

Dr inż. Marcin Chwała

Katedra Geotechniki, Hydrotechniki,
Budownictwa Podziemnego i Wodnego
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechnika Wroclawska
ORCID: 0000-0003-1185-8785
Dyscyplina: Inżynieria lądowa, geodezja i transport

AUTORFERAT

(opis kariery zawodowej)

1. Imię i nazwisko:

Marcin Chwała

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- Stopień naukowy **doktora w dziedzinie nauk technicznych** nadany uchwałą Rady Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wroclawskiej z dnia 28 listopada 2018 roku. Tytuł rozprawy doktorskiej „Ocena losowej nośności posadowienia bezpośredniego metodą kinematyczną”
- Tytuł zawodowy **magister inżynier**; kierunek budownictwo, specjalność budownictwo podziemne i inżynieria miejska, nadany przez Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wroclawskiej w dniu 9 lipca 2013 roku
- Tytuł zawodowy **inżynier**; kierunek budownictwo, specjalność geotechnika i hydrotechnika, nadany przez Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wroclawskiej w dniu 16 stycznia 2012 roku

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

- Adiunkt badawczo – dydaktyczny, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, jestem zatrudniony na tym stanowisku od kwietnia 2019
- Asystent badawczo – dydaktyczny, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, okres zatrudnienia od października 2017 do marca 2019

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

4.1. Omówienie głównego osiągnięcia naukowego

4.1.1. Dziedzina i dyscyplina

Dziedzina: **Nauki inżynieryjno-techniczne**

Dyscyplina: **Inżynieria lądowa, geodezja i transport**

4.1.2. Tytuł głównego osiągnięcia naukowego

Szacowanie losowej nośności fundamentu bezpośredniego z optymalizacją lokalizacji sondowań

4.1.3. Forma głównego osiągnięcia naukowego

Cykl publikacji:

- I. Puła, W., & **Chwała, M.*** (2018). Random bearing capacity evaluation of shallow foundations for asymmetrical failure mechanisms with spatial averaging and inclusion of soil self-weight. *Computers and Geotechnics*, 101, 176-195.
- II. **Chwała, M.*** (2019a). Undrained bearing capacity of spatially random soil for rectangular footings. *Soils and Foundations*, 59(5), 1508-1521.

- III. **Chwała, M.*** (2019b). Bearing Capacity for Spatially Random Soil Considering Cone Penetration Test Locations. *Proceedings of the 7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR)*
- IV. **Chwała, M.***, & Puła, W. (2020). Evaluation of shallow foundation bearing capacity in the case of a two-layered soil and spatial variability in soil strength parameters. *Plos one*, 15(4), e0231992.
- V. **Chwała, M.*** (2020a). On determining the undrained bearing capacity coefficients of variation for foundations embedded on spatially variable soil. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 42(2), 125-136.
- VI. **Chwała, M.*** (2020b). Soil sounding location optimisation for spatially variable soil. *Géotechnique Letters*, 10(3), 409-418.
- VII. **Chwała, M.*** (2021a). Optimal placement of two soil soundings for rectangular footings. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(3), 603-611 (i późniejsze Corrigendum).
- VIII. **Chwała, M.***, & Kawa, M. (2021). Random failure mechanism method for assessment of working platform bearing capacity with a linear trend in undrained shear strength. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(6), 1513-1530.
- IX. **Chwała, M.*** (2022). An iterative algorithm for random upper bound kinematical analysis. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 44(1), 13-25.
- X. **Chwała, M.***, Jerez, D. J., Jensen, H. A., & Beer, M. (2022). Random Failure Mechanism Method in Optimal Borehole Placement for Shallow Foundation Design Under Spatially Variable Conditions. *Proc. of the 8th Intl. Symp. on Reliability Engineering and Risk Management (ISRERM 2022)*.
- XI. **Chwała, M.***, Jerez, D. J., Jensen, H. A., & Beer, M. (2023). Performance assessment of borehole arrangements for the design of rectangular shallow foundation systems. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.05.009>

We wszystkich powyższych publikacjach jestem autorem korespondencyjnym (oznaczenie *).

4.1.4. Omówienie celu naukowego ww. cyklu publikacji i osiągniętych wyników

Wprowadzenie

Niepewności związane z podłożem gruntowym są kluczowym elementem wpływającym na bezpieczeństwo konstrukcji inżynierskich. Do jednych z najistotniejszych rodzajów niepewności należy niepewność związana z przestrzenną zmiennością parametrów podłoża (Lumb, 1966; Phoon i Kulhawy, 1999) wynikająca z naturalnych procesów powstawania warstw gruntowych i utrudniająca bezpośrednie zastosowanie punktowego rozpoznania geotechnicznego (trudność dotyczy niepewności w określeniu własności podłoża w niezbadanych miejscach). Ocena miary tej niepewności i jej

wpływu na bezpieczeństwo konstrukcji spotyka się w ostatnich latach z rosnącym zainteresowaniem ze strony środowiska akademickiego (Phoon i in., 2022; Chwała i in., 2022). Zainteresowanie to wynika z aktualnych potrzeb związanych z rozwojem infrastruktury na świecie i dostępnością nowoczesnych metod rozpoznania geotechnicznego, w szczególności w warunkach in-situ (Konkol i in., 2019; Młynarek i in., 2023). Naturalnym podejściem pozwalającym na uwzględnienie wyżej opisanych niepewności jest podejście probabilistyczne, za pomocą którego możemy skutecznie opisać stan naszej niewiedzy i określać poziom bezpieczeństwa konstrukcji. Jednym z prekursorów takiego podejścia w zastosowaniach geotechnicznych był prof. Kazimierz Biernatowski (1966a, b).

Rozwój metod probabilistycznych w geotechnice wywiera realny wpływ na kształt obowiązujących normatywów budowlanych na świecie – można tu przytoczyć przykłady Japonii (*Japanese Geocode 21*, Honjo i in., 2010), Kanady (*Canadian Standards Association*, 2014) czy Europy (Orr, 2000; *Comité Européen de Normalisation*, 2004). Warto dodać, że nowa wersja normy europejskiej dedykowanej zagadnieniom geotechniki (*Eurokod 7*) ma znacznie zwiększyć wpływ podejścia niezawodnościowego na projektowanie konstrukcji geotechnicznych w stosunku do aktualnie obowiązującej wersji. Podejście niezawodnościowe zostało przedstawione także w normie International Organization for Standardization (ISO 2394:2015, 2015; Phoon i in., 2016), gdzie w załączniku D wskazano je jako właściwe do określania niezawodności konstrukcji geotechnicznych.

Powyższe przykłady pokazują istotną rolę metod probabilistycznych we współczesnej geotechnice ze wskazaniem na dalszy wzrost ich znaczenia w przyszłości. Taki kierunek zmian potwierdza także niedawny raport komitetu technicznego *Engineering Practice of Risk Assessment & Management TC-304* (Ching, 2022) oparty na ankietyzacji członków komitetu, który powstał w ramach projektu kapsuła czasu (*Time Capsule Project*) przeprowadzonym przez ISSMGE (*International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*).

Cele osiągnięte w cyklu publikacji

W kontekście powyższego wprowadzenia do tematyki zastosowań metod probabilistycznych w geotechnice, moje główne osiągnięcie naukowe dotyczy rozwoju metod probabilistycznych w szacowaniu nośności fundamentów bezpośrednich i zaproponowania nowego podejścia pozwalającego na uwzględnienie i optymalny dobór położenia sondowań w procesie projektowania fundamentów. Poniżej podaję cztery zasadnicze cele, które osiągnąłem w przedstawionym cyklu publikacji:

- A) Opracowanie numerycznie efektywnej metody pozwalającej na szacowanie nośności fundamentu bezpośredniego (traktowanej jako zmienna losowa) przy założeniu trójwymiarowej przestrzennej zmienności parametrów podłoża gruntowego.**
- B) Zaproponowanie metody pozwalającej uwzględnić wpływ miejsc sondowania podłoża gruntowego na szacowanie nośności fundamentów bezpośrednich.**
- C) Opracowanie procedur optymalizacyjnych pozwalających na poszukiwanie najlepszych możliwych miejsc sondowania podłoża gruntowego w procesie projektowania fundamentów bezpośrednich.**
- D) Rozszerzenie metody z punktu A i B w celu umożliwienia uwzględnienia większej liczby fundamentów i większej liczby sondowań.**

W dalszej części opisu odwołuję się do powyższych celów (A – D) i wskazuję, w których moich publikacjach i w jaki sposób cele te są realizowane. Z uwagi na obszerność większości prac

przedstawiłem osiągnięte wyniki, skupiając się na najistotniejszych aspektach stworzonej metody i poświęcając mniej uwagi szczegółowym wnioskom opisanym w każdej z prac. Odnosząc się do prac z cyklu publikacji używam pogrubienia w celu ich odróżnienia od pozostałych cytowanych prac.

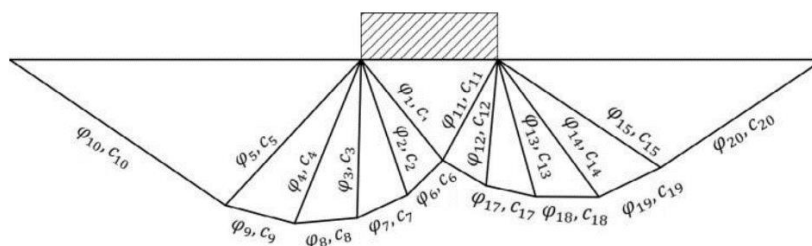
Metoda szacowania losowej nośności fundamentów i jej zastosowanie do analizy ławy fundamentowej (cel A)

Przestrzenną zmienność parametrów podłoża możemy uwzględnić na kilka sposobów. Najprostszym z nich jest przypisanie pojedynczych zmiennych losowych poszczególnym wybranym parametrom podłoża (tzw. randomizacja parametrów poprzez zadanie zmiennym losowym rozkładów prawdopodobieństwa, wartości średniej czy wariancji). Parametry te mogą być wyznaczone na podstawie wyników badań laboratoryjnych lub in-situ. Słabą stroną powyższego podejścia jest nieadekwatność wyznaczonych w ten sposób parametrów w stosunku do charakteru współpracy konstrukcji z podłożem gruntowym. Wynika to z „uśredniania” parametrów podłoża w obszarze objętym wpływem konstrukcji (mechanizm zniszczenia gruntu). Z uwagi na powyższe, wypadkowy wpływ przestrzennej zmienności parametrów podłoża może być znacznie mniejszy niż ten wyznaczony na podstawie punktowych badań (tzw. wariancja punktowa a wariancja związana z obszarem gruntu biorącym udział w zniszczeniu). Z tego względu podejście oparte na pojedynczej zmiennej losowej ma aktualnie marginalne zastosowanie.

Najczęstszą formą opisu przestrzennej zmienności parametrów podłoża jest zastosowanie pól losowych. Pierwszą pracą korzystającą z pól losowych w analizie nośności posadowienia bezpośredniego była praca Griffithsa i Fentona (2001), analizująca warunki bez odpływu w płaskim stanie odkształcenia. Praca ta zapoczątkowała powszechne obecnie zastosowanie losowej metody elementów skończonych (*Random Finite Element Method*, RFEM) do oceny nośności podłoża. Stosując RFEM, w ramach metody Monte Carlo, generuje się wiele realizacji pól losowych i dla każdej z nich rozwiązuje się zagadnienie brzegowe metodą elementów skończonych. Jako rezultat otrzymuje się rozkład nośności fundamentu, który jest podstawą do dalszych analiz, np. aproksymacji funkcji gęstości prawdopodobieństwa i dalszego jej użycia w szacowaniu prawdopodobieństwa awarii. RFEM pomimo powszechnego zastosowania w środowisku akademickim oraz coraz większego zainteresowania ze strony praktykujących geotechników ma jedną istotną wadę, wynikającą z długiego czasu obliczeń, szczególnie widoczną w zagadnieniach trójwymiarowych. Z tego też względu większość publikowanych niedawno analiz opartych na RFEM lub zbliżonych metodach, ciągle opiera się na założeniu płaskiego stanu odkształcenia (np. Kawa i in., 2021; Liao i in., 2022; Chen i in., 2023). Założenie to sprawdza się bardzo dobrze w przypadku analiz deterministycznych (rozumianych jako analizy bez uwzględnienia przestrzennej zmienności parametrów podłoża), jednak może znacząco wpływać na wiarygodność oszacowania bezpieczeństwa konstrukcji w sytuacji, gdy chcemy uwzględnić przestrzenną zmienność podłoża. Z uwagi na czasochłonność obliczeń, zastosowania metody RFEM w analizach trójwymiarowych są bardzo ograniczone i zamykają się w kilku niedawnych pracach dotyczących stóp kwadratowych; należy tutaj wspomnieć o pracy Kawy i Puły (2020) oraz Li i in. (2022).

Ograniczenia związane z metodą RFEM były dla mnie motywacją do rozwoju metody pozwalającej szacować nośność fundamentu bezpośredniego w sposób znacznie efektywniejszy pod względem czasu obliczeń tak, aby z powodzeniem móc ją zastosować w analizach probabilistycznych do zagadnień trójwymiarowych. W ramach cyklu publikacji zaproponowałem metodę losowych mechanizmów zniszczenia (*Random Failure Mechanism Method*, RFMM), której nazwa po raz pierwszy została użyta w mojej pracy z Markiem Kawą (**Chwała i Kawa, 2021**), a której podwaliny zostały opracowane wspólnie z prof. Wojciechem Pułą w pierwszej pracy wykazanej w cyklu publikacji (**Puła i Chwała, 2018**).

Celem metody RFMM jest szacowanie nośności fundamentów bezpośrednich w oparciu o twierdzenie o oszacowaniu górnym nośności granicznej (Pietruszczak, 2010; Chen, 2013). W tym celu w metodzie korzysta się z kinematycznie dopuszczalnych mechanizmów zniszczenia (Izbicki i Mróz, 1976), które pozwalają na efektywne pod względem czasu obliczeń oszacowanie nośności. Metoda RFMM została zaproponowana w pracy z prof. Wojciechem Pułą (**Puła i Chwała, 2018**). Mój wkład w powstanie pracy dotyczył współtworzenia podstaw teoretycznych metody, opracowania procedury optymalizującej geometrię mechanizmu zniszczenia oraz implementację metody w środowisku Mathematica (Wolfram Research, 2018). W metodzie RFMM przestrzenna zmienność parametrów podłoża nie jest uwzględniona poprzez jawną reprezentację w postaci pól losowych, ale poprzez generowanie uśrednionych wartości parametrów podłoża na liniach dyssypacji energii (zwanym dalej także liniami poślizgu), które wynikają z założonego mechanizmu zniszczenia (Rys. 1).



Rysunek 1. Geometria mechanizmu zniszczenia (**Puła i Chwała, 2018**). Każda linia poślizgu ma przypisaną zmienną losową opisującą spójność i kąt tarcia wewnętrznej.

Uśrednione parametry podłoża generuje się na podstawie macierzy korelacji w ramach opracowanego algorytmu (**Puła i Chwała, 2018**) opartego na rozkładzie Choleskiego (Horn i Johnson, 2012). Współczynniki macierzy korelacji wyznacza się za pomocą wzorów całkowych będących wynikiem zastosowania teorii uśrednień lokalnych Vanmarcka (1983). W dalszej części zamiennie będą używane pojęcia macierzy korelacji i macierzy kowariancji, ponieważ w prosty sposób można jedną macierz przekształcić w drugą (np. **Puła i Chwała, 2018**). Zakładając stacjonarność pola losowego opisującego wybrany parametr podłoża, po uśrednieniu wartość średnia parametru pozostaje niezmienną, natomiast wariancja ulega redukcji w stosunku do wariancji punktowej. Nowe wariancje oraz kowariancje pomiędzy poszczególnymi liniami poślizgu możemy wyznaczyć z Równania (1).

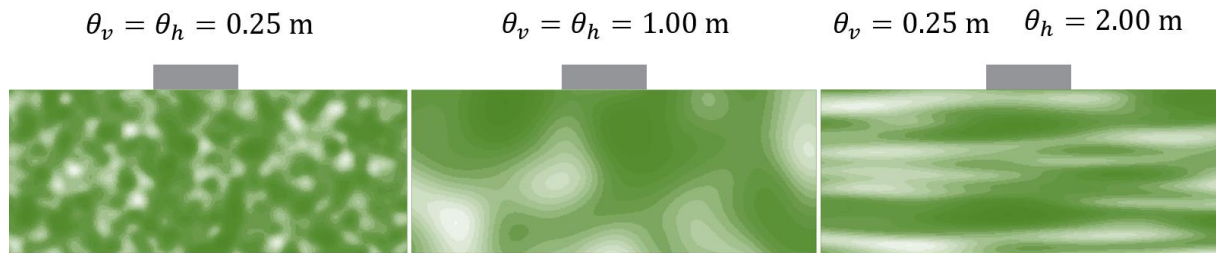
$$\text{Cov}(X_i, X_j) = \frac{1}{|V_i||V_j|} \int_{V_i} \int_{V_j} R(x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j) dV_i dV_j \quad (1)$$

Gdzie X oznacza obszar, w którym wyznaczamy uśredniony parametr podłoża, i, j są numerami obszarów dyssypacji energii, V jest miarą obszaru, tj. długością, powierzchnią lub objętością. Rodzaj obszaru dyssypacji zależy od rozpatrywanego zadania (płaskie lub przestrzenne) oraz założonego mechanizmu zniszczenia. Funkcja kowariancji R może być założona dowolnie, jednak najczęściej korzysta się z funkcji typu Markowa lub funkcji typu Gaussa (Fenton i Griffiths, 2008). Postać funkcji Gaussa dla zagadnienia trójwymiarowego podaję w Równaniu (2).

$$R(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = \sigma_x^2 \exp \left[- \left(\frac{x_i - x_j}{\omega_x} \right)^2 \right] \exp \left[- \left(\frac{y_i - y_j}{\omega_y} \right)^2 \right] \exp \left[- \left(\frac{z_i - z_j}{\omega_z} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Gdzie, $\omega_x = \theta_x / \sqrt{\pi}$, $\omega_y = \theta_y / \sqrt{\pi}$, $\omega_z = \theta_z / \sqrt{\pi}$; θ_x , θ_y i θ_z są skalami fluktuacji na odpowiednich kierunkach. Skala fluktuacji opisuje szybkość zmienności pola losowego (Fenton i Griffiths, 2008). Dla zilustrowania jej wpływu, na Rys. 2 przedstawiam trzy przykładowe realizacje dwuwymiarowego stacjonarnego pola losowego w przypadku różnych wartości skali fluktuacji oraz funkcji korelacji typu

Gaussa. Z uwagi na naturalne procesy formujące grunty, najczęściej zakłada się, że pozioma skala fluktuacji jest większa niż pionowa (jak na trzeciej realizacji pola losowego po prawej stronie rysunku), co znajduje uzasadnienie w badaniach podłoża (Cami i in. 2020).



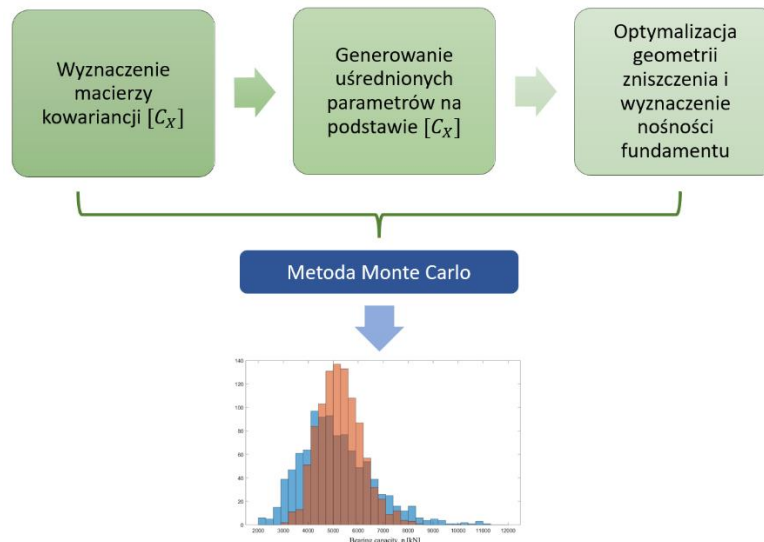
Rysunek 2. Przykładowe realizacje pola losowego dla trzech zestawów wartości skali fluktuacji.

Wyrażenia otrzymane z Równania (1) są współczynnikami macierzy kowariancji $[C_X]$, która jest dodatnio określona, kwadratową macierzą symetryczną o wymiarze odpowiadającym liczbie obszarów dyssypacji; jej postać przedstawiono w Równaniu (3).

$$[C_X] = \begin{bmatrix} \text{Var}(X_1) & \cdots & \text{Cov}(X_1, X_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(X_1, X_N) & \cdots & \text{Var}(X_N) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Gdzie N oznacza liczę obszarów dyssypacji w założonym mechanizmie zniszczenia. Całki w Równaniu (1) są wyznaczone po obszarze V , w związku z czym dla linii otrzymujemy całkę podwójną, dla powierzchni całkę potrójną, natomiast dla objętości całkę sześciokrotną. W przypadku pracy (Puła i Chwała, 2018), gdzie analizowany był płaski mechanizm wieloblokowy (Rys. 1), współczynniki macierzy kowariancji wyznaczano za pomocą całek podwójnych. W tym miejscu należy dodać, że biorąc $i = j$, z Równania (1) otrzymamy wzór na wariancję zmiennej losowej (po uśrednieniu). Podsumowując, w metodzie RFMM dyskretyzuje się pole losowe do zestawu skorelowanych zmiennych losowych. W ten sposób uwzględnia się przestrzenną zmienność parametrów podłoża zachowując możliwość korzystania z podejścia opartego na mechanizmach zniszczenia.

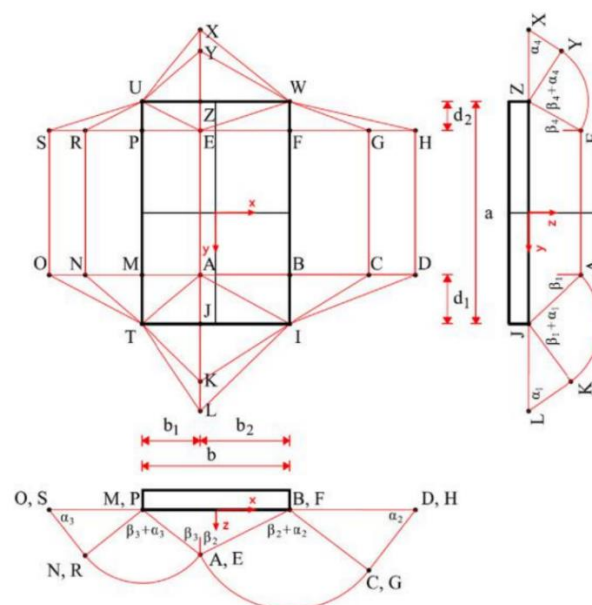
Ogólny zarys metody przedstawia Rys. 3, natomiast w kolejnych pracach cyklu publikacji pojawiają się różnice w użyciu metody, które wynikają z potrzeby jej dostosowania do wymogów rozpatrywanego zagadnienia. Niemniej jednak, ogólna idea pozostaje niezmienna. W mojej pracy z prof. Wojciechem Pułą (Puła i Chwała, 2018) pokazujemy możliwość zastosowania metody do wyznaczenia prawdopodobieństwa awarii ławy fundamentowej w płaskim stanie odkształcenia z uwzględnieniem możliwości wystąpienia niesymetrycznego mechanizmu zniszczenia.



Rysunek 3. Schemat postępowania w metodzie RFMM w celu wyznaczenia rozkładu nośności fundamentu.

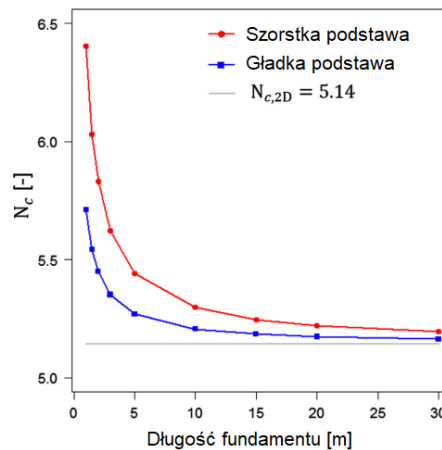
Metoda szacowania nośności fundamentów prostokątnych (cel A)

W autorskiej pracy (Chwała, 2019a) rozszerzam metodę RFMM do analizy zagadnienia trójwymiarowego w przypadku prostokątnego fundamentu bezpośredniego posadowionego na podłożu jednowarstwowym w warunkach bez odpływu. Trójwymiarowy mechanizm zniszczenia przy założeniu szorstkiej podstawy i pionowego obciążenia ilustruje Rys. 4. Implementacja RFMM do zagadnienia trójwymiarowego pozwoliła mi na uzyskanie pierwszych dostępnych w literaturze kompleksowych analiz fundamentu prostokątnego posadowionego na podłożu o cechach przestrzennie zmiennych. Było to możliwe dzięki wysokiej efektywności numerycznej zaproponowanego podejścia oraz jego implementacji w środowisku MatLab (The Math Works, 2019).



Rysunek 4. Trójwymiarowy mechanizm zniszczenia dostosowany do potrzeb analizy posadowienia na podłożu o cechach przestrzennie zmiennych (Chwała, 2019a).

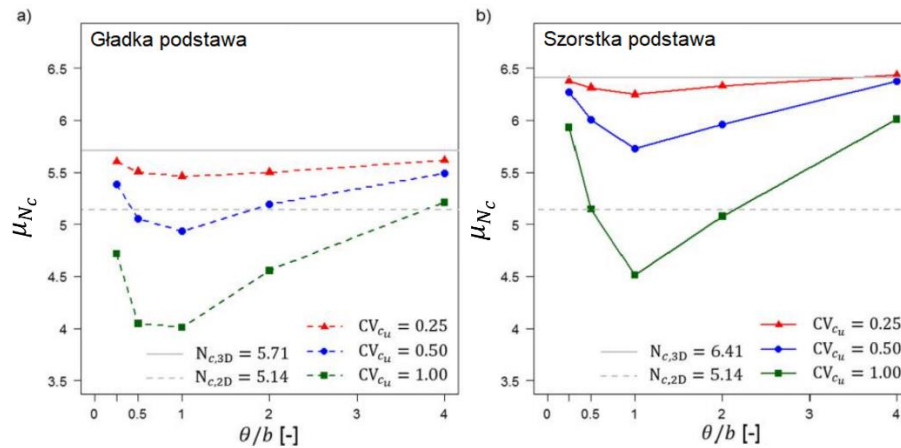
Wybór mechanizmu zniszczenia przedstawionego na Rysunku 4 wynika z dobrej zgodności wartości nośności uzyskiwanych za jego pomocą z danymi eksperymentalnymi dla fundamentów kwadratowych oraz rezultatami teoretycznymi otrzymanymi dla nieskończonej długości fundamentu (np. Pietruszczak, 2010). Wartości współczynnika nośności N_c w funkcji długości fundamentu przedstawiono na Rys. 5, gdzie szara pozioma linia oznacza rozwiązanie dokładne w płaskim stanie odkształcenia ($N_c = 2 + c$).



Rysunek 5. Współczynniki nośności dla przypadku deterministycznego, fundament o szerokości 1 m.

W celu optymalizacji geometrii mechanizmu zniszczenia zastosowałem autorską implementację metody wyżarzania (*simulated annealing*, Kirkpatrick i in., 1983). Mechanizm zniszczenia zbudowany jest z powierzchni i objętości, w których zachodzi dyssypacja energii, w związku z czym współczynniki macierzy kowariancji $[C_X]$ wyrażają się przez całki poczwórne, pięciokrotne i sześciokrotne. Wszystkie wyrażenia całkowe zostały przeze mnie wyprowadzone i zaimplementowane w środowisku MatLab (macierz kowariancji ma wymiar 30 x 30, jednak z uwagi na symetrię liczba unikalnych współczynników wynosi 465).

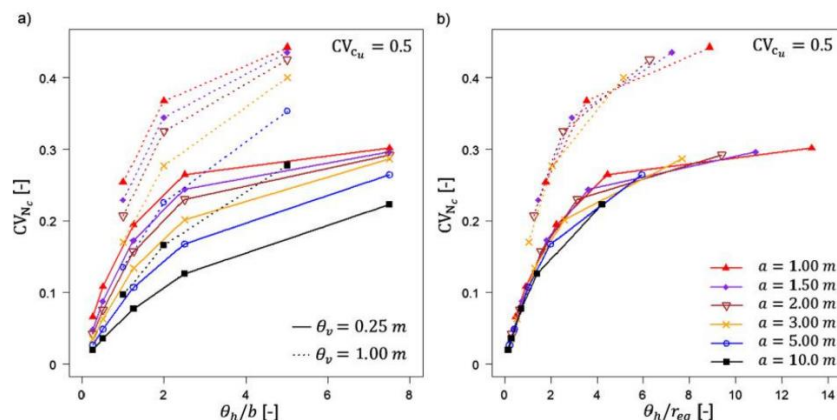
Korzystając z trójwymiarowego mechanizmu zniszczenia przeanalizowałem wpływ pionowej i poziomej skali fluktuacji na wartości średnie i odchylenia standardowe nośności (Chwała, 2019a). Wykazałem, że uwzględnienie przestrzennej zmienności w trzech wymiarach jest istotne w analizie bezpieczeństwa fundamentów i prowadzi do mniej konserwatywnych oszacowań nośności w porównaniu z podejściem dwuwymiarowym. Podobnie jak w płaskim stanie odkształcenia, uwzględnienie trójwymiarowej przestrzennej zmienności powoduje redukcję wartości średnich nośności fundamentu w porównaniu z przypadkiem deterministycznym. W pracy pokazałem, że redukcja ta powiększa się wraz ze zwiększeniem współczynnika zmienności spójności w warunkach bez odpływu (c_u). Wyniki wskazują na wystąpienie opisywanego w literaturze efektu najgorszego przypadku (*worst-case effect*, np. Pieczyńska-Kozłowska i in., 2023) widocznego w wartościach średnich nośności, tzn. minimum wartości średniej nośności obserwuje się dla skali fluktuacji zbliżonej do rozmiaru fundamentu. Rezultaty ilustrujące ten efekt dla stopy kwadratowej o szerokości 1 m przedstawiono na Rys. 6, gdzie wyraźnie widać minimum dla skali fluktuacji równej założonej szerokości fundamentu.



Rysunek 6. Wartości średnie współczynnika nośności N_c otrzymane dla kwadratowego fundamentu i przedstawione w funkcji znormalizowanej skali fluktuacji (θ/b). Założono przypadek izotropowy $\theta_v = \theta_h$.

Analogiczne analizy za pomocą losowej metody elementów skończonych (RFEM) zostały przeprowadzone przez Li i in. (2022), którzy uzyskali zbliżone rezultaty do tych przedstawionych na Rys. 6. Porównanie to wskazuje na bardzo dobre oszacowanie wpływu przestrzennej zmienności na nośność fundamentu uzyskane metodą RFMM w przypadku rozważanego zagadnienia trójwymiarowego. Należy podkreślić, że autorzy wspomnianej pracy (Li i in., 2022) musieli zastosować specjalne zabiegi związane z przeskalowywaniem wyników z gęstych do rzadkich siatek metody elementów skończonych w celu umożliwienia przeprowadzenia odpowiedniej liczby realizacji w procesie symulacyjnym. Pokazuje to, jak duże trudności stwarza zastosowanie RFEM w analizie zagadnień trójwymiarowych. Metoda RFMM w tym zastosowaniu pozwoliła mi na przeanalizowanie znacznie szerszej grupy przypadków, włączając w to analizę wpływu długości fundamentu na wartości średnie i współczynniki zmienności nośności przy wykorzystaniu do tego celu standardowego komputera osobistego.

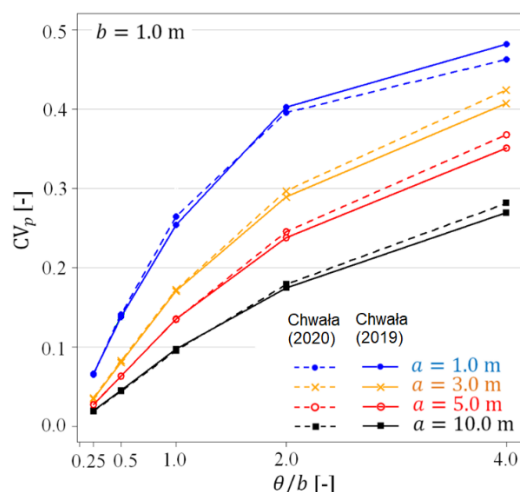
Analizując szerokie spektrum wartości parametrów mających wpływ na nośność fundamentu udało mi się odkryć ciekawe zależności, pozwalające bardzo szybko oszacować współczynnik zmienności nośności na podstawie wartości skali fluktuacji i zastępczego rozmiaru fundamentu. Jak pokazano na Rys. 7, po odpowiedniej normalizacji osi poziomej, wszystkie punkty na wykresie współczynnika zmienności nośności mają tendencję do układania się na jednej krzywej.



Rysunek 7. Współczynniki zmienności N_c otrzymane dla kwadratowego ($a = 1$ m) i prostokątnych fundamentów o długościach wskazanych na legendzie, przedstawione w funkcji znormalizowanej skali fluktuacji. Wyniki przedstawiono dla dwóch pionowych skali fluktuacji i szorstkiej podstawy fundamentu. Współczynnik normalizacyjny r_{eq} jest promieniem okręgu o takim samym polu, jak pole powierzchni fundamentu prostokątnego.

Pomimo osiągnięcia efektywności numerycznej na poziomie nieosiągalnym dla RFEM (Chwała, 2019a), była ona wciąż niewystarczająca, aby osiągnąć cele B i C. Z tego względu procedura przedstawiona na Rys. 3 została zmodyfikowana tak, aby przenieść pierwszy krok – czyli wyznaczenie macierzy kowariancji – poza pętlę w metodzie Monte Carlo. Oznaczało to konieczność założenia stałej macierzy kowariancji, wyznaczanej jeden raz dla rozpatrywanego fundamentu. Naturalnym wyborem jest wyznaczenie tej macierzy dla wartości oczekiwanych parametrów podłoża (Puła, 2019). W pracy poruszającej tę tematykę (Chwała, 2020a) pokazałem, że dla założonego mechanizmu zniszczenia w warunkach bez odpływu przyjęcie stałej macierzy kowariancji ma marginalny wpływ na jakość osiągniętych wyników. Należy podkreślić, że przyczynia się to do znacznego skrócenia czasu obliczeń w porównaniu do podejścia z 2019 roku. Osiągnięty czas obliczeń potrzebny do wyznaczenia nośności w warunkach bez odpływu dla prostokątnego fundamentu posadowionego na podłożu o cechach przestrzennie zmiennych to ok. 0.5 s dla standardowego komputera osobistego. Jest to redukcja czasu obliczeń od ok. 1000 do 10 000 razy w stosunku do losowej metody elementów skończonych przy zachowaniu porównywalnej jakości rezultatów. Różnica w czasie obliczeń może być nawet większa, jeśli rozpatrzmy fundamenty o znacznych długościach. Osiągnięta efektywność numeryczna nie ma aktualnie konkurencji wśród innych metod probabilistycznych uwzględniających przestrzenną zmienność parametrów podłoża.

Oczywiście należy mieć na uwadze ograniczenia w zaproponowanej metodzie. Przede wszystkim dotyczy ono podłoża jednowarstwowego w warunkach bez odpływu. Dlatego też możliwość praktycznych zastosowań jest wypadkową wielkości fundamentu oraz miąższości warstwy gruntu spoistego. Można przyjąć, że metoda może być stosowana już przy miąższości warstwy porównywalnej z szerokością fundamentu (jeśli warstwa poniżej nie ma niższej nośności). Rozszerzenie na podłoża dwuwarstwowe jest możliwe, natomiast nie było ono przedmiotem analiz w kontekście mechanizmu trójwymiarowego dla fundamentu prostokątnego. Porównanie współczynników zmienności nośności pomiędzy podejściami przedstawionymi w obu pracach (Chwała, 2019a; Chwała, 2020a) przedstawiono na Rys. 8. Otrzymane różnice zawierają się w granicach dokładności oszacowania metodą Monte Carlo.

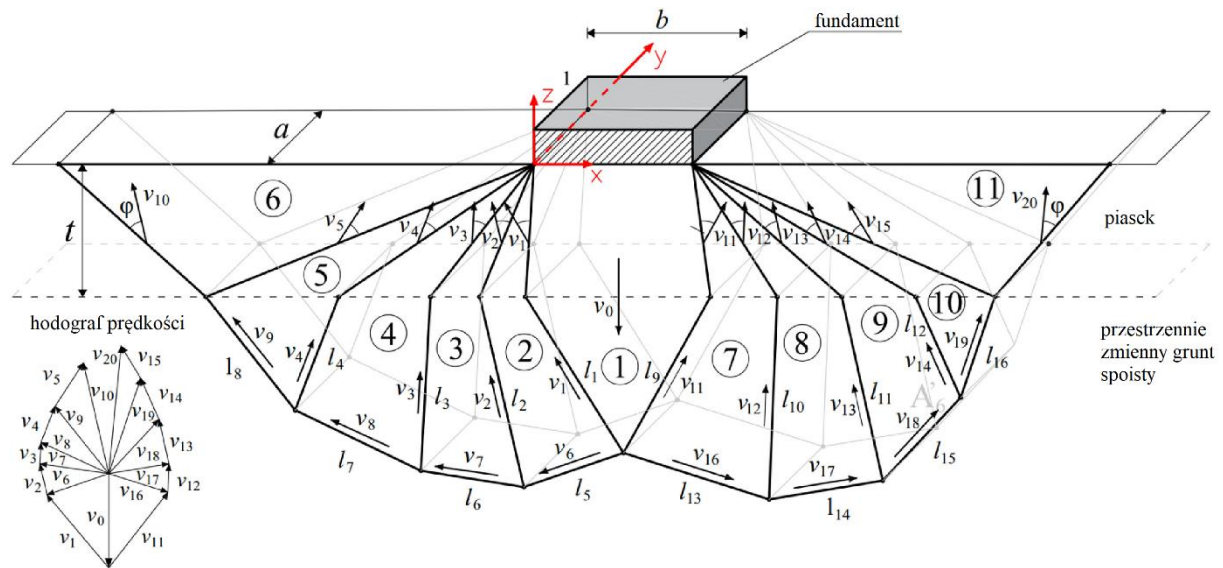


Rysunek 8. Porównanie współczynników zmienności dla czterech długości fundamentu. Założono izotropową strukturę korelacyjną.

Metoda szacowania nośności ław fundamentowych na podłożu uwarstwowym (cel A)

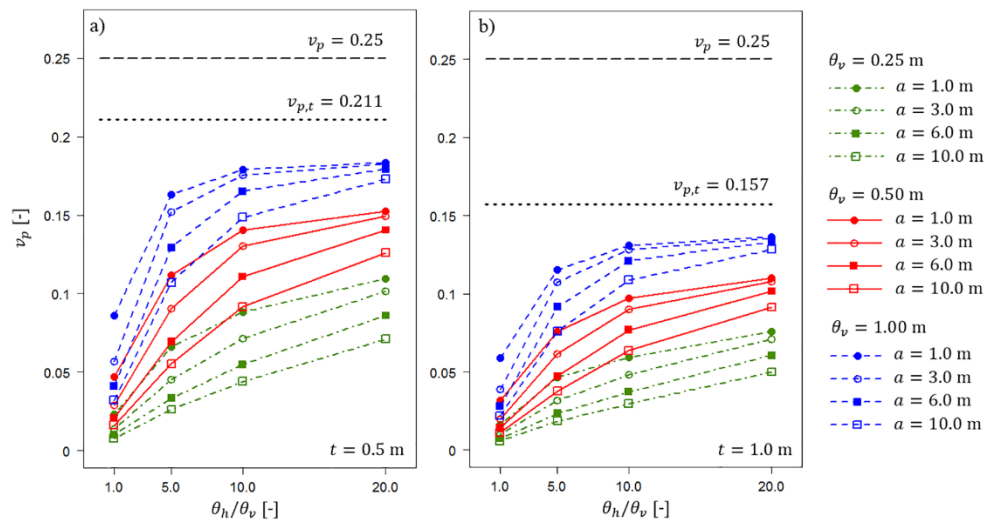
Metoda RFMM została przeze mnie zastosowana do analizy płaskiego stanu odkształcenia także w przypadku podłoża dwuwarstwowego (Chwała i Puła, 2020). Rozważano interesującą sytuację, w której górna warstwa jest warstwą piaszczystą, a dolną stanowią grunty spoiste (dla których założono warunki bez odpływu). Podejście takie odzwierciedla pracę platform roboczych

wykonywanych pod ciężkie maszyny budowlane, a także może być użyte do określenia nośności fundamentów z płytką wymianą gruntu. W analizach przyjęto, że warstwa piaszczysta jest warstwą wykonywaną przez człowieka, w związku z czym nie uwzględniono przestrzennej zmienności jej parametrów (założenie homogeniczności), natomiast warstwa spoista znajdująca się poniżej jest warstwą naturalną, w której uwzględniono przestrzenną zmienność spójności w warunkach bez odpływu. Aby umożliwić podejście probabilistyczne, zaadaptowano mechanizm zniszczenia zaproponowany przez Michałowskiego i Shi (1995). W pracy uwzględniono różne długości fundamentu w celu bardziej realistycznego oszacowania wpływu przestrzennej zmienności drugiej warstwy gruntowej na nośność fundamentu. W ten sposób powstał kwazi-trójwymiarowy mechanizm zniszczenia, który zilustrowano na Rys. 9.



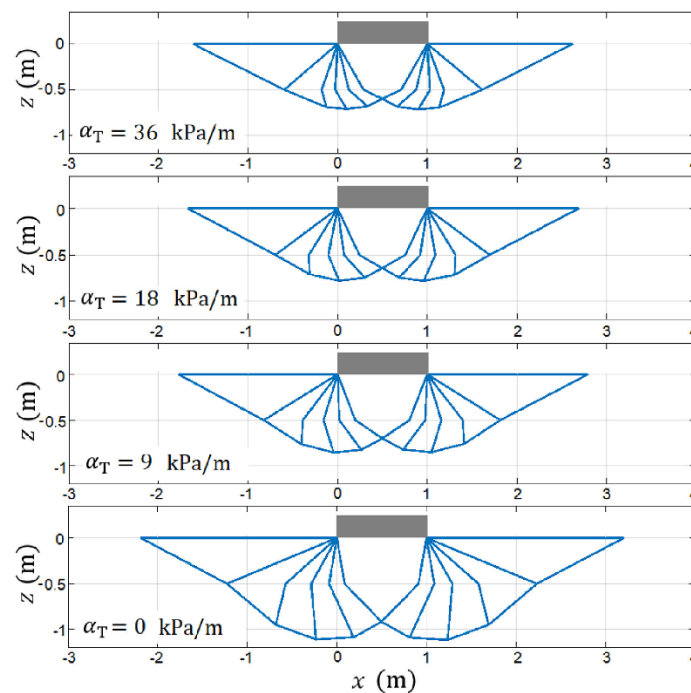
Rysunek 9. Wieloblokowy mechanizm zniszczenia dla podłoża dwuwarstwowego (Chwał i Puła, 2020; Chwał i Kawa, 2021).

Bazując na mechanizmie z Rys. 9 przeprowadzono kompleksowe analizy nośności w zależności od grubości warstwy piasku oraz wartości pionowych i poziomych skali fluktuacji. Podobnie jak w przypadku analiz dla fundamentów prostokątnych, były to pierwsze analizy tego typu dostępne w literaturze. Za pomocą zaproponowanej metody można badać istotność zjawiska tłumienia wpływu przestrzennej zmienności c_u na nośność fundamentu spowodowaną jednorodną warstwą piasku. Efekt ten przedstawiono na Rys. 10, gdzie pokazane są współczynniki zmienności nośności fundamentu (v_p) w funkcji poziomej skali fluktuacji dla trzech pionowych skali fluktuacji oraz dwóch miąższości warstwy piaskowej. Pozioma przerywana linia oznacza teoretyczną wartość współczynnika zmienności nośności fundamentu w przypadku nieskończonych wartości skali fluktuacji i braku warstwy piaskowej (co oznacza, że równa się założonemu współczynnikowi zmienności c_u), natomiast przerywana linia kropkowa zakłada warstwę piasku o danej miąższości przy nieskończonych wartościach skali fluktuacji. Dzięki takiemu przedstawieniu wyników, można oddzielić wpływ warstwy piasku na redukcję v_p od wpływu uśrednienia przestrzennego zależnego od wartości skali fluktuacji i rozmiaru fundamentu. Widać wyraźnie, że samo uwzględnienie jednorodnej warstwy piasku znacząco tłumi wpływ przestrzennej zmienności drugiej warstwy.



Rysunek 10. Współczynnik zmienności nośności fundamentu posadowionego na podłożu uwarstwowym (Chwała i Puła, 2020).

W kolejnej publikacji dotyczącej nośności podłoża uwarstwowego (Chwała i Kawa, 2021), rozszerzyłem metodę RFMM o możliwość uwzględnienia liniowego trendu zmian spójności (Li i in., 2015). Rosnący trend w wartościach c_u jest często obserwowany w gruntach spoistych (Jaksa i Kaggwa, 1996) i – jak wykazałem – ma wpływ na geometrię mechanizmu zniszczenia. Wpływ ten przedstawia Rys. 11, gdzie przedstawiono optymalne geometrie zniszczenia dla miąższości warstwy piaskowej równej 0.5 m i stałej wartości c_u . Efekt wskazany na Rys. 11 w przypadku probabilistycznym oznacza spływanie mechanizmu zniszczenia i zwiększenie wartości średnich nośności fundamentu, jeśli uwzględnimy liniowy trend w wartości c_u . Co ciekawe, współczynniki zmienności nośności osiągają maksimum dla niezerowego trendu (9 kPa/m) i następnie zmniejszają się wraz ze wzrostem trendu (Chwała i Kawa, 2021).



Rysunek 11. Wpływ liniowego trendu c_u (α_T oznacza współczynnik kierunkowy prostej określającej trend) na geometrię mechanizmu zniszczenia w przypadku deterministycznym (Chwała i Kawa, 2021).

W pracy z Kawą (Chwała i Kawa, 2021) przeprowadzono także porównanie RFMM z losową metodą różnic skończonych (RFDM). Za część obliczeniową związaną z zastosowaniem RFDM odpowiedzialny był Marek Kawa. Jako rezultat porównania zaproponowaliśmy zastosowanie kombinacji metod RFMM i RFDM, w której za pomocą RFMM szacuje się współczynnik zmienności nośności podłoża (jego precyzyjne wyznaczenie wymaga większej liczby realizacji), natomiast za pomocą RFDM wyznacza się wartość średnią nośności (do jej wyznaczenia wystarczy mniejsza liczba realizacji i można uwzględnić różne wartości kąta dylatacji).

Badanie wpływu sposobu wyznaczania macierzy kowariancji na szacowanie nośności w metodzie RFMM (cel A)

W autorskiej pracy (Chwała, 2022) analizuję wpływ sposobu wyznaczania macierzy kowariancji na otrzymane charakterystyki rozkładów nośności fundamentów. Jako przykładów używam implementacji RFMM z omówionych dotychczas prac, tj. dla fundamentów prostokątnych (Chwała, 2019a; Chwała, 2020a) oraz dla ław fundamentowych w przypadku podłoża uwarstwionego (Chwała i Puła, 2020; Chwała i Kawa, 2021). W pracy tej rozpatrzyłem nie tylko stałą macierz kowariancji oraz macierz wyznaczaną indywidualnie (jak przedstawiono na Rys. 3), ale także wpływ iteracyjnego dostosowywania macierzy kowariancji do geometrii mechanizmu zniszczenia. Sprawdzenie wpływu tego efektu było istotnym elementem, który otworzył drogę metodzie RFMM do szerszych zastosowań. W pracy pokazałem, że iteracyjne (dokładniejsze) wyznaczanie macierzy kowariancji nie wprowadza istotnych zmian w otrzymanych wartościach średnich i współczynnikach zmienności nośności w stosunku do stałej macierzy kowariancji. Niejako częściowo zostało to pokazane we wcześniejszej pracy (Chwała, 2020a), jednak dopiero ta praca (Chwała, 2022) kompleksowo podeszła do analizy tego zagadnienia. Oczywiście stosowanie procedury iteracyjnego wyznaczania macierzy kowariancji powoduje znaczne wydłużenie czasu obliczeń, co w świetle braku poprawy jakości rezultatów nie daje żadnych korzyści. Jest to bardzo pozytywna obserwacja, która pokazuje, że stała macierz kowariancji jest wystarczająca, aby poprawnie uwzględnić charakter przestrzennej zmienności parametrów podłoża w zastosowaniach rozpatrywanych w przedstawionym cyklu publikacji, a w szczególności w zagadnieniach z uwzględnieniem lokalizacji sondowań, które omawiam w kolejnej części.

Uwzględnienie lokalizacji sondowań w przypadku pojedynczego fundamentu (cel B)

Efektywność numeryczną, którą osiągnięto w zaproponowanej metodzie (w szczególności w zastosowaniu do fundamentów prostokątnych na podłożu, dla którego można przyjąć warunki bez odpływu), zastosowałem do zaproponowania nowego podejścia pozwalającego na uwzględnienie lokalizacji sondowań lub otworów badawczych. Przystępując do opracowania koncepcji metody i jej późniejszego opracowania od strony teoretycznej, założyłem następujące wymagania wobec nowego podejścia:

- Zachowanie wysokiej numerycznej efektywności, co było wynikiem chęci stosowania metody do poszukiwania optymalnych położeń sondowań oraz jej rozszerzenia do większej liczby fundamentów i sondowań.
- Skupienie się na sytuacji, w której mamy bardzo mało informacji o podłożu lub w ogóle taką informacją nie dysponujemy w obszarze rozważanej inwestycji.

Jako wynik wstępnych poszukiwań metoda została zaprojektowana tak, aby jej obszarem aplikacyjnym było wsparcie na etapie projektowania programu badań geotechnicznych (w sytuacji, w której dopiero mamy zaproponować położenia sondowań dla określonej konstrukcji). Oczywiście na tym etapie możemy zrobić to wyłącznie poprzez wskazanie najlepszych położeń sondowań ze statystycznego punktu widzenia. Może to być znaczne wsparcie dla osób podejmujących decyzję, gdzie i ile sondowań powinno zostać wykonanych, aby możliwe najlepiej wykorzystać informacje, które z nich otrzymamy i tym samym maksymalnie zredukować niepewności w wyznaczeniu nośności

fundamentów bezpośrednich. Sama metoda może być z powodzeniem zastosowana także do innych konstrukcji geotechnicznych, dla których jesteśmy w stanie zaproponować wiarygodny mechanizm zniszczenia, jednak w ramach cyklu rozpatruję wyłącznie powszechnie stosowane fundamenty prostokątne.

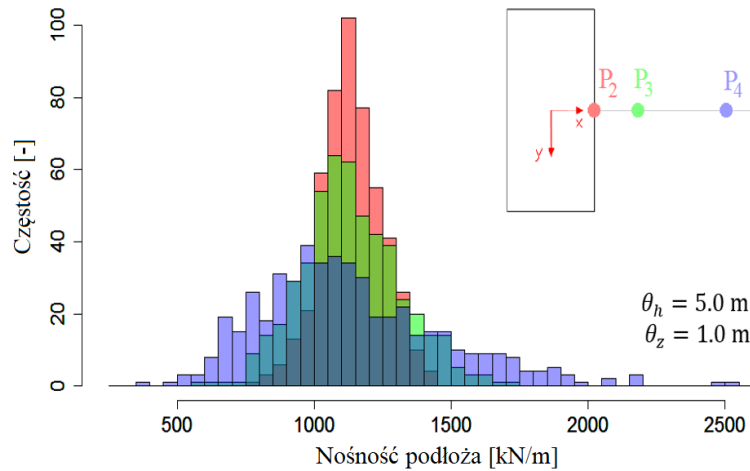
Uwzględnienie przestrzennej zmienności podłoża w projektowaniu położenia sondowań jest bardzo ważnym aspektem ograniczania ryzyka w geotechnice. Jest to temat, który w ostatnich latach zajmuje coraz szersze grono badaczy. Pomimo tego, większość z nich nadal skupia się przede wszystkim na zaproponowaniu takich układów sondowań, aby jak najlepiej zidentyfikować parametry geotechniczne podłoża w określonym obszarze (Gong i in., 2017; Huang i in., 2020; Crisp i in., 2021; Guan i in., 2022). Innym podejściem, znacznie słabiej reprezentowanym w literaturze jest taki dobór położenia sondowań, aby były najefektywniejsze dla określonego typu konstrukcji. Takie właśnie podejście zostało zastosowane przeze mnie w cyklu publikacji: zasadniczy wpływ na umieszczenie sondowań ma charakter współpracy konstrukcji z podłożem gruntowym. W przypadku fundamentów przekłada się to na obszary, w których dyssypacji ulega największa ilość energii. Najwięcej takich analiz dotyczy skarp (np. Li i in., 2019; Jiang i in., 2020; Yang i in., 2022; Zhang i Wang, 2023), ale są także zastosowania do analizy osiadań fundamentów (Goldsworthy i in., 2007) i nośności fundamentu w płaskim stanie odkształcenia (Hu i in., 2023). Dotychczas nie było znanych mi prób optymalizowania położenia sondowań w przypadku analizy nośności fundamentów w zagadnieniach trójwymiarowych. Wynika to przede wszystkim z opisanych wcześniej ograniczeń związanych z czasem obliczeń metodą RFEM w zagadnieniach trójwymiarowych. W tym świetle zaproponowana przeze mnie metoda jest unikalna i otwiera szerokie możliwości analiz niedostępnych w ramach istniejących metod.

W pracach (Chwała, 2019b; Chwała, 2020b) zaproponowane zostały podstawy teoretyczne metody pozwalającej na uwzględnienie lokalizacji sondowań przy szacowaniu nośności fundamentu posadowionego na podłożu o cechach przestrzennie zmiennych. Jak wskazałem wcześniej, zastosowano tam mechanizm zniszczenia dla fundamentu prostokątnego w warunkach bez odpływu. W stworzonej metodzie linia sondowania została skorelowana ze wszystkimi obszarami dyssypacji występującymi w mechanizmie zniszczenia, a kowariancje były wyznaczane za pomocą Równania (1). Z tego równania wyznaczane były także kowariancje pomiędzy dwoma sondowaniami (w przypadku, gdy liczba sondowań była większa lub równa dwa), co dla funkcji korelacji typu Gaussa wyraża się Równaniem (4):

$$\text{Cov}(B_i, B_j) = \sigma_{c_u}^2 \exp \left[- \left(\frac{x_{B_i} - x_{B_j}}{\omega_x} \right)^2 \right] \exp \left[- \left(\frac{y_{B_i} - y_{B_j}}{\omega_y} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Gdzie współrzędne (x_{B_i}, y_{B_i}) i (x_{B_j}, y_{B_j}) są współrzędnymi położenia sondowań w globalnym układzie odniesienia. Jeżeli uwzględnimy jedno sondowanie, to macierz kowariancji wyrażona w Równaniu (3) zostanie odpowiednio powiększona o jeden wiersz i jedną kolumnę, w przypadku dwóch sondowań będą to dwa wiersze i dwie kolumny, itp. Następnie uśrednione parametry podłoża generowane są za pomocą opracowanego algorytmu (Chwała, 2019a) z niewielkimi modyfikacjami. Główną z nich jest założenie na linii sondowania wartości oczekiwanej c_u , której wariancja jest znacznie mniejsza od wariancji wyjściowego pola losowego ($\bar{\sigma}_{c_u}^2$). Wariancję tę można interpretować jako dokładność samego pomiaru i może być dowolnie modyfikowana. W cyklu publikacji została przyjęta jako 1% wartości wariancji wyjściowego pola losowego. Założenie takie jest naturalne w przypadku, gdy nie dysponujemy informacjami o podłożu lub wiedza ta jest bardzo ograniczona. Metoda ustawiona w ten sposób pozwala na poszukiwanie najlepszych ze statystycznego punktu widzenia położenia sondowań w przypadku ograniczonej wiedzy o samym podłożu. Przykład ilustracyjny przedstawiono na Rys. 12, gdzie dla fundamentu prostokątnego o wymiarach 1 x 2 m oraz skali fluktuacji $\theta_x = \theta_y = \theta_h = 5$ m i $\theta_z = \theta_v = 1$ m przeanalizowano trzy położenia sondowań (dla każdego z nich w ramach metody

Monte Carlo wykonano 500 realizacji). Na rysunku można zauważyć, że rozkład nośności fundamentu staje się coraz bardziej skoncentrowany w pobliżu wartości średniej, w miarę jak odległość sondowania do fundamentu maleje.



Rysunek 12. Przykładowe rozkłady nośności dla trzech położen sondowania w stosunku do położenia fundamentu (Chwała, 2019b).

W opisany wyżej sposób otrzymuje się rozszerzoną macierz kowariancji $[C_X]^{ext}$, której postać zapisaną dla mechanizmu zniszczenia o N obszarach dyssypacji i n_B liczbie sondowań prezentuje Równanie (5).

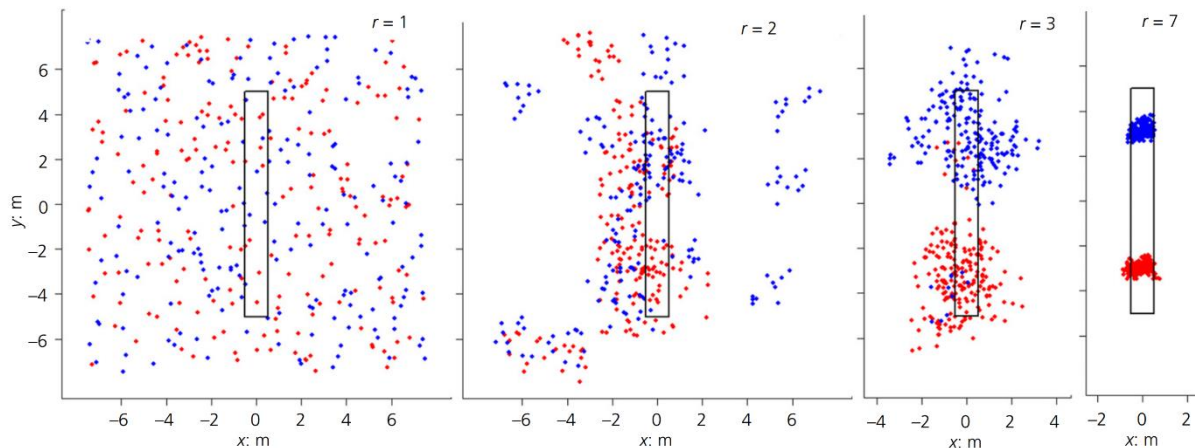
$$[C_X]^{ext} = \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_{c_u}^2 & \cdots & \text{Cov}(B_1, B_{n_B}) & \text{Cov}(B_1, X_1) & \cdots & \text{Cov}(B_1, X_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(B_1, B_{n_B}) & \cdots & \bar{\sigma}_{c_u}^2 & \text{Cov}(B_{n_B}, X_1) & \cdots & \text{Cov}(B_{n_B}, X_N) \\ \text{Cov}(B_1, X_1) & \cdots & \text{Cov}(B_{n_B}, X_1) & \text{Var}(X_1) & \cdots & \text{Cov}(X_1, X_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(B_1, X_N) & \cdots & \text{Cov}(B_{n_B}, X_N) & \text{Cov}(X_1, X_N) & \cdots & \text{Var}(X_N) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Otrzymana macierz jest dodatkowo określoną macierzą symetryczną, kwadratową, o wymiarze $N + n_B$. Parametry podłoża są generowane na podstawie rozszerzonej macierzy kowariancji, a więc są nie tylko uśrednione przestrzennie w obszarach dyssypacji, ale także uwarunkowane położeniem sondowania. Należy zwrócić uwagę, że wyznaczenie wartości średniej lub odchylenia standardowego nośności w przypadku ustalonego położenia sondowania wymaga wielu realizacji Monte Carlo. Oznacza to, że jeśli chcemy przejść do poszukiwań optymalnego położenia sondowań będziemy mieć do czynienia z problemem podwójnej pętli. Rozwiązanie tego zagadnienia jest możliwe wyłącznie dzięki bezkonkurencyjnej efektywności metody RFMM.

Optymalizacja położen sondowań (cel C)

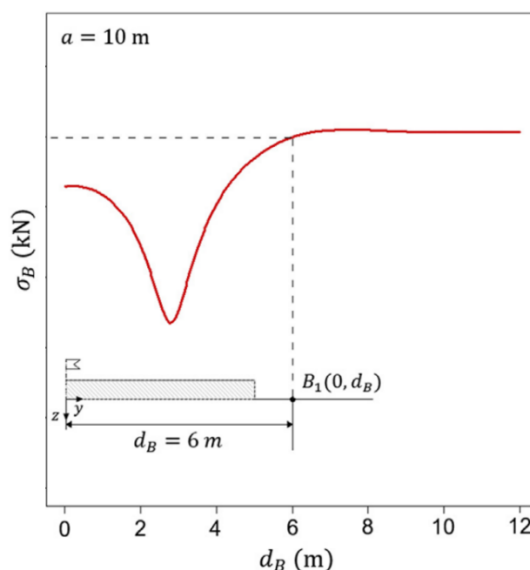
Algorytm, który uwzględnia lokalizację sondowań dla pojedynczego fundamentu został sformułowany przeze mnie w pracy z 2020 roku (Chwała, 2020b), rozwiązałem tam także zagadnienie optymalizacyjne dla dwóch sondowań stosując do tego autorską implementację metody subset simulation (Au i Beck, 2001). Metoda *subset simulation* służy przede wszystkim w zagadnieniach niezawodnościowych do szacowania małych prawdopodobieństw awarii, natomiast może być także używana do zagadnień optymalizacyjnych. Jest to metoda symulacyjna, w której w kolejnych etapach zbliżamy się do rozwiązania optymalnego. Polega na wybieraniu w każdym etapie względnie małej części realizacji (w podejściu z 2020 roku było to 10%) i następnie generowaniu nowych realizacji poprzez zastosowanie teorii łańcuchów Markowa, dla których punktami początkowymi (*seed*) jest te 10% realizacji, które odpowiadały lokalizacjom sondowań dającym

najmniejsze wartości odchylenia standardowego nośności. Ilustrację tego procesu dla czterech wybranych etapów prezentuje Rys. 13.



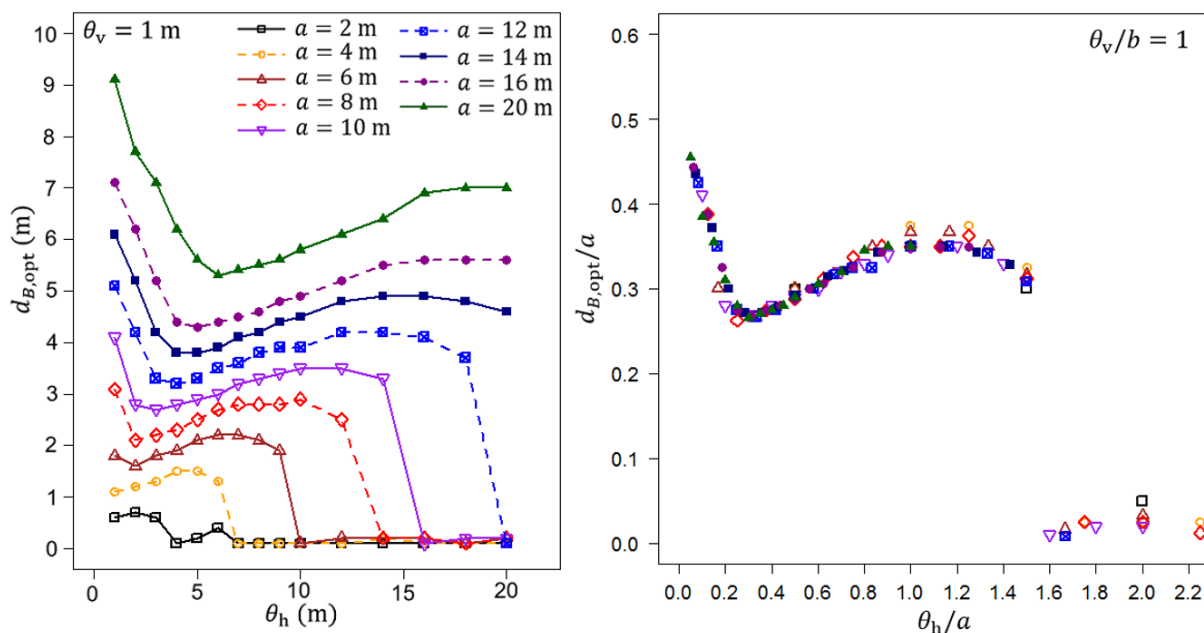
Rysunek 13. Wybrane etapy w zaproponowanej metodzie do poszukiwania optymalnych położenia sondowań w przypadku dwóch sondowań (Chwała, 2020b).

Ważną obserwacją płynącą z analiz dla dwóch sondowań (Chwała, 2020b) jest to, że optymalne położenia sondowań są niezależne od przyjętej struktury korelacyjnej. W każdym z rozpatrzonych przypadków najlepiej jest umiejscowić sondowania na osi symetrii fundamentu równoległej do dłuższego boku w równych odległościach od środka fundamentu (Rys. 13). Obserwacja ta pozwoliła mi na zrezygnowanie z procedury optymalizacyjnej i kompleksowe przeanalizowanie pojedynczego fundamentu i dwóch sondowań, korzystając z wyżej opisanej zależności. W zaproponowanym podejściu analizie poddałem sondowania symetrycznie rozmieszczone względem środka fundamentu (odległość od środka oznaczono jako d_B). Analizy przeprowadzono systematycznie zwiększając d_B . Tok obliczeń i uzyskiwane wyniki przedstawia poglądowy Rys. 14. W sytuacji, gdy d_B jest znacznie większe od połowy długości fundamentu, otrzymuje się maksymalną i ustabilizowaną wartość odchylenia standardowego nośności, a w miarę jak d_B ulega zmniejszeniu, wartość σ_B (odchylenia standardowego nośności z uwzględnieniem sondowań) maleje, osiągając w pewnym punkcie minimum. Lokalne maksimum jest obserwowane w przypadku, gdy d_B jest bliskie zeru (co oznacza sytuację, gdy oba sondowania są praktycznie w tym samym miejscu), co spowodowane jest nakładaniem się informacji pochodzących z obu sondowań. Przebieg krzywej opisującej odchylenie standardowe nośności fundamentu nie zawsze wygląda jak na Rys. 14 – można wyróżnić kilka rodzajów tych krzywych w zależności od stosunku pomiędzy skalami fluktuacji a rozmiarem fundamentu (Chwała, 2021a).



Rysunek 14. Poglądowe wyniki analiz dla dwóch sondowań rozmieszczonych na osi symetrii w równych odległościach od środka fundamentu (d_B) (Chwała, 2021a).

W pracy z 2021 roku (Chwała, 2021a) przeanalizowałem dziesiątki sytuacji obliczeniowych (różne rozmiary fundamentów i wartości skali fluktuacji). Podobnie jak w pracy z 2019 roku (Chwała, 2019a), także i w tym przypadku pokazałem, że poprzez odpowiednie znormalizowanie rezultatów, układają się one na jednej krzywej. Na Rys. 15 po lewej stronie przedstawiono wartości d_B dla optymalnego położenia sondowań w funkcji poziomej skali fluktuacji (każda krzywa odpowiada innej długości fundamentu). Rysunek po prawej stronie przedstawia te same dane otrzymane po znormalizowaniu obu osi przez długość fundamentu (a). Otrzymana krzywa jest unikalna dla rozpatrywanej pionowej skali fluktuacji ($\theta_v = 1$ m), a dla innych pionowych skali fluktuacji otrzymuje się nieco inną krzywą. Najistotniejszym rezultatem pracy z 2021 roku jest wykazanie, że wpływ poziomej skali fluktuacji na optymalne położenia sondowań jest bardzo ograniczony. Optymalne położenia sondowań oscylują w pobliżu 0.3 długości fundamentu. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku skrajnych wartości θ_h/a (bardzo mała lub bardzo duża wartość tego stosunku) optymalne położenia znacznie odbiegają od wskazanych $0.3a$, jednak w tych przypadkach umiejscowienie sondowań gdziekolwiek w obrębie fundamentu (pod warunkiem ich dostatecznego odseparowania) prowadzi do bardzo zbliżonych oszacowań odchylenia standardowego nośności fundamentu w stosunku do wartości minimalnej. Uzyskane wyniki okazały się bardzo obiecujące w kontekście planowanego obszaru zastosowań metody, a więc ograniczonej wiedzy o podłożu – skoro pozioma skala fluktuacji ma niewielki wpływ na optymalne położenia sondowań, mamy dużą szansę na wysoką efektywność wyznaczonych położenia sondowań (przed wykonaniem badań nie wiemy, jaka jest pozioma skala fluktuacji). Obserwacja ta była motywacją do dalszej pracy nad rozwojem tego podejścia, także z uwagi na trudności w szacowaniu samej wartości skali fluktuacji, w szczególności poziomej – jest to spore wyzwaniem w praktyce geotechnicznej (Ching i in., 2018).



Rysunek 15. Optymalne położenia sondowań dla przypadku dwóch sondowań i fundamentu prostokątnego o różnych długościach. Rysunek prawy pokazuje wartości z rysunku lewego po znormalizowaniu przez długość fundamentu (Chwała, 2021).

W drugiej pracy dotyczącej zagadnienia optymalizacji położenia sondowań (Chwała i in., 2022) przedstawiono nowe i bardziej uniwersalne podejście w stosunku do wcześniej zaproponowanej metody (Chwała, 2020b). Nowe podejście opiera się na niedawno opracowanej metodzie *Asymptotic Bayesian Optimization* (ABO, Jerez i in., 2022). Dostosowując metodę ABO do potrzeb optymalizacji położenia sondowań nawiązałem współpracę z twórcami tej metody (Danko Jerez, prof. Hector Jensen oraz prof. Michael Beer). Funkcją celu, podobnie jak we wcześniej opisanym podejściu, jest minimalizacja odchylenia standardowego nośności fundamentu ($\sigma_p(\mathbf{d})$) przy ograniczeniu dostępnego obszaru poszukiwań (np. ograniczenie z uwagi na dostępny obszar pod wykonanie badań gruntu). Ideą zastosowania metody ABO jest przekształcenie problemu optymalizacyjnego w zadanie uzyskania położenia sondowań ze specjalnie zadanego rozkładu gęstości prawdopodobieństwa tak, aby w kolejnych etapach procedury otrzymywane rozkłady położenia sondowań były coraz bardziej skoncentrowane w pobliżu położenia optymalnych. Rozkład $f_T(\mathbf{d})$ możemy interpretować jako rozkład potomny (*posterior distribution*) otrzymany na podstawie rozkładu pierwotnego $U_D(\mathbf{d})$ (*prior distribution*) poprzez odpowiednią modyfikację wynikającą z członu zaczerpniętego z metody *simulated annealing*, który jest tzw. funkcją wiarygodności (*likelihood function*). Wyżej opisaną zależność przedstawia Równanie (6):

$$f_T(\mathbf{d}) \propto U_D(\mathbf{d}) \exp\left(-\frac{\sigma_p(\mathbf{d})}{T}\right), \quad T > 0 \quad (6)$$

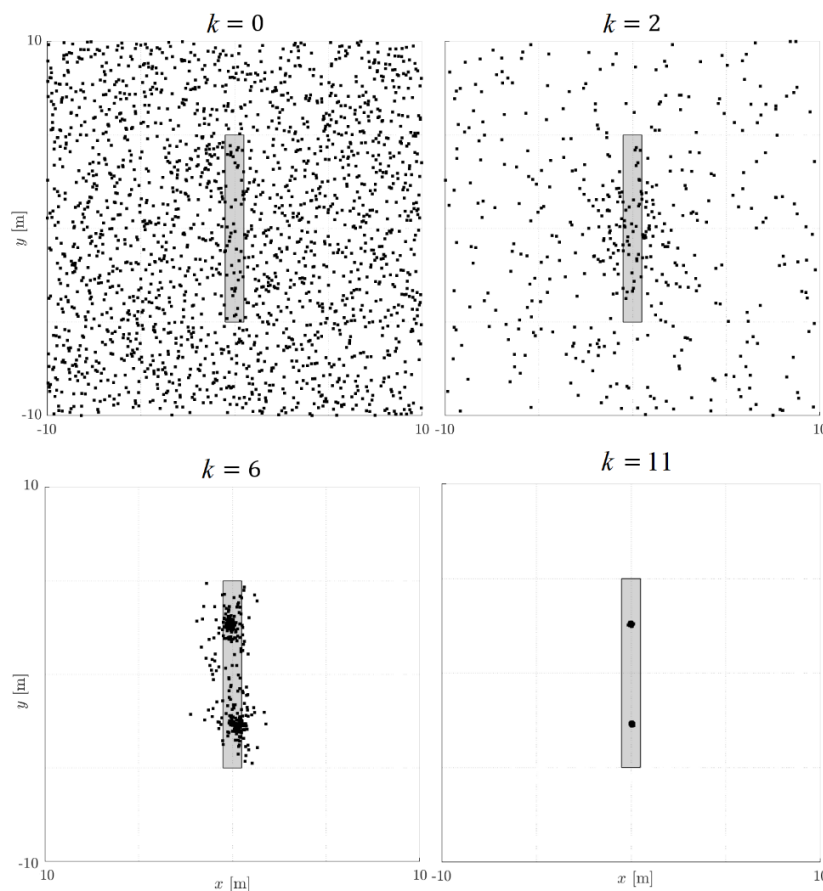
Gdzie T jest parametrem nazywanym temperaturą. Zauważmy, że dla $T \rightarrow \infty$ rozkład potomny $f_T(\mathbf{d})$ jest równy rozkładowi jednostajnemu $U_D(\mathbf{d})$. Wraz ze zmniejszaniem wartości T , rozkład potomny staje się coraz bardziej skoncentrowany w pobliżu optymalnego rozwiązania. W związku z powyższym, znalezienie optymalnego rozwiązania wiąże się z uzyskaniem rozkładu położenia sondowań w ramach problemu uaktualniania Bayesowskiego (*Bayesian model updating*), gdzie końcowy rozkład potomny dany jest przez $\lim_{T \rightarrow 0} f_T(\mathbf{d})$. Zagadnienie uaktualniania rozwiązywane jest za pomocą metody TCMCMC (*Transitional Markov Chain Monte Carlo*, Ching i Chen, 2007), co sprowadza się do otrzymania sekwencji pośrednich rozkładów zdefiniowanych następująco:

$$f_{T_0}(\mathbf{d}) = U_D(\mathbf{d}) \quad (T_0 = \infty)$$

$$f_{T_k}(\mathbf{d}) \propto U_D(\mathbf{d}) \exp\left(-\frac{\sigma_p(\mathbf{d})}{T_k}\right), \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

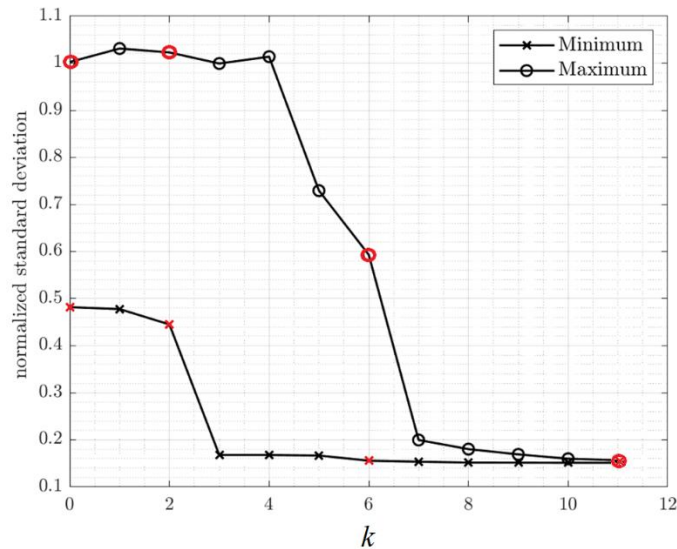
gdzie kolejne wartości T spełniają następujące nierówności: $\infty = T_0 > T_1 > \dots > T_m \rightarrow 0$. Więcej szczegółów dotyczących implementacji metody można znaleźć w pracy (Chwała i in., 2022).

Istotną zaletą podejścia opartego na ABO jest możliwość analizy pośrednich rozkładów i skonfrontowanie ich z przedziałem wartości odchylenia standardowego nośności. Jest to bardzo użyteczne z punktu widzenia praktyki, ponieważ rozkłady położen dają nam cenną informację nie tylko o optymalnych położeniach, ale przede wszystkim o wrażliwości funkcji celu na zmianę położen sondowań. Takie ujęcie zagadnienia może być zastosowane do zaproponowania ogólnych wytycznych do umiejscawiania sondowań w projektowaniu fundamentów bezpośrednich (jest to ważny aspekt możliwości zastosowania opracowanej metody w zagadnieniach praktycznych). Na Rys. 16 przedstawiam przykładowe wyniki dla zagadnienia pojedynczego fundamentu oraz dwóch sondowań. Dodatkowo, na Rys. 17 pokazano wartości odchylenia standardowego nośności (wartość znormalizowana względem przypadku bez sondowań) w kolejnych etapach metody optymalizacyjnej. Pokazano dwie krzywe: górna oznacza maksymalną wartość odchylenia standardowego nośności w zbiorze położen sondowań otrzymanym w określonym etapie, natomiast dolna przedstawia wartość minimalną. Pod koniec procesu optymalizacyjnego obie wartości są praktycznie równe, a rozkłady gęstości położen sondowań skoncentrowane są w bardzo małych obszarach (prawy dolny diagram na Rys. 16).



Rysunek 16. Otrzymane rozkłady położen dwóch sondowań w czterech różnych etapach metody ABO. $k = 0$ odpowiada rozkładowi jednostajnemu, $k = 11$ rozkładowi końcowemu. W analizach przyjęto fundament o wymiarach 1 x 10 m, pionowa i pozioma skala fluktuacji odpowiednio 1 m i 5 m.

W pracy (Chwała i in., 2022) zademonstrowano wysoką skuteczność ABO w rozwiązywaniu zagadnienia optymalizacyjnego polegającego na poszukiwaniu optymalnych położenia sondowań dla pojedynczego fundamentu. Efektywność zaproponowanego podejścia pozwoli w przyszłości na zastosowanie go do większej liczby fundamentów.



Rysunek 17. Maksymalne i minimalne wartości znormalizowanego odchylenia standardowego nośności fundamentu w funkcji etapów metody ABO (k). Cztery etapy z Rysunku 16 oznaczono kolorem czerwonym.

Rozszerzenie metody do wielu fundamentów i sondowań (cel D)

Metoda RFMM została rozszerzona do większej liczby fundamentów w ostatniej pracy cyklu (Chwała i in., 2023). Ważnym aspektem związanym z analizą dwóch lub więcej fundamentów jest zaproponowanie odpowiednich miar efektywności położenia sondowań. W sytuacji pojedynczego fundamentu naturalną miarą jest minimalizacja odchylenia standardowego lub współczynnika zmienności nośności (z czego korzystałem w pracach Chwała, 2020b; Chwała i in., 2022). Sytuacja ulega skomplikowaniu w przypadku większej liczby fundamentów, w związku z czym wspólnie z pozostałymi autorami zaproponowaliśmy sześć uniwersalnych miar pozwalających na ocenę efektywności położenia sondowań. Zaproponowane miary mogą być wykorzystane w ramach dowolnej metody, także RFEM, a jedynym ograniczeniem pozostaje efektywność numeryczna samej metody. Poniżej podaję dla przykładu dwie miary oparte na analizie odchylenia standardowego nośności. Średnią miarę znormalizowaną (*average normalized measure*) zdefiniowano w Równaniu (8):

$$\hat{\delta}_{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^{n_F} \frac{\sigma_{p,i}}{\sigma_{p,i}^{\text{unc}}}}{n_F} \quad (8)$$

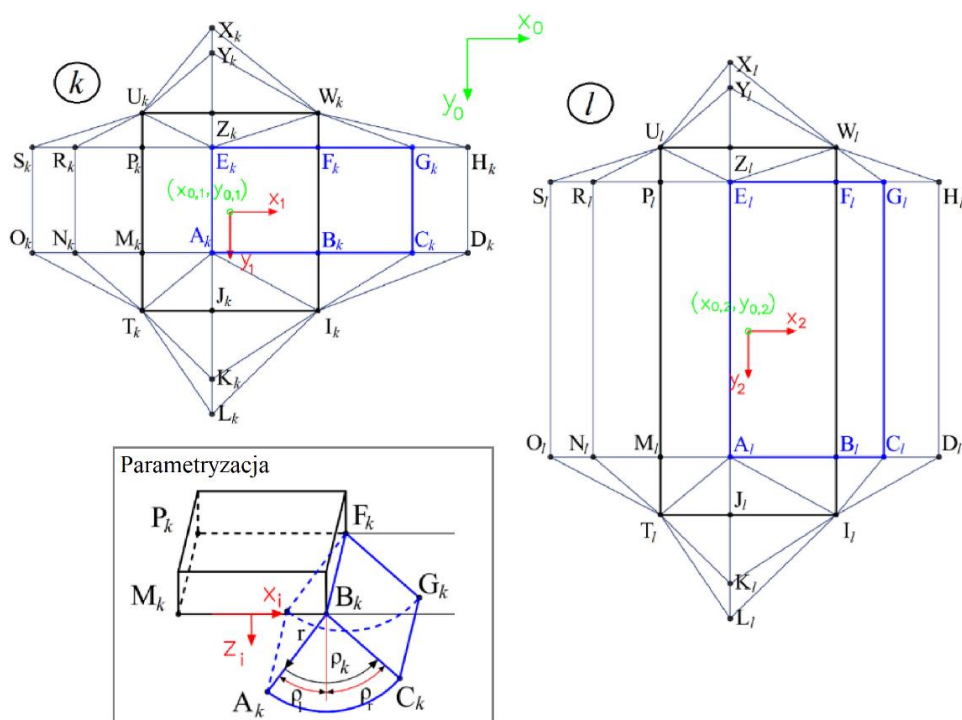
Gdzie n_F oznacza liczbę fundamentów w rozpatrywanym układzie. Miara z Równania (8) określa, o ile średnio zredukowane zostają odchylenia standardowe nośności fundamentów dla danego rozkładu sondowań w stosunku do sytuacji bez sondowań. Inne podejście prezentuje miara z Równania (9), nazwana maksymalną miarą znormalizowaną (*maximum normalized measure*), której wartość oznacza minimalny poziom redukcji względem sytuacji bez sondowań dla wszystkich fundamentów.

$$\hat{\psi}_{\sigma} = \max_{i=1, \dots, n_F} \left(\frac{\sigma_{p,i}}{\sigma_{p,i}^{\text{unc}}} \right) \quad (9)$$

Zastosowanie różnych definicji miar skutkuje różnymi efektywnościami układu sondowań. Dobór odpowiedniej miary jest uwarunkowany rodzajem rozpatrywanej konstrukcji. Zaproponowane

podejście pozwala także w prosty sposób uwzględnić wagi dla poszczególnych fundamentów, które mogłyby być wprowadzone np. przez projektanta konstrukcji. Opracowanie tej części zostało przeprowadzone możliwie jak najbardziej uniwersalnie – tak, aby w ramach różnych metod można było korzystać ze wszystkich zaproponowanych miar.

Rozwiązanie zagadnienia dla wielu fundamentów w ramach RFMM musiało zostać poprzedzone rozszerzeniem metody w stosunku do propozycji przedstawionej w pracach (Chwała, 2019a, 2020a, 2022). Wymagało ono nowych wyprowadzeń wzorów na współczynniki macierzy kowariancji. Należy zwrócić uwagę, że w ramach RFMM wszystkie obszary dyssypacji są ze sobą skorelowane, tzn. nie tylko skorelowane w obrębie danego fundamentu, ale także pomiędzy fundamentami. Oznacza to, że rozmiar macierzy kowariancji wynosi $30n_F \times 30n_F$. Nowo powstała macierz kowariancji złożona jest z części odpowiadających za korelacje w obrębie pojedynczego fundamentu oraz części korelujących wszystkie obszary dyssypacji k -tego fundamentu ze wszystkimi obszarami dyssypacji l -tego fundamentu. Przykładową sytuację przedstawia Rys. 18, gdzie kolorem niebieskim oznaczono cylindryczny obszar ABC-EFG oraz jego parametryzację wykorzystaną w wyprowadzeniu wzoru na kowariancję pomiędzy tymi samymi obszarami w dwóch fundamentach (w przypadku funkcji korelacji typu Gaussa), który to wzór przedstawiono w Równaniu (10).

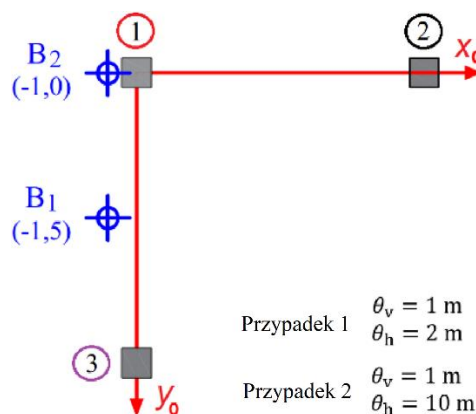


Rysunek 18. Widok z góry na dwa mechanizmy zniszczenia oraz parametryzację wykorzystaną w wyprowadzeniu Równania (10).

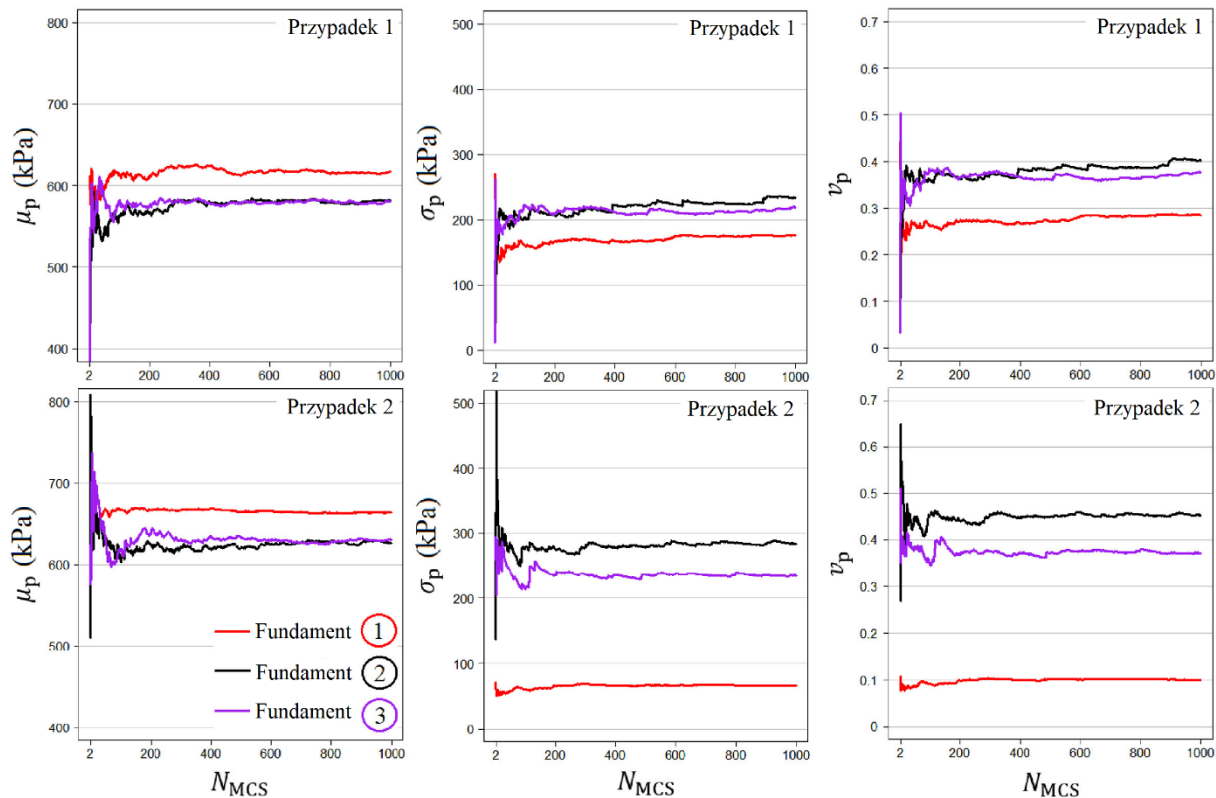
$$\begin{aligned}
 & \text{Cov}(X_{A_k B_k C_k - E_k F_k G_k}, X_{A_l B_l C_l - E_l F_l G_l}) = \\
 & = \int_{-\rho_{l_k}}^{\rho_{r_k}} \int_0^{y_{F_k}} \int_{y_{B_k}}^{\rho_{r_l}} \int_{-\rho_{l_l}}^{\rho_{r_l}} \int_0^{y_{F_l}} \int_{y_{B_l}}^{\rho_{r_l}} \exp \left[- \left(\frac{x_{B_k} + r_k \sin \rho_k - (x_{B_l} + r_l \sin \rho_l)}{\omega_x} \right)^2 \right] \times \\
 & \times \exp \left[- \left(\frac{y_k - y_l}{\omega_y} \right)^2 \right] \exp \left[- \left(\frac{r_k \cos \rho_k - r_l \cos \rho_l}{\omega_z} \right)^2 \right] r_k r_l d\rho_k dr_k dy_k d\rho_l dr_l dy_l
 \end{aligned} \tag{10}$$

Gdzie $\omega_x = \theta_x/\sqrt{\pi}$, $\omega_y = \theta_y/\sqrt{\pi}$, $\omega_z = \theta_z/\sqrt{\pi}$. Aby otrzymać wszystkie kowariancje pomiędzy obszarami dyssypacji dla dwóch fundamentów, wyprowadziłem 900 wzorów analogicznych do Równania (10). Pewnym ułatwieniem był fakt, że niektóre z nich były powielane z uwagi na podobieństwa (w implementacji aktualizowano jedynie wartości początkowe, takie jak współrzędne punktów). Końcowy rozmiar macierzy kowariancji $[C]_{n_B}^{n_F}$ po uwzględnieniu położenia fundamentów to $(30n_F + n_B) \times (30n_F + n_B)$. Podobnie jak poprzednio, uśrednione wartości spójności w warunkach bez odpływu oraz uwarunkowane położeniami sondowań otrzymuje się poprzez ich generowanie na podstawie macierzy kowariancji (Chwała i in., 2023). Warto dodać, że rozpatrzenie kilku fundamentów jednocześnie z uwzględnieniem kilku sondowań wykracza daleko poza możliwości losowej metody elementów skończonych. Oczywiście metoda RFMM w zastosowaniu do kilku fundamentów ma ograniczenie spowodowane założoną niezależnością mechanizmów zniszczenia, w związku z czym należy pamiętać o zapewnieniu wystarczającej odległości pomiędzy fundamentami, co w przypadku warunków bez odpływu oznacza zapewnienie odległości powyżej dwukrotności szerokości fundamentu.

Rys. 19 przedstawia przykład zastosowania opracowanej metody do trzech kwadratowych stóp fundamentowych rozmieszczonych w odległościach 10 m od siebie oraz dwóch sondowań. Rozpatrzono dwie wartości poziomej skali fluktuacji. Otrzymane rezultaty w postaci wartości średniej, odchylenia standardowego oraz współczynnika zmienności nośności każdego z fundamentów przedstawiono na Rys. 20. Wyniki przedstawiono w funkcji liczby realizacji Monte Carlo przyjętych do oszacowania ww. charakterystyk rozkładu nośności. Analiza dwóch wartości poziomych skali fluktuacji pozwala na pokazanie jej wpływu na otrzymane rozkłady nośności podłoża. Można zauważyć, że fundament 1, w pobliżu którego znajduje się sondowanie B₂, ma w obu przypadkach najmniejsze odchylenia standardowe oraz współczynniki zmienności nośności. Zwiększenie skali fluktuacji (przypadek 2) znacząco zmniejsza obie te wartości. Ciekawą obserwacją jest porównanie wartości średnich dla obu przypadków skali fluktuacji, mianowicie: mniejsze wartości średnie otrzymano dla poziomej skali fluktuacji 2 m, co jest manifestacją wspomnianego już efektu najgorszego przypadku (*worst-case effect*), widocznego także w sytuacji, gdy generuje się uwarunkowane parametry podłoża. Więcej szczegółowych obserwacji i wniosków dla większej liczby fundamentów przedstawiono w opisywanej pracy (Chwała i in. 2023).



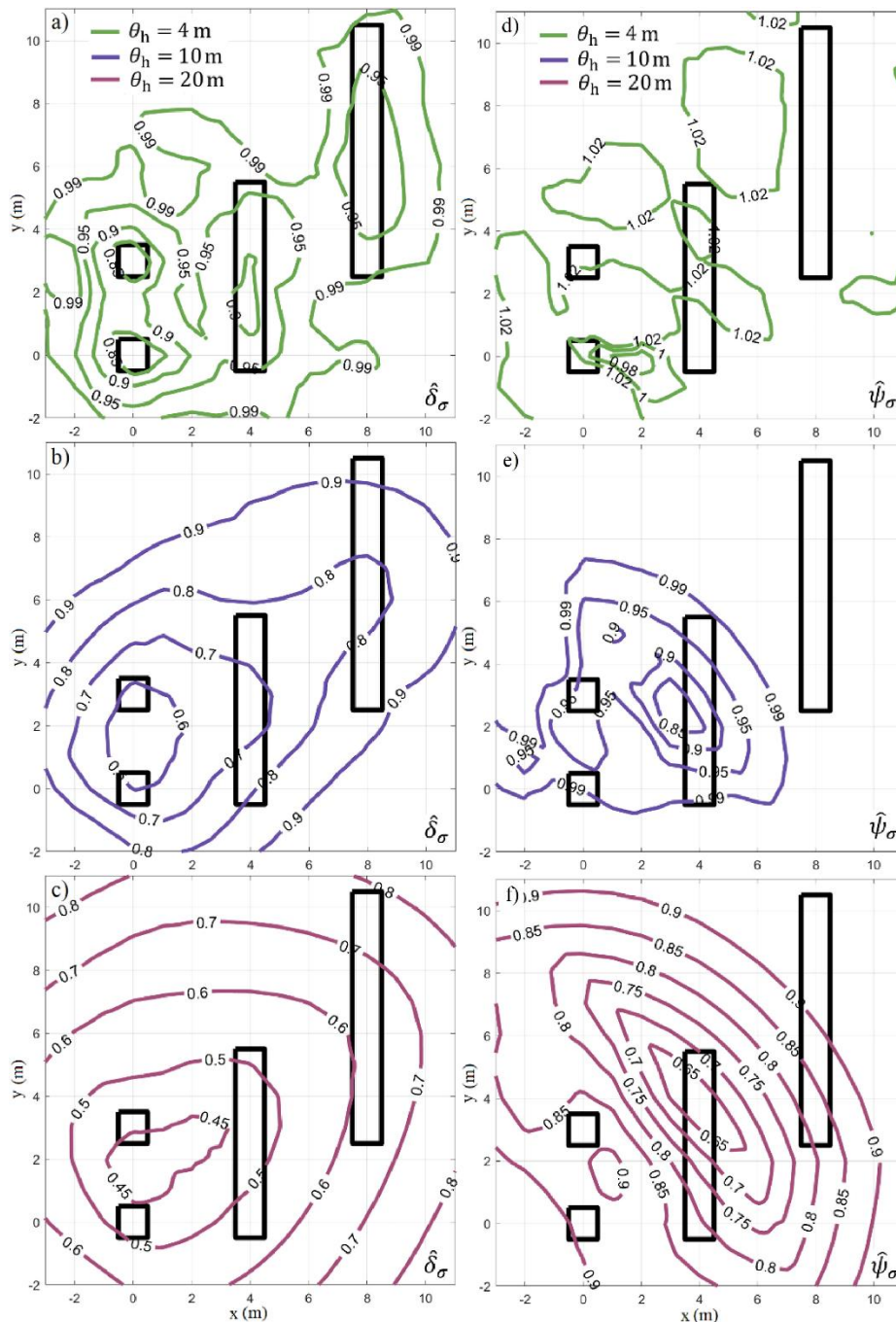
Rysunek 19. Położenie fundamentów i sondowań. Rezultaty przedstawiono na Rys. 20.



Rysunek 20. Wartości średnie, odchylenia standardowe oraz współczynniki zmienności nośności każdego z trzech fundamentów z Rys. 19. Analizy przeprowadzono dla funkcji korelacji typu Gaussa.

Wracając do tematu miar efektywności połączeń sondowań, które były jednym z głównych osiągnięć przedstawionym w omawianej pracy (Chwała i in., 2023), na Rys. 21 przedstawiłem wyniki analiz dla pojedynczego sondowania oraz dwóch stóp kwadratowych i dwóch fundamentów prostokątnych. Izolinie przedstawiające wartości obu miar przedstawionych w Równaniach (8) i (9) wyznaczono w oparciu o analizy przeprowadzone dla sondowania umiejscowionego na siatce kwadratowej w odstępach co 1 m (co daje 14 x 14 punktów, a więc 196 przypadków dla każdego z wykresów; dla każdego położenia sondowania przeprowadzono 300 realizacji Monte Carlo). Na przedstawionych wykresach widać wyraźne różnice pomiędzy obiema miarami. W przypadku średniej miary znormalizowanej $\hat{\delta}_\sigma$ minima osiągnane są w bezpośredniej bliskości fundamentów, z preferencją fundamentów mniejszych, co wynika z faktu, że odchylenia standardowe nośności mniejszych fundamentów wykazują większą redukcję niż w przypadku fundamentów o większych rozmiarach. Widać także, że efekt lokalności traci na znaczeniu, w miarę jak rośnie pozioma skala fluktuacji (Rys. 21b, c). Sytuacja wygląda inaczej w przypadku maksymalnej miary znormalizowanej, gdzie np. dla poziomej skali fluktuacji 4 m (Rys. 20d) nie zaobserwowano wyraźnego minimum (wahania +/- 2% wynikają z szumu numerycznego). Oznacza to, że jedno sondowanie przy tej wartości poziomej skali fluktuacji i założonego układu fundamentów nie pozwala na zredukowanie odchylenia standardowego wszystkich fundamentów (potrzebna jest większa liczba sondowań). Widzimy natomiast, że w miarę jak pozioma skala fluktuacji rośnie, pojawia się wyraźne minimum, a co więcej, nieznacznie się przesuwa przy dalszym wzroście poziomej skali fluktuacji (z 10 m na 20 m, Rys. 21e, f). Podobne wnioski obserwujemy, patrząc na wartości średniej miary znormalizowanej. Jest to ogólna zaobserwowana przez nas charakterystyka, która wskazuje, że pozioma skala fluktuacji nie jest wiodącym parametrem wpływającym na optymalne położenia sondowań. Oczywiście ma ona decydujący wpływ na wartości wskazanych miar, natomiast nie na samo optymalne położenie sondowań. Jest to bardzo obiecująca obserwacja w kontekście planowanego dalszego rozwoju zaproponowanego podejścia i szczególnie istotna z praktycznego punktu widzenia – opierając się na poczynionych w metodzie założeniach można wskazać najkorzystniejsze położenia sondowań ze

statystycznego punktu widzenia, w sytuacji ograniczonej wiedzy o podłożu lub nawet jej braku. Dopiero po wykonaniu tych sondowań można będzie korzystać z innych metod w celu możliwie precyzyjnego oszacowania wartości skali fluktuacji (Kawa, 2023) i następnie modelowania za pomocą bardziej dokładnych metod, np. RFEM.



Rysunek 21. Średnia miara znormalizowana (a-c) oraz maksymalna miara znormalizowana (d-f) dla trzech wartości poziomych skali fluktuacji.

Podsumowanie

Z uwagi na bardzo ograniczone możliwości zastosowania RFEM do poszukiwania optymalnych położenia sondowań w trójwymiarowych zagadnieniach nośności fundamentów bezpośrednich, zaproponowana przeze mnie metoda oparta na RFMM oferuje unikalne możliwości analizy tego typu zagadnień. Podczas tworzenia i rozwoju metody w cyklu publikacji była ona

ukierunkowana na wsparcie procesu projektowania programu badań geotechnicznych w sytuacji ograniczonej wiedzy o podłożu (co jest często spotykaną sytuacją na początkowym etapie inwestycji). Metoda będzie dalej rozwijana, a pierwszym najbardziej naturalnym kierunkiem jest rozszerzenie metody optymalizacyjnej na rezultaty osiągnięte w ostatniej z prac w cyklu (Chwała i in., 2023), a więc zastosowanie do wielu fundamentów i wielu sondowań. Innym ważnym kierunkiem jest możliwość uwzględnienia rzeczywistych wyników sondowań statycznych, co można zrobić stosunkowo prosto przy wciąż akceptowalnej efektywności numerycznej. Zagadnienia wspomniane wyżej, a także inne związane z rozwojem i popularyzacją metody w środowisku geotechników w Polsce i na świecie będą przedmiotem mojej pracy w najbliższej przyszłości.

4.2. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowych

Poniżej przedstawiam dwa najważniejsze osiągnięcia naukowe poza głównym osiągnięciem opisanym w punkcie 4.1. W poniższych opisach pogrubiam prace, które przynależą do danego osiągnięcia naukowego. Szczegóły dotyczące wymienionych prac można znaleźć w liście referencji dołączonej poniżej opisów.

4.2.1. Tytuł pierwszego dodatkowego osiągnięcia naukowego

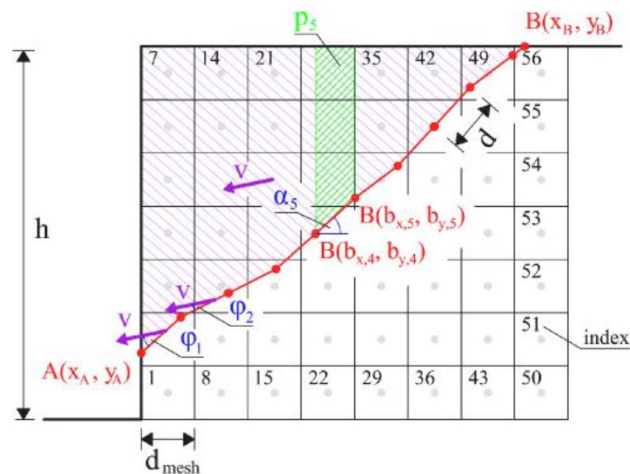
Stworzenie metody linii łamanych (broken line method) do szacowania stateczności skarp i nośności fundamentów w ramach oszacowania górnej nośności.

4.2.2. Opis pierwszego dodatkowego osiągnięcia naukowego

Widząc duży potencjał zastosowania twierdzenia o oszacowaniu górnym w analizie nośności fundamentów, zaproponowałem i opracowałem zupełnie nową metodę, korzystającą z zalety metody RFMM (opisanej w cyklu publikacji będącym moim głównym osiągnięciem naukowym), tj. sformułowałem metodę linii łamanych (*broken line method*). Podobnie jak RFMM, korzysta ona z wieloblokowych mechanizmów zniszczenia, zapewniając konkurencyjny czas obliczeń w stosunku do metod opartych na elementach skończonych. Ponadto, zależało mi na zapewnieniu większej elastyczności mechanizmu zniszczenia w porównaniu do RFMM oraz na możliwości analizy w przypadku jawnych reprezentacji pól losowych, co jest elementem charakterystycznym dla losowej metody elementów skończonych (RFEM). Konkludując, zaproponowana metoda łączy zalety obu metod (RFMM oraz RFEM), dając w rezultacie rozwiązanie kompromisowe (RFMM cechuje bardzo wysoka efektywność numeryczna, a RFEM wyróżnia się dużą elastycznością). Metoda po raz pierwszy została przedstawiona w mojej autorskiej pracy (Chwała, 2021b) w zastosowaniu do stateczności skarp. Następnie, w kolejnych pracach, rozwinąłem ją do zagadnień nośności fundamentów bezpośrednich (Chwała i Zhang, 2022a, 2022b) (wkład prof. Wengang Zhang w powstanie prac dotyczył przede wszystkim korekt napisanych przeze mnie manuskryptów).

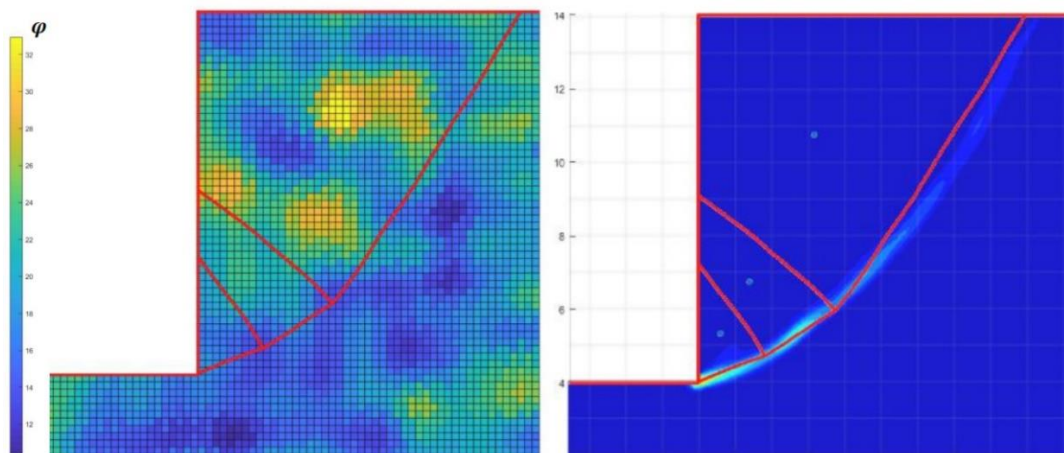
W pracy, w której po raz pierwszy opisałem metodę linii łamanych (Chwała, 2021b), przedstawiłem szczegółowy algorytm pozwalający na analizę stateczności skarpy za pomocą jedno i tryb blokowych mechanizmów zniszczenia. Przykład mechanizmu jednoblokowego, którego stosowalność ogranicza się do pionowych skarp lub skarp o bardzo dużych nachyleniach, prezentuje Rys. 1. W opracowanej metodzie pole losowe jest dyskretyzowane do kwadratowych elementów (d_{mesh}), które są reprezentowane przez współrzędne ich środków. Linia poślizgu nie jest prostą, ale łamaną, co wynika ze zmieniającej się wartości kąta tarcia wewnętrznego. Po założeniu długości odcinka prostego (d) wyznacza się geometrię linii poślizgu w oparciu o przedstawiony przeze mnie

algorytm i efektywny sposób przydzielania indeksów dyskretyzowanego pola losowego do określonych segmentów linii łamanej (sposób ten bazuje na dzieleniu modulo, a szczegóły można znaleźć w opisywanej pracy). Należy pamiętać, że blok gruntu jest sztywny, więc kąt tarcia w danym segmencie linii poślizgu determinuje jej pochylenie. Naturalnie, tak postawione zadanie prowadzi do mechanizmów zniszczenia, które są złożone z linii łamanych. Jest to przybliżenie, związane z założoną dyskretyzacją – gładkie powierzchnie w mechanizmie zniszczenia otrzymamy przy przejściu $d_{mesh} \rightarrow 0$, co oczywiście sprawi, że czas obliczeń będzie nieakceptowalny. W pracy pokazuję, że można osiągnąć satysfakcjonujący kompromis pomiędzy dokładnością a czasem obliczeń w zaproponowanej metodzie.



Rysunek 1. Ilustracja jednoblokowego mechanizmu zniszczenia (Chwała, 2021b).

Otrzymane rezultaty porównywałem z oszacowaniem górnym otrzymanym w ramach *random finite element limit analysis* (RFELA), korzystając z implementacji komercyjnej w oprogramowaniu OptumG2 (Optum CE, 2021). Porównania były wykonywane dla przypadków deterministycznych oraz probabilistycznych. Dodatkowo, przeprowadzałem analizy na tych samych polach losowych, które były odwzorowane z oprogramowania OptumG2, aby porównywać otrzymane mechanizmy zniszczenia. Zaobserwowałem bardzo dobrą zgodność obu podejść, zarówno w kontekście geometrii mechanizmów zniszczenia, jak i wartości współczynnika stateczności. W artykule pokazałem, że stworzona metoda jest wystarczająco elastyczna w zakresie dopasowywania geometrii zniszczenia, aby móc identyfikować najbliższe obszary w podłożu gruntowym. Przykładowe rezultaty porównania pokazano na Rys. 2, gdzie użyto pole losowe odwzorowane z programu OptumG2 oraz trybłokowy

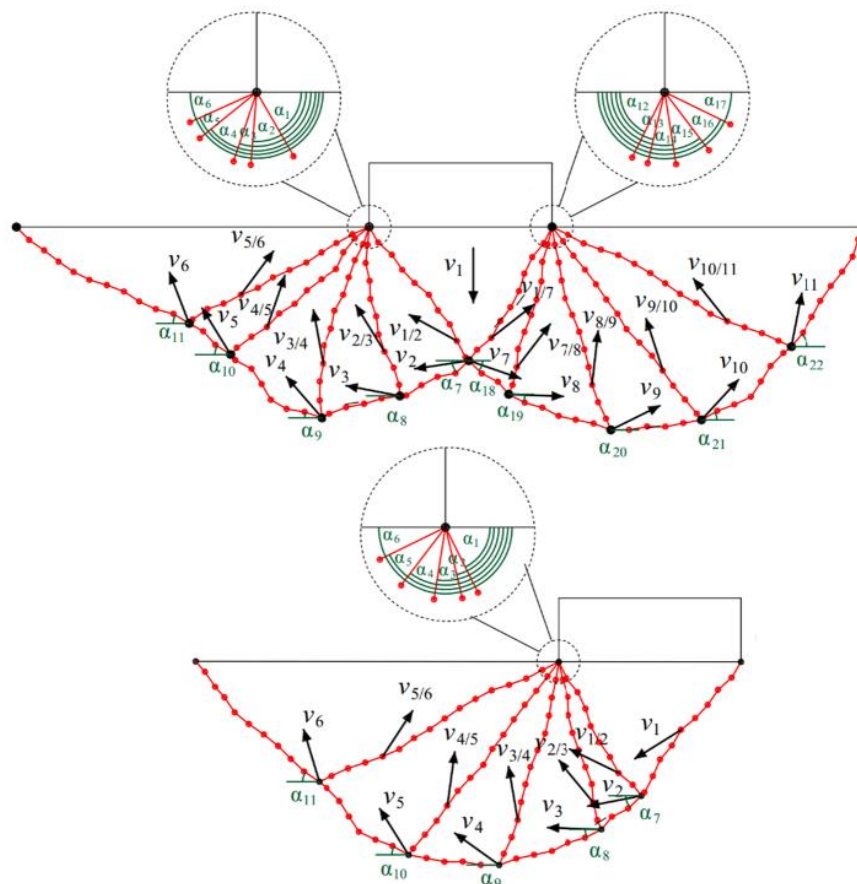


Rysunek 2. Przykład geometrii zniszczenia dla mechanizmu trybłokowego wraz z reprezentacją pola losowego kąta tarcia wewnętrznego. Po prawej porównanie otrzymanej geometrii zniszczenia z obszarami dysypacji wyznaczonymi w programie OptumG2.

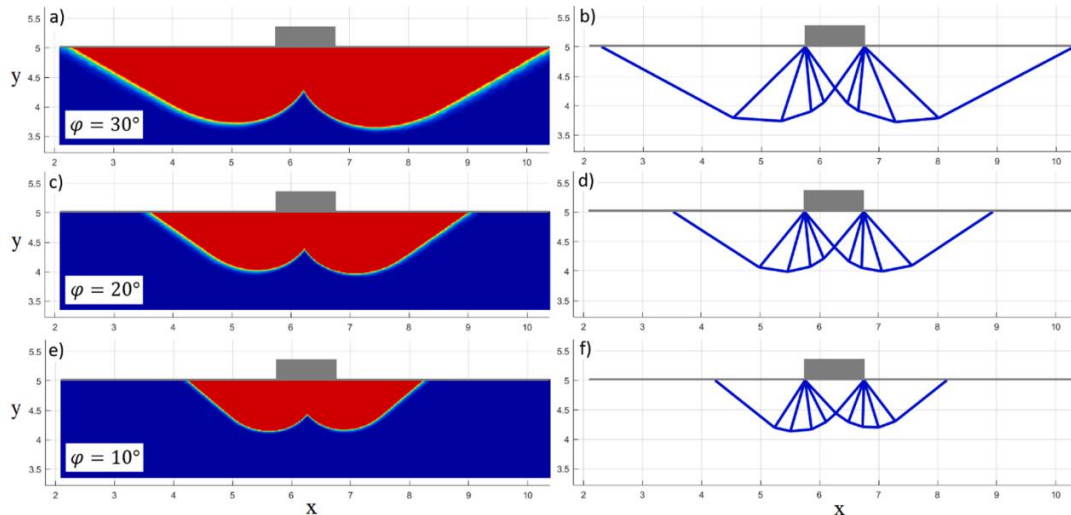
mechanizm zniszczenia oparty na liniach łamanych. Na rysunku można zauważyć, że znalezione linie poślizgu omijają obszary o wysokich wartościach kąta tarcia wewnętrznego (żółty kolor). Co więcej, porównując znaną geometrię zniszczenia z obszarami największej dyssypacji otrzymanymi w metodzie RFELA, widać bardzo dobrą zgodność obu geometrii.

W celu poszukiwania geometrii zniszczenia, która daje najniższą wartość oszacowania górnego, opracowałem autorską metodę optymalizacyjną opartą na metodzie *subset simulation* (Au i Beck, 2001). W przypadku mechanizmu trzyblokowego, z uwagi na skrócenie czasu obliczeń, uwzględniłem dodatkową procedurę, która poprawia rozwiązanie znalezione za pomocą metody *subset simulation* (tzw. *local search procedure*). Uzyskane czasy obliczeń są konkurencyjne w stosunku do bardzo efektywnej metody RFELA (średnio 300 razy krótsze dla mechanizmu jednoblokowego i 5 razy krótsze dla mechanizmu trzyblokowego). Ponieważ przy powstaniu metody i jej pierwszej implementacji zapewnienie wysokiej efektywności nie było podstawowym celem, istnieje duży potencjał do dalszego skrócenia czasu obliczeń. Metoda w zastosowaniach do analizy stateczności skarp daje duże pole do rozwoju w szczególności w zakresie uwzględnienia szczelin oraz zastosowań w analizie prawdopodobieństw awarii.

W pracy (Chwała i Zhang, 2022a) metoda linii łamanych została zaaplikowana do zagadnienia nośności fundamentów bezpośrednich. Wymagało to przeformułowania wielu elementów – przede wszystkim wprowadzenia dodatkowych warunków zapewniających poprawność mechanizmu zniszczenia w trakcie procedury optymalizacyjnej. W sformułowaniu metody uwzględniłem możliwość wystąpienia jednostronnych mechanizmów zniszczenia, zatem pełne rozwiązanie dla podłoża o cechach przestrzennie zmiennych zawierało analizę trzech mechanizmów zniszczenia: lewostronnego, prawostronnego i dwustronnego (Rys. 3).

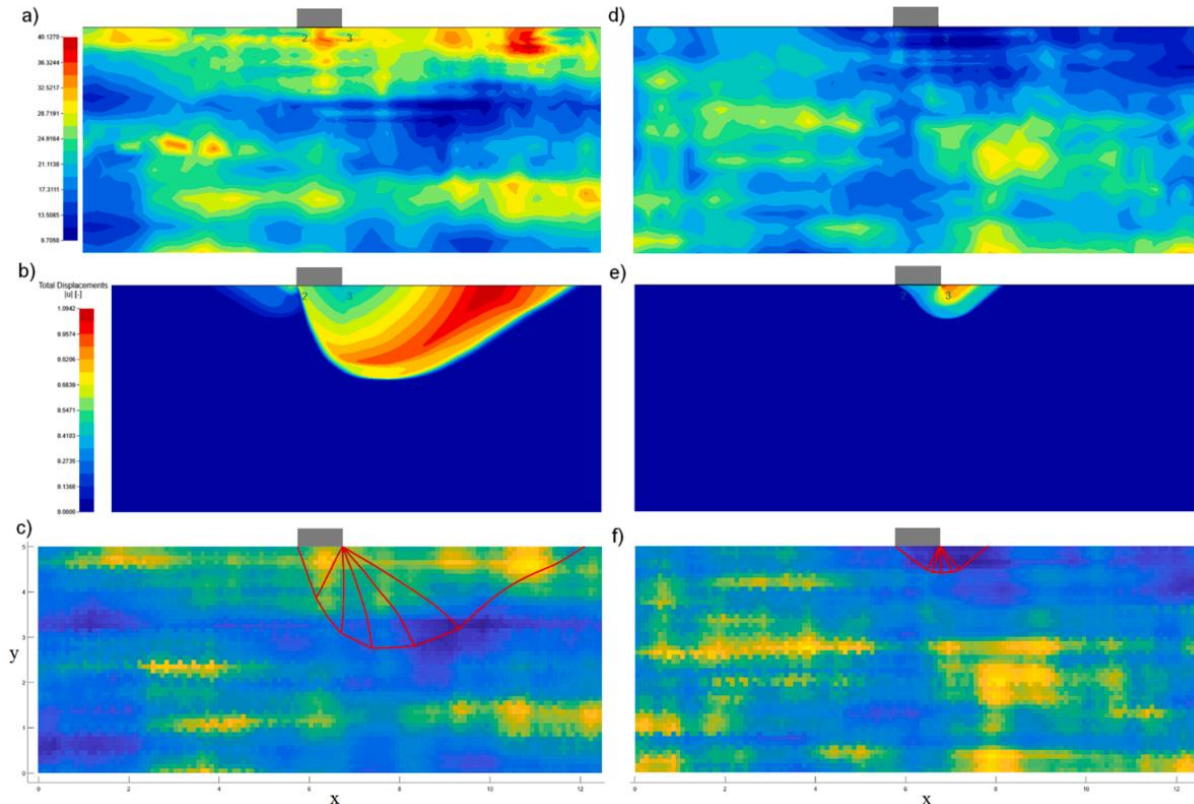


Rysunek 3. Geometrie mechanizmów dwustronnego i jednostronnego.



Rysunek 4. Porównanie rozmiarów mechanizmów zniszczenia; po lewej: FELA, po prawej: metoda linii łamanych (w przypadku deterministycznym są to linie proste).

Wykonano szereg porównań w przypadku deterministycznym z wynikami otrzymanymi metodą FELA (Rys. 4). Następnie, porównywano także przypadki pól losowych opisujących kąt tarcia wewnętrznego (analizy wykonywano na tych samych realizacjach pól losowych). Przykładowe rezultaty dla dwóch skrajnych wartości nośności pokazano na Rys. 5, gdzie (a-c) dotyczą maksymalnej wartości nośności wśród przeanalizowanych realizacji, natomiast (d-f) dotyczą minimalnej wartości nośności. Analizowano przypadek pionowej skali fluktuacji 0.5 m oraz poziomej skali fluktuacji równej 5 m. Również w tym przypadku zgodność pomiędzy obiema metodami jest bardzo dobra.



Rysunek 5. Porównanie rozmiaru mechanizmu zniszczenia otrzymanego w metodzie RFELA (a, b, d, e) z geometrią mechanizmu zniszczenia otrzymaną metodą linii łamanych (c, f).

Podsumowując, w opisanym osiągnięciu naukowym zaproponowałem oryginalną metodę do analizy zagadnienia stateczności skarp oraz nośności łąwy fundamentowej na podłożu o cechach przestrzennie zmiennych. Podjęcie łączy zalety metody opartej na mechanizmach zniszczenia (RFMM) z dużą elastycznością charakterystyczną dla metody elementów skończonych (RFEM). Wykazałem, że uzyskane rezultaty w analizowanych zagadnieniach są porównywalne z metodą RFELA, natomiast osiągnięte są w znacznie krótszym czasie. Otrzymałem oryginalne rezultaty związane z pierwszymi dostępnymi w literaturze analizami przy użyciu mechanizmów zniszczenia w przypadku jawnej reprezentacji pola losowego kąta tarcia wewnętrznego. Dzięki metodzie wykazałem, że w przypadku gruntu o cechach przestrzennie zmiennych, zastosowanie mechanizmu jednostronnego do analizy nośności posadowienia jest wystarczające, aby dobrze odwzorować rozkład nośności fundamentu. Dodatkowo, w opracowanej metodzie można bardzo prosto wyznaczyć wielkość mechanizmu zniszczenia, dzięki czemu możliwe było wykazanie, że otrzymane najmniejsze wartości nośności fundamentu są obserwowane dla mechanizmów zniszczenia o najmniejszych objętościach. Jest to ważna obserwacja z praktycznego punktu widzenia, ponieważ wskazuje, że ulepszenie własności podłoża (lub jego wymiana) w niewielkiej objętości może znacznie poprawić niezawodność konstrukcji. Metoda oferuje szerokie możliwości zastosowań, dalszych ulepszeń i rozszerzeń w kierunku nowych zagadnień (np. analiza podłoża dwuwarstwowego) oraz przejścia do analizy zagadnień trójwymiarowych.

4.2.3. Tytuł drugiego dodatkowego osiągnięcia naukowego

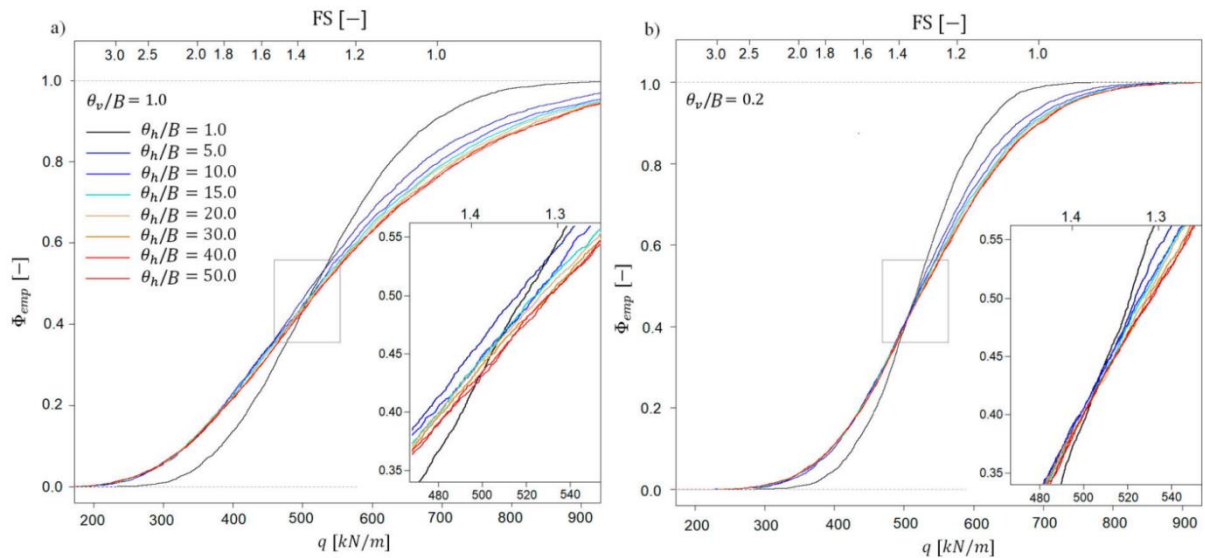
Analiza nośności i osiadania łąwy fundamentowej z uwzględnieniem przestrzennej zmienności parametrów podłoża.

4.2.4. Opis drugiego dodatkowego osiągnięcia naukowego

Poza głównym osiągnięciem naukowym (punkt 4.1) oraz osiągnięciem opisanym w punkcie 4.2.2, mam także wkład współautorski w badanie wpływu przestrzennej zmienności podłoża na nośność i analizę osiadania łąw fundamentowych wykraczający poza oba powyższe osiągnięcia.

W pracy z prof. Wojciechem Pułą (**Puła i Chwała, 2015**) rozwijałem podejście oparte na mechanizmie zniszczenia Prandtla (Prandtl, 1920) i teorii lokalnych uśrednień Vanmarcke'a (Vanmarcke, 1983). Opracowana metoda różniła się jednak od aktualnego sformułowania metody RFMM. Macierz kowariancji była uzależniona od jednej wartości kąta tarcia wewnętrznego, co wynikało z samego mechanizmu zniszczenia i było zasadniczą różnicą w stosunku do metody RFMM. Współczynniki macierzy kowariancji były obliczane z wcześniej wyznaczonych aproksymacji funkcjami wielomianowymi. W pracy uwzględniono wpływ wartości współczynnika korelacji pomiędzy wartościami spójności oraz kąta tarcia wewnętrznego. Wykonano szereg analiz niezawodnościowych dla dwóch przykładów fundamentów i założenia symetrycznego mechanizmu zniszczenia. Wykazano, że założenie braku korelacji pomiędzy kątem tarcia wewnętrznego i spójnością daje najbardziej konserwatywne oszacowanie wskaźników niezawodności (korelacje dodatnie nie były rozpatrywane).

W zakresie analiz nośności fundamentu bezpośredniego miałem także wkład w prace współautorskie z Joanną Pieczyńską-Kozłowską i prof. Wojciechem Pułą (**Puła i in., 2017; Pieczyńska-Kozłowska i in., 2023**), w których analizowaliśmy za pomocą losowej metody elementów skończonych efekt najgorszego przypadku (*worst-case effect*). Mój wkład był szczególnie istotny w pracy z 2023 roku, w której byłem odpowiedzialny za analizę empirycznych skumulowanych rozkładów gęstości prawdopodobieństwa nośności łąwy fundamentowej (Rys. 6).

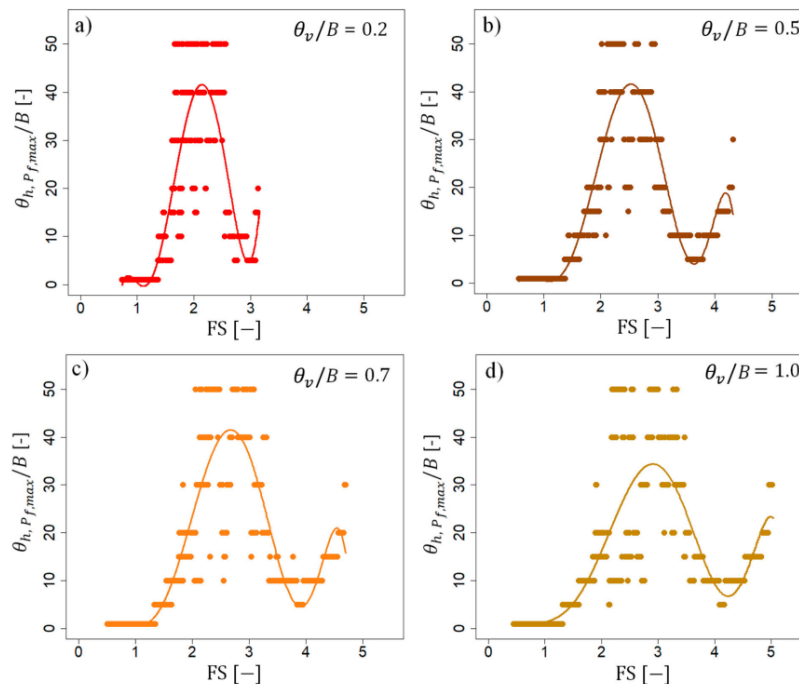


Rysunek 6. Empiryczne dystrybuanty nośności ławy fundamentowej uzyskane dla ośmiu wartości poziomych skali fluktuacji oraz dwóch wartości pionowej skali fluktuacji.

Na Rys. 6 widać, że niektóre z dystrybuant przecinają się wzajemnie, co oczywiście oznacza, że dla danej wartości nośności (oś pozioma) lub współczynnika bezpieczeństwa (FS) największe prawdopodobieństwo awarii otrzymujemy dla różnych poziomych skali fluktuacji. Należy uzupełnić, że współczynnik bezpieczeństwa $FS = 1$ odpowiada deterministycznej wartości nośności otrzymanej w ramach metody elementów skończonych. Bazując na analizach jak na Rys. 6, poprzez odłożenie na osi poziomej współczynnika bezpieczeństwa, a na osi pionowej wartości poziomej skali fluktuacji, można otrzymać wykresy wskazujące, która wartość poziomej skali fluktuacji daje największe prawdopodobieństwo awarii ławy fundamentowej. Wyniki takie są oryginalnym ujęciem efektu najgorszego przypadku (Rys. 7). Linie ciągłe są aproksymacją do wykresu punktowego wykonaną jedynie w celu pokazania uśrednionego przebiegu wykresu punktowego. Z uwagi na empiryczny charakter danych, w niektórych zakresach współczynnika bezpieczeństwa dystrybuanty przecinają się wielokrotnie (stąd „przeskakiwanie” punktów pomiędzy sąsiednimi wartościami poziomej skali fluktuacji na Rys. 7). W pracy pokazano, że wartość poziomej skali fluktuacji, dla której obserwuje się największą wartość prawdopodobieństwa awarii, jest uzależniona od wartości współczynnika bezpieczeństwa (FS). Analizy tego zagadnienia pozwoliły na zaproponowanie używania w analizach probabilistycznych nieskończonej wartości poziomej skali fluktuacji w przypadku względnie dużych współczynników bezpieczeństwa ($FS > 3$). Przy mniejszych współczynnikach trzeba mieć na uwadze, że mniejsze poziome skale fluktuacji mogą dać większe wartości prawdopodobieństw awarii. Otrzymane rezultaty są istotne w dyskusji nad praktycznymi możliwościami zastosowania tego efektu przy analizie nośności podłoża na gruncie o cechach przestrzennie zmiennych. Istota tego zagadnienia wynika ze znacznych problemów, jakie stwarza szacowanie poziomej skali fluktuacji.

Praktycznie wszystkie dostępne analizy probabilistyczne z zastosowaniem pól losowych - czy to dotyczące nośności, czy osiadań - stosują model Coulomba-Mohra, co w szczególności przy zastosowaniach do wyznaczania osiadań może wpływać negatywnie na jakość uzyskanych rezultatów. Znacznie dokładniejszym podejściem jest zastosowanie jednego z bardziej nowoczesnych modeli konstytutywnych, np. *Hardening Soil* (HS, Schanz i in., 1999), co jednak komplikuje prostotę opisu stosowaną w modelu Coulomba-Mohra i stwarza dodatkowe trudności przy analizach probabilistycznych. Będąc promotorem pomocniczym Daniela Teshagera, miałem możliwość zaangażować się w analizę osiadań ław fundamentowych z zastosowaniem modelu HS. Pierwsza praca z zastosowaniem modelu *Hardening Soil small* (HSs) w zastosowaniu do ściany szczelinowej została opublikowana dopiero w 2021 roku przez Marka Kawę i współautorów (Kawa i in., 2021).

Mój wkład w dotychczas opublikowane prace razem z Danielem Teshagerem oraz prof. Wojciechem Pułą (**Teshager i in., 2022; 2023**) dotyczył przede wszystkim zastosowania pól losowych do opisu



Rysunek 7. Wartości poziomej skali fluktuacji, dla której zaobserwowano największe prawdopodobieństwo awarii ławy fundamentowej.

przestrzennej zmienności parametrów podłoża występujących w ww. modelu oraz ich implementacji w ramach oprogramowania ZSoil (co wymagało odpowiedniego przygotowania plików wsadowych, gdyż aktualna wersja programu nie ma wbudowanej możliwości przeprowadzania analiz probabilistycznych). Dotychczas opublikowane wyniki w recenzowanych materiałach konferencyjnych mają charakter wstępny, związany przede wszystkim z prezentacją naszych doświadczeń w stosowaniu modelu *Hardening Soil* w analizach probabilistycznych. Praca w tym temacie jest kontynuowana.

4.3. Pozostały dorobek naukowy

Poza powyżej opisanymi osiągnięciami (główne osiągnięcie naukowe oraz dwa wyodrębnione osiągnięcia naukowe) w swoim dorobku posiadam także pojedyncze publikacje, które dotyczyły innych zagadnień niż szeroko pojęta analiza fundamentów bezpośrednich lub związanych z głównym osiągnięciem naukowym (natomiast niewprowadzające oryginalnych rozwiązań – co było warunkiem na to, żeby dana praca znalazła się w cyklu publikacji opisanym w punkcie 4.1). Wszystkie te prace zostały zestawione w wykazie osiągnięć naukowych (załącznik 4); są wśród nich dwie prace z bazy JCR, 8 prac w recenzowanych materiałach konferencyjnych i jeden rozdział w monografii.

4.4. Podsumowanie wkładu habilitanta w dyscyplinę inżynieria lądowa, geodezja i transport

- Moje główne osiągnięcie naukowe, które jest podstawą ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego, stanowi cykl publikacji pt. „Szacowanie losowej nośności

fundamentu bezpośredniego z optymalizacją lokalizacji sondowań”, w którym opracowałem nową metodę *random failure mechanism method* (RFMM) oraz jej rozszerzenie do możliwości analizy wielu fundamentów i sondowań łącznie z zaproponowaniem procedur optymalizacyjnych. Cykl publikacji składa się z 11 artykułów, w tym 8 jest indeksowanych w bazie JCR, a łączny wskaźnik Impact Factor czasopism w roku opublikowania artykułów wynosi 30.533.

- Poza głównym cyklem publikacji w skład mojego dorobku naukowego wchodzi 7 artykułów, z czego 6 opublikowanych w czasopismach indeksowanych w bazie JCR (łączny wskaźnik Impact Factor czasopism w roku opublikowania artykułów wynosi 24.723) oraz 12 artykułów w recenzowanych materiałach konferencyjnych i jeden rozdział w monografii.
- Łączny dorobek stanowi 14 artykułów w czasopismach indeksowanych w bazie JCR o łącznym wskaźniku Impact Factor w roku opublikowania równym 55.256. Mój indywidualny wkład w ich powstanie jest znaczący: 100% w przypadku 5 artykułów, 90% w przypadku 1 artykułu, 67% w przypadku 2 artykułów, 50% w przypadku 3 artykułów, 33% w przypadku 2 artykułów oraz 10% w przypadku 1 artykułu. Większość z tych artykułów została opublikowanych w uznanych na arenie międzynarodowej czasopismach:
 - 4 artykuły w czasopiśmie *Computers and Geotechnics*,
 - 3 artykuły w czasopiśmie *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*,
 - 2 artykuły w czasopiśmie *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*,
 - 1 artykuł w czasopiśmie *Soils and Foundations*
 - 1 artykuł w czasopiśmie *Geotechnique Letters*
 - 1 artykuł w czasopiśmie *Studia Geotechnica et Mechanica*
 - 1 artykuł w czasopiśmie *Plos One*
 - 1 artykuł w czasopiśmie *Forests*
- Wykonałem kilkanaście recenzji dla uznanych czasopism o zasięgu międzynarodowym, np. *Studia Geotechnica et Mechanica*, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, *Computers and Geotechnics*, *Acta Geotechnica*, *Transport in Porous Media*.

Za najważniejszy wkład wniesiony w dyscyplinę inżynieria lądowa, geodezja i transport uważam stworzenie autorskiej metody pozwalającej na optymalizację położenia sondowań statycznych gruntu (CPT) w analizie nośności fundamentów bezpośrednich posadowionych na podłożu o cechach przestrzennie zmiennych. Pomysł ten zrealizowałem od koncepcji, poprzez opracowanie teoretyczne aż do implementacji. Celem podejścia jest minimalizacja wartości odchylenia standardowego nośności podłoża (lub współczynnika zmienności nośności) tak, aby możliwie maksymalnie wykorzystać informację płynącą z sondowań (manipulując ich położeniami). Z uwagi na korelację przestrzenną, sondowania CPT znajdujące się bliżej fundamentu w większym stopniu redukują wartość odchylenia standardowego nośności niż te znajdujące się dalej (istotny jest także rozkład energii dyssypacji pod fundamentem – dlatego ważne jest uwzględnienie charakteru mechanizmu niszczenia adekwatnego do rozważanej konstrukcji). Osiągnięcie powyższego było możliwe dzięki opracowaniu metody RFMM, którą rozszerzyłem także do możliwości zastosowań w przypadku wielu sondowań i fundamentów. Osiągnięto bezkonkurencyjny czas obliczeń w stosunku do dostępnych metod, w szczególności do często stosowanej RFEM, a skrócenie czasu obliczeń jest rzędu 1000 – 10000 razy. Zaproponowany algorytm jest pierwszym tego typu podejściem dostępnym w literaturze i z uwagi na swój duży potencjał będzie dalej rozwijany. Osiągnięte rezultaty pozwalają na umieszczanie sondowań w najlepszych możliwych miejscach w momencie ograniczonej wiedzy o podłożu oraz na wskazywanie, jaka liczba sondowań jest konieczna, aby uzyskać pożądaną redukcję w

niepewności wyznaczania nośności fundamentów – co oczywiście przekłada się na wzrost efektywności badań podłoża, a tym samym na zwiększenie bezpieczeństwa konstrukcji.

4.5. Literatura cytowana w autoreferacie

W poniższym wykazie pomijam artykuły będące głównym osiągnięciem naukowym i wymienione w punkcie 4.1.3

Au, S. K., & Beck, J. L. (2001). Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation. *Probabilistic engineering mechanics*, 16(4), 263-277.

Biernatowski, K. (1966a). Stateczność fundamentów cz. I – Zastosowanie rachunku prawdopodobieństwa dla oceny współczynników bezpieczeństwa przy sprawdzaniu fundamentów. *Archiwum Hydrotechniki* 13 (2): 239–262.

Biernatowski, K. (1966b). Stateczność Fundamentów cz. II – Stateczność na obrót i przesunięcie w ujęciu probabilistycznym. *Archiwum Hydrotechniki* 13 (2): 283–302

Cami, B., Javankhoshdel, S., Phoon, K. K., & Ching, J. (2020). Scale of fluctuation for spatially varying soils: estimation methods and values. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 6(4), 03120002.

Canadian Standards Association. (2014). Canadian Highway Bridge Design Code. CAN/CSA-S6-14, Mississauga, Ont.

Chen, W. F. (Ed.). (2013). *Limit analysis and soil plasticity*. Elsevier.

Ching, J., & Chen, Y. C. (2007). Transitional Markov chain Monte Carlo method for Bayesian model updating, model class selection, and model averaging. *Journal of engineering mechanics*, 133(7), 816-832.

Chen, H., Wang, L., Tian, Y., & Qi, C. (2023). Probabilistic bearing capacities of strip foundation on two-layered clay. *Ocean Engineering*, 269, 113572.

Ching, J., Wu, T. J., Stuedlein, A. W., & Bong, T. (2018). Estimating horizontal scale of fluctuation with limited CPT soundings. *Geoscience Frontiers*, 9(6), 1597-1608.

Ching, J. (2022). Summary Report for TC304 Time Capsule Project, Technical Committee of Engineering Practice of Risk Assessment & Management (TC304) of ISSMGE

Chwała, M., Phoon, K. K., Uzielli, M., Zhang, J., Zhang, L., & Ching, J. (2022). Time capsule for geotechnical risk and reliability. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 1-28.

Chwała, M. (2021b). Upper-bound approach based on failure mechanisms in slope stability analysis of spatially variable c - ϕ soils. *Computers and Geotechnics*, 135, 104170.

Chwała, M., & Zhang, W. (2022a). Broken line random failure mechanism method in foundation bearing capacity assessment for spatially variable soil. *Computers and Geotechnics*, 150, 104903.

Chwała, M., & Zhang, W. (2022b). Multi-Block Failure Mechanism Approach with Broken Lines in Bearing Capacity Estimation of Spatially Variable Soil. Proc. of the 8th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR)

- Comité Européen de Normalisation. 2004. EN 1997-1: Geotechnical Design – Part 1: General Rules.
- Crisp, M. P., Jaksa, M. B., Kuo, Y. L., Fenton, G. A., & Griffiths, D. V. (2021). Characterizing site investigation performance in a two layer soil profile. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 48(2), 115-123.
- Fenton, G. A., & Griffiths, D. V. (2008). *Risk assessment in geotechnical engineering* (Vol. 461). New York: John Wiley & Sons.
- Griffiths, D. V., & Fenton, G. A. (2001). Bearing capacity of spatially random soil: the undrained clay Prandtl problem revisited. *Geotechnique*, 51(4), 351-359.
- Goldsworthy, J. S., Jaksa, M. B., Fenton, G. A., Kaggwa, W. S., Griffiths, V., & Poulos, H. G. (2007). Effect of sample location on the reliability based design of pad foundations. *Georisk*, 1(3), 155-166.
- Gong, W., Tien, Y. M., Juang, C. H., Martin, J. R., & Luo, Z. (2017). Optimization of site investigation program for improved statistical characterization of geotechnical property based on random field theory. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76, 1021-1035.
- Guan, Z., Wang, Y., & Zhao, T. (2022). Adaptive sampling strategy for characterizing spatial distribution of soil liquefaction potential using cone penetration test. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(4), 1221-1231.
- Honjo, Y., Kikuchi, Y., & Shirato, M. (2010). Development of the design codes grounded on the performance-based design concept in Japan. *Soils and Foundations*, 50(6), 983-1000.
- Horn, R. A., & Johnson, C. R. (2012). *Matrix analysis*. Cambridge university press.
- Hu, J. Z., Zheng, J. G., Zhang, J., & Huang, H. W. (2023). Bayesian framework for assessing effectiveness of geotechnical site investigation programs. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 9(1), 04022054.
- Huang, L., Huang, S., & Lai, Z. (2020). On the optimization of site investigation programs using centroidal Voronoi tessellation and random field theory. *Computers and Geotechnics*, 118, 103331.
- International Organization for Standardization. (2015). *General Principles on Reliability for Structures*. ISO2394:1973/1986/1998/2015. Geneva, Switzerland.
- Izbicki, R., & Mróz, Z. (1976). *Metody nośności granicznej w mechanice gruntów i skał*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Jaksa, M. B., & Kaggwa, W. S. (1996, January). Generalised geotechnical engineering design properties of the Keswick and Hindmarsh Clays. In *Proc. 7th Aust. New Zealand Conf. on Geomechanics*.
- Jerez, D. J., Jensen, H. A., Beer, M., & Chen, J. (2022). Asymptotic Bayesian Optimization: A Markov sampling-based framework for design optimization. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 67, 103178.
- Jiang, S. H., Papaioannou, I., & Straub, D. (2020). Optimization of site-exploration programs for slope-reliability assessment. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 6(1), 04020004.
- Kawa, M., & Puła, W. (2020). 3D bearing capacity probabilistic analyses of footings on spatially variable c - ϕ soil. *Acta Geotechnica*, 15(6), 1453-1466.
- Kawa, M., Puła, W., & Truty, A. (2021). Probabilistic analysis of the diaphragm wall using the hardening soil-small (HSs) model. *Engineering Structures*, 232, 111869.

- Kawa, M. (2023). Zastosowania pól losowych do opisu anizotropowych ośrodków gruntowych w wybranych zagadnieniach geoinżynierii. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598), 671-680.
- Konkol, J., Międlarz, K., & Bałachowski, L. (2019). Geotechnical characterization of soft soil deposits in Northern Poland. *Engineering Geology*, 259, 105187.
- Li, D. Q., Qi, X. H., Cao, Z. J., Tang, X. S., Zhou, W., Phoon, K. K., & Zhou, C. B. (2015). Reliability analysis of strip footing considering spatially variable undrained shear strength that linearly increases with depth. *Soils and Foundations*, 55(4), 866-880.
- Li, Y., Qian, C., & Liu, K. (2019). Sampling efficiency in spatially varying soils for slope stability assessment. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-15.
- Li, Y., Li, J., Xu, N., Fenton, G. A., Vardon, P. J., & Hicks, M. A. (2022). On worst-case correlation length in probabilistic 3D bearing capacity assessments. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 1-11.
- Liao, K., Wu, Y., Miao, F., Pan, Y., & Beer, M. (2022). Probabilistic risk assessment of earth dams with spatially variable soil properties using random adaptive finite element limit analysis. *Engineering with Computers*, 1-14.
- Lumb, P. (1966). The variability of natural soils. *Canadian geotechnical journal*, 3(2), 74-97.
- Michalowski, R. L., & Shi, L. (1995). Bearing capacity of footings over two-layer foundation soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(5), 421-428.
- Młynarek, Z., Wierzbicki, J., Monaco, P., & Stefaniak, K. (2023). Use of DMT and CPTU tests in the evaluation of shear modulus G_0 for soils of different origin. *Archives of Civil Engineering*, 539-552.
- Optum CE, OPTUM G2. Version 2021, Optum Computational Engineering, 2021. Computer Software. www.optumce.com/.
- Orr, T. L. (2000). Selection of characteristic values and partial factors in geotechnical designs to Eurocode 7. *Computers and Geotechnics*, 26(3-4), 263-279.
- Phoon, K. K., & Kulhawy, F. H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian geotechnical journal*, 36(4), 612-624.
- Phoon, K. K., Retief, J. V., Ching, J., Dithinde, M., Schweckendiek, T., Wang, Y., & Zhang, L. M. (2016). Some observations on ISO2394: 2015 Annex D (reliability of geotechnical structures). *Structural Safety*, 62, 24-33.
- Phoon, K. K., Cao, Z. J., Ji, J., Leung, Y. F., Najjar, S., Shuku, T., ... & Ching, J. (2022). Geotechnical uncertainty, modeling, and decision making. *Soils and Foundations*, 62(5), 101189.
- Pieczyńska-Kozłowska, J. M., Chwała, M., & Puła, W. (2023). Worst-case effect in bearing capacity of spread foundations considering safety factors and anisotropy in soil spatial variability. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 17(2), 330-345.
- Prandtl, L. (1920). Über die harte plastischer körper. *Nachr. Ges. Wissensch, Göttingen, math.-phys. Klasse*, 1920, 74-85.
- Puła, W. (2019). Wybrane zagadnienia oceny nośności posadowienia bezpośredniego w ujęciu teorii pól losowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.

- Puła, W., & Chwała, M. (2015). On spatial averaging along random slip lines in the reliability computations of shallow strip foundations. *Computers and Geotechnics*, 68, 128-136.
- Puła, W., Pieczyńska-Kozłowska, J. M., & Chwała, M. (2017). Search for the worst-case correlation length in the bearing capacity probability of failure analyses. In *Geo-Risk 2017* (pp. 534-544).
- Pietruszczak, S. (2010). *Fundamentals of plasticity in geomechanics*. CRC Press.
- Schanz, T., Vermeer, P. A., & Bonnier, P. G. (1999). The hardening soil model: formulation and verification. *Beyond 2000 in computational geotechnics*, 1, 281-296.
- Teshager, D. K., Chwała, M., & Puła, W. (2022). Shallow foundation settlement using a hardening soil model for spatially variable soil. *Proc. 8th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR)*, 278-284.
- Teshager, D. K., Chwała, M., & Puła, W. Probabilistic Analysis of Shallow Foundation Settlement on Layered Soil Using a Hardening Soil Model. In *Geo-Risk 2023* (pp. 317-325).
- The Math Works, Inc. MATLAB. (2019). Wersja 2019a, The Math Works, Inc. Computer Software. www.mathworks.com/.
- Vanmarcke, E. (1983). *Random Fields: Analysis and Synthesis*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Wolfram Research, Inc. (2018). *Mathematica*, Wersja 8, Champaign, IL
- Yang, R., Huang, J., & Griffiths, D. V. (2022). Optimal geotechnical site investigations for slope reliability assessment considering measurement errors. *Engineering Geology*, 297, 106497.
- Zhang, L., & Wang, L. (2023). Optimization of site investigation program for reliability assessment of undrained slope using Spearman rank correlation coefficient. *Computers and Geotechnics*, 155, 105208.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Poniżej wykazuję, w kolejności chronologicznej, najważniejsze przykłady współpracy z przedstawicielami zagranicznych instytucji nauki mające największy wpływ na dotychczasowy przebieg mojego rozwoju naukowego:

- 1) **3-miesięczny staż** finansowany w ramach programu Erasmus+ na włoskim uniwersytecie Università degli Studi „G. d’Annunzio” Chieti-Pescara pod opieką prof. Giovanni Vessi. Staż odbyłem podczas czwartego roku studiów doktoranckich w okresie od 03.2017 do 05.2017. W ramach stażu wykonywałem działania naukowe będące częścią mojej rozprawy doktorskiej związane z zastosowaniem sondowań statycznych CPT w analizach probabilistycznych.
- 2) **2-tygodniowy staż** finansowany z programu Erasmus+ w Institute for Risk and Reliability (Leibniz University Hannover). Wizyta odbyła się w październiku

2021 roku – rozpocząłem wtedy trwającą do dziś współpracę z zespołem prof. Michaela Beera. W czasie wizyty nawiązałem współpracę z ówczesnym doktorantem Danko Jerez oraz prof. Michaelem Beerem w zakresie możliwości optymalizacji położenia sondowań w ramach opracowanej przeze mnie metody.

- 3) **Od lutego 2021 do listopada 2022** w ramach mojego członkostwa w Komitecie Technicznym ISSMGE (*International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*), TC-304 (*Engineering Practice of Risk Assessment & Management*) współpracowałem przy projekcie ‘Time Capsule Project’ przy przygotowaniu publikacji przeglądowej mającej na celu przedstawienie najważniejszych osiągnięć w szacowaniu ryzyka i niepewności w geotechnice oraz określenie przyszłych kierunków rozwoju dyscypliny. Przy pracy nad publikacją miałem okazję współpracować z wybitnymi przedstawicielami ww. tematyki, np. prof. K.K. Phoon (Singapore University of Technology and Design), prof. Limin Zhang (Hong Kong University of Science and Technology) oraz prof. Jianye Ching (National Taiwan University). W ramach tej współpracy powstała następująca publikacja:

Chwała, M., Phoon, K. K., Uzielli, M., Zhang, J., Zhang, L., & Ching, J. (2022). Time capsule for geotechnical risk and reliability. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 1-28.

- 4) **6-miesięczny staż** finansowany w ramach stypendium Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej (program im. Bekkera) w Institute for Risk and Reliability (Leibniz University Hannover). W trakcie trwania stażu prowadziłem własny projekt badawczy związany z optymalizacją położenia sondowań w przypadku wielu fundamentów oraz wielu sondowań. Kontynuowałem współpracę z Danko Jerez oraz prof. Michaelem Beerem, a także nawiązałem współpracę z prof. Hectorem Jensenem (Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile) oraz z doktorantem Chengxin Feng, z którym pracowałem nad tematyką efektywnych metod próbkowania Monte Carlo. Staż odbyłem w okresie od 03.2022 do 09.2022. Współpraca zainicjowana w czasie stażu jest nadal prowadzona. Dwie prace będące jej wynikiem są obecnie w procesie recenzyjnym, natomiast dwie wchodzące w skład cyklu publikacji zostały już opublikowane:

Chwała, M., Jerez, D. J., Jensen, H. A., & Beer, M. (2022). Random Failure Mechanism Method in Optimal Borehole Placement for Shallow Foundation Design Under Spatially Variable Conditions. *Proc. of the 8th Intl. Symp. on Reliability Engineering and Risk Management (ISRERM 2022)*

Chwała, M., Jerez, D. J., Jensen, H. A., & Beer, M. (2023). Performance assessment of borehole arrangements for the design of rectangular shallow foundation systems. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.

5) **Od początku 2022 roku** współpracuję z prof. Wengang Zhang (School of Civil Engineering, Chongqing University). Uzyskałem roczny grant na rozpoczęcie współpracy naukowej i wygłoszenie serii wykładów dla School of Civil Engineering, Chongqing University w ramach „High-end Foreign Expert Introduction program, Ministry of Science and Technology, China”. Z uwagi na pandemię i brak możliwości wyjazdu do Chin, współpraca była prowadzona w sposób zdalny. W jej ramach dla pracowników i studentów School of Civil Engineering wygłosiłem 4 wykłady:

- Selected aspects of spatial averaging in geotechnical engineering
- Random Failure Mechanism Method in optimal borehole placement for shallow foundations
- Worst-case scale of fluctuation effect
- Selected practical aspects of using geosynthetic reinforcement in earth structures

Wspólnie z naukowcami z tamtejszej jednostki opublikowaliśmy dwie prace w tematyce nośności fundamentów bezpośrednich oraz podatności terenu na osuwiska:

Chwała, M.*, & Zhang, W. (2022). Broken line random failure mechanism method in foundation bearing capacity assessment for spatially variable soil. *Computers and Geotechnics*, 150, 104903.

Zhang, W., Liu, S., Wang, L., Samui, P., **Chwała, M.**, & He, Y. (2022). Landslide susceptibility research combining qualitative analysis and quantitative evaluation: A case study of Yunyang County in Chongqing, China. *Forests*, 13(7), 1055.

Jako rezultat współpracy z prof. Wengang Zhang w 2023 roku zostałem jednym z edytorów numeru specjalnego w czasopiśmie *Geological Journal* (wydawnictwo Wiley, IF = 1.8) pt. „Design and Construction of Tunnels and Tunneling Geological Issues”. Ukazanie się numeru specjalnego planowane jest na 2024 rok.

6) **2-tygodniowy staż** finansowany z programu Erasmus+ w International Research School of Planetary Sciences (Pescara, Włochy). Opiekunem podczas wizyty był prof. Goro Komatsu, wybitny geolog planetarny zajmujący się powierzchniami skalistych ciał planetarnych w Układzie Słonecznym. Podczas wizyty przedstawiłem założenia mojego projektu badawczego dotyczącego analizy stateczności pozaziemskich jaskiń lawowych. Wyjazd był poprzedzony około rocznym kontaktem e-mailowym i dyskusjami nad ww. tematyką. W trakcie wizyty miałem także możliwość poznać prof. Junichi Haruyama (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency), z którym także nawiązałem współpracę. Wizyta odbyła się w kwietniu 2023 roku. Jako dotychczasowy rezultat współpracy powstała pierwsza moja praca w tej tematyce, która jest aktualnie w procesie recenzyjnym.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

W trakcie studiów doktoranckich oraz mojego zatrudnienia na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego prowadziłem następujące kursy:

- 1) **Fundamentowanie** (zajęcia projektowe), kurs prowadzony dla studentów studiów I stopnia.
- 2) **Fundamentowanie – głębokie wykopy** (zajęcia projektowe), kurs prowadzony dla studentów studiów I stopnia.
- 3) **Fundamentowanie – wybrane zagadnienia** (zajęcia projektowe), kurs prowadzony dla studentów studiów II stopnia.
- 4) **Matematyka – wybrane zagadnienia** (ćwiczenia audytoryjne), kurs prowadzony dla studentów studiów II stopnia.
- 5) **Matematyka – wybrane zagadnienia** (wykład), kurs prowadzony dla studentów studiów II stopnia.
- 6) **Analiza matematyczna 2.1** (ćwiczenia audytoryjne), kurs prowadzony dla studentów studiów I stopnia.
- 7) **Analiza matematyczna 2.1** (wykład), kurs prowadzony dla studentów studiów I stopnia.
- 8) **Zaawansowane metody obliczeniowe** (laboratorium), kurs prowadzony dla studentów studiów II stopnia.
- 9) **Zagadnienia brzegowe teorii sprężystości i plastyczności** (ćwiczenia audytoryjne), kurs prowadzony dla studentów studiów II stopnia.

Dwa kursy prowadziłem w języku angielskim:

- 10) **Selected topics in mathematics** (ćwiczenia audytoryjne), kurs prowadzony dla studentów studiów II stopnia.
- 11) **Selected topics in mathematics** (wykład), kurs prowadzony dla studentów studiów II stopnia.

Aktualnie przygotowuję wykład do kursu Równania różniczkowe, który będę prowadził od października bieżącego roku dla studentów studiów I stopnia.

Od końca 2019 roku byłem promotorem 9 prac inżynierskich oraz 1 pracy magisterskiej. Podczas przygotowywania tematów staram się uwzględniać aktualne potrzeby budownictwa oraz przekazywać dyplomantom wiedzę z zakresu wykraczającego poza zakres studiów, korzystając przy tym z własnych doświadczeń, np. z mojego zatrudnienia w Przedsiębiorstwie Realizacyjnym Inora Sp. z o. o., gdzie zajmowałem się zastosowaniem materiałów geosyntetycznych w geotechnice. W zakresie tych zagadnień moi dyplomanci rozwiązali m.in. następujące tematy: „Projekt nasypu drogowego o pionowych skarpach z zastosowaniem zbrojenia geosyntetycznego”, „Projekt nasypu drogowego o stromym pochyleniu skarp z zastosowaniem zbrojenia geosyntetycznego” czy „Projekt fundamentu na poduszce z użyciem materiałów geosyntetycznych pod dom jednorodzinny”. Moje doświadczenie naukowe staram się wprowadzać w tematach magisterskich – na chwilę obecną zrealizowany został temat: „Ocena nośności oraz projekt fundamentu bezpośredniego

posadowionego w sąsiedztwie skarpy z uwzględnieniem przestrzennej zmienności podłoża gruntowego”.

Jestem promotorem pomocniczym w dwóch przewodach doktorskich:

- 1) Pana Daniela Teshagera, który jest uczestnikiem Szkoły Doktorskiej Politechniki Wrocławskiej; planowany tytuł rozprawy to „Probabilistic analysis of foundation settlement by means of Hardening Soil Model (HSM)”. Rozprawa będzie napisana w języku angielskim. Promotorem jest prof. Wojciech Puła
- 2) Pana Fouzi Mancera, który jest doktorantem na University of Biskra-Algeria; planowany tytuł rozprawy to „Numerical study of the bearing capacity of shallow skirted foundation”. Rozprawa będzie napisana w języku angielskim. Promotorem jest prof. Mabrouki Abdelhak. Pan Fouzi Mancera planuje odbycie stażu pod moim kierownictwem pod koniec 2023 roku.

Poniżej podaje moją aktywność przy organizacji lub współorganizacji konferencji naukowych:

- 1) Byłem członkiem komitetu organizacyjnego konferencji „Machine Learning & Risk Assessment in Geoenvironment (MLRA 2021)”, która odbyła się we Wrocławiu w dniach 25-27 października 2021 roku. Zakres obowiązków dotyczył pomocy przy opracowywaniu materiałów informacyjnych, sprawowaniu roli recenzenta nadesłanych abstraktów, prac organizacyjnych, obsługi technicznej podczas konferencji (konferencja była realizowana w trybie hybrydowym). Konferencja miała zakres międzynarodowy.
- 2) Prowadziłem sesję podczas konferencji „International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management”, która odbyła się w Hanowerze w dniach 4 - 7 września 2022 roku. Była to jedna spośród sesji w sekcji „Probabilistic approaches in geotechnical engineering”. Konferencja miała zakres międzynarodowy.
- 3) Współprzewodniczyłem sesji pt. „Reliability assessment of subsoil modelling in geoenvironment applications”, która odbyła się w ramach „8th International Symposium for Geotechnical Safety & Risk” (14-16.12.2022). Zakres obowiązków dotyczył organizacji procesu recenzowania nadesłanych prac oraz zdalnemu współprzewodniczeniu sesji. Konferencja miała zakres międzynarodowy.
- 4) Pełniłem rolę Sekretarza Naukowego konferencji „XLIV Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu i Geoinżynierii”, która odbyła się w Karpaczu w dniach 20-23 marca 2023 roku. Zakres obowiązków to gromadzenie abstraktów nadsyłanych przez autorów, kontakt z autorami referatów, pomoc przy obsłudze technicznej konferencji. Konferencja miała zasięg krajowy.
- 5) Współprzewodniczyłem sesji pt. „Uncertainty Assessment of Geotechnical and Geological Models in Reliability Evaluation of Civil Engineering Structures” podczas konferencji GEO-RISK 2023 (lipiec 2023). Mój zakres obowiązków, z uwagi na brak możliwości osobistego uczestnictwa, ograniczył się do organizacji procesu recenzowania nadesłanych prac. Konferencja miała zasięg międzynarodowy.

Pozostałe ważniejsze aktywności:

- 1) Pomagałem w tworzeniu wniosku grantowego w programie Erasmus Mundus (wniosek ze strony Politechniki Wrocławskiej przygotowywany był pod kierownictwem prof. Wojciecha Puły), pt. „European Master in Advanced Solid Mechanics STRAINS”. Konsorcjum składa się z uczelni wyższych z Francji, Belgii, Polski, Grecji i Włoch. Program uzyskał finansowanie z Komisji Europejskiej – pierwsi studenci rozpoczęli naukę od października 2021 roku.
- 2) Od 2019 roku pełnię rolę sekretarza w czasopiśmie naukowym „Studia Geotechnica et Mechanica”; czasopismo uzyskało Impact Factor za 2022 rok (Impact Factor = 0.6).
- 3) Od 2021 roku jestem członkiem Editorial Board (Early Career) w czasopiśmie “Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards” wydawanym przez Tylor and Francis, które jest jednym z wiodących czasopism w dziedzinie stosowania metod probabilistycznych w geotechnice (Impact Factor = 4.8).
- 4) Wygłosiłem popularyzatorski referat na zaproszenie koła naukowego „Mole” przy Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego podczas seminarium „Nowoczesne Metody w Fundamentowaniu”. Prezentacja dotyczyła zagadnień związanych z losową oceną nośności posadowienia bezpośredniego, odbyła się w dniu 27 czerwca 2019 roku.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

W okresie od 05.2013 do 08.2017 (z wyłączeniem 3-miesięcznego okresu, w którym przebywałem na stażu we Włoszech) **byłem pełnoetatowym pracownikiem Przedsiębiorstwa Realizacyjnego Inora Sp. z o. o.**, gdzie zajmowałem się m.in. projektowaniem konstrukcji geotechnicznych z zastosowaniem zbrojenia geosyntetycznego i prowadzeniem szkoleń dla firm projektowych z zakresu stosowania materiałów geosyntetycznych. Praca na pełen etat przez 4 lata w trakcie trwania studiów doktoranckich spowodowała mój rozwój naukowy, natomiast pozwoliła mi zdobyć unikalne doświadczenie nie tylko z zakresu praktyki geotechnicznej, ale także zarządzania czasem i kontaktem z uczestnikami procesu inwestycyjnego na różnych szczeblach. W tym okresie uczestniczyłem w wielu krajowych konferencjach naukowo-technicznych, na których także prezentowałem realizacje firmy.

Wpływ na mój rozwój zawodowy miały także szkolenia i warsztaty, z których starałem się aktywnie korzystać. Poniżej podaję w mojej ocenie najważniejsze z nich:

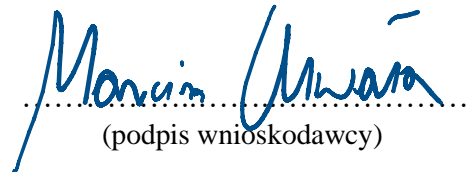
- 1) Kurs online ‘Introduction to R for Data Science’ (2017).
- 2) W ramach projektu “Innowacyjna uczelnia – innowacyjny nauczyciel” finansowanego z Europejskiego Funduszu Socjalnego w okresie 2018-2019 uczestniczyłem w serii kursów języka angielskiego: „Intensywny kurs konwersacyjny z języka angielskiego” (30h), „Intensywny kurs konwersacyjny z języka angielskiego” na poziomie C1 (30h), „Język angielski z elementami języka

- technicznego” na poziomie C1 (30h), „Academic Writing”, na poziomie C1 (30h) oraz „Język angielski C1” (60h).
- 3) “Baesian Method and tools for Geotechnical Practice” prowadzony przez Timo Schweckendiek oraz Yu Wang. Kurs odbył się 11 grudnia 2019 roku i poprzedzał konferencję 7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk.
 - 4) Dwudniowe warsztaty “V Warsztaty modelowania komputerowego w geotechnice” prowadzone przez prof. Andrzeja Trutego oraz dr inż. Krzysztofa Podleś. Korbielów, 28-29 lutego 2020.
 - 5) Szkolenie dot. grantów Maria Skłodowska-Curie oraz ERC (10-11.2021).
 - 6) Szkolenie w zakresie zarządzania projektami oraz zdanie egzaminu i uzyskanie certyfikatu PRINCE2 Foundation Certificate in Project Management (11-12.2021).
 - 7) Szkolenie ze statystyki prowadzone przez Marka Skarupskiego (05-06.2022)
 - 8) Szkolenie pt. „Granty ERC: jak złożyć wniosek w najbliższych konkursach?”, organizowane przez Krajowy Punkt Kontaktowy Programów Badawczych UE; (07.2022).
 - 9) Ukończyłem kursy z platformy Nature Masterclasses: „Persuasive Grant Writing”, “Advancing your Scientific Presentations”, Networking for Researchers”.
 - 10) Dwudniowe warsztaty Action Learning – problem solving (06.2023)

Wybrane osiągnięcia naukowe, nagrody i wyróżnienia zestawione w kolejności chronologicznej:

- 1) Uzyskanie tytułu finalisty L Olimpiady Astronomicznej (2007).
- 2) Stypendium Prezesa Rady Ministrów dla uczniów szkół ponadgimnazjalnych (2007).
- 3) Zajęcie pierwszego miejsca w XXIV Ogólnopolskim Młodzieżowym Seminarium Astronomiczno–Astronautycznym (2008).
- 4) Ukończenie studiów magisterskich na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego z oceną celującą (2013).
- 5) Wyróżnienie za pracę magisterską pt. „Zastosowanie losowego mechanizmu Prandtla oraz losowego mechanizmu Hilla w obliczeniach niezawodności łąw fundamentowych” przyznane przez Polski Komitet Geotechniki (2013).
- 6) Nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej za osiągnięcia naukowe przyznana w roku 2015.
- 7) Wyróżnienie artykułu pt. „Oszacowanie losowej nośności łąwy fundamentowej na podstawie mechanizmów kinematycznych” przyznane podczas VII Ogólnopolskiej Konferencji Młodych Geotechników (2018).
- 8) Wybór przez Polski Komitet Geotechniki mojej osoby do bycia jednym z dwóch reprezentantów Polski podczas 26th European Young Geotechnical Engineers Conference (EYGEC), która odbyła się w pobliżu Graz w Austrii we wrześniu 2018 roku. Udział w konferencji był częściowo sponsorowany przez ISSMGE (International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering).
- 9) Obrona rozprawy doktorskiej z wyróżnieniem pt. „Ocena losowej nośności posadowienia bezpośredniego metodą kinematyczną” (2018).
- 10) Od 2019 roku jestem członkiem Polskiego Komitetu Geotechniki

- 11) Od 2019 roku jestem członkiem International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)
- 12) Nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej za wyróżniający się wkład w działalność uczelni przyznana w latach: 2019, 2020, 2021 i 2022.
- 13) Powołanie mnie przez Rektora Politechniki Wrocławskiej do Academia Iuvenum jako reprezentanta dyscypliny naukowej inżynieria lądowa i transport na lata akademickie 2021/2022 – 2022/2023.
- 14) Stypendium Ministra Edukacji i Nauki dla wybitnych młodych naukowców przyznane w 2022 roku.
- 15) Powołanie mnie przez Rektora Politechniki Wrocławskiej do Academia Iuvenum jako reprezentanta dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport na lata akademickie 2023/2024 – 2024/2025.


.....
(podpis wnioskodawcy)