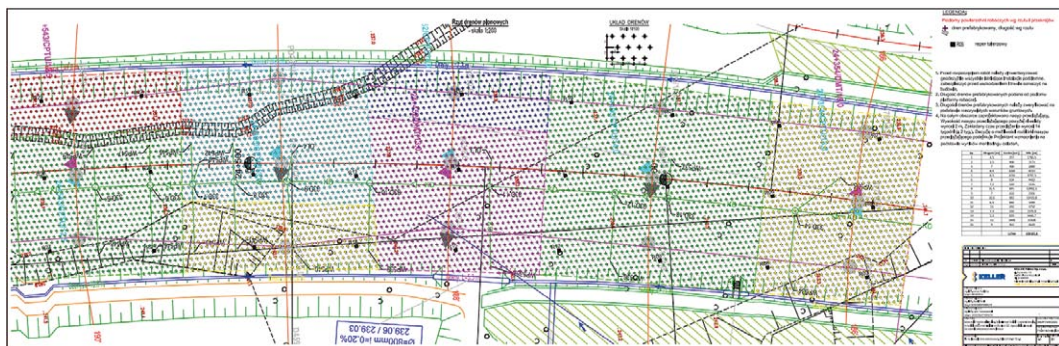
Wykonawca (Keller) zaproponował rozwiązanie zamienne wykorzystujące technologię drenów prefabrykowanych (PVD – Prefabricated Vertical Drains) z nasypem przeciążającym i przyspieszoną konsolidacją. Zainstalowano 11744 sztuk drenów prefabrykowanych o sumarycznej długości 100186 mb. Objętość nasypu przeciążającego 42000 m<sup>3</sup>.

Rozwiązanie z zastosowaniem drenów i nasypu przeciążającego pozwoliło ograniczyć emisję CO<sub>2</sub> na tym projekcie o ponad 70%, tj. o 1350 ton. W przypadku rozwiązania oryginalnego większość emisji spowodowana byłaby zastosowaniem betonu. W rozwiązaniu zamiennym główna część emisji pochodziła ze spalania oleju napędowego przez sprzęt budowlany oraz paliwo do transportu materiału do zbudowania nasypu przeciążeniowego.

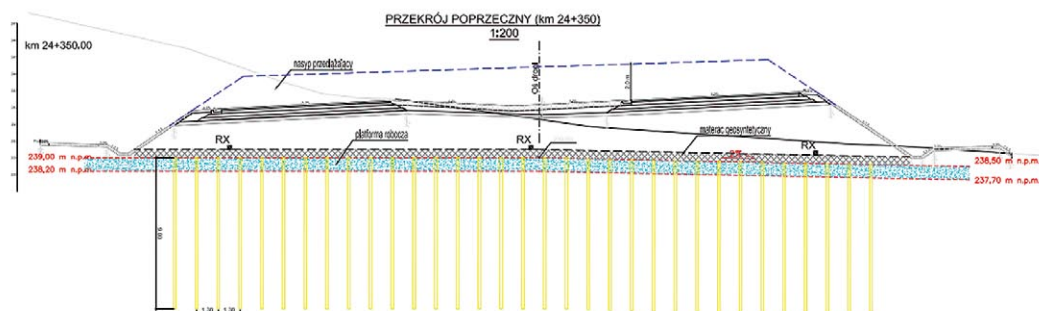
**Rys. 3.** Przekroje poprzeczne wzmocnienia za pomocą kolumn przemieszczeniowych CMC (projekt autorstwa IVIA S.A, Katowice, listopad 2021)



**Rys. 4.** Rozwiązanie zamienne w technologii drenów prefabrykowanych (PVD) z nasypem przeciążającym, plan rozmieszczenia drenów (projekt autorstwa Keller Polska Sp. z o.o., Wrocław, luty 2023)

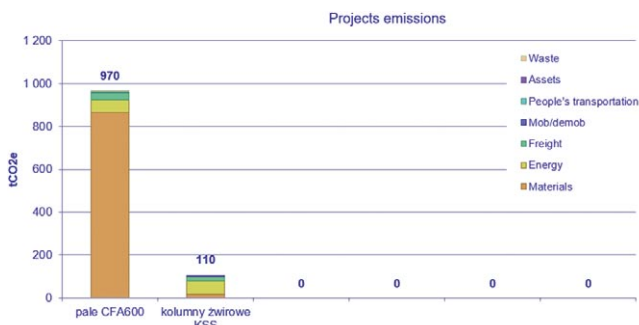


**Rys. 5.** Rozwiązanie zamienne firmy Keller w technologii drenów prefabrykowanych (PVD z nasypem przeciążającym, przekrój charakterystyczny)





**Tabela 6.** Porównanie emisji dla obu rozwiązań



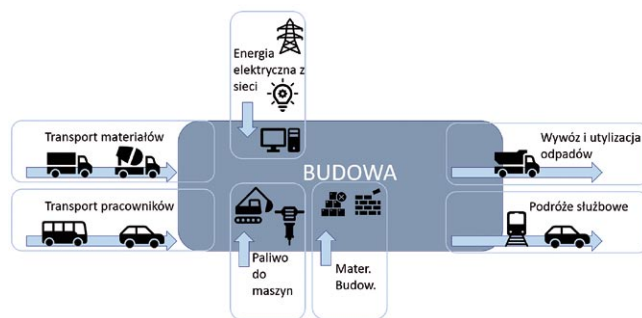
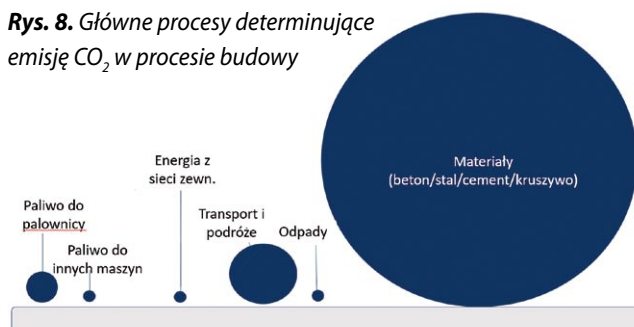
Największy udział w śladzie węglowym dla kolumn żwirowych miało spalanie oleju napędowego do zapewnienia pracy sprzętu budowlanego.

## 5. Podsumowanie

Powyższe przykłady, jak również kalkulacje wykonywane przez pracowników firmy Keller dla innych projektów, wskazują główne procesy decydujące o wielkości emisji w trakcie prac geotechnicznych: produkcja i wbudowanie materiałów budowlanych, transport materiałów, transport pracowników i podróże służbowe, paliwo do maszyn budowlanych, wywóz i utylizacja odpadów oraz wykorzystanie energii z sieci.

Jeżeli chodzi o udział poszczególnych procesów w wielkości emisji – na rysunku 8 przedstawiono szacunkowy rozkład. Dobór odpowiedniego sposobu wzmocnienia gruntu lub posadowienia pośredniego obiektu jest kluczowy dla pracy i bezpieczeństwa konstrukcji, ale również całościowych kosztów inwestycji. Jak pokazuje obecna praktyka inżynierska, koszt najczęściej determinuje metodę. Niezmiernie rzadko przy wyborze technologii kierujemy się stopniem jej oddziaływania na środowisko. Wykonane kalkulacje emisji CO<sub>2</sub>, prowadzone przy użyciu kalkulatora rekomendowanego przez EFFC, potwierdzają przewidywania, że technologie wzmocnienia gruntu, które nie wykorzystują betonu i cementu, zazwyczaj wykazują zdecydowanie niższą emisję CO<sub>2</sub>. Wyjątkowo korzystnie wypadają tutaj kolumny żwirowe, wibroflotacja, dynamiczne zagęszczanie gruntu, zagęszczanie impulsowe, drenaże prefabrykowane i przyspieszona konsolidacja. Są to metody, które poprawiają własności

**Rys. 8.** Główne procesy determinujące emisję CO<sub>2</sub> w procesie budowy



**Rys. 9.** Udział poszczególnych procesów budowy w wielkości emisji CO<sub>2</sub>

mechaniczne gruntu bez użycia materiałów z zewnątrz (dynamiczne ubijanie, zagęszczanie impulsowe) lub wykorzystujące materiały naturalne takie jak piasek czy żwir (wibroflotacja, kolumny żwirowe). Nie zawsze jednak mamy możliwość zastosowania „łżejszych” technologii. W przypadku konieczności zastosowania ciężkiego fundamentowania z użyciem betonu czy stali, ilość emitowanego CO<sub>2</sub> drastycznie rośnie. Wówczas o wielkości emisji decydują ilość oraz rodzaj użytych materiałów, np. cementy czy spoiwa na bazie popiołów. Ale również rodzaj, wiek, liczba maszyn budowlanych, sprawność wykonawcy (czas wykonania – niższe spalanie ON, krótszy pobyt na budowie, mniejsze zużycie energii do zasilania zaplecza socjalnego).

Powinniśmy dążyć, żeby już w najbliższej przyszłości analiza stosowanych materiałów, technologii geotechnicznych, ale również rozwiązań projektowych pod kątem emisji CO<sub>2</sub> była coraz powszechniejsza. Powinniśmy rozwijać system wspierający inwestorów prywatnych i publicznych dla stosowania metod, pozostawiających mniejszy ślad węglowy. Przeprowadzone analizy wskazują również na możliwość redukcji śladu węglowego poprzez optymalizację procesu budowlanego. Wśród potencjalnych źródeł oszczędności można wymienić ograniczenie transportu poprzez korzystanie z lokalnych dostawców, stosowanie materiałów budowlanych których produkcja emituje mniej CO<sub>2</sub> (np. użycie cementów hutniczych CEM III zamiast CEM I) lub też stosowanie nowoczesnych maszyn ograniczających zużycie ON.

Na wszystkich uczestnikach procesu budowlanego spoczywa odpowiedzialność za kierunek rozwoju branży budowlanej, mającej tak duży udział w globalnej emisji CO<sub>2</sub>. Ale zanim zmiany nastąpią, możemy zacząć od mniejszych kroków – poprzez analizę emisji CO<sub>2</sub> i śladu węglowego na wczesnym etapie robót geotechnicznych, poprzez zwracanie się w kierunku produktów przyjaznych środowisku, oraz na drodze optymalizacji procesu budowlanego.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Czym jest neutralność emisyjna i jak możemy ją osiągnąć do 2050 r. – portal parlamentu europejskiego
- [2] Ograniczanie emisji gazów cieplarnianych w UE: krajowe cele na 2030 r. – portal parlamentu europejskiego
- [3] Krukowska M., Budowa niskoemisyjnej przyszłości. Dekarbonizacja w budownictwie, Forbes
- [4] Villoria L., Sandilands D., How to integrate sustainability into geotechnical practice