

## Ocena gęstości gruntu metodą izotopową podczas badania *in situ* – wyniki wstępne

Anna Mykowska<sup>1</sup>, Marcin Schwesig<sup>2</sup>, Wojciech Cieślak<sup>2</sup>



A. Mykowska



M. Schwesig



W. Cieślak

**The assessment of in-situ soil density using nuclear method – preliminary results.** *Prz. Geol.*, 65: 743–747.

*Abstract.* Soil compaction is one of the key factors during construction investments. There are several methods of measurement and the moisture-density nuclear gauge is of them. The gauge is popular in the USA but in Poland is practically unused besides the measurements of the post flotation wastes so the authors decided to conduct non-destructive isotopic test to determine the density and soil compaction during construction project. Nuclear method was tested and evaluated in the relation to traditional method (drive cylinder). The results were similar;  $R^2 = 0.99$  for wet soil and  $R^2 = 0.94$  for dry soil but testing by nuclear-gauge is much faster and easier to operate.

**Keywords:** moisture-density gauge, soil compaction, soil measurement, isotopic probe

Inwestycje budowlane wymagają kontroli zagęszczenia gruntu wykorzystanego do budowli ziemnych, żeby sprawdzić czy zostały spełnione założenia projektowe. Odpowiednio zagęszczony grunt pozwala uzyskać wymaganą nośność podłoża, zwiększyć kąt tarcia wewnętrznego, poprawiając tym samym wytrzymałość na ścinanie, zmniejszyć porowatość, a co za tym idzie także wodoprzeuszczalność (Cyske, 2012). Zagęszczenie gruntu bada się w odniesieniu do wartości maksymalnej gęstości objętościowej uzyskanej w badaniu Proctora, wyznaczając wskaźnik zagęszczenia  $I_s$  (PN-B-04481:1988) lub poprzez wskaźnik odkształcenia  $I_0$ , określony na podstawie wyników badania płytą VSS.

Do badania zagęszczenia gruntu są stosowane metody bezpośrednie, w których jest mierzona objętość i masa gruntu, a zagęszczenie jest wyznaczane przez porównanie uzyskanego wyniku gęstości z wartością maksymalnej gęstości objętościowej, wyznaczonej wcześniej laboratoryjnie, np. badanie cylindrem wciskany, objętościomierzem piaskowym oraz objętościomierzem wodnym. Te trzy metody są zdefiniowane w polskiej normie branżowej BN-77/8931-12:1997. Stosowane są także metody pośrednie, w których określa się od razu zagęszczenie bez uprzedniego pomiaru gęstości, są to m.in.: statyczna płyta VSS oraz lekka płyta dynamiczna. Innym sposobem popularnym na świecie, przede wszystkim w USA, jest badanie miernikiem izotopowym wykorzystującym promieniowanie izotopu Cs-137, określone normą amerykańską (ASTM D 6938-08a). W Polsce już w latach 60. XX w. szeroko omawiano zastosowanie metod izotopowych w geologii inżynierskiej (Borowczyk, 1964), wskazując, że pozwalają one na badanie gruntu bez naruszania jego struktury oraz wykonanie badania w znacznie krótszym czasie. O badaniach radioizotopowych pisał także Pisarczyk (2001), dzieląc pomiary na powierzchniowe i podziemne oraz omawiając zasadę pomiaru gęstości i wilgotności gruntu.

W przypadku geologii inżynierskiej, miernik izotopowy ze źródłem promieniowania gamma i neutronowego pozwala na nieinwazyjne pomiary wilgotności oraz gęstości gruntu, w odróżnieniu od tradycyjnego pobierania próbek rdzeniowych powodujących zniekształcenie podłoża (Tominaga i in., 2002). Jest także używany do pomiaru gęstości asfaltu oraz betonu (Domingo i in., 2009; ASTM D 2950-05).

Badania nad bezpośrednimi i pośrednimi metodami oceny zagęszczenia gruntu są cały czas rozwijane zarówno w kontekście tradycyjnych metod, jak metoda cylindra wciskanego (Lestariningsih i in., 2013) czy pierścienia (Timm i in., 2005), jak i bardziej zaawansowanych – tomografia komputerowa gamma – GCT (Timm i in., 2005) czy badania miernikiem izotopowym (Tominaga i in., 2002; Timm i in., 2002, 2005; Wood i in., 2004; Wierzbiński i in., 2004; Domingo i in., 2009). Źródła promieniotwórcze są wykorzystywane w wielu krajach, jak np. USA, Brazylia, Nowa Zelandia, Indonezja, do badań wpływu gęstości objętościowej gruntu, czasu zliczania impulsów, struktury oraz kalibracji na wynik wilgotności (Tominaga i in., 2002).

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie praktycznych aspektów pomiaru gęstości i wilgotności gruntu za pomocą miernika izotopowego (Cs-137 oraz Am-241:Be) oraz porównanie wyników uzyskanych metodą cylindra wciskanego, a także za pomocą promieniowania gamma. Przeprowadzone badania zarówno tradycyjne, jak i radioaktywne, pozwoliły podsumować wady i zalety ww. metody oraz mogą się przyczynić jej rozpowszechnienia w Polsce.

### MATERIAŁ I METODY

Badania przeprowadzono na terenie inwestycji budowlanej w Polsce północnej. Badano próbki gruntów niespoistych, przede wszystkim piasków średnich (test 1–3), oraz

<sup>1</sup> SINEO Sp. z o.o., ul. Galaktyczna 3, 80-299 Gdańsk; sineo@sineo.com.pl.

<sup>2</sup> INGENEO Sp. z o.o., ul. Kopernika 78, 81-456 Gdynia; schwesig@ingeo.com.pl, cieslak@ingeo.com.pl.

spoistych – glin (test 4–6), pochodzących z ok. 1000 m<sup>2</sup> terenu budowy. Poszczególne punkty oznaczano kolejnymi numerami, przy czym próbę pobierano cylindrem wciskany w miejscu, w którym uprzednio wykonano badanie miernikiem izotopowym. Metodyka badawcza w przypadku badania cylindrem wciskany była zgodna z normą BN-77/8931-12:1997, a użyte cylindry były nowe, nieodkształcalne i zgodne z normą PN-B-04481:1988. Metodykę badania miernikiem izotopowym (ryc. 1), ze względu na brak polskiej normy omówiono szerzej poniżej. Analogiczne badania omawiano już w Polsce w odniesieniu do pomiaru odpadów poflotacyjnych (Młynarek, Wierzbicki, 2004). Autorzy dokonywali pomiarów w dwóch przedziałach głębokości, tj. 0–30 cm oraz 30–60 cm, wskazując na wysoką efektywność metody, szczególnie w przypadku istnienia stref o zróżnicowanym zagęszczeniu.

Podstawą pomiaru wilgotności gruntu jest spowolnienie szybkich neutronów, co jest związane przede wszystkim z obecnością wodoru w materiale. Pomiar gęstości gruntu oparty jest na fizycznym oddziaływaniu promieniowania gamma z materiałem. Dochodzi do przekazania energii elektronowi związanemu w atomie (efekt fotoelektryczny), pochłaniania energii fotonów na skutek zjawiska Comptona oraz do tworzenia par elektron–pozytron, jeżeli kwant promieniowania gamma ma energię wyższą niż masa spoczynkowa pary (Pogocki, 1997). Należy wziąć także pod uwagę, że zmiana gęstości materiału powoduje zmianę wilgotności, opartej na zliczeniach ilości neutronów (Bogacz i in., 1992). Duży wpływ ma także *grunt medium* otaczające sondę, dlatego należy rozważyć kalibrację w laboratorium lub też wykonanie większej ilości badań na danym terenie (Rawitz i in., 1981). W przypadku badania betonu proponuje się wykonanie bloku o podobnym składzie i utworzenie adekwatnej krzywej kalibracji (TEX-451-A). Norma amerykańska wskazuje także, że na wyniki pomiarów *in situ* może wpływać: skład chemiczny gruntu, jego heterogeniczność i struktura, a w przypadku rozproszenia wstecznego dużą rolę odgrywa także obecność wody (ASTM D 6938-08a).

Co ważne, używane w pomiarze promieniowanie gamma nie wzbudza sztucznego promieniowania, więc nie powoduje wtórnego napromieniowania gruntu (Pogocki, 1997). Promieniowanie neutronowe jest na tyle słabe, że w dozymetrii indywidualnej pracowników pod uwagę jest brane tylko promieniowanie gamma (Domingo i in., 2009).

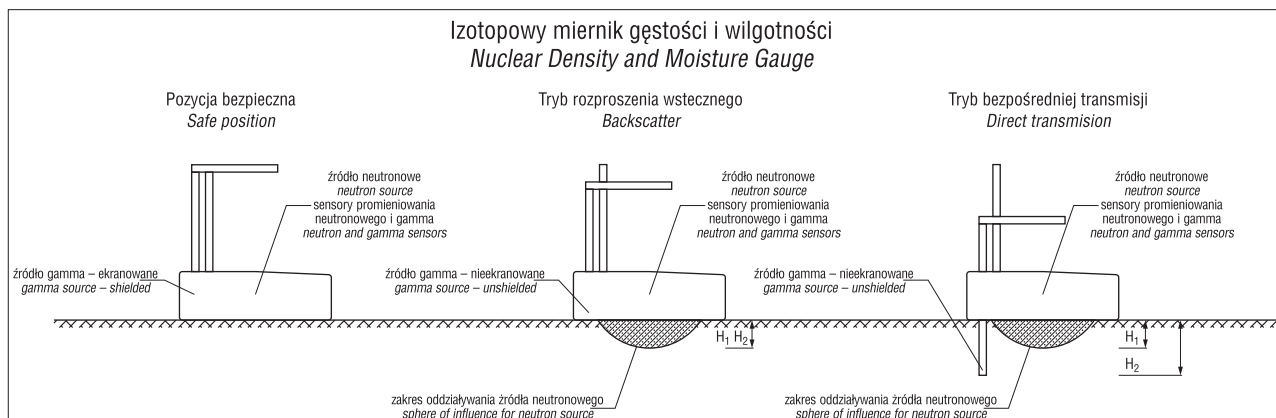


Ryc. 1. Miernik izotopowy gęstości i wilgotności gruntu (HS5001EZ – Product Manual, 2012)

Fig. 1. Moisture-density nuclear gauge (HS5001EZ – Product Manual, 2012)

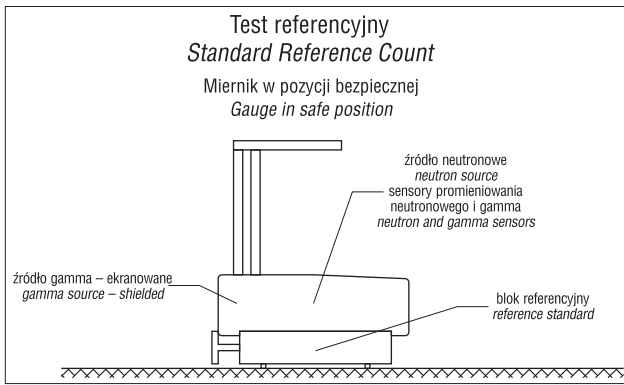
Pracownicy przeprowadzający pomiary muszą być przeszkoleni przez inspektora ochrony radiologicznej oraz mieć ważne badania lekarskie, umożliwiające pracę z promieniowaniem jonizującym. W przypadku miernika ze źródłem cezowym Cs-137, są oni przypisani do kategorii B narażenia, ograniczającej dawkę, którą mogą otrzymać do 6 mSv/rok. Użytkowanie urządzenia wymaga także zezwolenia od Państwowej Agencji Atomistyki na pracę w terenie, magazynowanie i transport.

Do badania gęstości i wilgotności gruntu użyto miernika izotopowego Humboldt 5001EZ, posiadającego źródło Cs-137 370 MBq (10 mCi) oraz Am-241:Be 1,48 GBq (40 mCi). Miernik może być używany w trybie bezpośred-



Ryc. 2. Schemat miernika izotopowego wilgotności i gęstości gruntu

Fig. 2. The scheme of the moisture-density nuclear gauge



Ryc. 3. Test referencyjny miernika

Fig. 3. Standard reference count of the gauge

niej transmisji promieniowania, kiedy źródło gamma jest umieszczane w uprzednio przygotowanym otworze, lub w trybie rozproszenia wstecznego, gdy znajduje się ponad powierzchnią gruntu lub asfaltu. Schemat urządzenia zamieszczono na rycinie 2.

Przed przystąpieniem do właściwych badań sprawdzono poprawność pomiarów miernika na dołączonym do urządzenia bloku referencyjnym (ryc. 3). Przed każdym pomiarem usuwano luźny materiał oraz wyrównywano powierzchnię płyty. Nie zaistniała sytuacja, w której byłoby konieczne zastosowanie rozproszenia wstecznego, w każdym punkcie było możliwe odwiercenie otworu o głębokości minimum 20 cm. Pomiary wilgotności i gęstości gruntu wykonywano w 15-centymetrowej warstwie, licząc od powierzchni gruntu. W każdym punkcie przeprowadzono trzy pomiary, zgodnie z wytycznymi Departamentu Transportu w Nowym Jorku (GTM-10, 2015).

### WYNIKI BADAŃ

Przeprowadzono 18 pomiarów miernikiem izotopowym oraz 6 pomiarów cylindrem wciskany. W tabeli 1 zestawiono wyniki badań porównawczych pomiędzy cylindrem wciskany a miernikiem izotopowym. Podane wartości to średnie z trzech pomiarów przeprowadzonych w jednym punkcie, w którym następnie pobrano próbkę cylindrem wciskany. Różnice w wartościach uzyskanych w jednym punkcie podczas pomiaru miernikiem izotopowym wynoszą maksymalnie 0,2–0,3%, przy czym w dwóch miejscach uzyskano różnicę 0,1%.

Tab. 1. Wyniki badań porównawczych pomiędzy cylindrem wciskany a miernikiem izotopowym

Table 1. The results of comparison between drive cylinder and nuclear gauge

Nr testu Test No.	Gęstość mokrego gruntu Wet Density [g/cm <sup>3</sup> ]		Gęstość suchego gruntu Dry Density [g/cm <sup>3</sup> ]		Wilgotność Moisture Content [%]	
	cylinder wciskany drive cylinder	miernik izotopowy nuclear gauge	cylinder wciskany drive cylinder	miernik izotopowy nuclear gauge	cylinder wciskany drive cylinder	miernik izotopowy nuclear gauge
1	1,738	1,744	1,674	1,680	3,8	3,8
2	1,778	1,779	1,719	1,722	4,0	3,3
3	1,812	1,777	1,736	1,695	4,4	4,9
4	2,131	2,102	1,837	1,821	15,9	15,4
5	2,126	2,120	1,838	1,846	15,8	14,8
6	2,142	2,139	1,841	1,831	15,9	15,4

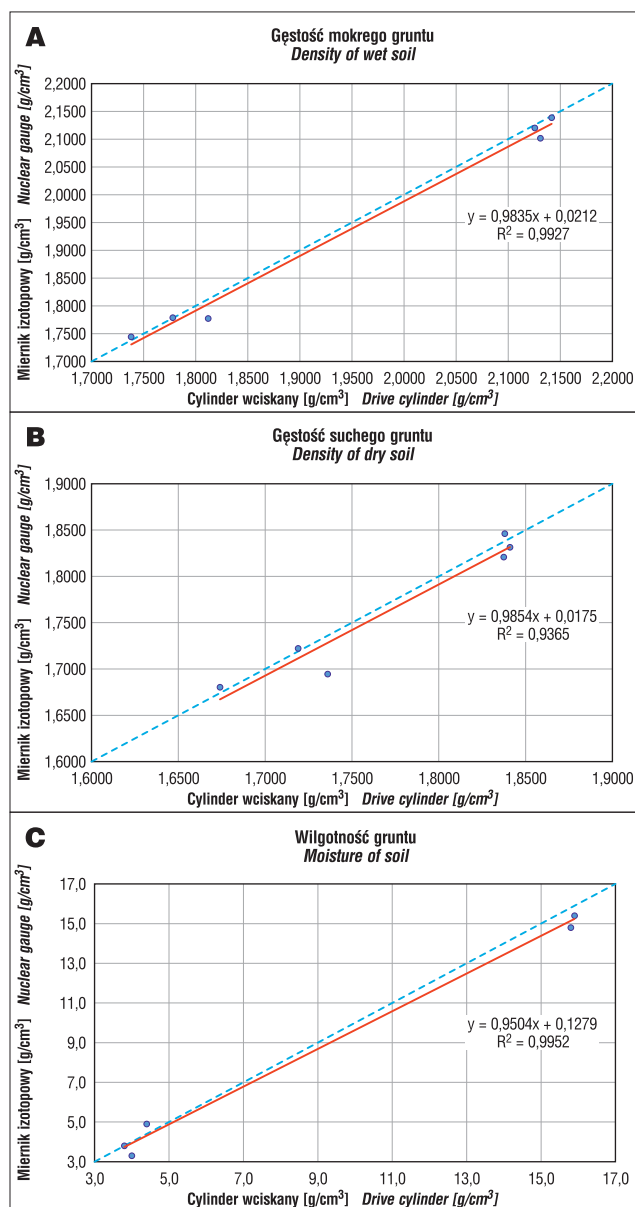
Na rycinie 4 przedstawiono porównanie wyników dla: gęstości gruntu mokrego (ryc. 4A), gęstości gruntu suchego (ryc. 4B) oraz wilgotności (ryc. 4C). Wyniki są bardzo zbliżone dla obydwu metod: w przypadku gęstości mokrego gruntu współczynnik korelacji  $R^2 = 0,993$ , gęstości gruntu suchego  $R^2$  wynosi 0,937, a przy porównaniu wilgotności jest równy 0,995. Pozwala to stwierdzić bardzo wysoką korelację między badaniami zarówno w przypadku gruntów spoistych, jak i piasków. Powyższe badanie stanowi impuls do przeprowadzenia bardziej zaawansowanych badań na większej ilości próbek, także w zróżnicowanych warunkach atmosferycznych. Na podstawie wyników uzyskanych na obecnym etapie można wyciągnąć wniosek, że badanie miernikiem izotopowym daje wiarygodne wyniki przy znacznie krótszym czasie pracy i mniejszym prawdopodobieństwie popełnienia błędu.

### DYSKUSJA

Z porównania wyników badań metodą cylindra wciskanego oraz pomiaru za pomocą miernika izotopowego wynika, że obydwie metody dają porównywalne wyniki – wartość współczynnika determinacji  $R^2$  wynosi od 0,937 do 0,995, w zależności od badanej właściwości. Przy czym należy zauważyć niezwykle wysoką powtarzalność wyników pomiaru izotopowego – różnice wynoszą maksymalnie 0,3% przy trzech pomiarach. Podobny wniosek wysunęli Młynarek i Wierzbicki (2004) oraz Wierzbicki i in. (2004) – zmienność losowa wyników uzyskanych miernikiem izotopowym jest pomijalnie mała i wystarczy jeden pomiar w danym punkcie, a w przypadku badania cylindrem wciskany potrzebna co najmniej czterech pomiarów.

Pozwala to wnioskować, że badania z użyciem promieniowania jonizującego mogłyby być przeprowadzane uzupełniająco w trakcie inwestycji drogowych i budowlanych lub też, w zależności od wymagań określonych specyfikacją, zastąpić tradycyjne badania. Na korzyść pomiaru miernikiem izotopowym przemawia fakt, że są to badania niezwykle szybkie, o dużej powtarzalności i łatwej obsłudze, co pozwala przebadać jednocześnie większy obszar – ma to duże znaczenie ze względu na heterogeniczność gruntu.

W tabeli 2 zestawiono wady i zalety pomiaru miernikiem izotopowym. Należy wziąć pod uwagę, że używanie ww. urządzenia wymaga uzyskania wszelkich pozwoleń wydawanych przez Państwową Agencję Atomistyki,



**Ryc. 4.** Porównanie wyników badań metodą cylindra wciskanego oraz pomiaru za pomocą miernika izotopowego. **A** – gęstość mokrego gruntu; **B** – gęstość suchego gruntu; **C** – wilgotność gruntu. Linia przerywana – linia równości, linia ciągła – linia trendu

**Fig. 4.** The comparison of the results between drive cylinder method and measurement by nuclear gauge. **A** – density of wet soil; **B** – density of dry soil; **C** – moisture of soil. Dashed line – line of equality, solid line – trend line

ochrony osobistej pracowników i oznakowania terenu, jednak kwestie pozwoleń i zabezpieczeń są zawsze po stronie wykonawcy, a nie zleceniodawcy.

Z praktycznego doświadczenia zdobytego podczas wykonywania tych oraz wielu wcześniejszych pomiarów, należy zwrócić szczególną uwagę na dobór miejsca wykonywanego badania. Obecność dużych pionowych obiektów, takich jak ściany lub pojazdy, w pobliżu urządzenia może zafałszować wyniki badania. Ważne jest również przygotowanie równego i stabilnego podłoża. Wszelkie pustki znajdujące się pod urządzeniem powodują zaniżenie podanej przez miernik gęstości. W celu prawidłowego określenia zagęszczenia gruntu, niezwykle ważny jest do-

**Tab. 2.** Podsumowanie wad i zalet izotopowego miernika gęstości i wilgotności gruntu

**Table 2.** Summary of the advantages and disadvantages of moisture-density nuclear gauge

Wady w stosunku do tradycyjnych metod Disadvantages in the relation to traditional methods	Zalety w stosunku do tradycyjnych metod Advantages in the relation to traditional methods
– stosunkowo wysoka cena – relatively high cost	– bardzo szybki czas pomiaru – very fast time of the measurement
– zafałszowanie wyniki wilgotności w przypadku występowania wodoru w gruncie, związków chemicznych zawierających wodór, np. gips – unreliable results of moisture in the presence of hydrogen-containing chemicals such as gypsum	– łatwość obsługi (mniejsze prawdopodobieństwo popełnienia błędu niż w przypadku cylindra wciskanego) – easy use (less chance of a mistake than in case of using drive cylinder)
– konieczność uzyskania pozwoleń na działalność ze źródłami promieniowania jonizującego – need to obtain permission for operate with the sources of ionizing radiation	– badanie nieniszące struktury gruntu – non-destructive measurement of soil texture
– konieczność objęcia personelu ochroną dozymetryczną, przeprowadzenia specjalistycznych badań lekarskich i opieki inspektora ochrony radiologicznej – the necessity of dosimetric protection, carrying out specialized medical examinations and supervision of radiological safety officer	– bardzo wysoka dokładność pomiarowa – very high accuracy
– mogą wystąpić trudności w przypadku niskich temperatur – measurement can be problematic in low temperatures	– możliwość kalibracji w odniesieniu do składu chemicznego gruntu – the possibility of calibration in relation to the chemical composition of the soil

bór właściwej gęstości maksymalnej, z jaką są korelowane wyniki badań gęstościomierzem izotopowym. W większości przypadków nieprawidłowe oznaczenie wskaźnika zagęszczenia wynika nie z błędów pomiarowych, lecz z doboru niewłaściwego punktu odniesienia.

Pierwiastki radioaktywne zastosowane do badania gęstości i wilgotności w mierniku izotopowym ulegają naturalnemu procesowi samorozpadu. W związku z tym, w celu zachowania jak najwyższej dokładności prowadzonych badań, należy codziennie przed rozpoczęciem testów dokonać pomiaru na dołączonym do urządzenia bloku referencyjnym. Ponadto urządzenie, zgodnie z zaleceniami producenta, jest kalibrowane co 1–2 lat.

## WNIOSKI

Badanie zagęszczenia gruntu z użyciem promieniowania gamma różni się od metod tradycyjnych zasadą działania miernika, opartą na oddziaływaniu promieniowania jonizującego z materią. Wyniki otrzymywane metodami tradycyjnymi i metodą promieniotwórczą są bardzo podobne, jednak należy zauważyć, że użycie promieniowania gamma w badaniu zagęszczenia gruntu ma znaczące zalety. Głównymi zaletami omawianej metody są: dokładność pomiaru, a co za tym idzie niezwykle wysoka

powtarzalność wyników oraz szybkość wykonywania badania.

Przedmiotem dalszej pracy naukowej będzie problematyka badań zagęszczenia gruntu podczas inwestycji drogowej. Autorzy planują przeprowadzić znacznie większą ilość pomiarów, korelując wyniki uzyskane z użyciem metod izotopowych z wynikami otrzymanymi podczas pomiaru płytą dynamiczną, a także innych tradycyjnych metod, uwzględniając skład granulometryczny oraz warunki atmosferyczne. Planowane jest także rozszerzenie badania o pomiar gęstości asfaltu.

Praca była finansowana ze środków własnych INGEN Sp. z o.o. (50%) oraz SINEO Sp. z o.o., (50%), jako część realizowanej polityki naukowo-badawczej przedsiębiorstw. Autorzy składają serdeczne podziękowania Recenzentom za wkładowe i konstruktywne uwagi oraz rozszerzenie perspektyw badawczych.

## LITERATURA

- ASTM D 2950-05 – Standard Test Method for Density of Bituminous Concrete in Place by Nuclear Methods.
- ASTM D 6938-08a – Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth).
- BN-77 /8931-12:1997 – Oznaczenie wskaźnika zagęszczenia gruntu.
- BOGACZ J., ŁOSKIEWICZ J., MATŁĄG R., MNICH E. 1992 – Jądrowa metoda pomiaru gęstości i wilgotności masy aglomeracyjnej. Instytut Fizyki Jądrowej, Kraków.
- BOROWCZYK M. 1964 – Oznaczanie parametrów fizycznych gruntów w geologii inżynierskiej metodami izotopowymi. *Geol. Quart.*, 8 (4): 866–873.
- CYSKE W. 2012 – Wszystko o badaniach zagęszczenia gruntu. *Drogi gminna i powiatowe*, 3: 59–64.
- DOMINGO C., AMGAROU K., GARCIA-FUSTE M.J., GARCIA-ORELLANA J., MORALES E., BOUASSOULE T., CASTELO J., FERNANDEZ F. 2009 – Neutron dosimetric studies of density/moisture gauge operators during transport and usage. *Radiation Measurements*, 44: 1002–1005.
- GTM-10 GEOTECHNICAL TEST METHOD: Test Method for Earthwork Compaction Control by Nuclear Gauge, Revision #5, 2015, State Of New York Department Of Transportation, Geotechnical Engineering Bureau.
- HS5001EZ – Product Manual, 2012.
- LESTARININGSIH I.D., WIDIANTO, HAIRIAH K. 2013 – Assessing soil compaction with two different methods of soil bulk density measurement in oil palm plantation soil. *Procedia Environ. Sci.*, 17: 172–178.
- MŁYNAREK Z., WIERZBICKI J. 2004 – Statystyczna ocena zagęszczenia osadów poflotacyjnych na podstawie badań różnymi metodami. *Sesja Naukowa Zastosowanie Odpadów Przemysłowych i Geosyntetyków w Budownictwie Ziemi z okazji Jubileuszu 70-lecia Profesor Krystyny M. Skrażyńskiej*, Kraków.
- PISARCZYK S. 2001 – *Gruntoznawstwo inżynierskie*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa: 271–275.
- PN-B-04481: 1988 – Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu.
- POGOCKI D. 1997 – Oddziaływanie promieniowania jonizującego z materia. IV Szkoła Sterylizacji Radiacyjnej Sprzętu Medycznego, Przeszczepów, Farmaceutyków i Kosmetyków. Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Warszawa.
- RAWITZ E., ETKIN H., HAZAN A. 1981 – Calibration and Field Testing of a Two-probe Gamma Gauge. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 3: 461–465.
- STEFANIAK K., WRÓŻYŃSKA M., KROLL M. 2017 – Application of postflotation tailing in hydroengineering. *J. Ecol. Eng.*, 18 (1): 113–118.
- TEX-451-A, Density of In-place Unhardened and Hardened Concrete by the Nuclear Methods, 08/99-06/0, 1999, published on-line.
- TIMM L.C. 2002 – On the use of surface neutron-gamma gauges to estimate soil water content. *Appl. Radiat. Isot.*, 57: 369–374.
- TIMM L.C., PIRES L.F., REICHARDT K., ROVERATTI R., OLIVEIRA J.C.M., BACCHI O.O.S. 2005 – Soil bulk density evaluation by conventional and nuclear methods. *Aust. J. Soil. Res.*, 43: 97–103.
- TOMINAGA T.T., CIASSARO F.A.M., REICHARDT K., BACCHI O.O.S., OLIVEIRA J.C.M., TIMM L.C. 2002 – On the use of surface neutron-gamma gauges to estimate soil water content. *Appl. Radiat. Isot.*, 57: 369–374.
- TSCHUSCHKE W., GOGOLIK S., KROLL M., WALCZAK M. 2015 – Miary zagęszczenia odpadów poflotacyjnych w kontekście kryteriów odbioru robót ziemnych. *Inż. Mor.*, 36 (3): 200–203.
- TSCHUSCHKE W., WRÓŻYŃSKA M., WIERZBICKI J. 2017 – Quality Control for the Construction of a Tailings Dam. *Acta Geotech. Slov.*, 14 (1): 3–9.
- WIERZBICKI J., NIEDZIELSKI A., WALIŃSKI M., WOŁYŃSKI W. 2004 – The quality control of post flotation reservoir dam by determination of relative compaction index in various methods. *Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, Viana da Fonesca & Mayne (red.), Millpress, Rotterdam: 1371–1375.
- WOOD M.J., DOUGLAS R.A., SANDS R. 2004 – A Comparison of Three Methods for Measuring the Density of a Forest Soil in New Zealand. *Int. J. Forest Eng.*, 315 (1):71–80.