

DIAGNOZOWANIE KONDYCJI DRZEW Z WYKORZYSTANIEM TOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ

Wojciech Durlak, Margot Dudkiewicz, Krystyna Pudelska,
Marek Dąbski

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Streszczenie. Zmiany struktury wewnętrznej pnia u drzew stojących, np. zgnilizny czy pustki, często nie są możliwe do rozpoznania wizualnego. Tomografia komputerowa oferuje bardzo dobre wsparcie diagnostyczne w ocenie stanu zdrowotnego drzew. Od niedawna dostępne są nowatorskie metody badań, do których należą: tomografia elektryczna, tomografia akustyczna oraz mapowanie systemów korzeniowych drzew za pomocą systemu GPR. Precyzyjne urządzenia pomiarowe stosowane w tych metodach, szczególnie ze względu na swój bezinwazyjny charakter, sprawdzają się doskonale w praktyce. Wyniki diagnoz są przedstawiane na bieżąco, co sprawia, że już w terenie możemy dokonać wstępnej oceny stanu zdrowotnego drzewa.

Słowa kluczowe: nieinwazyjne metody oceny kondycji drzew, tomograf PiCUS Sonic, PiCUS Treetric, mapowanie systemów korzeniowych, Ground Penetrating Radar (GPR)

WSTĘP

Podstawą opracowania skutecznego programu pielęgnacji drzew powinny być pomiary inwentaryzacyjne i diagnostyczne prowadzone za pomocą nowoczesnych urządzeń. Z punktu widzenia ochrony, konserwacji i pielęgnacji drzew, najbardziej odpowiednimi metodami diagnozowania ich stanu zdrowotnego są te, które w najmniejszym stopniu ingerują w tkanki. Każda rana jest bowiem miejscem potencjalnej infekcji grzybowej, prowadzącej do rozkładu drewna i w efekcie narażającej pień lub konary na złamanie. Ważnym czynnikiem jest również dokładność przeprowadzonych badań, które pozwolą z kolei na postawienie właściwej diagnozy i wydanie odpowiednich zaleceń co do pielęgnacji dendroflory.

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr Wojciech Durlak, Katedra Roślin Ozdobnych i Architektury Krajobrazu, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, ul. Głęboka 28, 20-912 Lublin; e-mail: wdurlak@autograf.pl.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2017

Dotychczas do badań oceny stanu zdrowotnego drzew używano technik inwazyjnych. Stosowane wcześniej narzędzia tj.: penetrometry, mierniki, świdry czy elektryczne sensory, wymagające do pomiarów wierceń są nadal wykorzystywane, chociaż już w mniejszym stopniu. Niewątpliwie na spadek popularności tych metod duży wpływ miał fakt, że po badaniach pozostawały rany, często osłabiające siły vitalne drzewa.

Obecnie diagnostyka dendrologiczna oferuje nowe, bezinwazyjne metody oceny kondycji drzew działających w sposób bezinstrumentalny, jak i z wykorzystaniem precyzyjnych i zaawansowanych technicznie urządzeń. Jedną z nich jest metoda wizualna – VTA (Visual Tree Assessment), działająca w oparciu o ocenę wzrokową eksperta, który definiuje na jej podstawie stan badanego drzewa [Baridon i Suchocka 2009, Suchocka 2012]. Diagnoza ta nie jest jednak na tyle precyzyjna, by przewidzieć wszystkie sytuacje, dlatego też wymaga dodatkowo w niektórych przypadkach posiłkowania się innymi metodami. Do jej zalet należy jednak mała pracochłonność.

Inną metodą szacunkową jest zintegrowana ocena statyki – SIA (Static Integrated Assessment), pozwalająca określić wytrzymałość drzewa i jego statyczność, gdy dysponuje się jedynie podstawowymi danymi dendrometrycznymi i kształtem korony [Siewniak i Bobek 2010]. Do metod bezinwazyjnych z wykorzystaniem urządzeń, zalicza się także zintegrowany pomiar statyki – SIM (Static Integrated Measurement), który pozwala wyznaczyć wytrzymałość podstawową, aktualną wytrzymałość na złamanie oraz stabilność drzewa w gruncie. Na podstawie licznych badań na różnorodnych gatunkach drzew, stworzono katalog o właściwościach statycznych dla poszczególnych gatunków. Zbiór tych danych pozwala na szybszą diagnozę badanego egzemplarza [Siewniak i Siewniak 2005, Siewniak i Bobek 2010]. Za pomocą metody SIA przeszkolony inspektor może dokonać właściwej oceny statyki 95% drzew. Natomiast metoda SIM pozwala z kolei na diagnozę najtrudniejszych przypadków [Siewniak i in. 2008]. Wizualna ocena stopnia rozkładu drewna może być często wiarygodnym sposobem przewidywania potencjalnego ryzyka. Jednakże do dogłębnej oceny drzewa wymagane jest zastosowanie specjalistycznego sprzętu, zwłaszcza gdy stwarza ono wysoki stopień zagrożenia dla bezpieczeństwa publicznego i wykazuje podejrzane wady, które nie mogą być w pełni ocenione w trakcie inspekcji wzrokowej [Johnstone i in. 2010].

Od niedawna dostępne są nowe metody badań m.in.: tomografia elektryczna, tomografia akustyczna oraz mapowanie systemów korzeniowych drzew za pomocą GPR. Defekty wewnętrzne pni drzew często pozostają poza zasięgiem wzroku arborysty [Hayes 2001, Pokorny 2003, Luley 2005, Wang i Allison 2008]. Ponieważ zgnilizna drewna często przez długi czas nie daje widocznych objawów na zewnątrz, dla właściwego rozpoznania obecności rozkładu wewnątrz pnia, konieczne jest zastosowanie bardziej precyzyjnych narzędzi umożliwiających dokładną analizę wewnętrznej struktury pnia drzewa. W tym celu stosuje się tomografię komputerową. Obecność rozkładu i jego zaawansowanie będą świadczyły o słabej kondycji drzewa, a wówczas np. pod wpływem wiatru ciężar i ruch korony mogą spowodować przekroczenie granicznej wytrzymałości pnia lub systemu korzeniowego drzewa, a w konsekwencji złamanie lub wykrot [Johnson i Johnson 1999].

Drzewa zakwalifikowane jako potencjalnie zagrażające bezpieczeństwu przeznaczają się do obserwacji lub przeprowadza zabiegi pielęgnacyjne korygujące ich statykę. Korektę sylwetki drzewa uzyskuje się przez umiejętne cięcia redukujące masę korony lub

wzmocnienia mechaniczne i podpory, co nie usuwa przyczyny zagrożenia, ale na jakiś czas zabezpiecza drzewo przed upadkiem. Decyzja dotycząca bezpieczeństwa i wskazań w zakresie pielęgnacji uzależniona jest od funkcji, które pełni drzewo w konkretnym miejscu. Inne będą wskazania dla drzewa młodego, które w związku z małymi gabarytami stanowi mniejsze zagrożenie, inne dla dużego, starzejącego się, a jeszcze inne dla drzewa, które ze względu na walory historyczne i reprezentacyjną lokalizację jest obiektem monumentalnym i podlega szczególnej opiece.

Prawdopodobieństwo rozłamania uzależnione jest od predyspozycji gatunkowych, takich jak twardość, elastyczność i kruchość drewna, żywiczność, skłonność gatunku do tworzenia słabych rozwidleń czy skłonność do tworzenia form wielopniowych [Baridon i Suchocka 2009]. Do wskaźników zaawansowanej próchnicy w drzewie stojącym należą: zgniłe drewno, owocniki grzybów, ubytki, dziury i pęknięcia w drewnie. Próchnica może wystąpić w gałęziach, pniu i/lub w korzeniach drzewa rosnącego. Grzyby rozkładające drewno wytwarzają enzymy: lignazy i karbohydrazy, które depolimeryzują lub rozszczepiają ligninę, celulozę i hemicelulozę w jednostki mniejsze, o łatwiej przyswajalnym węglu. Gatunki drzew w różnym stopniu posiadają zdolność odizolowania zgnilizny od zdrowych tkanek. Możliwe jest to dzięki temu, że drzewa posiadają zdolność wytwarzania bariery kompartmentowej – CODIT (*compartmentalization of decay in trees*). Jest to proces fizjologiczny polegający na wytworzeniu chemicznych i fizycznych barier ograniczających rozprzestrzenianie się chorób i organizmów powodujących próchnicę wewnątrz pnia drzewa. Drzewo „odgradza” patogen, co nie pozwala na rozwój choroby i niszczenie kolejnych tkanek. Bariera jest skuteczna w momencie, kiedy patogen zostanie całkowicie odizolowany od zdrowego drewna, jednak może być przerwana na skutek uszkodzeń mechanicznych [Baridon i Suchocka 2009].

PRZEGLĄD METOD I URZĄDZEŃ

Tomograf akustyczny – PiCUS Sonic Tomograph

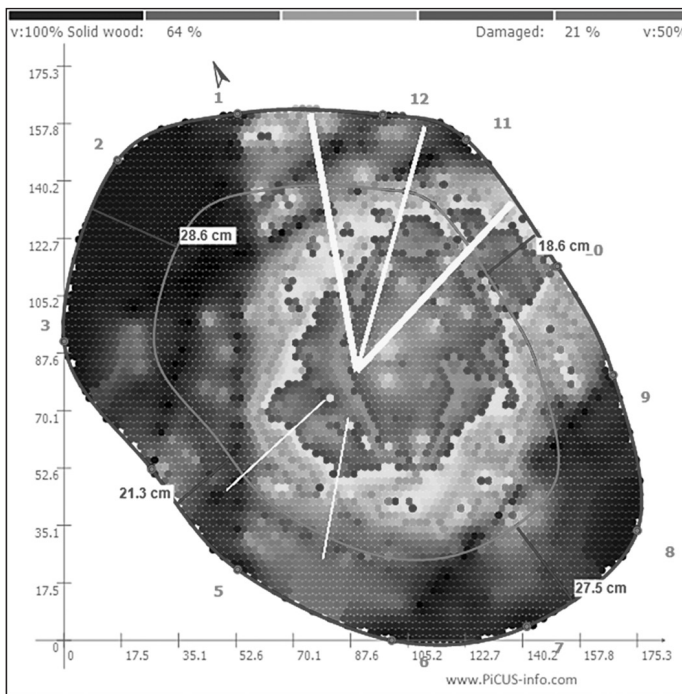
Pierwszy tomograf skonstruowano w 1998 r. w Niemczech. Obecnie aparaty PiCUS Sonic używane są m.in. w Wielkiej Brytanii, Stanach Zjednoczonych, w Australii, Chinach i Japonii, we Francji i Włoszech, w Rosji, Arabii Saudyjskiej, a od 2010 r. także w Polsce. Nazwa urządzeń PiCUS pochodzi od łacińskiej nazwy rodzaju ptaków z rodziny dzięciołowatych (*Picus* sp.) i związana jest ze sposobem przeprowadzenia pomiaru.

Tomograf dźwiękowy PiCUS Sonic służy do bezinwazyjnego wykrywania różnego stopnia rozkładu, ubytków wewnątrz drzew oraz pęknięć. W przeciwieństwie do innych instrumentów służących do wykrywania anomalii pnia tomograf dźwiękowy nie wymaga do swego działania nawiercania i naruszenia bariery, jaką drzewo tworzy, aby ograniczyć i spowolnić rozprzestrzenianie się próchnicy [Kersten i Schwarze 2005]. Tomograf działa na zasadzie prędkości rozchodzenia się fali akustycznej w poprzek pnia, która zależy od gęstości i elastyczności drewna. Uszkodzenia wewnętrzne powodują zmniejszenie elastyczności i gęstości, co skutkuje zmniejszeniem prędkości fali akustycznej w konkretnym miejscu. Metoda zakłada, że w przypadku drewna w pełni zdrowego prędkość przechodzenia fal dźwiękowych przez badany przekrój poprzeczny drzewa wynosi 100%. W przypadku jakichkolwiek zmian w strukturze drewna prędkość ta

maleje. Odpowiednia kolorystyka na tomogramie będącym wynikiem badania obrazuje zachodzące zmiany. Barwy od jasnobrazowej do prawie czarnej wskazują na prędkość dźwięku w zakresie od 60 do 100%, sugerując jednocześnie żywą i zdrową tkankę; różne odcienie zielonego – prędkość od 40 do 60% są charakterystyczne dla drewna o nieco osłabionej strukturze; odcienie różowego – ok. 20–40%, a od niebieskiego do prawie białego ok. 0–20% są przypisane dla obszarów drewna o najsłabszych parametrach, gdzie najczęściej pojawiają się uszkodzenia i postępujący rozkład tkanek drewna [Chomicz 2007, 2010] (ryc. 1).

W interpretacji istotny jest udział powierzchniowy wymienionych powyżej kolorów, ich lokalizacja, sąsiedztwo, przenikanie się oraz konfiguracja.

Przed przystąpieniem do badań tomografem, należy dokonać oceny wizualnej badanego drzewa oraz sprawdzić czy pojawiają się jakiegokolwiek zewnętrzne objawy uszkodzenia pnia, które należy zlokalizować. Następnym etapem jest sporządzenie dokumentacji fotograficznej zaobserwowanych defektów, która pomoże w ocenie wyników badania.



Ryc. 1. Przykładowy tomogram przekroju poprzecznego pnia lipy srebrzystej (*Tilia tomentosa* Moench) będący wynikiem badania tomografem dźwiękowym (W. Durlak, 2017)

Fig. 1. Example tomogram cross-section of the trunk of the silver linden (*Tilia tomentosa* Moench) resulting from research tomograph sound (W. Durlak, 2017)

Analizę rozpoczyna się od opukania pnia gumowym młotkiem, w celu określenia specyficznych efektów dźwiękowych co pozwala na wyznaczenie poziomu punktów pomiarowych. Następnie na wyznaczonej wysokości umieszcza się szpilki pomiarowe

służące do umocowania sensorów odpowiedzialnych za odbieranie fal dźwiękowych. Zwykle zakłada się od 5 do 24 punktów pomiarowych oddalonych od siebie o określone wartości. Liczba umieszczonych punktów zależy od obwodu i kształtu pnia drzewa (ryc. 2).



Ryc. 2. Tomograf soniczny ułożony na pniu drzewa (W. Durlak 2016)

Fig. 2. CT scanner sonic located on a tree trunk (W. Durlak 2016)

Kolejnym etapem jest zmierzenie geometrii pnia drzewa, którą ocenia się na poziomie pomiaru. W celu precyzyjnego odwzorowania jego kształtu wykorzystuje się suwmiarkę elektroniczną – PiCUS Calliper, która po wykonaniu pomiaru przesyła bezprzewodowo dane do jednostki centralnej tomografu, gdzie jest on odczytany na ekranie (ryc. 3). Wadą suwmiarki jest jej ograniczona rozpiętość (max. 1,5 m), która nie pozwala na dokonywanie pomiarów drzew o znacznych obwodach pnia.



Ryc. 3. Pomiar geometrii pnia drzewa za pomocą suwmiarki PiCUS Calliper (M. Dudkiewicz 2016)

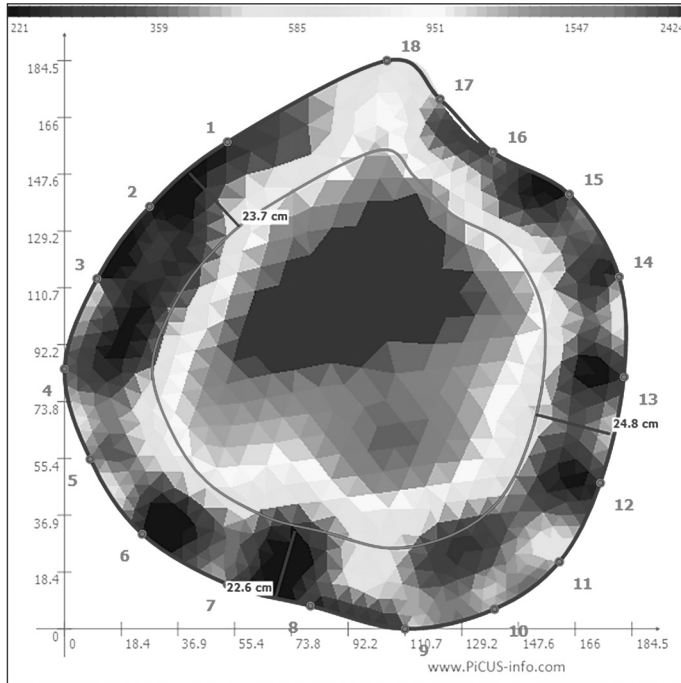
Fig. 3. Measure the geometry of the tree trunk using calipers PiCUS Calliper (M. Dudkiewicz 2016)

Następnie wykonuje się pomiar dźwiękowy, używając do tego młotka radiowego. Za jego pomocą generuje się impuls dźwiękowy na każdym kolejnym punkcie pomiarowym, który jest odbierany przez sensory. Podczas generowania fali sensory rejestrują czas odebrania sygnału. Ten etap jest kluczowy, bowiem wówczas powstaje wizualizacja, obrazująca wnętrze pnia (tomogram) z dokładną wielkością oraz lokalizacją defektu na danej wysokości. Etap diagnozy akustycznej przypomina pracę dziecięcia, stąd nazwa. Obraz przedstawiony na tomogramie jest zazwyczaj stosunkowo łatwy do zinterpretowania. Kolor niebieski i fioletowy oznacza uszkodzony obszar drewna, natomiast kolor brązowy – drewno zdrowe, niedotknięte rozkładem.

Problem w odczytaniu tomogramu pojawia się, gdy mamy do czynienia z tzw. mokrym drewnem. Wizualizacja przedstawia wówczas obraz pnia w taki sposób jak w przypadku zgnilizny, pomimo tego iż mokre drewno uodparnia drzewo przed zgnilizną. Trudność w interpretacji tomogramu, jest również związana z pęknięciami wewnątrz pnia, ponieważ obszar za ubytkiem przedstawiany jest jako defekt wywołany zgnilizną. W celu interpretacji uszkodzenia zalecane jest dodatkowe badanie metodą impedancji elektrycznej, by porównać wyniki i dokonać trafnej diagnozy. Urządzenie PiCUS Sonic Tomograph jest doskonałym narzędziem do badań drzewostanu, zwłaszcza ze względu na swój bezinwazyjny charakter. Wyniki diagnoz są przedstawiane na bieżąco, co sprawia, że już w terenie możemy dokonać oceny stanu drzewa. Znaczną zaletą jest także otrzymanie wizualizacji całego przekroju poprzecznego pnia. Dodatkowy atut stanowi możliwość wyliczenia tzw. współczynnika określającego wytrzymałość mechaniczną pnia (t/R), czyli stosunek zdrowego drewna (t) do promienia pnia drzewa (R), oraz lokalizacji GPS, która jest zapisywana automatycznie w urządzeniu.

Tomograf elektryczny – PiCUS TreeTronic

PiCUS TreeTronic jest urządzeniem wykorzystującym metodę tomografii impedancji elektrycznej (*Electrical Impedance Tomograph*). Wynikiem takiego badania jest tomogram, przedstawiający przekrój poprzeczny pnia, z dokładną wielkością i lokalizacją defektów. Urządzenie zapisuje czas przemieszczania się napięcia elektrycznego wygenerowanego na każdym z punktów pomiarowych. Aparat wykorzystując napięcie elektryczne, określa wewnątrz pnia obszary o różnym oporze elektrycznym. Wynikiem pomiaru jest dwuwymiarowa mapa przekroju poprzecznego pnia, na której zaznaczone barwy odpowiadają określonej wartości oporu elektrycznego. Zdolność drewna do przewodzenia prądu zależy w dużej mierze od chemicznych właściwości drewna, takich jak: zawartość wody w tkankach, struktura komórek, koncentracja pierwiastków itd. Biorąc pod uwagę fakt, że wszystkie te właściwości ulegają zmianie wcześniej niż właściwości fizyczne, łączy się tomografię akustyczną z tomografią elektryczną co umożliwi z kolei przeprowadzenie zaawansowanej oceny wewnętrznych struktur pnia drzewa. W wielu przypadkach wynik pomiaru może być wykorzystany do analiz identyfikujących typ zgnilizny lub ustaleń czy wewnątrz pnia jest spróchniale, czy też jest zainfekowane przez bakterie. Oprócz tego wynik badania dostarcza również informacji o stopniu uwilgotnienia drewna. Niska wartość impedancji wskazuje na podwyższoną zawartość wody. Rozmieszczenie obszarów o różnym oporze (różnej wilgotności) może posłużyć do analizy sprawności systemu korzeniowego i transportu wody wewnątrz drzewa [Chomicz 2007] (ryc. 4).



Ryc. 4. Przykładowy tomogram przekroju poprzecznego pnia dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) będący wynikiem badania tomografem elektrycznym (W. Durlak, 2016)

Fig. 4. Example tomogram cross-section of the trunk of oak (*Quercus robur* L.) resulting from electrical tomography study (W. Durlak, 2016)

Wiele zespołów badawczych potwierdziło skuteczność tomografii dźwiękowej w wykrywaniu rozkładu drzewa [Divos i Szalai 2002, Nicolotti i in. 2003, Socco i in. 2004, Wang i in. 2007]. Gilbert i Smiley [2004], którzy również oceniali skuteczność tej metody na dębach i orzesznikach, stwierdzili, że średnia dokładność urządzenia wynosi 89%. W celu uzyskania precyzyjniejszych wyników sugeruje się stosowanie tomografii dźwiękowej w połączeniu z tomografią rezystancji elektrycznej. Ponieważ obydwie metody badawcze wzajemnie się uzupełniają, uzyskuje się w efekcie szczegółowy obraz wnętrza pnia badanego drzewa [Göcke i in. 2007].

Mapowanie systemów korzeniowych drzew za pomocą urządzenia GPR (*Ground Penetrating Radar*)

GPR jest technologią nieinwazyjną służącą m.in. do ustalania strukturalnego układu korzeni pod powierzchnią gruntu oraz tworzenia szczegółowych map warstw podziemnych [Bassuk i in. 2011]. Drzewo staje się potencjalnie niebezpieczne, gdy jego struktura jest osłabiona przez jedną lub więcej wad. Osłabienie to może wynikać z rozwijającą się próchnicą, mechanicznych zranień, czy występowania szkodników. Podczas silnych wiatrów, wady te jeszcze mocniej predysponują drzewa do złamania. Ponadto wiele drzew miejskich rośnie na gruncie nadmiernie zagęszczonym, słabo przepuszczalnym,

o niebył dobrej strukturze, niejednokrotnie z resztkami gruzu budowlanego. Często drzewa żyją w miejscach o ograniczonej przestrzeni niepozwalającej na dostateczne zakorzenienie się, np. w wąskich dołkach wzdłuż bulwarów lub chodników. Negatywne czynniki wpływające na stan drzew to także: zanieczyszczenia komunikacyjne (mieszanka SO_2 z NO_2 i NO), zanieczyszczenia przemysłowe (pył węglowy, pyły cementowe), pyły metali (związki ołowiu, cynku, kadmu, miedzi) oraz substancje do posypywania nawierzchni dróg zimą w okresie zimowym. Zaawansowana próchnica i trudne warunki otoczenia zawsze skutkują mniejszą wytrzymałością konstrukcyjną drzewa [Pokorny 2006]. Badanie systemów korzeniowych drzew, szacowanie ich rozmiaru i głębokości odbywa się za pomocą urządzenia GPR. Systemy georadarowe są stosowane na całym świecie już od ponad trzydziestu lat przede wszystkim do lokalizowania obiektów podpowierzchniowych takich jak instalacje podziemne, narzędzia i inne obiekty inżynierskie [Neal 2004].

Georadar jest urządzeniem służącym do podpowierzchniowej penetracji terenu. Jego działanie oparte jest na zasadzie wysyłania z anteny nadawczej impulsów elektromagnetycznych o wysokiej częstotliwości w głąb badanego ośrodka i rejestracji fal odbitych od poszczególnych granic podpowierzchniowych. Pod tym pojęciem należy rozumieć granicę między ośrodkami różniącymi się wartością stałej dielektrycznej [Karczewski i in. 2011]. GPR wykorzystuje fale elektromagnetyczne, które załamują się i/lub uginają w przypadku napotkania granicy pomiędzy obiektami o różnych właściwościach elektromagnetycznych [Daniels 1996]. Różne skały i materiały charakteryzują się różnymi wartościami stałej dielektrycznej. Jeśli pod powierzchnią terenu istnieją przewarstwienia geologiczne w formie zmieniających się rodzajów warstw, to granica międzywarstwowa jest granicą odbijającą impuls radarowy. Podobnie rejestrowane są inne nieciągłości powierzchniowe, np. pustki, rurociągi instalacji podziemnych, pozostałości murów i fundamentów. Odbite impulsy radiowe odbierane są za pomocą anteny, a następnie wzmacniane, przetwarzane i rejestrowane. Obrazem rejestracji fal radarowych jest wydruk (echogram) w postaci ciągłego podpowierzchniowego przekroju czasowego (oś głębokościowa kalibrowana jest w jednostce czasu). Na echogramie granice odbijające impulsy fal elektromagnetycznych zobrazowane są za pomocą równoległych, wielokrotnie powtarzających się pasów lub plam o różnej intensywności barwy lub stopnia zaczernienia. Zasada pracy metodą georadarową polega na przemieszczaniu anteny wzdłuż wyznaczonych na powierzchni profili oraz ciągłej rejestracji odbitych impulsów od struktur podpowierzchniowych [Przybyła 2016].

Pierwszą próbę radarów penetrujących grunt przeprowadzono w Austrii w 1929 r., gdzie metodą radarową wykorzystano do określania głębokości lodu na lodowcu. Ta pionierska praca wykazała, że energia elektromagnetyczna może być przekazywana w mediach innych niż powietrze. Pierwsze zastosowanie radaru na dużą skalę miało miejsce w czasie II wojny światowej, kiedy to Brytyjczycy, a później Amerykanie, testowali systemy do wykrywania samolotów. W 1972 roku prototyp systemu GPR został zbudowany przez NASA i wysłany w Apollo 17 na naturalnego satelitę Ziemi do badania własności elektrycznych i geologicznych jego powierzchni. Radar wykorzystywano również w archeologii do poszukiwań m.in. fundamentów budynków i podziemnych piwnic magazynowych. W 1979 r. z powodzeniem prowadzono przy jego pomocy badania na Cyprze i w Salwadorze. Sukcesy obu tych badań georadarowych można było

przypisać bardzo suchemu materiałowi, pokrywającemu pozostałości archeologiczne i umożliwiającemu głęboką penetrację fal i stosunkowo nieskomplikowaną identyfikację obrazu [Conyers 2006]. Kompleksowa seria badań georadarowych została przeprowadzona w Japonii w połowie 1980 r. – w jej trakcie zlokalizowano ukryte pod ziemią kurhany z VI w. [Imai i in. 1987].

Sukcesy w mapowaniu terenu przez GPR, jakie uzyskali Japończycy w latach 80., zostały szybko potwierdzone w innych licznych badaniach, prowadzonych przez Goodmana i jego współpracowników [Goodman i Nishimura 1993, Goodman i in. 1994, Goodman i in. 1995]. Postęp ten był możliwy, ponieważ w tym okresie producenci GPR zaczęli wytwarzać systemy, które mogły przechowywać dane w formie plików cyfrowych. Ponadto, niedrogie i coraz bardziej wydajne komputery osobiste umożliwiły przetwarzanie danych cyfrowych w sposób, który nie był dotychczas możliwy. Pionierskie badania prowadzone przez Goodmana z zespołem doprowadziły do powstania modeli trójwymiarowych. Ta technika przetwarzania i mapowania danych pozwala zobrazować ogromne ilości danych pochodzących z wielu dziesiątek profili tworząc czytelne mapy rozkładu obiektów. Innym ważnym wydarzeniem w historii GPR było oprogramowanie umożliwiające analizę ukrytych pod powierzchnią ziemi obiektów archeologicznych, głównie dzięki zdolności do tworzenia syntetycznych modeli komputerowych, pomocnych przy interpretacji wyników badań [Conyers 2015].

Pomiary za pomocą GPR w postaci mapowania systemów korzeniowych drzew ma w stosunku do innych metod kilka zalet: nadaje się do skanowania systemów korzeniowych dużych drzew w warunkach polowych w stosunkowo krótkim czasie; jest całkowicie nieinwazyjna; pozwala na uzyskanie wyników, ukazujących długoterminowy rozwój systemu korzeniowego; umożliwia obserwację korzeni przez twarde powierzchnie (np. beton, asfalt, cegły, drogi, budynki), a jej dokładność jest wystarczająca do wykrycia korzeni o średnicy nawet 1 cm (ryc. 5, 6).



Ryc. 5. Poszukiwanie dawnych fundamentów wokół Kaplicy Trójcy Świętej w Lublinie (W. Durlak, 2016)

Fig. 5. Finding old foundations around the Holy Trinity Chapel in Lublin (W. Durlak, 2016)



Ryc. 6. System georadarowy GSSI do mapowania obiektów podpowierzchniowych (M. Dudkiewicz, 2016)

Fig. 6. System GSSI ground penetrating radar to map the subsurface objects (M. Dudkiewicz, 2016)

Początkowo do badania systemów korzeniowych stosowano różne metody [Vogt i Persson 1991]. Grube korzenie były zazwyczaj badane metodami archeologicznymi, czyli odkrywkowo [Kasyanenko 1980, Carlson i in. 1988]. Pobierano również próbki z ich rdzenia [Vogt i in. 1987, Persson i in. 1990]. Wadą tych metod jest fakt, że wykopy archeologiczne były destrukcyjne, a pobieranie próbek rdzenia wykluczało z kolei badanie całego systemu korzeniowego drzewa. Ponadto badania dużych drzew w ich strefie podpowierzchniowej są bardziej skomplikowane, ze względu na duże i złożone systemy korzeniowe. W ciągu ostatnich piętnastu lat miały miejsce pierwsze próby zastosowania GPR w badaniach w rolnictwie i leśnictwie. W 1999 r. uzyskano pierwszy trójwymiarowy obraz systemów korzeniowych dużych dębów [Hruska i in 1999]. W kolejnych latach skuteczność mapowania korzeni m.in. topól i brzośliwni za pomocą GPR potwierdziły badania innych autorów [Buthnor i in. 2001, Cox i in. 2005, Lorenzo i in. 2010, Zhu i in. 2014].

PODSUMOWANIE

Tomografia komputerowa oferuje bardzo dobre wsparcie diagnostyczne do oceny stanu drzew. Bezpieczeństwo użytkujących zabytkowe parki i aleje, przy których rosną drzewa o znacznych wymiarach, jest bardzo ważne i wymaga użycia precyzyjnych technik diagnostycznych. Ocena wizualna (VTA) nadal jest punktem wyjścia do przeprowadzenia takich badań, jednak defekty wewnętrzne pni drzew często nie dają widocznych objawów zewnętrznych. Przez wiele lat używano metod wymagających ingerencji w wewnętrzne tkanki drzewa, a ich stosowanie w przypadku cennych drzew zabytkowych było kontrowersyjne. Najbardziej właściwe są te metody, które całkowicie

wykluczają lub przynajmniej ograniczają do minimum destrukcyjny wpływ badania na drzewo. Do takich metod należą: tomografia akustyczna, elektryczna oraz GPR.

PIŚMIENNICTWO

- Baridon, D., Suchocka, M. (2009). Wizualna metoda oceny statyki drzew. Co ma wpływ na statykę drzewa i jak rozpoznać zagrożenie. *Administrator*, 2, 16–19.
- Barszcz, A. (2004). Influence of interpretation of resistograph indications on results of qualitative classification of standing trees. *Ann. Warsaw Agriculture University, Forestry and Wood Technol.*, 55, 30–37.
- Bassuk, N., Grabosky, J., Mucciardi, A., Raffel, G. (2011). Ground-penetrating radar accurately locates tree roots in two soil media under pavement. *Arboricult. Urban Forestry*, 37(4): 160–166.
- Butnor, J.R., Doolittle, J.A., Kress, L., Cohen, S., Johnsen, K.H. (2001). Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree Physiol.*, 17, 1269–1278.
- Carlson, W.C., Harrington, C.A., Farnum, P., Hallgren, S.W. (1988). Effects of root severing treatments on loblolly pine. *Can. J. For. Res.*, 18, 1376–1385.
- Chomicz, E. (2007). Bezinwazyjne metody wykrywania defektów wewnątrz pni drzew stojących (Tomograf PiCUS® Sonic i PiCUS® Treetric). *Leśne Prace Badaw.*, 3, 117–121.
- Chomicz, E. (2010). Bezinwazyjne diagnozowanie kondycji drzew zabytkowych z zastosowaniem tomografów PiCUS®. *Kurier Konserwatorski*, 8, 29–32.
- Conyers, L.B. (2006). Ground-penetrating radar. [W:] *Remote sensing in archaeology*. Red. J. Johnson. University of Alabama Press, Tuscaloosa, AL., 131–159.
- Conyers, L.B. (2015). Ground-penetrating radar data analysis for more complete archaeological interpretations. *Proceed. of the 11th Intern. Conf. on Archaeological Prospection, 15–19 September 2015, Warsaw, Poland*. The Institute of Archaeology and Ethnology, Polish Academy of Sciences, the Polish Center of Mediterranean Archaeology, University of Warsaw, the Copernicus Science Centre, 202–205.
- Cox, K.D., Scherm, H., Serman, N. (2005). Ground-penetrating radar to detect and quantify residual root fragments following peach orchard clearing. *HortTechnology*, 15(3), 600–607.
- Daniels, D.J. (1996). Surface-penetrating radar. The Institute of Electrical Engineers, London.
- Divos, E., Szalai, L. (2002). Free evaluation by acoustic tomography. [W:] *Proceed. of the 13th Internat. Symp. on Nondestructive Testing of Wood, August 19–21, Berkeley, CA*, 251–256.
- Gilbert, E.A., Smiley, E.T. (2004). PiCUS sonic tomography for the quantification of decay in white oak (*Quercus alba*) and hickory (*Carya* spp.). *J. Arboriculture*, 30(5), 277–281.
- Goodman, D., Nishimura, Y. (1993). A ground-radar view of Japanese burial mounds. *Antiquity*, 67, 349–354.
- Goodman, D., Nishimura, Y., Rogers, J. D. (1995). GPR Time-Slices in Archaeological Prospection. *Archaeolog. Prospection*, 2: 85–89.
- Goodman, D., Nishimura, Y., Uno, R., Yamamoto, T., 1994. A ground radar survey of medieval kiln sites in Suzu City, Western Japan. *Archaeometry*, 36(2), 317–326.
- Göcke L., Rust S., Weihs U., Günther T., Rücker C. (2007). Combining sonic and electrical impedance tomography for the nondestructive testing of trees. *Proceed. of the 15th Internat. Symp. Nondestructive Testing of Wood: September 10–12, Duluth, Minnesota, USA*, 31–42.
- Hayes, E. (2001). *Evaluating tree defects*. 2nd ed. Safetrees, Rochester, MN., s. 34.
- Hruska, J., Cermák, J., Sustek, S. (1999). Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Tree Physiol.*, 19(2), 125–130.
- Imai, T., Sakayama, T., Kanemori, T. (1987). Use of Ground-Probing Radar and Resistivity Surveys for Archaeological Investigations. *Geophysics*, 52, 137–150.

- Johnstone, D., Moore, G., Tausz, M., Nicolas, M. (2010). The Measurement of Wood Decay in Landscape Trees. *Arboricult. Urban Forestry*, 36(3), 121–127.
- Johnson, G.R., Johnson, B. (1999). Storm damage to landscape trees: prediction, prevention, treatment. FO-7415-S. St. Paul, MN: University of Minnesota Extension Service, ss. 8.
- Karczewski J., Ortyl Ł., Pasternak M. (2011). *Zarys metody georadarowej*. Wydawnictwo AGH, Kraków, ss. 346.
- Kasyanenko, A.I. (1980). Kornevaya sistema podvovoye plodovoyh derevyev. (Root systems of fruit trees.). *Naukova Dumka*, Kiev, ss. 220.
- Lorenzo, H., Pérez-Gracia, V., Armesto, J. (2010). Forestry applications of ground-penetrating radar. *Forest Systems*, 19(1), 5–17.
- Luley, C.L. (2005). Wood decay fungi common to living urban trees in the northeast and central United States. *Urban Forestry LLC*, Naples, NY, ss. 61.
- Neal, A. (2004). Ground penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Rev.*, 66, 261–330.
- Nicolotti, G., Socco, L.V., Martinis, R., Godio, A., Sambuelli, L. (2003). Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. *J. Arboriculture*, 29, 66–77.
- Persson, H., Ahlstrom, K., Clemensson-Lindell, A. Majdi, H. (1990). Experimental approaches to the study of air pollution on trees root studies. *Proceed. CEC and SUAS Above and Below-Ground Interactions in Forest Trees in Acidified Soils*. Red. H. Persson. Simlangsdalen, Sweden, 8–16.
- Pokorny, J. (2003). Urban tree risks management: A community guide to program design and implementation. NA-TP-03-03. USDA Forest Service, Northeastern Area, State and Private Forestry, St. Paul, MN, ss.194.
- Pokorny, J. (2006). *Urban Tree Risk Management: A Community Guide to Program Design and Implementation NA-TP-03-03*.
- Przybyła, B. (2016). Lokalizacja podziemnej infrastruktury sieciowej. Cz. 2. *Inżynieria Bezwykopowa*, 3, 62–66.
- Siewniak, M., Siewniak, M. (2005). Zintegrowany pomiar statyki drzewa. *Wiadomości Konserwatorskie*, 18, 15–17.
- Siewniak, M., Bobek, W. (2010). Zagrożenie ludzi i mienia w parkach, metody określania stanu statycznego drzew. *Kurier Konserwatorski*, 8, 13–17.
- Siewniak, M., Siewniak M., Bobek W. (2008). Bezinwazyjny pomiar wytrzymałości pnia drzewa w gruncie. *Aura*, 9, 24–28.
- Socco, L.V., Sambuelli, L., Martinis, R., Comino, E., Nicolotti, G. (2004). Feasibility of ultrasonic tomography for nondestructive testing of decay on living trees. *Res. Nondestructive Evaluation*, 15(1), 31–58.
- Suchocka, M. (2012). Zalety i ograniczenia stosowania wizualnej metody oceny drzew (VTA) jako odpowiedź na problemy związane z zagrożeniami powodowanymi przez drzewa miejskie. *Człowiek i Środowisko*, 36(1–2), 97–110.
- Szewczyk, G. (2012). *Arborystyka. Wybrane zagadnienia pielęgnacji drzew*. Wydawnictwo UR, Kraków.
- Vogt, K.A., Vogt, D.J., Moore, E.E., Fatuga, B.A., Redlin, M.R. Edmonds, R.L. (1987). Conifer and angiosperm fine-root biomass in relation to stand age and site productivity in Douglas-fir forests. *J. Ecol.*, 75, 857–870.
- Vogt, K.A., Persson, H. (1991). Measuring growth and development of roots. [W:] *Techniques and Approaches in Forest Tree Ecophysiology*. Red. H. Lassoie, T.M. Hinckley. CRC Press, Baton Roca, FL, 477–502.
- Wang, X., Allison, R.B., Wang, L., Ross, R.J. (2007). Acoustic tomography for decay detection in red oak trees. *Research Paper FPL-RP-642*. USDA, Forest Service, Forest Products Lab., Madison, WI, s.7.

- Wang, X., Allison, R.B. (2008). Decay detection in red oak trees using a combination of visual inspection, acoustic testing, and resistance microdrilling. *Arboricult. Urban Forestry*, 34(1), 1–4.
- Zhu, S., Huang, C., Su, Y., Sato, M. (2014). 3D Ground penetrating radar to detect tree roots and estimate root biomass in the field. *Remote Sens.*, 6, 5754–5773.

DIAGNOSING THE CONDITION OF THE TREES COMPUTED TOMOGRAPHY

Abstract. Changes in the internal structure of the trunk of standing trees for example. Decay and emptiness are often not possible to identify visually. Computed tomography offers very good support in the diagnostic assessment of the health of trees. Recently, there are innovative testing methods, which include: electrical tomography, computed tomography, and acoustic mapping root systems of trees using the GPR system. Precision measuring instruments used in these methods, especially due to its non-invasive nature, suited perfectly in practice. The results of diagnosis are presented on a regular basis, which makes already in the field, we can make a preliminary assessment of the state of health of the tree.

Keywords: non-invasive methods for assessing the condition of the trees, CT Sonic PiCUS, PiCUS Treetronic, mapping root systems, ground penetrating radar (GPR)

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 2.06.2017

Do cytowań – For citation: Durlak, W., Dudkiewicz, M., Pudelska, K., Dąbski M. (2017). Diagnozowanie kondycji drzew z wykorzystaniem tomografii komputerowej. *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 16(2), 71–83.