

Zgłoszenie do nagrody TYTAN 2025 w obszarze Geoinżynieria

Wielkoskalowe badania platform roboczych z kruszywa antropogenicznego wykonywanych na luźnym podłożu niespoistym dla potrzeb weryfikacji modułu projektowego Platforma w Tensar+

Opis zgłoszenia:

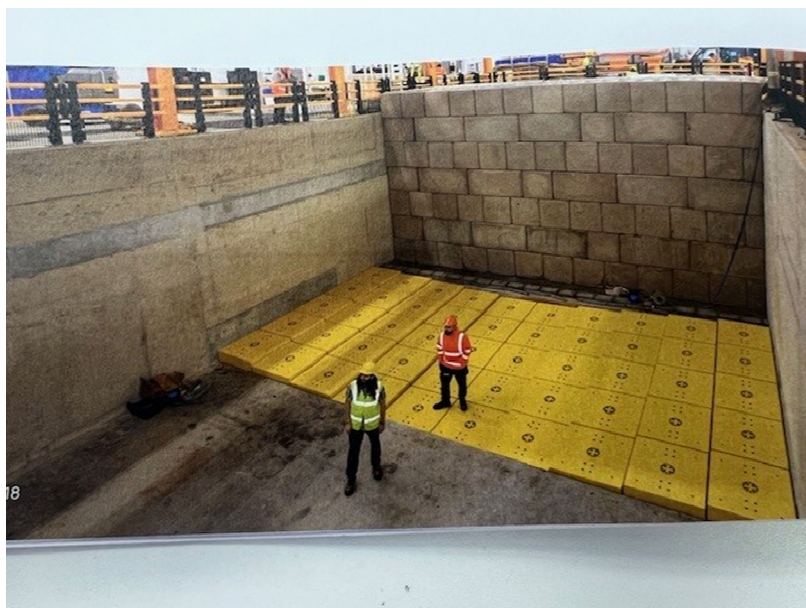
Aby zagwarantować bezpieczeństwo jakiegokolwiek rozwiązania technicznego w geoinżynierii wymagana jest weryfikacja założeń teoretycznych w praktyce. W przypadku metod projektowania platform roboczych, a więc sytuacji, w których ciężki sprzęt budowlany jak dźwigi czy palownice często przekazuje duże zmienne punktowe obciążenia na słabonośne i odkształcalne podłoże gruntowe, najlepszym sposobem jest weryfikacja założeń w pełnej skali technicznej. To stosunkowo trudne organizacyjnie i technologicznie podejście daje jednak najbardziej wiarygodne możliwości sprawdzenia założeń z rzeczywistością.

Firma Tensar w ostatnich latach prowadziła szereg badań polowych w pełnej skali technicznej obciążając platformy wykonane na słabonośnych gruntach do momentu wyczerpania ich nośności, co jest jedynym właściwym podejściem dla oszacowania rzeczywistych współczynników bezpieczeństwa metod projektowych. Wszystkie terenowe badania prowadzone były na jednorodnych słabych podłożach spoistych. Wyzwaniem było i jest znalezienie lokalizacji poletka doświadczalnego na luźnych gruntach niespoistych charakteryzujących się jednorodnością składu gruntu i jego stopnia zagęszczenia. Pomimo kilkuletnich poszukiwań idealne stanowisko terenowe niestety nie zostało zidentyfikowane.

Taki stan rzeczy wymusił zmianę podejścia do problemu i konieczność stworzenia idealnie jednorodnego podłoża piaszczystego o odpowiedniej miąższości w pełnej skali technicznej. W tym zakresie firma Tensar nawiązała współpracę z laboratorium National Buried Infrastructure Facility (NBIF), będącym częścią Uniwersytetu w Birmingham w Wielkiej Brytanii.

W okresie pomiędzy marcem 2023 a marcem 2025 prowadzono badania w gigantycznej wannie o wymiarach 10x5,8m i głębokości 5,0m. Wanna każdorazowo była wypełniana luźnym piaskiem z kontrolowaną energią zagęszczania. Następnie na tak przygotowanym podłożu każdorazowo wykonywano platformę z kruszywa antropogenicznego (gruzu budowlanego) stabilizowaną georusztem.

Cykl przygotowania jednego badania (každorazowo usunięcie i wbudowanie warstw luźnego piasku, badania kontrolne, wykonanie platform roboczych, oprzyrządowanie stanowiska i same badania) wynosił średnio 4 miesiące, a poprzedzone to było kilkumiesięcznymi pracami koncepcyjno-projektowymi, przebudową stanowiska dla potrzeb eksperymentów, produkcją sztywnej płyty obciążeniowej itp.

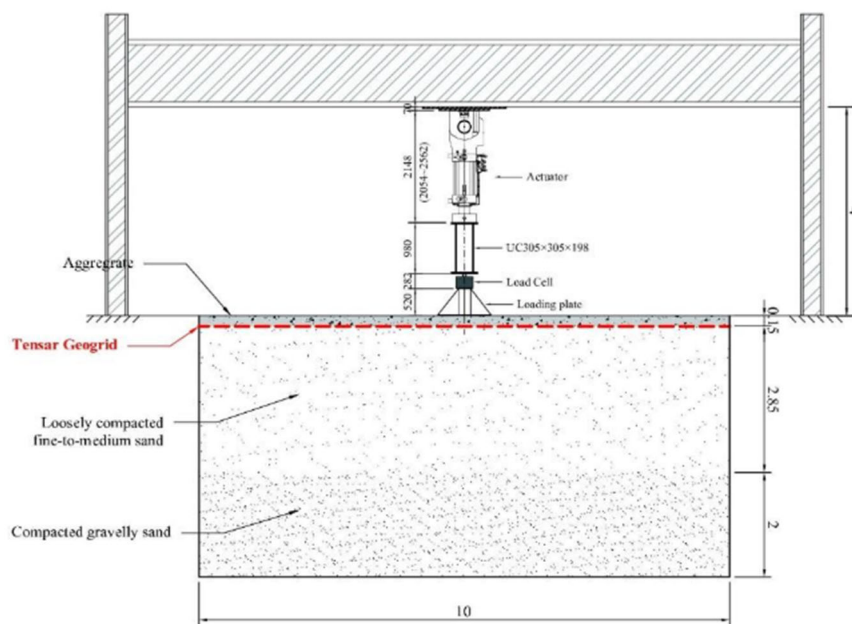


Fot. 1 Widok wanny wykorzystanej do wypełnienia luźnym piaskiem

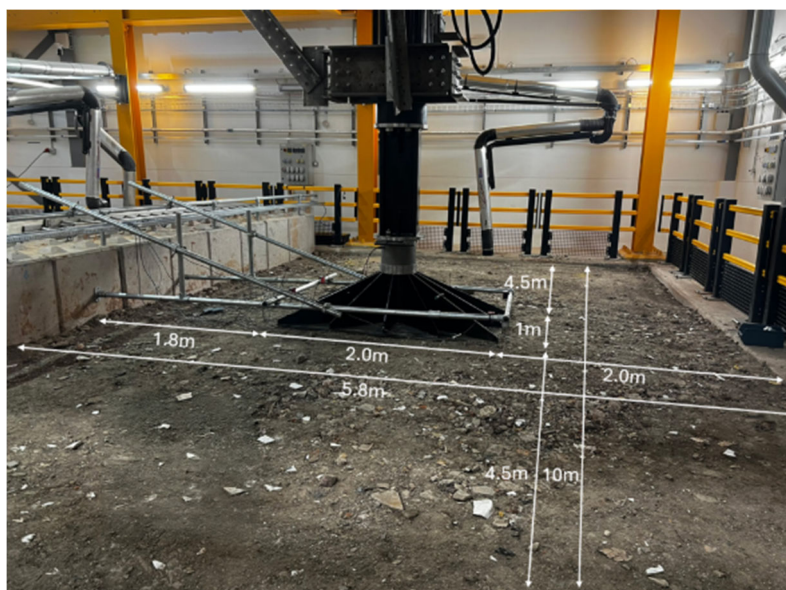


Fot. 2 i 3. Widok kruszywa antropogenicznego zagęszczanego na georuszcie tworzącego platformę roboczą

Projekt zakładał każdorazowe obciążenie platformy siłownikami hydraulicznymi umocowanymi w sztywnej ramie (Rys.1). Maksymalna wartość przyłożonej siły wynosiła 2000kN. Dla potrzeb eksperymentów zaprojektowano i wykonano specjalną sztywną nieodkształcalną płytę o wymiarach 1,0mx2,0m pozwalającą na równomierne przekazywanie obciążenia na platformę na powierzchni 2m² (Fot.4),



Rys. 1 Schemat stanowiska badawczego



Fot. 4. Widok płyty przekazującej obciążenie na platformę

Po zakończeniu badań w wannie materiał antropogeniczny wykorzystany do formowania platformy (Fot. 5) został przebadany w laboratorium City University w Londynie w dużym aparacie bezpośredniego ścinania o wymiarach skrzyni 1,5mx1,5 i głębokości 1,0m (Fot. 6)



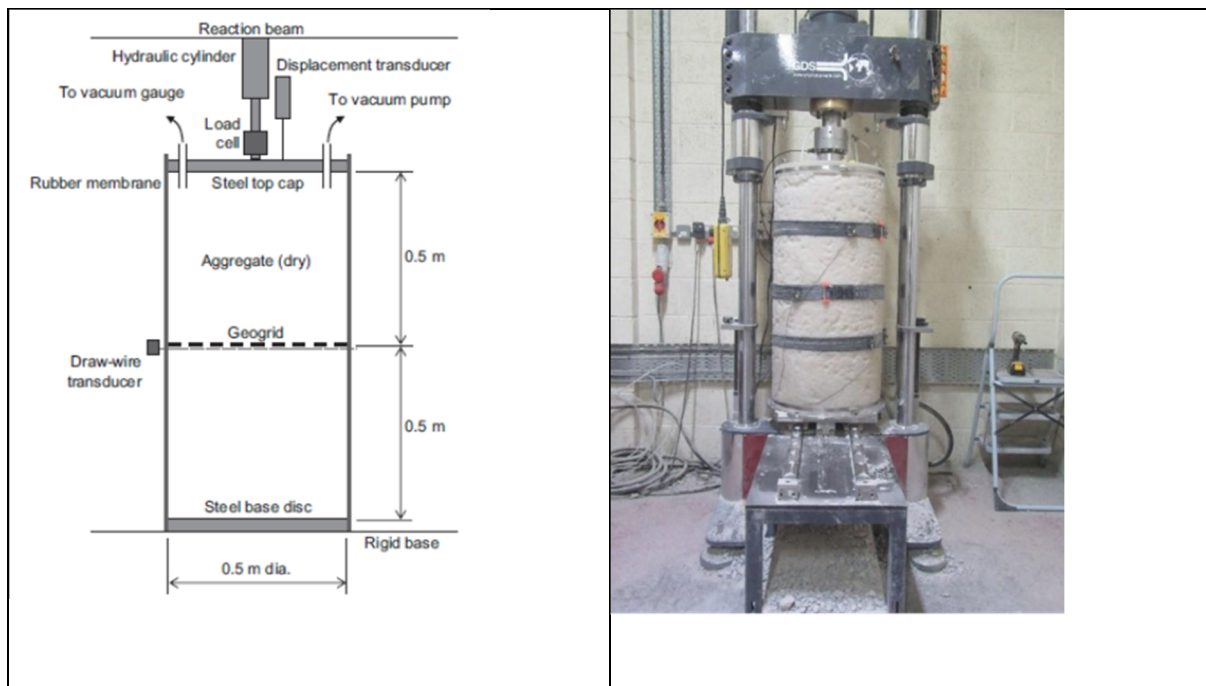
Fot. 5 Widok kruszywa antropogenicznego wykorzystywanego do badań

W wielkowymiarowym aparacie skrzynkowym badania kruszywa antropogenicznego prowadzone były w bardzo szerokim zakresie naprężeń pionowych, od 50kPa do 600kPa. Przyjętym kryterium zniszczenia próbki było przesunięcie skrzynki o 300 mm. Takie podejście sprawia, że uzyskane wyniki badań pozwalają na określenie rzeczywistego kąta tarcia wewnętrznego kruszywa antropogenicznego w warunkach zbliżonych do jego pracy w konstrukcji platformy pod rzeczywistym obciążeniem.

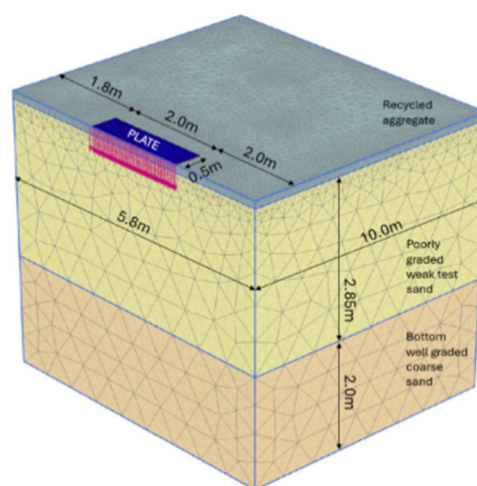


Fot. 6. Widok wielkowymiarowego aparatu bezpośredniego ścinania

Dodatkowo wykonano badania w dużym aparacie trójosiowego ściskania w Centrum Technicznym Tensar (Fot.7), na próbkach o wysokości 1,0m i średnicy 0,5m, dla kruszywa z i bez georusztu. Ich celem było zarówno określenie parametrów materiału kompozytowego (kruszywo z georusztem) jak i wpływu georusztu na zmianę parametrów geotechnicznych kruszywa wykorzystanego do formowania platformy. Te badania zostały przeprowadzone zgodnie z procedurą opisaną przez Lees i Clausen (2020), która pozwala na wyznaczanie obu tych parametrów dla potrzeb kalibracji modelu MES platformy. Obliczenia tak skalibrowanym modelem MES w programie Plaxis (Rys.2) pozwalają na wyznaczenie przewidywanej nośności platformy, która była porównywana z wynikami próbnymi obciążeń na stanowisku badawczym (Rys.1).



Fot. 7. Aparat bezpośredniego ściskania dla próbek 1,0x0,5m



Rys. 2 Model MES zastosowany do obliczeń teoretycznej nośności platform poddawanych badaniom

Te obszerne badania pozwoliły na kalibrację i weryfikację metody T-Value projektowania platform dla podłoży niespoistych będącej elementem modułu projektowego Tensar+. Platforma projektowa tym samym pozwala użytkownikom na bezpieczne projektowanie rozwiązań technologicznych w oparciu o zweryfikowane w skali technicznej próbne obciążenia.

Przeprowadzone badania zostały docenione jeszcze w fazie realizacji przez Brytyjską Federation of Piling Specialists i w listopadzie 2024 uhonorowane 1-szą nagrodą w kategorii Sustainability (Fot. 8 i 9), a po ich zakończeniu, w maju 2025, przez Brytyjską Izbę Inżynierów Budownictwa (Institution of Civil Engineering West Midland) nagrodą Studies and Research Award (Fot. 10 i 11)



Fot. 8 i 9 Nagroda FPC przyznana zespołowi Tensar za projektowanie platform roboczych



Fot. 10 i 11 Nagroda ICE dla zespołu Uniwersytetu Birmingham i Tensar za badania platform roboczych

Materiały uzupełniające – opis aplikacji i modułu projektowego, którego weryfikacja w zakresie podłoży niespoistych jest elementem zgłoszenia do nagrody TYTAN2025

Moduł „Platforma robocza” w aplikacji Tensar+

1. Idea powstania platformy Tensar+

Tensar+ to bezpłatna, ogólnodostępna platforma projektowa, która powstała jako odpowiedź na potrzebę uproszczenia i ustandaryzowania procesów projektowych w geoinżynierii. Zamiast korzystania z arkuszy kalkulacyjnych i ręcznych obliczeń, użytkownik otrzymuje intuicyjne środowisko online, dostępne zarówno z poziomu komputera, jak i urządzeń mobilnych. Proces rejestracji został maksymalnie uproszczony, a interfejs zaprojektowano z myślą o wygodzie użytkownika – nawet osoby bez doświadczenia z oprogramowaniem inżynierskim mogą szybko rozpocząć pracę.

Platforma prowadzi Projektanta krok po kroku – od wprowadzenia danych gruntowych i informacji o obciążeniu, przez dobór geosyntetyków, aż po analizę kosztów, emisji CO₂ i czasu realizacji. Dzięki funkcjom lokalizacyjnym platforma projektowa automatycznie dostosowuje metody projektowe do kraju realizacji inwestycji, uwzględniając lokalne normy czy wytyczne.

2. Moduł „Platforma robocza” i metoda T-Value

Moduł „Platforma robocza” oparty jest na metodzie T-Value – nowoczesnym podejściu do projektowania platform roboczych, które uwzględnia rzeczywiste właściwości warstw konstrukcyjnych i ich interakcję z podłożem. Metoda ta została opracowana przez dr. Andrew Lees na podstawie badań laboratoryjnych (m.in. trójosiowych testów wielkowymiarowych), analiz numerycznych (FEA) oraz pełnoskalowych testów terenowych.

W przeciwieństwie do starszych metod, takich jak podejście Meyerhofa czy metoda rozkładu obciążenia (load spread), które często ignorowały udział warstwy kruszywa w nośności lub opierały się na uproszczonych założeniach geometrycznych, metoda T-Value traktuje warstwę kruszywa jako aktywny element konstrukcyjny. Wprowadza ona współczynnik efektywności przenoszenia obciążeń (T), który zależy od parametrów warstwy kruszywa (kąt tarcia, gęstość, sztywność), indywidualnych cech geosyntetyku oraz wytrzymałości podłoża (su).

Dzięki temu możliwe jest:

- precyzyjne oszacowanie nośności platformy, nawet w warunkach bardzo słabonośnych gruntów,
- optymalizacja grubości warstwy kruszywa przy zachowaniu wymaganych współczynników bezpieczeństwa,
- oszczędność materiałów, kosztów transportu i tym samym redukcja emisji CO₂,
- lepsze dopasowanie rozwiązania projektowego do rzeczywistych warunków terenowych.

Innowacyjność metody T-Value polega również na tym, że uwzględnia ona zachowanie kruszywa stabilizowanego georuszem jako jednorodnego układu o podwyższonej wytrzymałości i większej podatności na odkształcenia bez utraty nośności. Dzięki temu możliwe jest wykorzystanie pełnej wytrzymałości szczytowej warstwy kruszywa, co nie było możliwe w tradycyjnych podejściach, gdzie przyjmowano wartości rezydualne (post-peak).

Sama metoda T-Value została opisana w literaturze i zweryfikowana analitycznie m.in. w najnowszym przewodniku *EFFC/DFI Guide to Working Platforms* (2025), a jej skuteczność potwierdzono w testach terenowych, takich jak badania płytowe (PLT) na platformach stabilizowanych georuszem. Weryfikacja terenowa dotyczyła dotychczas jednak jedynie podłoży spoistych. Weryfikacja metody (i tym samym

modułu projektowego Tensar+) dla gruntów niespoistych jest przedmiotem zgłoszenia do nagrody TYTAN2025.

3. Zakres analiz i lokalne uwarunkowania projektowe

Moduł „Platforma robocza” w Tensar+ — podobnie jak inne moduły platformy — posiada przejrzystą, intuicyjną strukturę, która ułatwia użytkownikowi przeprowadzenie pełnej analizy projektowej. Główne zakładki to „Projekt” oraz „Wartości”.

W zakładce „Projekt” użytkownik wprowadza dane wejściowe, które zostały podzielone na logiczne sekcje:

- **Obciążenia** – umożliwiają definiowanie różnych kształtów rozkładu nacisków (prostokątny, trapezowy, trójkątny) oraz uwzględnienie różnych faz pracy ciężkiego sprzętu, takiego jak palownice, dźwigi czy wiertnice. Możliwe jest także uwzględnienie mimośrodków.
- **Kruszywo** – do wyboru są cztery typy materiałów:
 - kruszywo łamane (np. C90/3),
 - kruszywo o jednorodnym uziarnieniu,
 - wysokiej jakości kruszywo z recyklingu (np. z rozbiórki konstrukcji betonowych),
 - średniej jakości kruszywo z recyklingu.
- **Podłoże** – użytkownik może określić typ gruntu jako:
 - spoisty – analizowany na podstawie wytrzymałości na ścinanie bez odplywu (s_u),
 - niespoisty – opisywany przez ciężar objętościowy i kąt tarcia wewnętrznego (ϕ).

Dodatkowo można uwzględnić poziom wody gruntowej oraz sposób posadowienia platformy (w wykopie lub na nasypie).

W zakładce „Wartości” dostępna jest analiza ekonomiczna i środowiskowa projektowanego rozwiązania. Użytkownik może porównać warianty z i bez zastosowania georusztów, ocenić oszczędności materiałowe, koszty realizacji oraz wpływ na emisję CO₂. To narzędzie wspiera podejmowanie decyzji nie tylko technicznych, ale również zrównoważonych środowiskowo.

4. Rodzaje konstrukcji możliwych do zaprojektowania

Moduł „Platforma robocza” w Tensar+ został zaprojektowany z myślą o analizie tymczasowych konstrukcji posadowionych na podłożu jednorodnym, które może być zaklasyfikowane jako grunt spoisty (analizowany na podstawie parametru s_u) lub niespoisty (opisywany przez ciężar objętościowy i kąt tarcia wewnętrznego).

Moduł znajduje zastosowanie w projektowaniu platform roboczych pod:

- ciężki sprzęt budowlany, taki jak palownice, dźwigi, wiertnice,
- nietypowe obciążenia punktowe i liniowe, np. kontenery, maszyny przemysłowe,
- obciążenia placów składowych w portach i terminalach logistycznych.

5. Zalety modułu

Moduł „Platforma robocza” w Tensar+ oferuje szereg funkcjonalności, które czynią go wyjątkowym narzędziem w codziennej pracy projektowej:

- **Bezpłatny i ogólnodostępny** – dostępny online bez konieczności instalacji, zarówno na komputerach, jak i urządzeniach mobilnych.
- **Możliwość archiwizacji i współdzielenia projektów** – użytkownik może zapisać wyniki obliczeń, udostępnić je osobom weryfikującym projekt lub wrócić do nich w dowolnym momencie.

- **Dynamiczny rozwój** – moduł jest regularnie aktualizowany, m.in. o nowe typy kruszyw, funkcje analityczne i interfejs użytkownika.
- **Rozbudowane raporty projektowe** – generowane raporty zawierają szczegółowe zestawienia danych wejściowych, wyników obliczeń oraz poszczególnych etapów analizy, co ułatwia ich integrację z dokumentacją techniczną.
- **Interaktywny interfejs graficzny** – dane wprowadzane przez użytkownika są natychmiast wizualizowane, co pozwala na bieżąco śledzić wpływ zmian na konstrukcję.
- **Elastyczność danych geotechnicznych** – moduł akceptuje różne formy danych wejściowych dotyczących nośności podłoża, takie jak:
 - ✓ CBR (California Bearing Ratio),
 - ✓ su (wytrzymałość na ścinanie bez odpływu),
 - ✓ moduł sprężystości,
 - ✓ wpędy z sondowań (np. SPT),
 - ✓ R-Value,
 - ✓ Ev2 (z płytowych prób obciążeniowych).

Metoda T-Value została zweryfikowana dotychczas w:

- **analizach numerycznych (FEA)** z wykorzystaniem modelu TSSM (Tensor Stabilised Soil Model),
- **badaniach laboratoryjnych** w aparacie trójosiowym o dużych wymiarach,
- **wielkoskalowych testach terenowych dla podłoża spoistego**, m.in. poprzez próby obciążeniowe płytą (PLT), które potwierdziły zgodność wyników z obliczeniami teoretycznymi.
- **wielkoskalowych badaniach weryfikujących dla podłoża niespoistego** prowadzonych w laboratorium NBIF Uniwersytetu w Birmingham zakończonych w maju 2025 – przedmiot zgłoszenia do nagrody TYTAN2025