

## Wykorzystanie metody konduktometrycznej i georadarowej do identyfikacji stopnia ugniecenia wierzchniej warstwy gruntu

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono relacje między stopniem zagęszczenia gruntu określonym penetrometrem stożkowym, przewodnością elektryczną gruntu na wybranych głębokościach jego profilu określoną konduktometrem oraz echogramem wykonanym georadarem. Badania przeprowadzono w warunkach rzeczywistych a do zagęszczania gruntu wykorzystano ciągnik rolniczy wyposażony w standardowe opony. Zidentyfikowano istotną zbieżność wyników pomiarów dla wszystkich metod pomiarowych, która pozwala stosować je wymiennie do identyfikacji nadmiernego zagęszczenia gruntu np. śladów przejazdu maszyn a także innych anomalii w zagęszczeniu gruntu pod warunkiem istnienia wyrównanych parametrów wilgotnościowych mierzonego ośrodka.

**Abstract.** The article presents the relationship between the degree of soil compaction determined by a cone penetrometer and soil electrical conductivity at selected depths of its profile determined by a conductometer and a GPR echogram. The tests were carried out in real conditions and an agricultural tractor equipped with standard tires was used for soil compaction. Significant convergence of measurement results was identified for all measurement methods, which allows them to be used interchangeably to identify excessive soil compaction, e.g. machine tracks, as well as other anomalies in soil compaction, provided that the humidity parameters of the measured medium are equal.. (The use of conductometric and GPR methods to identify the extent of upper range compaction).

**Słowa kluczowe:** georadar, konduktometr, rolnictwo precyzyjne, zagęszczenie gleby

**Keywords:** ground penetrating radar, conductivity, precision farming, soil compactness.

### Wstęp

Wyodrębnienie obszarów wymagających szczególnej uwagi na powierzchni pola jest bardzo złożone i wymaga zaawansowanych środków technicznych potrafiących realizować swoje funkcje w czasie rzeczywistym. Uwzględnić należy wiele czynników a dużym wyzwaniem jest jak największe uproszczenie wyznaczania granic tych obszarów na podstawie jednego czynnika i określenie jego korelacji ze zmiennością danego parametru produkcyjnego [1]. Metoda georadarowa jest jedną z najbardziej zaawansowanych metod z grupy pomiarów geofizycznych, która znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach, m.in. w rolnictwie. W trakcie pomiaru wykonuje się serie równoległych profilowań, co pozwala na interpolowanie wyników pomiędzy kolejnymi profilami, a sam wynik jest przedstawiany w postaci przejrzystych map na dowolnym poziomie głębokościowym [2,3]. Kompaktowy, przenośny system z cyfrową akwizycją danych umożliwia gromadzenie danych wraz z położeniem geograficznym, jak również włączenie nowoczesnych technik analizy danych [4]. Nieinwazyjność, pozyskanie dużej ilości informacji i względnie niskie koszty sprawiają, że georadar jako metoda uzupełniająca techniki konwencjonalne jest stosowany w badaniach gleby rolniczej. Juliszewski i in. [5] wykorzystali georadar do identyfikacji anomalii zagęszczenia antropogenicznego gruntu w jego profilu do głębokości 1 m. Badania przeprowadzili metodą profilowania refleksyjnego polegającego na tym, że obie anteny przesuwają się równocześnie wzdłuż ścieżek pomiarowych i prostopadle do analizowanego profilu glebowego, podczas pomiarów wykorzystano antenę o częstotliwości 800 MHz. Podobne badania przeprowadził [6] identyfikując metodą georadarową ślady ciągnika w profilu glebowym. Niemniej w opinii wielu autorów opracowanie danych georadarowych jest bardzo złożone i wymaga bardzo dobrego wykształcenia kadry wykonującej pomiary i interpretującej uzyskane wyniki. Prędkość fali elektromagnetycznej ( $v$ ) i przenikalność elektryczna ( $k$ ) są silnie zależne od zawartości wody w glebie ( $\theta$ ), z powodu wysokiej stałej dielektrycznej wody w porównaniu z innymi materiałami ( $K$

dla wody = 80,  $K$  dla różnych materiałów geologicznych = 5-15 i  $K$  dla powietrza = 1), np. względna przenikalność elektryczna mokrego piasku jest ośmiokrotnie większa od względnej przenikalności elektrycznej piasku suchego [7]. Nieco inną metodą jest wykorzystanie przewodności elektrycznej do określania potencjału produkcyjnego gleby oraz jej wybranych właściwości fizycznych. Jedną z najbardziej niezawodnych, najprostszych w wykonaniu i najczęściej stosowanych metod do charakterystyki zmienności w obrębie pola jest pomiar przewodności elektrycznej EC (ang. Electrical Conductivity), czyli zdolności materiału do przewodzenia prądu elektrycznego. Przewodność elektryczna profilu glebowego jest pośrednim wskaźnikiem istotnych fizycznych i chemicznych właściwości, takich jak zasolenie, zasobność w składniki odżywcze, ilość i rodzaj ilitu, odczyn, pojemność sorpcyjna, wilgotność, pojemność wodna, temperatura, zawartość węgla organicznego i węglanu wapnia, gęstość objętościowa, porowatość [8-12]. Uzyskiwane wartości ECa i ER nie są bezpośrednim miernikiem którejs z właściwości gleby, ale najczęściej są wypadkową kombinacji kilku właściwości gleby i przedstawiają ich kompleksową współzależność. Wiele badań było ukierunkowanych na określenie zależności pomiędzy różnymi właściwościami gleby, a chwilową przewodnością elektryczną. Uzyskane wyniki są bardzo zróżnicowane, co świadczy o tym, że właściwości gleby oddziałują na oporność/przewodność gleby w sposób złożony [13]. Poza tym, na większość wyżej wymienionych właściwości wpływa pogoda i pomiary ECa są zmienne również w czasie. Czasowo-przestrzenne skanowanie ECa stanowi najlepiej dopasowaną ocenę trendu zmian z roku na rok [9], która może być pomocna w doborze metod zarządzania obszarowego w ramach rolnictwa precyzyjnego. Rodriguez i in. [14] podają, że jeśli gleby nie są zasolone, wówczas ECa reaguje głównie na zawartość ilitu i wilgotność. W badaniach Suddutha i in. [15] przewodność ECa była najwyższej skorelowana z zawartością części ilastych i pojemnością kompleksu sorpcyjnego. Pomiary ECa, podobnie jak pomiary czujnikami zbliżeniowymi, charakteryzują zmienność

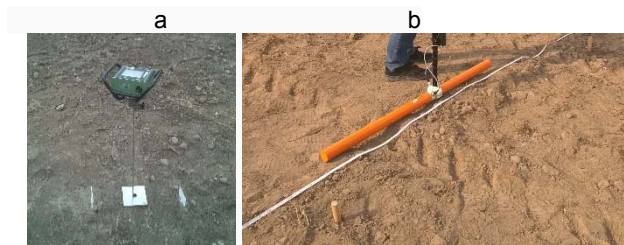
glebową pośrednio, dostarczając informacji niezbędnych do pobierania próbek gleby, które powinny być zebrane tego samego dnia co wykonanie pomiarów, w celu weryfikacji i kalibracji.

### Cel i zakres badań

Celem badań było określenie relacji przewodności elektrycznej gleby wyznaczonej metodą konduktometryczną a echogramem wygenerowanym na podstawie pomiarów georadarowych w odniesieniu do zwięzłości gruntu mierzonego metodą penetrometryczną. Zakres badań obejmował identyfikację zróżnicowania sygnałów pomiarowych w/w metod w siatce punktów usytuowanych na poligonie doświadczalnym o znanych parametrach podłoża, które stanowiły punkt startowy badań. W kolejnym etapie doświadczenia modyfikowano właściwości fizyczne podłoża poprzez zróżnicowanie ugniecenia i wilgotności. Badania przeprowadzono na jednorodnym powierzchniowo oraz wgłębnie podłożu, którym był piasek słabo-gliniasty.

### Metodyka badań

Badania przeprowadzono na poligonie doświadczalnym Wydziału Inżynierii Produkcji i Energetyki UR, w trzech wariantach ugniecenia gruntu. Ugniecenie realizowane było oddzielnie dla każdej serii pomiarowej w tych samych śladach, co pozwoliło na kumulację efektu ugniecenia i pozwalało na eliminację nie wynikającej z metodyki badań zmienności. Aby warunki badań odpowiadały warunkom, produkcyjnym ugniecenie gruntu wykonano ciągnikiem MF235 o masie 26,5 kN usytuowanej symetrycznie na kołach i rozmiarze opon: przednie 600-16, tylnych 12,4R28. Ugniecenie gruntu realizowano przejeżdżając ciągnikiem tym samym śladem w układzie: próba zerowa, dwukrotne, pięciokrotne oraz dziesięciokrotne. Pomiar zagęszczenia gruntu wykonano penetrometrem stożkowym typu Penetrologger Eijkelkamp (rys. 1a) w sondą ThetaProbe wg. normy ASAE (obecnie ASABE). Głębokość sondowania wynosiła 0,8 m przy rejestracji wartości mierzonej zwięzłości profilu w odstępach co 0,01 m. Pomiarzy przeprowadzono wykorzystując stożek o średnicy nominalnej 11,28 mm i kącie rozwarcia 30° a średnia prędkość wciskania stożka penetrometru wynosiła 5 cm·s<sup>-1</sup>. Sondowanie było prowadzone w osi symetrii śladu, gdzie nastąpiło ugniecenie gruntu oraz w miejscu bez ugniecenia, które traktowano jako próbę odniesienia. Pomiarzy przewodności elektrycznej gruntu wykonano konduktometrem, w którym cewki nadawcza TX i odbiorcza RX (sprzężone czasowo i częstotliwościowo) umieszczone w takiej samej odległości i orientacji względem powierzchni ziemi (pionowo – HCP, lub poziomo – PRP).



Rys.1. Aparatura pomiarowa: a) Penetrologger Eijkelkamp, b) konduktometru typu CMD-MiniExplorer

W zależności od częstotliwości cewek, odległości między nimi, orientacji względem cewki nadawczej oraz przewodności elektrycznej ośrodka, możliwy był pomiar do głębokości kilku metrów. W badaniach użyto konduktometru typu CMD-MiniExplorer (rys. 1b) firmy GF Instruments pozwalającego na pomiar przewodności elektrycznej na

trzech głębokościach dla każdego zakresu tj High Depth Range 0,5m; 1,0m; 1,8m oraz Low Depth Range 0,25m; 0,5m; 0,9m. Pomiarzy przeprowadzono wzdłuż śladu ugniecenia gruntu oraz w poprzek saldu ugniecenia tak, aby linie pomiarowe pomiarów konduktometrycznych pokryły się z punktami pomiarów penetrometrycznych.

Kolejne pomiarzy wykonano georadarem ProEx System szwedzkiej firmy Mala GeoScience, gdzie wykorzystano metodę profilowania refleksyjnego polegającego na tym, że obie anteny przesuwają się równocześnie wzdłuż ścieżek pomiarowych i prostopadle do analizowanego profilu gruntu. Badania przeprowadzono przy użyciu anteny ekranowanej o częstotliwości 800 MHz (rys. 2b) pozwalającej na uzyskanie fali o długości 0,12 m i rozdzielczości 0,03 m oraz przy użyciu anteny 1600 MHz (rys. 2b).

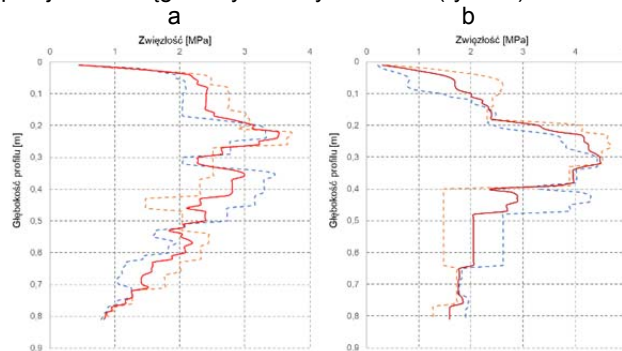


Rys. 2. Anteny georadaru: a) 800 MHz, b) 1,6GHz

Sposób prowadzenia anteny georadaru po gruncie był tożsamy ze sposobem prowadzenia konduktometru, co pozwoliło na identyfikację wszystkich sygnałów pomiarowych w tych samych punktach poligonu doświadczalnego.

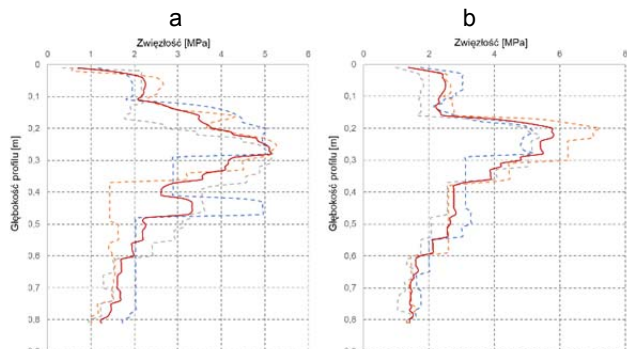
### Wyniki badań

Na rysunku 3 przedstawiono zagęszczenie gruntu zarejestrowane metodą penetrometryczną do głębokości 0,8m w stanie naturalnym (rys.3a) oraz po dwukrotnym przejeździe ciągnika tym samym śladem (rys. 3b).



Rys. 3. Zwięzłość gruntu: a) grunt nie ugniatany, b) po dwukrotnym przejeździe ciągnika

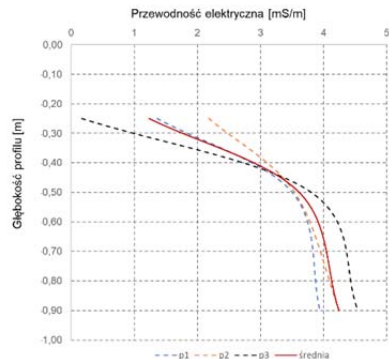
Zidentyfikowano strefę deformacji gruntu do głębokości 0,4m. Różnica w wartościach bezwzględnych zagęszczenia między gruntem nieugniatanym a ugniatanym podwójnym przejazdem ciągnika na głębokości istotnej dla rozwoju roślin (0,3m) wynosiła ok 1 MPa, co jest wartością istotną ze względów technologicznych. W przypadku dalszego ugniatania gruntu (pięciokrotny przejazd ciągnika) nie odnotowano liniowego wzrostu jego zagęszczenia (rys. 4a), które mierzone wartością zwięzłości gruntu wzrosło o 0,5 MPa na głębokości 0,3m. Należy jednak zaznaczyć, że odnotowano znacznie większą zmienność w wartościach zwięzłości (linie przerywane) w stosunku do w/w kombinacji doświadczenia. W przypadku dziesięciokrotnego przejazdu ciągnikiem odnotowano dalszy wzrost zagęszczenia gruntu (rys. 4b), które w skrajnym przypadku przekraczało 7MPa na głębokości profilu wynoszącego 0,2 m.



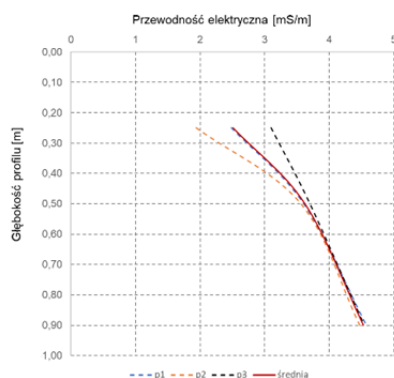
Rys. 4. Zwięzłość gruntu: a) po pięciokrotnym przejeździe ciągnika, b) po dziesięciokrotnym przejeździe ciągnika

Taka struktura gruntu wymaga ingerencji maszynowej, którą należy uwzględnić szczególnie w technologiach produkcji roślin korzeniowych. Należy mieć świadomość, że przedstawione wyniki uzyskano metodą penetrometryczną, która oparta jest o punktowy pomiar zagęszczenia gruntu, co utrudnia jej implementację do autonomicznych systemów uprawowych.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki przewodności elektrycznej gruntu dla różnych głębokości profilu glebowego przed ugniataniem kołami ciągnika. W pomiarach uwzględniono dwa zakresy pracy konduktometru wynikające ze zmiany orientacji dipola, natomiast w analizie przedstawiono tylko wyniki dla pomiarów tzw. niskiej głębokości. Odnotowano, że średnia wartość przewodności elektrycznej gruntu (linia koloru czerwonego) wynosiła na 1,2  $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$  na głębokości 0,3 m a na głębokości 0,5 m ok 3,7  $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ . Po czym zaobserwowano, że wzrost głębokości profilu gruntu nie powoduje znacznego wzrostu przewodności elektrycznej, której wartość na głębokości 0,9m wynosiła 4,3  $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ .

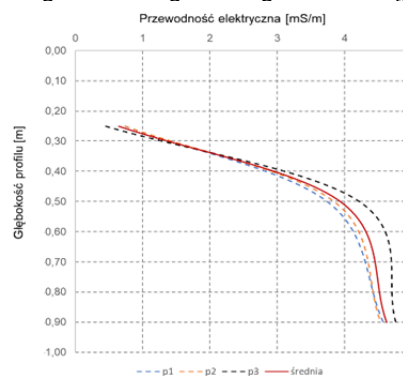


Rys. 5. Przewodność elektryczna gruntu nie ugniatanego

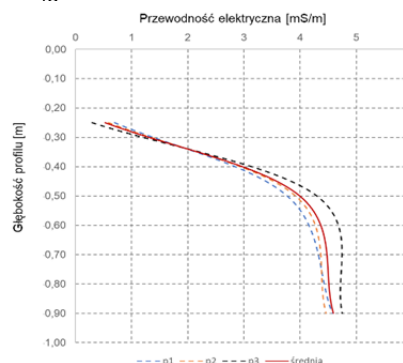


Rys. 8. Przewodność elektryczna gruntu po dziesięciokrotnym przejeździe ciągnika

Po dwukrotnym przejeździe ciągnika po wyznaczonych ścieżkach poligonu doświadczalnego, odnotowano niewielki spadek przewodności elektrycznej na głębokości 0,25 m w stosunku do gruntu nie ugniatanego kołami ciągnika (rys.6).



Rys. 6. Przewodność elektryczna gruntu po dwukrotnym przejeździe ciągnika



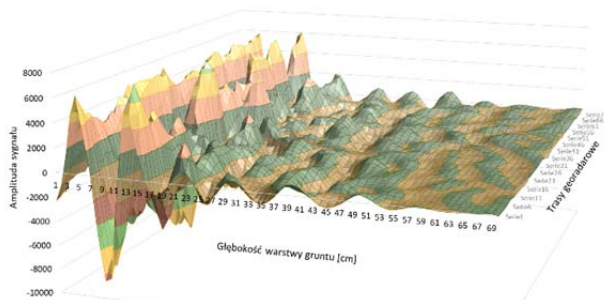
Rys. 7. Przewodność elektryczna gruntu po pięciokrotnym przejeździe ciągnika

Natomiast już na głębokości profilu gruntu wynoszącego 0,5m przewodność elektryczna była nieznacznie wyższa wynosząc 3,8  $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ . Poniżej głębokości 0,5m nie odnotowano różnic w wartości przewodności elektrycznej. Podobny trend nieznacznego spadku przewodności elektrycznej gruntu na głębokości 0,25m, która wynosiła 0,45  $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$  odnotowano w przypadku ugniecia gruntu pięciokrotnym przejazdem ciągnika (rys.7).

Nieco inną charakterystyką przewodności elektrycznej charakteryzował się grunt, który był ugniatany przez dziesięciokrotnym przejazdem ciągnika (rys. 8), ponieważ już na głębokości 0,25m wynosiła ona średnio 2,5  $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ , co odpowiadało zwięzłości wynoszącej blisko 6 MPa (patrz rys. 4b). Na głębokości 0,5m przewodność elektryczna gruntu była porównywalna do przewodności elektrycznej we wcześniejszych opisywanych wariantach doświadczenia. Należy jednak zaznaczyć, że pomimo porównywalnych wartości przewodności gruntu w analizowanym wariantcie doświadczenia (10 przejazdów ciągnikiem) zmienność mierzonej wielkości była znacznie mniejsza w stosunku do wariantów, gdzie stopień ugniecia gruntu był mniejszy.

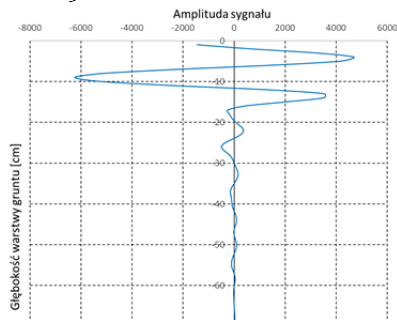
Na rysunku 9 przedstawiono amplitudę sygnału georadarowego gruntu nie ugniatanego wygenerowanego na całej długości odcinka pomiarowego. Zakres amplitudy sygnału jest miarą zróżnicowania mierzonego ośrodka. Odnotowano, że amplituda sygnału wynosiła ok 6000 jednostek (rys. 10), która była wyrównana na całej długości odcinka pomiarowego z wyjątkiem początkowego okresu pomiaru, gdzie przekraczała 10000 jednostek (rys. 10). Należy zaznaczyć, że najwyższe zróżnicowanie występowało do głębokości ok. 0,2m a następnie amplituda sygnału wyraźnie malała, co może świadczyć o jednolitości mierzonego ośrodka.





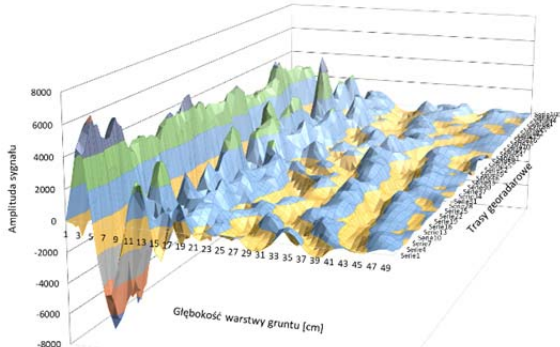
Rys. 9. Wizualizacja zagęszczenia gruntu nie ugniatanego

Głębokość zidentyfikowanych anomalii wynosiła do 0,2 m a po przekroczeniu tej głębokości amplituda nie przekraczała 200 jednostek.



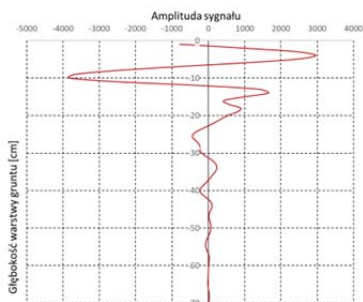
Rys. 10. Uśredniona amplituda sygnału georadarowego gruntu w stanie naturalnym

Znacznie mniejsze amplitudy sygnału georadarowego odnotowano na gruncie, który był ugniatany dwukrotnym przejazdem ciągnika (rys.11).



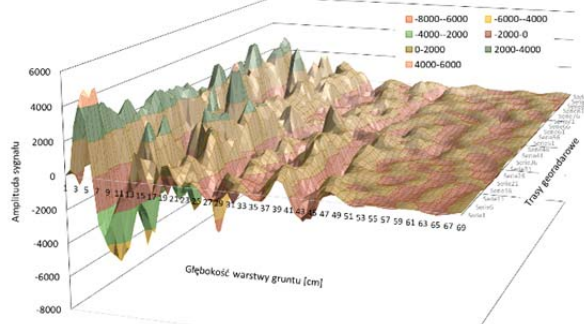
Rys. 11. Wizualizacja zagęszczenia gruntu po dwukrotnym przejeździe ciągnika

Uśrednioną wartość amplitudy sygnału wszystkich tras georadarowych mierzonego odcinka, oczywiście po wykluczeniu tzw. odcinków rozbiegowych przedstawiono na rysunku 12. Stwierdzono, że najwyższą amplitudą charakteryzował się grunt na głębokości ok 0,1 m wynosząc 4000 jednostek. Amplituda sygnału stabilizuje się dopiero po przekroczeniu głębokości 0,25 m.



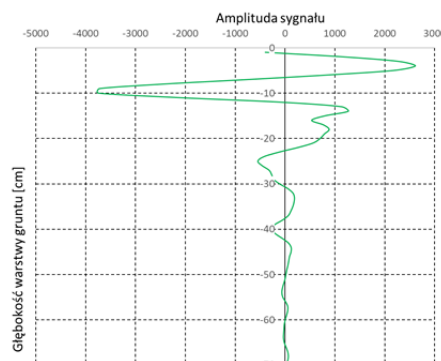
Rys. 12. Uśredniona amplituda sygnału georadarowego gruntu po dwukrotnym przejeździe ciągnika

Wskazuje to wyraźnie na zmianę relacji zagęszczenia między poszczególnymi warstwami gruntu wywołanymi dwukrotnym przejazdem ciągnika. Jeszcze bardziej wyrównaną amplitudę sygnału georadarowego analizowanego gruntu uzyskano po pięciokrotnym przejeździe ciągnika (rys. 13).

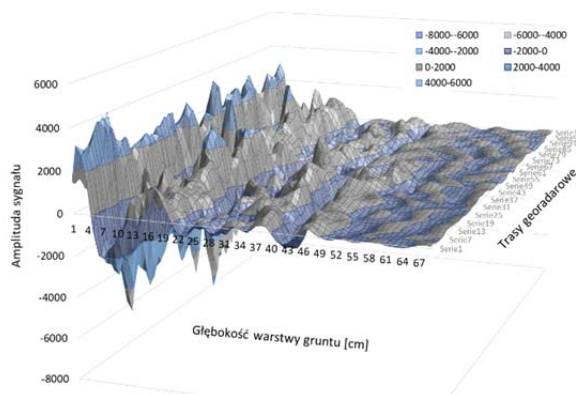


Rys. 13. Wizualizacja zagęszczenia gruntu po pięciokrotnym przejeździe ciągnika

Analizując uśrednioną amplitudę sygnału georadarowego (rys. 14) stwierdzono, że maksymalnie wyniosła 3800 jednostek, które odnotowano na głębokości 0,1 m. Należy zwrócić uwagę, że na głębokości ok 0,2m amplituda sygnału wynosiła jeszcze ponad 800 jednostek, dopiero po przekroczeniu głębokości 0,3 m amplituda sygnału stabilizuje się, co świadczy o jednorodności ośrodka.



Rys. 14. Uśredniona amplituda sygnału georadarowego gruntu po pięciokrotnym przejeździe ciągnika

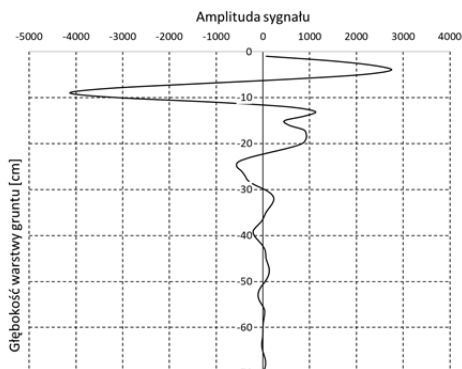


Rys. 15. Wizualizacja zagęszczenia gruntu po dziesięciokrotnym przejeździe ciągnika

W przypadku ugniecia gruntu dziesięciokrotnym przejazdem ciągnika zaobserwowano wzrost amplitudy sygnału georadarowego wierzchniej warstwy gruntu (rys. 15) świadczące o zróżnicowaniu ugniecia między analizowaną warstwą a warstwami głębszymi gruntu. Zwiększona amplituda sygnału występowała do głębokości ok 0,4m, co świadczy o zidentyfikowanych metodą

georadarową zmianach w strukturze gruntu wywołanych przejazdami ciągnika.

Uśrednioną amplitudę sygnału przedstawiono na rysunku 16, która potwierdza zniekształcenia struktury gruntu do głębokości ok. 0,35 m.



Rys. 16. Uśredniona amplituda sygnału georadarowego gruntu po pięciokrotnym przejeździe ciągnika

### Podsumowanie

Zidentyfikowane anomalie mogą być podstawą do automatycznej lokalizacji miejsc, w których struktura gruntu jest niejednorodna. Każda z zastosowanych pozwala na identyfikację obszarów w profilu gruntu o anormalnych właściwościach produkcyjnych, ale dopiero wzajemna ich analiza pozwala wykluczyć przypadkowość wnioskowania. Metody georadarowe uzupełnione metodami konduktometrycznymi pozwalają na automatyzację procesu identyfikacyjnego anomalie w profilu gruntu wykluczając jednocześnie niektóre czynniki zakłócające wynik pomiaru.

*Acknowledgments. This research has been financially supported by AGH University of Science and Technology in Kraków grants no. 11.11.140.645 and from the Ministry of Science and Higher Education funds.*

**Autorzy:** Akinniyi Akinsunmade, Nigerian Geological Survey Agency, Abuja, Nigeria, E-mail: akinsunmade@agh.edu.pl; dr hab. inż. Sylwia Tomecka-Suchoń, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, E-mail: tomecka@agh.edu.pl; mgr inż. Paweł Pysz, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, E-mail: pysz\_pawel@wp.pl; dr inż. Jerzy Karczewski, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, E-mail: karcz@agh.edu.pl; prof. dr hab. inż. Tadeusz Juliszewski, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: tadeusz.juliszewski@urk.edu.pl; dr inż. Mirosław Zagórda, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: miroslaw.zagorda@urk.edu.pl; dr hab. inż. Paweł Kielbasa, prof. UR, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: pawel.kielbasa@urk.edu.pl

### LITERATURA

- [1] Corwin D.L., Lesch S.M. Delineating site-specific management units with proximal sensors. W: Geostatistical Applications for Precision Agriculture, Oliver M. (Ed.) Springer Science+Business Media B.V., (2010), n. 6, 139-165.
- [2] Walczykova M., Kielbasa P., Zagórda M.: Pozyskanie i wykorzystanie informacji w rolnictwie precyzyjnym. Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej – Monografia (2006), ISBN 978-83-64377-03-7.
- [3] Tomecka-Suchoń S.: Ground penetrating radar use in flood prevention. Acta Geophysica, (2019), <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00371-6>.
- [4] Adamchuk V.I., Viscarra Rossel R.A. Development of on-the-go proximal soil sensor systems. W: Proximal soil sensing, Progress in soil science. Springer Science+Business Media B.V., (2010), 15-28.
- [5] Juliszewski T., Kielbasa P., Zagórda M., Tomecka S., Karczewski J., Akinniyi A.: Porównanie wyników badania zagęszczenia gleby uprawnej metodą penetrometryczną i georadarową. Przegląd Elektrotechniczny, (2019), nr.1, 12-16.
- [6] Akinsunmade A., Tomecka-Suchoń S., Pysz P.: Correlation between agrotechnical properties of selected soil types and corresponding GPR response. Acta Geophysica, (2019), <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00349-4>.
- [7] Karczewski J., Ortyl Ł., Pasternak M. Zarys metody georadarowej, Wydanie drugie poprawione i rozszerzone, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH Kraków, (2011), ISBN 978-83-7464-422-8.
- [8] Allred B. Agricultural Geophysics: Past/Present Accomplishments and Future Advancements. Keynote Presentation. Proceedings of The Second Global Workshop on Proximal Soil Sensing – Montreal (2011), 24-31.
- [9] Corwin D.L., Lesch S.M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. Computers and Electronics in Agriculture (2005), 46, 11-43.
- [10] Doolittle J.A., Brevik E.C. 2014. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. Geoderma (2014) 223-225, 33-45.
- [11] Szczęsny A., Korzeniewska E.: Dobór metody do pomiaru rezystancji uziemia. Przegląd Elektrotechniczny 2018, 94(12), pp. 178-181
- [12] Szczęsny A., Korzeniewska E.: Validation of the method for measuring the effectiveness of residual current protection 2019 Applications of Electromagnetics in Modern Engineering and Medicine, PTZE 2019, 8781686, pp. 237-240
- [13] Allred B.J., Groom D., Ehsani M.R., Daniels J.J. 2008. Resistivity methods. W: Allred B.J., Ehsani M.R., Daniels J.J. (Ed.). Handbook of Agricultural Geophysics, CRC Press, (2008), 5, 85-108.
- [14] Rodriguez D., Fitzgerald G.J., Belford R., Christensen L.K. Detection of nitrogen deficiency in wheat from spectral reflectance indices and basic crop eco-physiological concepts. Australian Journal of Agricultural Research, (2006), 57, 781-789.
- [15] Sudduth K.A., Kitchen N.R., Wiebold W.J., Batchelor W.D., Bollero G.A., Bullock D.G., Clay D.E., Palm H.L., Pierce F.J., Schuler R.T., Thelen K.D. Relating apparent electrical conductivity top soil properties across the North-Central USA. Computers and Electronics in Agriculture (2005) 46, 263-283.