

## Możliwość redukcji emisji CO<sub>2</sub> dzięki zastosowaniu geosyntetyków

Dr inż. Angelika Duszyńska

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Jako redaktor działu Geosyntetyki istniejącego od 2010 roku w czasopiśmie naukowo-technicznym Inżynieria Morska i Geotechnika, i wieloletni pracownik Katedry Geotechniki, współpracujący od ponad 20 lat z Redaktorem Naczelnym prof. Eugeniuszem Dembickim, z wielką przyjemnością przyjąłem propozycję napisania artykułu do jubileuszowego numeru IMiG.

Swój artykuł, jak pewnie większość czytelników spodziewa się, chciałabym poświęcić geosyntetykom, którymi zainteresowanie zaszczylił we mnie Profesor E. Dembicki wraz z promotorem mojej pracy doktorskiej dr hab. inż. Adamem Boltem, prof. nadzw. PG.

Wśród inżynierów dość powszechna jest obecnie wiedza o korzyściach wynikających z zastosowania geosyntetyków w budownictwie i inżynierii środowiska. W porównaniu do tradycyjnych technologii geosyntetyki pozwalają na uzyskanie znacznych oszczędności finansowych oraz skrócenie czasu wykonania robót. Wydaje się jednak, że wciąż stosunkowo niewielka jest świadomość tego, że oprócz korzyści ekonomicznych,

zastosowanie geosyntetyków w budownictwie ma bardzo duży i bardzo korzystny wpływ na ochronę środowiska.

Według powszechnej opinii, główną przyczyną obserwowanych na Ziemi zmian klimatu jest efekt cieplarniany, spowodowany przede wszystkim wzrostem emisji dwutlenku węgla. Uwarunkowania prawno-polityczne (Protokół z Kioto) stwarzają konieczność podjęcia działań na rzecz ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> w celu zmniejszenia stężenia dwutlenku węgla w atmosferze. Jednym z kierunków działań jest wdrażanie i rozwój technologii charakteryzujących się niską emisją dwutlenku węgla.

W rozwiązaniach geotechnicznych tzw. geosystemy okazują się znacznie bardziej wydajne środowiskowo i opłacalne niż tradycyjne podejścia, szczególnie te oparte na betonie. Odpowiednie zastosowanie rozwiązań wykorzystujących geosystemy pozwala na znaczne korzyści związane z ograniczeniem ilości emisji tzw. wbudowanego dwutlenku węgla.

Pojęcie wbudowanej emisji węgla (lub dwutlenku węgla) stanowi miarę skumulowanej energii (stąd emisja dwutlenku wę-

gla) wymaganej do wytworzenia, przetransportowania i wykorzystania danego wyrobu. Przykładowo emitowany dwutlenek węgla zawarty w betonie jest wynikiem wielu procesów, m.in. wydobywania, obróbki i transportu cementu i kruszywa. Analizując ilość wbudowanego dwutlenku węgla w konstrukcji betonowej, należy rozważyć wszystkie jej wyjściowe elementy składowe, jak również konstrukcję jako końcowy produkt oddawany do użytku. Podobnie wbudowany CO<sub>2</sub> w stali odzwierciedla wydobywanie rudy żelaza, jej późniejszy transport, produkcję stali, a także jej dalszy transport i przetwarzanie przed dostarczeniem na miejsce docelowe. Aby ocena emisji wbudowanego dwutlenku węgla była w pełni zbilansowana, należy wziąć pod uwagę również powiązane roboty budowlane, wykorzystywane urządzenia, itp.

Wymienione powyżej dwa tradycyjne materiały inżynierskie, beton i stal, w dużym stopniu przyczyniają się do emisji dwutlenku węgla w przypadku każdego obiektu budowlanego. Mniejszy udział mają wydobywane kruszywa naturalne. Wyeliminowanie tych materiałów lub ograniczenie ich wykorzystania do minimum, poprzez zastosowanie alternatywnego rozwiązania na bazie geosystemu, który będzie zawierał jeden lub więcej geokomponentów, może przyczynić się do zmniejszenia nieodłącznej emisji dwutlenku węgla w tych samych inwestycjach. Redukcja ta jest często spotęgowana geosystemami umożliwiającymi wykorzystanie lokalnie dostępnych gruntów, zazwyczaj nieprzydatnych w tradycyjnych rozwiązaniach geotechnicznych. Możliwość ponownego wykorzystania materiałów miejscowych wpływa dodatkowo na redukcję składowanych odpadów.

Prosty zabieg zastąpienia tradycyjnych rozwiązań odpowiednim alternatywnym geosystemem może zmniejszyć (a nawet wyeliminować) użycie stali, betonu i dowożonych kruszywa naturalnych, wspierając zrównoważony rozwój i powodując znaczne korzyści dla środowiska [5, 6].

## HISTORIA GEOSYSTEMÓW

Przykłady zastosowania pierwszych geosystemów można znaleźć tysiące lat temu, w takich obiektach jak Ziggurat w Mezopotamii, Wielki Mur w Chinach i w wielu starożytnych budowach rzymskich. Przez wieki rozwiązania te były rozwijane, wprowadzano nowe materiały, udoskonalano technologie.

Z czasów mniej odległych, gabiony (kosze z siatki stalowej wypełnione kamieniami), mogą być traktowane jako przodek nowoczesnych geosystemów – ich rodowód sięga około 130 lat wstecz. Jednak ostatnie cztery dekady to lata świetności geosyntetyków. Polimery były początkowo stosowane w przemyśle włókienniczym w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku jako włókna syntetyczne zamiast tradycyjnych włókien bawełny i lnu. Nowe włókna zaczęto wykorzystywać w miejscach, gdzie była wymagana większa wytrzymałość; w przemyśle znane były jako „tekstylia techniczne”.

W czasie, gdy polimery zdobywały popularność w branży budowlanej, zaczęto badać i testować inne materiały. Popularnym rozwiązaniem stało się wykorzystanie elementów stalowych do wzmocnienia ziarnistego wypełnienia i gruntów. W ścianach oporowych i stromych zboczach zaczęto również stosować wzmocnienia oparte na geosystemach.

W 1980 roku rosnące wykorzystanie geosystemów w wielu konstrukcjach wymusiło potrzebę stworzenia standardów projektowania i specyfikacji. W połowie lat dziewięćdziesiątych w Wielkiej Brytanii pojawiły się ważne wytyczne:

- BS 8002 [1] – norma obecnie zastąpiona przez Eurokod 7,
- BS 8006 [2] – norma zaktualizowana w 2010 roku,
- Specjalna Publikacja SP123 [4], wydana w 1996 roku przez CIRIA.

Wymienione dokumenty stanowią podstawę projektowania geosystemów w Wielkiej Brytanii, jak i w wielu innych krajach (obok coraz bardziej powszechnych, również w Polsce, niemieckich zaleceń EBGE0 [3]).

Obecnie geosystemy są szeroko stosowane w budownictwie. W dalszym ciągu trwa nieustanne udoskonalanie wyrobów, a rozwój tego sektora wydaje się być zapewniony na kolejne lata, zwłaszcza biorąc pod uwagę rosnące znaczenie zrównoważonego rozwoju i świadomość tych zagadnień wśród wszystkich uczestników procesu budowlanego.

## SKŁADOWE GEOSYSTEMU

Na każdy geosystem składają się trzy podstawowe elementy: grunt, geokomponenty oraz inżynierskie dane wejściowe (związane przede wszystkim z warunkami terenowymi). Dzięki szczegółowej analizie oraz odpowiedniemu zestawieniu tych elementów inżynierowie mogą zaprojektować i wykonać naprawdę imponujące budowle.

Wykorzystywane geokomponenty obejmują szeroką gamę kształtów, rozmiarów, materiałów, kolorów i konfiguracji, które zapewniają spełnienie określonych funkcji w danym geosystemie. Część geokomponentów wykonanych jest ze stali i polimerów, niektóre składają się z drewna lub betonu, wykorzystywane są także wyroby z naturalnych włókien, np. włókna kokosowe lub juty.

W przypadku konstrukcji oporowych geokomponenty najczęściej przyjmują formę rusztów lub pasków wykonanych ze stali lub polimerów, które mogą być połączone z różnymi elementami kotwiącymi i panelami, które z kolei zapewniają sztywne bądź podatne oblicowanie.

Może się wydawać niewłaściwe, że tak wiele geokomponentów wykonanych jest z materiałów, które same mają wysoki poziom wbudowanego węgla, np. stal czy beton. Jednakże należy zauważyć, że ilość tych materiałów stosowanych w geosystemach jest znacznie mniejsza niż w tradycyjnych rozwiązaniach konstrukcyjnych wykorzystujących elementy stalowe lub betonowe.

Analizy projektowe i ekspertyzy techniczne są chyba najważniejszym aspektem doboru geosystemów. Bez odpowiedniej liczby danych wejściowych wybranie geosystemu najlepiej dostosowanego do specyficznych warunków w danym miejscu może być bardzo trudne. Jest również ważne, aby wybrany geosystem był szczegółowo zaprojektowany przez doświadczonych specjalistów, którym nieobce są aktualnie obowiązujące wytyczne projektowe.

W różnych sytuacjach projektowych występuje szereg zróżnicowanych kryteriów, którymi należy kierować się przy dobrze geosystemu - zarówno samej technologii, jak i poszczególnych geokomponentów. Pierwszym z kryteriów są miejscowe warunki gruntowe. Należy przeanalizować nie tylko rodzaj (i parametry) gruntu rodzimego pod planowaną konstrukcją i poziom zwierciadła wody gruntowej, ale również możliwość użycia materiałów miejscowych. Kolejne kryterium to ograniczenia terenowe. Dostępne miejsce, przeznaczone dla danej konstrukcji, może mieć decydujące znaczenie przy ostatecznym wyborze geosystemu. Szerokość przyjętego geosystemu powinna być traktowana jako krytyczna. Innymi z kryteriów mogą być między innymi estetyczne wykończenie oraz aspekty związane z ochroną środowiska.

Geosystemy znajdują również zastosowanie w przypadku rozbiórek. Podlegają one recyklingowi, a ich elementy mogą być ponownie wykorzystane (z wyjątkiem niektórych geokomponentów, które nie mogą być używane ponownie z powodu zmian ich właściwości technicznych w następstwie ich wcześniejszego użytkowania).

Producenci i dystrybutorzy poszczególnych geokomponentów oferują na ogół doradztwo techniczne oraz wytyczne dotyczące stosowania ich produktów. Zwykle nie są materiały wystarczające do prawidłowego i szczegółowego zaprojektowania konstrukcji. Tu ponownie ujawnia się ważna rola projektanta-geotechnika, którego zadaniem jest wykonanie projektu zgodne z obowiązującymi normami projektowymi lub wytycznymi z uwzględnieniem aspektów związanych z ochroną środowiska.

W praktyce możliwość zastosowania projektu od producenta (lub dostawcy geosystemu) zależy od jego wielkości i ważności obiektu, jak również charakteru umowy pomiędzy inwestorem, projektantem, wykonawcą, itd. w odniesieniu do ryzyka, odpowiedzialności zawodowej, wymaganych gwarancji, itp.

## ZALETY STOSOWANIA GEOSYSTEMÓW

Główną zaletą rozwiązań wykorzystujących geosystemy jest bardziej efektywne wykorzystanie zasobów, w porównaniu do tradycyjnych rozwiązań budowlanych, w szczególności z betonu lub stali. W rozwiązaniach tych istnieje bardzo duży potencjał, ponieważ ich zastosowanie zapewnia bardzo istotne korzyści finansowe (czasowe i kosztowe) i środowiskowe.

Rosnący nacisk na zrównoważony rozwój w budownictwie jest dogodnym momentem, aby pokazać, jak zastosowanie geosystemów może zmniejszyć emisję dwutlenku węgla w projektach budowlanych, w porównaniu do bardziej tradycyjnych. Warto również podkreślić, że często istnieje bezpośredni związek między zmniejszeniem emisji dwutlenku węgla w projekcie a całkowitym kosztem.

Rozpatrując korzyści finansowe należy wspomnieć o redukcji kosztów materiałów dowożonych oraz strat. Rozwiązania geosystemowe wymagają zazwyczaj mniejszej ilości materiałów, zarówno podstawowych geokomponentów, jak i składników wypełniających. Dzięki temu oraz dzięki zastosowaniu gruntu miejscowego koszty zakupu i transportu materiału są kluczowymi elementami generującymi oszczędności.

Korzyści środowiskowe polegają głównie na redukcji emisji dwutlenku węgla od materiałów dowożonych. Wiele rozwiązań technicznych wykorzystuje materiały o wysokim poziomie wbudowanego dwutlenku węgla, np. żelbet w murach oporowych. Podczas, gdy składowe geokomponenty w geosystemach mogą mieć podobnie wysoki poziom wbudowanego dwutlenku węgla (w stosunku masa do masy), ilość użytych materiałów, w całym ostatecznym rozwiązaniu, zwykle ma znacznie mniejszą emisję dwutlenku węgla.

Z pewnością na zastosowaniu geosystemów może korzystać lokalna społeczność, między innymi poprzez zmniejszenie przewozów, hałasu i zanieczyszczenia powietrza.

## DZIEDZINY ZASTOSOWAŃ GEOSYSTEMÓW [5]

Możliwości wykorzystania geosystemów w budownictwie są bardzo różnorodne, np. konstrukcje oporowe, strome skarpy i zbocza, drenaże, wzmocnienia słabonośnego podłoża, wzmocnienia podbudów drogowych itp.

Strome zbocza i ściany oporowe są najpopularniejszym obszarem wykorzystywania geosystemów. Typowym rozwiązaniem jest zbrojenie w formie polimerowych taśm lub arkuszy (geotkaniny, geosiatki). Takie geosystemy bardzo często na „pierwszy rzut oka” mogą być trudne do odróżnienia od tradycyjnych np. betonowych konstrukcji czy też naturalnych zboczy porośniętych roślinnością.

Najczęściej stosowane geokomponenty do tworzenia geosystemów do stabilizacji gruntu to:

- prefabrykowane pionowe drenaże (PVD) – wykorzystywane w celu przyspieszenia konsolidacji i do etapowej budowy nasypów na gruncie ściśliwym,
- drenaż poziomy – stosowany w celu ograniczania dopływu wody lub kontrolowania poziomu wody gruntowej w skarpię (poprawy stateczności),
- gwoździowanie i kotwy gruntowe – wykorzystywane przede wszystkim w celu utrzymania w stateczności stromych skarp i zboczy, które wymagają dodatkowych sił stabilizujących,
- zbrojenie podstawy – przyjmuje ono zwykle postać arkuszowych geosyntetyków, często stosowanych w przypadku podłoża słabonośnego w połączeniu z drenażem pionowym i odpowiednią warstwą drenażową,
- kolumny w osłonach geotekstylnych (GEC) – ten sposób ulepszenia gruntu spełnia wiele funkcji, między innymi przenosi obciążenia jak typowe pionowe elementy nośne, zapewnia polepszenie parametrów otaczającego gruntu, jak również wspomaga drenaż pionowy.

Coraz większą przychylność zyskuje również wykorzystanie geokomponentów w drogach i nawierzchniach, szczególnie gdy najważniejszą kwestią są całkowite koszty użytkowania. Włączenie geokomponentów w postaci siatek zbrojeniowych, geotekstyliów i geokompozytów do warstw asfaltowych i podbudów z kruszyw dróg utwardzonych staje się normą. Głębokość, na której należy umieścić wzmocnienie, zależy od tego, czy celem jest przedłużenie żywotności nawierzchni poprzez

ograniczenie spēka odbitych czy maksymalna nośność drogi w kontekście trudnych warunków gruntowych.

Do innych ważnych, nie wymienionych powyżej, bardziej specyficznych zastosowań geosystemów należą między innymi:

- platformy robocze pod dźwigi lub ciężkie maszyny,
- kontrola erozji cieków wodnych lub skarp nasy-pów,
- geotuby w zastosowaniach przeciwoerozyjnych i hydro-technicznych (np. budowa wałów),
- separacyjne i ochronne geotekstylija w transporcie lub za-stosowaniach morskich,
- w konstrukcji składowisk odpadów - w tym obszarze geo-komponenty mogą być stosowane w różnej kombinacji, w celu spełnienia wielu funkcji, między innymi ochronnej, filtracyjnej, separacyjnej, drenażowej lub uszczel-nienia.

## WYBÓR ODPOWIEDNIEGO GEOSYSTEMU [5]

### Względy techniczne

Na początku należy zawsze przeprowadzić analizę technicz-ną przydatności różnych geosystemów, to znaczy rozważyć na-stępujące czynniki:

- cechy głównych geokomponentów,
- przydatność przewidzianych do zastosowania materia-łów zasypowych,
- łatwość dostępu, wykonania, instalacji itp., biorąc pod uwagę również konieczność spełnienia wymagań BHP,
- kwestie CDM (*Clean Development Mechanism*) (mecha-nizm obniżający koszty ograniczania emisji gazów szko-dliwych do środowiska poprzez inwestowanie w projek-ty redukujące emisję gazów cieplarnianych w krajach rozwijających się, opracowany w ramach Protokołu z Kioto),
- działania podejmowane po zakończeniu budowy, potrze-by konserwacji i ewentualne metody naprawy w przy-padku uszkodzeń, pożarów lub wandalizmu.

### Względy ekonomiczne

W dokładnym oszacowanie całkowitego kosztu geosyste-mu (ze zrozumieniem jego zalet i wad konstrukcyjnych) należy uwzględnić nie tylko cenę poszczególnych geokomponentów, ale również czas, robociznę i materiały drugorzędne. Z praktyki budowlanej wynika, że jest wiele przypadków, w których części składowe wybranego geosystemu są dostarczane na miejsce bu-dowy bez wcześniejszego, szczegółowego określenia całkowitej wartości rzeczywistych nakładów pieniężnych i czasowych.

Innym ważnym czynnikiem jest to, czy w danym geosystemie można wykorzystać wypełnienie gorszej klasy (uzyskanych lo-kalnie lub z recyklingu). Ta opcja może przynieść duże korzyści

natury finansowej oraz środowiskowej, ale oczywiście musi być analizowana z uwzględnieniem aspektów technicznych.

### Względy środowiskowe

W dzisiejszych czasach rośnie świadomość kwestii środo-wiskowych. Pojęcie emisji dwutlenku węgla stało się bardzo powszechne, a w ostatnich latach temat objął także przemysł budowlany, ze szczególnym naciskiem na trwałość konstruk-cji. Celem jest zminimalizowanie negatywnego wpływu na środowisko, w efekcie zminimalizowania ilości wbudowanego dwutlenku węgla i energii w projektowanych konstrukcjach lub zastępowanie ich całkowicie alternatywną - bardziej proekolo-giczną opcją, taką jak geosystemy.

### Ocena emisji CO<sub>2</sub>

W celu umożliwienia świadomego wyboru najbardziej efek-tywnej opcji geoinżynierskiej i ustalenia, czy zastosowanie wybranego geosystemu może zapewnić przewagę nad konwen-cjonalnymi rozwiązaniami, niezbędne jest oszacowanie poten-cjalnej emisji dwutlenku węgla i „scenariuszy budowlanych” alternatywnego projektu. Wymaga to szczegółowej analizy i po-dejścia „element po elemencie” i „miejsce po miejscu”, biorąc pod uwagę harmonogram budowy, dostępność materiałów miej-scowych, logistykę, plan terenu, itd.

Dzięki dotychczasowemu doświadczeniu ze stosowania geo-systemów można określić kilka kluczowych obszarów, w któ-rych rozwiązania te wykazują istotne korzyści środowiskowe. Są to:

- redukcja objętości wykopu, ze względu na mniejsze za-potrzebowanie na materiał wypełniający,
- zmniejszenie strat materialnych przez wprowadzenie geokomponentów pozwalających na ponowne wykorzy-stanie materiałów gorszej jakości, które mogą być dostę-pne na miejscu lub w bezpośrednim sąsiedztwie,
- zmniejszenie zużycia droższych kruszyw budowlanych lepszej jakości, dzięki wykorzystaniu niższej klasy mate-riałów lokalnie pozyskanych,
- redukcja przewozów ze względu na mniejszą ilość mate-riału dowożonego i wywozu odpadów,
- zmniejszenie wykorzystania materiałów o wysokiej za-wartości wbudowanego dwutlenku węgla, zwłaszcza sta-li i betonu.

### METODOLOGIA OBLICZEŃ CO<sub>2</sub>

Metodologia stosowana do obliczenia wbudowanego CO<sub>2</sub> w [5] jest oparta na materiałach ICE (*Inventory of Carbon & Energy*). Opracowanie umożliwia oszacowanie zawartości wbu-dowanej energii i wbudowanego CO<sub>2</sub> w wielu powszechnie sto-sowanych materiałach. Wbudowany CO<sub>2</sub> wyrobu jest to wartość ilości węgla będącego wynikiem wydobycia (wytworzenia), przetwórstwa i transportu. Wartość ta jest zwykle wyrażana jako



masa w kg wbudowanego CO<sub>2</sub> z wytwarzania 1 kg materiału, jednostka kg CO<sub>2</sub>/kg.

Podczas dokonywania obliczeń CO<sub>2</sub> konieczne jest ustalenie ciężaru i rodzaju materiału każdej części składowej tak, aby zapewnić, że obliczenia są jak najbardziej dokładne.

W kompleksowych obliczeniach należy uwzględnić zarówno:

- tak zwaną wbudowaną energię materiału,
- jak i ilość CO<sub>2</sub> emitowanego podczas transportu materiałów.

### PRZYKŁAD ROZWIĄZANIA ZASTĘPCZEGO

W opracowaniu [5] przedstawiono między innymi przypadek rekultywacji zbocza wzdłuż linii kolejowej Severn Valley w Worcestershire, podmytego na skutek nawalnego deszczu.

W pierwotnym projekcie przewidziano zastosowanie ściany oporowej w formie szczelnej palisady. Zamiast tego, wybrano konstrukcję z gruntu zbrojonego z drenażem przyporowym. Jako główne korzyści z rozwiązania zastępczego wskazano znaczne oszczędności finansowe i środowiskowe.

Aby utworzyć bloki z gruntu zbrojonego dla 10-metrowej zniszczonej części stoku, potrzebowano około 0,06 ton geosiatki Fortrac 30-3D. Zawartość wbudowanego CO<sub>2</sub> w geokomponencie wynosiła około 0,1 tony, z dodatkowym 0,06 ton produkowanych podczas transportu materiału na miejsce. W celu porównania, ilość betonu, która byłaby wymagana do skonstruowania ścianki o wysokości 10 metrów, wynosiłaby około 57,60 ton. Ta ilość betonu miałaby zawartość wbudowanego CO<sub>2</sub> około 8,8 ton, z dodatkowym 0,07 tony produkowanych w czasie transportu.

### PODSUMOWANIE

W Polsce powoli wzrasta świadomość tego, że zastosowanie geosyntetyków w budownictwie ma bardzo korzystny wpływ na ochronę środowiska. Dzięki geosyntetykom można nie tylko oszczędzić czas i pieniądze, ale również zmniejszyć zużycie energii i związane z nim zanieczyszczenie środowiska naturalnego.

Kluczowym wnioskiem z obliczeń omówionych w [5] jest to, że do każdego konkretnego przypadku należy zastosować najwłaściwszą metodę geosystemu. Żaden z geosystemów nie jest bardziej przyjazny zmniejszeniu emisji CO<sub>2</sub> niż inne, ponieważ zależy to od możliwości zastosowania danej technologii, jak również dostępności zasobów i materiałów w najbliższym sąsiedztwie danego obiektu.

### LITERATURA

1. BS 8002:1994. Code of practice for earth retaining structures
2. BS 8006:1996. British Standard. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills.
3. EBGeo. Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements.
4. Soil reinforcement with geotextiles. Special Publication SP 123, CIRIA, 1996
5. Sustainable geosystems in civil engineering applications. Geosystems Report. WRAP, 2010.
6. The 24th Annual GRI Conference Proceedings „Optimizing Sustainability Using Geosynthetics”, Dallas. USA, 2011.