

OCENA ODDZIAŁYWANIA SYSTEMÓW KORZENIOWYCH DRZEW NA KONSTRUKCJE WYBRANYCH DRÓG LEŚNYCH PUSZCZY NOTECKIEJ BEZINWAZYJNĄ METODĄ GEORADAROWĄ

Ewa Kurowska✉, Andrzej Czerniak, Anna K. Gdula

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

ABSTRAKT

Wstęp. Drogi stanowią jeden z kluczowych elementów infrastruktury niezbędnej do prowadzenia gospodarki leśnej, a ich rola związana jest m.in. z transportem drewna, ochroną przeciwpożarową oraz udostępnianiem lasów dla turystów. Ocena stanu technicznego dróg jest czynnikiem koniecznym do podejmowania odpowiednich działań naprawczych zapewniających bezpieczeństwo użytkowania dróg. Technika georadarowa (GPR) stanowi jedno z najskuteczniejszych narzędzi umożliwiających szybkie i nieinwazyjne wykrywanie uszkodzeń nawierzchni dróg leśnych. Cel badań stanowiła analiza przydatności techniki georadarowej (GPR) w rozpoznawaniu skali uszkodzeń nawierzchni dróg leśnych powodowanych przez korzenie drzew na przykładzie Puszczy Noteckiej.

Cel badań. Badanie przydatności techniki georadarowej (GPR) w rozpoznawaniu skali uszkodzeń nawierzchni dróg leśnych powodowanych przez korzenie drzew na przykładzie Puszczy Noteckiej.

Materiał i metody. Badania przeprowadzono na terenie Puszczy Noteckiej, w nadleśnictwach: Sieraków, Karwin i Oborniki. W ramach prac terenowych założono cztery pola badawcze, na których wykonano badania dróg mogących ulegać uszkodzeniom przez systemy korzeniowe drzew. Do tego celu wykorzystano georadar (GPR) typu Ground Explorer (GX) HDR MALÅ z anteną o częstotliwości centralnej 750 MHz oraz oprogramowanie MALÅ 3D Grid Project oraz MALÅ Vision. W rezultacie profilowań georadarowych uzyskano barwne modele przestrzenne anomalii prędkości rozchodzenia się fali georadarowej pod badanymi fragmentami dróg, które następnie przeanalizowane zostały na obrazach powstałych przez wykonanie poziomych cięć czasowych dla różnych głębokości.

Wyniki. Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano modele rozprzestrzenienia systemów korzeniowych przydrożnych drzew sąsiadujących z polami badawczymi. Wykazano występowanie anomalii utożsamianych z przebiegiem systemów korzeniowych drzew oraz niewielkie anomalie mogące wskazywać obszary, gdzie przebiegają procesy destrukcyjne w konstrukcjach badanych dróg.

Wnioski. Wyniki badań pokazują możliwość wykorzystania metody GPR do badania stanu dróg leśnych w kontekście występowania uszkodzeń powodowanych przez korzenie drzew oraz wnoszą nowy wkład do metodyki słabo dotąd poznanego zagadnienia, dzięki czemu mogą przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa dróg leśnych, a także minimalizacji kosztów związanych z planowaniem prac drogowych. Na czterech polach testowych w Puszczy Noteckiej, gdzie przewidywano możliwą ekspansję systemu korzeniowego w kierunku konstrukcji drogowej, udało się wyinterpretować prawdopodobny zasięg tych systemów, które w niektórych przypadkach mogą negatywnie wpływać na stan nawierzchni.

Słowa kluczowe: drogi leśne, systemy korzeniowe drzew, georadar (GPR)

✉ ewa.kurowska@up.poznan.pl, <https://orcid.org/0000-0002-8559-0374>

WSTĘP

Drogi to jeden z elementów infrastruktury niezbędnej do prowadzenia zrównoważonej gospodarki leśnej. Są one istotne nie tylko dla transportu drewna, ale również dla zaspokajania potrzeb związanych z pozaprodukcyjnymi funkcjami lasów (Bitir i in., 2021; Grajewski, 2022). Drogi leśne ułatwiają dostęp do drzewostanów i odgrywają ważną rolę w zapobieganiu pożarom lasów (Stefanović i in., 2016; Laschi i in., 2019). Ze względu na duże znaczenie dróg w kontekście ochrony lasów bardzo ważnym aspektem jest utrzymanie ich właściwego stanu technicznego (Grajewski, 2019; Thompson i in., 2021). Nawierzchnie drogowe podlegają działaniu wielu czynników mogących negatywnie rzutować na ich jakość i obniżać przez to komfort i bezpieczeństwo poruszania się po nich pojazdów (Rasol i in., 2022). Do czynników wpływających na jakość dróg należą m.in. charakter znajdującego się pod nimi podłoża, obciążenie wynikające z ruchu pojazdów, temperatura czy też wilgotność. Analizując czynniki potencjalnie mogące negatywnie wpływać na stan dróg leśnych, a przez to na ich bezpieczeństwo, należy także brać pod uwagę możliwość nadmiernego rozwoju systemów korzeniowych rosnących w ich pobliżu drzew.

Nadmierny wzrost korzeni drzew może powodować znaczne i postępujące uszkodzenia dróg, takie jak wypiętrzanie się ich nawierzchni oraz powstawanie pęknięć/szczelin w nawierzchniach (Lantini i in., 2022). Do czynników wpływających na powstawanie uszkodzeń dróg powodowanych przez korzenie drzew korzeniowych należą: gatunek drzewa i jego system korzeniowy, wiek drzewa, odległość drzewa od drogi, miąższość/grubość gruntu (tj. struktura nawierzchni) dzieląca konstrukcję drogi od systemów korzeniowych (Randrup i in., 2001). Powstawanie zniszczeń nawierzchni drogowych przez korzenie drzew stanowi problem generujący znaczne koszty związane z podjęciem działań mających na celu zminimalizowanie tego zjawiska, np.: podcinaniem korzeni i montażem barier w celu minimalizowania uszkodzeń konstrukcji dróg, likwidacją już poniesionych szkód, budowę ochronną korzeni lub systemu korzeniowego (np. McPherson, 2000).

Technika georadarowa (GPR) jest nieinwazyjną, nieniszczącą liniową metodą geofizyczną, pozwalającą

na rejestrację i analizę odbitych fal elektromagnetycznych (EM) o wysokiej częstotliwości w mediach o różnych stałych dielektrycznych (Daniels, 2000). Metoda ta wykorzystuje antenę nadawczą emitującą do gruntu sygnał elektromagnetyczny, który częściowo odbija się na styku dwóch różnych mediów, a częściowo transmitowany jest do głębszych warstw, oraz antenę odbiorczą odbierającą odbicia fal. Użycie tej metody pozwala na szybkie pozyskiwanie danych bez niszczącej ingerencji w badane podłoże (Solla i in., 2021). Technika georadarowa znajduje szerokie zastosowanie w badaniu stanu i jakości dróg oraz umożliwia analizę układu ich konstrukcji i grubości warstw (np. Bianchini Ciampoli i in., 2019). Badania georadarowe są także przydatne w naukach leśnych, m.in. do oceny grubości warstw konstrukcyjnych dróg leśnych (Kasztelan, 2021) czy też analizy przestrzennego rozmieszczenia korzeni drzew (Potępa i in., 2018; Kurowska i in., 2021). W badaniach dotyczących korzeni drzew metoda wykorzystywana jest także do szacowania biomasy zarówno pojedynczych drzew (np. Ferrara i in., 2014; Lantini i in., 2020), jak i drzewostanów (Butnor i in., 2016).

ZAŁOŻENIA I CEL BADAŃ

Drogi leśne z racji specyfiki ich konstrukcji oraz masy poruszających się po nich pojazdów ulegają silnym uszkodzeniom, niezależnie od rodzaju zastosowanej technologii ich budowy. Uszkodzenia te występują nawet w okresie gwarancyjnym. Określenie przyczyn uszkodzeń jest bardzo istotne w relacji inwestor–wykonawca.

Na przykładzie wybranych czterech testowych pól badawczych w specyficznym kompleksie leśnym, jakim jest Puszcza Notecka, postanowiono sprawdzić możliwości użycia techniki georadarowej (GPR) do wskazania, czy uszkodzenia dróg leśnych mogły nastąpić przez korzenie drzew.

Z danych ostatniej V rewizji Planu Urządzenia Lasu wynika, że na terenie Leśnego Kompleksu Promocyjnego „Puszcza Notecka” (LKP obejmuje powierzchnię 137 tys. ha) przeważają gleby bielcowe właściwe (Blw), których jest 48,9%; gleby rdzawe bielcowe (RDb) – 24,8% i gleby rdzawe właściwe (RDw) – 11,7%. Gleby te wytworzone są na piaskach, często wydmych. Założono, że na tak ubogich

siedliskach ekspansja korzeni pod drogami może mieć znaczący wpływ na stan konstrukcji drogowych.

Zakres badań obejmował analizę danych GPR w systemie 3D, pozyskanych z przykładowych fragmentów dróg o nawierzchniach typowych dla Puszczy. Miała ona umożliwić rozpoznanie problemów uszkodzeń dróg i sprawdzenie, czy są one powodowane przez korzenie drzew, czy mają inną przyczynę. Badania te mogą przyczynić się do skuteczniejszej ochrony dróg i poprawy ich bezpieczeństwa komunikacyjnego i pożarowego.

Przyjęto następujące hipotezy badawcze:

- specyficzne warunki glebowe i wodne w Puszczy Noteckiej sprzyjają ekspansji korzeni drzew przydrożnych pod konstrukcją nawierzchni
- metoda georadarowa (GPR) wspomaga identyfikację uszkodzeń nawierzchni oraz ich przyczyny, w szczególności uszkodzeń wynikających z penetracji konstrukcji przez korzenie drzew przydrożnych.

REJON BADAŃ

Puszcza Notecka położona jest w obrębie dwóch makroregionów: Pradoliny Toruńsko-Eberswaldzkiej i Pojezierza Wielkopolskiego (Kondracki, 1998), a jej granice wyznaczają dwie duże rzeki: Warta (na południu) i Noteć (na północy). Obszar Puszczy Noteckiej charakteryzuje się przewagą siedlisk ubogich, a dominującym typem gleb są tu gleby bielcowe, zajmujące około 90% powierzchni Puszczy. Efektem takiego układu siedliskowego jest dominacja sosny zwyczajnej, której udział jako gatunku panującego wynosi 92,8% powierzchni. Powyżej 1% składu zajmuje brzoza (1,9%), olsza (1,7%) i dąb bezszypułkowy (1,5%). Pod względem powierzchni najczęstsze są drzewostany w wieku 71–90 lat (IVb i Va kl w), które łącznie zajmują aż 38,5% ogółu drzewostanów, co jest efektem gradacji strzygoni choinówki z lat 20. XX wieku.

Problemy związane z gospodarką leśną na terenie Puszczy to m.in. niedobory wody – szacuje się, że na około 48 tys. ha suchych siedlisk na tym obszarze wymagane jest prowadzenie działań z zakresu małej retencji wodnej. Jednym ze skutków niesprzyjających warunków wodnych, a także innych czynników, m.in. długiej suszy, był katastrofalny pożar w Nadleśnictwie Proszowice, który miał miejsce w dniach

10–11 sierpnia 1992 roku. Spaliło się wówczas około 6 tys. ha lasów (Kusiak i Dymek-Kusiak, 2002). Warto zauważyć, że jednym z ważnych elementów niezbędnych do prowadzenia skutecznej ochrony przeciwpożarowej jest sieć drogowa i jej odpowiedni stan techniczny, który w kontekście Puszczy Noteckiej, dotkniętej wcześniej katastrofalnym pożarem, jest szczególnie istotny.

BADANIA GEORADAROWE (GPR)

Prace terenowe przeprowadzono na czterech testowych polach badawczych (stanowiskach), zlokalizowanych na drogach w lasach nadleśnictw: Sieraków, Karwin i Oborniki (rys. 1).

Sieraków – stanowisko nr 1 (6,0 m × 8,0 m) stanowi fragment drogi o jezdni mineralno-bitumicznej (asfaltowej), usytuowany w odległości około 2–3 km na NW od Sierakowa, między jeziorami Borowy Młyn oraz Lichwińskim. Teren jest równy, powierzchnia terenu na wysokości około 53 m n.p.m. Pierwszy poziom wód gruntowych znajduje się prawdopodobnie na wysokości około 37 m n.p.m.

Karwin, rejon Gajewic – stanowisko nr 2 (7,20 m × 5,20 m) – wytyczono na drodze o nawierzchni z tłuczni utwardzonego. Teren jest równy, występujący na zachód od rz. Człapia. Powierzchnia terenu na wysokości około 49 m n.p.m. Pierwszy poziom wód gruntowych występuje prawdopodobnie na wysokości około 45 m n.p.m.

Karwin-Rapin – stanowisko nr 3 (6,60 m × 5,40 m) obejmuje fragment drogi o nawierzchni mineralno-bitumicznej (asfaltowej). Teren jest równy, położony na wysokości około 53 m n.p.m., w obniżeniu między jeziorami Rapino oraz Lubowo. Pierwszy poziom wód gruntowych znajduje się na wysokości około 40 m n.p.m.

Oborniki – stanowisko nr 4 (5,80 m × 7,60 m) – usytuowano na fragmencie nowej drogi o nawierzchni asfaltowej, położonej na NW od Obornik. Teren jest równy, położony na wysokości około 61 m n.p.m. Pierwszy poziom wód gruntowych znajduje się prawdopodobnie na wysokości około 58 m n.p.m.

W pracach terenowych wykorzystano metodę mapowania systemu korzeniowego drzew przy pomocy anteny ekranowanej 750 MHz – Ground Explorer (GX) HDR firmy MALÅ.



Rys. 1. Lokalizacja testowych pól badawczych/stanowisk, gdzie przeprowadzono georadarowe badania potencjalnego wpływu systemów korzeniowych drzew przydrożnych na konstrukcję dróg: 1 – dąb przy drodze leśnej w Nadl. Sieraków, 2 – sosny przy drodze leśnej w Nadl. Karwin (w okolicy Gajewic), 3 – sosny przy drodze leśnej/gminnej w Nadl. Karwin, w Rąpinie, 4 – sosny przy drodze Oborniki – Słonawy, Nadl. Oborniki.

Źródło: <https://www.bdl.lasy.gov.pl/portal/mapy>.

Fig. 1. Location of the research fields where GPR studies of the potential impact of roadside tree root systems on road construction were carried out: 1 – oak by the forest road in Sieraków Forest District, 2 – pines by the forest road in Karwin Forest District (near Gajewice), 3 – pines by the forest/municipal road in Karwin Forest District, in Rąpin, 4 – pines by the road Oborniki – Słonawy, Oborniki Forest District.

Source: <https://www.bdl.lasy.gov.pl/portal/mapy>.

W nawiązaniu do metodyki opisanej w innych pracach o podobnej tematyce (np. Tosti i in., 2018; Lantini i in., 2020), na wszystkich stanowiskach wyznaczono punkty kontrolne oraz linie bazowe wytyczające obszary pól badawczych. Drzewa, których systemy korzeniowe mogły potencjalnie mieć wpływ na nawierzchnie dróg, sąsiadowały z liniami bazowymi pól badawczych. Linie bazowe Y były równoległe do osi drogi, a linie bazowe X – prostopadłe do osi drogi. Linie siatki przekrojów GPR prowadzone były w odstępach co 0,20 m. Dla stanowiska nr 1 wykonano 72 linie przekrojowe GPR; dla stanowiska nr 2 wykonano 62 linie przekrojowe GPR; dla stanowiska nr 3 wykonano 64 linie przekrojowe GPR; dla stanowiska nr 4 wykonano 69 linii przekrojowych GPR (rys. 2–5). Akwizycję danych georadarowych przeprowadzono z interwałem punktowym równym $i = 0,02$ m (impuls wysłany do gruntu).

Na stanowisku nr 1 drzewem, którego system korzeniowy badano, był dąb szypułkowy *Quercus robur* L. Na pozostałych polach badawczych badano systemy korzeniowe sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. (rozmieszczenie drzew przy polach badawczych pokazano na rys. 2–5). Dane zebrane w terenie przetworzono oprogramowaniem MALÅ 3D Grid Project i MALÅ

Vision, w wyniku czego uzyskano efekt obrazowania 3D anomalii prędkości fali, co z kolei posłużyło do wyinterpretowania rozprzestrzenienia systemów korzeniowych badanych drzew. Na podstawie zebranych danych uzyskano modele rozprzestrzenienia systemów korzeniowych badanych drzew, wyinterpretowanych na podstawie obrazów anomalii GPR prezentowanych w systemie barw, w którym tło (grunt, przez który przebiegają fale radarowe) jest w odcieniach zieleni i niebieskiego, natomiast utożsamiane z systemami korzeniowymi obiekty zakłócające przebieg fali mają kolory żółty, pomarańczowy i czerwony.

Na uzyskanych obrazach poziomych cięć czasowych z automatyczną estymacją głębokości obserwowano w niektórych miejscach ciągi anomalii przebiegających poprzecznie lub skośnie względem elementów rozpatrywanych dróg. Jeśli taki ciąg lub strefę anomalii można było przestrzennie powiązać z miejscem lokalizacji pnia drzewa, interpretowano taką anomalię jako prawdopodobny korzeń drzewa. W wygenerowanych obrazach obserwuje się również bardzo wiele różnokształtnych anomalii, które nie są związane z systemami korzeniowymi, ale innymi czynnikami zaburzającymi przebieg impulsów

wysyłanych przez antenę georadaru. Do powstawania anomalii tego typu przyczyniają się m.in. zróżnicowanie rodzaju ośrodka gruntowego, np. konstrukcji drogi, zróżnicowana wilgotność, występowanie materiału organicznego w płytkich strefach podpowierzchniowych, w przypadku nawierzchni utwardzonej – jej rodzaj, materiał, uszkodzenia (spękania), pozostałości wcześniejszych, starszych konstrukcji i elementów drogi. Trudność w interpretacji obrazu i stwierdzeniu występowania korzeni najczęściej wynika z występowania tego typu anomalii.

Ostateczne wyniki filtracji danych zostały wygenerowane w postaci map cięć czasowych dla wybranych głębokości. Na rysunkach 2–5 pokazano przykłady obrazów cięć czasowych i zaznaczono na nich anomalie interpretowane jako systemy korzeniowe badanych drzew lub inne czynniki zaburzające przebieg fal elektromagnetycznych.

WYNIKI BADAŃ

Stanowisko nr 1 (Sieraków)

Analizę anomalii GPR na stanowisku nr 1 (rys. 2a) wykonano na obrazach powstałych z 84 poziomych cięć czasowych (wykonanych co 5 cm) dla głębokości 0,049–2,50 m. Przykładowe poziome cięcia czasowe dla głębokości 0,58 m i 0,53 m pokazano na rysunku 2b i 2c. Można na nich dostrzec anomalie systemów korzeniowych o kierunkach zbliżonych do prostopadłych w stosunku do osi jezdni. Jeżeli jednak są to odbicia od systemów korzeniowych, korzenie niewątpliwie znajdują się głęboko pod konstrukcją jezdni. Porównanie wykrytych systemów korzeniowych (rys. 2c) z obrazem widocznych na powierzchni szczelin w jezdni asfaltowej pola badawczego 1 nie wykazuje zbieżności.

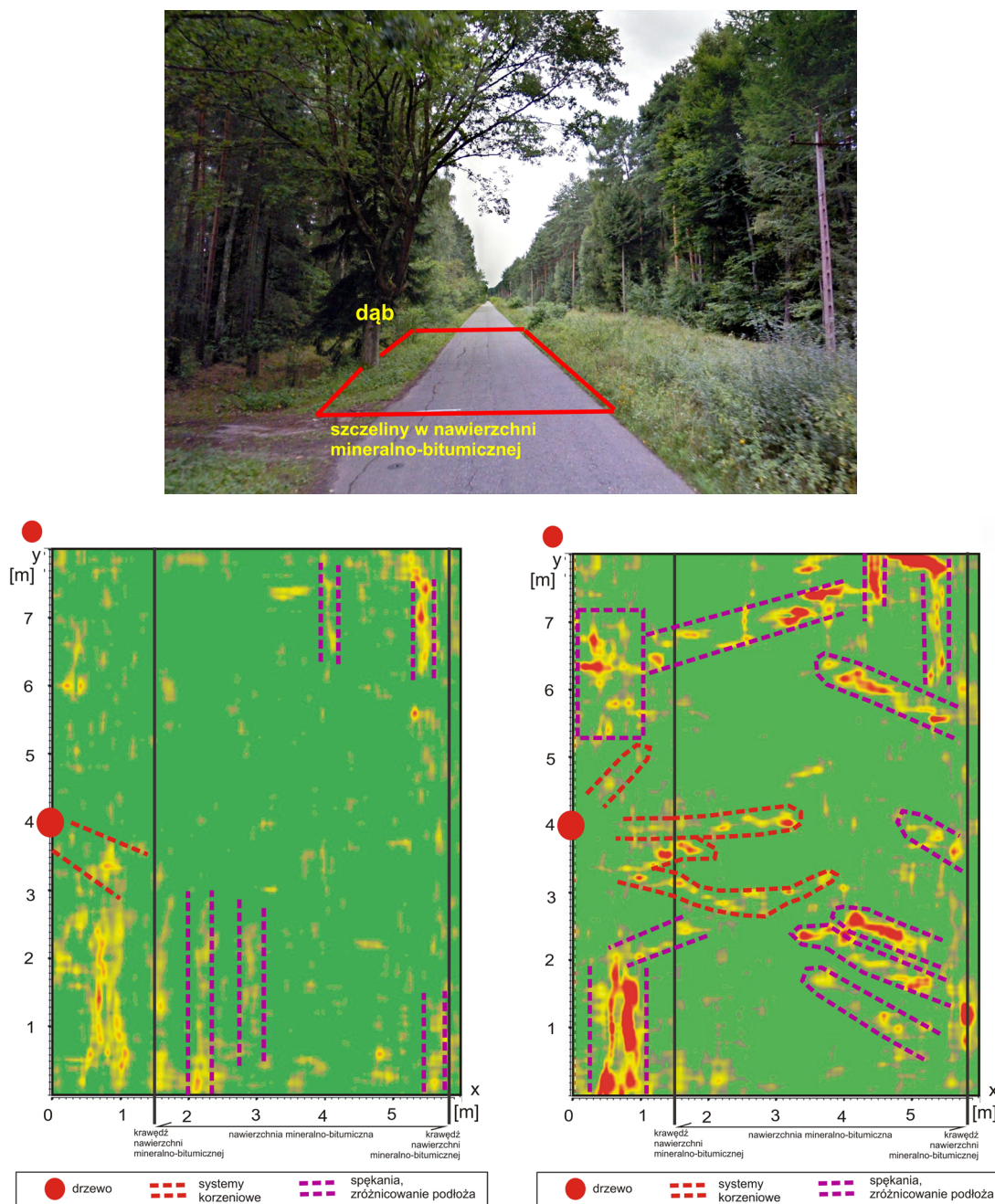
Szczeliny w nawierzchni są równoległe do osi jezdni, natomiast wykryte systemy korzeniowe – prostopadłe do osi jezdni. Stąd wniosek, że systemy korzeniowe nie mają wpływu na kondycję jezdni, a szczeliny związane są raczej z poziomem zużycia drogi. Niektóre anomalie oznaczone przerywaną linią w kolorze fioletowym należy wiązać prawdopodobnie ze stanem podbudowy drogi lub warunkami gruntowymi podłoża, gdyż nie wykazują przestrzennego związku z usytuowaniem przydrożnego dębu.

Stanowisko nr 2 (Nadleśnictwo Karwin, rejon Gajewic)

Analizę anomalii GPR na stanowisku 2 wykonano na obrazach uzyskanych z 95 poziomych cięć czasowych (wykonanych co 2 cm), dla głębokości 0,05–1,85 m. Najciekawsze poziome cięcia czasowe dla głębokości 0,38 m i 0,76 pokazano na rysunku 2a i 2b. Widoczne są korzenie biegnące prostopadłe do osi drogi, jednak prawdopodobnie znajdują się one pod konstrukcją jezdni. Poniżej anomalie spowodowane rozprzestrzenieniem systemów korzeniowych już właściwie nie występują. Z analizy wynika, że wykryte płytkie systemy korzeniowe (do głębokości 0,5 m) mogą mieć wpływ na kondycję jezdni drogi w przyszłości.

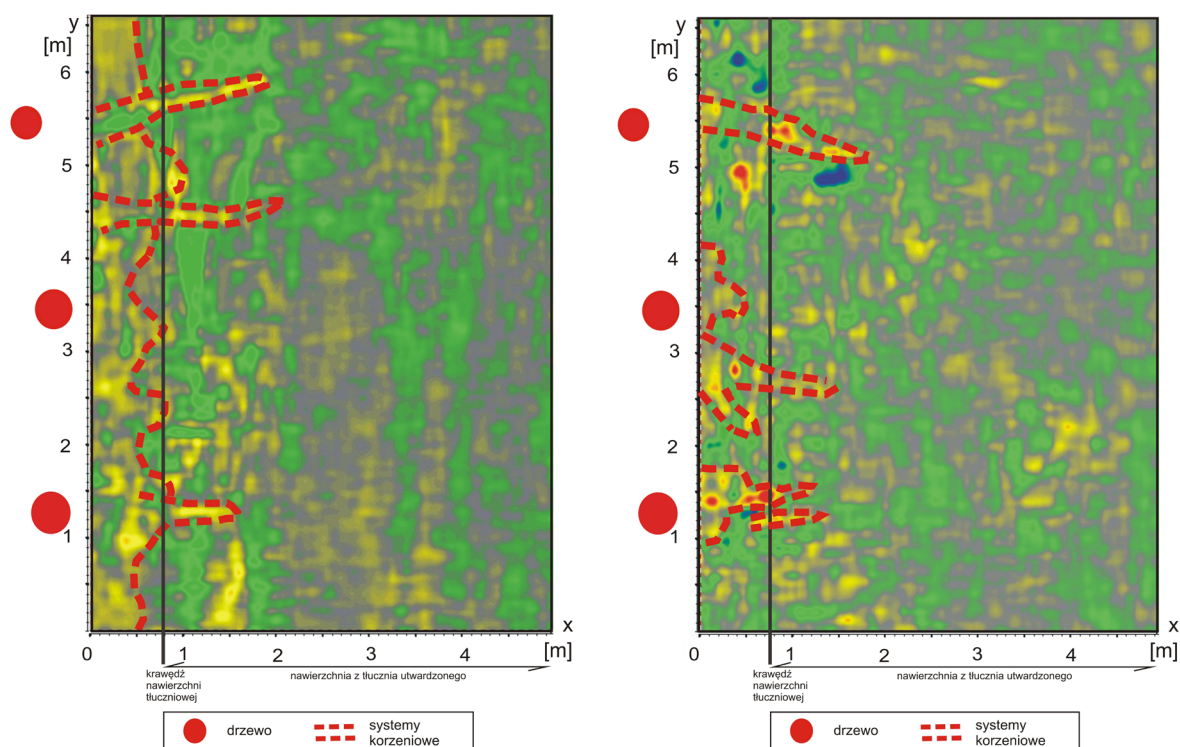
Stanowisko nr 3 (Nadleśnictwo Karwin, rejon Rapina)

Analizę anomalii GPR na stanowisku 3 (rys. 4a) wykonano na obrazach ze 136 poziomych cięć czasowych (wykonanych co 1 cm) dla głębokości: 0,05–1,996 m. Przykładowe poziome cięcia czasowe dla głębokości 0,125 m przedstawiono na rysunku 4b. Widać na nim korzenie wzrastające w kierunku drogi, ale w większości niewchodzące pod nią (z jednym wyjątkiem). Przymuszczać należy, że zostały wycięte podczas budowy drogi. Przykładowe cięcia czasowe dla głębokości 0,52 m zaprezentowano na rysunku 4b. Widoczna jest anomalia powiązana z systemem korzeniowym pod jezdnią. W obu przypadkach korzenie mogą one mieć wpływ na kondycję nawierzchni drogi. Porównanie wykrytych systemów korzeniowych (rys. 4b i 4c) z obrazem deformacji w nawierzchni jezdni asfaltowej pola badawczego 3 (rys. 4a) wykazuje pewne zbieżności. Prawdopodobnie płytko położone systemy korzeniowe wpływają na kondycję nawierzchni jezdni, ale zależność może wynikać także ze struktury i stanu jej podłoża. Widoczne na powierzchni drogi deformacje starej nawierzchni asfaltowej były usytuowane poprzecznie oraz lekko skośnie do osi drogi, toteż można domniemywać, że zostały spowodowane przez rozrastające się od przydrożnej sosny korzenie. W nawierzchni znajdowały się także podłużne strefy spękań. Charakter anomalii obserwowanych na obrazach cięć czasowych sugeruje występowanie problemów również w innych miejscach, w obrębie warstw konstrukcyjnych drogi, co może być związane ze zróżnicowaniem ośrodka gruntowego.



Rys. 2. Stanowisko nr 1 (Sieraków): a) widok na przydrożny dąb przy drodze w Nadl. Sieraków oraz szczeliny w jezdni o nawierzchni mineralno-bitumicznej w rejonie pola badawczego; b) anomalie GPR na przykładowym poziomym cięciu czasowym dla głębokości 0,58 m; c) anomalie GPR na przykładowym poziomym cięciu czasowym dla głębokości 0,73 m
Źródło: opracowanie własne.

Fig. 2. Research field No. 1 (Sieraków): a) view of the roadside oak by the road in Sieraków Forest District and cracks in the roadway with an mineral-bituminous surface in the area of the research field; b) GPR anomalies on an exemplary horizontal time cut for a depth of 0.58 m; c) GPR anomalies on an exemplary horizontal time cut for a depth of 0.73 m
Source: own elaboration.



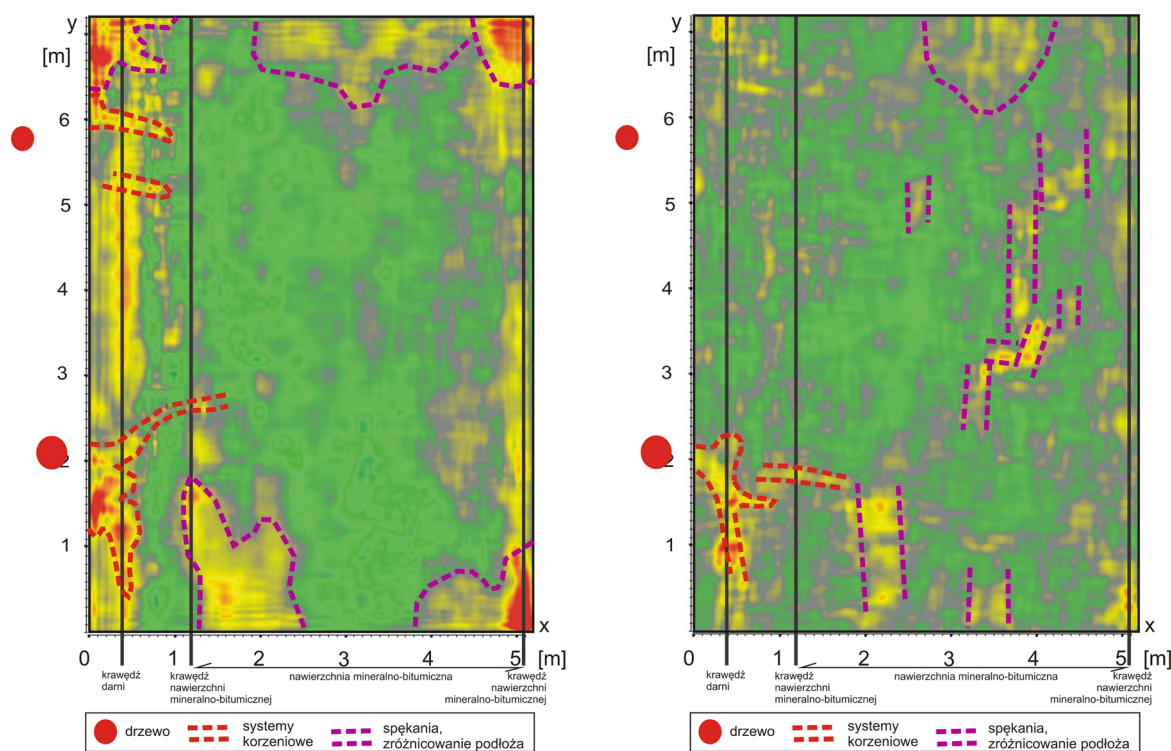
Rys. 3. Stanowisko nr 2 (Nadl. Karwin, okolice Gajewic): a) anomalie GPR na przykładowym poziomym cięciu czasowym dla głębokości 0,38 m; b) anomalie GPR na przykładowym poziomym cięciu czasowym dla głębokości 0,76 m
Źródło: opracowanie własne.

Fig. 3. Research field No. 2 (Karwin Forest District, near Gajewice): a) GPR anomalies on an exemplary horizontal time cut for a depth of 0.38 m; b) GPR anomalies on an exemplary horizontal time cut for a depth of 0.76 m
Source: own elaboration.

Stanowisko nr 4 (Oborniki)

Analizę anomalii GPR na stanowisku 4 (rys. 5a) wykonano na obrazach z 92 poziomych cięć czasowych (wykonanych co 2–5 cm) dla głębokości 0,06–2,50 m. Przykładowe poziome cięcie czasowe dla głębokości 0,7 m pokazuje korzenie przy krawędzi drogi rozrastające się w kierunku osi drogi (rys. 5b). Widoczne są również anomalie pod nawierzchnią w innych rejonach pola badawczego 4, które można wiązać ze zróżnicowaniem podłoża lub materiału konstrukcyjnego drogi. Przyczyną zaburzeń obserwowanych na różnych głębokościach mogą być także pozostałości systemów korzeniowych wyciętych dawniej drzew. Droga jest nowa, ale w przyszłości systemy korzeniowe drzew rosnących przy drodze mogą mieć wpływ na

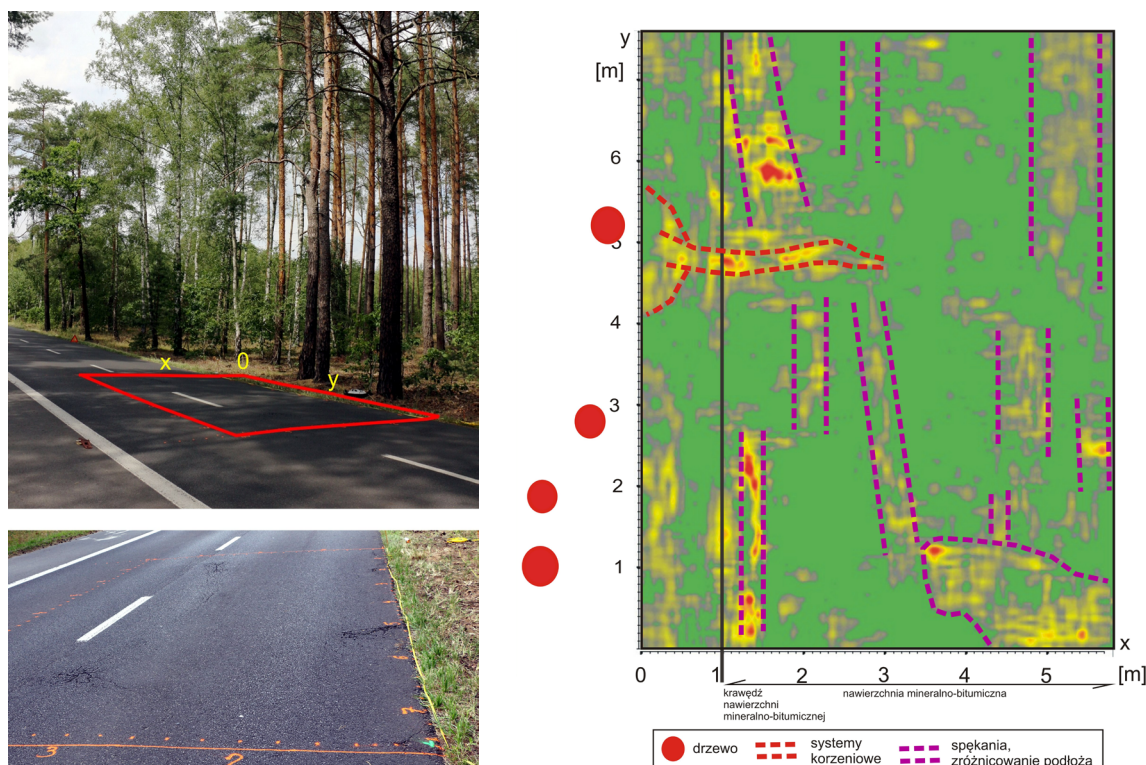
jej kondycję. W obrazach rozkładu anomalii uzyskanych z przetworzenia danych georadarowych bardzo wyraźnie zarysowują się anomalie w strefie granicznej nawierzchni, wyraźne jest także zaburzenie obrazu w obrębie deformacji nawierzchni w sąsiedztwie strefy krawędziowej, pokazanej na zdjęciu na rysunkach 5a i 5b. Wyodrębniony zarys strefy korzeniowej przydrożnej sosny nie pokrywa się jednoznacznie ze strefą uszkodzenia asfaltu, ale z nią sąsiaduje. Na stanowisku 4, w obrębie pobocza, w interwale głębokości 0,12–0,22 m zaobserwowano słabo zarysowujące się anomalie, które można wiązać ze strefami korzeniowymi. Natomiast silne anomalie dotyczące deformacji nawierzchni są obserwowane na większych głębokościach w interwale 0,4–0,8 m.



Rys. 4. Stanowisko nr 3 (Karwin-Rąpin): a) widok na przydrożne sosny przy drodze oraz prostopadłe do osi jezdni deformacje nawierzchni mineralno-bitumicznej w rejonie pola badawczego; b) anomalie GPR na przykładowym poziomym cięciu czasowym dla głębokości 0,125 m; c) anomalie GPR na przykładowym poziomym cięciu czasowym dla głębokości 0,52 m
Źródło: opracowanie własne.

Fig. 4. Research field No. 3 (Karwin-Rąpin): a) view of roadside pines by the road and deformations of the asphalt surface perpendicular to the road axis in the area of the research field; b) GPR anomalies on an exemplary horizontal time cut for a depth of 0.125 m; c) GPR anomalies on an exemplary horizontal time cut for a depth of 0.52 m

Source: own elaboration.



Rys. 5. Pole badawcze nr 4 (Nadleśnictwo Oborniki): a) widok na przydrożne sosny oraz nową nawierzchnię asfaltową z uszkodzeniami w rejonie pola badawczego; b) anomalie GPR na przykładowym poziomym cięciu czasowym dla głębokości 0,7 m

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 5. Research field No. 4 (Oborniki Forest District): a) view of the roadside pine trees and the new asphalt surface with some defects in the area of the research field; b) GPR anomalies on an exemplary horizontal time cut for a depth of 0.7 m

Source: own elaboration.

WNIOSKI

W przypadku **stanowiska 1 (Sieraków)** szczeliny w nawierzchni są równoległe do osi jezdni, natomiast wykryte systemy korzeniowe – prostopadłe do osi jezdni. Stąd wniosek, że systemy korzeniowe nie mają wpływu na kondycję drogi, a szczeliny związane są z długotrwałym użytkowaniem i budową podłoża nawierzchni jezdni.

Jeśli chodzi o **stanowisko 2 (Karwin, rejon Gajewic)**, z analizy wynika, że wykryte płytko systemy korzeniowe (do głębokości 0,5 m) mogą mieć w przeszłości wpływ na kondycję drogi, natomiast obecnie nie obserwuje się żadnych deformacji.

Porównanie występowania wykrytych na **stanowisku 3 (Karwin-Rapin)** systemów korzeniowych z obrazem muld w nawierzchni jezdni asfaltowej wykazuje niezbyt wyraźne zbieżności. Prawdopodobnie płytko położone systemy korzeniowe wpływają na kondycję nawierzchni jezdni, przyczyniając się jednocześnie do uruchamiania procesu przemieszczania się materiału mineralnego w podłożu, przy współdziałaniu wody, zwłaszcza w strefie krawędziowej nawierzchni (sufozja). W konsekwencji następuje deformowanie nawierzchni pod ciężarem pojazdów użytkujących drogę.

W obrębie **stanowiska 4 (Oborniki)** nawierzchnia drogowa jest stosunkowo nowa. W płytszych strefach

pobocza i jezdni trudno jednoznacznie wyodrębnić zarysy systemów korzeniowych przydrożnych sosen, które mogłyby mieć ewentualnie wpływ na stan konstrukcji. Być może podczas budowy drogi te płytkie systemy korzeniowe pod budowaną drogą zostały wycięte. Poniżej 0,65 m widoczne są wyraźne strefy anomalii, które częściowo mogą być związane z głębszym korzeniem sosny.

Prezentowane w niniejszej pracy badania pozwoliły na wskazanie anomalii GPR systemów korzeniowych drzew rosnących w bezpośrednim sąsiedztwie badanych dróg. Na uzyskanych obrazach zaobserwowano anomalie mogące wskazywać obszary, na których przebiegają procesy destrukcyjne badanych dróg. Wyniki te potwierdzają hipotezę zakładającą, iż metoda georadarowa (GPR) umożliwia identyfikację uszkodzeń konstrukcji dróg, w tym uszkodzeń wynikających z penetracji przez korzenie drzew przydrożnych pod konstrukcje dróg.

Uzyskane wyniki dostarczają danych dotyczących słabo dotąd poznanego wątku wykorzystania metody GPR do badania stanu dróg leśnych w kontekście występowania uszkodzeń powodowanych przez korzenie drzew. Na czterech polach testowych w Puszczy Noteckiej, gdzie przewidywano możliwą ekspansję systemu korzeniowego w kierunku konstrukcji drogowej, udało się wyinterpretować prawdopodobny zasięg tych systemów korzeniowych, jednak nie wszędzie potwierdzono ich negatywny wpływ na stan nawierzchni. Przedstawiona praca wnosi także wkład metodyczny do dalszych badań, mogących przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa i trwałości dróg leśnych, a także podejmowania działań związanych z planowaniem prac drogowych i mających na celu minimalizację związanych z nimi kosztów.

PIŚMIENNICTWO

Bank danych o lasach (b.d.). Pobrano 6.10.2022 z: <https://www.bdl.lasy.gov.pl/portal/mapy>

Bianchini Ciampoli, L., Tosti, F., Economou, N., Benedetto, F. (2019). Signal processing of GPR data for road surveys. *Geosci.*, 9(2), 96.

Bitir, I., Musat, E. C., Lunguleasa, A., Ciobanu, V. D. (2021). Monitoring the Transport on the Ciobănuș Forest Road within the Bacău Forestry Department. *Recent*, 1(63), 10–16.

Butnor, J. R., Samuelson, L. J., Stokes, T. A., Johnsen, K. H., Anderson, P. H., González-Benecke, C. A. (2016). Surface-based GPR underestimates below-stump root biomass. *Plant and Soil*, 402(1), 47–62.

Daniels, J. J. (2000). Ground penetrating radar for imaging archeological objects. In: *Proceedings of the New Millennium International Forum on Conservation of Cultural Property*, December 5–8, 2000 (s. 247–265). Kongju National University, Korea: Institute of Conservation Science for Cultural Property.

Ferrara, C., Barone, P. M., Salvati, L., Pettinelli, E. (2014). Ground Penetrating Radar as remote sensing technique to investigate the root system architecture. *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 12(3), 695–702.

Grajewski, S. M. (2019). Funkcjonalność leśnych dojazdów pożarowych względem wymogów współczesnych pojazdów ratowniczo-gaśniczych oraz aktualnie stosowanych taktyk i technologii gaszenia pożarów. *Rozprawy Naukowe*. Poznań: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu.

Grajewski, S. M. (2022). Forest road engineering in Poland: current status and development perspectives. *Sylvan*, 166(2), 123–140.

Kasztelan, A. (2021). Przydatność techniki georadarowej do badań kontrolnych dróg leśnych na przykładzie odcinków eksperymentalnych w nadleśnictwie Gryfino. *Acta Sci. Pol. Silv. Colendar. Ratio Ind. Lignar.*, 20(4) 2021, 243–252.

Kondracki, J. (1998). *Geografia regionalna Polski*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

Kurowska, E. E., Kasztelan, A., Czerniak, A. (2021). Test skuteczności badań systemów korzeniowych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) i sosny żółtej (*Pinus ponderosa*) georadarem wyposażonym w antenę 750 MHz. *Acta Sci. Pol. Silv. Colendar. Ratio Ind. Lignar.*, 20(4) 2021, 199–206.

Kusiak, W., Dymek-Kusiak, A. (2002). *Puszcza Notecka*. Monografia przyrodniczo-gospodarcza. Poznań: Wydawnictwo Przegląd Leśniczy.

Lantini, L., Giannakis, I., Tosti, F., Mortimer, D., Alani, A. M. (2020). A reflectivity-based gpr signal processing methodology for mapping tree root systems of street trees. In: *2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP) July 7–9, 2020* (s. 449–452). Milan, Italy: IEEE.

Lantini, L., Trevisani, S., Gagliardi, V., Tosti, F., Alani, A. (2022). An investigation into road trees' root systems through geostatistical analysis of GPR data. *EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022*, EGU22-6168. Vienna, Austria: EGU. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-6168>

- Laschi, A., Foderi, C., Fabiano, F., Neri, F., Cambi, M., Mariotti, B., Marchi, E. (2019). Forest road planning, construction and maintenance to improve forest fire fighting: a review. *Croat. J. For. Eng.*, 40(1), 207–219.
- McPherson, E. G. (2000). Expenditures associated with conflicts between street tree root growth and hardscape in California. *Journal of Arboriculture*, 26(6), 289–297.
- Potępa, B., Szykiewicz, A., Udyrysz-Kraweć, M. (2018). GPR survey for fir (*Abies alba*) and spruce (*Picea abies*) root systems in different locations in the Western Carpathians Mts. *J. Geol. Res. Eng.*, 6, 5, 194–209.
- Randrup, T. B., McPherson, E. G., Costello, L. R. (2001). A review of tree root conflicts with sidewalks, curbs, and roads. *Urban Ecosystems*, 5(3), 209–225.
- Rasol, M., Pais, J. C., Pérez-Gracia, V., Solla, M., Fernandes, F. M., Fontul, S., ..., Assadollahi, H. (2022). GPR monitoring for road transport infrastructure: A systematic review and machine learning insights. *Construction and Building Materials*, 324, 126686.
- Solla, M., Pérez-Gracia, V., Fontul, S. (2021). A review of GPR application on transport infrastructures: Troubleshooting and best practices. *Remote Sensing*, 13(4), 672.
- Stefanović, B., Stojnić, D., Danilović, M. (2016). Multi-criteria forest road network planning in fire-prone environment: a case study in Serbia. *J. Environ. Plan. Manag.*, 59(5), 911–926. DOI:10.1080/09640568.2015.1045971
- Thompson, M. P., Gannon, B. M., Caggiano, M. D. (2021). Forest roads and operational wildfire response planning. *Forests*, 12(2), 110.
- Tosti, F., Bianchini Ciampoli, L., Brancadoro, M. G., Alani, A. (2018). GPR applications in mapping the subsurface root system of street trees with road safety-critical implications. *Adv. Transport. Stud.*, 44, 107–118. DOI:10.4399/97888255143468
- Ustawa z dnia 28 września 1991 r. o lasach (1991). *Dz. U.* 1991 nr 101 poz. 444 z późn. zm.
- Wagar, J. A., Barker, P. A. (1983). Tree root damage to sidewalk and curbs. *J. Arboric.*, 9, 177–181.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF TREE ROOT SYSTEMS ON THE STRUCTURES OF SELECTED FOREST ROADS IN THE NOTEĆ FOREST USING THE NON-DESTRUCTIVE GPR METHOD

ABSTRACT

Introduction. Roads are one of the key elements of the infrastructure necessary for forest management, and their role is related to, inter alia, with the transport of wood, fire protection and the provision of forests for tourists. The assessment of the technical condition of roads is a necessary factor for taking appropriate remedial actions to ensure the safety of road use. The GPR technique is one of the most effective tools for quick and non-invasive detection of damage to forest road surfaces. The aim of the research was to analyze the usefulness of the GPR technique in recognizing the scale of damage to the surface of forest roads caused by tree roots on the example of the Noteć River Forest Area.

Material and methods. The research was carried out in the Noteć River Forest Area. As part of the field work, four plots were established where roads that could be damaged by tree root systems were examined. For this purpose, a Ground Explorer (GX) HDR MALÅ georadar (GPR) with an antenna with a central frequency of 750 MHz and 3D Vision software were used. The research was carried out assuming research plots with the same density of the profiling network, every 0,20 m. As part of the research, colorful spatial models of root distribution were obtained, which were then analyzed on the images created by making horizontal time cuts for different depths.

Results. On the basis of the conducted research, models of the spreading of the root systems of roadside trees were obtained with the occurrence of anomalies identified with the course of tree root systems which may indicate areas where destructive processes of the examined roads take place.

Conclusions. The results of the research show the possibility of using the GPR method to study the condition of forest roads in the context of the occurrence of damage caused by tree roots and make a new contribution to the methodology of the so far poorly known problem, thanks to which they can contribute to improving the safety of forest roads, as well as minimizing the costs associated with planning road works.

Keywords: forest roads, tree root systems, GPR technique

