

Gdańsk, dnia 4 września 2019 roku

dr hab. inż. Lech Bałachowski, prof. nadzw. Politechniki Gdańskiej  
Katedra Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego  
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska  
Politechnika Gdańska

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgra inż. Bartosza Piotrowicza**  
pt. „Wpływ zmian temperatury ośrodka gruntowego na nośność pali grzewczych”  
**promotor: dr hab. inż. Małgorzata Jastrzębska, prof. nadzw. PŚ**

### 1. Podstawa opracowania

Niniejszą recenzję pracy doktorskiej sporządziłem na zlecenie Rady Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej zgodnie z uchwałą z dnia 3 lipca 2019 roku na podstawie otrzymanego egzemplarza rozprawy. Oceny pracy dokonałem odnosząc się do przepisów *Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami)* oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 roku (Dz. U. z 2011 roku, Nr 204, poz. 1200).

### 2. Tematyka i cel rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Bartosza Piotrowicza jest zagadnienie wyznaczania nośności fundamentów głębokich wykorzystywanych w celach energetycznych. Problem ten rozpatruje w badaniach modelowych w zmniejszonej skali oraz wykonując symulacje numeryczne przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz pracy pala energetycznego w terenie. Podejmowana tematyka badawcza wykracza poza klasyczne zagadnienia nośności fundamentów głębokich i wymaga uzupełnienia o analizy przepływu ciepła w ośrodku gruntowym i w samym palu. Koncepcja pali energetycznych, będących fundamentem konstrukcji, a jednocześnie zawierających instalacje pozwalające na magazynowanie i odzysk ciepła zawartego w gruncie, jest rozwiązaniem nowatorskim wpisującym się w aktualne zagadnienia budownictwa zrównoważonego i energooszczędnego. Autor podejmuje w rozprawie doktorskiej temat nośny i aktualny, o dużym znaczeniu praktycznym.

W rozważanej koncepcji pali energetycznych zmagazynowana energia cieplna na głębokości posadowienia jest wykorzystywana w chłodnej porze roku do ogrzewania budynków, a latem do ich chłodzenia. Zastosowanie tu fundamentu głębokiego pozwala wykorzystać dużą pojemność cieplną głębszych warstw gruntu. Zmiany temperatury podczas cyklu ogrzewania/ chłodzenia powodują zmiany naprężeń osiowych w materiale pala, zależne od sposobu jego utwierdzenia oraz zmiany

Wpłynęło dnia 6.09.2019 r. 1

naprężeń radialnych, spowodowane rozszerzalnością cieplną materiału pała i otaczającego gruntu. Proces ogrzewania/schładzania pała wpływa zarówno na parametry gruntu, materiału pała jak i kontaktu pał-grunt, co dodatkowo oddziałuje na pracę takiego pała. W rozprawie Doktorant analizuje pracę pojedynczego pała bez oddziaływań termicznych, wpływ chłodzenia i ogrzewania na otaczający grunt oraz łączny wpływ obciążeń statycznych i termicznych na nośność pojedynczego pała.

### 3. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana praca liczy 198 strony tekstu, zawiera spis oznaczeń, obszerną bibliografię oraz liczne załączniki.

Doktorant podzielił tekst pracy na 4 rozdziały o zróżnicowanej objętości. Po krótkim wstępie, w rozdziale pierwszym Autor definiuje problem badawczy, zwięźle omawia podstawowe rodzaje pali fundamentowych i przedstawia zasady działania oraz przykłady zastosowań pali grzewczych.

W rozdziale drugim Doktorant opisuje zasadę działania gruntowych pomp ciepła oraz parametry opisujące przepływ ciepła w gruncie. Przedstawia skrócony przegląd literatury dotyczący wpływu wymiany ciepła pał-grunt na nośność fundamentu. Autor omawia wpływ zmian temperatury na wilgotność, zagęszczalność, odkształcalność i wytrzymałość gruntu. Pomija jednak wpływ temperatury na parametry opisujące zachowanie się kontaktu pał-grunt.

Rozdział trzeci stanowi zasadniczy element pracy, w którym Doktorant przedstawia przeprowadzone badania modelowe oraz analizy numeryczne. W części poświęconej badaniom modelowym opisuje stanowisko badawcze. W badaniach zastosowano równoziarnisty, kwarcowy, mało wilgotny piasek średni, który zagęszczano warstwami w skrzyni o wymiarach 0,6 x 0,6 x 0,6m. Betonowy model pała o średnicy 0,2m formowano w rurze obsadowej w gruncie. Przygotowano w ten sposób trzy instalacje badawcze: jedną kontrolną bez wymiennika ciepła i dwie z wymiennikiem ciepła. Po upływie 4 tygodni modele były obciążane siłą wyciągającą. W przypadku pali modelowych wyposażonych w wymiennik ciepła, przed rozpoczęciem obciążenia wywoływano przepływ czynnika chłodzącego/ grzewczego prowadzący do wyrównania temperatury pała i otaczającego gruntu.

Drugim istotnym zagadnieniem badawczym poruszonym w tym rozdziale jest wytrzymałość gruntu z uwzględnieniem wpływu zmian temperatury. Autor przeprowadził serię badań w aparacie trójosiowego ściskania bez konsolidacji i bez odpływu czerwonego iltu pobranego z terenu budowy autostrady A1. Doktorant formował próbki z pasty gruntowej o danej wilgotności zagęszczanej w aparacie Proctora. W programie badań podzielił próbki na sześć grup poddanych różnej procedurze przygotowania. Grupa pierwsza to próbki kontrolne ścinane w temperaturze pokojowej. W pozostałych grupach próbki były zamrażane przez różny czas i ścinane w temperaturze pokojowej lub w zamrażarce w temperaturze -21° C.

W rozdziale tym umieszczono również wyniki symulacji numerycznych pali stosowanych w badaniach modelowych. Doktorant rozpatruje przypadek pała wyciąganego kontrolnego i poddanego ogrzewaniu/ oziębianiu. Dodatkowo analizuje przypadek pali wciskanych, ale bez rozdziału obciążenia przekazywanego przez tarcie na pobocznicę i opór podstawy pała.

Dodatkowym elementem są symulacje numeryczne rzeczywistego obiektu fundamentu grzewczego w postaci wielkośrednicowego pała betonowego. Obliczenia nośności przeprowadzono dla pała kontrolnego oraz pała pozyskującego ciepło z gruntu. Uzyskano zmniejszoną nośność pała grzewczego w stosunku do pała tradycyjnego.

Rozdział czwarty stanowi podsumowanie przeprowadzonych badań doświadczalnych i analiz numerycznych. Doktorant proponuje też kierunki dalszych badań.

#### 4. Ocena merytoryczna pracy

Rozprawa mgra inż. Bartosza Piotrowicza zawiera zarówno wyniki badań doświadczalnych, jak i elementy symulacji numerycznych badań laboratoryjnych i pala energetycznego w skali rzeczywistej.

Autor podejmuje się w pracy bardzo trudnego zagadnienia badań modelowych fundamentów głębokich z dodatkowym uwzględnieniem wpływów termicznych wskutek dostarczania/ pobierania ciepła z otaczającego pala gruntu. Praca dotyczy opisu zjawisk w kontakcie pala-grunt podczas wyciągania i wciskania pala. Zagadnienie to nie zostało jednak w pracy właściwie omówione. Należy tu przytoczyć przede wszystkim pracę Boulon i Foray (1986), gdzie wprowadzono pojęcie sztywności normalnej kontaktu i omówiono wyznaczanie tarcia w kontakcie pala-grunt na podstawie wyników badań w aparacie bezpośredniego ścinania konstrukcja-grunt, gdzie wpływ otaczającego gruntu modelowany jest poprzez dobór odpowiedniej sztywności normalnej kontaktu (ang. controlled normal stiffness). Badania te były dalej rozwijane (Foray et al. 1998, Porcino et al. 2003, Bałachowski, 2006), a koncepcja ta została później zaadaptowana do modelowania kontaktu pala termicznego z gruntem (DiDonna et al. 2016, Chunhong et al. 2019). Podejście takie tłumaczy przyrost tarcia na pobocznicy podczas ogrzewania pala zaobserwowany w badaniach w wirówce geotechnicznej (Ng et al. 2015) i spadek wartości tarcia podczas chłodzenia.

Badania modelowe fundamentów głębokich w zmniejszonej skali są zagadnieniem niezwykle skomplikowanym. Wymagają przeprowadzenia złożonej analizy wymiarowej i właściwego doboru skal modelowania. Ze względu na zależność parametrów gruntu od stanu naprężenia, rygorystyczne podejście do modelowania wymaga zwiększenia poziomu naprężenia wokół modelu w zmniejszonej skali. Przeprowadza się zatem takie badania w wirówce geotechnicznej lub symuluje się zachowanie odcinka pala w komorze kalibracyjnej. Autor rozprawy nie miał takich możliwości, ale tym bardziej powinien przemyśleć sposób przygotowania modelu, dobór materiału pala modelowego i jego średnicę, dobór parametrów gruntu zasypowego, sposób formowania zasypu, czy wpływ warunków brzegowych. Należałoby również zastanowić się jakie są relacje między modelem a prototypem i jak wartości pomierzone na modelu ekstrapolować na poziom prototypu. Istotną dodatkową trudnością jest modelowanie przepływu ciepła. Autor nie przemyślał właściwie powyższych zagadnień. Zastosowanie w badaniach modelowych pali betonowych formowanych w gruncie jest pomysłem błędnym. Znacznie lepszym byłoby zastosowanie pali stalowych o dużo mniejszej średnicy. Pale te powinny być obsypywane w gruncie suchym (metodą deszczu piaskowego), a nie formowane w zagęszczonym piasku wilgotnym. Sposób formowania pala przedstawiony w rozprawie nie zapewnia powtarzalności procedury przygotowania modelu i jednorodności zasypu. Zastosowanie metody zagęszczania dynamicznego wywołuje nieokreślony stan naprężenia w gruncie (nie znamy wartości współczynnika parcia w masywie gruntowym, ani składowej normalnej naprężenia na pobocznicy pala przed rozpoczęciem właściwych badań). Dodatkowym utrudnieniem jest stosowanie gruntu częściowo nasyconego, którego wilgotność zmienia się w czasie wskutek procesu wiązania/ twardnienia betonu i parowania, a także ogrzewania pala. Rozkład przestrzenny wilgotności gruntu zależy zatem od odległości od trzonu pala. Zastosowanie pala stalowego w gruncie suchym wyeliminowałoby wszystkie powyższe problemy i pozwoliłoby też na szybkie sprawdzenie powtarzalności procedury przygotowania modelu. Takie rozwiązanie zmniejszyłoby również wpływ warunków brzegowych na uzyskane wyniki. Należy

zaznaczyć, że badania przeprowadzono na modelu o średnicy 0,2m w skrzyni o szerokości 0,6m. Warunki brzegowe eksperymentu odgrywają tu zatem krytyczną rolę, a wpływ tych warunków jest dodatkowo zwielokrotniony przez zastosowanie zagęszczonego zasypu z piasku o wilgotności optymalnej. Tarcie mobilizowane w gruncie wilgotnym jest istotnie większe niż w gruncie suchym lub w pełni nawodnionym. Jest ono też znacznie zwiększone poprzez wpływ ścian bocznych skrzyni. Należy też zwrócić uwagę na zabużone proporcje modelu, który symuluje raczej fundament blokowy, zamiast fundamentu głębokiego o dużej smukłości.

Autor przeprowadził trzy testy w badaniach modelowych pali wyciąganych: badanie kontrolne, badanie pala ogrzewanego i badanie pala chłodzonego. Badania te trudno zinterpretować ze względu na wpływ warunków brzegowych i powierzchnię zniszczenia, która przebiega nie tylko w kontakcie pał-grunt, ale prawdopodobnie również wzdłuż ścianek skrzyni. Tarcie mierzone w badaniach (Rys.38) przewyższa ciężar skrzyni wraz z gruntem (wynoszący w przybliżeniu około 4 kN). Skrzynia ta jest zatem podnoszona, czemu przeciwdziała system jej mocowania. Powyżej tej wartości siły, w mojej opinii, Doktorant nie mierzy zachowania modelu, ale przede wszystkim podatność systemu mocowania skrzyni (belki drewniane opisane na str. 90). Doktorant podkreśla duży rozrzut otrzymanych wyników badań modelowych. Wyniki badań modelowych dla trzech pali przedstawiono w postaci siły zależnej od czasu, a nie od przemieszczenia głowicy, jak należałoby to poprawnie zrobić. Brak rejestracji przemieszczeń głowicy pala utrudnia analizy tak otrzymanych wyników pomiarów. Tarcie wzdłuż pala chłodzonego mobilizuje się zgodnie z oczekiwaniami wolniej niż w przypadku pala kontrolnego. Tarcie dla pala ogrzewanego mobilizuje się jednak wielokrotnie wolniej, niż w przypadku pala kontrolnego i pala chłodzonego, co jest niezgodne z rozwiązaniem teoretycznym. Autor nie komentuje jednak tego wyniku. Temperatury masywu gruntowego w sąsiedztwie pala wynoszą dla pala kontrolnego 17,6°C, pala ogrzewanego 17,9°C i pala chłodzonego 17,4°C. Różnice temperatur w trzech testach są zatem niewielkie w porównaniu do rozrzutu wyników badań modelowych. W mojej ocenie obniżona wartość tarcia uzyskana w pomiarach dotyczących pala ogrzewanego nie jest skutkiem wpływów termicznych, ale wynika przede wszystkim z braku powtarzalności sposobu formowania zasypu. Doktorant nie powtórzył żadnego z badań i nie sprawdził powtarzalności przyjętej procedury przygotowania masywu.

Kolejnym zagadnieniem analizowanym przez Autora rozprawy jest wpływ zmian temperatury na wytrzymałość gruntów. W tym celu przeprowadza serię badań w aparacie trójosiowego ściskania próbek gruntu spoistego w różnych temperaturach. Rozpatruje wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu gruntu w temperaturze pokojowej oraz gruntu poddanego procesowi zamrażania o różnym czasie trwania. Dodatkowo, jedna seria badań przeprowadzona jest w zamrażarce w temperaturze -21° C. Wyniki otrzymane w poszczególnych grupach zestawiono na wspólnym wykresie (Rys.45), gdzie zaobserwowano wyraźny wpływ czasu trwania zamrażania próbek na ich wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu. W badaniach przeprowadzonych w komorze umieszczonej w zamrażarce uzyskano maksymalne wartości wytrzymałości gruntu na ścinanie. Autor wykazuje, że wartości wytrzymałości gruntu na ścinanie bez odpływu zależą liniowo od czasu zamrażania. W mojej ocenie jest to najwartościowszy element rozprawy.

Należy jednak podkreślić, że prawidłowo zaprojektowane i eksploatowane fundamenty energetyczne nie powinny pracować w zakresie ujemnych temperatur w gruncie. Zamrożenie gruntu w sąsiedztwie pala, a potem jego cykliczne rozmrażanie w cyklu dobowym i sezonowym, powodowałoby powstawanie uprzywilejowanej strefy poślizgu na granicy rozmrażającego gruntu, a w konsekwencji degradację tarcia na poboczniczy pala i niekontrolowane osiadania fundamentu, co ostatecznie mogłoby doprowadzić do utraty jego nośności. Zalecenia francuskie dotyczące fundamentów

energetycznych (Delerablee et al. 2017) dopuszczają ich pracę jedynie w zakresie temperatur w gruncie od +1 do +35°C. Zalecenia brytyjskie GSHPA dopuszczają występowanie temperatury ujemnej w materiale pala, ale w kontakcie pal-grunt powinna być ona dodatnia.

Przeprowadzone przez Doktoranta analizy numeryczne dotyczą symulacji badań modelowych pali oraz projektowanego pala energetycznego. Autor przeprowadza obliczenia w czasie ustalonym, pomija zatem pojemność cieplną betonu i gruntu. W przypadku pali modelowych przeanalizowano rozkład temperatur w gruncie podczas ogrzewania i chłodzenia. Rozszerzono rozważany obszar w stosunku do wielkości skrzyni badawczej w celu minimalizacji wpływu warunków brzegowych na odpowiedź pala. Autor ma zatem świadomość istotnego wpływu warunków brzegowych na wyniki badań modelowych. W pracy brakuje jasnego określenia, które parametry gruntu lub kontaktu pal-grunt zależą od temperatury? Nie podano wartości współczynnika parcia spoczynkowego stosowanego w analizach, ani wyjściowego rozkładu składowej normalnej naprężenia na pobocznicy pala (grunt zagęszczony mechanicznie jest prekonsolidowany). Jak zmienia się rozkład składowej normalnej naprężenia podczas ogrzewania i chłodzenia pala. Brakuje przedstawienia ewolucji składowej normalnej naprężenia na pobocznicy pala podczas testu wyciągania lub wciskania. Czy tarcie na pobocznicy i jego rozkłady różnią się przy wciskaniu i wyciąganiu? Zgodnie z teorią i wynikami badań modelowych (Ng et al, 2017) tarcie mobilizowane w przypadku pala oddającego ciepło do gruntu powinno być większe niż dla pala kontrolnego. Nie obserwujemy tego ani na Rys.60 (pal wyciągany), ani na Rys.61 (pal wciskany) – przy założeniu jednakowej mobilizacji oporu podstawy w trzech rozpatrywanych przypadkach.

W analizie numerycznej pala energetycznego w skali rzeczywistej wprowadzono pewne założenia dotyczące rozkładu temperatury w gruncie. Dlaczego Autor zakłada tak wysoką temperaturę w gruncie (20°C) na głębokości 20m? W analizach rozkładu naprężeń brakuje pokazania ewolucji składowej normalnej naprężenia na pobocznicy monopala podczas procesu obciążenia i pobierania ciepła z gruntu. Jakie naprężenia termiczne i jakie odkształcenia termiczne powstają w osi monopala wskutek pobierania ciepła z gruntu. Dodatkowo, należy zauważyć, że naprężenia te zależą od sposobu zamocowania pala w danej konstrukcji (Yazdani et al. 2019). W pewnych sytuacjach możliwe jest zatem powstanie tarcia negatywnego w górnej części pobocznicy pala. Dodatkowo, w gruntach spoistych cykliczne radialne odkształcenia termiczne pala mogą generować wzrost ciśnienia wody w porach gruntu. Niezrozumiała jest duża różnica przemieszczeń (Rys.89) w przypadku pala bez przepływu ciepła i z przepływem ciepła. Jest to rozbieżne z tendencją obserwowaną na Rys.92.

Doktorant wyznacza ciepło właściwe gruntu na podstawie przeprowadzonych pomiarów na próbce rozmrażanej i uśrednia pomiary w zakresie temperatur dodatnich i ujemnych. Jest to podejście błędne ze względu na występujące tu przejście międzyfazowe i pobieranie ciepła w procesie rozmrażania, co widać wyraźnie na Rys.84. Należałoby, w mojej ocenie, osobno wyznaczyć ten parametr w gruncie zamrożonym i gruncie niezamrożonym.

Pracę kończy podsumowanie, które nie do końca wynika z przeprowadzonych analiz. Proponowanie wartości współczynnika redukcyjnego dotyczącego tarcia na pobocznicy pala energetycznego jest przedwczesne i nie wynika bezpośrednio z przeprowadzonych badań. Zagadnienie tarcia na pobocznicy pali energetycznych jest znacznie bardziej skomplikowane i wymaga dodatkowych analiz z uwzględnieniem cykliczności obciążeń termicznych w cyklach dobowych i sezonowych (DiDonna 2015a, Gawecka et al. 2016, Sutman et al. 2019). Zarówno liczba, zakres przeprowadzonych badań modelowych oraz ich jakość nie mogą być podstawą do takich wniosków.

Poniżej podaję kilka uwag dotyczących strony edytorskiej rozprawy doktorskiej:

- praca jest generalnie dopracowana pod względem edytorskim, zdarzają się jednak drobne literówki,
- na kilku rysunkach (Rys.64, Rys.92) błędnie podano jednostki na osi pionowej,
- na Rys.64 jest prawdopodobnie błąd w opisie legendy,
- w kilku przypadkach Autor konsekwentnie myli spójność z wytrzymałością na ścinanie bez odpływu,
- nie wszystkie pozycje z listy bibliografii są w pracy cytowane.

Za najważniejsze elementy oryginalne rozprawy doktorskiej, stanowiące własny dorobek naukowy Autora, uznaję:

- przeprowadzenie i interpretację serii badań modelowych na stanowisku w laboratorium,
- przeprowadzenie badań w aparacie trójosiowego ściskania próbek gruntu poddanych procesowi zamrażania w różnych temperaturach i przy różnym czasie zamrażania,
- wyznaczenie zależności wytrzymałości na ścinanie bez odpływu gruntu spoistego w zależności od czasu zamrażania,
- symulacje numeryczne pali modelowych z uwzględnieniem obciążeń statycznych i termicznych.

Przedstawione uwagi krytyczne istotnie obniżają wartość rozprawy. Autor podejmuje ciekawą i nowatorską tematykę badawczą. Rozpoznanie tej tematyki przez Doktoranta jest niestety niepełne. Koncepcja i program badań modelowych oraz ich zakres nie zostały właściwie dobrane. Uniemożliwia to właściwą interpretację badań oraz ekstrapolację uzyskanych wyników na zachowanie się prototypu. Wyników badań modelowych nie można też porównać z rezultatami symulacji numerycznych. Ponadto, interpretacja symulacji numerycznych powinna być odpowiednio uzupełniona i pogłębiona, zwłaszcza dotycząca zjawisk w kontakcie pala i gruntu. Proszę o ustosunkowanie się Doktoranta do przedstawionych w recenzji uwag krytycznych.

## 5. Bibliografia

GSHPA (Ground Source Heat Pump Association). 2012. Thermal pile design, installation and materials standards. Milton Keynes, UK: GSHPA.

Bałachowski, L. 2006. Scale effect in shaft friction from the direct shear interface tests. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 6(3), 13-28.

Boulon, M., and Foray, P. 1986. Physical and numerical simulation of lateral shaft friction along offshore piles in sand. *In Proceedings of the 3rd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling*, Nantes, France. pp. 127–147.

Chunhong Li, Gangqiang Kong, Hanlong Liu, and Hossam Abuel-Naga 2019. Effect of temperature on behaviour of red clay–structure interface, *Can. Geotech. J.* **56**: 126–134, [dx.doi.org/10.1139/cgj-2017-0310](https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0310)

Yvon Delerablee, Philippe Reiffsteck, Antoinet Eric, Lionel Demongodin, 2017. Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en oeuvre des géostructures thermiques, CFMS/SYNTec INGENIERIE/SOFFONS-FNTP

Di Donna, A., and Laloui, L. 2015a. Response of soil subjected to thermal cyclic loading: experimental and constitutive study. *Engineering Geology*, **190**: 65–76, 2015. [doi:10.1016/j.enggeo.2015.03.003](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.03.003).

- Di Donna A., and Laloui L. 2015b. Numerical analysis of the geotechnical behaviour of energy piles. *Int. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 39(8): 861–888.
- Di Donna, A., Ferrari, A. and Laloui, L. 2016. Experimental investigations of the soil–concrete interface: physical mechanisms, cyclic mobilization, and behaviour at different temperatures. *Can. Geotech. J.* 53: 659–672, [dx.doi.org/10.1139/cgj-2015-0294](https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0294)
- Gawecka, Taborda, Potts et al. 2016. Numerical modelling of thermo-active piles in London Clay *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, <http://dx.doi.org/10.1680/jgeen.16.00096> Paper 1600096
- Foray, P., Bałachowski, L., and Rault, G. 1998. Scale effects in shaft friction due to the localization of deformations. *Proc., Int. Conf. on Centrifuge*, Tokyo, Taylor and Francis, London, 211–216.
- Han-long Liu, Cheng-long Wang, Gang-qiang Kong, Abdelmalek Bouazza, 2018. Ultimate bearing capacity of energy piles in dry and saturated sand *Acta Geotechnica* <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0661-6>
- Ng CWW, Shi C, Gunawan A, Laloui L, Liu HL, 2015. Centrifuge modelling of heating effects on energy pile performance in saturated sand. *Can Geotech J* 52(8):1045–1057
- Porcino, D., Fioravante, V., Ghionna, V.N., and Pedroni, S. 2003. Interface behavior of sands from constant normal stiffness direct shear tests. *Geotechnical Testing Journal*, 26(3).
- Saeed Yazdani; Sam Helwany; and Guney Olgun, 2019. Investigation of Thermal Loading Effects on Shaft Resistance of Energy Pile Using Laboratory-Scale Model *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 145(9): 04019043 DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002088.
- Melis Sutman; C. Guney Olgun; and Lyesse Laloui, 2019. Cyclic Load–Transfer Approach for the Analysis of Energy Piles, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2019, 145(1): 04018101

## 6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Pomimo przedstawionych w recenzji licznych uwag krytycznych stwierdzam, że oceniana rozprawa doktorska spełnia wymogi określone w odpowiednich przepisach. Rozprawa ta stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wnosi oryginalne elementy poznawcze, dotyczące przede wszystkim badań doświadczalnych w geotechnice. Zawarte w pracy sformułowania i rozwiązania problemu badawczego potwierdzają, że Doktorant zgodnie z ustawą z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) sprostał wymaganiom stawianym kandydatom do stopnia naukowego doktora. Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Bartosza Piotrowicza pt. „Wpływ zmian temperatury ośrodka gruntowego na nośność pali grzewczych” do publicznej obrony.

