

## PRZYDATNOŚĆ TECHNIKI GEORADAROWEJ DO BADAŃ KONTROLNYCH DRÓG LEŚNYCH NA PRZYKŁADZIE ODCINKÓW EKSPERYMENTALNYCH W NADLEŚNICTWIE GRYFINO

Adrian Kasztelan✉

Katedra Inżynierii Leśnej, Wydział Leśny i Technologii Drewna, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu  
ul. Wojska Polskiego 71 C, 60-625 Poznań

### ABSTRAKT

**Wstęp.** W Polsce obserwuje się wzrost liczby dróg leśnych o nawierzchni twardej ulepszonej i nieulepszonej. Wszystkie, zgodnie z Ustawą z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane, muszą być odebrane i zatwierdzone do ruchu drogowego. Poszukuje się nowych rozwiązań usprawniających pracę i dających lepsze efekty monitoringu jakości i stanu dróg. Propozycją może być metoda z użyciem georadaru – GPR (ang. *ground penetrating radar*). To metoda nieniszcząca, stosowana w wielu dziedzinach, w tym z powodzeniem w pomiarach dróg publicznych. Dane pozyskane przez georadar pozwalają stworzyć profil podłużny badanego odcinka. W ten sposób otrzymujemy informacje o układzie konstrukcyjnym obiektu, grubości warstw, anomaliach (np. osiadanie gruntu, przerwanie ciągłości warstwy, spękania). Dane informują o przeprowadzonej inwestycji drogowej. Monitoring stanu i jakości dróg może znacząco wpłynąć na oszczędności podczas prowadzenia prac remontowych.

**Cel badań.** Badanie przydatności metody georadarowej (GPR) w oszacowaniu grubości warstw konstrukcyjnych drogi leśnej.

**Materiał i metody.** Badania prowadzono na eksperymentalnych odcinkach drogowych wybudowanych na terenie Nadleśnictwa Gryfino. Akwizycja danych za pomocą georadaru umożliwiła stworzenie radargramów. Do prac terenowych wykorzystano antenę o częstotliwości centralnej 750 MHz (MALA Ground Explorer (GX) HDR). Wykonano profile podłużne o długości 25 m, będące fragmentem odcinków testowych o nawierzchniach twardych ulepszonych i nieulepszonych. Uzyskane rekordy w post-processingu przetworzono w oprogramowaniu MALA Object Mapper oraz RAMAC Ground Vision i poddano dalszej obróbce.

**Wyniki i konkluzje.** Na podstawie pomiarów i uzyskanych obrazów 2D stwierdzono, że georadar z anteną o częstotliwości centralnej 750 MHz można stosować z powodzeniem w pracach kontrolnych dróg leśnych. Opracowanie danych potwierdza możliwość monitorowania drogi w sposób ciągły (profile podłużne), obserwując układ konstrukcyjny obiektu, grubość warstw konstrukcyjnych oraz występujące anomalie.

**Słowa kluczowe:** GPR, georadar, metoda nieniszcząca, monitoring nawierzchni dróg, grubość warstw

### WSTĘP

W Polsce obserwuje się wzrost liczby dróg leśnych o nawierzchni twardej ulepszonej (NTU) i nieulepszonej (NTN), zarządzanych przez Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe. Budowa dróg polega na

wykonaniu, nadbudowaniu lub rozbudowaniu obiektu liniowego oraz obiektów budowlanych i urządzeń technicznych, które łącznie tworzą pas drogowy. Każde roboty kończą się odbiorami częściowymi

✉ [adrian.kasztelan@up.poznan.pl](mailto:adrian.kasztelan@up.poznan.pl), <https://orcid.org/0000-0003-3908-3424>

(pojedynczej warstwy konstrukcyjnej drogi) lub odbiorem końcowym całej konstrukcji (Ustawa..., 2021). Wiarygodne i dokładne pomiary geometrii, nośności oraz grubości warstw konstrukcyjnych drogi są podstawą do stwierdzenia właściwie wykonanych robót drogowych zgodnych z projektem i zasadami sztuki budowlanej (Czerniak i in., 2013; Dzikowski i in., 2006; Zarządzenie nr 30..., 2014; Zarządzenie nr 31..., 2014). Pomiary grubości warstw przeprowadza się punktowo w sposób niszczący, wykonując odkrywki lub odwiert (Zarządzenie nr 21..., 2019).

Technika georadarowa – GPR (ang. *ground penetrating radar*) jest metodą nieniszczącą. Znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, m.in. w naukach przyrodniczo-technicznych w rozpoznaniu geologicznym i geotechnicznym (Bednarczyk i Szykiewicz, 2009), do monitoringu osuwisk czy stanu wałów przeciwpowodziowych (Bednarczyk i Szykiewicz, 2015; Szykiewicz, 2000), przy pomiarach w budownictwie komunikacyjnym (Ortyl, 2009; Szykiewicz, 2021; Świt i Krosno, 2017). Metoda GPR opiera się na procesach transmisji, odbicia i odbioru oraz ostatecznie rejestracji fal elektromagnetycznych (EM) o wysokiej częstotliwości w zakresie od 10 MHz do nawet 6 GHz (Solla i in., 2021). Propagacja i odbijanie fal emitowanych przez georadar zachodzą płytko pod powierzchnią terenu, w ośrodku gruntowym, skalnym lub w obrębie materiału konstrukcyjnego badanej budowli. Zjawisko odbicia fali jest możliwe ze względu na różne właściwości dielektryczne materiałów budujących warstwy badanego ośrodka (Daniels, 2004; Karczewski i in., 2011).

Krótki czas pozyskiwania danych i możliwość uzyskiwania obrazu wysokiej rozdzielczości przesądza o przydatności metody georadarowej do zastosowań drogowych. W niektórych krajach użycie georadaru do kontroli grubości warstw konstrukcyjnych dróg lub jakości i stanu konstrukcji jest stosowane powszechnie lub nawet obligatoryjnie, np. w Szwecji czy Finlandii (Lenngren i in., 2000; Wutke, 2018). W zastosowaniach w infrastrukturze transportowej najlepsze wyniki uzyskuje się, używając anten o częstotliwości od 400 MHz do 2,5 GHz. Praktyka pokazuje, że im wyższa częstotliwość, tym mniejsza głębokość penetracji, ale za to wyższa rozdzielczość uzyskanego wyniku (Solla i in., 2021).

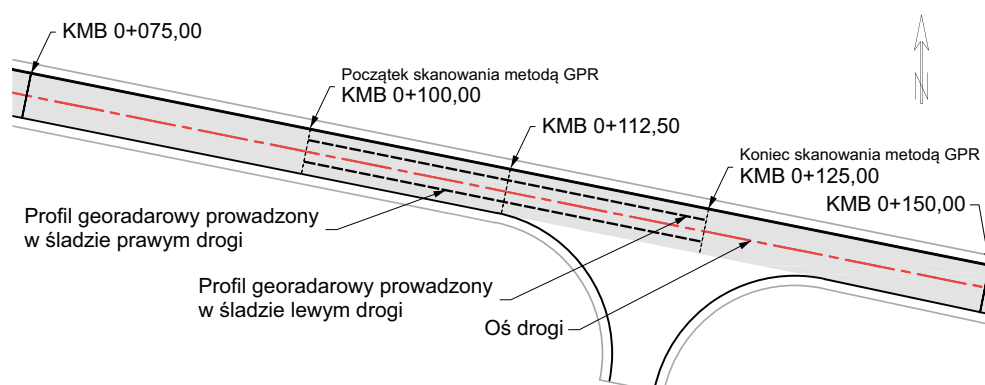
Sygnał radarowy jest wrażliwy na zróżnicowanie składu badanego ośrodka, kształt, orientację

i upakowanie ziaren (Neal i Roberts, 2000). W badaniach georadarowych dróg parametry dielektryczne wykazują zróżnicowanie w zależności od rodzaju materiałów konstrukcyjnych (Pitońak i Filipovsky, 2016). W konstrukcji drogowej stosunkowo najłatwiej wykrywalna jest powierzchnia graniczna między warstwą związaną a niezwiązaną, ponieważ stałe dielektryczne budujących je materiałów różnią się znacząco (Lenngren i in., 2000). Określenie grubości poszczególnych warstw konstrukcyjnych drogi jest uwarunkowane występowaniem różnicy prędkości rozchodzenia się fali w tych warstwach, a ta jest wynikiem stałych dielektrycznych materiałów, z których zostały zbudowane (Wutke, 2018).

Weryfikacja grubości warstw konstrukcyjnych odbywa się w nawierzchniach twardych ulepszonych (np. nawierzchniach betonowych) poprzez odwiertny rdzeniowe, natomiast w nawierzchniach twardych nieulepszonych (np. z kruszywa łamanego) poprzez odkrywki. Obie metody są praco- i czasochłonne, ingerują w konstrukcję, powodując zmniejszenie trwałości nawierzchni, a uzyskany wynik jest punktowy. Z kolei GPR jest metodą nieniszczącą, nienaruszającą konstrukcji, szybką, niezawodną, opłacalną, mogącą skanować duże powierzchnie. Między punktami kontrolnymi prowadzi się profilowania/przekroje liniowe (2D), a w przypadku kilku równoległych linii przekrojowych można uzyskać obrazy 3D, z możliwością poziomych cięć czasowych obrazujących anomalie GPR (w rzucie z góry) na wybranych głębokościach. Celem prowadzonych badań było określenie przydatności metody georadarowej do oszacowania grubości warstw konstrukcyjnych drogi leśnej. Brak wystarczających danych na temat rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w warstwach dróg leśnych, które mają odmienną konstrukcję niż drogi publiczne, skłania do wzbogacenia wiedzy na ten temat. Ważnym aspektem jest fakt, że liniowe profile podłużne, w porównaniu z punktowymi odwiertami/odkrywkami, dostarczają szczegółowych informacji na całym odcinku drogi. Takie dane pozwalają zarówno zredukować koszty robót drogowych, jak i zwiększyć bezpieczeństwo ruchu drogowego.

## MATERIAŁ I METODY

Artykuł prezentuje wyniki badań drogi leśnej, która została wybudowana na terenie Nadleśnictwa Gryfino,



**Rys. 1.** Schemat wykonywania pomiarów GPR na przykładzie nawierzchni typu NTN 0+075 – 0+150

**Fig. 1.** The scheme of GPR measurements based on NTN 0+075 – 0+150 surface

na południe od Szczecina ( $53^{\circ}18'38.7''N$ ;  $14^{\circ}33'10.0''E$ ). Całkowita długość drogi eksperymentalnej to blisko 1700 m. Zgodnie z planem badań, opracowanym w 2016 roku, całość drogi podzielono na 16 odcinków doświadczalnych. Odcinki różniły się konstrukcją, grubością warstw, wbudowanymi materiałami oraz technologią budowy. Warianty zostały podzielone na dwie główne nawierzchnie: twarde ulepszone (NTU) i twarde nieulepszone (NTN).

Przedstawione wyniki są częścią większych badań prowadzonych już od kilku lat. Latem 2021 roku wykonano prace terenowe z zastosowaniem nieniszczącej techniki georadarowej. Użyto georadaru z anteną o częstotliwości centralnej 750 MHz (MALA Ground Explorer (GX) HDR). Najważniejsze parametry nastawcze pomiaru to: częstotliwość próbkowania sygnału 9600 MHz, interwał zapisu śladów 0,5 cm, długość okna czasowego 43 ns. Prace terenowe polegały na wykonaniu profili podłużnych (Lenngren i in., 2000; Ortyl, 2009). Sytuacyjny rozkład 25-metrowych profili pomiarowych zlokalizowanych w środkowej części każdego eksperymentalnego odcinka przedstawiono na rysunku 1. Materiały pomiarowe zbierano liniowo wzdłuż obu śladów przejazdów samochodowych w stałych warunkach wilgotności konstrukcji. Do pozycjonowania profili użyto GPS oraz kółko pomiarowe.

Uzyskane dane przedstawiające charakterystykę migracji fali elektromagnetycznej zostały przetworzone w post-processingu w oprogramowaniu MALA Object Mapper oraz RAMAC Ground Vision, gdzie

podlegały dalszej obróbce. Zmodyfikowane obrazy 2D zinterpretowano, czego efektem było oznaczenie ośrodków o różnej przenikalności elektrycznej.

## WYNIKI

Wskutek dużej liczby zebranych danych oraz powstałych radargramów/echogramów GPR (odbitych fal EM) w prezentowanych badaniach przedstawiono pomiary z wybranych 25-metrowych profili podłużnych, będących fragmentem założonych odcinków doświadczalnych. Wyniki dotyczą odcinków testowych o układzie konstrukcji opisanych w tabeli 1. Miejsca pomiarowe zlokalizowano na odcinkach eksperymentalnych, których niweletę poprowadzono częściowo w nasypie i częściowo w wykopie. Wzdłuż przedmiotowej drogi leśnej fragmentami poprowadzono rów jednostronny lub dwustronny o głębokości 0,40–0,60 m. Ustalenie parametrów grubości warstw konstrukcyjnych z użyciem metody georadarowej wymaga wektoryzacji i kalibracji, co z kolei przekłada się na użycie zaawansowanych funkcji oprogramowania w post-processingu. Tak przygotowane dane georadarowe są wizualizowane w sposób graficzny na: A-skanach (pojedyncze fale, pojedyncze echa) oraz B-skanach (przekroje georadarowe, linear data), które przedstawiono na rysunkach 2–6. A-skan przedstawia oś  $z$  i jest funkcją amplitud odbitej fali elektromagnetycznej w czasie propagacji, stanowi swoisty odwrot przez konstrukcję. Z kolei B-skan prezentuje oś  $z$  oraz  $x$  i jest zbiorem A-skanów ułożonych jeden

**Tabela 1.** Lokalizacja oraz charakterystyka konstrukcji odcinków doświadczalnych drogi leśnej  
**Table 1.** Location and structure characteristics of experimental sections of a forest road

Rodzaj nawierzchni Road type	KMB Kilometre-marking along road section	Układ warstw Surface layers	Fracja Graining mm	Grubość warstw Layer thickness cm
NTN	0+075 – 0+150	w. klinująca – zamiałowanie kruszywem naturalnym (piasek)	0/2	4
		w. podbudowy – destrukta betonowy	0/63	15
		w. mrozoochronna – kruszywo naturalne (piasek średni)	–	15
NTN	0+600 – 0+750	w. klinująca – zamiałowanie kruszywem łamanym	0/8	3
		w. podbudowy zasadniczej – kruszywo łamane	0/31,5	12
		w. podbudowy pomocniczej – grunt rodzimy stabilizowany spoiwem hydraulicznym (Gruntar 32,5)	–	15
NTN	1+060 – 1+160	w. klinująca – zamiałowanie kruszywem łamanym	0/8	3
		w. podbudowy zasadniczej – kruszywo łamane	0/31,5	12
		w. podbudowy pomocniczej – kruszywo łamane	0/63	15
		geowłóknina separacyjna o gramaturze 200 g/m <sup>2</sup>	–	–
		w. mrozoochronna – kruszywo naturalne (piasek średni)	–	15
NTN	1+350 – 1+450	w. podbudowy zasadniczej – otoczek łamany w 2/3 pow.	0/31,5	12
		w. podbudowy pomocniczej – otoczek łamany w 2/3 pow.	0/63	15
NTU	1+550 – 1+600	w. ścieralna – beton wałowany RCC (beton C20/25)	–	12
		w. podbudowy – kruszywo łamane	0/31,5	10

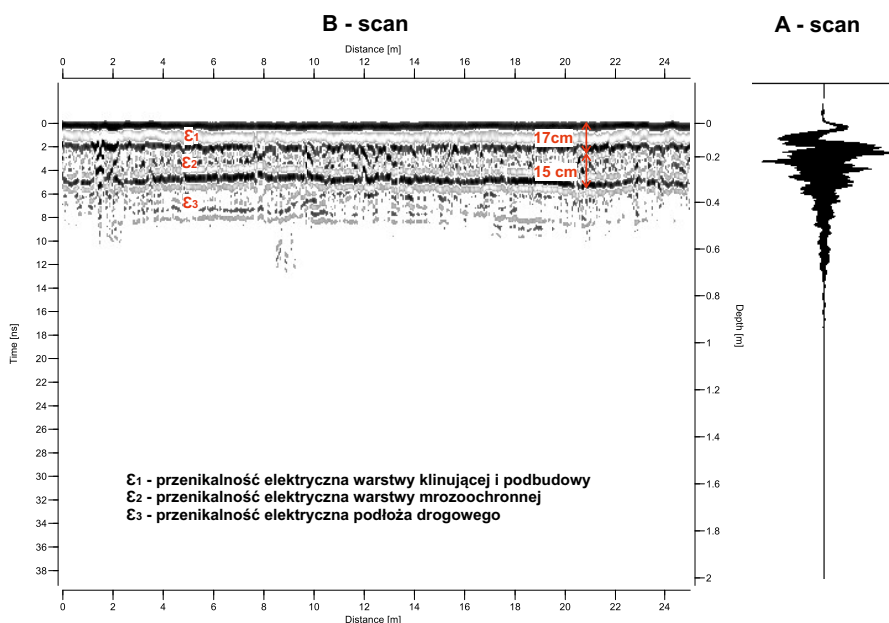
KMB – kilometr bieżący drogi, NTU – nawierzchnia twarda ulepszona, NTN – nawierzchnia twarda nieulepszona, w. – warstwa, pow. – powierzchnia przekruszonego materiału.

obok drugiego (linear data) wzdłuż badanej linii pomiarowej. Na każdym radargramie oznaczono „punkt zero”, który jest ustalany na podstawie linii osi czasu (Benedetto i in., 2017). W celu weryfikacji grubości warstw konstrukcyjnych parametry przyjęto zgodnie z dokumentacją projektową wykonania eksperymentalnych odcinków drogowych (tab. 1).

Prezentowane B-skany na rysunkach 2–6 obrazują w wyraźny sposób przejścia przez ośrodek wielowarstwowy (amplitudy fal EM odbitych od granic poszczególnych warstw). Na każdym badanym odcinku zaobserwowano układ warstw konstrukcyjnych drogi leśnej. Warstwy nie są ułożone prostoliniowo (poziomo), co może wskazywać na zmiany w grubości.

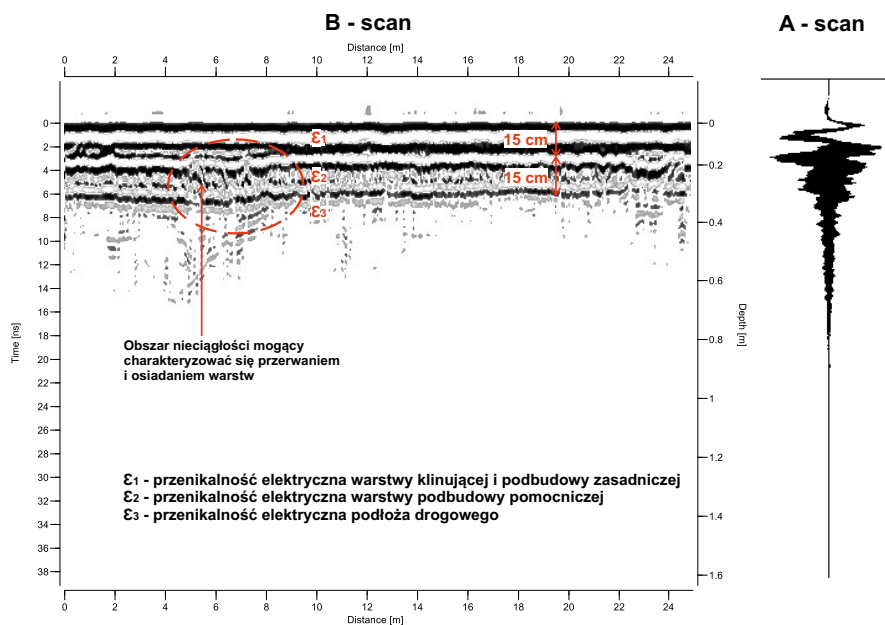
Wymiary geometryczne omawianych nawierzchni drogowych pomierzonych metodą georadarową zestawiono z grubościami zakładanymi w projekcie i przedstawiono w tabeli 2. Tolerancja grubości opisanej w dokumentacji technicznej inwestycji dla warstwy ścieralnej to +2 cm i –0,5 cm. Z kolei średnia tolerancja dla pozostałych warstw to ±1 cm.

Średnie grubości warstw konstrukcyjnych dla każdego 25-metrowego profilu podłużnego odcinka doświadczalnego uzyskano na podstawie pomiarów w post-processingu, w oprogramowaniu RAMAC Ground Vision, które przedstawiono w tabeli 2. Odchylenie standardowe większości warstw konstrukcyjnych nie przekracza 1 cm, co oznacza, że warstwy są



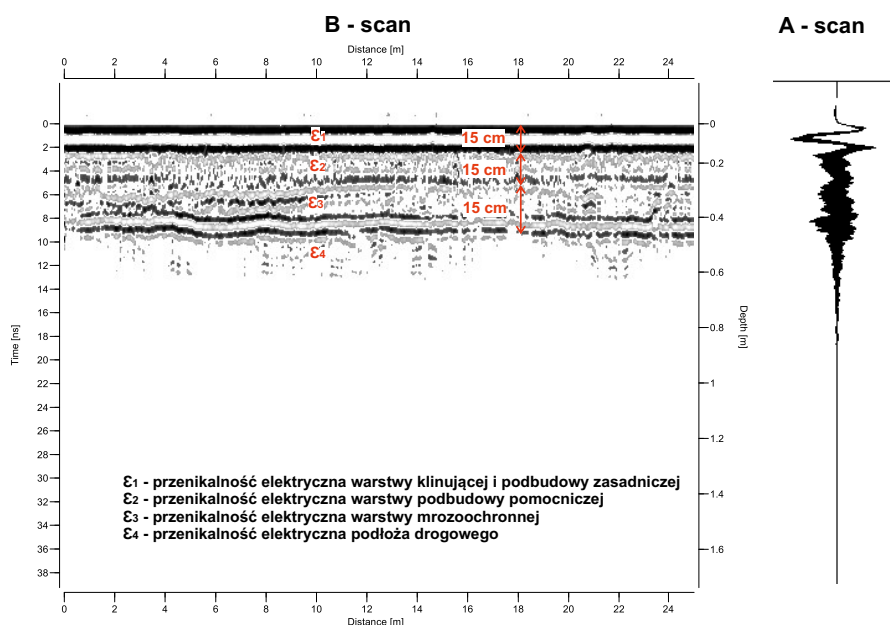
**Rys. 2.** A-skan i B-skan z pomiarów GPR nawierzchni typu NTN 0+075 – 0+150 anteną 750 MHz

**Fig. 2.** A-scan and B-scan of GPR measurements with a 750 MHz antenna for surface type NTN 0+075 – 0+150



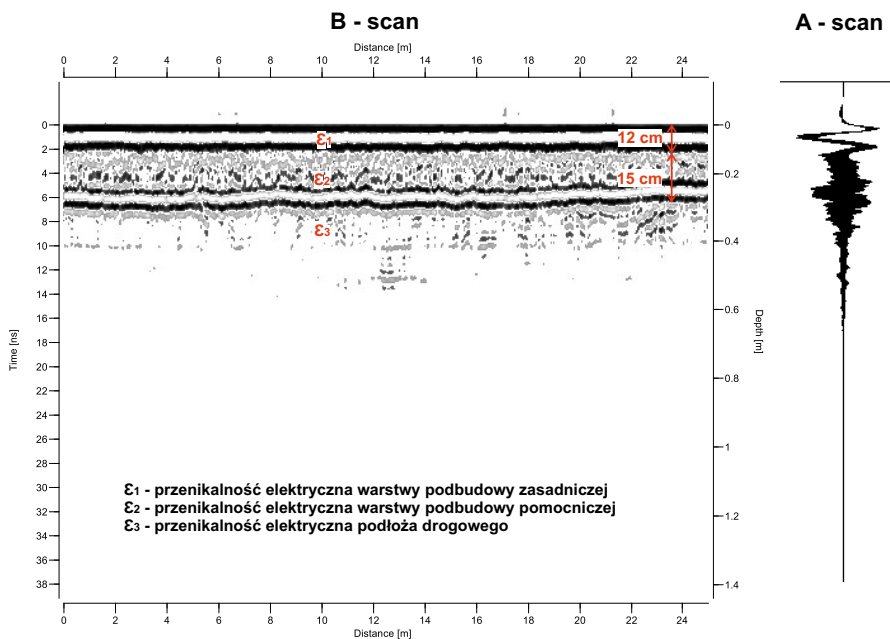
**Rys. 3.** A-skan i B-skan z pomiarów GPR nawierzchni typu NTN 0+600 – 0+750 anteną 750 MHz

**Fig. 3.** A-scan and B-scan of GPR measurements with a 750 MHz antenna for surface type NTN 0+600 – 0+750



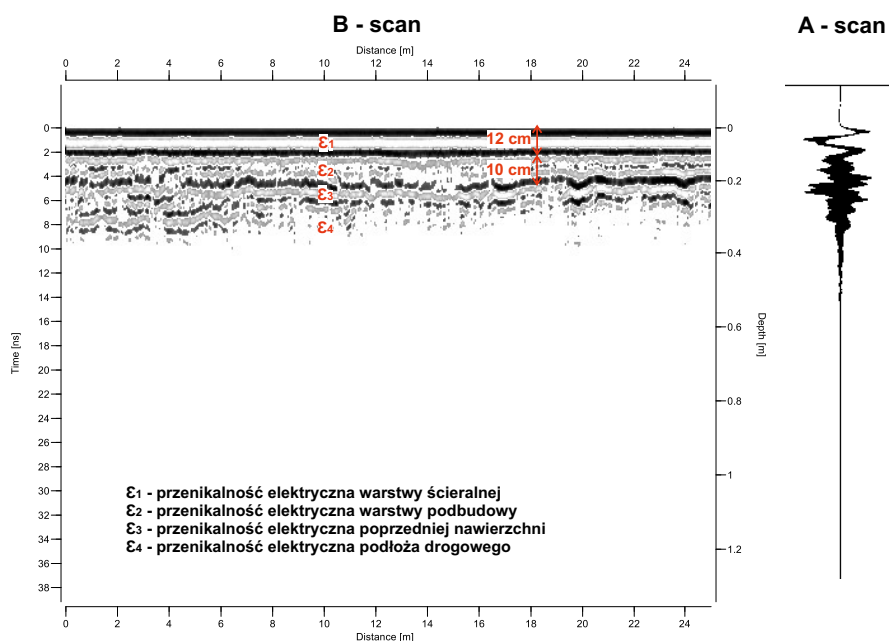
**Rys. 4.** A-skan i B-skan z pomiarów GPR nawierzchni typu NTN 1+060 – 1+160 anteną 750 MHz

**Fig. 4.** A-scan and B-scan of GPR measurements with a 750 MHz antenna for surface type NTN 1+060 – 1+160



**Rys. 5.** A-skan i B-skan z pomiarów GPR nawierzchni typu NTN 1+350 – 1+450 anteną 750 MHz

**Fig. 5.** A-scan and B-scan of GPR measurements with a 750 MHz antenna for surface type NTN 1+350 – 1+450



**Rys. 6.** A-skan i B-skan z pomiarów GPR nawierzchni typu NTU 1+550 – 1+600 anteną 750 MHz

**Fig. 6.** A-scan and B-scan of GPR measurements with a 750 MHz antenna for surface type NTU 1+550 – 1+600

**Tabela 2.** Zestawienie średnich grubości warstw konstrukcyjnych, odchylenia grubości pomierzonych georadarem oraz odchylenia grubości pomierzonej względem wartości projektowej

**Table 2.** Mean thickness of structural layers, deviations in thicknesses measured by GPR and deviations in thickness measured from the design value

KMB Kilometre-marking along road section	Układ warstw Surface layers	$h_{proj.}$ Project thickness cm	$h_{sr(gpr)}$ Average thickness cm	$\sigma$ Standard deviation cm	Tolerancja grubości Thickness tolerance cm
0+075 – 0+150	w. klinująca i podbudowy	19	16,9	0,6	-2,1
	w. mrozochronna	15	15,0	1,2	0,0
0+600 – 0+750	w. klinująca i podbudowy zasadniczej	15	15,4	0,8	0,4
	w. podbudowy pomocniczej	15	15,9	0,8	0,9
1+060 – 1+160	w. klinująca i podbudowy zasadniczej	15	14,8	0,4	-0,2
	w. podbudowy pomocniczej	15	14,2	0,9	-0,8
	w. mrozochronna	15	16,7	0,8	1,7
1+350 – 1+450	w. podbudowy zasadniczej	12	12,8	0,4	0,8
	w. podbudowy pomocniczej	15	16,8	1,2	1,8
1+550 – 1+600	w. ścieralna	12	12,6	0,5	0,6
	w. podbudowy	10	9,5	0,8	-0,5

KMB – kilometraż bieżący drogi, w. – warstwa,  $h_{proj.}$  – grubość warstw zaprojektowanych,  $h_{sr(gpr)}$  – średnia grubość warstw pomierzona georadarem,  $\sigma$  – odchylenie standardowe.

ułożone niemalże w poziomie (z wyjątkiem 0+075 – 0+150 warstwy mrozoochronnej – 1,2 cm oraz 1+350 – 1+450 warstwy podbudowy pomocniczej – 1,2 cm). Biorąc pod uwagę tolerancję grubości, przekroczenia wystąpiły w czterech warstwach: w dwóch na plus (1+060 – 1+160 warstwa mrozoochronna – 1,7 cm oraz 1+350 – 1+450 warstwa podbudowy pomocniczej – 1,8 cm) oraz w dwóch na minus (0+075 – 0+150 warstwa klinująca i podbudowy – –2,1 cm i 1+550 – 1+600 warstwa podbudowy – –0,5 cm). Grubości warstwy klinującej i podbudowy zasadniczej zostały wykonane z podobnych materiałów o niewielkiej grubości, więc przedstawiono je łącznie ze względu na brak możliwości rozróżnienia.

## DYSKUSJA I PODSUMOWANIE

Nieniszcząca metoda georadarowa (GPR) jest stosowana już blisko pół wieku, wspomagając lub będąc samodzielną techniką do określania stanu i jakości dróg (Roadscanners, b.d.). Z powodzeniem jest wykorzystywana w pomiarach dróg publicznych, w ocenie spękań, nieciągłości, miejsc występowania wzmożonej wilgotności. Badania na temat układu konstrukcji i grubości warstw dróg były prowadzone przez wielu autorów z całego świata. W pracach badawczych Al-Qadi i Lahouar (2005) dowodzili, że jeżeli nawierzchnia zawiera grube warstwy, to dane GPR dają akceptowalne wyniki grubości. Z kolei gdy nawierzchnia ma co najmniej jedną cienką warstwę (kilkucentymetrową), wówczas dokładność georadaru ulega znacznemu zmniejszeniu. Zespół z Francji (Bastard i in., 2007) przedstawił model pomiaru nawierzchni zbudowanych z kilkucentymetrowych warstw, używając anten o częstotliwości centralnej 1 GHz i 2 GHz. Z kolei Liu i Sato (2014), wykonując eksperyment terenowy na nawierzchni twardej ulepszonej, oszacowali grubość warstwy z błędem 6 mm (10%), czyli prawie na tym samym poziomie, co w metodzie wierceń rdzeniowych. Oprócz pomiarów grubości, Rasol i in. (2020) w nawierzchniach betonowych określili z powodzeniem na B-skanach spękania o wymiarach 5 mm, a nawet 2 mm.

Technika GPR należy do najchętniej używanych metod nieniszczących. Służy badaniom w budownictwie komunikacyjnym, w szczególności jest wykorzystywana do penetracji ośrodka gruntowego, konstrukcji nawierzchni oraz elementów występujących

w pasie drogowym. Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowanie georadaru z powodzeniem może być stosowane w pracach odbiorczych, kontrolnych i służyć do monitoringu stanu dróg. Metoda georadarowa może być wiarygodnym źródłem danych w porównaniu z metodami wykorzystującymi punktowe odwierty i odkrywki poszczególnych warstw drogi. Za pomocą techniki georadarowej zaprezentowano obraz obiektu liniowego na całym jego profilu podłużnym. Na radargramach anomalie o wysokiej amplitudzie oraz zaniżonej lub zawyżonej prędkości propagacji fali elektromagnetycznej mogą wskazywać obszary, gdzie przebiegają procesy destrukcyjne. Takim miejscem jest wskazane na rysunku 3 prawdopodobne przerwanie i osiadanie warstw. Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że metoda GPR może być wykorzystywana z powodzeniem do kontroli dróg leśnych. Za pomocą georadaru, który w sposób ciągły prowadzi akwizycję danych oraz post-processing, z powodzeniem określa się grubość warstw konstrukcyjnych dróg leśnych o nawierzchni twardej ulepszonej i nieulepszonej. Należy jednak mieć na uwadze, że drogi leśne budowane z nawierzchni twardych nieulepszonych, np. ze skały litej czy materiałów pochodzenia antropogenicznego, mają warstwę klinującą o drobnej frakcji (0–8 mm). Taka warstwa nie jest samodzielna, w większości wypadków tworzy wypełnienie podbudowy, mieszając się z nią, co potwierdzają wyniki z tabeli 2. Ograniczeniem stosowania techniki georadarowej jest fakt posiadania prób porównawczych. Jednak dzięki informacji zawartych w dokumentacji technicznej projektu budowy jesteśmy w stanie skorelować wyniki uzyskane georadarem z wartościami projektowymi (Gocał, 2009; Ortyl, 2009).

## PIŚMIENNICTWO

- Al-Qadi, I. L., Lahouar, S. (2005). Measuring layer thicknesses with GPR – Theory to practice. *Constr. Build. Mat.*, 19(10), 763–772. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.005>
- Bastard, C. Le, Baltazart, V., Wang, Y., Saillard, J. (2007). Thin-pavement thickness estimation using GPR with high-resolution and superresolution methods. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 45(8), 2511–2519. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.900982>
- Bednarczyk, Z., Szykiewicz, A. (2015). Applied engineering geology methods for exemplar infrastructure



- projects in Malopolskie and Podkarpackie Provinces. In G. Lollino, D. Giordan, K. Thuro, C. Carranza-Torres, F. Wu, P. Marinos, C. Delgado (Eds.), *Engineering geology for society and territory* (vol. 6, pp. 203–210). Springer.
- Bednarczyk, Z., Szykiewicz, A. (2009). Ground Penetrating Radar (GPR) scanning in geological and geotechnical recognition of mountain site for Polish Oil & Gas Company. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 731–738. <https://doi.org/10.4133/1.3176762>
- Benedetto, A., Tosti, F., Bianchini Ciampoli, L., D'Amico, F. (2017). An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections. *Signal Proc.*, 132, 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.05.016>
- Czerniak, A., Grajewski, S., Kamiński, B., Miler, A. T., Okoński, B., Leciejewski, P., ..., Wojtkowski, K. (2013). Wytoczne prowadzenia robót drogowych w lasach. Bodoń: Ośrodek Rozwojowo-Wdrożeniowy Lasów Państwowych.
- Daniels, D. J. (2004). *Ground penetrating radar* (2nd ed.). The Institution of Electrical Engineers. <http://dx.doi.org/10.1049/pbra015e>
- Dzikowski, J., Szarłowicz, A., Burzyński, S., Rajsman, M., Satoła, J., Wiązowski, Z. (2006). *Drogi leśne. Poradnik techniczny*. Bodoń: Ośrodek Rozwojowo-Wdrożeniowy Lasów Państwowych.
- Gocał, J. (2009). *Geodezja inżyniersko-przemysłowa*. Cz. 2 (2nd ed.). Kraków: Uczel. Wyd. Nauk.-Dyd. AGH.
- Karczewski, J., Ortyl, Ł., Pasternak, M. (2011). *Zarys metody georadarowej* (2nd ed.). Kraków: Uczel. Wyd. Nauk.-Dyd. AGH.
- Lenngren, C. A., Bergstrom, J., Ersson, B. M. (2000). Using ground penetrating radar for assessing highway pavement thickness. *Subsurf. Sens. Technol. Appl.* II, 4129, 474–483. <https://doi.org/10.1117/12.390649>
- Liu, H., Sato, M. (2014). In situ measurement of pavement thickness and dielectric permittivity by GPR using an antenna array. *NDT E Int.*, 64, 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.03.001>
- Neal, A., Roberts, C. L. (2000). Applications of ground-penetrating radar (GPR) to sedimentological, geomorphological and geoarchaeological studies in coastal environments. In K. Pye, J. R. L. Allen (Eds.), *Coastal and estuarine environments: Sedimentology, geomorphology and geoarchaeology* (vol. 175, 1, pp. 139–171). London: Geological Society of London. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.175.01.12>
- Ortyl, Ł. (2009). Ilościowa ocena możliwości i dokładności wyznaczania grubości warstw konstrukcji nawierzchni dróg z zastosowaniem aparatury georadarowej RAMAC/GPR. *Arch. Fotogram. Kart. Teledet.*, 19, 323–339.
- Pitoňák, M., Filipovsky, J. (2016). GPR Application – non-destructive technology for verification of thicknesses of newly paved roads in Slovakia. *Proced. Eng.*, 153, 537–549. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.184>
- Rasol, M. A., Pérez-Gracia, V., Fernandes, F. M., Pais, J. C., Santos-Assunção, S., Santos, C., Sossa, V. (2020). GPR laboratory tests and numerical models to characterize cracks in cement concrete specimens, exemplifying damage in rigid pavement. *Measurement: J. Int. Measur. Conf.*, 158, 107662. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107662>
- Solla, M., Pérez-Gracia, V., Fontul, S. (2021). A review of GPR application on transport infrastructures: Troubleshooting and best practices. *Remote Sens.*, 13(4), 672. <https://doi.org/10.3390/rs13040672>
- Szykiewicz, A. (2021). Przykłady zastosowania GPR do badań na lotniskach. *Przegl. Kom.*, 76(9/10/11), 18–22.
- Szykiewicz, A. (2000). GPR monitoring of earthen flood banks/levees. *Eighth Int. Conf. Ground Penetr. Radar*, 4084, 85–90. <https://doi.org/10.1117/12.383541>
- Świt, G., Krosno, Ł. (2017). Zastosowanie metody georadarowej do oceny poprawności wykonania konstrukcji gruntowo-powłokowej. *Czas. Inż. Ładow. Środ. Arch.*, 34(64(3/1/17)), 153–164. <https://doi.org/10.7862/rb.2017.111>
- Roadscanners (b.d.). Pobrano 17 grudnia 2021 z: <https://www.roadscanners.com/>
- Wutke, M. (2018). Charakterystyka technologii georadarowej i możliwe kierunki jej doskonalenia. *Drogownictwo*, 9, 276–280.
- Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane Dz.U. 2020 r., poz. 1333, 2127, 2320; 2021 r., poz. 11, 234, 282, 784, 1986, 141 (2021). <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU19940890414/U/D19940414Lj.pdf>
- Zarządzenie nr 30 z dnia 16 czerwca 2014 r. w sprawie katalogu typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych, 102 (2014). <https://www.archiwum.gddkia.gov.pl/pl/2291/Rok-2014>
- Zarządzenie nr 31 z dnia 16 czerwca 2014 r. w sprawie katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych, 112 (2014). <https://www.archiwum.gddkia.gov.pl/pl/2291/Rok-2014>
- Zarządzenie nr 21 z dnia 17 czerwca 2019 r. w sprawie diagnostyki stanu nawierzchni i wybranych elementów korpusu drogi, 89 (2019). <https://www.archiwum.gddkia.gov.pl/pl/2982/Diagnostyka-Stanu-Nawierzchni>

## APPLICABILITY OF GROUND PENETRATING RADAR FOR CONTROL TESTS OF FOREST ROADS: A CASE STUDY FROM THE GRYFINO FOREST DISTRICT (POLAND)

### ABSTRACT

**Introduction.** In Poland the number of forest roads with paved and unpaved surfaces is increasing. According to the Building Law all roads have to be reviewed and approved for road traffic. Additionally, new methods to verify the condition and monitor quality of these roads are being searched for. Such a solution is provided by the Ground Penetrating Radar (GPR). GPR testing is a non-destructive method used in many applications, for example thickness measurement of public road surfaces. The data obtained by the ground penetrating radar may be used to establish a longitudinal profile of the entire studied section. It provides information on the road structure, layer thickness, anomalies (e.g. soil subsidence, interruption of the layered continuity, cracks). This facilitates the verification of conducted roads. Monitoring the condition and quality of roads can significantly affect savings during repairs. The aim is to study GPR applicability in estimating the thickness of forest road structural layers.

**Material and methods.** The study was conducted on experimental road sections. This road was built in the Gryfino Forest District (NW Part of Poland, South of Szczecin). Data acquisition using the GPR made it possible to create radargrams. An antenna with a central frequency of 750 MHz (MALA Ground Explorer (GX) HDR) was used for fieldwork. Longitudinal profiles of 25 meters in length were prepared. These profiles are part of test sections with upgraded and non-upgraded hard surfaces. The obtained records were post-processed in the MALA Object Mapper and the RAMAC Ground Vision software, where they were further processed.

**Results and conclusions.** Based on the measurements and obtained radargrams, it was observed that the ground penetrating radar with an antenna (central frequency of 750 MHz) can be used successfully during inspection works also for forest roads. The data processing confirms feasibility of continuous road monitoring (longitudinal profiles) to observe road structure, the thickness of structural layers and occurring anomalies.

**Keywords:** ground penetrating radar (GPR), nondestructive testing, pavement monitoring, road layer thickness