

# Przegląd metod wymiarowania platform roboczych

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z wymiarowaniem platform roboczych, umożliwiającym bezpieczne prowadzenie robót geotechnicznych w gruntach słabonośnych. Omówiono dostępne metody wymiarowania (CIRIA, BRE, TWf i T-Value), umożliwiające określenie wymaganej miąższości platformy roboczej. Zwrócono uwagę na korzyści wynikające z zastosowania geosyntetyków w konstrukcji platform.

**B**ardzo często tereny o podłożu słabonośnym, dzięki stosunkowo niskiej wartości rynkowej, stanowią dużą pokusę dla inwestorów. Jednocześnie obszary te stanowią wyzwanie dla wykonawców robót budowlanych, z uwagi na konieczność dostosowania technologii i organizacji robót do słabych parametrów podłoża gruntowego, na którym ma stabilnie poruszać się i pracować sprzęt o wysoko usytuowanym środku ciężkości i masie nawet 200 ton. Z tego względu ważnym elementem prac jest właściwe zaprojektowanie i wykonanie platformy roboczej.

Z definicji, platformy robocze wraz z rampami zjazdowymi są to specjalne konstrukcje, przeważnie z kruszki (i ew. geotekstyliów i wyrobów pokrewnych), wykonywane na rodzimym, słabonośnym podłożu gruntowym. Ich zadaniem jest stworzenie stabilnej powierzchni, po której będą poruszać się maszyny biorące udział w realizacji robót budowlanych. Platformy robocze równomiernie rozkładają naprężenia od obciążeń i nacisku wywieranego na słabe podłoża przez ciężki sprzęt. Właściwie zaprojektowana oraz wykonana platforma robocza powinna zapewnić bezpieczeństwo i założoną wydajność pracy maszyn w zmiennych warunkach atmosferycznych.

W dużej części przypadków platforma robocza pełni rolę tylko tymczasowego, powierzchniowego wzmocnienia podłoża, ale odpowiednio zaprojektowana może w efektywny sposób zostać włączona na stałe jako element konstrukcyjny realizowanej budowli, np. jako warstwa konstrukcyjna, co znacząco może wpłynąć na zmniejszenie kosztów inwestycji.

Pomimo wymogu, aby wszystkie projekty geotechniczne były wykonywane zgodnie z *Eurokodem 7* (polski odpowiednik norma PN-EN 1997 [14]), projektowanie tymczasowych platform roboczych nie jest w sposób szczególny uwzględnione w aktualnie obowiązujących normatywach. W związku z tym projektanci korzystają w większości przypadków z poradników BR 470 [2] i CIRIA SP 123 [3], w których grubość platformy jest

## Overview of methods for the dimensioning of working platforms

The article presents selected issues related to the dimensioning of working platforms, enabling the safe conduct of geotechnical works in low-bearing soils. Available dimensioning methods (CIRIA, BRE, TWf and T-Value), enabling the determination of the required thickness of a working platform, are discussed. The benefits of using geosynthetics in the construction of platforms are highlighted.

### Keywords:

working platforms, low-bearing substrate, geosynthetics

summary

określana poprzez zapewnienie wystarczającej nośności lub ograniczenie odkształceń. Opublikowana na początku XXI w. metoda opisana w BR 470, pomimo konserwatywnego podejściu i wrażliwości na dane wejściowe (głównie wytrzymałości na ścinanie podłoża oraz kąta tarcia wewnętrznego materiału platformy), stała się „standardem” i pewnego rodzaju wyznacznikiem w branży geotechnicznej z uwagi na bezpieczeństwo, które zapewnia. W ciągu ostatnich kilku lat na rynku pojawiły się alternatywne metody projektowania, m.in. TWf [17] oraz T-Value [13], które wydają się być bardziej ekonomiczne.

## Ogólne aspekty projektowania platform roboczych

Celem każdego projektu powinno być osiągnięcie wymaganej niezawodności platformy przy równoczesnym zrównoważeniu aspektów ekonomicznych. Bezawaryjność konstrukcji wiąże się z prawidłowym założeniem danych wejściowych, obraniem właściwej metody projektowania, a także dokładnym odwzorowaniem projektu w rzeczywistości.

Duża różnorodność sposobów wzmacniania podłoża gruntowego sprawia, że niemożliwe jest stosowanie „uniwersalnych platform roboczych”. Podstawowy podział platform stosowanych w budownictwie odnosi się do planów wykorzystania platformy roboczej:



Rys. 1. Czynniki mające wpływ na jakość platformy roboczej [15]

- konstrukcje tymczasowe – umożliwiają dotarcie ciężkim sprzętem do niedostępnych miejsc, charakteryzujących się zbyt małą nośnością podłoża, aby przenieść ciężar od maszyn;
- konstrukcje trwałe – gdy platforma robocza docelowo poprawia nośność konstrukcji trwałej.

Platformę tymczasową należy zaprojektować dla konkretnego sprzętu z uwzględnieniem jego ciężaru oraz rodzaju wykonywanych prac. W przypadku platform obejmujących duże powierzchnie bardzo często trzeba uwzględnić dodatkowo ich funkcję jako drogi tymczasowej, a czasem placu składowego. Wiąże się to z zaprojektowaniem konstrukcji na wielokrotne (cykliczne) obciążenia i uwzględnieniem sprzętu poruszającego się nie tylko na gąsienicach, jak większość sprzętu do modyfikacji podłoża, ale również na kołach.

Na „jakość” platformy wpływa wiele czynników, które zostały szczegółowo opisane m.in. w [6, 15, 17] i pogrupowane na schemacie przedstawionym na rys. 1.

Projektowanie zarówno trwałych, jak i tymczasowych platform roboczych wymaga wcześniejszego rozpoznania podłoża gruntowego. Jakość rozpoznania i interpretacja uzyskanych danych odgrywają kluczową rolę w procesie projektowania. Użycie zbyt konserwatywnych parametrów spowoduje obliczenie zachowawczych, a tym samym nieekonomicznych grubości platform.

Mimośrodowość obciążenia podczas pracy sprzętu, takiego jak np. palownice, powoduje duże naciski na powierzchnię gruntu, a dodatkowo wysoko położony ich środek ciężkości stwarza zagrożenie wywrócenia się, jeżeli podłoże nie zapewnia wystarczającego „oparcia”. Dlatego do celów projektowych istotne jest uzyskanie szczegółowych parametrów dotyczących sprzętu, który przewidziany jest do realizacji robót. W sytuacji, gdy pojawia się konieczność zastąpienia maszyny inną lub niestandardowej konfiguracji jej osprzętu, należy ponownie przeanalizować naciski wywierane na podłoże, aby upewnić się, że platforma robocza będzie odpowiednia również w przypadku nowego obciążenia.

Projekt platformy roboczej powinien zawierać następujące dane:

- założenia projektowe dotyczące warunków gruntowo-wodnych na obszarze, na którym będzie wykonywana platforma – określone na podstawie badań podłoża i ocenione pod względem prawdopodobieństwa wystąpienia słabszych stref, zmienności warunków gruntowych itp.,

- założenia projektowe dotyczące technologii i rodzaju ciężkiego sprzętu do realizacji robót – w nawiązaniu do kart katalogowych robót geotechnicznych i sprzętowych (możliwe konfiguracje, ciężary i wymiary sprzętu oraz przekazywane naciski na podłoże),
- informacja o zakładanej trwałości (okresie użytkowania) platformy,
- uwzględnienie: topografii terenu, oddziaływania na sąsiednie obiekty budowlane, istniejący układ sieci podziemnych i naziemnych,
- obliczenia grubości platformy dla rzeczywistych warunków gruntowo-wodnych występujących na placu budowy, wykazujące zasadność proponowanej konstrukcji,
- określenie przewidywanej nośności platformy z podaniem przyjętych warunków obciążenia,
- szczegółowo opisane rozwiązanie projektowe, z prezentacją wymiarów platformy, obszaru roboczego, rozmieszczenia ramp najazdowych, dróg dojazdowych itp.,
- specyfikacje dotyczące stosowanych materiałów (gruntu nasypowego, geosyntetyków), sposobu wykonania platformy wraz z określeniem metody zagęszczenia i odwodnienia oraz podaniem wymagań w kwestii parametrów i badań odbiorowych, a także rodzaju i częstotliwości badań kontrolnych.

Należy pamiętać, że materiał, z którego wykonana jest platforma, ma decydujący wpływ na jej osiągnięci. Platforma robocza powinna charakteryzować się wytrzymałością na ścinanie znacznie większą niż podłoże gruntowe. Parametry geotechniczne proponowanego materiału zasypowego powinny zostać poprawnie określone jako dane wejściowe do projektu. Należy wziąć pod uwagę zarówno parametry wytrzymałościowe, jak i: trwałość, zmienność i ściśliwość materiału. Dobór materiałów zasypowych do budowy platform szczegółowo opisano m.in. w [7].

## Geosyntetyki w konstrukcji platform

Geosyntetyki odgrywają znaczącą rolę w budowie konstrukcji inżynierskich, w tym również platform roboczych. Ze studiów literaturowych (m.in. [1, 2, 5, 13]) wynika, że zastosowanie odpowiednio dobranego geosyntetyku skutkuje zmniejszeniem objętości wymaganego materiału ziarnistego nawet o 60% w zależności od miejsca wbudowania i parametrów stosowanego produktu. Jest to doskonała alternatywa przynosząca spore oszczędności w porównaniu do wykonania platformy o większej miąższości.



Fot. 1. Wjazd na podłoże po opadach deszczu [10]



Fot. 2. Platforma robocza z tłucznia na geotkaninie [Aarsleff Sp. z o.o.]

Zasady wymiarowania geosyntetyków w zależności od pełnionych przez nie funkcji opisano w poszczególnych częściach wytycznych *ISO/TR 18228 Design using geosynthetics* [10]. W zamierzeniach twórców opracowania te mają wspierać geotechników i inżynierów budownictwa w zakresie projektowania konstrukcji z użyciem geosyntetyków w budowach ziemnych i podziemnych, w których wyroby syntetyczne pracują w kontakcie z gruntami naturalnymi, nasypowymi i asfaltem. Są to nowe wytyczne, opracowywane w latach 2017-2022, dlatego opisane w dalszej części artykułu wcześniej opracowane metody projektowania platform roboczych z zastosowaniem geosyntetyków nie uwzględniają części informacji zawartych w [10].

W platformach roboczych stosuje się głównie następujące wyroby geosyntetyczne:

- 1) Geotkaniny – wzmacniają (zbroją) konstrukcję platformy (fot. 2.), umożliwiając jednocześnie odpowiednią separację, filtrację i drenaż. Więcej szczegółów na temat tych wyrobów w funkcji zbrojenia można znaleźć m.in. w [2, 3, 6-10].
- 2) Geowłókniny – stosowane są głównie jako warstwa separująca słabonośne podłoże od ziarnistego materiału wykorzystanego do budowy platformy, tak aby nie dopuścić do mieszania się gruntów o odmiennych parametrach [10]. Migracja drobnych cząstek pochodzących z podłoża do kruszywa wpłynęłaby negatywnie na parametry platformy oraz zachowanie projektowej miąższości platformy. Duża przepuszczalność geowłóknin zapewnia odpowiednią filtrację wody wypieranej z porów gruntu przez ciśnienie, które powstaje na skutek dynamicznego obciążenia platformy roboczej. Dzięki geotekstyliom nie dochodzi do lokalnych spiętrzeń, które mogłyby spowodować degradację platformy.
- 3) Geosiatki (georuszty) – stosowane w funkcji stabilizacji wykorzystują mechanizm oparty na zazębieniu się kruszywa niezwiązanego z geosyntetykiem o otwartej strukturze. Kruszywo wraz z georusztem tworzą współpracujący ze sobą kompozyt [10]. Wg autorów [5, 11-13] podczas zagęszczania warstwy kruszywa na georuszcie wielokierunkowym o węzłach monolitycznych TriAx® (fot. 3) dochodzi do częściowego przemieszczenia się materiału ziarnistego w głąb warstwy i następnie do jego zablokowania – jest to tzw. „boczne skrępowanie” kru-

szywa. Dzięki temu mechanizmowi przemieszczenia poziome kruszywa zostają ograniczone. Badania wykazały, że zmęczeniowa wytrzymałość stabilizowanej platformy jest znacznie wyższa od platformy bez geosyntetyków, a co za tym idzie – jej projektowa żywotność jest wydłużona.

- 4) Geokompozyty – produkty złożone z co najmniej dwóch różnych wyrobów geosyntetycznych, łączone termicznie, mechanicznie lub chemicznie, które są dobierane pod kątem uzyskania jak najbardziej pożądanych właściwości w zależności od funkcji, którą ma pełnić gotowy wyrób.

## Metody wymiarowania platform

Wymiarowanie platform roboczych polega na określeniu ich wymaganej grubości, która zapewni wystarczającą nośność lub ograniczy odkształcenia na jej powierzchni dla założonego obciążenia od palownicy/wiertnicy czy innego ciężkiego sprzętu budowlanego.

Wraz z wprowadzeniem *Eurokodów*, EC7 (na rynku krajowym norma PN-EN 1997 [13]) stał się standardem w projektowaniu geotechnicznym konstrukcji inżynierskich. EC7 zapewnia dużą elastyczność w zakresie przyjętych metod projektowania, obejmujących metody empiryczne, analityczne, numeryczne i obserwacyjne. W normie tej brak zapisów dotyczących szczegółów projektowania platform roboczych. Dlatego też projektanci sięgają do różnych wytycznych, które syntetycznie opisano poniżej.

### CIRIA

W zaleceniach CIRIA C703 [4] (wcześniej SP131) przedstawiono zagadnienia związane z bezpiecznym wykonawstwem konstrukcji wsporczych dla ciężkiego sprzętu budowlanego, wykorzystywanego głównie do uzdatniania podłoża o ściślejszych małowytężalnych gruntach. W wytycznych CIRIA SP123 [3] Jewell z zespołem przedstawili ideę współpracy platformy roboczej jako struktury złożonej z podłoża gruntowego, materiału nasypowego platformy oraz wzmocnienia geosyntetycznego. Podstawy zaproponowanej w [3] metodyki określania nośności niewzmocnionych i wzmocnionych geosyntetykami platform roboczych z materiału ziarnistego konstruowanych na podłożu spoiwym opisano m.in. w [8]. Metoda

Jewella bazuje na klasycznych metodach projektowania dróg tymczasowych.

Analizując zakres stosowalności wytycznych CIRIA SP123 [3], należy zauważyć, że:

- w metodzie obliczeniowej nie uwzględniono podłoża z gruntów niespoistych i podłoża uwarstwionych,
- przyjęto wiele konserwatywnych i mało realistycznych założeń, związanych głównie z brakiem tarcia na różnych płaszczyznach,
- geosyntetyk traktowany jest jako geomembrana, a jego nośność zależy od zakładanego stanu odkształcenia niezbędnego, aby ograniczyć deformację; sugerowany przedział wartości mieści się w zakresie od zalecanych 2% do maksymalnie 5%,
- pełna metoda analityczna wymaga rozwiązania stosunkowo złożonych równań i przeprowadzenia obliczeń iteracyjnych, dlatego też wskazane jest zastosowanie arkuszy kalkulacyjnych, alternatywnie autorzy [3] rekomendują metodę projektowania z wykorzystaniem stworzonych przez nich nomogramów.

#### BR470

Od blisko 20 lat poradnik Building Research Establishment (BRE) BR470 [2] stanowi kanon projektowania, instalacji i konserwacji platform roboczych konstruowanych z materiału ziarnistego. Swym zakresem obejmuje platformy niewzmocnione i wzmocnione geosyntetykami, zarówno na podłożach spoistych, jak i niespoistych. Metoda analityczna opiera się na klasycznej metodzie nośności Hanna i Meyerhofa, o równomiernie rozłożonym obciążeniu na zredukowanej powierzchni. BRE wprowadził na rynek prostą, półempiryczną metodologię uwzględniającą mechanizm ścięcia przy przebiciu obciążonego materiału platformy oraz podłoża przez gąsienicę pojazdu budowlanego. Zastosowano empiryczne współczynniki nośności, które nie powinny być postrzegane jako współczynniki częściowe, gdyż nie jest to metoda stanu granicznego. W przeciwieństwie do metodyki opisanej w CIRIA SP123 [3], wzmocnienie geosyntetyczne nie jest więc rozpatrywane przez pryzmat zapewnienia utwierdzenia bocznego, a poprzez zapewnienie dodatkowej odporności na przebicie, dzięki czemu istnieje możliwość zmniejszenia miąższości platformy.

Szczegółowo zakres poradnika BR470 [2] przedstawiono m.in. w [8]. Pomimo szerokiego rozpowszechnienia tej metody analitycznej i jej zalet występują istotne ograniczenia w jej zastosowaniu:

- metoda okazała się niezwykle wrażliwa na parametry wejściowe materiału platformy i wytrzymałości podłoża. W celu opracowania ekonomicznego projektu należy przyjąć odpowiednie parametry projektowe, poparte wysokiej jakości badaniami podłoża i testami platformy na budowie,

- w obliczeniach brak jest możliwości uwzględnienia podłoża niejednorodnego. Projektant powinien przyjmując najbardziej niekorzystne parametry gruntu,
- nie uwzględnia redukcji naprężeń wraz z głębokością,
- mechanizm zniszczenia przez przebicie nie ma zastosowania w przypadku:
  - gdy spójność bez odpływu podłoża spoistego  $c_u < 20$  kPa, lub  $c_u > 80$  kPa,
  - platformy o dużej miąższości, tj. gdy stosunek grubości platformy do szerokości gąsienicy maszyny  $(D/W) > 1,5$ ,
- aby platforma miała korzystny wpływ na nośność, jej grubość powinna być większa od 300 mm bądź  $0,5 \cdot W$  (wyłącznie dla maszyn lekkich),
- nachylenie terenu nie powinno przekraczać 1:10.

Poradnik BR470 [2] dodatkowo zaleca, aby gabaryty platformy spełniały poniższe warunki:

- minimalna grubość w platformach niezbrojonych jest mniejszą z wartości 300 mm lub  $0,5 \cdot W$  (połowa szerokości gąsienicy), zaś maksymalna grubość to  $1,5 \cdot W$ ,
- w przypadku platform wzmocnionych geosyntetykiem minimalna grubość powinna wynosić 300 mm,
- wyrób geosyntetyczny powinien zostać przykryty warstwą gruntu zasypowego o minimalnej grubości 300 mm.

#### Metoda TWf

W wytycznych [17] opublikowanych przez Forum Robót Tymczasowych (Temporary Works Forum - TWf) nakreślono inżynierskie standardy projektowania tymczasowych platform roboczych. Opracowanie [17] zawiera zbiór porad, zaleceń (określanych mianem „metody TWf”) dotyczących ogólnego podejścia do tego zagadnienia oraz czynników, które należy rozważyć podczas wykonywania obliczeń analitycznych w przypadku platform na podłożu wielowarstwowym, spoistym bądź niespoistym i w których konstrukcji nie przewiduje się zastosowania geosyntetyków. Przedstawiony schemat postępowania w [17] nie jest „samodzielną” nową metodą projektowania, lecz jest przeznaczony do stosowania w połączeniu z aktualnymi normami brytyjskimi i innymi dokumentami, do których wytyczne [17] i [18] odwołują się w swojej treści. Modele analityczne nie odzwierciedlają złożonej interakcji, która zachodzi w platformie poddanej obciążeniu w rzeczywistych warunkach. Pomimo tego stworzono założenia i uproszczenia, które zapewniają wykonanie projektu analitycznego platformy roboczej w taki sposób, aby spełnić wymagania EC7.

W metodzie TWf:

- analizuje się stan graniczny nośności, jak również stan graniczny użyteczności (pod kątem osiadań),
- sprawdza się nośność: podłoża i materiału wypełniającego platformę zgodnie z BRE,



Fot. 3. Georuszt Tensor TriAx® – stabilizacja poprzez klinowanie [Tensor Polska Sp. z o.o.]



Fot. 4. Kalibracja metody T-Value – Saskatchewan 2019 [11]

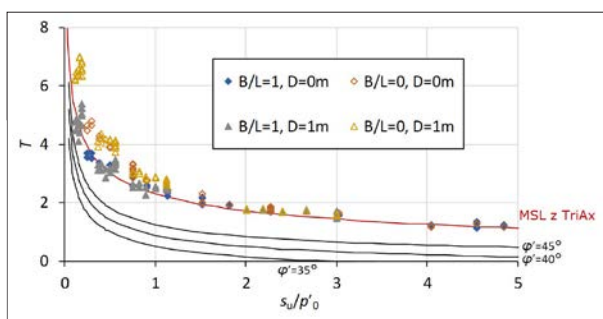
- wyznacza się kąta rozkładu obciążenia według teorii Boussinesqa,
- szacuje się parcie i odpór na platformę i/lub warstwy podłoża niespoistego w warunkach z odpływem, co umożliwi analizę ścięcia w konstrukcji (równoważenie sił poziomych), a dla podłoża spoistego uwzględnia się warunki bez odpływu,
- określa się nośności podłoża rodzimego i platformy na podstawie EC7 i brytyjskiej normy dot. robót fundamentowych.

Należy podkreślić, że metoda TWf:

- opiera się jedynie na prostym rozkładzie obciążenia, bez uwzględnienia wytrzymałości na przebicie oraz pomija wszelkie korzyści płynące z tarcia pomiędzy dolną a górną częścią platformy, co jest założeniem dość konserwatywnym;
- w celu kontrolowania ryzyka awarii wymagane są obliczenia osiadań natychmiastowych,
- ze względu na złożoność obliczeń, zaleca się korzystanie z arkusza kalkulacyjnego lub specjalistycznego oprogramowania.

### T-Value

Metoda *T-Value* opiera się na zależności pomiędzy nośnością a wartością *T* – efektywnością przenoszenia obciążenia przez warstwę ziarnistej platformy na poniżej zalegające podłoże gruntowe. W oparciu o analizy numeryczne, badania laboratoryjne i testy terenowe (fot. 4) opracowano krzywe dla różnych kątów tarcia wewnętrznego kruszywa (rys. 2) [12, 13].



Rys. 2. Wartość *T* dla różnych kątów tarcia wewnętrznego kruszywa dla przypadku bez georusztu i z nim, ( $s_u$  – wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu,  $p'_0$  – efektywne naprężenie pionowe w spągu warstwy kruszywa) [12]

Wszystkie relacje są bezwymiarowe. Pozwala to na proste obliczenie nośności na podstawie jednego wykresu, odczytując wartość *T* i podstawiając do równania (1) w przypadku obciążenia pasmowego bądź (2) gdy obciążenie przekazywane jest przez kwadratową lub okrągłą powierzchnię. Dzięki prostocie wyprowadzonych funkcji liniowych możliwe jest proste przeprowadzenie obliczeń w arkuszu kalkulacyjnym.

$$\frac{q_u}{q_s} = 1 + T \frac{H}{B} \leq \frac{q_g}{q_s} \quad (1)$$

$$\frac{q_u}{q_s} = \left(1 + T \frac{H}{B}\right)^2 \leq \frac{q_g}{q_s} \quad (2)$$

gdzie:

$q_u$  – nośność materiału platformy,

$q_s$  – nośność podłoża słabonośnego,

$q_g$  – nośność warstwy ziarnistej o nieskończonej miąższości,

$H$  – grubość warstwy platformy,

$B$  – szerokość obciążenia (gąsienicy),

$T$  – współczynnik efektywności przenoszenia obciążeń przez warstwy kruszywa.

Istotnym elementem współpracy georusztu z kruszywem, wykorzystywanym w metodzie *T-Value*, jest mechanizm stabilizacji mechanicznej kruszywa za pomocą georusztów wielokierunkowych. Mechanizm współpracy obu materiałów przeanalizowano szczegółowo w [12], analizując wyniki badań trójosiowych w aparacie wielkowymiarowym. Badania przeprowadzono zarówno dla samego kruszywa, jak i dla kruszywa oraz georusztu trójosiowego ułożonego w połowie wysokości próbki. W rezultacie przeprowadzonych badań Lees i Clausen [12] opracowali liniowo sprężysty, idealnie plastyczny model konstytutywny geokompozytu (kruszywo + georuszt wielokierunkowy) wykorzystywany w analizach numerycznych MES w programie Plaxis 2D (rys. 3). Wiarygodność modelu TSSM (ang. *Tensor Stabilized Soil Model*) oraz dokładność wyznaczenia naprężeń ścinających została potwierdzona w analizie wstecznej wyników uzyskanych z badań trójosiowego ściskania.

### Oprogramowanie komputerowe

Obecnie na rynku nie ma oprogramowania przeznaczonego *stricte* do projektowania platform roboczych. Stosowane są jednak różnorodne metody „komputerowe”:

- opracowane przez producentów geosyntetyków,
- obliczenia w arkuszach kalkulacyjnych zgodnie z metodami analitycznymi (np. omówionymi wcześniej BR 470, CIRIA, TWf),
- przeznaczone do projektowania fundamentów bezpośrednich,
- wykorzystywane do analiz numerycznych.

### Metody producentów geosyntetyków

Suplement do [2] i [18] dopuszczają jako metodę alternatywną projektowania platform roboczych wzmocnionych geosyntetykami podejścia obliczeniowe stworzone przez producentów, które są dostosowane indywidualnie do ich wyrobów. Warunkiem jest przedstawienie adekwatnych dowodów potwierdzających, że metody te opracowano na podstawie obszernych doświadczeń i odpowiednich testów eksperymentalnych. Patrz opisana powyżej metoda *T-Value*.

Założenia wprowadzane tych metod/programów różnią się w zależności od producenta, ale mogą obejmować zmiany w postaci:

- zwiększenia kąta rozłożenia obciążenia,
- zwiększenia nośności poprzez eliminację ścinania poziomego,
- eksperymentalnego wyznaczenia współczynnika poprawy rozkładu obciążenia dla platform wzmocnionych i niezbrojonych,
- wykorzystania skorelowanych współczynników częściowych,
- zmniejszenia grubości warstwy kruszywa w oparciu o doświadczalne dane z przeprowadzonych badań.

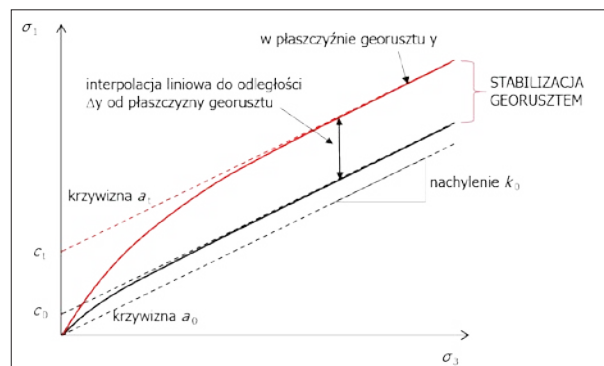
Chociaż stosowane procedury okazują się wiarygodne w praktyce należy zaznaczyć, że opierają się w dużej mierze na danych empirycznych i zwykle nie są tak przejrzyste jak stosowane od lat proste analityczne metody, których wyniki można łatwo zweryfikować.

### Metody numeryczne

Alternatywnie do rozwiązań modeli analitycznych czy empirycznych projektant może rozważyć wykorzystanie narzędzi numerycznych do analizy złożonych przypadków profili podłoża gruntowego i specyficznych warunków obciążenia platformy.

Wyróżnia się metody obliczeniowe bazujące na:

- Metodzie Elementów Skończonych (MES) - obejmuje szczegółową analizę numeryczną modelu w zależności od oprogramowania w 2D lub 3D, zapewniającą bezpośrednią analizę występujących naprężeń i odkształceń, w każdym przypadku obciążenia. Dostęp do wielu modeli materiałowych przybliża bardziej realistyczną reakcję gruntu. Dzięki temu możliwa jest szybka i precyzyjna symulacja etapowanych kolejno prac, uwzględniająca wpływ na sąsiednie konstrukcje,



Rys. 3. Graniczny stan naprężenia kruszywa stabilizowanego georusztem heksagonalnym [12]

zbrocza lub inne elementy. Przykładowe oprogramowania do analizy MES: GEO5 - FEA, Spread Footing, GTS NX, Safe, Plaxis.

- Metodzie Różnic Skończonych (MRS) - np. dwuwymiarowy program FLAC umożliwiający monitorowanie historii naprężeń, przemieszczeń czy prędkości głównych węzłów stworzonego modelu gruntowego.
- Optymalizacji układu nieciągłości (DLO) - jedna z metod coraz częściej wykorzystywanych do sprawdzania nośności platform pozwalająca na znalezienie realistycznych płaszczyzn zniszczenia. DLO dyskretyzuje korpus gruntu w kilku węzłach. Następnie za pomocą połączeń węzłowych oceniane są potencjalne nieciągłości linii poślizgu. Wykorzystując np. program LimitStateGEO, można oszacować stan graniczny nośności (SGN) przed awarią różnych konstrukcji geotechnicznych. Jak wykazano w [1], analiza DLO na ogół umożliwi określenie bardziej krytycznych mechanizmów awarii.

Należy zauważyć, że programy numeryczne wrażliwe są na wprowadzane parametry, dlatego też w celu otrzymania poprawnych wyników wymagane jest dostarczenie wysokiej jakości danych pochodzących ze szczegółowych badań analizowanego terenu.

### Podsumowanie

Zagadnienia związane z projektowaniem platform roboczych wymagają prowadzenia analiz w celu wskazania stosunkowo prostej metody obliczeniowej umożliwiającej wyznaczenie takiej grubości platformy, która nie tylko byłaby bezpieczna, ale i nie generowała dodatkowych niepotrzebnych kosztów.

Wszystkie z przedstawionych w artykule metod obliczania platform roboczych wykazują dużą wrażliwość na zmianę parametrów wytrzymałościowych gruntu (wytrzymałości na ścinanie bez odpływu podłoża spoistego), dlatego też tak istotną rolę w efektywnym projektowaniu odgrywa wykonanie szczegółowego rozpoznania geotechnicznego.

Zastosowanie wzmocnienia geosyntetycznego znacząco wpływa na redukcję miąższości platformy. Zmniejszenie

grubości platformy na rzecz zastosowania w konstrukcji geosyntetyku daje korzystny bilans ekonomiczny.

Metoda projektowa zaproponowana w poradniku BRE 470 jest najbardziej zachowawcza i charakteryzuje się największą wrażliwością na zmianę kąta tarcia wewnętrznego materiału. Stanowi jednak podstawę do obliczeń bezpiecznych. Warunkiem przyjęcia do projektowania miąższości z takich obliczeń jest krytyczna ocena ekspercka. Wyniki powinny zostać zweryfikowane przez projektanta geotechnicznego, a obliczona wymagana grubość platformy porównana z obserwacjami zachowania się platform roboczych w podobnych warunkach terenowych.

Porównanie wyników obliczeń platform roboczych wykonanych powszechnie stosowanymi metodami analitycznymi (własnych i opisanych w dostępnej literaturze m.in. [1, 12, 16]) z analizami wykonanymi z wykorzystaniem metody elementów skończonych wykazało spore rozbieżności. W wyniku prostych metod analitycznych otrzymuje się większe miąższości platform roboczych od określonych w obliczeniach MES. □

#### Piśmiennictwo

1. Białek K., Bałachowski L.: *Analiza nośności granicznej platformy roboczej na podłożu słabonośnym*. „Inżynieria Morska i Geotechnika”, 3/2015.
2. BRE: *Working platforms for tracked plant: good practice guide to the design, installation, maintenance and repair of ground-supported working platforms*. BR 470, 2004.
3. CIRIA: *Soil Reinforcement Using Geosynthetics*. SP 123, London 1996.
4. CIRIA: *Crane stability on site - second edition*. C 703, London 2003.
5. Dobie M.J.D., Ong R.: *Working Platform For Heavy Tracked Plant Constructed Using Geogrid Over Soft Ground*. 18<sup>th</sup> Southeast Asian Geotechnical Conference & Inaugural AGSSEA Conference, 2013.
6. Duszyńska A.: *Poprawa nośności platform roboczych*. „Magazyn Autostrady”, 3/2015.
7. Duszyńska A., Białek K.: *Dobór materiałów do wykonywania platform roboczych pod ciężki sprzęt budowlany*. „Magazyn Autostrady”, 3/2012.
8. Duszyńska A., Białek K.: *Projektowanie platform roboczych z zastosowaniem geosyntetyków*. „Inżynieria Morska i Geotechnika”, 4/2011.
9. Duszyńska A., Białek K.: *Problemy związane z wymiarowaniem platform roboczych*. „Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, 4/2013.
10. ISO/TR 18228 *Design using geosynthetics*.
11. Kawalec J., Mazurowski P., Zamara K., Duszyński R.: *Projektowanie i realizacja stabilizacji warstw kruszyw przy zastosowaniu geosyntetyków*. XXXVI Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wiśła 2022.
12. Lees A., Clausen J.: *The strength envelope of granular soil stabilised by multi-axial geogrid in large triaxial tests*. „Canadian Geotechnical Journal”, 2019.
13. Lees A., Matthias P.: *The bearing capacity of a granular layer on clay*. „Ground Engineering”, 11/2019.
14. PN-EN 1997 *Projektowanie geotechniczne*.
15. Porozumienie dla Bezpieczeństwa w Budownictwie: 3.5. *Platforma Robocza - wykonanie i eksploatacja*.
16. Scotland I., Poberezhniy V., Tatari A.: *Reinforced Soil Shear Key to Mitigate Extrusion Failure in Soft Soils under Working Platforms*. Proceedings of the XVII ECSMGE-2019 Geotechnical Engineering foundation of the future, 2019.
17. Temporary Works Forum: *Working Platforms Design of granular working platforms for construction plant. A guide to good practice*. April 2019.
18. *The EFFC/DFI Working Platforms Task Group, Guide to Working Platforms*. 1<sup>st</sup> Edition, January 2020.