

Niepewności i ryzyka w procesie rozpoznania podłoża budowlanego



Zrozumienie niepewności w ustalaniu modelu podłoża oraz wartości przyjmowanych parametrów jest istotne dla racjonalnego projektowania, a redukcja ryzyk z tego wynikających jest możliwa poprzez dodatkowe i poprawnie dobrane metody badań.

Badania podłoża budowlanego to proces o charakterze poznawczym, który ma na celu zbadanie, udokumentowanie, ocenę i odpowiednie zaklasyfikowanie oraz określenie stanu rzeczywistego. Ma on prowadzić do uzyskania podstawowych danych o geotechnicznych warunkach posadowienia, niezbędnych do projektowania i wykonawstwa konstrukcji budynków i budowli inżynierskich.

Zapewnienie wymaganej jakości rozpoznania podłoża jest możliwe tylko w sytuacji, kiedy przy doborze metod badań i sposobu interpretacji wyników brana jest pod uwagę naturalna zmienność badanego ośrodka wynikająca z warunków sedymentacji i formowania poszczególnych osadów oraz lokalne uwarunkowania wynikające z historii i diagenetyzacji badanych gruntów.

GENEZA PROBLEMU – ZMIENNOŚĆ OŚRODKA GRUNTOWEGO

Proces badawczy w nauce polega mniej na zbieraniu fragmentów wiedzy, a bardziej na zmniejszaniu liczby niewiadomych, które definiujemy w odniesieniu do rozpatrywanego zagadnienia. W opisie podłoża należy zatem dążyć do minimalizacji niepewności wynikających przede

dr hab. inż. Tomasz Godlewski, prof. ITB

Instytut Techniki Budowlanej,
Zakład Konstrukcji Budowlanych,
Geotechniki i Betonu

wszystkim z przyrodniczego charakteru badanego ośrodka.

Jako podstawę stosowania odpowiedniego podejścia w zakresie rozpoznania podłoża należy przypomnieć – wydaje się oczywiste, ale jakże często pomijane i zapominane – **stwierdzenia odnoszące się do skomplikowanych cech gruntu** opisanych w podręczniku *Mechanika gruntów* z 1977 r. [1]:

- „(...) **ten sam grunt zasadniczo ma inne właściwości w różnych miejscach** (...)”;
- „(...) **grunt nie odznacza się liniową lub nawet jednakową zależnością między naprężeniami i odkształceniami** (...)”;
- „(...) **zachowanie się gruntu zależy od naprężeń czasu i otoczenia** (...)”;
- „(...) **większość gruntów jest wrażliwa na zaburzenia, jakich doznaje podczas pobierania próbek i dlatego zachowanie się próbki gruntu badanej w laboratorium może różnić się od zachowania się gruntu w terenie** (...)”;

- „(...) **prawie nigdy masa gruntowa będąca przedmiotem zagadnienia nie jest całkowicie widoczna i dlatego trzeba ją oceniać na podstawie małych próbek gruntu otrzymanych z miejsc odosobnionych** (...)”.

Przytoczone opisy wskazują, że jak złożoną materią mamy do czynienia. Grunt jako ośrodek naturalny jest trudniejszy do opisu i parametryzacji niż typowe materiały budowlane wytwarzane, tj. stal czy beton, gdzie właściwości użytkowe są bardzo precyzyjnie wyznaczane, a zakres stosowności w danej klasie znajduje się w ograniczonym, zazwyczaj wąskim zakresie (np. wytrzymałość). W przypadku gruntów zakres niepewności wynikający z naturalnej zmienności ośrodka w obrębie skali rozpoznania przy często ograniczonym opróbowaniu jest znacznie szerszy, co utrudnia, a niekiedy uniemożliwia poprawne wnioskowanie o poszukiwanych cechach.

W procesie poznawczym wychodzimy od modelu budowy geologicznej podłoża w skali regionalnej [2], czyli jednostek geomorfologicznych z zachowaniem następstwa warstw (np. równiny sandrowe), następnie w skali lokalnej uwzględniamy jednostki litogenetyczne (np. piaski fluwiogłajne). Dalej w procesie rozpoznania przy

opracowaniu modelu współpracy budowl z podłożem wskazujemy warstwy w strefie oddziaływania fundamentu według przyjętego klucza (np. stan gruntu), oznaczając dla każdej ustalonej warstwy parametr mechaniczny na próbce, która może zawierać wewnętrzne strefy osłabienia w płaszczyźnie ścicia czy wręcz spękania, a nawet pustki na poziomie mikrostruktury (rys. 1). Strefa współpracująca z konstrukcją jest zwykle dużo większa niż badana próbka czy też strefa podłoża objęta badaniami „in situ”. W konsekwencji miarodajna wartość parametru jest najczęściej wartością uśrednioną z dużej przestrzeni podłoża.

Jak widać, reprezentatywność próbki w sytuacji niepewności wynikającej ze zmienności ośrodka w obrębie warstwy, kompleksu czy jednostki litogenetycznej ma ogromne znaczenie dla wskazywania parametru geotechnicznego i tym samym poprawnego rozwiązania posadowienia. Ocena wiarygodności badań musi opierać się na wiedzy o zmienności cech w poszczególnych typach gruntów. Podłoże gruntowe jako wytwór natury ma przypisaną zmienność wynikającą z genezy, historii oraz wielu różnych czynników geodynamicznych oddziałujących w sposób losowy w czasie i przestrzeni. Ocena wiarygodności badań musi wynikać z wiedzy na temat zmienności cech. Zmienność dla takich grup genetycznych jak nasypy czy utwory zboczowe (deluwia, koluwia) może być bardzo duża i trudna

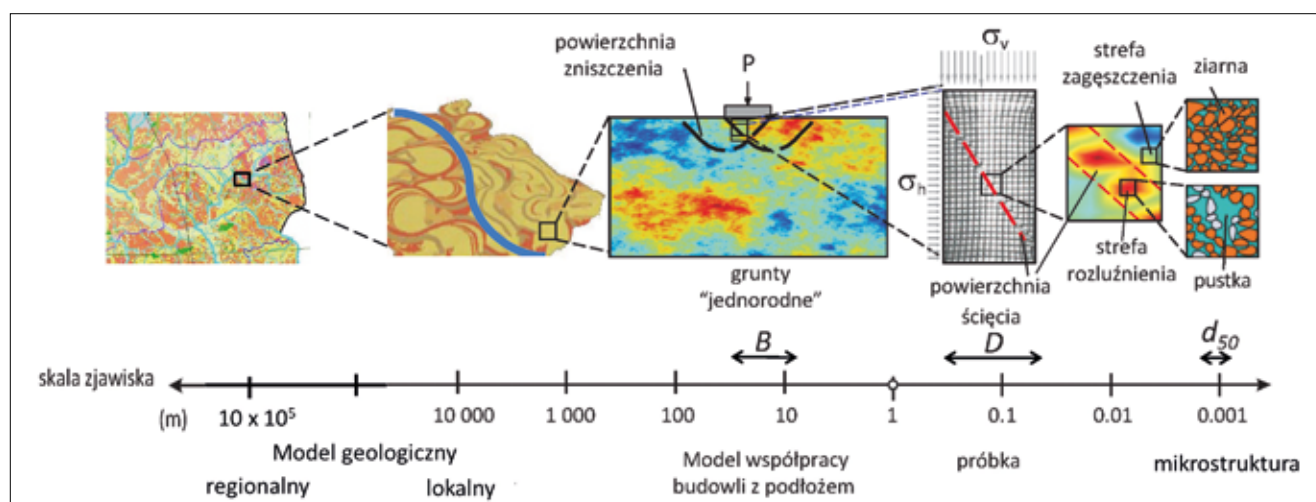
do przewidzenia [5]. Jakościowy opis zmienności danej grupy litogenetycznej na podstawie wieloletnich wyników zebranych w ITB podano w tab. 1.

Równie duża losowość występuje w utworach rzecznych czy glacialnych, ale ich rozkład przestrzenny może być ograniczony i przez to mało istotny z punktu widzenia warunków posadowienia. Paradoksalnie grunty organiczne, problemowe z punktu widzenia posadowienia, charakteryzują się nieznaczną i łatwą do przewidzenia zmien-

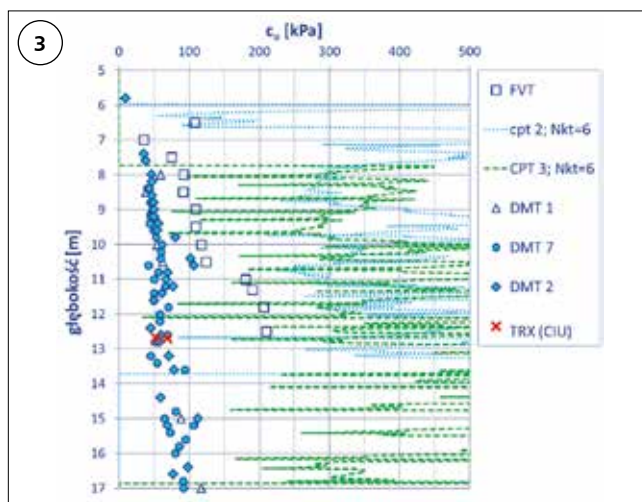
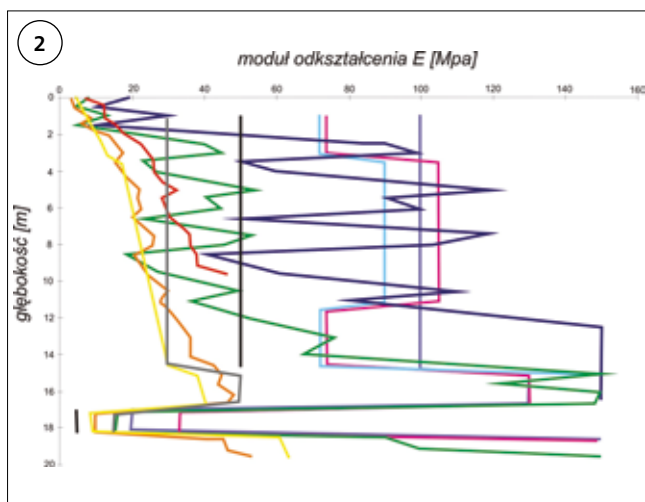
nością występowania (z uwagi na sekwencyjność warunków sedymentacji i znane następstwo warstw). Mając to na uwadze, **przy ustalaniu wartości charakterystycznej nie należy trzymać się sztywno wartości wyliczonych bardzo dokładnie z wykorzystaniem narzędzi statystycznych**. Zalecane jest podejście eksperckie i ostrożne oszacowanie wartości parametrów geotechnicznych [6] w odniesieniu do doświadczeń (doświadczenie porównywalne) i rodzajów problemów (metoda obserwacyjna).

Tab. 1. Typy litogenetyczne gruntów, ich naturalna zmienność [5]

Geneza osadów	Rodzaj gruntu	Opisowa zmienność cech
Antropogeniczna	Nasypy, hałdy odpadów	Na ogół bardzo duża
Organogeniczna/jeziorna	Namuły, torfy, gytie	Nieznaczną, dobrze widoczną i do przewidzenia
Eoliczna	Lessy (pyły), piaski wydymowe (drobne i pylaste)	Nieznaczną, łatwą do przewidzenia
Rzeczna	Żwiry, piaski, mady (pyły, gliny)	Dużą, trudną do przewidzenia
Fluwioglacjalna	Żwiry, piaski, pospółki	Dużą, często nieistotną ze względu na przekonsolidowanie
Glacialna (w przewadze gliny polodowcowe)	Gliny, piaski, żwiry, ły	Dużą, lecz nieistotną ze względu na przekonsolidowanie
Morska i lagunowa	Ły, pyły, inne (organiczno-mineralne)	Małą, łatwą do przewidzenia
Zwierzelińskie skały i spękaną skały	Różne, w tym gliny i ły zwierzelińskie, rumosze	Średnią, do dużej, dobrze widoczną
Utwory zboczowe (deluwia, koluwia)	Gliny, ły, inne	Bardzo dużą, trudną do przewidzenia



Rys. 1. Prezentacja problemu skali rozpoznania podłoża w kontekście wyznaczania reprezentatywnej wartości parametru geotechnicznego gruntu



Rys. 2–3. Przykłady rozbieżności i niejednoznaczności wyników badań podłoża w zależności od metody i przyjętego sposobu interpretacji w tej samej lokalizacji

PROBLEMY Z INTERPRETACJĄ WYNIKÓW BADAŃ

Kolejnym ryzykiem i źródłem możliwych niepewności w procesie poprawnej oceny warunków gruntowych jest kwestia interpretacji wyników. Norma PN-EN 1997-2 [7] zawiera wybrane badania polowe i laboratoryjne, uznane za powszechnie stosowane w krajach europejskich. **Poprawne ustalenie parametrów wymaga posługiwania się wykalibrowanymi do warunków lokalnych metodami oraz sprawdzoną w praktyce ich interpretacją** [8, 9]. Stosując podane w EC7 załączniki informacyjne (nieobligatoryjne), należy się upewnić, czy warunki w podłożu badanego obszaru (rodzaj gruntu, współczynnik jednorodności, wskaźnik konsystencji itd.) są zgodne z warunkami brzegowymi dla danych korelacji. W tym celu należy wykorzystywać lokalne doświadczenia [8], które potwierdzą poprawność zastosowanych zależności lub pozwolą na ich weryfikację. Stosowane w praktyce korelacje między wynikami sondowania a informacjami o warunkach geotechnicznych posadowienia budowli wymagają regionalnych ustaleń lub adaptacji do warunków lokalnych. Praktyczne zastosowanie rozwiązań teoretycznych napotyka jeszcze na trudności, ponieważ zarówno na wyniki sondowań, jak i na zachowanie podłoża współpracującego z budowlą wpływa wiele różnych czynników, których pomiar

nie jest jeszcze możliwy lub dostatecznie wiarygodny. Dane z literatury (w tym zawarte w załącznikach do normy [7]) uzyskane za granicą na innych gruntach często nie są zadowalające w warunkach polskich i niekiedy prowadzą do błędnych wniosków (rys. 2–3).

Rys. 2 dotyczy przykładu, gdzie wartości modułu odcztałcenia zinterpretowano na podstawie różnych metod (sondowania dynamiczne DP oraz sondowania statyczne CPT) i korelacji (według DIN, EC7, PN, własnych) dla tych samych wyników uzyskanych z jednego punktu badawczego w aluwiach rzecznych (piaskach). Rysunek w sposób poglądowy i zbiorczy przedstawia wyniki interpretacji (wartości ustalone ze wzoru w funkcji głębokości – wykresy lub przyjęte wartości średnie lub oszacowane – linie pionowe) przekazywane projektantom na różnych etapach procesu inwestycyjnego dla tego samego obiektu (ten sam punkt badawczy). Interpretacji dokonywały różne osoby reprezentujące różny poziom wiedzy i doświadczenia, opierając się bezkrytycznie na wzorach podanych w normach i publikacjach. Rozrzut wielkości osiadań ustalonych z wyinterpretowanych modułów dla projektowanego obiektu wyniósł od 4 do 11 cm (sic!). Rozstrzygające okazały się wyniki z badań DMT wykalibrowane na podstawie osiadań z badań próbnego obciążenia – ostatecznie ustalona wartość charakterystyczna modułu E to ok. 40 MPa [8].

Na rys. 3 przedstawiono przykład interpretacji wartości wytrzymałości na ściskanie bez odplywu (c_u) na podstawie sondowań statycznych (CPTU), na tle wartości z sondowań dylatometrem (DMT) i sondą krzyżkową (FVT) oraz badań w aparacie trójosiowego ściskania (TRX). Zestawienie wyników badań wytrzymałości w profilu głębokościowym dotyczy tej samej lokalizacji, w której w podłożu występowały grunty organiczne (skonsolidowane gytie). Na podstawie sondowań statycznych (CPTU) i znanych z literatury zależności (i zalecanych wartości współczynnika empirycznego – N_{kt}) wyinterpretowano wyniki (linie ciągłe). Pomiary te zostały zwalidowane badaniami terenowymi (DMT i FVT) oraz oznaczeniami na pobranych próbkach w laboratorium (TRX). Bezskrytyczne przyjęcie danych z literatury wskazywało na wartości poszukiwanego parametru przeszacowane o 100–200% (sic!). W dodatkowych badaniach ustalono lokalną zależność, wyznaczając poprawny współczynnik N_{kt} do interpretacji wyników z sondowań CPTU. Przykład takiej kompleksowej walidacji parametru N_{kt} ze wskazaniem korelacji lokalnych (krajowych) ustalonych empirycznie dla gruntów organicznych podano w tab. 2, a szczegóły tych badań opisano w [10].

Problem interpretacji i doboru metody badawczej dotyczy również badań laboratoryjnych. Należy pamiętać, że parametry

Rys. autora

mechaniczne gruntów mogą się znacznie różnić w zależności od metody badania (np. aparat „trójosiowy” czy aparat skrzynkowy) oraz w zależności od przyjętej procedury badawczej w obrębie danej metody (np. dla aparatu trójosiowego ściskania można zastosować różne procedury związane z warunkami badania: UU, CIU, CID). To samo dotyczy późniejszej interpretacji wyników badań. Kąt tarcia wewnętrznego i spójność nie są stałymi materiałowymi. Wartości parametrów wytrzymałościowych mogą być przyjęte jako stałe jedynie w przedziale naprężeń, dla których zostały określone. To samo dotyczy parametrów odkształceniowych, tj. moduły ścisłości (M), odkształcenia (E), czy „sztywności” gruntu (G), gdzie znając zakres pracy danej konstrukcji, można zastosować odpowiednią metodę i dobrać wartość parametru wynikającą z ustalonej wartości odkształcenia, mając na uwadze silną nieliniowość sztywności gruntu w zakresie małych odkształceń.

Generalnie parametry mechaniczne gruntów spełniają rolę wskaźników identyfikujących, niezbędnych do opisu przyjętych modeli współpracy z konstrukcją. **W zależności od zastosowanej interpretacji temu samemu gruntowi można przypisać różne modele matematyczne, dlatego parametry te mogą być wyrażone przez bardzo różne wielkości wymiarowe.**

PODSUMOWANIE

Określanie współpracy konstrukcji z podłożem gruntowym wymaga podania odpowiednio dobranych do danego zagadnienia parametrów geotechnicznych wymaganych w danej metodzie obliczeniowej. Przed przystąpieniem do wykonywania badań należy zastanowić się nad warunkami pracy gruntu w zależności od rozpatrywanego zadania geotechnicznego. Zmienności parametrów projektowych muszą być zatem koniecznie ujęte w rozważaniach nad bezpieczeństwem lub użytkowalnością obiektu. Wszystkie parametry konstrukcji, które bierze się pod rozwagę w inżynierskich obliczeniach projektowo-budowlanych, są w rzeczywistości obciążone pewną niepewnością, rozumianą jako brak dokładnej znajomości parametrów, a nie ich nieprzewidywalność. Zrozumienie niepewności przyjmowanych parametrów jest istotne dla racjonalnego projektowania [11].

Mowa tu o niepewności probabilistycznej, statystycznej (aleatorycznej) w zakresie rozpoznania podłoża, wynikającej z naturalnej zmienności gruntu, gdzie nie mamy możliwości jej redukcji. Druga to niepewność poznawcza (epistemiczna), wynikająca z braku precyzji lub ograniczeń posiadanych informacji, gdzie możliwa jest redukcja np. poprzez dodatkowe rozpoznanie. Bardzo trafnie ujął to prof. Wysokiński w publika-

cji w ramach seminarium dotyczącym ilów płoceńskich Warszawy [12]:

- „(...) Byłoby lepiej, gdyby **parametrów nie podawać w postaci konkretnych liczb, tylko w postaci zakresu możliwych wartości**, z zaznaczeniem różnych przypadków i różnych odpowiadających im parametrów (...);”
- „(...) **konstruktor mógłby ustalać, w zależności od projektowanej budowli, jaki chce mieć poziom bezpieczeństwa (...);**”
- „(...) pomimo probabilistycznych podstaw nowej normy (Eurokod 7) **wyznaczenie parametrów charakterystycznych gruntu (jako rzekomo stałych wielkości) i szczegółowe algorytmy obliczeniowe prowadzą do sytuacji, w której zapomina się o rozrzucie wartości tych parametrów i jego wpływie na wymiarowanie (...).**”

Przy ograniczonej ilości badań (co w praktyce jest bardzo częste) – np. w badaniach „trójosiowych” zleca się tylko 3 ścięcia dla próbek pobranych z jednego otworu z uwagi na ograniczenia związane z czasem i kosztami realizacji – preferowane jest podejście „eksperskie” [6] i ostrożne oszacowanie wartości parametru geotechnicznego [11].

Nie ma więc jednoznaczności w określaniu wartości charakterystycznych gruntu do projektowania. Na przykład budynek posadowiony na stopach nie jest zdolny przeciwstawić się punktowym odkształceniom – wartości parametrów należy w takim przypadku ustalać właściwie dla każdej stopy. O wyborze wartości reprezentatywnej dla opisu zachowania podłoża pod obciążeniem decyduje analizowany stan graniczny. Należy też pamiętać, że **stosowany do projektowania obraz przestrzenny podłoża to zawsze tylko model z większym lub mniejszym prawdopodobieństwem zbliżony do warunków rzeczywistych, a nie dokładne odbicie rzeczywistości.**

Jest to ważne z punktu widzenia całego procesu projektowania, ponieważ badanie podłoża to etap związany z pozyskiwaniem danych geotechnicznych do dalszych prac związanych z modelowaniem interakcji konstrukcja-grunt. W tym celu do projektowania geotechnicznego niezbędne jest

Tab. 2. Zestawienia wartości parametru N_{kt} dla wybranych typów litogenetycznych gruntów – przykład doświadczeń interpretacyjnych o charakterze lokalnym [10]

Typ litologiczno-genetyczny	Wartość parametru N_{kt}		Źródło
	Badania własne [10]	Wartości z literatury	
Namuły NC	6-9	6-15 (utwory zastoiskowe)	Norma EC7
		7,0 (namuły), 12,9 (torf)	Młynarek i in. 2015
Mady (miękkoplastyczne grunty pylaste) NC	~3	7-10 (very soft clay)	Lune i in. 1997
		7-10 (grunty pylaste)	Stefaniak 2015
		6-15 (utwory zastoiskowe)	Norma EC7
Gytia OC	~20 (OCR ~ 3-15)	30 (stiff clay), 12-20 (gliny)	Lune i in. 1997
		1-6	Norma EC7
		7,9 gytia (OCR ~ 1-1,6)	Młynarek i in. 2015

wyznaczenie wiarygodnego parametru geotechnicznego gruntu. Inne czynniki wpływu (niosące za sobą dodatkowe niepewności i ryzyka) to m.in.: odpowiedni dobór metod badawczych, jakość zastosowanego do testu sprzętu, staranność wykonania testu przez operatora, losowość mierzonych parametrów podczas badania, jakość próbek do badań kalibracyjnych w laboratorium. Na końcu tego procesu poznawczego jest dobór odpowiedniej metody obliczeń. Dobór modelu obliczeniowego określany jest rodzajem zadania (typem konstrukcji), natomiast typ modelu determinuje parametry geotechniczne niezbędne do obliczeń, a to z kolei warunkuje metody badań w celu ich określenia. Prowadząc analizy i obliczenia w projekcie geotechnicznym, należy świadomie brać pod uwagę charakter wprowadzanych niepewności w odniesieniu do metod badań, przyjmowanego modelu geotechnicznego i sposobu inter-

pretacji wyników, tak aby właściwie ocenić niezawodność rozwiązania posadowienia konstrukcji. ■

Literatura

1. T.W. Lambe, R.V. Whitman, *Mechanika gruntów*, t. 1 i 2, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1977.
2. L. Marks, A. Ber, W. Gogolek, K. Piotrowska (red.), *Mapa geologiczna Polski w skali 1:500 000*, PIG-PIB, Warszawa 2006.
3. Q. Chen, A. Seifried, J.E. Andrade, J.W. Baker, *Characterization of random fields and their impact on the mechanics of geosystems at multiple scales*, „International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics” 36 (2), 2010, s. 140–165.
4. M. Huber, *Soil variability and its consequences in geotechnical engineering*, PhD thesis, Stuttgart 2013.
5. L. Wysokiński, *Wiarygodność rozpoznania geotechnicznego w świetle naturalnej zmienności utworów geologicznych, doświadczeń i norm*, materiały konferencyjne XLI Konferencji w Krynicy 1995, t. 8, s. 149–158.
6. L. Wysokiński, W. Kotlicki, T. Godlewski, *Projektowanie geotechniczne wg Eurokodu 7. Poradnik*, ITB, Warszawa 2011.
7. PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
8. T. Godlewski, *Interpretacja badań polowych a Eurokod 7*, „Acta Scientiarum Polonorum, Architektura-Budownictwo” 12 (3), 2013, s. 61–72.
9. Z. Frankowski, T. Godlewski, K. Gwizdała, A. Słabek, T. Szczepański, M. Tarnawski, J. Wierzbicki, J. Kłosiński, R. Mieszkowski, A. Nowosad, J. Saloni, M. Ura, M. Wójcik, *Badanie podłoża budowli: metody polowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2020.
10. T. Godlewski, Ł. Kaczyński, O. wyznaczaniu wytrzymałości na ścinanie polową sondą krzyżkową w świetle nowych wymagań norm europejskich, „Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska” vol. 25 (3), nr 73, 2016, s. 356–365.
11. T. Godlewski, W. Bogusz, *Philosophy of Geotechnical Design in Civil Engineering – Possibilities and Risks*, „Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences” vol. 67, nr 2, 2019, s. 289–306, DOI: 10.24425/bpas.2019.12825.
12. L. Wysokiński, T. Godlewski, *Parametry geotechniczne i ich wykorzystanie w projektowaniu*, materiały z seminarium ITB *Iły plioceniskie* Warszawy, Warszawa, 26 lutego 2004 r., s. 51–71.