



Partnerstwo na rzecz rozwoju standardów szkoleń diagnostów drzew w Europie środkowo-wschodniej.  
Numer Projektu – 2019-1-PL01-KA202-065670



**TREE  
ASSESSOR**

# **Instrumentalna diagnostyka drzew**

Podręcznik dla oceniających drzewa  
– poziom zaawansowany





**TREE  
ASSESSOR**

# **Instrumentalna diagnostyka drzew**

Podręcznik dla oceniających drzewa  
– poziom zaawansowany

Projekt realizowany przy wsparciu finansowym Komisji Europejskiej w ramach Programu Erasmus+:  
Partnerstwa strategiczne w obszarze edukacji i kształcenia zawodowego

# TREE ASSESSOR

## Instrumentalna diagnostyka drzew

Podręcznik dla oceniających drzewa

– poziom zaawansowany

**Redakcja:** Ágnes Kinga Buza (wersja angielska), Beata Pachnowska (wersja polska)

**Główni autorzy:** Ferenc Divós, Ágnes Kinga Buza, László Bejő, Jaroslav Kolařík

**Autorzy współpracujący i konsultanci:** Beata Pachnowska, Jerzy Stolarczyk, Piotr Tyszko-Chmielowiec, Kamil Witkoś-Gnach, Anna Pszkit, Andris Spaile, Vilmos Szaller, Kritóf Németh, Gábor Ócsvári, István Markovits

**Zdjęcia i grafiki:** Ágnes Kinga Buza, Ferenc Divós, László Bejő, Jaroslav Kolařík, archiwum Fakopp, archiwum EKO-TREK oraz zdjęcia wskazanych przy fotografii. Opracowanie grafik własne  
– o ile nie wskazano inaczej.

**Skład i oprawa graficzna:** Marta Płonka

### INFORMACJE O PROJEKCIE:

#### Nazwa i numer projektu:

Partnerstwo na rzecz rozwoju standardów szkoleń diagnostów drzew w Europie środkowo-wschodniej. 2019-1-PL01-KA202-065670

#### Lider projektu:

Dobre Kadry Centrum badawczo-szkoleniowe sp. z o.o. (Wrocław, Polska)

#### Partnerzy projektu:

Instytut Drzewa sp. z o.o. (Polska),  
Latvian Arboriculture Society (Łotwa),  
FAKOPP Enterprise Bt. (Węgry).

Publikacja powstała w wyniku projektu zrealizowanego przy wsparciu finansowym Komisji Europejskiej w ramach programu Erasmus+. Publikacja odzwierciedla jedynie stanowisko autorów. Komisja Europejska ani Narodowa Agencja nie ponoszą odpowiedzialności za umieszczoną w niej zawartość merytoryczną ani za sposób wykorzystania zawartych w niej informacji.

ISBN 978-83-67265-03-4



Creative Commons Licence

Uznanie autorstwa – Użycie niekomercyjne –Bez utworów zależnych 4.0  
Międzynarodowe (CC BY-NC-ND – 4.0)

© Copyright: Dobre Kadry. Research and Training Centre Ltd. / FAKOPP ENTERPRISE

© Copyright wersja polska: Instytut Drzewa sp. z o.o.







## *Spis treści*

<b>WPROWADZENIE</b>	<b>11</b>
<b>I. BIOMECHANIKA DRZEW</b>	<b>13</b>
1. Podstawowe koncepcje	14
2. Dane i wielkości fizyczne używane do obliczeń	17
3. Obciążenie wiatrem	19
4. Samoobciążenie – ciężar i zginanie	21
5. Mierzone dane i wnioski	22
6. Inne naprężenia – ścinanie i wzrost	26
7. Obliczenia/równania dla współczynników bezpieczeństwa	27
Pojęcia fizyczne	34
Równania	35
<b>II. DIAGNOSTYKA INSTRUMENTALNA: ROZKŁAD DREWNA</b>	<b>37</b>
1. Świder przyrostowy	38
2. Wiertarka oporowa	38
3. Sygnały akustyczne i ultradźwiękowe w drewnie oraz pomiary akustyczne w jednej linii	40
4. Tomografy akustyczne	42
5. Tomografia elektryczna/impedacyjna	46
6. Średnicomierze	49
7. Inne urządzenia do wykrywania rozkładu drewna	49

DIAGNOSTYKA INSTRUMENTALNA: ROZKŁAD DREWNA	
- STUDIA PRZYPADKÓW .....	<b>51</b>
1. Siedem lat badania tomografem akustycznym .....	51
2. Badanie dużych drzew (o obwodzie większym niż 350 cm) .....	52
3. Duże drzewa z rozkładem drewna (obwód ponad 400 cm) .....	53
4. Tomogramy tuż pod rozwidleniem .....	55
5. Częściowo zamrożony pień .....	55
6. Dlaczego nie używać długopisu do wywołania sygnału dźwiękowego? .....	57
7. Badanie reakcji drzewa na rany .....	58
8. Bezpieczeństwo drzewa rosnącego na parkingu .....	59
9. Tomografia impedancyjna i akustyczna .....	59
10. Pomiar przewodzenia – eksperymentalne zastosowanie tomografii impedancyjnej .....	61
Ocena instrumentalna rozkładu drewna – ograniczenia .....	62
Ocena instrumentalna rozkładu drewna – zalety .....	62
<b>III. DIAGNOSTYKA INSTRUMENTALNA: STABILNOŚĆ W GRUNCIE .....</b>	<b>65</b>
1. Stabilność drzewa ogólnie .....	65
2. Próba obciążeniowa ( <i>pulling test</i> ) .....	66
A. Sprzęt .....	66
B. Procedura testu .....	71
C. Ocena wyników .....	77
D. Zalety i ograniczenia próby obciążeniowej .....	79
3. Test dynamiczny .....	80
A. Sprzęt .....	82
B. Procedura testu .....	85
C. Ocena uzyskanych wyników .....	86
D. Czynniki wpływające na wiarygodność testów dynamicznych .....	87
E. Zalety i ograniczenia testu dynamicznego .....	89
F. Wiarygodność testu dynamicznego .....	90
4. Czynniki wpływające na badanie stabilności drzew .....	92
A. Ulistnienie .....	92
B. Opady atmosferyczne .....	93
C. Zamrożony grunt .....	93
D. Zmiany wynikające z pór roku .....	94
E. Kierunek pomiaru .....	94
<b>IV. METODY WYKRYWANIA KORZENI –</b>	
<b>TECHNIKI INSTRUMENTALNE I NIENISZCZĄCE .....</b>	<b>97</b>
1. Sonda .....	98
2. Metody akustyczne .....	98
3. Georadar .....	99
4. Tomografia elektrooporowa .....	102
5. Studia przypadków .....	104
5.1. Mapowanie korzeni vs. odstępniecie korzeni .....	104
5.2. Czy mapowanie korzeni ma związek ze stabilnością? .....	105



<b>V. ZDALNA INSTRUMENTALNA OCENA DRZEW .....</b>	<b>109</b>
Wprowadzenie .....	109
1. Analiza pozycyjna .....	110
2. Analiza obrazów .....	111
3. Analiza spektralna .....	112
4. Sieci neuronowe i sztuczna inteligencja .....	113
5. LiDAR .....	113
6. Drony .....	114
<b>VI. DENDROCHRONOLOGIA .....</b>	<b>117</b>
1. Historia i główne założenia .....	117
2. Zakładki i chronologia wzorcowa .....	118
3. Pobieranie próbek i ich użycie .....	118
<b>LITERATURA .....</b>	<b>122</b>





# Wprowadzenie

Tomografia i próba obciążeniowa to najbardziej znane zaawansowane techniki instrumentalne służące do oceny drzew. Są stosowane od dziesięcioleci na całym świecie od Japonii do Hiszpanii, od Kolumbii do Niemiec, od Wielkiej Brytanii do Australii. Są również bardzo popularne w Polsce i na Węgrzech. Zanim przejdę do kolejnych rozdziałów chciałabym by czytelnik pamiętał, że instrumenty to konkretne narzędzia. Są użyteczne dla właściwych sobie celów.

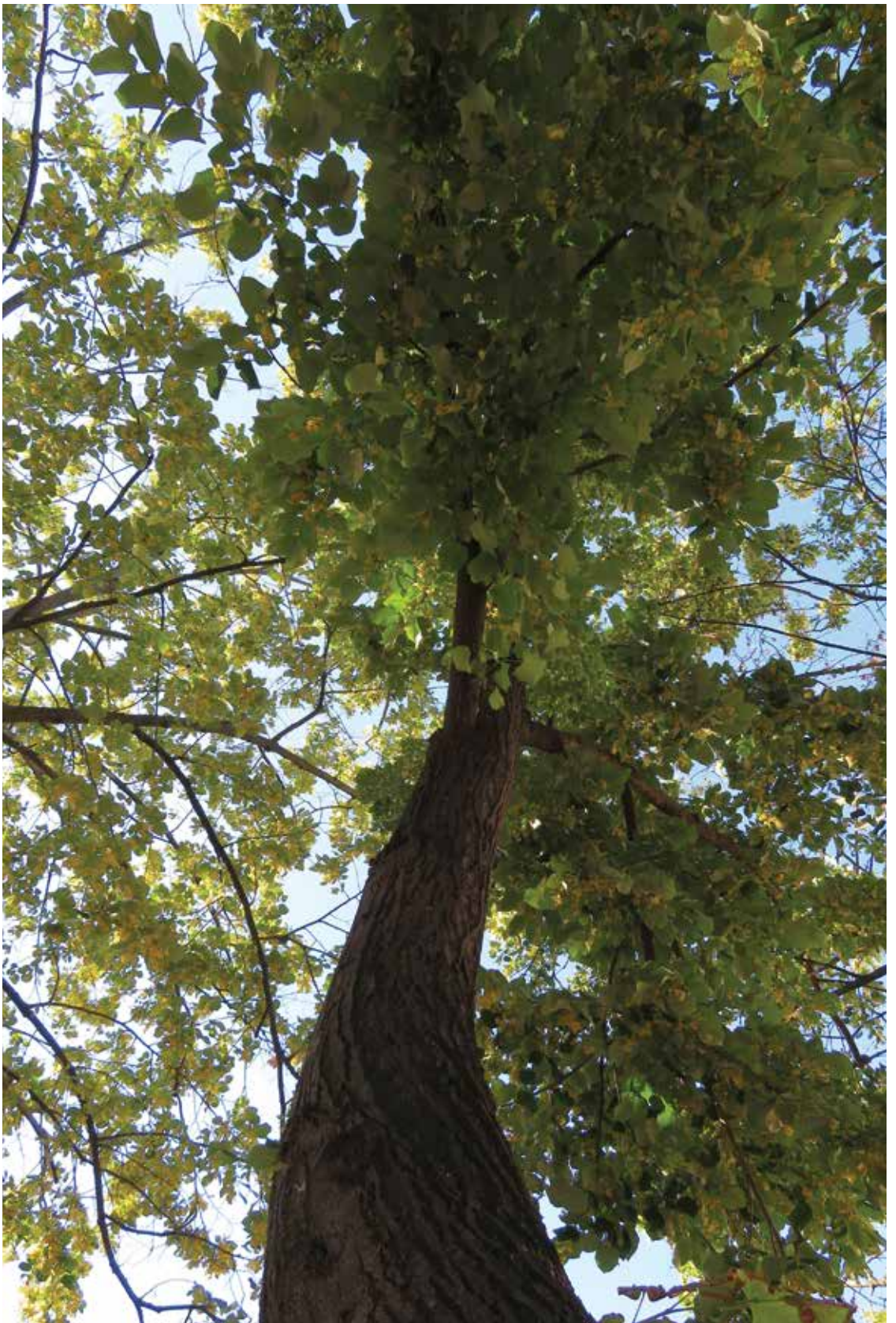
Kilka lat temu poczułam dziwny ból zęba, więc poszłam do dentysty, który skierował mnie na panoramiczny rentgen stomatologiczny. Nie wysłał mnie na badanie krwi lub PET-CET, chociaż są to również użyteczne narzędzia diagnostyczne. Wybrał inne, bardziej odpowiednie, dzięki czemu moja dolegliwość została szybko zdiagnozowana. Mój lekarz to stomatolog z ponad czterdzieścioletnim doświadczeniem, ale problem, z którym do niego przyszłam, widział dopiero drugi raz w życiu. Musiał zatem wysłać mnie do specjalisty. Moja historia miała swój happy end :).

Pomiary akustyczne, pomiary dynamiczne... to świetne narzędzia, ale musisz wiedzieć, jakie wybrać w danej sytuacji. Żadne z nich nie rozwiąże wszystkich sytuacji, różne przypadki wymagają zróżnicowanego podejścia i badania.

Pamiętaj o tym i nie wahaj się korzystać z pomocy lub konsultacji. Pozwól by Twoje drzewa również miały swój happy end.



*dr Ágnes Kinga Bekefi-Buza*  
redaktor



# I.

## *Biomechanika drzew*

### *– poziom zaawansowany*

Biomechanika drzew jest bardzo szeroką dziedziną nauki, w której prowadzone są badania pod kątem wielu aspektów, np. kształtowania drzew przez wiatr, reakcji drzew na siły zginające, analizy budowy i/lub gęstości oraz innych cech drewna.

Niektórzy eksperci upraszczają ten temat, sprowadzając go do relacji „drzewa i wiatr”, podkreślając tym samym jeden z jego głównych elementów. To prawda, że wiedza i umiejętność przewidywania zachowania się (bezpieczeństwa) drzewa w czasie burzy lub wichury jest jednym z najważniejszych praktycznych elementów tej dziedziny, ponieważ powinniśmy dążyć do zminimalizowania ryzyka obrażeń lub uszkodzeń wynikających z upadku drzewa.

Drzewa nie mogą się przemieszczać, rosną tam, gdzie wykiełkowały (chyba, że zostały przesadzone) i muszą przystosować się do panujących tam warunków. Mogą radzić sobie z przeciwnościami rosnąc, tworząc odpowiednią strukturę, mogą się też uginać lub pozwalać poruszać się gałęziom, nadal pozostając w danym miejscu.

Podstawowa wiedza przydatna w praktyce zawarta jest w osobnej publikacji „Podstawy biologii, ekologii i biomechaniki” w ramach serii TREE ASSESSOR, natomiast narzędzia do pomiarów w terenie zostały opisane w dalszych rozdziałach tego podręcznika pt. „Diagnostyka instrumentalna: stabilność drzewa” i „Diagnostyka instrumentalna: rozkład drewna”. Tu skupiamy się na zasadach fizyki, definicjach i obliczeniach.

Nawet, jeśli temat ten wydaje się jedynie suchą teorią, będziemy koncentrować się na jego praktycznym zastosowaniu. Gdy rozumiemy podstawowe informacje i zasady, jesteśmy w stanie lepiej korzystać z naszych narzędzi, zauważyć że coś idzie w złym kierunku i wyjaśnić oraz podsumować te kwestie osobom, które nie zajmują się tym zawodowo.

W tym rozdziale główną kwestią będzie to, czy dane drzewo jest bezpieczne. Jak możemy odpowiedzieć na to pytanie? Przedstawimy współczynniki bezpieczeństwa, kalkulacje obciążenia (wiatr, ciężar własny, zginanie itp.), modele stosowane w obliczeniach oraz koncepcje z obszaru fizyki. W trakcie interpretacji danych uwzględnimy również zasady statycznych i dynamicznych prób obciążeniowych drzewa. Cały podrozdział poświęcimy przeprowadzeniu czytelnika przez użyteczność dynamicznych obciążeń wiatrem, ponieważ jest to nowy i rozwijający się obszar.

Krótki przegląd równań i wskaźników (dla szybkiego przypomnienia tematu) znajduje się na końcu tego rozdziału.



## 1. PODSTAWOWE KONCEPCJE

Biomechanika drzew jest nauką wzbudzającą zainteresowanie od dziesięcioleci. Pojawiają się w niej znane nazwiska niemieckich naukowców jak np. Wessolly, Erb lub Mattheck, którzy są również autorami wyczerpujących i dobrze ilustrowanych publikacji (Wessolly, Erb: *Tree Static and Tree Inspection*, 2016; Mattheck: *Aktualisierte Feldanleitung für Baumkontrollen mit Visual Tree Assessment*, 2007).

Podstawową koncepcję statyki można przedstawić za pomocą „trójkąta statyki” opartego na pracy Wessolly’ego. Pokazuje on, że drzewo ma dwa sposoby radzenia sobie z obciążeniem: materiał drzewa może mieć odpowiednie właściwości lub kształt drzewa może „przyjmować obciążenia”. (zob. ryc. 1.1.).

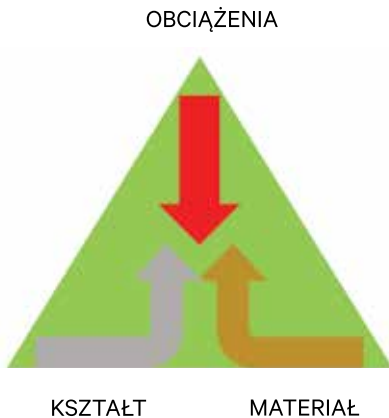
Aby określić ilościowo, czy kształt i materiał drzewa pozwolą na utrzymanie szacowanego obciążenia, wprowadzono współczynnik bezpieczeństwa (*Safety Factor*). Aby pomóc w zrozumieniu pojęć szczegółowo opisanych w dalszych podrozdziałach, w tej części pracy przedstawiono informacje na temat współczynnika oporu aerodynamicznego i ciężaru drzewa.

### A. WSPÓŁCZYNNIK BEZPIECZEŃSTWA

Jest to liczba lub wartość procentowa pokazująca stosunek nośności do obciążeń (np. 3,12 lub 312%). Równanie do obliczenia go jest bardzo proste (jednak obliczenie nośności lub obciążeń może być trudniejsze).

$$SF = (\text{nośność}) / (\text{obciążenia})$$

Należy pamiętać, że współczynnik bezpieczeństwa (SF) może być wyższy niż 1 lub 100%. Dla zdrowego i bezpiecznego drzewa powinien on wynosić więcej niż 100%. Ale nie jest to ani określenie szansy, ani prawdopodobieństwa. To tylko iloraz. 100% czy 150% nadal nie oznacza pewności, że podczas kolejnej silnej burzy drzewo nie zostanie zniszczone.



Ryc. 1.1.

„Trójkąt statyki”

(na podstawie Wessolly, Erb, 2016)

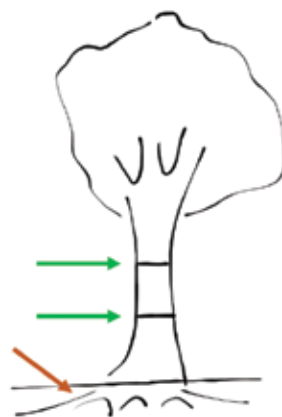
Zwykle drzewo uważane jest za bezpieczne, jeśli współczynnik bezpieczeństwa przekracza 150% lub nawet 200%. To dlatego, że podczas obliczeń występują pewne uproszczenia. Możliwe jest modelowanie całego drzewa ze wszystkimi gałęziami i liśćmi, ale nie jest to codzienną praktyką i nawet przy idealnym modelu właściwości drewna powinny być estymowane.

Współczynnik bezpieczeństwa nie posiada jednostki miary (takiej jak metr lub kilogram), ponieważ jest to iloraz dwóch miar. Oznacza to, że dwie podzielone wartości powinny być tego samego rodzaju (np. obliczenie ilorazu siły do momentu siły nie jest możliwe). Współczynniki bezpieczeństwa mogą odnosić się do danego poziomu (warstwy) pnia lub systemu korzeniowego. Ponieważ bazują one na danych zebranych podczas pomiaru (np. testu obciążeniowego drzewa, tomografii), mogą być przypisane tylko mierzonym częściom drzewa. Nie istnieje „współczynnik bezpieczeństwa dla całego drzewa”. Są za to współczynniki

bezpieczeństwa dla systemu korzeniowego uwzględniające wywrócenie drzewa oraz dla warstw pnia uwzględniające jego uszkodzenie. Jeżeli – z jakiegokolwiek powodu – należy podać ogólny współczynnik bezpieczeństwa, należy wybrać najniższą wartość. Diagnosta jest odpowiedzialny za wybór najbardziej krytycznej części lub warstwy drzewa na podstawie oceny wizualnej oraz za prawidłowe wykonanie pomiaru.

Do dnia dzisiejszego nie ma czegoś takiego jak „współczynnik bezpieczeństwa gałęzi” (*branch Safety Factor*). Gałęzie drzew mogą poruszać się z dużymi amplitudami podczas burz i nawet, jeśli nie ma żadnych problemów, czy rozkładu ich drewna, mogą odłamywać się od drzewa, aby zmniejszyć jego obciążenie.

Kiedy analizuje się warunki wiatru oraz obciążenie wywierane na drzewo, głównym czynnikiem w takich kalkulacjach jest prędkość wiatru. Należy pamiętać, że wartość współczynnika bezpieczeństwa oblicza się dla danej prędkości wiatru, ta wartość zmniejsza się, gdy prędkość wiatru rośnie. Prawidłowe ustalenie maksymalnej przewidywanej prędkości wiatru, biorąc pod uwagę warunki panujące w danym obszarze, jest niezwykle ważne. (Na przykład podczas jednego z pomiarów otrzymaliśmy współczynnik bezpieczeństwa 3,1 dla porywów wiatru 120 km/h, ale gdy prędkość wzrosła do 160 km/h współczynnik ten dla tego samego drzewa spadł do 1,7). Interpretacja współczynników bezpieczeństwa: poniżej 1 lub 100%, istnieje poważne ryzyko uszkodzenia drzewa, ponieważ obliczona nośność jest mniejsza niż obliczone obciążenie. Jeśli współczynnik bezpieczeństwa wynosi 1–1,5 (lub 2), czyli 100%–150% (lub 200%), mamy do czynienia z tzw. „szarą strefą”. Zwykle oznacza to, że można zapobiec uszkodzeniu (np. przez zredukowanie korony drzewa oraz/lub jej wysokości). Jeśli współczynnik bezpieczeństwa wynosi więcej niż 1,5 (lub 2), czyli ponad 150% (lub 200%), drzewo uważa się za bezpieczne. Ciekawostką może być fakt, że dla zdrowego drzewa współczynnik bezpieczeństwa systemu korzeniowego oraz współczynniki warstw pnia (biorąc pod uwagę wiatry o prędkości 120 km/h) są zwykle zbliżone i zazwyczaj wynoszą nieco ponad 300%. Zdrowe drzewa wzmacniają obie te główne części.



Ryc. 1.2.

Współczynnik bezpieczeństwa może się odnosić do mierzonych warstw pnia (zielone strzałki) lub systemu korzeniowego (brązowa strzałka)

## B. WSPÓŁCZYNNIK OPORU AERODYNAMICZNEGO (DRAG FACTOR)

Współczynnik oporu aerodynamicznego może być stosowany w różnych metodach badawczych, na przykład, gdy obiekt stoi nieruchomo i musi wytrzymać siłę przepływu (np. wiatru) lub, gdy obiekt ma pewną prędkość i porusza się lub w powietrzu.

Oczywiście, dany obiekt może poruszać się z wiatrem, ale ponieważ skupiamy się na bezpieczeństwie drzewa, przyjmujemy, że drzewo stoi na swoim miejscu i porusza się tylko w reakcji na podmuchy wiatru.

W ten sposób współczynnik oporu pokazuje, jak bardzo przepływ powietrza wpływa na obiekt, który znajduje się na jego drodze, i który zakłóca ten przepływ. Ryc. 1.3. przedstawia kilka przykładów, które mogą być pomocne w zrozumieniu tej koncepcji (kształt nie jest jedynym czynnikiem

wpływającym na współczynnik oporu; zależy on również od prędkości, właściwości itp. powietrza, powierzchni, kierunku).

W angielskiej wersji podręcznika współczynnik oporu tłumaczony jest jako *drag factor* (zamiast *drag coefficient*), ponieważ takie określenie zostało użyte przez Wessolly'ego i jest ono częściej stosowane przez arborystów.

*Drag factors* dla drzew zostały zmierzone przez Wessolly'ego i Erba i opublikowane w 1998 roku jako część pracy „Stuttgart table of wood strength” (tzw. katalog Stuttgarcki). Tabela ta zawiera proponowane współczynniki oporu aerodynamicznego dla 45 gatunków drzew. Według tych badań zmierzone współczynniki oporu wynosiły od 0,12 do 0,30, a dla większości drzew zmieniały się one w niewielkim zakresie (0,2–0,25).

Zwykle te wartości są traktowane jako punkty początkowe do obliczeń bezpieczeństwa. Współczynnik oporu jest mnożnikiem podczas szacowania obciążenia wiatrem.

### C. CIĘŻAR DRZEWA

Drzewo musi być w stanie udźwignąć swój własny ciężar. Przy tym podejściu mówimy o wadze drzewa powyżej pewnego poziomu, bez uwzględniania masy systemu korzeniowego. Ponieważ drzewa znacznie różnią się od siebie kształtem w zależności od warunków, w których rosną, zmierzenie ciężaru pnia, gałęzi i liści dla każdego drzewa z osobna byłoby znacznym wyzwaniem. Dlatego też zastosujemy uproszczony model, przy czym należy pamiętać, że w większości przypadków przeszacowuje on wagę o około 5–15%. (Jeśli chodzi o bezpieczeństwo, przeszacowania obciążeń i niedoszacowania możliwości drzewa są dopuszczalne, ale odwrotna sytuacja, tj. niedoszacowanie obciążeń i przeszacowywanie potencjału może okazać się bardzo niebezpieczna). Wzorec drzewa jest wykonany z drewna o tej samej gęstości i wysokości jak modelowane drzewo. Średnica pręta jest stała – jest to pierśnica drzewa (DBH – *diameter at breast height*, tj. średnica mierzona na wysokości 1,3 m nad poziomem gruntu).

$$m_{\text{drzewo}} = \rho_{\text{drzewo}} H D_{1,3}^2 \pi/4$$

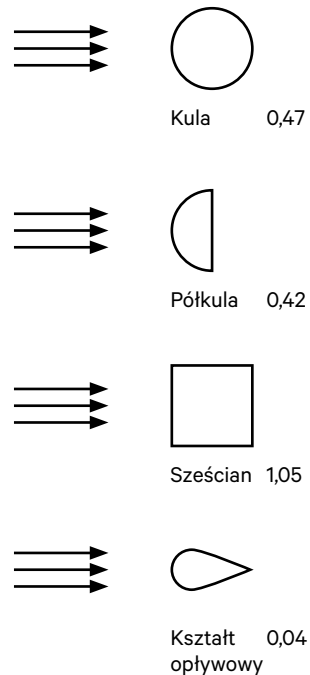
- $m_{\text{drzewo}}$  – ciężar drzewa
- $\rho_{\text{drzewo}}$  – gęstość (kg/m<sup>3</sup>) „zielonego” drewna (żywego materiału drzewnego)
- H – wysokość drzewa (m)
- $D_{1,3}$  – pierśnica (m)

UWAGA:

zwykle obciążenie wiatrem jest około 10–20 razy większe niż obciążenie ciężarem własnym drzewa. Błędy wynikające z przeszacowania ciężaru drzewa zazwyczaj wynoszą mniej niż 1%.

#### WYBRANE PRZYKŁADY WSPÓŁCZYNNIKÓW OPORU AERODYNAMICZNEGO

kierunek wiatru



Ryc. 1.3.

Przykłady współczynnika oporu aerodynamicznego





## 2. DANE I WIELKOŚCI FIZYCZNE UŻYWANE DO OBLICZEŃ

### A. DANE DRZEWA W TYM DANE ZEBRANE PODCZAS POMIARÓW I TESTÓW

W przypadku oceny bezpieczeństwa, należy zebrać różne dane w zależności od jej celu (uszkodzenie pnia lub systemu korzeniowego) oraz interpretacji oceny (tomografia, statyczne lub dynamiczne próby obciążeniowe drzewa).

Spójrzmy teraz na dane niezbędne do obliczenia bezpieczeństwa w zakresie uszkodzenia pnia z zastosowaniem tomografii. W tym przypadku potrzebujemy takich informacji jak wysokość drzewa, średnica pnia, powierzchnia korony, położenie środka korony, wysokość pomiarów tomografem, stopień oraz kierunek nachylenia drzewa (jeśli nie rośnie ono prosto). Gęstość drewna oraz pozostałe właściwości, takie jak współczynnik oporu lub prędkość fal dźwiękowych w drewnie i granica elastyczności, zależą od gatunku. Ponieważ pomiar tych danych w terenie zajęłoby dużo czasu i wymagałby zastosowania specjalnych narzędzi, prostsze (ale bardzo ważne dla oceny) jest prawidłowe rozpoznanie gatunku drzewa.

Próba obciążeniowa może być stosowana do oceny bezpieczeństwa zarówno korzeni jak i pnia. W obu przypadkach należy zapisać wysokość zamontowania liny na badanym drzewie, kąt liny (odległość punktu kotwienia może być użyta zamiast kąta), powierzchnię korony oraz wysokość jej środka. Oczywiście, potrzebne są również informacje na temat siły użytej w trakcie pomiaru oraz wychylenia podstawy pnia/szyi korzeniowej oraz/lub zmiany długości włókien pnia. Jeśli interesuje nas jedynie bezpieczeństwo związane z wywrotem, nie potrzebujemy innych danych. Jeśli natomiast chcemy oszacować bezpieczeństwo pnia na uszkodzenie czy złamanie, niezbędna jest informacja o gatunku drzewa, ponieważ w obliczeniach stosuje się granicę elastyczności.

Powierznię korony drzewa oraz jej środek można oszacować (samodzielnie lub wykorzystując tabelę określającą kształt i mierząc odpowiednie wysokości) lub obliczyć na podstawie zdjęcia drzewa. W takim przypadku należy oznaczyć obszar korony. Zdjęcie można wykonać w stanie bezlistnym, ale musi ono obejmować całą koronę włączając wszystkie mniejsze gałęzie i liście.



Ryc. 1.4.  
Prawidłowo oznaczony obszar korony

Pomiary dynamiczne posiadają dużą zaletę – wykorzystują rzeczywistą siłę wiatru. W tym przypadku, jako że pomiar jest wykonywany w warunkach rzeczywistych, w obliczeniach można przewidzieć prędkość wiatru o dużym ryzyku lub to, czy drzewo przetrwa określoną siłę wiatru, czy też nie. Jeśli chcemy oszacować odporność drzewa na wywrócenie, wystarczy znać prędkość wiatru oraz wychylenie/inklinację szyi korzeniowej. Nie musimy uwzględniać wysokości lub powierzchni korony czy też gatunku drzewa, drzewo podlega pomiarom bez założeń wstępnych. Jeśli sprawdzamy bezpieczeństwo pnia na uszkodzenie, wtedy trzeba uwzględnić zmiany długości pnia drzewa oraz jego gatunek (w celu ustalenia granicy elastyczności).

Należy pamiętać, że różne programy obliczeniowe mogą wymagać różnych danych (i mieć różne założenia). Jeśli nie ma pewności, czy pień drzewa pęknie, czy też nie, do obliczeń wykorzystuje się dane dotyczące wytrzymałości na ściskanie wraz z geometrią, gęstością drewna i obciążeniem wiatrem.

## B. PODSTAWOWE DANE FIZYCZNE WYKORZYSTYWANE DO OBLICZEŃ – DANE DLA WIATRU

Do oceny bezpieczeństwa wykorzystuje się również dane dotyczące obciążenia wiatrem. Zwykle do obliczeń wymagana jest prędkość wiatru podana w km/h lub m/s (lub w milach na godzinę). Domyślną wartością jest zwykle 120 km/h, czyli 33,33 m/s. Temperatura otoczenia może być również istotnym parametrem, gdyż wpływa na gęstość powietrza.

## C. OBCIĄŻENIA WIATREM WEDŁUG EUROCODE I KATEGORIE TERENU

Obliczanie obciążenia wiatrem zgodnie z EUROCODE jest poza zakresem niniejszej publikacji, zatem dalej podajemy jedynie kilka podstawowych informacji na ten temat. Norma EUROCODE EN 1991 dzieli obiekty na 1 do 6 obszarów (w zależności od ich wysokości i kategorii terenu), oblicza obciążenie wiatrem dla wszystkich z nich i sumuje końcowe obciążenie.

Prędkość wiatru różni się w zależności od wysokości, ale w obliczeniach używa się „prędkości bazowych” (są zawarte w normie), dzięki czemu można obliczyć również inne prędkości. (Istnieje mapa z obszarem Unii Europejskiej przedstawiająca prędkości bazowe. W Polsce wynosi ona około 20–30 m/s, na Łotwie około 30–32 m/s, a na Węgrzech około 26 m/s w zależności od regionu).

Kategorie terenu nawiązują do średniej wysokości obiektów, więc i średniej redukcji obciążenia wiatrem w otoczeniu. Zalicza się do nich wybrzeże (brak miejsc osłoniętych od wiatru, wiatr dociera do obiektu z pełną energią), tereny nad jeziorami (bardzo mała redukcja), obszary rolne (na których mogą się znajdować inne drzewa i rośliny), tereny wiejskie (gdzie w pobliżu drzewa mogą się znajdować niezbyt wysokie obiekty, a domy mogą przynajmniej częściowo osłaniać badane drzewo) oraz miejskie (na których w pobliżu drzewa mogą się znajdować wysokie zabudowania).

Wartości dotyczące obciążenia wiatrem używane w obliczeniach ulegają zmianie wraz ze zmianą kategorii terenu – całkowite obciążenie wiatrem ulega zmniejszeniu w kierunku od wybrzeża do miasta. Niektóre programy (takie jak ArborSonic 5.3.118 i nowsze) zawierają obliczenia oparte na normie EN 1991.

Należy pamiętać, że obliczenia obciążenia wiatrem przedstawione w kolejnym rozdziale zazwyczaj dają wyższe wartości w porównaniu z normą EN 1991, jeśli drzewo ma nie więcej niż 26 metrów, a niższe od tej normy, jeśli drzewo jest wyższe niż 26 m.



### 3. OBCIĄŻENIE WIATREM

Uprozczone i przybliżone obliczenia obciążeń wiatrem są stosowane dla drzew od lat 80. (Jones, 1983). Następujące równanie (dobrze znane w hydrodynamice) opisuje siłę wywieraną przez wiatr:

$$F_{\text{wiatr}} = 0,5 \rho_{\text{powietrze}} c_{\text{gatunek drzewa}} A_{\text{drzewo}} v_{\text{wiatr}}^2$$

$\rho_{\text{powietrze}}$  – gęstość powietrza (*air density* – zależy od temperatury ale zwykle zakłada się  $1,2 \text{ kg/m}^3$ )

$c_{\text{gatunek drzewa}}$  – współczynnik oporu aerodynamicznego (*drag factor*) drzewa specyficzny dla danego gatunku

$A_{\text{drzewo}}$  – powierzchnia drzewa (w  $\text{m}^2$ ) wystawiona na działanie wiatru

$v_{\text{wiatr}}$  – prędkość wiatru (m/s)

Należy pamiętać, że gęstość powietrza zależy od warunków geograficznych i topograficznych, a także od czynników sezonowych i meteorologicznych.

Jak możemy wykorzystać siłę generowaną przez wiatr do obliczeń poziomu bezpieczeństwa?

W różnych pomiarach wykorzystywana jest ona na różne sposoby. Statyczna próba obciążeniowa wymaga momentu siły wiatru, w przypadku tomografii należy obliczyć naprężenie ściskające (z wykorzystaniem momentu wiatru), podczas gdy do ocen na podstawie pomiarów dynamicznych wykorzystywane jest ciśnienie. Momentem wiatru jest:

$$M_{\text{wiatr}} = F_{\text{wiatr}} h_{\text{środek korony}}$$

$h_{\text{środek korony}}$  – wysokość środka korony (m)

Naprężenie ściskające wywołane momentem wiatru u podstawy pnia wynosi:

$$\sigma_{\text{wiatr}} = M_{\text{wiatr}} (z/l)$$

$z$  – odległość od osi neutralnej – tzn. takiej, na której nie ma naprężeń ani odkształceń podczas zginania (m)

$l$  – drugi moment bezwładności przekroju ( $\text{m}^4$ ) – szczegóły w kolejnym podrozdziale

Ponieważ tomografia jest zwykle mierzona na różnych wysokościach, a nie tylko na poziomie gruntu, musimy nieco cofnąć się do definicji momentu siły wiatru (siła razy wysokość) i użyć jej do osiągnięcia innych poziomów pomiaru.

$$\sigma_{\text{wiatr}} = F_{\text{wiatr}} (h_{\text{środek korony}} - h_{\text{warstwa}}) (z/l)$$

$h_{\text{warstwa}}$  – wysokość warstwy pnia, która jest przedmiotem badania (m)

Ciśnienie wiatru stosowane do oceny pomiarów dynamicznych:

$$p_{\text{wiatr}} = F_{\text{wiatr}} / (c_{\text{gatunek drzewa}} A_{\text{drzewo}}) = 0,5 \rho_{\text{powietrze}} v_{\text{wiatr}}^2$$

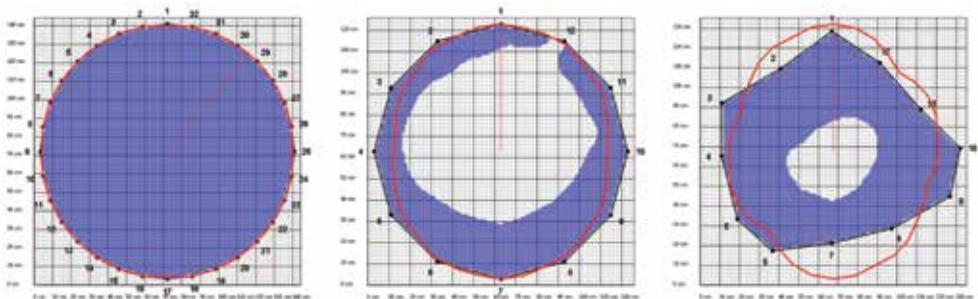
## A. DRUGI MOMENT BEZWŁADNOŚCI

Drugi moment bezwładności lub drugi moment pola opisuje, w jaki sposób dwuwymiarowy kształt powierzchni jest odporny na zginanie lub odkształcenie. Oblicza się go według następującego wzoru:

$$I_m = \iint_{x y} x^2 dx dy$$

Obliczenia dotyczące bezpieczeństwa można przeprowadzić poprzez uproszczenie przypadku (jak przy założeniu, że pień jest okrągły; w tym przypadku drugi moment bezwładności wynosi  $(\pi d^4)/64$ , gdzie  $d$  oznacza średnicę) lub za pomocą oprogramowania.

Korzystanie z oprogramowania nie tylko przyspiesza obliczenia, ale pozwala zobaczyć obciążenie w różnych kierunkach (drugi moment bezwładności zależy od kierunku!). Przykłady wpływu kierunku obciążenia pokazano na ryc. 15., w tym na zdrowy i okrągły pień, taki, który ulega rozkładowi i pień, który ma nieregularny kształt.

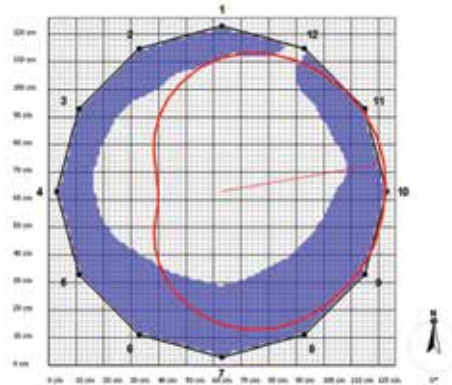


Ryc. 15.

Niebieski obszar przedstawia zdrowe drewno w przekroju pnia, odległość czerwonego obrysu od środka obszaru jest proporcjonalna do obciążenia, a czerwony promień pokazuje najłagodniejszy kierunek

## 4. SAMOOCIAŻENIE – CIĘŻAR I ZGINANIE

Ciężar drzewa powoduje obciążenie i naprężenie, ponieważ drzewo musi go utrzymać. Jeśli jednak drzewo nie jest proste i jego pień jest nachylony, powoduje to dodatkowe naprężenie. Obie kwestie są ważne ze względu na bezpieczeństwo – pochYLENIE pnia drzewa może modyfikować obciążenia i poziom bezpieczeństwa w różnych kierunkach.



Ryc. 1.6.

*Pień platana jest pochylony na wschód, przez co wiatr wiejący z zachodu staje się najbardziej zagrażający*

Naprężenie wywołane ciężarem własnym drzewa – ciężar drzewa w przypadku braku rozkładu drewna na określonej wysokości:

$$\sigma_{\text{samoociażenie}} = m_{\text{drzewo}} g / A_{\text{przekrój}}$$

tutaj możemy przypomnieć, że

$$m_{\text{drzewo}} = \rho_{\text{drzewo}} H D_{1,3}^2 \pi / 4$$

i bardziej ogólnie używając pola zamiast powierzchni koła otrzymujemy

$$m_{\text{drzewo}} = A_{\text{przekrój}} H \rho_{\text{drzewo}}$$

H oznacza wysokość drzewa, ale nas może interesować warstwa, która nie jest warstwą przy gruncie, ale warstwą na wyższym poziomie. Zmniejszy to wysokość (ponieważ masa poniżej tej warstwy nie powinna być brana pod uwagę w tym przekroju:

$$m_{\text{drzewo}} = A_{\text{przekrój}} (H - h_{\text{warstwa}}) \rho_{\text{drzewo}}$$

podstawiając to otrzymujemy równanie:

$$\sigma_{\text{samoociażenie}} = (A_{\text{przekrój}} (H - h_{\text{warstwa}}) \rho_{\text{drzewo}} g) / A_{\text{przekrój}}$$

upraszczając to równanie przez  $A_{\text{przekrój}}$  mamy:

$$\sigma_{\text{samoobciążenie}} = (H - h_{\text{warstwa}}) \rho_{\text{drzewo}} g$$

H – wysokość drzewa (m)

$h_{\text{warstwa}}$  – wysokość badanej warstwy (m)

$\rho_{\text{drzewo}}$  – gęstość „zielonego” drewna danego drzewa (kg/m<sup>3</sup>)

g – standardowe przyspieszenie ziemskie (9,81 m/s<sup>2</sup>)

Jeśli w danej warstwie zachodzi rozkład drewna, naprężenie należy pomnożyć przez iloraz powierzchni pełnego przekroju do powierzchni pozostałego drewna w tej warstwie (oznaczono je kolorem niebieskim na ryc. 1.5. i 1.6.).

$$\sigma_{\text{samoobciążenie\_w\_rozkładzie}} = [(H - h_{\text{warstwa}}) \rho_{\text{drzewo}} g] (A_{\text{przekrój}} / A_{\text{drewno}})$$

$A_{\text{przekrój}}$  – powierzchnia pełnego przekroju (m<sup>2</sup>)

$A_{\text{drewno}}$  – powierzchnia pozostałej części drewna w danym przekroju przejmującego obciążenie (m<sup>2</sup>)

Naprężenie spowodowane przechyłem i zginaniem się drzewa wynosi:

$$\sigma_{\text{zginanie}} = (m_{\text{drzewo}} g h_{\text{środek\_korony}} \sin \alpha) (z/l)$$

$m_{\text{drzewo}}$  – masa drzewa (kg)

$h_{\text{środek\_korony}}$  – wysokość środka korony (m)

$\alpha$  – kąt pomiędzy pniem drzewa a pionem

z – odległość od osi neutralnej (tzn. osi, na której nie ma naprężeń ani odkształceń podczas zginania) (m)

l – drugi moment bezwładności przekroju (m<sup>4</sup>)

Naprężenia wywołane obciążeniami (tj. wiatr, ciężar własny i przechylanie się) sumują się i wytwarzają naprężenie, które przekrój pnia powinien wytrzymać. Współczynnik bezpieczeństwa dla pnia zostanie przedstawiony w podrozdziałach 5.B i 7.

## 5. MIERZONE DANE I WNIOSKI

W tej części zostaną przedstawione dane zebrane podczas pomiarów drzewa odpowiednim i niszczącym przyrządem oraz dane, które uzyskano za pomocą metod niszczących. Wyniki zostały przedstawione w tabelach. Oba rodzaje informacji zostaną wykorzystane do oceny bezpieczeństwa.

### A. DANE Z TOMOGRAFII

Podczas tomografii mierzy się czas i odległość, na ich podstawie oblicza się prędkości impulsu, a następnie przygotowuje się mapę warstwy w formacie 2D (szczegóły w rozdziale „Diagnostyka instrumentalna: rozkład drewna”). Wykonany w ten sposób tomogram może pokazać nienaruszone i zdrowe drewno, jak i uszkodzone, w rozkładzie lub z ubytkami.

Wartość, która jest wynikiem tomografii i która jest wykorzystywana do oceny bezpieczeństwa, to

$A_{\text{drewno}}$  – powierzchnia części nośnej przekroju poprzecznego lub  $A_{\text{przekrój}} / A_{\text{drewno}}$ , jeśli powierzchnia przekroju nie jest nieistotnie mała (i obliczona w programie na podstawie zmierzonej odległości

czujników). Oczywiście oprogramowanie może zawierać wiele danych – od lokalizacji drzewa do powierzchni korony, mogą być także obliczane współczynniki bezpieczeństwa.

## B. DANE ZE STATYCZNYCH PRÓB OBCIĄŻENIOWYCH

Podczas próby obciążeniowej należy zmierzyć odległość punktu zakotwiczenia i wysokość montażu liny, natomiast sam proces pomiaru dostarczy informacji o zastosowanej sile, inklinacji (odchyleniu) i/lub zmianach długości.

Należy przewidzieć siłę lub moment, w którym może dojść do wyrócenia drzewa lub uszkodzenia pnia (przeprowadzenie próby opisano szczegółowo w rozdziale „Diagnostyka instrumentalna: stabilność drzewa”).

Prześledźmy najpierw dane dotyczące wyrotu drzewa. Jeśli na podstawie zebranych danych dotyczących siły nachylenia zostanie utworzony wykres, do punktów można dopasować funkcję tangens (dane mogą wymagać filtrowania odpowiednio do obciążenia wyciągarką w trakcie ciągnięcia drzewa i/lub w momencie odpuszczania siły, kiedy obciążenie ustępuje i drzewo powraca do stanu przed ciągnięciem).



$$\varphi_{obl} = 0,33 \tan(1,35F/F_{krytyczna}) + 0,33 (F/F_{krytyczna})^2 - 0,1 (F/F_{krytyczna})$$

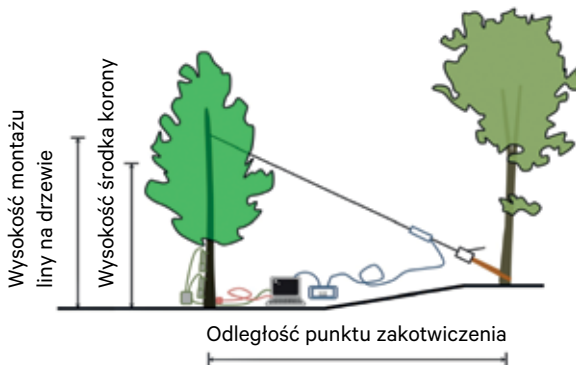
- $\varphi_{obl}$  – odpowiednia inklinacja
- $F$  – mierzona siła (N)
- $F_{krytyczna}$  – oszacowana siła krytyczna (N)

Używając  $F_{krytyczna}$  oraz odpowiednich danych geometrycznych można obliczyć moment wywracający:

$$M_{krytyczny} = F_{krytyczna} L \cos\alpha$$

- $L$  – wysokość montażu liny na badanym drzewie (m)
- $\alpha$  – kąt liny (obliczony z odpowiednich odległości)

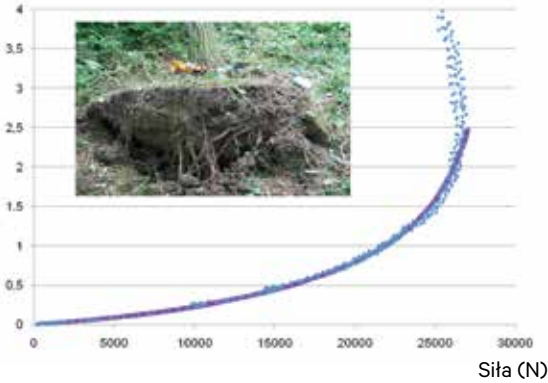
Moment krytyczny zostanie wykorzystany do obliczenia współczynnika bezpieczeństwa.



Ryc. 1.7.  
Odległości potrzebne do oceny bezpieczeństwa podczas próby obciążeniowej

I  
Różnica poziomu punktu zakotwiczenia i podstawy drzewa

Inklinacja (stopień)



Ryc. 1.8.

Dane dotyczące nachylenia i siły zebrane podczas próby prowadzącej do wyrócenia drzewa (niebieskie punkty) oraz krzywa tangens dopasowana do danych (fioletowa linia). Należy pamiętać, że podczas nieniszczącej próby obciążeniowej nachylenie (inklinacja) nie przekracza 0,25 stopnia (0,25°)

Podczas próby obciążeniowej można również zbierać dane na temat zmiany długości włókien pnia. Są to bardzo niewielkie odległości mierzone w mikrometrach, ale to, co nas interesuje, to wydłużenie względne ( $\epsilon$ ).

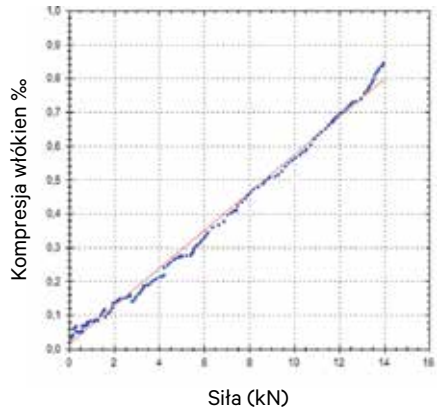
$$\epsilon = \Delta l / l$$

$\Delta l$  – zmiana w długości ( $\mu\text{m}$ )

$l$  – pierwotna długość elastometru

Wykres względnej siły rozciągania pokazuje korelację liniową, która jest w zasadzie prawdziwa aż do granicy elastyczności. Zgodnie z przeprowadzonymi doświadczeniami, pień pęka, jeśli rozciąganie względne przekracza granicę elastyczności (około 0,26% lub 2,6 ‰). Dane dla konkretnych gatunków są przedstawione w katalogu stuttgartarckim Wessolly'ego.

Wartość siły łamiącej można odczytać z odpowiedniej krzywej, a moment można obliczyć podobnie jak w przypadku wyrotu – wykorzystując wysokość montażu liny i kąt. Jest to  $M_{\text{złamanie}}$ , czyli moment, przy którym pień drzewa ulega pęknięciu.



Ryc. 1.9.

Siła i rozciąganie względne (ściskanie włókna podane w ‰) zmierzone podczas próby obciążeniowej (niebieskie punkty). Można dostrzec liniowość trendu (czerwona linia)

### C. DANE Z DYNAMICZNEJ PRÓBY OBCIĄŻENIOWEJ

Główną ideą pomiarów dynamicznych jest wykorzystanie wiatru, rzeczywistych podmuchów wiatru jako obciążenia. W ten sposób obliczenia stają się prostsze, ponieważ wykorzystuje się do nich rzeczywistą sytuację, włączając współczynnik oporu otoczenia lub powierzchnię korony. Podczas badań dynamicznych mierzy się prędkość wiatru i nachylenia szyi korzeniowej i/lub rozciągnięcie pnia – są to takie same czynniki, jak podczas statycznej próby obciążeniowej.



Ciśnienie wiatru jest obliczane na podstawie jego zmierzonej prędkości,

$$p_{\text{wiatr}} = 0,5 \rho_{\text{powietrze}} v_{\text{wiatr}}^2$$

Ciśnienie zachowuje się podobnie jak siła ciągnąca podczas próby obciążeniowej. Podobną funkcję tangens można dopasować do punktów nachylenia–ciśnienia na wykresie. Pomiędzy wydłużeniem względnym (opisanym w poprzednim podrozdziale), a ciśnieniem wiatru istnieje liniowa korelacja. To prowadzi nas do  $p_{\text{krytyczne}}$  ciśnienia oszacowanego z funkcji tangens, które mogłoby wyrwać drzewo oraz  $p_{\text{złamanie}}$ , ciśnienia, które mogłoby złamać pień zgodnie ze zmierzonymi rozciągnięciami. Należy pamiętać, że drzewa są tworami elastycznymi. Gdy wieje wiatr, drzewo kołysze się, ale także pochłania i zatrzymuje część energii. Kiedy tej energii jest „za dużo”, dochodzi do jej „eksplzycji”. Drzewo uwalnia tę energię w silniejszym kołysaniu się. Zjawisko to można zaobserwować analizując dane z pomiarów dynamicznych.

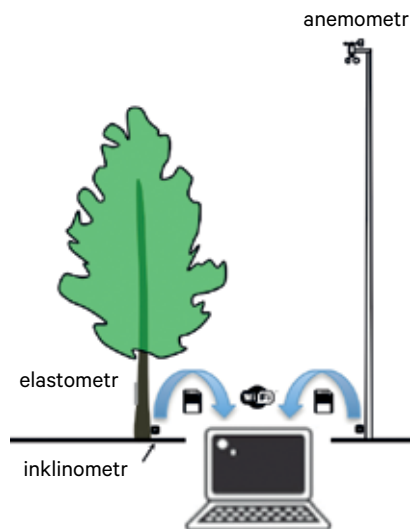
Z drugiej strony zjawisko to pokazuje, że nie ma potrzeby przypisywać lub łączyć danych prędkości wiatru zmierzonych w określonym momencie z danymi dotyczącymi nachylenia lub rozciągnięcia mierzonymi w tym samym momencie. Drzewo może być jeszcze w okresie absorpcji lub może uwolnić energię, gdy wiatr jest stosunkowo słaby. Z przeprowadzonych badań wynika, że najlepiej jest sprawdzić 10-minutowe okna czasowe i porównać dane dotyczące wiatru i nachylenia/rozciągnięcia. Używając odpowiednich (statystycznych) matematycznych danych pary można wygenerować i dopasować odpowiednią funkcję (tangens do inklinacji i liniową do względnego wydłużenia). W praktyce można również stosować krótsze okna czasowe, np. 5 minut lub nawet krótsze. Ponieważ obliczenia wymagają minimalnej liczby par danych, jeśli okno czasowe jest krótsze, pomiar również powinien trwać krócej. Przy korzystaniu z 5-minutowego okna danych skrócony czas pomiaru wynosi około 1 godziny. Dłuższy pomiar zapewnia więcej danych i lepszą ocenę. Możliwe są też pomiary trwające dłużej niż 2 dni.

Gdyby ktoś interpretował pomiar dynamiczny, to wybrany do pomiaru anemometr powinien być w stanie wykryć podmuchy wiatru trwające nawet 1 sekundę.

Dlatego też częstotliwość próbkowania powinna wynosić co najmniej 1 dana/s lub 1 Hz.

Anemometr powinien znajdować się na wysokości 10 m, blisko drzewa, tak aby był wystawiony na działanie wiatru. Jednak niektóre badania pokazują, że nawet jeśli anemometr jest oddalony o 5 km, dane mogą być dobrze dopasowane. Podczas dokonywania oceny przydatne mogą być informacje na temat wiatru ze stacji meteorologicznych (w takich przypadkach do oceny może być wymagane dłuższe okno czasowe, np. 20 minut, co również wydłuża czas trwania pomiaru). Minimalna wymagana prędkość porywów wiatru to 25 km/h (ponieważ funkcja tangens jest tak płaska na początku, pary danych są bliskie zera i niepewność dopasowania jest stosunkowo wysoka.)

Technika przedstawiona w tym rozdziale to dynamiczny system pomiarowy opracowany przez firmę Fakopp. Na rynku są dostępne inne produkty, ale o ile wiemy, wymagają one znacznie większych prędkości wiatru i znacznie dłuższego czasu pomiaru.



Ryc. 110.

Zestaw dla próby dynamicznej

## D. WŁAŚCIWOŚCI DRZEWA LUB ZIELONEGO DREWNA Z TABEL

Obliczenia poziomu bezpieczeństwa wymagają użycia pewnych właściwości drewna, które zostały określone podczas próby niszczącej i można je znaleźć w tabelach. Zaliczamy do nich współczynnik oporu (*drag factor*), prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej w drewnie (i jej zależność od kierunku), granicę elastyczności oraz wytrzymałość na ściskanie  $\sigma_{\text{ściskania}}$  (N/m<sup>2</sup>).

Wytrzymałość na ściskanie to zdolność do wytrzymywania obciążeń, które mogą zmienić wielkość materiału. Siła ta „utrzymuje” ciężar drzewa i część obciążenia wiatrem. Należy pamiętać, że do obliczeń można również wykorzystać granicę plastyczności (*yield strenght* – moduł sprężystości), czyli granicę, poniżej której nie występuje trwałe odkształcenie (jest ona podobna do granicy elastyczności, ale nie jest względna, jej jednostką jest N/m<sup>2</sup> lub N/mm<sup>2</sup>, a nie tylko %). Granica plastyczności jest nazywana porównawczą wytrzymałością w długości w katalogu stuttgarckim Wessolly’ego i Erba.



## 6. INNE NAPRĘŻENIA – ŚCINANIE I WZROST

Ogólnie naprężenie styczne to naprężenie wynikające z siły ścinającej, które przyczynia się do zmiany kształtu, jeśli badamy mniejszą część materiału.

Uszkodzenie drzewa spowodowane naprężeniem ścinającym ma miejsce wtedy, gdy pień lub inna część pęka pionowo. W takich przypadkach nośność znacznie się zmniejsza, co może być bardzo niebezpieczne.

$$\tau_{\text{ścianie}} = (F_{\text{ścianie}} S) / (I b)$$

$F_{\text{ścianie}}$  – siła ścinania (N)

$S$  – pierwszy moment pola (m<sup>3</sup>)

$I$  – drugi moment bezwładności przekroju (m<sup>4</sup>)

$b$  – szerokość prostopadła do ścinania (m)

$S$ ,  $I$  oraz  $b$  pochodzą z geometrii (obliczenie  $S$  przedstawiono poniżej).

Pod środkiem ciężkości drzewa:

$$F_{\text{ścianie}} = F_{\text{ścianie, wiatr}} + F_{\text{ścianie, samoobciążenie}}$$

$$F_{\text{ścianie, wiatr}} = F_{\text{wiatr}} \cos(\alpha)$$

$\alpha$  – kąt pnia drzewa względem pionu

$$F_{\text{ścianie, samoobciążenie}} = m_{\text{drzewo}} g \sin(\alpha)$$

$m_{\text{drzewo}}$  – masa drzewa (kg)

$g$  – przyspieszenie ziemskie (9.81 m/s<sup>2</sup>)

Pierwszy moment pola można obliczyć w następujący sposób:

$$S = \int y_i dA$$

Jeśli mamy kształt, powierzchnię, a także oś, pierwszy moment pola odnosi się do odległości pola lub jego części od osi. Dla okręgu wynosi on  $S = \frac{2}{3} R^3$ .

Należy pamiętać, że pierwszy moment pola trzeba obliczyć tylko – w odniesieniu do interesującej nas osi – dla górnej lub dolnej (lub jednej bocznej) części pola. Ścinanie należy obliczyć dla osi w środku pnia, ponieważ jest to miejsce, gdzie występuje największe naprężenie.

Naprężenie ścinające ma dwa indeksy, takie jak  $\tau_{RL}$ . Pierwszy indeks odnosi się do kierunku siły, podczas gdy drugi pokazuje wektor normalny, który jest prostopadły do płaszczyzny danej powierzchni. Z przedstawionego równania można obliczyć  $\tau_{RL}$ , podczas gdy tym, który powoduje pęknięcie pnia jest  $\tau_{LR}$ . Niemniej jednak  $\tau_{RL} = \tau_{LR}$  z powodu dualności.

Naprężenie ścinające może stać się krytyczne w przypadku niskich drzew z szerokimi pniami, jak można wywnioskować z prac Clausa Matthecka.

Naprężenie wzrostowe również pojawia się w przypadku drzew, dlatego też żywe drzewo jest materiałem wstępnie naprężonym. Według Brudiego i jego współpracowników ma to zwykle efekt zwiększający bezpieczeństwo. Wynika z tego, że dane dotyczące wytrzymałości uzyskane z pomiaru na suchej próbce drewna i użyte do obliczania bezpieczeństwa niedoszacowują momentu wiatru lub jego prędkości, które drzewo może przetrwać.



## 7. OBLICZENIA/RÓWNANIA DLA WSPÓŁCZYNNIKÓW BEZPIECZEŃSTWA

Na podstawie tego, co zostało przedstawione w poprzednich rozdziałach można stwierdzić, że obliczanie współczynników bezpieczeństwa jest przejrzyste. Istnieje sześć oddzielnych przypadków dotyczących tomografii, prób obciążeniowych i testów dynamicznych oraz pękania.

Współczynnik bezpieczeństwa pnia na uszkodzenie na podstawie tomografii (dla mierzonej warstwy i tylko wtedy, gdy pień nie jest pęknięty):

$$SF_{\text{tomogram_pnia}} = \sigma_{\text{siła ściskania}} / (\sigma_{\text{wiatr}} + \sigma_{\text{samoobciążenie}} + \sigma_{\text{zginanie}})$$

Współczynnik bezpieczeństwa systemu korzeniowego na uszkodzenie na podstawie statycznej próby obciążeniowej:

$$SF_{\text{ciągnięcie_korzeni}} = M_{\text{krytyczny}} / M_{\text{wiatr}}$$

Współczynnik bezpieczeństwa pnia na uszkodzenie na podstawie statycznej próby obciążeniowej:

$$SF_{\text{ciągnięcie_pnia}} = M_{\text{złamanie}} / M_{\text{wiatr}}$$

Współczynnik bezpieczeństwa systemu korzeniowego na uszkodzenie na podstawie testu dynamicznego:

$$SF_{\text{korzenie\_test dynamiczny}} = p_{\text{krytyczny}} / p_{\text{wiatr}}$$

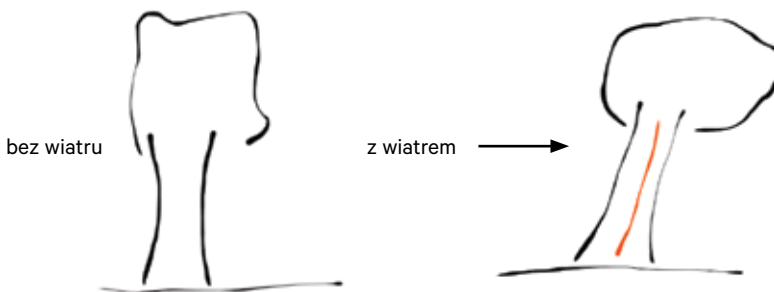
Współczynnik bezpieczeństwa pnia na uszkodzenie na podstawie testu dynamicznego:

$$SF_{\text{pień\_test dynamiczny}} = p_{\text{pęknięcie}} / p_{\text{wiatr}}$$

Współczynnik bezpieczeństwa pnia na pęknięcie (na podstawie geometrii):

$$SF_{\text{pęknięcie}} = \sigma_{\text{ściananie}} / \tau_{\text{ściananie}}$$

( $\sigma_{\text{ściananie}}$  jest wytrzymałością na ściananie danego gatunku z poprzednich badań, tabel lub normy)



Ryc. 111.

Podczas wiatru pień nieco się wydłuża (ze względu na naprężenie rozciągające) po stronie wystawionej na wiatr a nieco skraca się po stronie zawietrznej (ze względu na naprężenie ściskające). Te dwie wyobrażone części drzewa chcą się przesuwać” względem siebie. To naprężenie powoduje naprężenie ścinające (pomańczowa linia)

Tabela 1.1.

GATUNEK	WILGOTNOŚĆ	ŚCINANIE WZDŁUŻ WŁÓKIEN (kPa)
<b><i>Alnus rubra</i></b> (Olsza czerwona) Alder, red	drewno zielone 12%	5300 7400
<b><i>Fraxinus nigra</i></b> (Jesion czarny) Ash, black	drewno zielone 12%	5900 10800
<b><i>Fraxinus quadrangulata</i></b> (Jesion czterograniasty) Ash, blue	drewno zielone 12%	10600 14000
<b><i>Fraxinus pennsylvanica</i></b> (Jesion pensylwański) Ash, green	drewno zielone 12%	8700 13200
<b><i>Fraxinus latifolia</i></b> (Jesion szerokolistny) Ash, oregon	drewno zielone 12%	8200 12300
<b><i>Fraxinus americana</i></b> (Jesion amerykański) Ash, white	drewno zielone 12%	9300 13200
<b><i>Populus grandidentata</i>*</b> Aspen, bigtooth	drewno zielone 12%	5000 7400
<b><i>Populus tremuloides</i></b> (Topola osikowa) Aspen, quaking	drewno zielone 12%	4600 5900
<b><i>Tilia americana</i></b> (Lipa amerykańska) Basswood, American	drewno zielone 12%	4100 6800
<b><i>Fagus grandifolia</i></b> (Buk wielkolistny) Beech, American	drewno zielone 12%	8900 13900
<b><i>Betula papyrifera</i></b> (Brzoza papierowa) Birch, paper	drewno zielone 12%	5800 8300
<b><i>Betula lenta</i></b> (Brzoza cukrowa) Birch, sweet	drewno zielone 12%	8500 15400
<b><i>Betula alleghaniensis</i></b> (Brzoza żółta) Birch, yellow	drewno zielone 12%	7700 13000
<b><i>Juglans cinerea</i></b> (Orzech szary) Butternut	drewno zielone 12%	5200 8100
<b><i>Prunus serotina</i></b> (Czeremcha amerykańska) Cherry, black	drewno zielone 12%	7800 11700
<b><i>Castanea dentata</i></b> (Kasztan amerykański) Chestnut, American	drewno zielone 12%	5500 7400
<b><i>Populus balsamifera</i></b> (Topola balsamiczna) Cottonwood, balsam poplar	drewno zielone 12%	3400 5400
<b><i>Populus trichocarpa</i></b> (Topola kalifornijska) Cottonwood, black	drewno zielone 12%	4200 7200
<b><i>Populus deltoides</i></b> (Topola amerykańska) Cottonwood, eastern	drewno zielone 12%	4700 6400
<b><i>Ulmus americana</i></b> (Wiąz amerykański) Elm, American	drewno zielone 12%	6900 10400
<b><i>Ulmus thomasi</i>*</b> Elm, rock	drewno zielone 12%	8800 13200
<b><i>Ulmus rubra</i></b> (Wiąz czerwony) Elm, slippery	drewno zielone 12%	7700 11200
<b><i>Celtis occidentalis</i></b> (Wiązowiec zachodni) Hackberry	drewno zielone 12%	7400 11000
<b><i>Carya illinoensis</i></b> (Orzesznik jadalny/pekanowy) Hickory, pecan	drewno zielone 12%	10200 14300
<b><i>Carya tomentosa</i></b> (Orzesznik owłosiony) Hickory, true, mockernut	drewno zielone 12%	8800 12000

GATUNEK	WILGOTNOŚĆ	ŚCINANIE WZDŁUŻ WŁÓKIEN (kPa)
<b><i>Carya glabra</i></b> (Orzesznik nagi) Hickory, true, pignut	drewno zielone 12%	9400 14800
<b><i>Carya ovata</i></b> (Orzesznik pięciolistkowy) Hickory, true, shagbark	drewno zielone 12%	10500 16800
<b><i>Carya laciniosa</i></b> (Orzesznik siedmiolistkowy) Hickory, true, shellbark	drewno zielone 12%	8200 14500
<b><i>Gleditsia triacanthos</i></b> (Glediczyja trójcierniowa) Honeylocust	drewno zielone 12%	11400 15500
<b><i>Robinia pseudoacacia</i></b> (Robinia akacjowa) Locust, black	drewno zielone 12%	12100 17100
<b><i>Magnolia acuminata</i></b> (Magnolia drzewiasta) Magnolia, cucumber tree	drewno zielone 12%	6800 9200
<b><i>Magnolia grandiflora</i></b> (Magnolia wielkokwiatowa) Magnolia, southern	drewno zielone 12%	7200 10500
<b><i>Acer macrophyllum</i></b> (Klon wielkolistny) Maple, bigleaf	drewno zielone 12%	7700 11900
<b><i>Acer nigrum*</i></b> ( <i>Acer saccharum ssp. nigrum</i> ) Maple, black	drewno zielone 12%	7800 12500
<b><i>Acer rubrum</i></b> (Klon czerwony) Maple, red	drewno zielone 12%	7900 12800
<b><i>Acer saccharinum</i></b> (Klon srebrzysty) Maple, silver	drewno zielone 12%	7200 10200
<b><i>Acer saccharum</i></b> (Klon cukrowy) Maple, sugar	drewno zielone 12%	10100 16100
<b><i>Quercus velutina</i></b> (Dąb barwierski) Oak, red – black	drewno zielone 12%	8400 13200
<b><i>Quercus pagoda*</i></b> Oak, red – cherrybark	drewno zielone 12%	9100 13800
<b><i>Quercus laurifolia*</i></b> Oak, red – laurel	drewno zielone 12%	8100 12600
<b><i>Quercus rubra</i></b> (Dąb czerwony) Oak, red – northern red	drewno zielone 12%	8300 12300
<b><i>Quercus palustris</i></b> (Dąb błotny) Oak, red – pin	drewno zielone 12%	8900 14300
<b><i>Quercus coccinea</i></b> (Dąb szkarłatny) Oak, red – scarlet	drewno zielone 12%	9700 13000
<b><i>Quercus falcata*</i></b> Oak, red – southern red	drewno zielone 12%	6400 9600
<b><i>Quercus nigra</i></b> (Dąb wodny) Oak, red – water	drewno zielone 12%	8500 13900
<b><i>Quercus macrocarpa</i></b> (Dąb wielkoowocowy) Oak, white – bur	drewno zielone 12%	9300 12500
<b><i>Quercus montana</i></b> Oak, white – chestnut	drewno zielone 12%	8300 10300
<b><i>Quercus virginiana</i></b> (Dąb wirginijski) Oak, white – southern live	drewno zielone 12%	15200 18300
<b><i>Quercus lyrata</i></b> (Dąb lirolistny) Oak, white – overcup	drewno zielone 12%	9100 13800
<b><i>Quercus stellata*</i></b> Oak, white – post	drewno zielone 12%	8800 12700

GATUNEK	WILGOTNOŚĆ	ŚCINANIE WZDŁUŻ WŁÓKIEN (kPa)
<b>Quercus michauxii*</b> Oak, white – swamp chestnut	drewno zielone 12%	8700 13700
<b>Quercus bicolor</b> (Dąb dwubarwny) Oak, white – swamp white	drewno zielone 12%	9000 13800
<b>Quercus alba</b> (Dąb biały) Oak, white – white	drewno zielone 12%	8600 13800
<b>Sassafras albidum</b> (Sasafras lekarski) Sassafras	drewno zielone 12%	6600 8500
<b>Liquidambar styraciflua</b> (Ambrowiec balsamiczny) Sweetgum	drewno zielone 12%	6800 11000
<b>Platanus occidentalis</b> (Platan zachodni) Sycamore, American	drewno zielone 12%	6900 10100
<b>Nyssa sylvatica</b> (Błotnia leśna) Tupelo, black	drewno zielone 12%	7600 9200
<b>Nyssa aquatica</b> (Błotnia wodna) Tupelo, water	drewno zielone 12%	8200 11000
<b>Juglans nigra</b> (Orzech czarny) Walnut, black	drewno zielone 12%	8400 9400
<b>Salix nigra</b> (Wierzba czarna) Willow, black	drewno zielone 12%	4700 8600

\* – brak nazwy polskiej

Tabela 11.

Wytrzymałość na ścinanie niektórych gatunków drewna twardego

Źródło: (<https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr113/ch04.pdf>).

*Mechanical Properties of Wood* David W. Green, Jerrold E. Winandy, and David E. Kretschmann, From Forest Products Laboratory. 1999. *Wood handbook—Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 p.*



Tabela 1.2.

GATUNEK		MODUŁ ELASTYCZNOŚCI (N/MM <sup>2</sup> )	PORÓWNYWALNA SIŁA DŁUGOŚCI (N/MM <sup>2</sup> )	GRANICA ELASTYCZNOŚCI (%)	PROPONOWANY WSPÓŁCZYNNIK OPORU AERODYNAMICZNEGO (CW)
<i>Abies alba</i>	<i>Jodła pospolita</i>	9500	15	0,16	0,2
<i>Acer campestre</i>	<i>Klon polny</i>	6000	25,5	0,43	0,25
<i>Acer negundo</i>	<i>Klon jesionolistny</i>	5600	20	0,36	0,25
<i>Acer pseudoplatanus</i>	<i>Klon jawor</i>	8500	25	0,29	0,25
<i>Acer saccharinum</i>	<i>Klon srebrzysty</i>	6000	20	0,33	0,25
<i>Acer saccharum</i>	<i>Klon cukrowy</i>	5450	20	0,37	0,25
<i>Aesculus hippocastanum</i>	<i>Kasztanowiec zwyczajny</i>	5250	14	0,26	0,35
<i>Ailanthus altissima</i>	<i>Bożodrzew gruczołkowany</i>	6400	16	0,25	0,15
<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Olsza czarna</i>	8000	20	0,25	0,25
<i>Betula pendula</i>	<i>Brzoza brodawkowata</i>	7050	22	0,31	0,12
<i>Carpinus betulus</i>	<i>Grab pospolity</i>	8800	16	0,18	0,2
<i>Castanea sativa</i>	<i>Kasztan jadalny</i>	6000	25	0,42	0,25
<i>Cedrus deodara</i>	<i>Cedr himalajski</i>	7650	15	0,2	0,2
<i>Cercis siliquastrum</i>	<i>Judaszowiec południowy</i>	0	15	-	0,2
<i>Chamaecyparis lawsonia</i>	<i>Cyprysik Lawsona</i>	7350	20	0,27	0,2
<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Buk zwyczajny</i>	8500	22,5	0,26	0,25-0,30
<i>Fraxinus excelsior</i>	<i>Jesion wyniosły</i>	6250	26	0,42	0,2
<i>Larix decidua</i>	<i>Modrzew europejski</i>	5035	17	0,32	0,15
<i>Liriodendron tulipifera</i>	<i>Tulipanowiec amerykański</i>	5000	17	0,34	0,25
<i>Picea abies</i>	<i>Świerk pospolity</i>	9000	21	0,23	0,2
<i>Picea omorika</i>	<i>Świerk serbski</i>	9000	16	0,18	0,2
<i>Pinus pinaster</i>	<i>Sosna nadmorska</i>	8500	18	0,21	0,2
<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Sosna zwyczajna</i>	5800	17	0,29	0,15
<i>Platanus x acerifolia</i>	<i>Platan klonolistny</i>	6250	27	0,43	0,25
<i>Populus alba</i>	<i>Topola biała</i>	6400	20	0,31	0,2
<i>Populus nigra</i>	<i>Topola czarna</i>	6520	20	0,31	0,2
<i>Populus nigra 'Italica'</i>	<i>Topola włoska</i>	6800	16	0,24	0,3
<i>Populus x canescens</i>	<i>Topola szara</i>	6050	20	0,33	0,2-0,25
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	<i>Daglezja zielona</i>	1000	20	0,2	0,2
<i>Pyrus communis</i>	<i>Grusza pospolita</i>	5800	17	0,29	0,3
<i>Quercus robur</i>	<i>Dąb szypułkowy</i>	6900	28	0,41	0,25
<i>Quercus rubra</i>	<i>Dąb czerwony</i>	7200	20	0,28	0,25
<i>Robinia monophyla</i>	<i>Robinia akacja „monophyla”</i>	5200	20	0,38	0,15-0,2
<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Robinia akacja</i>	7050	20	0,28	0,15
<i>Salix alba</i>	<i>Wierzba biała</i>	7750	16	0,21	0,2
<i>Salix alba 'Tristis'</i>	<i>Wierzba płacząca</i>	7000	16	0,23	0,2
<i>Sequoiadendron giganteum</i>	<i>Mamutowiec olbrzymi</i>	4550	18	0,4	0,2
<i>Sophora japonica</i>	<i>Perekłowiec japoński</i>	6450	20	0,31	0,15
<i>Sorbus aria</i>	<i>Jarząb mączny</i>	6000	16	0,27	0,25
<i>Tilia cordata</i>	<i>Lipa drobnolistna</i>	8300	20	0,24	0,25
<i>Tilia euclora</i>	<i>Lipa krymska</i>	7000	17,5	0,25	0,25
<i>Tilia platyphyllos</i>	<i>Lipa szerokolistna</i>	8000	20	0,25	0,25
<i>Tilia tomentosa</i>	<i>Lipa srebrzysta</i>	8350	20	0,24	0,25-0,30
<i>Tilia x hollandica</i>	<i>Lipa holenderska</i>	4500	17	0,38	0,25
<i>Ulmus glabra</i>	<i>Wiąz górski</i>	5700	20	0,35	0,25

Tabela 1.2.

Wytrzymałość drewna wg Wessolly'ego i Erba

Źródło: "Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle", Patzer Verlag, Berlin 1998.





POJECIA FIZYCZNE

SF	- współczynnik bezpieczeństwa (brak jednostki)
$m_{\text{drzewo}}$	- masa drzewa (kg)
$\rho_{\text{drzewo}}$	- gęstość (kg/m <sup>3</sup> ) „zielonego” drewna (żywego materiału drzewnego)
H	- wysokość drzewa (m)
$D_{1,3}$	- pierśnica (m) – średnica pnia na wysokości 1,3 m
$F_{\text{wiatr}}$	- napór wiatru (N)
$\rho_{\text{powietrze}}$	- gęstość powietrza (zależy od temperatury, ale zwykle zakłada się 1,2 kg/m <sup>3</sup> )
$C_{\text{gatunek drzewa}}$	- współczynnik oporu aerodynamicznego drzewa, specyficzny dla danego gatunku (brak jednostki)
$A_{\text{drzewo}}$	- powierzchnia drzewa (m <sup>2</sup> ) wystawiona na działanie wiatru
$v_{\text{wiatr}}$	- prędkość wiatru (m/s)
$M_{\text{wiatr}}$	- moment wiatru (Nm)
$h_{\text{środek korony}}$	- wysokość środka korony (m)
$\sigma_{\text{wiatr}}$	- naprężenie ściskające wywołane podmuchem wiatru (N/m <sup>2</sup> )
z	- odległość od osi obojętnej (jest to oś, w której nie ma naprężeń ani odkształceń podczas zginania) (m)
I	- drugi moment bezwładności przekroju (m <sup>4</sup> )
$h_{\text{warstwa}}$	- wysokość warstwy pnia będącej przedmiotem pomiarów (m)
$p_{\text{wiatr}}$	- ciśnienie spowodowane wiatrem (N/m <sup>2</sup> )
g	- standardowe przyspieszenie ziemskie (9.81 m/s <sup>2</sup> )
$A_{\text{przekrój}}$	- powierzchnia całego przekroju (m <sup>2</sup> )
$A_{\text{drewno}}$	- powierzchnia części nośnej przekroju (m <sup>2</sup> )
$\alpha$	- kąt pnia drzewa względem pionu
$\varphi_{\text{calc}}$	- dopasowana inklinacja
F	- zmierzona siła (N)
$F_{\text{krytyczna}}$	- oszacowana siła krytyczna/wywracająca (N)
L	- wysokość liny na badanym drzewie (m)
$\alpha$	- kąt liny (liczony z odpowiednich odległości)
l	- pierwotna długość elastometru (μm)
$\Delta l$	- zmiana długości (μm)
$\sigma_{\text{siła ściskająca}}$	- wytrzymałość na ściskanie (N/m <sup>2</sup> )
$M_{\text{złamanie}}$	- moment, w którym pień ulega uszkodzeniu/złamaniu
$p_{\text{krytyczne}}$	- ciśnienie, które może wywrócić drzewo
$p_{\text{złamanie}}$	- ciśnienie, które może złamać drzewo
$F_{\text{ściananie}}$	- siła ścinania (N)
S	- pierwszy moment pola (m <sup>3</sup> )
b	- szerokość prostopadła do ścinania (m)
$\sigma_{\text{ściananie}}$	- wytrzymałość na ścinanie



RÓWNANIA

SF = (nośność) / (obciążenia)

$$m_{\text{drzewo}} = \rho_{\text{drzewo}} H D_{1,3}^2 \pi / 4$$

$$F_{\text{wiatr}} = 0.5 \rho_{\text{powietrze}} c_{\text{gatunek drzewa}} A_{\text{drzewo}} v_{\text{wiatr}}^2$$

$$M_{\text{wiatr}} = F_{\text{wiatr}} h_{\text{środek korony}}$$

$$\sigma_{\text{wiatr}} = M_{\text{wiatr}} (z/l)$$

$$\sigma_{\text{wiatr}} = F_{\text{wiatr}} (h_{\text{środek korony}} - h_{\text{warstwa}}) (z/l)$$

$$\rho_{\text{wiatr}} = F_{\text{wiatr}} / (c_{\text{gatunek drzewa}} A_{\text{drzewo}}) = 0.5 \rho_{\text{powietrze}} v_{\text{wiatr}}^2$$

$$I_{\text{okrąg}} = (\pi d^4) / 64$$

$$\sigma_{\text{samoobciążenie}} = m_{\text{drzewo}} g / A_{\text{przekrój}}$$

$$m_{\text{drzewo}} = A_{\text{przekrój}} (H - h_{\text{warstwa}}) \rho_{\text{drzewo}}$$

$$\sigma_{\text{samoobciążenie}} = (A_{\text{przekrój}} (H - h_{\text{warstwa}}) \rho_{\text{drzewo}} g) / A_{\text{przekrój}}$$

$$\sigma_{\text{samoobciążenie\_rozkład}} = [(H - h_{\text{warstwa}}) \rho_{\text{drzewo}} g] (A_{\text{przekrój}} / A_{\text{drewno}})$$

$$\sigma_{\text{zginanie}} = (m_{\text{drzewo}} h_{\text{środek korony}} \sin \alpha) (z/l)$$

$$\varphi_{\text{obl}} = 0,33 \tan(1,35 F / F_{\text{krytyczna}}) + 0,33 (F / F_{\text{krytyczna}})^2 - 0,1 (F / F_{\text{krytyczna}})$$

$$M_{\text{krytyczna}} = F_{\text{krytyczna}} L \cos \alpha$$

$$\epsilon = \Delta l / l$$

$$\rho_{\text{wiatr}} = 0.5 \rho_{\text{powietrze}} v_{\text{wiatr}}^2$$

$$\sigma_{\text{ścinanie}} = (F_{\text{ścinanie}} S) / (I b)$$

$$F_{\text{ścinanie}} = F_{\text{ścinanie, wiatr}} + F_{\text{ścinanie, samoobciążenie}}$$

$$F_{\text{ścinanie, wiatr}} = F_{\text{wiatr}} \cos(\alpha)$$

$$F_{\text{ścinanie, samoobciążenie}} = m_{\text{drzewo}} g \sin(\alpha)$$

$$S = \int y_i dA \quad (\text{pierwszy moment pola})$$

$$S_{\text{okrąg}} = \frac{2}{3} R^3$$

Współczynnik bezpieczeństwa pnia na uszkodzenie na podstawie tomografii (dla mierzonej warstwy i tylko wtedy, gdy pień nie jest pęknięty):

$$SF_{\text{tomogram\_pnia}} = \sigma_{\text{siła ściskania}} / (\sigma_{\text{wiatr}} + \sigma_{\text{samoobciążenie}} + \sigma_{\text{zginanie}})$$

Współczynnik bezpieczeństwa systemu korzeniowego na uszkodzenie na podstawie statycznej próby obciążeniowej:

$$SF_{\text{ciągnięcie\_korzeni}} = M_{\text{krytyczny}} / M_{\text{wiatr}}$$

Współczynnik bezpieczeństwa pnia na uszkodzenie na podstawie statycznej próby obciążeniowej:

$$SF_{\text{ciągnięcie\_pnia}} = M_{\text{złamanie}} / M_{\text{wiatr}}$$

Współczynnik bezpieczeństwa systemu korzeniowego na uszkodzenie na podstawie testu dynamicznego:

$$SF_{\text{korzenie\_test dynamiczny}} = p_{\text{krytyczny}} / p_{\text{wiatr}}$$

Współczynnik bezpieczeństwa pnia na uszkodzenie na podstawie testu dynamicznego:

$$SF_{\text{pień\_test dynamiczny}} = p_{\text{pęknięcie}} / p_{\text{wiatr}}$$

Współczynnik bezpieczeństwa pnia na pęknięcie (na podstawie geometrii):

$$SF_{\text{pęknięcie}} = \sigma_{\text{ścinanie}} / \tau_{\text{ścinanie}}$$

( $\sigma_{\text{ścinanie}}$  jest wytrzymałością na ścinanie danego gatunku z poprzednich badań, tabel lub normy).



## II.

# *Diagnostyka instrumentalna: rozkład drewna*

Rozkład drewna jest ważną oznaką dotyczącą zdrowia drzewa. Czasami jego ślady są widoczne przy uszkodzeniach lub sięgają kory od środka pnia, ale może też się zdarzyć, że pozostają w środku drzewa. Zazwyczaj stwierdzenie rozkładu drewna rozpoczyna się od oceny wizualnej, jeśli istnieją jego oznaki (np. obecność owocników grzybów), a dźwięk uderzenia gumowego młotka diagnostycznego może ulec zmianie, gdy obszar rozkładu jest znaczny. Lokalizowanie wypróchnienia i szacowanie obszaru, który została nim objęty, jest możliwe na różnych poziomach i przy użyciu nieniszczących lub mało inwazyjnych narzędzi i instrumentów.

W niniejszym rozdziale zaprezentowano proste narzędzia, takie jak świder przyrostowy i fraktometr, jednoliniowe pomiary akustyczne do wykrywania dużych śladów rozkładu, wiertarkę oporową, która również dostarcza informacji wzdłuż jednego kierunku, a także tomografy pozwalające uzyskać szczegółowe tomogramy całej badanej warstwy. Dodatkowo opisano użycie średnicomierza. W dalszej kolejności przedstawiono związek pomiędzy obszarami, które uległy rozkładowi, a bezpieczeństwem czy współczynnikiem bezpieczeństwa. Uwzględniono również studia przypadków skupione wokół tomografii akustycznej, ponieważ technika ta jest już niemal codzienną praktyką. Należy pamiętać, że wyżej wymienione techniki nie dają informacji o całym drzewie, a jedynie o jego części lub warstwie na wysokości dokonanego pomiaru. Podstawową techniką jest ocena wizualna, która powinna pomóc zdecydować, czy zastosowanie jakichkolwiek instrumentów jest konieczne, czy też nie, a jeśli tak – jakie części drzewa i na jakiej wysokości powinny zostać zbadane.



## 1. ŚWIDER PRZYROSTOWY I FRAKTOMETR

Świder przyrostowy to narzędzie przypominające wyglądem wiertło z tuleją, za pomocą którego można pobrać próbkę drewna z pnia. Pobrana próbka może zostać zbadana, nawet wzrokowe informacje mogą być bardzo użyteczne. Można obejrzeć objęte rozkładem, uszkodzone drewno.



Ryc. 2.1.  
Pobieranie próbki za pomocą  
świda przyrostowego



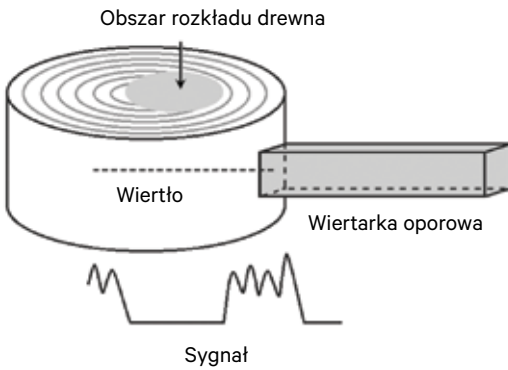
Ryc. 2.2.  
Próbka (zdrowego) drewna widoczna  
w tulei świda

Pobieranie próbek świdrem przyrostowym trwa zwykle kilka minut, ale czasami wymaga większego wysiłku fizycznego. Tarcie pojawiające się w trakcie badania powoduje wzrost temperatury, przez co zarówno próbka jak i świder mogą być gorące. **Techniki tej nie można zaliczyć do metod nieinwazyjnych, ponieważ wynikiem pobierania próbek jest zazwyczaj otwór o średnicy nawet 10–15 mm sięgający daleko w głąb pnia.** Otwór ten należy odpowiednio zabezpieczyć, aby zachować dobry stan drzewa. Zaletą stosowania tej metody jest pozyskanie próbki, którą można szczegółowo przeanalizować. (Próbki pobrane świdrem mogą posłużyć np. do oceny ostatnich przyrostów drzewa).

Fraktometr to przydatne narzędzie, które zostało stworzone z myślą o dokonaniu oceny próbki pobranej za pomocą świda przyrostowego nawet w terenie. Urządzenie to zgina i łamie próbkę, udzielając informacji o jej wytrzymałości. Wytrzymałość ta zależy od gatunku drzewa (do sprzętu dołączana jest tabela z odpowiednimi wartościami dla danego gatunku), kierunku zginania (zginanie zgodnie z kierunkiem włókna oraz poprzecznie) oraz stanu drewna (zdrowe lub w rozkładzie).

## 2. WIERTARKA OPOROWA

Wiertarka oporowa to urządzenie składające się ze specjalnego, cienkiego (kilka milimetrów średnicy, w Polsce zwykle 3 mm) i długiego wiertła, które wwierca się w drzewo, badając jego opór. Nawet niewielkie zmiany w łatwości, z jaką wwierca się wiertło, mogą świadczyć o zmianach w jakości drewna. Dzięki tej technice można odnaleźć nie tylko ślady próchnienia, ale również pierścienie przyrostu drzewa (zob. ryc. 2.3.), które mogą być następnie zwizualizowane oraz zapisane, jeśli sprzęt posiada taką funkcję. Zapis wiertarki można też wydrukować na papierze. Podczas wiercenia zarówno drewno jak i wiertło stają się bardzo gorące. Temperatura może mieć działanie sterylizujące, ale powstały w drzewie otwór należy odpowiednio zabezpieczyć.



Ryc. 23.

Zastosowanie wiertarki oporowej. Kiedy wiertło penetruje drewno, zmiany w napotkanym materiale wysyłają określony sygnał. Na rezystogramie pojawiają się przyrosty i ślady próchnienia

Wykonanie jednego pomiaru zajmuje około 5 minut, ale zazwyczaj należy wykonać kilka dla każdej badanej warstwy lub wysokości drzewa. Jeden odwiert daje bowiem informacje na temat jednej linii. Ta technika jest zalecana po dokonaniu jednoliniowego pomiaru akustycznego oraz po wykonaniu tomografii, ponieważ świetnie się sprawdza jako działanie kontrolne. Jednak – według badań Lin i in. 2013 – badania wiertarką oporową może przerwać istniejące bariery grodziujące wewnątrz pnia i przyczynić się do przeniesienia grzybów na zdrowe części drzewa. Wiertarka sama w sobie jest zwykle dość ciężka, a utrzymanie jej prostopadle do powierzchni kory wymaga pewnego wysiłku. Jeśli w trakcie badania napotka się duży obszar wypróchnienia, może dojść do zgięcia wiertła w środku pnia drzewa. Dlatego też zaleca się przerwanie wiercenia, gdy odczyt urządzenia wskazuje na znaczny „pusty” obszar.



Ryc. 24.

Wiertarka oporowa podczas prezentacji, po wykonaniu odwiertu w pniu (na ekranie widoczna jest część odczytu urządzenia – obraz można przewijać i oceniać)

### 3. SYGNAŁY AKUSTYCZNE I ULTRADŹWIĘKOWE W DREWNIĘ ORAZ POMIARY AKUSTYCZNE W JEDNEJ LINII

Dźwięk dobrze się rozchodzi w materiałach drewnianych, co dobrze słychać w różnych instrumentach muzycznych.

Gdy atomy i cząsteczki wibrują, wprawiają w wibracje również inne cząsteczki wokoło i w ten sposób rozchodzi się sygnał, fala dźwiękowa. Cząsteczki w materiale drewnianym są ze sobą powiązane, więc stosunkowo łatwo jest wprawić w drgania również te, które z nimi sąsiadują.

W powietrzu lub w drewnie o gorszej jakości fala dźwiękowa rozchodzi się wolniej. Wiedząc to, można sprawdzić jakość drewna używając metody nieinwazyjnej. Sygnał dźwiękowy rozchodzi się szybko (około 2000 m/s prostopadłe do włókna) w zdrowym drewnie (dokładna wartość zależy od gatunku), ale znacznie wolniej (około 340 m/s) w powietrzu. Ponieważ różnica ta jest dość duża, a zatem jeśli sygnał dźwiękowy napotka spróchniałą przestrzeń i obiegnie ją poprzez zdrowe drewno, dotrze on szybciej na drugą stronę drzewa, niż sygnał idący w tym samym kierunku, ale na wprost przez wypróchniałą obszar. Zjawisko to zostało przedstawione na ryc. 2.5. Z drugiej strony porównując zdrowy oraz rozłożony fragment drzewa można zauważyć, że w tym pierwszym fala dźwiękowa rozchodzi się znacznie szybciej.

Najprostszy rodzaj pomiaru to 1D lub TOF (*time-of-flight*), a do jego przeprowadzenia potrzebny jest tylko czujnik generujący sygnał oraz odbiornik.

Należy pamiętać o tym, że metody akustyczne wykorzystują najszybszy sygnał, czyli ten, który przechodzi prosto przez drewno w kierunku detektora w przypadku zdrowego materiału oraz sygnał idący „dookoła”, spowalnia wskutek wypróchnienia. Jeśli drewno jest rozłożone, nie dostajemy informacji bezpośrednio z obszaru rozkładu.

Istnieją również materiały, w których fala dźwiękowa może poruszać się z taką samą prędkością, jak w zdrowym drewnie lub nawet szybciej. Na przykład, jeśli w wypróchnieniu lub w ubytku znajduje się lód lub beton, fala dźwiękowa przechodzi przez nie bezpośrednio, co może prowadzić do uznania tego fragmentu drzewa za zdrowy. Aby uniknąć tego rodzaju błędów, nie zaleca się przeprowadzania pomiarów akustycznych, jeśli środek drzewa może być zmarznięty. Nawet, jeśli obecna temperatura jest powyżej zera, należy uwzględnić warunki pogodowe panujące w poprzednich dniach i rozważyć, czy drzewo mogło „zamarznąć”, czy też nie.

Czas rozchodzenia się fal dźwiękowych nie zależy jedynie od stanu drzewa. Istotna jest również – oczywiście – odległość pomiędzy czujnikami. Aby wartości były porównywalne, prędkość jest obliczana z danych czasu i odległości, a następnie uwzględniana w analizie.

Dane dotyczące prędkości zostały zmierzone w laboratoriach i w terenie i można je znaleźć w tabelach dla konkretnych gatunków drzew. Można również obliczyć prędkość referencyjną poprzez przeanalizowanie pomiarów wykonanych na zdrowych partiach tego samego drzewa.

Prędkość fali dźwiękowej zależy od gatunku drzewa, od jego kondycji oraz kierunku pomiaru. Dzięki pomiarom wykonywanym w jednej linii można uzyskać szacunkowe informacje na temat wielkości obszaru, który uległ rozkładowi (jeśli w drzewie jest wypróchnienie). Potrzebna do tego jest wartość zmierzonej prędkości ( $V_{\text{zmierzona}}$ ) oraz referencyjnej prędkości fali dźwiękowej ( $V_{\text{referencyjna}}$ ). Korzystając z poniższego wzoru można obliczyć w % względny spadek prędkości fali dźwiękowej (RDSV – *relative decrease of velocity*). Pomiar 1D są zazwyczaj wykonane w kierunku promieniowym, na linii lub liniach, które przechodzą przez środek (zob. ryc. 2.5.). Pomiar TOF można wykonać wzdłuż pnia drzewa oceniając jakość drewna, co może pomóc w wybraniu najlepszej jakości drewna na plantacji.





$$RDSV = (V_{\text{referencyjna}} - V_{\text{mierzona}}) / V_{\text{referencyjna}} * 100$$

Ryc. 2.5.

Przykład pomiaru akustycznego TOF (time-of-flight) lub 1D. Czas rozchodzenia się fali dźwiękowej jest mierzony pomiędzy czujnikiem emitującym sygnał, a odbiornikiem. Jeśli w danym miejscu występuje wypróchnienie, sygnał „biegnie dookoła”, a mierzony czas wydłuża się

WIELKOŚĆ OBSZARU WYPRÓCHNIENIA W %	WZGLĘDNY SPADEK PRĘDKOŚCI W %
0	0
5	0
10	0
15	0-10
20	10-20
25	10-20
30	20-30
40	20-40
50	30-50
>50	>50

Tabela 2.1.

Zależność pomiędzy względnym spadkiem prędkości, a stosunkiem powierzchni wypróchnienia badanej warstwy

Sygnaly dźwiękowe i ultradźwiękowe zachowują się w podobny sposób i są wykorzystywane w różnych urządzeniach. Istnieją jednak pewne różnice:

- ultradźwięki są generowane przez czujnik/nadajnik, którego nie należy uderzać młotkiem,
- czujniki ultradźwiękowe muszą być bardzo dobrze połączone z materiałem drzewnym; czujnik tego typu może wymagać trochę żelu lub może być konieczne przytrzymanie go i mocne przyciskanie do drzewa w trakcie wykonywania pomiaru,
- fale dźwiękowe są generowane poprzez uderzenie metalowego młotka w czujniki/punkty pomiarowe.



Ryc. 2.6.

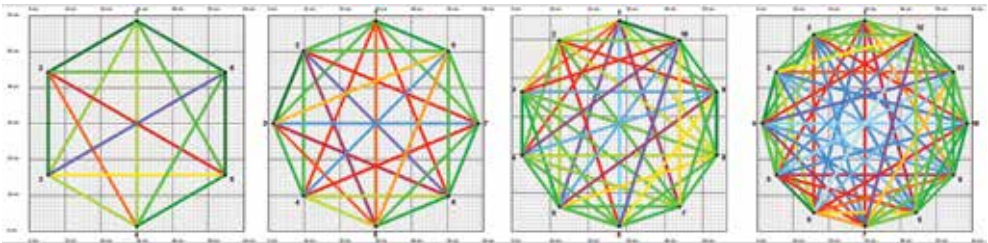
Pomiar sekwoi (grubość kory 7–10 cm) w parku (po lewej i prawej stronie), czujnik z długim (12 cm) i zwykłym (6 cm) szpikulcem (w środku)

Czujniki akustyczne muszą być dobrze połączone, a ich szpikulce powinny dotykać materiału drzewnego. Oznacza to, że powinny być na tyle długie, aby przebić się przez korę. W przypadku wielu gatunków drzew czujnik z 6 cm szpikulcem jest wystarczający, ale w niektórych sytuacjach należy użyć dłuższego. Na przykład, kiedy musieliśmy dokonać pomiaru sekwoi rosnących w parku (około 100-letnie drzewa), użyliśmy czujników o długości szpikulca 12 cm. – zobacz ryc. 2.6.

#### 4. TOMOGRAFY AKUSTYCZNE

Akustyczne i ultradźwiękowe tomografie bazują na tym samym zjawisku fizycznym, które opisano w poprzednim rozdziale. W momencie przeprowadzania tomografii, wokół pnia lub konara umieszcza się wiele czujników, a następnie dokonuje się pomiaru przechodzenia sygnałów akustycznych pomiędzy nimi. Pomiar pozwala uzyskać informacje na temat danej linii przesyłu, a na podstawie tych danych można obliczyć tomogramy 2D.

Jak pokazano na ryc. 2.7., wzrost liczby linii pomiarowych prowadzi również do mniejszych, niezmiernych obszarów. Rozdzielczość i rzetelność obliczanych tomogramów wzrasta, jeśli używa się większej liczby czujników. Jednakże nie zaleca się umieszczania czujników w odległości mniejszej niż 5 cm od siebie.



Ryc. 2.7.

*Jeśli wokół pnia znajduje się wiele czujników, pojawi się więcej ścieżek pomiarowych, linii pomiarowych pomiędzy nimi*

Obliczanie tomogramu odbywa się za pomocą oprogramowania i obejmuje kilka etapów, łącznie z wprowadzaniem poprawek dotyczących czasu i kierunku, ponieważ materiał drzewny nie jest jednolity, a podczas penetracji sygnały dźwiękowe zależą również od kierunku. (To właśnie dlatego pomiar 1D jest wykonywany na linii przechodzącej przez środek lub wzdłuż pnia, a nie w innych kierunkach.)

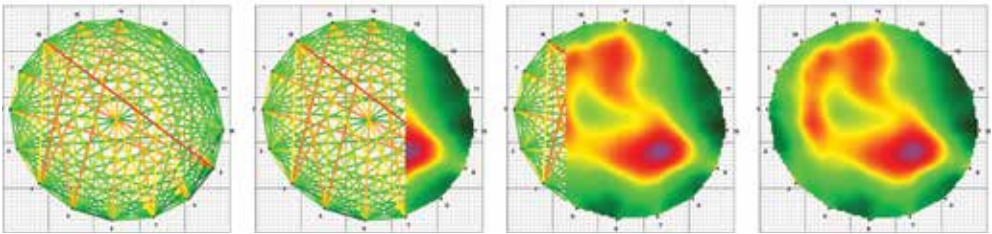
Odtworzenie obrazu mogłoby się odbyć również na papierze, ale z powodu liczby etapów oraz ilości informacji to rozwiązanie nie jest praktykowane ani w realnych testach ani do celów szkoleniowych. Mierzona warstwa powinna być prostopadła do kierunku wzrostu drzewa, co zwykle oznacza, że powinna być pozioma. Zaleca się również zmierzenie wysokości badanej warstwy: nie tylko po to, aby wiedzieć, gdzie dokonano pomiaru, ale także w celu oszacowania obciążenia i stworzenia tomogramu 3D.

Używanie odpowiedniej geometrii mierzonych warstw wpływa na wyniki badania. Jeśli odległości między czujnikami nie są zgodne z rzeczywistymi, wpływa to na błędy w obliczaniu prędkości.

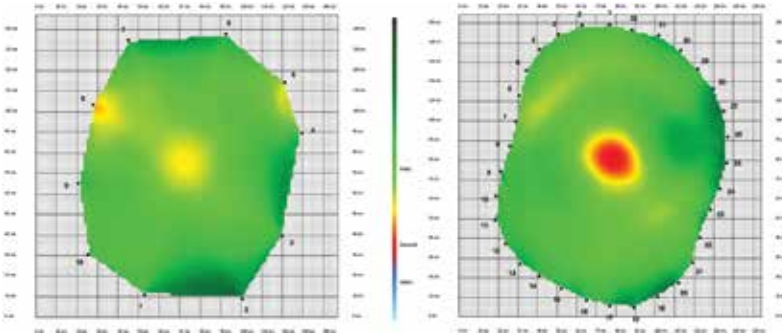
Oprogramowanie oferuje różne geometrie, takie jak okrąg, elipsa czy kształt nieregularny. Zaleca się stosowanie tej ostatniej.

Nieregularna geometria wymaga informacji o położeniu czujników, podczas gdy regularna wskazuje, gdzie należy je umieścić, aby uzyskać optymalną rozdzielczość. Zazwyczaj należy zmierzyć odległość pomiędzy niektórymi czujnikami, co może zająć kilka minut (w zależności od ich liczby). Aby przyspieszyć tę część pomiaru, zaleca się użycie średnicomierza cyfrowego. Można również użyć zwykłej klupy, ale jest to bardziej czasochłonne.

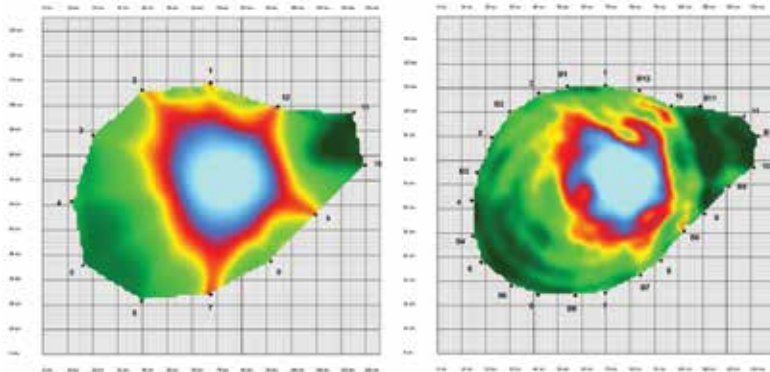
Użycie niewłaściwej geometrii może spowodować niedoszacowanie wielkości wypróchnienia. To z kolei może przyczynić się do zawyżenia czynnika bezpieczeństwa nawet o 40% lub więcej. Nigdy nie należy używać geometrii okręgu lub elipsy, gdy pień drzewa wyraźnie odbiega od tych kształtów. Lepszą rozdzielczość można uzyskać montując większą liczbę czujników lub stosując więcej „punktów pomiarowych”, takich jak czujniki Ludwiga. Przykłady przedstawiono na ryc. 2.9. i 2.10.



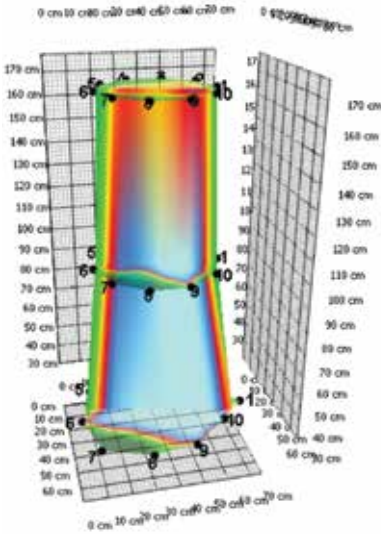
Ryc. 2.8.  
Linie pomiarowe i obliczony tomogram



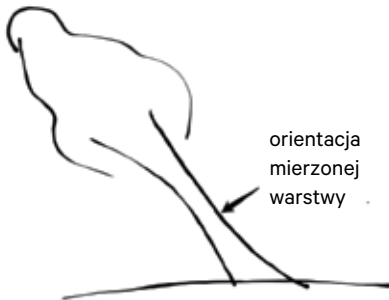
Ryc. 2.9.  
Platan mierzony  
za pomocą  
10 (po lewej)  
i 32 czujników  
(po prawej)



Ryc. 2.10.  
Inny platan  
mierzony tylko  
12 czujnikami  
(po lewej) oraz  
12 czujnikami  
Ludwiga (które  
nie wykrywają  
sygnałów  
dźwiękowych,  
tylko je generują)  
(po prawej)



Ryc. 2.11.  
Interpolacja obliczona z tomogramów mierzonych warstw



Ryc. 2.12.  
Pomiar należy wykonywać prostopadle do kierunku wzrostu drzewa



Ryc. 2.13.  
Zdjęcie drzewa powinno być zrobione z odległości co najmniej takiej jak jego wysokość

Wykonanie tomografii jednej warstwy znajdującej się na dogodnej wysokości przez 2 osoby zajmuje około 10 minut, ale cały proces łącznie z oceną bezpieczeństwa i sporządzeniem raportu jest dłuższy. Pomiar kilku warstw na wysokości, do której nie można sięgnąć z poziomu gruntu, może znacznie wydłużyć czas pomiaru. Praca w parach jest optymalna, ponieważ zadania można łatwo podzielić między dwie osoby. Jeśli na jednym drzewie mierzonych jest kilka warstw, z ich tomogramów można interpolować obraz 3D (zob. ryc. 2.11.)

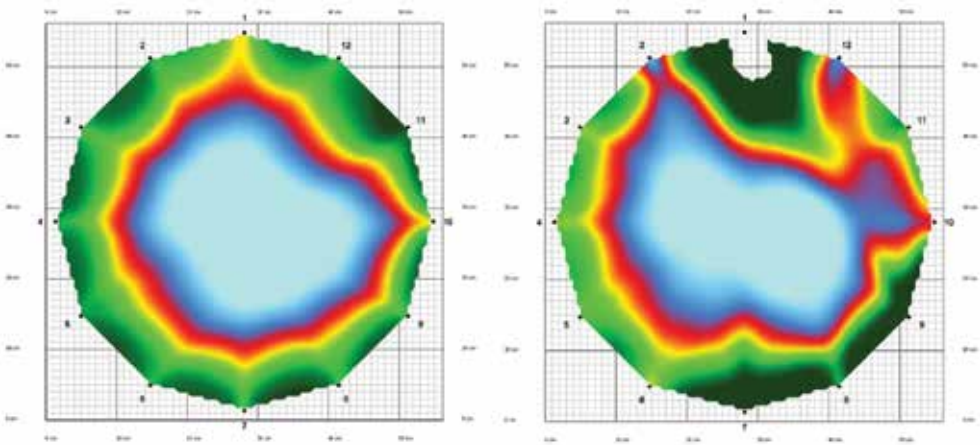
#### POMIAR TOMOGRAFEM – ZALECANE ETAPY:

- wybierz najsłabszą warstwę (lub warstwy) badanego drzewa na podstawie oceny wizualnej;
- zdecyduj, czy możliwe jest użycie geometrii regularnej (okrąg, elipsa). Jeśli tak, dokonaj odpowiednich pomiarów (np. obwód) i umieść czujniki we właściwych pozycjach wskazanych przez oprogramowanie;
- jeśli używasz geometrii nieregularnej, umieść czujniki na pniu zgodnie z jego kształtem i zmierz odległości między nimi;
- ustaw urządzenie i umieść czujnik na wybranym poziomie prostopadle do kierunku wzrostu pnia (warstwa ta jest zwykle pozioma, ale jeśli pień drzewa jest przechylony, warstwa również będzie przechylona);
- sprawdź, czy czujniki zostały umieszczone wystarczająco głęboko, czy przeszły przez korę, aby uzyskać właściwy przepływ dźwięku;
- zdejmij taśmę mierniczą;
- podłącz czujniki do akumulatora (możesz potrzebować do tego kabli) i włącz urządzenie;
- dokonaj pomiaru uderzając co najmniej 3 razy we wszystkie czujniki/punkty pomiarowe (najlepiej 5 razy);
- wyłącz urządzenie;
- zapisz dane;
- poczekaj, aż oprogramowanie obliczy tomogram. Sprawdź, czy pomiar został wykonany prawidłowo;
- natychmiast poinformuj klienta/właściciela drzewa, jeśli na podstawie tomogramu istnieje prawdopodobieństwo poważnego uszkodzenia/szkody;
- dokonaj pomiaru kolejnej warstwy, jeśli to konieczne;

- wykonaj zdjęcie całego drzewa z odległości co najmniej takiej jak jego wysokość. W ten sposób można zmniejszyć zniekształcenia;
- zdejmij i wyczyść urządzenie;
- przejdź do następnego drzewa;
- przeprowadź analizę biomechaniczną/bezpieczeństwa, jeśli jest to konieczne i możliwe (w zależności od oprogramowania);
- przygotuj raport i prześlij go klientowi/właścicielowi/do biura, itd.

#### RADY DOTYCZĄCE KORZYSTANIA Z TOMOGRAFII:

- dokonaj właściwej oceny wizualnej, aby zdecydować, czy tomografia jest potrzebna, czy też nie. Czasami stan drzewa jest na tyle oczywisty, że wykonywanie tomografii nie jest konieczne;
- nie wykonuj tomografii, jeśli woda znajdująca się w pniu drzewa/konarach może być zamrznięta. Niska temperatura może również negatywnie wpływać na urządzenie – kabel może stać się sztywny i podatny na uszkodzenia;
- nie wykonuj tomografii akustycznej podczas ulewnego deszczu;
- nie wykonuj tomografii akustycznej w temperaturze powyżej 40°C;
- nie wykonuj tomografii akustycznej i impedancyjnej na tym samym drzewie jednocześnie. Wykonaj je jedną po drugiej;
- ważne jest zapewnienie odpowiedniego sprzężenia akustycznego. Należy wbić czujniki/szpikulce na tyle mocno, aby przeszły przez korę i sięgały drewna (zob. ryc. 2.5.);
- jeśli używasz metalowej taśmy mierniczej, zdejmij ją przed rozpoczęciem pomiaru. Może przyczynić się do powstania skróconej drogi dla fal dźwiękowych i fałszywych danych, ponieważ dźwięk rozchodzi się znacznie szybciej w metalu niż w drewnie;
- stosuj rzeczywistą geometrię wszędzie, gdzie jest to możliwe. Stosowanie uproszczonej ma wpływ na szacowanie obszaru wypróchnienia oraz na współczynnik bezpieczeństwa;
- sprawdź akumulator/baterię przed wyjazdem w teren, aby był wystarczająco naładowany do wykonywania pomiarów;
- zaleca się posiadanie składanego stołu, aby móc postawić na nim urządzenie;
- utrzymuj szpikulce czujników w czystości i sterylizuj je, jeśli istnieje ryzyko infekcji;



Ryc. 2.14.

Tomogram pokazujący rozkład drewna (po lewej) i oraz pomiar tej samej warstwy, gdy na drzewie pozostawiono metalową taśmę



- zalecane jest posiadanie niewielkiej ilości środka czyszczącego w celu usunięcia żywicy z urządzenia;
- końcówki czujników/szpikulce mogą być bardzo ostre, należy więc zachować ostrożność podczas zakładania i zdejmowania ich, aby nie zranić ani siebie, ani innych;
- jeśli to możliwe, umieść pierwszy czujnik od północy;
- gdy musisz wspiąć się wyżej, użyj lekkiego urządzenia/miernika na tablicie lub smartfonie, tak abyś mógł dokonać pomiaru w prosty sposób w dowolnym momencie;
- w trakcie wykonywania pomiaru należy mieć co najmniej 3 odczyty na każdym czujniku/punkcie pomiarowym;
- można dokonać pomiaru konarów oraz obliczenia ich obrazu tomograficznego, ale nie da to możliwości oceny ich bezpieczeństwa;
- jeśli pień drzewa uległ pęknięciu, obliczony współczynnik bezpieczeństwa może być znacznie wyższy niż w rzeczywistości;
- pamiętaj, że oprogramowanie zawiera informacje na temat warstwy (lub warstw), na których dokonano pomiaru. Określone czynniki bezpieczeństwa dotyczą tylko pewnych fragmentów, a nie całego drzewa;
- zapisz uzyskane dane – funkcja automatycznego zapisywania informacji nie zawsze jest dostępna;
- przed rozpoczęciem samodzielnej pracy weź udział w szkoleniu z zakresu używania urządzenia tomograficznego.

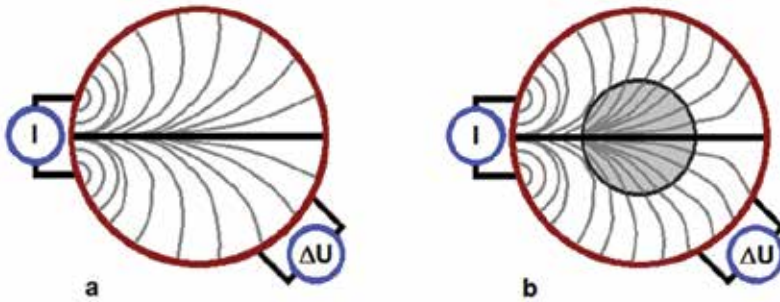
## 5. TOMOGRAFIA ELEKTRYCZNA/IMPEDANCYJNA

Pomysł wykorzystania sygnałów elektrycznych w celu uzyskania informacji o stanie wnętrza pnia pochodzi od Alexa Shigo, który opracował urządzenie zwane shigometrem. Dostarczało ono informacji na temat oporności pnia, ale interpretacja wyników była trudna.

Elektryczna tomografia impedancyjna lub tomografia elektrooporowa jest z powodzeniem stosowana w geofizyce od dziesięcioleci, dlatego też powrócono do pomysłu używania pomiarów elektrycznych w ocenie drzew.

Podczas gdy sygnały akustyczne można sobie wyobrazić jako linie proste, linie pola elektrycznego wyglądają raczej jak linie krzywe lub cylindryczne. Interpretacja pomiaru jest bardziej złożona. Tomogram wykonywany jest w kilku krokach iteracji. To oznacza, że oprogramowanie musi być odpowiednie dla tej sytuacji – tomogram ma pokazywać wyniki takie jak te otrzymane podczas samego pomiaru.

Tomografia impedancyjna może wykryć niejednorodności w materiale drzewnym (ryc. 2.15.).



Ryc. 2.15.

- a) Schematyczny obraz linii ekwipotencjalnych podczas wykonywania tomografii impedancyjnej. Prąd elektryczny jest przewodzony („I”) do jednorodnego materiału podczas pomiaru napięcia („ $\Delta U$ ”). Pomiar napięcia jest wykonywany dookoła, a rola elektrod może ulec zmianie. Można wykonać model przewodzenia lub oporności materiału
- b) Schematyczny obraz tomografii impedancyjnej pnia. Zmiana w materiale zmienia linie ekwipotencjalne i mierzone napięcie

W trakcie pomiaru elektrody umieszcza się na drzewie w taki sposób, aby przebiły korę. Dwie elektrody przewodzące doprowadzają prąd elektryczny do drzewa, podczas gdy napięcie jest mierzone przez dwie elektrody wykrywające. Niejednorodność w drzewie zmienia napięcie i może wskazywać na obecność mniejszej lub większej ilości wody, koncentracji jonów, fałszywej twardzieli, uszkodzeń lub grzybów. Za pomocą tomografii impedancyjnej można zatem zbadać przebarwienia drewna, transport wody, biel oraz twardziel.

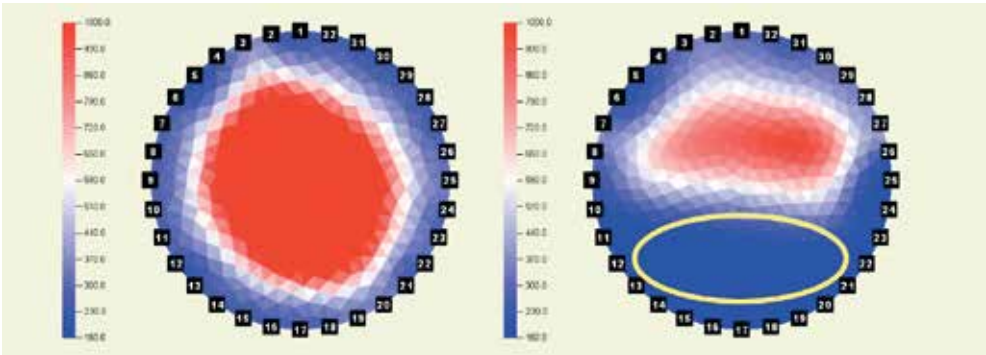
Warto zauważyć, że ponieważ oporność elektryczna różni się od prędkości sygnałów akustycznych, tomogram uzyskany w ten sposób może znacznie różnić się od obliczonego za pomocą tomografii akustycznej.

Tomografia impedancyjna pozwala wykryć zmiany w drewnie na wczesnym etapie. Nawet jeśli gęstość drewna nie uległa jeszcze zmianie, ten rodzaj tomografii potrafi stwierdzić obecność grzybów lub chorób znacznie sprawniej, niż inne rodzaje tomografii.

Aby wychwycić zmianę, należy zmierzyć wzorec zdrowego drzewa. Rezystywność (opór elektryczny właściwy) zależy od badanych gatunków drzew. Spójrzmy na przykład i zapoznajmy się ze studiami przypadków, włączając porównanie tomografii akustycznej i impedancyjnej.

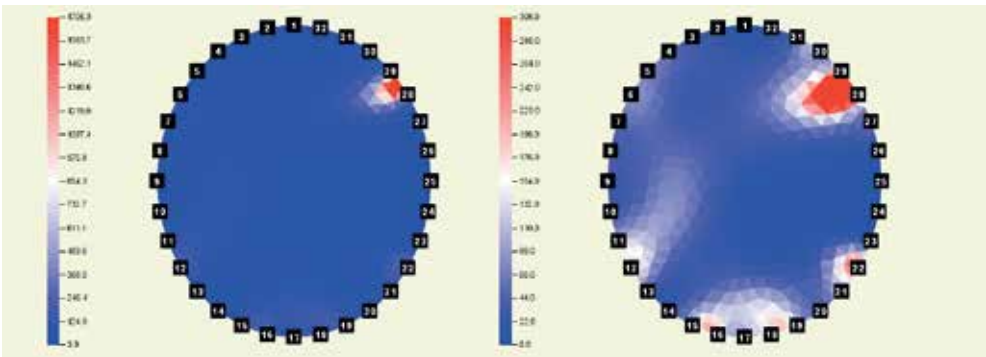
#### TOMOGRAFIA IMPEDANCYJNA – ZALECANE ETAPY:

- wybierz interesującą Cię warstwę drzewa (miejsce, gdzie mogą występować grzyby, martwe sęki itd.);
- umieść elektrody ze stali nierdzewnej (szpikulce) na drzewie, wbijając je w korę;
- uruchom oprogramowanie komputerowe;
- zarejestruj pozycje szpikulców (tomografia impedancyjna jest bardzo wrażliwa na geometrię);
- załóż zaciski (krokodylki) na szpikulce i podłącz przewody;
- uruchom urządzenie i podłącz je do komputera;
- rozpocznij pomiar i poczekaj, aż komputer wykona ten proces. Pomiar może zająć kilka minut;
- po zakończeniu pomiaru wyłącz urządzenie i zapisz dane;
- poczekaj, aż oprogramowanie obliczy tomogram;
- porównaj otrzymany tomogram ze wzorem tomogramu zdrowego drzewa tego samego gatunku.



Ryc. 2.16.

Zdrowy świerk (po lewej) z obszarem o wyższej oporności w środku. Spadek oporności (obraz po prawej, zaznaczony obszar) oznacza obecność większej liczby wolnych, ruchomych jonów, co z kolei świadczy o obecności grzybów. Oba drzewa to świerki pospolite



Ryc. 2.17.

Zdrowy kasztanowiec z reakcją na uszkodzenie (wzorec zdrowego kasztanowca nie ma okrągłego obszaru o wyższej oporności pośrodku). Po lewej: tomogram z automatyczną skalą. Po prawej: w celu uwydatnienia reakcji na ranę skala została ustawiona od 0.0 do 308.0

#### PRAKTYCZNE UWAGI DOTYCZĄCE TOMOGRAFII IMPEDANCYJNEJ:

- zazwyczaj automatyczna skala działa dobrze; należy pamiętać, aby porównywać wzorce, a nie rzeczywiste wartości oporności;
- skalę można modyfikować, aby uwydatnić mniejsze zmiany i uzyskać bardziej szczegółowy obraz interesującego nas obszaru;
- ta technika jest bardzo wrażliwa jeśli chodzi o geometrię, dlatego zawsze należy mierzyć i używać rzeczywistej geometrii;
- urządzenie powinno być dobrze naładowane (w przeciwnym razie może dojść do powstawania błędnych tomogramów);
- tomogramy mogą być porównywane tylko wtedy, gdy liczba użytych elektrod oraz dystans między nimi jest taki sam;
- oporność może ulec zmianie w zależności od temperatury i pory roku, ale nie powinno to mieć zbyt dużego wpływu na wzorce.

Pomiar jednej warstwy na dogodnej wysokości 16 elektrodami zajmuje około 15 minut.



## 6. ŚREDNICOMIERZE

Pomiary odległości i geometrii są dość ważne zarówno w przypadku jednoliniowych pomiarów akustycznych, jak i tomografii.

Do pomiaru odległości pomiędzy czujnikami można zastosować średnicomierze mechaniczne lub elektryczne o dokładności co najmniej 0,5 cm. (Oczywiście, średnicomierze mogą mierzyć dowolne odległości w swoim zakresie, średnicę drzewa lub długość osi, jeśli kształt pnia jest zbliżony do elipsy.) Mechaniczne narzędzia tego typu są tanie i przydatne do wykonywania pomiarów 1D. Zaletą średnicomierzy elektrycznych wykorzystywanych do oceny drzew jest to, że zazwyczaj można je połączyć z urządzeniem pomiarowym, komputerem lub smartfonem przez Bluetooth.

Połączenie może przyspieszyć rejestrację nieregularnych geometrii. Zmierzoną odległość można przesłać naciskając na przycisk, który znajduje się na jednym z ramion średnicomierza.

### WSKAZÓWKI DOTYCZĄCE STOSOWANIA ŚREDNICOMIERZY:

- wybierz prawidłowy zakres dla mierzonego drzewa;
- naładuj baterię średnicomierza;
- nie używaj siły, nie zaciskaj średnicomierza.

## 7. INNE URZĄDZENIA DO WYKRYWANIA ROZKŁADU DREWNA

Oprócz przedstawionych, stosunkowo dobrze znanych i rozpowszechnionych metod, istnieje kilka innych, które mogą być przydatne w wykrywaniu rozkładu drewna.

Do badania wnętrza pnia można wykorzystać georadar lub podobne urządzenie. Podczas wykonywania pomiaru należy zbliżyć ręcznie radar do pnia na interesującej nas wysokości. Echo różni się w zależności od napotkanego materiału (np. powietrze). Dzięki tej metodzie można wygenerować obraz podobny do tomogramu.



Ryc. 2.18.  
Średnicomierz mechaniczny



Ryc. 2.19.  
Użycie średnicomierza elektronicznego



Przeprowadzono też kilka prób z wykorzystaniem detekcji optycznej. Kamery na podczerwień mogą wykryć wypróchnienie znajdujące się tuż pod powierzchnią kory (mniej niż kilka centymetrów). Rejestrowanie ruchów kory i jej zniekształceń (za pomocą markera) oraz znajdowanie korelacji pomiędzy tym zjawiskiem a występowaniem próchnienia jest również obszarem badań. Inne techniki, jak np. używanie przenośnego tomografu komputerowego (CT) do badania stanu wnętrza pnia, są rzadko stosowane.

Należy pamiętać, że istnieje wielu twórców i producentów urządzeń, a przedstawione w tym rozdziale zdjęcia i obrazy mają za zadanie pomóc w zrozumieniu zasad opisanych technik oraz zademonstrować ich użyteczność. Zależnie od obszaru geograficznego znane marki mogą się różnić, ale jeśli interesują Cię producenci tego typu urządzeń, zacznij od przeglądania stron internetowych marek takich jak Fakopp, Rinntech i Argus Electronic. Może to stanowić dobry punkt wyjścia.



## Diagnostyka instrumentalna: rozkład drewna – studia przypadków

### 1. SIEDEM LAT BADANIA TOMOGRAFEM AKUSTYCZNYM

W 2013 opieńka miodowa (*Armillaria mellea*) zasiedliła świerka pospolitego (*Picea abies*) rosnącego w ogrodzie botanicznym.

W latach 2013–2019 dokonywano powtarzanych pomiarów drzewa na wysokości 30 cm, 100 cm i 170 cm za pomocą tomografii akustycznej (dane z 2017 roku zostały utracone). Zaskakującym może być fakt, że przez kilka lat obszar wypróchnienia na wysokości 30 cm ulegał zmniejszeniu. W miarę poszerzania się pnia drzewa, jego cała powierzchnia zwiększyła się, ale miejsce, w którym doszło do rozkładu drewna było izolowane i nie mogło powiększać się tak szybko.



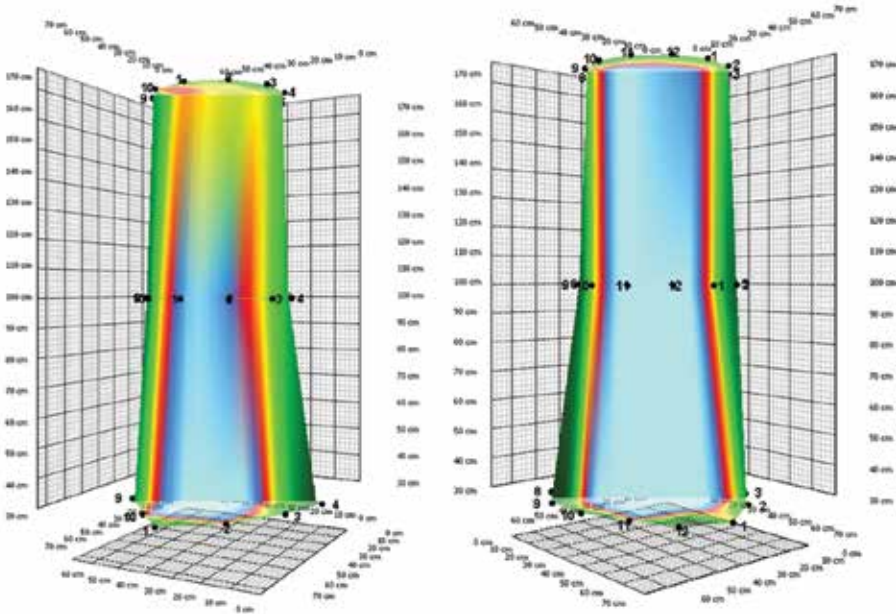
Ryc. 2.20.

Owocniki opieńki miodowej

WYSOKOŚĆ WARSTWY	2013	2014	2015	2016	2018	2019
30 CM	63%	61%	61%	62%	66%	67%
100 cm	52%	55%	53%	60%	58%	57%
170 cm	23%	42%	46%	52%	48%	67%

Tabela 2.2.

Mierzona powierzchnia przekroju objęta rozkładem drewna w porównaniu do całego przekroju pnia



Ryc. 2.21.

Model pnia 3D wykonany w 2013 (po lewej) i 2019 roku (po prawej). Obszar wypróchnienia mógł silniej poszerzać się poziomo, ale na wysokości 30 cm proces ten zachodził wolniej

Na podstawie danych wyznaczono również współczynniki bezpieczeństwa na złamanie pnia (dla porywów wiatru 120 km/h). Najniższy (2018 rok, 170 cm) wyniósł 249%. Wynika z tego, że ryzyko uszkodzenia pnia na tej wysokości jest dość umiarkowane. Drzewo nadal stoi (wiosna, 2021 rok) i skutecznie walczy ze stosunkowo groźną infekcją.

## 2. BADANIE DUŻYCH DRZEW (O OBWODZIE WIĘKSZYM NIŻ 350 CM)

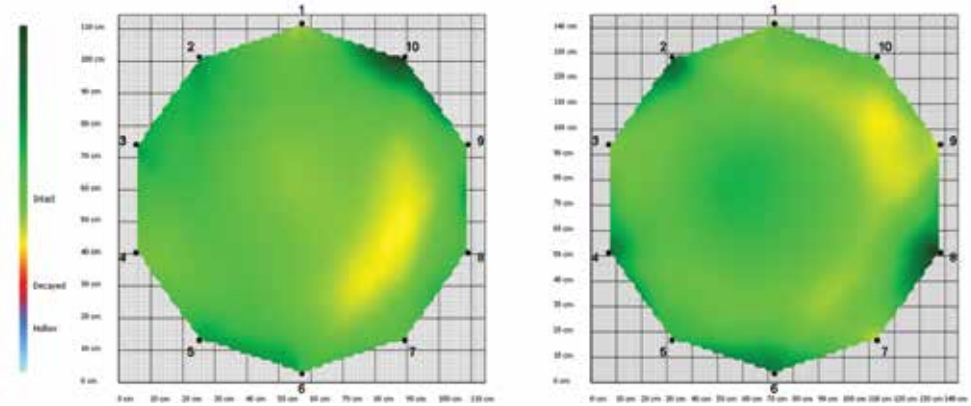
W ogrodzie botanicznym Uniwersytetu w Sopronie zbadano stan 3 dużych drzew – dwóch sekwoi oraz jednego platana. Pierwsza sekwoja (obwód = 380 cm) rośnie w ogrodzie w otoczeniu innych drzew. Druga (obwód = 472 cm) rośnie obok budynku, a platan – na środku terenu. Sekwoje mają korę o grubości 6–10 cm, więc do pomiaru użyto czujniki ze szpikulcami długości 12 cm. W pierwszym drzewie stwierdzono 1% wypróchnienia, podczas gdy drugie okazało się zdrowe.



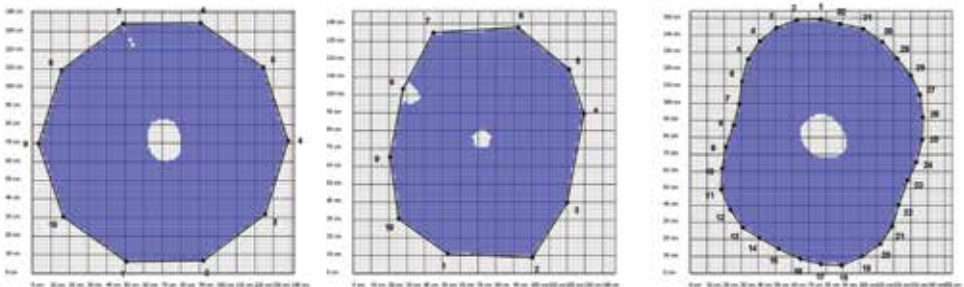
Ryc. 2.22.

Tomografia pierwszej sekwoi

Platan mierzono zwykłymi czujnikami o długości 6 cm. Najpierw dokonano pomiaru z wykorzystaniem geometrii kołowej, a następnie nieregularnej. Po kilku miesiącach dokonano kolejnego pomiaru z wykorzystaniem 32 czujników (zobacz ryc. 2.9. przedstawiający tomogramy uzyskane za pomocą 10 oraz 32 czujników). Obszar wypróchnienia zwiększył się z 1% do 4% wraz ze wzrostem geometrii i rozdzielczości. Ten pomiar został wykonany w celu przetestowania urządzenia, ale porównywanie uzyskanych obrazów jest bardzo interesujące, nawet jeśli wiemy, że rozkład drewna zajmuje bardzo mały obszar i jest umiejscowiony centralnie.



Ryc. 2.23.  
Tomogramy pierwszej (po lewej) i drugiej sekwoi (po prawej)



Ryc. 2.24.  
Szacowany obszar wypróchnienia w platanie

### 3. DUŻE DRZEWA Z ROZKŁADEM DREWNA (OBWÓD PONAD 400 CM)

W przypadku tomografii akustycznej występuje pewne ograniczenie związane z osłabieniem sygnału. Sygnał generowany przez jeden czujnik musi dotrzeć do kolejnego, przy czym należy pamiętać, że drzewa są zbudowane różnie, a te największe mogą osiągać nawet 10 metrów w obwodzie. Jeśli w środku drzewa znajduje się obszar rozkładu, sygnał dźwiękowy, który przez niego przechodzi, może ulec osłabieniu lub zanikowi. Sytuację tę zobrazowano trzema przykładami.

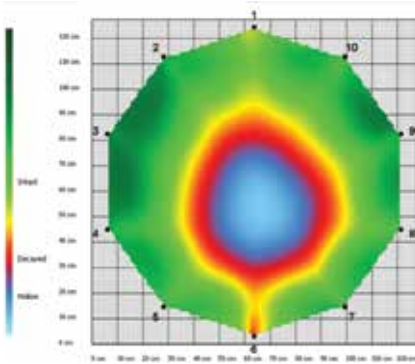
Pierwsze drzewo to dąb rosnący w pobliżu hotelu na skraju lasu (Sopron, Węgry). Obwód na wysokości pomiaru wynosił 402 cm, natomiast obszar wypróchnienia – 33%.

Drugie drzewo to topola rosnąca na terenie parku (Hidegseg, Węgry). Obwód na wysokości pomiaru wynosił 448 cm, a obszar wypróchnienia – 76% (zob. ryc. 2.27.).

Trzecie drzewo to kolejna topola, tym razem rosnąca przy drodze (Nagylozs, Węgry), której korona została zredukowana ze względu na stan drzewa. Obwód na wysokości pomiaru wynosił 664 cm (średnica nieco powyżej 2 m), natomiast obszar wypróchnienia – 82%. Pomiar został wykonany pomyślnie i można było obliczyć tomogram. Udało się też dokonać oceny biomechanicznej drzewa. Współczynnik bezpieczeństwa okazał się bardzo wysoki (ponad 1000%) dzięki zredukowaniu korony.



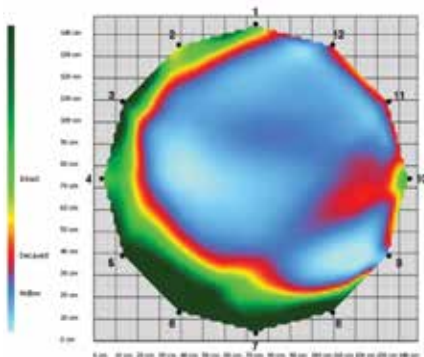
Ryc. 2.25.  
Dąb. Zakończony pomiar. Tomogram pokazany na ekranie smartfonu



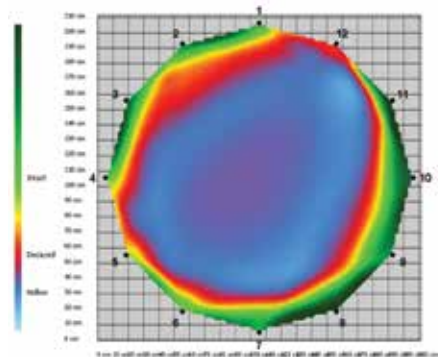
Ryc. 2.26.  
Tomogram dębu



Ryc. 2.28.  
Topola w Nagylozs



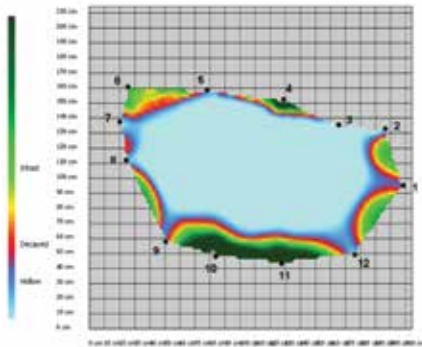
Ryc. 2.27.  
Tomogram topoli rosnącej w Hidegseg



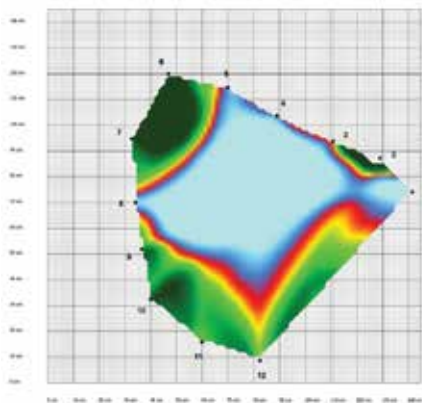
Ryc. 2.29.  
Tomogram topoli w Nagylozs



Ryc. 2.30.  
Pomiar jednego z pni rozwidlonego dębu



Ryc. 2.31.  
Tomogram tuż pod rozwidleniem



Ryc. 2.32.  
Tomogram lewej części dębu

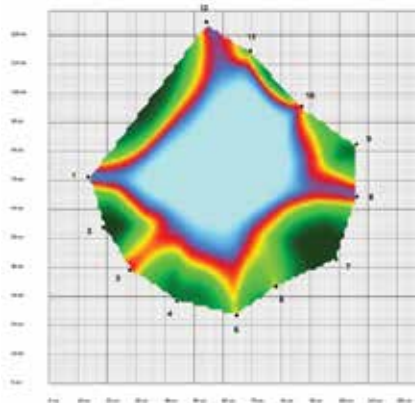
#### 4. TOMOGRAMY TUŻ POD ROZWIDLENIEM

Na prośbę właściciela zbadano dąb rosnący w pobliżu jego domu. Drzewo miało rozwidlony pień u podstawy. Zarówno pnie jak i podstawa drzewa zostały zbadane za pomocą tomografii. W pniach obszar wypróchnienia wynosił od 47% do 55% (mierzony na wysokości 65, 75 i 100 cm). Podstawa pnia (na wysokości 30 cm) została zbadana dwoma sposobami. Najpierw umieszczono czujniki wokół całej podstawy (ryc. 2.31.), a następnie wokół każdego pnia oddzielnie (ryc. 2.32. i 2.33.).

Gdy dokonano pomiaru pnia poniżej miejsca rozwidlenia, obszar wypróchnienia wynosił 86%. Kiedy zbadano dwa pnie wyrastające z rozwidlenia oddzielnie, obszar ten wyniósł 63%. Tomografia przeszacowała wielkość obszaru rozkładu w trakcie pierwszego pomiaru, ponieważ sygnał dźwiękowy musiał przejść przez zakorek w rozwidleniu.

#### 5. CZĘŚCIOWO ZAMARZNIĘTY PIEŃ

Konserwator parku poprosił o zbadanie drzewa, łącznie z wykonaniem jego tomografii. Temperatura spadła poniżej zera (tak jak w poprzednich dniach), a park był pokryty śniegiem. Jako że badanie było zleczone w trybie pilnym, platan poddano ocenie wizualnej (na wysokości 5 metrów usunięto w przeszłości główną gałąź, a w miejscu cięcia doszło do rozkładu drewna),



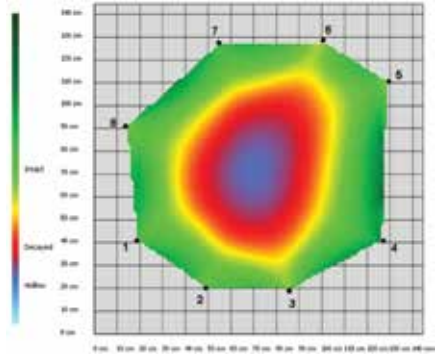
Ryc. 2.33.  
Tomogram prawej części dębu

a następnie wykonano tomografię akustyczną na wysokości 95 cm. Wtedy obszar rozkładu został oszacowany na 41%.

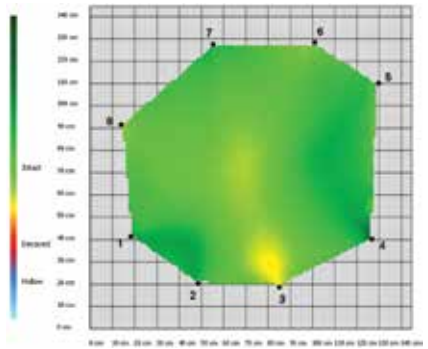
Zgodnie z zaleceniem eksperta pomiar powtórzono 2 tygodnie później, kiedy temperatura była wyższa i utrzymywała się przez kilka dni. Wtedy można było mieć pewność, że pień drzewa nie będzie zamarznięty. Położenie czujników było dokładnie takie samo, ale uzyskany pomiar wskazał tylko 1% wypróchnienia. Podczas wykonywania pierwszego pomiaru zewnętrzna warstwa pnia była zamarznięta, przez co fala dźwiękowa mogła się po niej poruszać znacznie szybciej (prędkość wyniosła około 2000 m/s, podczas gdy norma przyjęta dla zdrowego platana wynosi około 1300–1400 m/s). W środku pnia sygnał rozprzestrzeniał się wolniej (około 1400 m/s). Te wartości przyczyniły się do powstania tomogramu wskazującego na wypróchnienie.

Uwaga do przedstawionego wyniku pomiaru: wypróchnienie pojawiło się na wysokości ponad 2 metrów w miejscu przycięcia gałęzi. Nie stwierdzono go natomiast na wysokości 95 cm, na której dokonano pomiaru.

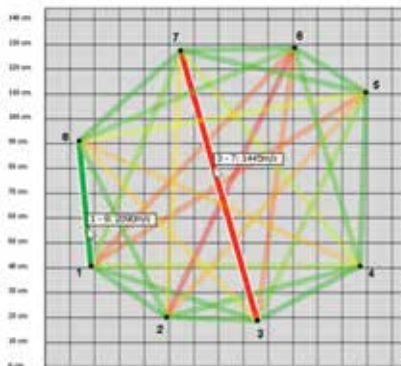
Może też dojść do odwrotnej sytuacji. W innym drzewie nastąpił rozkład, ale przez obecność zamarzniętej wody odczyt nie wskazał na obecność wypróchnienia. Kiedy drzewo zostało zbadane ponownie w temperaturze powyżej zera, wypróchnienie stało się widoczne na tomogramie.



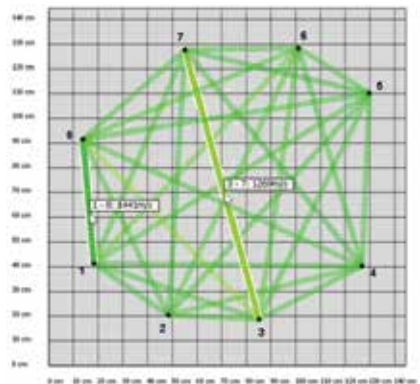
Ryc. 2.34.  
Tomogram na 95 cm przy mrozie



Ryc. 2.35.  
Tomogram pnia wykonany na wysokości 95 cm w warunkach „normalnych”, przy dodatniej temperaturze



Ryc. 2.36.  
Wykres z pierwszego pomiaru. Prędkość sygnału dźwiękowego rozchodzącego się po bokach pnia jest znacznie większa niż norma ustalona dla platana, ponieważ ta część drzewa była zamarznięta

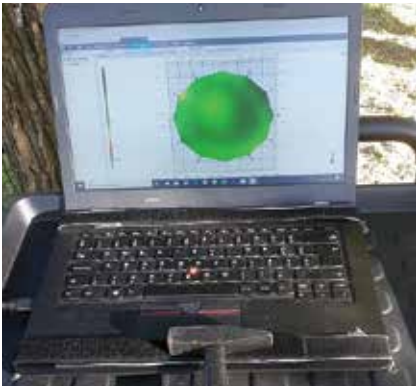


Ryc. 2.37.  
Wykres z drugiego pomiaru, gdy pień drzewa nie był już zamarznięty. Prędkość odpowiada normie dla zdrowego platana (należy pamiętać, normy te są ustalone indywidualnie dla danego gatunku drzewa)

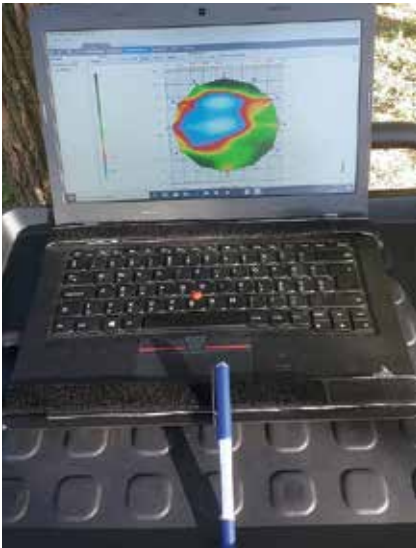




Ryc. 2.38.  
Przyrządy użyte do generowania dźwięku



Ryc. 2.39.  
Pomiar kontrolny



Ryc. 2.40.  
Najgorszy tomogram uzyskano za pomocą długopisu

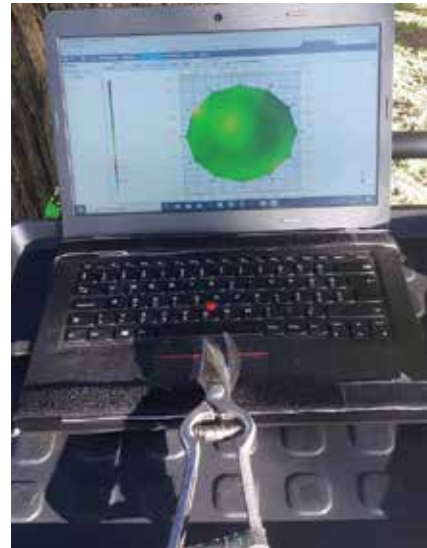
## 6. DLACZEGO NIE UŻYWAĆ DŁUGOPISU DO WYWOŁANIA SYGNAŁU DŹWIĘKOWEGO?

Członkowie organizacji Főkert, która zajmuje się około 700 tysiącami drzew rosnących w Budapeszcie, chcieli sprawdzić, co się stanie, jeśli nie będą mieli przy sobie metalowego młotka do generowania sygnałów dźwiękowych. W tym celu przeprowadzili eksperyment, w którym użyli 12 różnych narzędzi. Były to:

- plastikowy długopis,
- młotek z gumową główką (typu „Wiha”),
- młotek z plastikową główką (typu „Wiha”),
- młotek aluminiowy,
- młotek z główką wykonaną z brązu,
- młotek typu „SK” ze stalowym elementem w plastikowej główce,
- młotek z czarnym, lakierowanym trzonkiem wykonanym z robinii akacjowej,
- młotek wykonany z jesionu,
- kawałek drewna sosnowego,
- plastikowy wkład do klejenia na gorąco,
- stalowy sekator (typu „Kunde”) oraz metalowy młotek znajdujący się w pakiecie niezbędnym do wykonania tomogramu.



Ryc. 2.41.  
Tomogram uzyskany za pomocą młotka typu „SK” (u góry), poniżej główka tegoż młotka



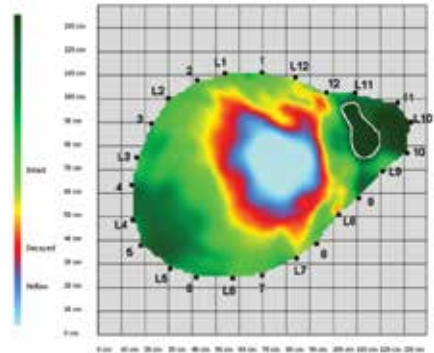
Ryc. 2.42.  
Tomogram uzyskany za pomocą stalowego sekatora

W porównaniu do pomiaru kontrolnego, najniższą prędkość fal dźwiękowych oraz najgorszy tomogram bazujący na tych danych uzyskano za pomocą długopisu. Dokonywanie pomiaru drewnianym młotkiem, prętem lub trzonkiem również okazało się niezbyt dobrym pomysłem. Lepszą prędkość fal dźwiękowych można uzyskać stosując młotek wykonany z gumy, brązu lub plastiku lub wkładu do klejenia na gorąco. W pomiarze dokonanym za pomocą aluminiowego młotka lub stalowego sekatora można było dostrzec jedynie niewielkie różnice. Najlepszym narzędziem do dokonania pomiaru (jeśli stalowy młotek nie jest dostępny) okazał się młotek typu „SK” z metalowym elementem w środku plastikowej główki.

## 7. BADANIE REAKCJI DRZEWA NA USZKODZENIA

Platan rosnący w ogrodzie botanicznym kilka lat temu doznał uszkodzenia spowodowanego mrozem.

Drzewo zbadano za pomocą tomografu i stwierdzono obecność wypróchnienia. Test przeprowadzono jeszcze raz, aby sprawdzić, czy dokładniejsza geometria może pokazać więcej szczegółów obszaru dotkniętego rozkładem. Wyniki powtórnego badania dostarczyły nie tylko więcej informacji na temat wypróchnienia, ale pokazały również obszar mocnego drewna, które zarosło ranę przez ostatnie lata.



Ryc. 2.44.

Na szczegółowym tomogramie zaznaczono reakcję drzewa



Ryc. 2.43.

Badany platan – zarośnięta rana została zaznaczona na czerwono

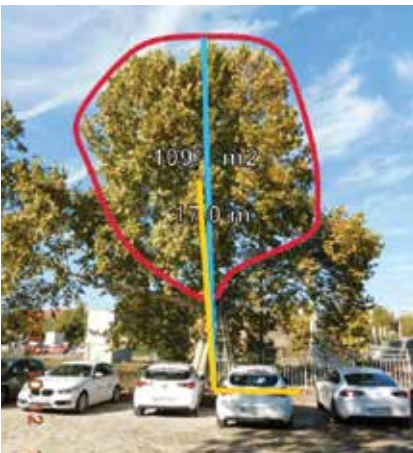


Ryc. 2.45.

Pęknięcie na drzewie



Ryc. 2.46.  
Wybór obszaru korony w celu obliczenia współczynnika bezpieczeństwa



Ryc. 2.47.  
Symulacja redukcji korony drzewa (do celów oszacowania nowego SF)

## 8. BEZPIECZEŃSTWO DRZEWA ROSNĄCEGO NA PARKINGU

Na terenie parkingu rósł platan z pęknięciem pnia.

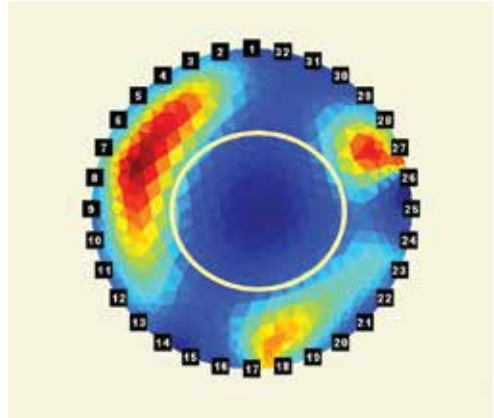
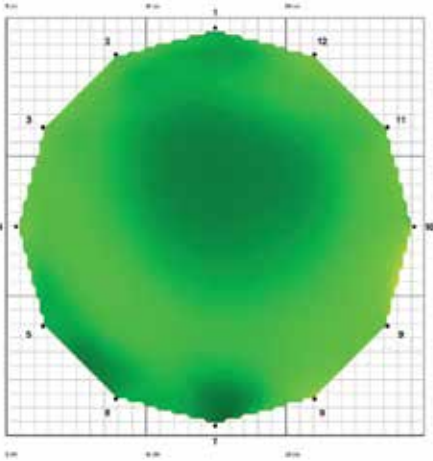
Na tomogramie pokazano rozkład drewna, a bezpieczeństwo pnia na złamanie zostało obliczone na podstawie zdjęcia drzewa.

Współczynnik bezpieczeństwa przy obciążeniach wiatrem obliczony na podstawie europejskiej normy EN1991 wyniósł 70%. Aby zmniejszyć obliczone ryzyko, przeprowadzono symulację redukcji korony.

W symulowanym przypadku współczynnik bezpieczeństwa wzrósł niewiele, osiągając jedynie 80%. Europejska norma obliczona na podstawie zredukowanej korony, ale z taką samą wysokością drzewa, przy silnym wietrze w górnych jego partiach (por. rys. 2.47.) w niewielkim stopniu zmniejszyła obciążenie wiatrem. Dlatego też przy symulacji redukcji korony należy uwzględnić przede wszystkim cięcia wierzchołkowe obniżające wysokość głównego naporu wiatru, co jednak przy bardzo osłabionej odporności może nie wystarczyć dla znaczącej poprawy SF (przyp. red. PL).

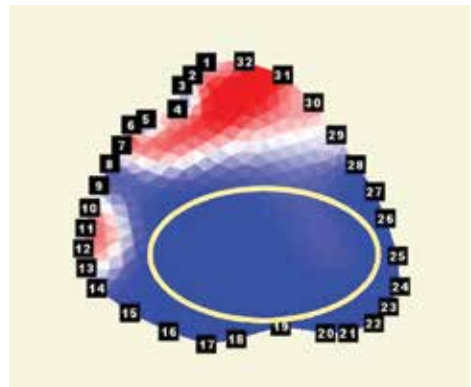
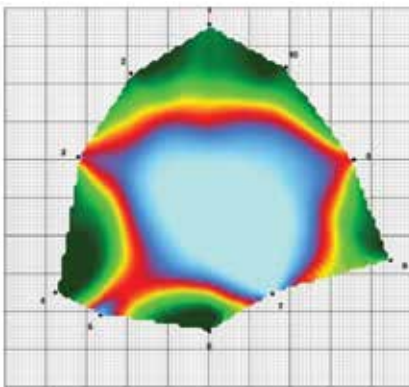
## 9. TOMOGRAFIA IMPEDANCYJNA I AKUSTYCZNA

Tomografia impedancyjna umożliwia wykrycie aktywnego ataku grzybów, prognozowanie wypróchnienia lub pokazanie problematycznego obszaru zanim stanie się widoczny na tomogramie akustycznym. Korzystając z tego rodzaju tomografii można potwierdzić obecność grzybów w obszarze dotkniętym rozkładem. Według badań przeprowadzonych na Uniwersytecie w Getyndze, dzięki tej metodzie można zaobserwować grzyby wywołujące biały rozkład drewna (Bieker i in., 2009). Ponieważ biały rozkład „zjada” ligninę, ale nie celulozę, fale dźwiękowe mogą przejść przez drzewo bez znaczącego opóźnienia, a tomogram akustyczny może nie pokazać wypróchnienia spowodowanego grzybami białego rozkładu, zwłaszcza w początkowej fazie. Pomiary dokonane na świerku, jesionie, topoli, kasztanowcu, cedrze i dębie wykazały podobne zjawisko.



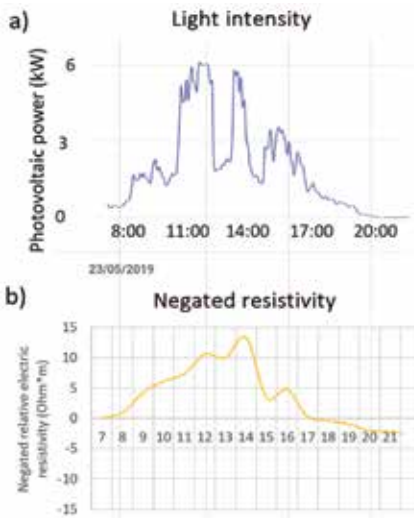
Ryc. 248.

Jesion (u góry po lewej) został zasiedlony przez grzyby z rodzaju *Armillaria* (u góry po prawej – owocniki grzybów). Drzewo było w złym stanie (m.in. straciło liście). Tomografia akustyczna (na dole po lewej) nie wykazała wypróchnienia ani problematycznego obszaru. Obszar o niskiej oporności został zaznaczony na tomogramie impedancyjnym (na dole po prawej) i pokazuje obecność grzybów



Ryc. 249.

Tomografia akustyczna (po lewej) pokazuje znaczne wypróchnienie. Obszar o niskiej oporności (niebieski) pokazuje więcej wolnych jonów, co świadczy o obecności grzybów (po prawej). Pomiary wykonano na świerku pospolitym



Ryc. 2.50.

Zmiany w oporności *b*) następowały wraz ze zmianami w natężeniu światła. Na osi X pokazano czas w godzinach dla obu zjawisk (wykres pokazuje tylko okres światła dziennego – *Light intensity*, natomiast cały pomiar trwał 25 godzin)

## 10. POMIAR PRZEWODZENIA – EKSPERYMENTALNE ZASTOSOWANIE TOMOGRAFII IMPEDANCYJNEJ

Kiedy drzewo jest „obudzone”, zachodzi w nim transport pomiędzy korzeniami a liśćmi, w szczególności wiosną, kiedy na drzewie pojawiają się nowe liście.

Na jednym z buków dokonywano pomiarów za pomocą tomografii impedancyjnej co godzinę przez okres 25 godzin. Naturalnie, tomogramy nie ulegały znaczącym modyfikacjom, ponieważ grzyby nie rosną tak szybko, ale dało się zauważyć niewielkie zmiany w natężeniu światła i odkryto ciekawą zależność. Według niej, zmiany w oporności zależą od zmian w natężeniu światła. Dla porównania wartości oporu zostały pomnożone przez minus jeden (na ryc. 2.50. *Negated resistivity*), ponieważ oporność maleje, gdy natężenie światła się zwiększa.

W chwili obecnej ta technika jest na razie świetnym tematem badawczym, w przyszłości może służyć do sprawdzania witalności drzew.



## *Ocena instrumentalna rozkładu drewna – ograniczenia*

Techniki akustyczne zakładają, że jeśli w drzewie występuje rozkład drewna lub inne okoliczności obniżające jego stabilność (np. pęknięcie), fala dźwiękowa musi „obiec” problematyczne miejsca, a jej prędkość (w porównaniu do prędkości, z jaką porusza się w pełnym drewnie) maleje.

Jak wspomniano wcześniej, w przypadku grzybów powodujących biały rozkład drewna fala dźwiękowa może rozchodzić się z normalną prędkością, a tomogram może pokazywać mylne wyniki badania. Sytuacja wygląda podobnie w przypadku larw lub owadów żerujących w drewnie – sygnał dźwiękowy może znajdować drogę, nawet jeśli w drzewie znajduje się wiele otworów i tuneli.

Dźwięk może rozchodzić się z normalną prędkością również w przypadku, gdy obecne jest nie tylko drewno. Na przykład, gdy obszar rozkładu został wypełniony betonem lub jeśli drzewo obrośło filar, kolumnę ogrodzenia lub budynek. Materiały te mogą stwarzać środowisko podobne do zamrożonej wody – fala dźwiękowa może rozchodzić się szybciej, a ich obraz na tomogramie może przypominać obraz zdrowego drewna. Czasami dzieje się odwrotnie – fala dźwiękowa rozchodzi się wolniej, a tomogram wskazuje na wypróchnienie, podczas gdy w rzeczywistości nie dochodzi do rozkładu drewna, tylko do pęknięcia, rozwarstwienia pomiędzy słojami lub wrastania kory (zakorka). Jeśli chodzi o bezpieczeństwo, te przypadki nie wprowadzają badacza zbyt wiele w błąd, ponieważ pęknięcie zmniejsza nośność drzewa, podobnie jak odkryte w nim wypróchnienie.

## *Ocena instrumentalna rozkładu drewna – zalety*

Zalety są łatwo widoczne – tomogramy dostarczają więcej informacji o wnętrzu pnia niż jakkolwiek ocena wizualna. Nawet bardzo szybki pomiar 1D może ostrzec użytkownika o poważnych, ale niewidocznych uszkodzeniach i tym samym uniknąć szkody dla mienia i ludzi. Z drugiej strony tomogramy mogą być łatwo prezentowane i udostępniane, są zrozumiałe i mogą pomóc w przekazywaniu informacji o pracy osoby dokonującej oceny drzewa.







# III.

## *Diagnostyka instrumentalna: stabilność w gruncie*

Stabilność drzew jest ważną kwestią w środowisku miejskim. Ich obecność niesie ze sobą wiele korzyści – zacienienie i ochłoda, osłona przed wiatrem, walory estetyczne, odpoczynek, poprawa jakości powietrza i redukcja temperatury. Niestety drzewa w przestrzeni miejskiej czasem stanowią też zagrożenie. Spadające gałęzie, pęknięte lub wyrwane z korzeniami pnie prowadzą nie tylko do uciążliwości i wydatków związanych z porządkowaniem terenu. Mogą spowodować znaczne szkody mienia publicznego i prywatnego, obrażenia ciała, a w skrajnych przypadkach nawet śmierć. Dokładna ocena ich stabilności i bezpieczeństwa ma zatem kluczowe znaczenie dla zapobiegania tym wysoce niepożądanym skutkom.

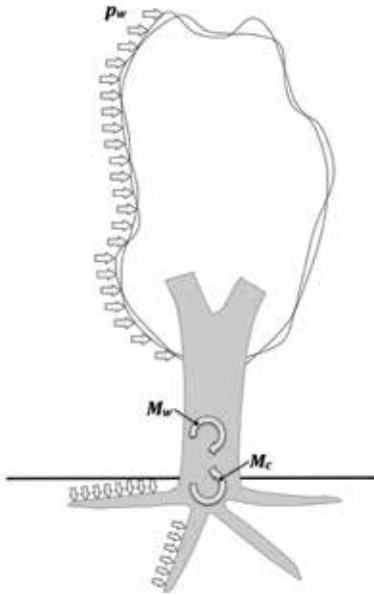
Ten rozdział zawiera szczegółowy opis dwóch instrumentalnych metod oceny stabilności drzew. Zostały one opracowane na podstawie zasad biomechaniki opisanych w rozdziale I. Przedstawimy podstawową koncepcję, praktyczne narzędzia, wdrażanie i ocenę tradycyjnej próby obciążeniowej, a także nowatorskie procedury dynamicznych testów stabilności. Omówione zostaną również niezawodność, zalety i wady tych technik. Na koniec przyjrzymy się niektórym czynnikom wpływającym na stabilność drzewa i jej ocenę, o których należy pamiętać podczas testowania i interpretowania wyników.

### 1. STABILNOŚĆ DRZEWA OGÓLNIE

Główną, jeśli nie jedyną przyczyną przewracania się drzew jest poziome obciążenie korony drzew przez wiatr. Drzewa zachowują się jak belki wspornikowe, a obciążenie wiatrem powoduje zgięcie, które może spowodować złamanie pnia lub wyrwanie korzeni kotwiczących drzewo z ziemi. Celem testowania stabilności drzewa jest określenie, czy dla danego drzewa taka sytuacja jest prawdopodobna. Najpierw należałoby wyjaśnić, co rozumiemy przez określenie „bezpieczeństwo drzewa”. Co to znaczy, kiedy mówimy, że drzewo jest bezpieczne?

Na pierwszy rzut oka odpowiedź może wydawać się oczywista – drzewo nie powinno upaść z powodu wyrwania lub złamania w żadnych warunkach. Takie oczekiwanie nie jest jednak realistyczne, ponieważ odpowiednio duże obciążenie wiatrem może spowodować upadek nawet najbezpieczniejszego drzewa. Dlatego stabilność drzewa jest zawsze określana na podstawie spodziewanego silnego wiatru, a bezpieczeństwo określane jest w odniesieniu do tzw. referencyjnej wartości prędkości wiatru (najsilniejszego wiatru spodziewanego w danym położeniu geograficznym).

Jak wyjaśniono w rozdziale I, stabilność drzewa określa się, porównując największe obciążenie wiatrem, które może oddziaływać na drzewo, z największym obciążeniem, jakie dane drzewo może wytrzymać bez złamania lub wywrócenia. Krótko mówiąc, jeśli pierwsza wartość jest wyższa, drzewo prawdopodobnie ulegnie złamaniu lub zostanie wyrwane z korzeniami przy silnym wietrze, a zatem nie jest bezpieczne.



Ryc. 3.1.  
Równowaga między obciążeniem wiatrem  
( $M_w$ ) a momentem wywrotu ( $M_c$ )

Sama teoria wydaje się dość prosta. Istnieją jednak trudności i niepewności przy określaniu zarówno maksymalnego spodziewanego obciążenia wiatrem, jak i krytycznego obciążenia wiatrem, które dane drzewo może wytrzymać. Te kwestie zostaną szczegółowo omówione w części dotyczącej prób obciążeniowych. Jednym z czynników, które komplikują kwestię stabilności drzewa jest to, że obciążenie wiatrem nie jest typu stałego, statycznego. Silne wiatry często pojawiają się w formie porywów, które przeplatają się z okresami ciszy. Drzewo jest złożoną strukturą, a jego odpowiedź na tego typu obciążenia bywa trudna do przewidzenia. Dlatego tradycyjna metoda badania stabilności drzewa (tj. próba obciążeniowa) bazuje na obciążeniu statycznym. Próba obciążeniowa jest znacznie łatwiejsza do przeprowadzenia i obliczenia, ale jest jedynie namiastką zachowania drzewa podczas dynamicznych obciążeń wiatrem.

Niedawno pojawił się nowy sposób przeprowadzania prób pod wpływem rzeczywistego obciążenia wiatrem, oparty na podejściu statystycznym. W kolejnych rozdziałach opiszemy filozofię, zalety i ograniczenia obu tych testów.

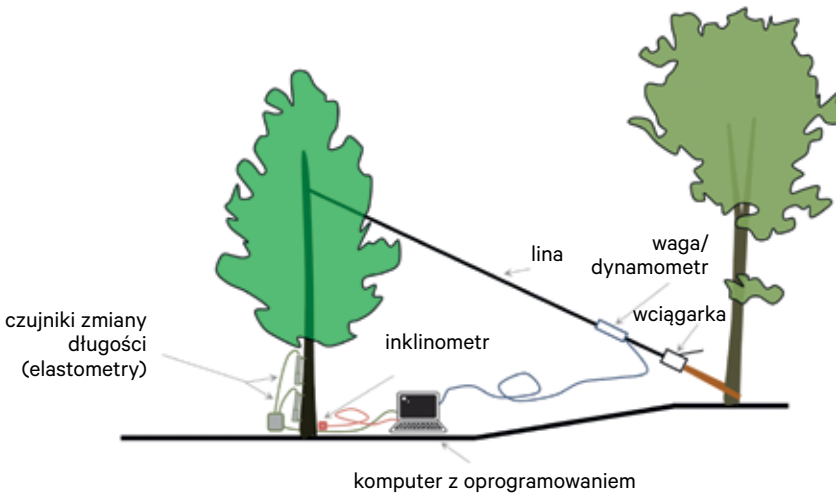
## 2. PRÓBA OBCIĄŻENIOWA (PULLING TEST)

Próba obciążeniowa jest przyjazną drzewom nieniszczącą metodą oceny stabilności drzewa. Została opracowana na podstawie wyników badań Wessolly'ego i Sinna (Sinn 1983, Wessolly 1991). Jak opisano w rozdziale 1.5, test ten polega na zamocowaniu liny w koronie drzewa (najlepiej blisko środka korony) i wywieraniu stopniowo rosnącego obciążenia bocznego, przy ciągłym pomiarze wychylenia szczy korzeniowej drzewa (inklinacji) i/lub odkształcenia pnia. Stabilność drzewa i bezpieczeństwo pnia na złamanie można ocenić odpowiednio na podstawie danych dotyczących inklinacji i odkształcenia.

### A. SPRZĘT

#### LINA I WCIĄGARKA

Na drzewo wywierana jest siła poprzeczna za pomocą stalowej lub syntetycznej liny (np. Dyneema) o odpowiedniej długości (zwykle co najmniej 20 m) i nośności. W zależności od geometrii drzewa i wysokości, na jakiej lina jest zamocowana w koronie, do uzyskania pożądanego nachylenia lub odkształcenia wymagane jest odpowiednie obciążenie. Uzyskujemy je za pomocą wciągarki z mechanizmem zapadkowym, który pomaga operatorowi uzyskać wystarczające naprężenie na linie. Zarówno lina, jak i wciągarka powinny być wystarczająco mocne, aby wytrzymać obciążenie niezbędne do próby obciążeniowej (zwykle 1,5–3,5 tony).



Ryc. 3.2.

Typowe ustawienia próby obciążeniowej oraz główne komponenty systemu

Lina musi być zamontowana w koronie drzewa (wokół pnia lub dużego konaru), a wciągarka zaczepona w punkcie blisko ziemi (często wokół pnia innego drzewa). Ponieważ w tej sytuacji występuje znaczne obciążenie, jest wysoce prawdopodobne, że lina spowoduje uszkodzenie drzewa (lub drzew). Aby tego uniknąć, operatorzy zwykle używają szerokiego, miękkiego pasa i owijają go wokół drzewa. Należy uważać by nie uszkodzić kory drzewa.

Oczywiście sam pas powinien być również wystarczająco mocny, aby wytrzymać naprężenie na linie. Ważne, aby do tego typu testów używać produktów z atestem, dopuszczalne obciążenie należy sprawdzić przez testem.



Ryc. 3.4.

Stosowanie pasa do ochrony drzewa



Ryc. 3.3.

Lina, wciągarka i pas użyte do wytworzenia bocznego obciążenia drzewa



Ryc. 3.5.

Sprawdzenie dopuszczalnego obciążenia na pasie ochronnym



Ryc. 3.6.  
Przyrząd do pomiaru obciążenia  
montowany na linie



Ryc. 3.7.  
Przyrząd do pomiaru obciążenia montowany  
pomiędzy pasem a liną (zdjęcie dzięki  
uprzejmości Argus Electronic GmbH)



Ryc. 3.8.  
Inklinometry montowane na szyi  
korzeniowej (zdjęcia dzięki uprzejmości  
Argus Electronic GmbH i FAKOPP Ltd.)

### PRZYRZĄD DO POMIARU OBCIĄŻENIA

Dokładny pomiar naprężenia liny (tj. obciążenia bocznego wywieranego na drzewo) ma kluczowe znaczenie dla stworzenia krzywej obciążenie–wychylenie lub obciążenie–odkształcenie oraz, finalnie, dla oceny bezpieczeństwa drzewa. Naprężenie mierzy się za pomocą skalibrowanego przyrządu pomiarowego (dynamometru).

Można go zamontować na linie lub pomiędzy pasem a liną. Przyrząd ten zapewnia dokładne odczyty obciążenia w czasie rzeczywistym z wystarczającą częstotliwością (co najmniej 1 odczyt na sekundę), które są rejestrowane i wyświetlane przez specjalne oprogramowanie. Przyrząd do pomiaru obciążenia musi być wytrzymały, niezawodny i odporny na warunki atmosferyczne.

### INKLINOMETRY

Ocena stabilności wymaga dokładnego pomiaru nachylenia szyi korzeniowej drzewa (podstawy pnia drzewa blisko gruntu). Do jego pomiaru wykorzystywany jest inklinometr o odpowiedniej czułości ( $\pm 0,001$  stopnia) i zakresie pomiarowym.

Inklinometr jest zazwyczaj mocowany do podstawy pnia drzewa np. za pomocą przykręcanej płytki montażowej. Przyrząd ten jest połączony z płytką montażową za pomocą urządzenia poziomującego (np. przegubu kulowego). Podczas pomiaru inklinometr jest podłączony do komputera za pomocą kabla lub Bluetooth, aby przekazywać wartości nachylenia do oprogramowania pomiarowego z odpowiednią częstotliwością.



Ryc. 3.9.  
Płytki montażowe do mocowania  
inklinometru z dwuosiową poziomnicą

### ELASTOMETRY

Aby ocenić bezpieczeństwo pnia na złamanie, należy zmierzyć odkształcenie pnia, co wymaga zastosowania bardzo czułego urządzenia ( $\pm 0,001$  mm). Odkształcenie jest mierzone po tej samej stronie co lina obciążająca lub po stronie przeciwnej do liny (strefa ściskania, rozciągania lub obie). W tym celu zwykle używamy ekstensometru (elastometru) typu LVDT (transformatorowy czujnik przemieszczeń liniowych, ang: *linear variable differential transformer*). Czujniki LVDT mogą bardzo precyzyjnie mierzyć względne wydłużenie pnia drzewa. Posiadają obudowę oraz ruchomy rdzeń. Oba te elementy muszą zostać przymocowane do drzewa, po czym można bardzo dokładnie zmierzyć ich względne przemieszczenie. Wartości przemieszczenia względnego są ponownie wysyłane do programu, które generuje krzywą obciążenie–odkształcenie.



Ryc. 310  
Czujnik odkształcenia montowany na pniu (zdjęcie dzięki uprzejmości Argus Electronic GmbH)

### OPROGRAMOWANIE DO PRÓBY OBCIĄŻENIOWEJ I KOMPUTER

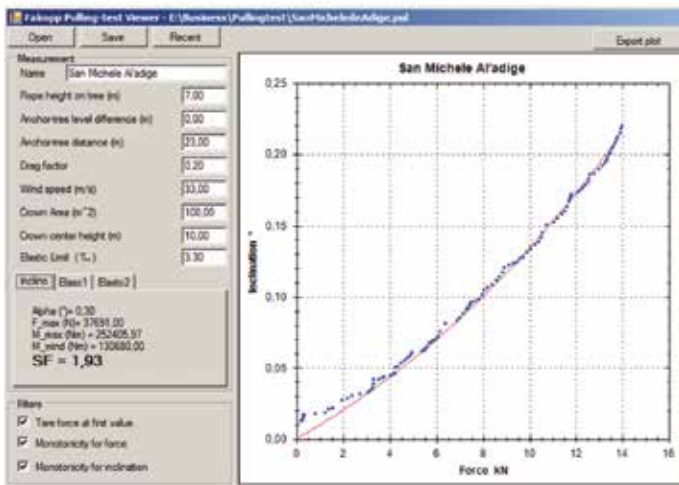
Zarówno przeprowadzenie próby jak i dokonanie oceny wyników wymaga odpowiedniego oprogramowania komputerowego. Na rynku dostępnych jest kilka programów do tego typu testów (zwykle są dołączane do zakupionego wyposażenia do przeprowadzenia testu). W zależności od oprogramowania, zazwyczaj może ono:



Ryc. 311.  
Czujnik odkształcenia w pozycji zamkniętej (po lewej) i otwartej (po prawej). (1 – linka, 2 – obudowa, 3,4,5 – mechanizm blokujący, 6 – ruchomy rdzeń. Zdjęcie dzięki uprzejmości FAKOPP Ltd.)

Ryc. 312.

Przykład ekranu pokazującego wyniki próby obciążeniowej





Ryc. 3.13.

Lekka składana drabina (powyżej)  
i sprzęt do wspinaczki (poniżej)  
– fot. Jakub Józefczuk

- obliczać obciążenia boczne na podstawie wprowadzonych parametrów geometrycznych;
- dokonywać jednoczesnego pomiaru obciążenia, wychylenia i zmian długości (odkształcenia);
- generować krzywe (wykresy) obciążenie–inclinacja oraz obciążenie–odkształcenie;
- automatycznie obliczać współczynnik bezpieczeństwa (SF) na wywrot oraz uszkodzenia (złamania) pnia na podstawie wprowadzonych parametrów geometrycznych, współczynnika oporu, granicy elastyczności i referencyjnej prędkości wiatru;
- eksportować wyniki do raportów i/lub tabel.

Równoczesne gromadzenie i ocena danych podczas testu jest ważne, aby ustalić, kiedy należy przerwać próbę bez powodowania uszkodzenia drzewa. Wymaga to komputera przenośnego (laptopa lub tabletu), który odbiera dane i ostrzega operatora, aby przerwał test, gdy zostaną osiągnięte odpowiednie wartości nachylenia lub odkształcenia. Specyfikacje systemu zależą od konkretnego oprogramowania używanego w trakcie testu, ale wymagania są zwykle podobne.

Oprócz wykresów obciążenie–inclinacja i/lub obciążenie–odkształcenie, ocena wyników wymaga również pewnych parametrów geometrycznych jak np. powierzchnia korony lub wysokość środka korony. Można je oszacować, ale wymaga to dużej praktyki i prawdopodobnie nie będzie dokładne. Obecnie eksperci używają cyfrowych zdjęć drzewa, które analizują za pomocą oprogramowania komputerowego (może być to oddzielne oprogramowanie lub to samo co dla próby obciążeniowej). Więcej informacji na ten temat można znaleźć w części artykułu poświęconej dokonywaniu oceny.

#### **DRABINA LUB SPRZĘT DO WSPINACZKI**

W zależności od wysokości drzewa możemy potrzebować drabiny lub być może będziemy musieli się na nie wspiąć w celu zamontowania pasa, do którego przymocowana jest lina na odpowiedniej wysokości. Jeśli korzystamy z tej pierwszej opcji, najlepiej mieć lekką, teleskopową lub składaną drabinę aluminiową. Sprzęt do wspinaczki na drzewa może być bardziej

elastyczną i mniej uciążliwą alternatywą, ale jego użycie wymaga wiedzy i doświadczenia. W obu przypadkach bezpieczeństwo jest najwyższym priorytetem.

## B. PROCEDURA TESTU

Ryc. 3.2. przedstawia ogólny schemat konfiguracji testu. W tym rozdziale opowiemy krok po kroku, jak przygotować się do próby obciążeniowej i jak ją przeprowadzić, na przykładzie jednego z systemów. (Inne systemy i oprogramowania mogą wymagać nieco innych kroków lub konkretnych działań, generalne zasady będą jednak wspólne, przyp. red. PL)

Zasady, z którymi należy się zapoznać przed wykonaniem konfiguracji oraz samego testu:

- Próba obciążeniowa wymaga stosunkowo dobrej pogody, z wiatrem poniżej 25 km/h. Silny wiatr może zakłócać test i powodować fałszywe odczyty.
- Stabilność i wytrzymałość drzewa mogą różnić się w zależności od kierunku. Drzewa są najsilniejsze w kierunku zgodnym z przeważającym kierunkiem wiatru (punkt na kompasie, z którego wiatr wieje najczęściej). Aby uzyskać optymalne wyniki, kierunek, w którym wykonywana jest próba obciążeniowa, powinien być taki sam lub przynajmniej zbliżony do przeważającego kierunku wiatru.
- Wykonanie konfiguracji sprzętu do testu, przeprowadzenie próby oraz demontaż sprzętu zajmują około 30–60 minut na każde drzewo, co oznacza, że należy zaplanować odpowiednią ilość czasu.
- W trakcie konfiguracji i przeprowadzania testu musimy przestrzegać odpowiednich środków bezpieczeństwa (zob. koniec tego podrozdziału).

Najpierw należy przetransportować sprzęt do miejsca, w którym będzie przeprowadzana próba. Ponieważ wiele elementów wyposażenia (np. lina, wciągarka, drabina i/lub sprzęt do wspinaczki) jest ciężkich i/lub niewygodnych do przenoszenia, zwykle wymaga to obecności asystenta, który może również pomóc w konfiguracji i przeprowadzaniu próby .

### PRZYGOTOWANIA DO TESTU UWZGLĘDNIAJĄ NASTĘPUJĄCE ETAPY:

1.

#### MOCOWANIE LINY W KORONIE DRZEWA

Pierwszym krokiem jest zamontowanie liny w koronie drzewa. Jak wspomniano w poprzedniej części rozdziału, aby uniknąć uszkodzenia drzewa, lina nie może mieć z nim bezpośredniej styczności. Używamy miękkiego, szerokiego pasa, który mocujemy wokół pnia i do którego przyczepiamy linę.

Pas mocowany jest zazwyczaj wokół pnia drzewa w koronie na odpowiedniej wysokości. Im wyżej znajduje się punkt mocowania, tym mniejsze obciążenie liny, ponieważ ramię siły jest dłuższe. Jest to szczególnie przydatne podczas testowania sędziwych drzew o dużej średnicy pnia, które wymagają



Ryc. 3.14.  
Owijanie pasa wokół pnia drzewa



Ryc. 3.15.  
Mocowanie liny do pasa



Ryc. 3.16.  
Montowanie liny we wciągarkę



Ryc. 3.17.  
Wciągarka przymocowana do punktu kotwienia za pomocą szerokiego pasa

odpowiedniego momentu siły, abyśmy mogli uzyskać dane na temat inklinacji i/lub odkształcenia. Z drugiej strony, mocowanie pasa wysoko na drzewie może wymagać wspinaczki lub konieczności użycia długiej drabiny.

## 2.

### MONTOWANIE WCIĄGARKI

Po zamocowaniu jednego końca liny na drzewie, drugi należy zamontować do wciągarki. Wciągarka jest przymocowana do punktu kotwienia w pobliżu gruntu. Może to być pień innego drzewa (blisko nasady), pniak lub jakiegolwiek inny obiekt, który bezpiecznie tkwi w gruncie. Jeśli do tego celu wybierzemy inne drzewo, należy użyć jeszcze jednego pasa, owijając go wokół pnia, aby zabezpieczyć je przed uszkodzeniem. Punkt kotwienia należy wybrać po stronie przeciwnej do przeważającego kierunku wiatru. Nie zawsze jest to łatwe, ponieważ możemy nie mieć dobrego punktu kotwienia akurat w tym miejscu. W takiej sytuacji należy znaleźć punkt kotwienia znajdujący się najbliżej takiego miejsca.

Należy również zwrócić uwagę, aby lina nie była zamontowana pod zbyt dużym kątem. W przeciwnym razie nie będziemy w stanie wywrzeć wystarczającego obciążenia bocznego na drzewo. Kiedy lina jest naprężona, jej kąt względem poziomu nie powinien wynosić więcej niż 30 stopni.

### UWAGA:

wciągarki to narzędzia stworzone do wytwarzania dużego naprężenia na linie. Operatorzy powinni zapoznać się z działaniem takiego sprzętu i zachować szczególną ostrożność w celu uniknięcia obrażeń ciała.

## 3.

### MONTOWANIE PRZYRZĄDU DO POMIARU OBCIĄŻENIA

W zależności od zastosowanego systemu, przyrząd do mierzenia obciążenia powinien znajdować się pomiędzy pasem a liną, pomiędzy wciągarką a pasem kotwiącym lub powinien być zamontowany na linie. Podczas korzystania z przyrządu montowanego na linie, element ten powinien znajdować się powyżej miejsca, w którym lina wchodzi do wciągarki. Nie powinien znajdować się zbyt blisko niej, ponieważ lina będzie wchodziła dalej do urządzenia w celu wywarcia odpowiedniego naprężenia. Nie powinien



znajdować się też zbyt daleko od wciągarki, ponieważ będzie zbyt wysoko, co może oznaczać trudności z jego zamontowaniem. Kiedy lina jest naprężona, odległość przyrządu do mierzenia obciążenia od wciągarki powinna wynosić 50–60 cm.

4.

#### MONTAŻ INKLINOMETRÓW

Inklinometr jest mocowany u nasady pnia, czyli tak blisko gruntu, jak to praktycznie możliwe. W celu dokonania oceny stabilności drzewa należy zmierzyć nachylenie podstawy pnia. Jeśli inklinometr jest zamocowany wyżej, zarejestrujemy większe nachylenie i niższe wartości współczynnika bezpieczeństwa (SF) niż w rzeczywistości.

W zależności od rodzaju zastosowanego inklinometru, zwykle najpierw musimy przymocować płytkę montażową do drzewa. Można tego dokonać za pomocą śrub, (w niektórych systemach gwoździ przyp. PL – przy minimalnym uszkodzeniu drzewa) – lub też pasów. Po zamontowaniu płytki umieszczamy na niej inklinometr. Na koniec, w zależności od rodzaju stosowanego inklinometru, należy wypoziomować przyrząd we wszystkich kierunkach. W przeciwnym razie może dojść do przekroczenia zakresu pomiarowego. Możemy użyć małej poziomicy albo taniej (czasem nawet bezpłatnej) i powszechnie dostępnej aplikacji na telefon.

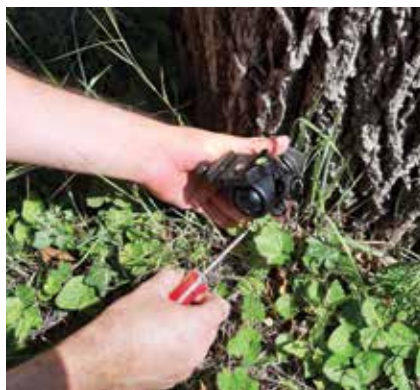
Niektóre z płytek montażowych mają również wbudowane poziomnice, które ułatwiają poziomowanie (ryc. 3.21).



Ryc. 3.18.  
Mocowanie przyrządu do pomiaru obciążenia na linie



Ryc. 3.19.  
Przyrząd do pomiaru obciążenia powinien znajdować się w odpowiedniej odległości od wciągarki



Ryc. 3.20.  
Mocowanie płytki montażowej u podstawy pnia drzewa



Ryc. 3.21.  
Poziomowanie inklinometru za pomocą małej poziomicy (na górze) lub aplikacji na telefon komórkowy (na dole)



Ryc. 3.22.  
Płytkę montażową z wbudowaną poziomnicą



Ryc. 3.23.  
Zastosowanie kilku inklinometrów  
na tym samym drzewie



Ryc. 3.24.  
Montowanie elastometru na pniu  
drzewa (urządzenie zablokowane)

Jeśli drzewo jest zdrowe i ma stosunkowo dużą średnicę, do jego pomiaru wystarczy zazwyczaj jeden inklinometr. W przypadku mniejszej średnicy lub drzewa z problemami dość łatwo dochodzi do odkształceń, nawet jeśli czujnik jest umieszczony blisko ziemi, co może być przyczyną fałszywych odczytów. W takim przypadku można używać dwóch lub więcej inklinometrów jednocześnie.

Należy pamiętać, że szyja korzeniowa bardzo młodego drzewa o małej średnicy niezwykle łatwo ulega odkształceniu (zginaniu) podczas testu. To również jest uwzględniane w pomiarze i skutkuje większym nachyleniem oraz mniejszym współczynnikiem bezpieczeństwa. Z tego powodu należy unikać przeprowadzania testów na młodych drzewach, których średnica nie przekracza 40 cm.

## 5. MONTOWANIE ELASTOMETRÓW

Elastometry montuje się na pniu drzewa w miejscu, w którym drzewo jest najbardziej narażone na złamanie. Jeśli nie ma oznak słabości pnia, możemy zamontować go na wysokości klatki piersiowej. Korzystając z więcej niż jednego elastometru, możemy sprawdzić kilka miejsc na pniu.

Montowanie elastometru to zazwyczaj proste zadanie wymagające zamocowania obudowy urządzenia oraz jego ruchomego rdzenia do pnia drzewa w odpowiednim miejscu za pomocą jednej śruby lub gwoźdźca. W momencie mocowania przyrząd powinien być zablokowany (zob. ryc. 3.11.), po czym przed rozpoczęciem próby należy go odblokować. Elastometr można zamocować po tej samej stronie drzewa, po której jest zamocowana lina (strefa ściskania) lub po przeciwnej stronie (strefa rozciągania). Elastometru nie należy montować z boku pnia, ponieważ będziemy rejestrować niższe odczyty lub (w tzw. strefie neutralnej) gdzie brak odkształcenia.

Po zamontowaniu wszystkich przyrządów pomiarowych należy je podłączyć do komputera.

## 6. PRZEPROWADZENIE TESTU

Po wykonaniu wyżej wymienionych czynności jesteśmy gotowi do rozpoczęcia próby. Najpierw należy uruchomić oprogramowanie i wprowadzić

podstawowe dane geometryczne oraz inne parametry jak następuje:

- geometria drzewa: powierzchnia korony i wysokość środka korony,
- geometria konfiguracji pomiaru: odległość między punktem kotwienia a drzewem, wysokość mocowania liny, różnica poziomów między punktem kotwienia a drzewem,
- referencyjna prędkość wiatru,
- aerodynamiczny współczynnik oporu,
- granica elastyczności (tylko dla bezpieczeństwa pnia drzewa).

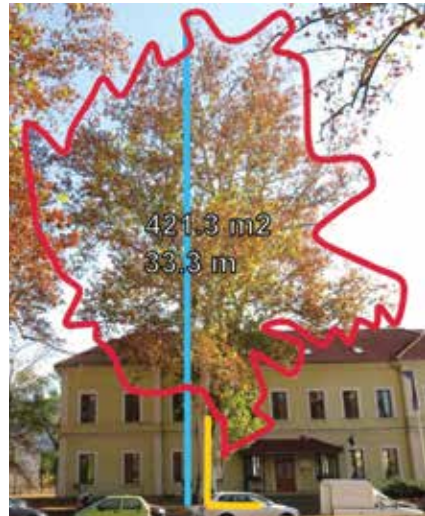
Geometria drzewa jest zazwyczaj określana na podstawie cyfrowego zdjęcia drzewa i jego analizy. Należy pamiętać, że obraz musi być wyraźny i że musi być na nim zaznaczona odległość referencyjna. Operator musi znać i wprowadzić tę informację. Im większa odległość, tym dokładniejsze będą parametry geometryczne. Najlepiej, gdyby była możliwość zmierzenia wysokości drzewa oraz wprowadzenia jej do programu. Na podstawie zdjęcia program oblicza powierzchnię korony i wysokość jej środka. Program może oszacować jej kształt (np. owalny), albo operator może go narysować odręcznie – wtedy program obliczy powierzchnię oraz położenie środka korony.

Po podaniu wszystkich wymaganych danych można przystąpić do testu. W trakcie próby wytwarzamy stopniowo narastające naprężenie liny poprzez jej powolne i równomierne wciąganie przez wciągarkę. To generuje moment siły w drzewie, przyczyniając się do zgięcia pnia oraz przechylenia jego podstawy. Próbę należy przerwać po osiągnięciu wychylenia 0,25 stopnia w celu ochrony drzewa przed uszkodzeniem, a w szczególności w celu uniknięcia przewrócenia się drzewa i uszkodzeń pobliskich drzew lub zabudowań. (Drzewa zazwyczaj nie ulegają wywróceniu ani nie łamią się, kiedy inklinacja nie przekracza 2 stopni. Niemniej jednak zawsze należy minimalizować ryzyko, ograniczając dostęp osobom postronnym oraz stosując sprzęt ochronny.)

Nachylenie podstawy pnia powinno być monitorowane przez cały czas trwania testu, aby określić, kiedy należy go przerwać. Oprogramowanie zazwyczaj wysyła wizualne i/lub dźwiękowe ostrzeżenia po osiągnięciu 0,25 stopnia nachylenia lub granicy obciążenia wciągarki.



Ryc. 3.25.  
Elastometr zamontowany na pniu  
(pozycja odblokowana)



Ryc. 3.26.  
Obraz drzewa z zaznaczonym  
konturem korony (kolor czerwony)  
i długością referencyjną (wysokość  
drzewa – kolor niebieski)



Ryc. 3.27.  
W trakcie testu



Ryc. 3.28.

Ekran laptopa pokazujący zmierzone parametry. Sprzęt wysyła ostrzeżenia do operatora, jeśli osiągnięty zostanie limit wychylenia lub obciążenia

#### UWAGA:

podczas próby obciążeniowej można dopuścić do zniszczenia drzewa (np. przez wyrócenie lub złamanie), jeśli uszkodzenie nie stanowi problemu (np. jeśli drzewo jest problematyczne i przeznaczone do usunięcia). Wymaga to wygenerowania znacznego momentu siły przy użyciu długiego ramienia siły (np. mocowanie liny wysoko na drzewie) lub dużego obciążenia liny. W takiej sytuacji bezpieczeństwo jest priorytetem. Osoby postronne powinny znajdować się daleko i w bezpiecznej odległości, a operatorzy muszą mieć na sobie odzież ochronną. Tego typu próby są bardzo przydatne zwłaszcza do celów badawczych (tzw. próby niszczące, przyp. red. PL)

#### OSTRZEŻENIA DOTYCZĄCE BEZPIECZEŃSTWA:

Próba obciążeniowa wymaga znacznych obciążeń i może być niebezpieczna, jeśli nie będą przestrzegane odpowiednie zasady. Uszkodzenie liny może spowodować poważne obrażenia, dlatego należy postępować zgodnie z poniższymi instrukcjami bezpieczeństwa:

- Za bezpieczne wykonanie próby odpowiada kierownik zespołu, który ją przeprowadza.
- Próbę obciążeniową mogą przeprowadzać jedynie przeszkolone osoby.
- Urządzenie ciągnące, pasy, lina oraz wciągarka muszą być czynne i w dobrym stanie. Przed testem należy sprawdzić je pod kątem uszkodzeń.
- Wszystkie urządzenia należy chronić przed wilgocią, mrozem i długotrwałym nasłonecznieniem.
- Miejsce przeprowadzania próby powinno być zamknięte dla osób postronnych. Osobom nieupoważnionym nie wolno zbliżać się, przechodzić pod liną ani wspinać się po niej.
- Osoby w zespole przeprowadzającym próbę powinny mieć na sobie odzież ochronną włączając kaski oraz obuwie ochronne. Zaleca się również noszenie rękawic ochronnych w trakcie pracy z liną i wciągarką, podczas wspinania się na drzewo itd.
- Zespół przeprowadzający próbę musi stać w odległości co najmniej 2 metrów od liny z wyjątkiem operatora wciągarki.
- Sprawdź drogę ewakuacyjną z miejsca, w którym będzie przeprowadzana próba obciążeniowa do innej, bezpiecznej lokalizacji. W przypadku nieoczekiwanego zdarzenia, takiego jak np. złamanie drzewa lub uszkodzenia liny, natychmiast szukaj bezpiecznego miejsca.
- Powyżej obciążenia 1 kN operator wciągarki powinien użyć wysięgnika i stać jak najdalej od liny.
- Przerwać próbę obciążeniową po osiągnięciu 0,25 stopnia inklinacji.
- Jeśli drzewo znacznie skrzywieć, natychmiast przerwać test (nie należy tego mylić z odgłosem liny dostosowującej swoją pozycję do drzewa).
- Należy przestrzegać wszystkich zasad dotyczących bezpieczeństwa podanych w instrukcji urządzenia do ciągnięcia.
- Próby obciążeniowej nie wolno przeprowadzać podczas deszczu ani w ujemnych temperaturach.

## C. OCENA WYNIKÓW

Opierając się na parametrach wprowadzonych na początku testu oraz krzywych obciążenia–inklinacji i/lub obciążenia–odkształcenia, program dokonuje automatycznej oceny wyników, co jest wygodne dla operatora. Ważne jest natomiast, aby je rozumieć i poprawnie interpretować:

### Obciążenie wiatrem

Program oblicza maksymalny oczekiwany moment siły spowodowanej obciążeniem wiatrem ( $M_{\text{wiatr}}$ ) na podstawie wprowadzonych danych geometrycznych korony, referencyjnej prędkości wiatru i wartości współczynnika oporu powietrza, korzystając ze wzorów przedstawionych w rozdziale I. Jest to moment siły, który drzewo będzie musiało wytrzymać (bez wywrócenia się lub pęknięcia pnia).

### Krzywa nachylenia–obciążenia oraz moment krytyczny (powodujący wywrócenie drzewa)

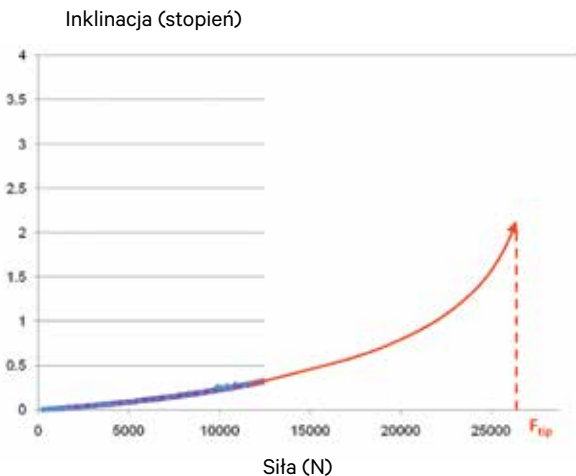
Punkty danych obciążenia–nachylenia układają się w wykres tangens drugiego rzędu – w zależności przedstawionej w rozdziale I. Relacja ta została bardzo dobrze zilustrowana na ryc. 1.8., która przedstawia krzywą obciążenia–nachylenia badanego drzewa, aż do momentu zniszczenia, dzięki czemu punkt wywrotu ( $F_{\text{krytyczna}}$ ) jest wyraźnie widoczny na wykresie, a moment siły prowadzącej do wywrotu jest łatwy do obliczenia.

Jednak w momencie testowania stabilności drzewa dochodzimy jedynie do 0,25 stopnia inklinacji, przez co otrzymujemy tylko pierwszą część tej krzywej. Sposób, w jaki określamy  $M_{\text{krytyczny}}$  na podstawie tej krzywej, polega na dopasowaniu wykresu tangens oraz stycznej do dostępnych punktów danych i ekstrapolacji krzywej do  $F_{\text{krytyczna}}$  (ryc. 3.29.).

(Uwaga: wartości obciążenia pokazane na ryc. 3.26. to pozioma składowa obciążenia liny, którą program oblicza na podstawie wprowadzonych danych geometrycznych).

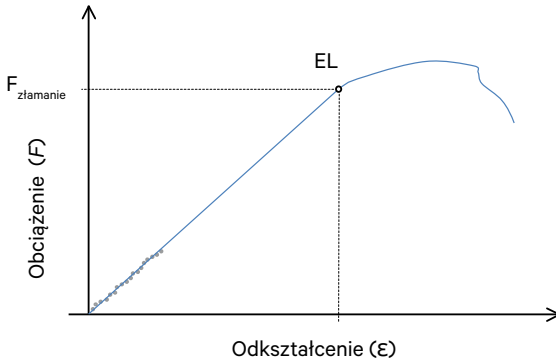
### Krzywa odkształcenia–obciążenia i moment powodujący pęknięcie/złamanie pnia

Jak omówiono w rozdziale I, krzywa odkształcenia–obciążenia pnia zachowuje liniową zależność aż do tzw. granicy liniowej elastyczności. Drzewo w rzeczywistości nie pęka przy tej granicy, ale jego pień zostaje nieodwracalnie uszkodzony. Dlatego obliczenia dotyczące bezpieczeństwa są oparte na granicy elastyczności, a nie na ostatecznym obciążeniu.



Ryc. 3.29.

Określanie siły prowadzącej do wywrotu ( $F_{\text{krytyczna}} = F_{\text{tip}}$ ) z początkowej części wykresu obciążenia–wychylenia przez ekstrapolację, przy użyciu specjalnej zależności stycznej drugiego rzędu



Ryc. 3.30.  
Określanie siły prowadzącej do złamania pnia ( $F_{\text{złamanie}}$ ) na podstawie początkowej części wykresu obciążenia–odkształcenia metodą ekstrapolacji liniowej do granicy elastyczności (EL)

W tym przypadku mierzymy tylko początek krzywej obciążenia–odkształcenia, a program ekstrapoluje obciążenie do wprowadzonej granicy liniowej elastyczności, aby obliczyć krytyczne obciążenie poziome ( $F_{\text{złamanie}}$ , zob. ryc. 3.30.), a następnie moment siły prowadzący do złamania pnia ( $M_{\text{złamanie}}$ ). Granica liniowej elastyczności (EL) to wartość specyficzna dla danego gatunku drzewa, którą można sprawdzić w tabeli stuttgarckiej (zob. rozdział I)

#### Współczynnik bezpieczeństwa (Safety Factor)

Program oblicza współczynnik bezpieczeństwa drzewa (SF) dzieląc moment wywrótu ( $M_{\text{krytyczny}}$ ) lub złamania pnia ( $M_{\text{złamanie}}$ ) przez moment obciążenia wiatrem ( $M_{\text{wiatr}}$ ), odpowiednio dla bezpieczeństwa drzewa na wywrócenie i złamanie. Informacje na temat interpretacji współczynnika bezpieczeństwa znajdują się w rozdziale I.

Jest kilka aspektów, o których należy pamiętać podczas interpretacji współczynnika bezpieczeństwa (SF):

- Moment obciążenia wiatrem – współczynnik bezpieczeństwa jest zawsze obliczany w odniesieniu do referencyjnej prędkości wiatru. Drzewo o stosunkowo wysokim współczynniku bezpieczeństwa przy danej prędkości wiatru może nie być bezpieczne przy silniejszym wietrze.
- Współczynnik bezpieczeństwa na złamanie obowiązuje dla tego odcinka pnia, w którym podczas testu umieszczono czujnik. Jeśli istnieje słabsza część pnia, drzewo może pęknąć przy referencyjnej prędkości wiatru lub poniżej niej. Pewność oceny można zwiększyć mierząc więcej części pnia lub łącząc próbę obciążeniową z innymi metodami oceny bezpieczeństwa drzewa (np. stosując tomografię akustyczną).
- Wartości współczynnika bezpieczeństwa obowiązują w takich okolicznościach, w jakich przeprowadzono pomiar. Czynniki takie jak zmiany ulistnienia, zamrznięty grunt czy wilgotność gleby mogą wpływać na bezpieczeństwo drzewa. Jeśli współczynnik bezpieczeństwa jest poniżej 1, drzewo jest niebezpieczne i wymaga interwencji, natomiast powyżej 1,5 drzewo jest uważane za bezpieczne. Ponieważ istnieje pewien poziom niepewności przyjmuje się, że w przypadku współczynnika bezpieczeństwa 1–1,5 występuje umiarkowane ryzyko wywrócenia lub złamania pnia drzewa, a drzewo powinno być pod tym kątem monitorowane. Więcej informacji na ten temat znajduje się w części 4 tego rozdziału.

## D. ZALETY I OGRANICZENIA PRÓBY OBCIĄŻENIOWEJ

Próba obciążeniowa (czasami nazywana również „elasto-inclino”) jest szeroko stosowana przez ekspertów ds. kontroli drzew od lat 80. ubiegłego wieku. Została opracowana na podstawie zasady biomechaniki i jest uważana za standardową metodę badania drzew. Oprócz zalet ma jednak pewne wady i ograniczenia.

### ZALETY:

- Akceptowana i zatwierdzona metoda oceny stabilności drzewa i bezpieczeństwa pnia na złamanie.
- Działa dobrze przy bezwietrznej pogodzie (prędkość wiatru poniżej 25 km/h).
- Operator ma pełną kontrolę nad warunkami testu (kierunek, wskaźniki obciążenia itp.).
- Dobra korelacja pomiędzy mierzonymi parametrami zapewnia wysoki poziom wiarygodności wyników.

### WADY I OGRANICZENIA:

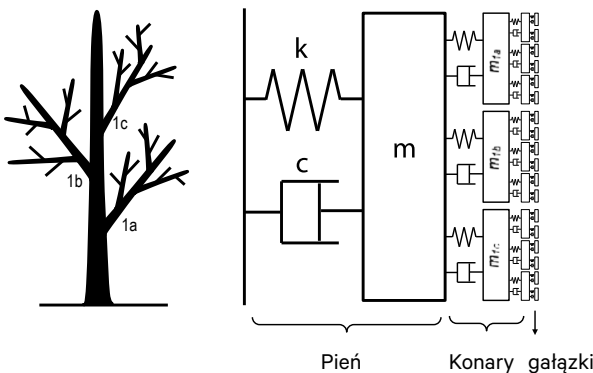
- Trudności w oszacowaniu parametrów geometrycznych: określenie danych geometrycznych korony drzewa może sprawiać trudność. Dokonuje się tego albo przez szacowanie, które jest obarczone dużym prawdopodobieństwem niedokładności, albo poprzez cyfrową analizę obrazu. Stosując drugą metodę, operator zaznacza granice korony na zdjęciu, co bywa subiektywne, a przy obecnym poziomie zaawansowania program samodzielnie nie jest w stanie uwzględnić obszaru korony. W tej metodzie należy również podać wartość długości referencyjnej, co może okazać się kolejnym źródłem niedokładnych informacji.
- Ograniczenie stosowalności parametrów specyficznych dla danego gatunku drzewa: niektóre stałe potrzebne do oceny, takie jak granica liniowej elastyczności lub współczynnik oporu aerodynamicznego, pochodzą z danych literaturowych jako wartości specyficzne dla danego gatunku drzewa. Należy jednak pamiętać, że czasami występują duże różnice pomiędzy drzewami tego samego gatunku (tzw. różnice osobnicze), które mogą znacząco zmienić te wartości.
- Trudność w oszacowaniu intensywności wiatru: różnice w ukształtowaniu terenu, zacienienie przez inne drzewa lub sztuczne obiekty oraz różnice w nasileniu wiatru mogą znacząco wpływać na rzeczywistą intensywność wiatru, której doświadczają poszczególne drzewa w warunkach silnego wiatru, a co za tym idzie – na rzeczywiste bezpieczeństwo drzewa.
- Próba obciążeniowa nie może być przeprowadzana przy wietrznej pogodzie (gdy prędkość wiatru przekracza 25 km/h).
- Próba obciążeniowa wymaga zastosowania ciężkiego oraz niewygodnego sprzętu i wielu przygotowań.
- Próba obciążeniowa bazuje na scenariuszu obciążenia statycznego. Reakcja drzewa na stopniowo rosnące obciążenie statyczne wywierane przez linę może się różnić od nieregularnych i dynamicznych porywów wiatru, które oddziałują na złożony system listowia, pędów, gałęzi oraz pnia drzewa. Scenariusz obciążenia dynamicznego, który jest bardziej realistyczny, może zapewnić lepszy wgląd w bezpieczeństwo i stabilność drzewa.

### 3. TEST DYNAMICZNY

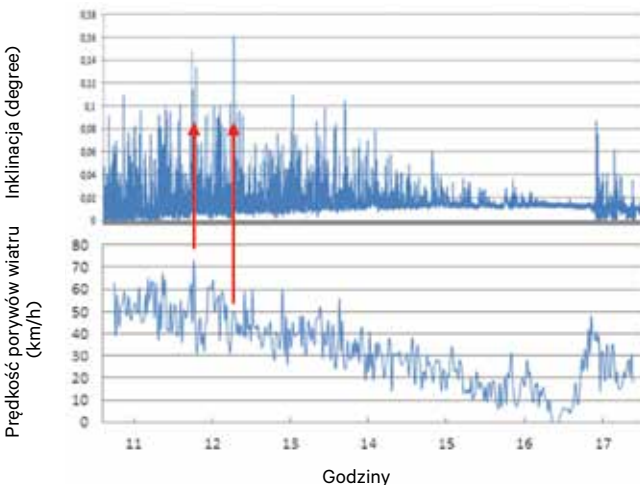
Obecnie najbardziej akceptowaną metodą oceny stabilności drzew jest statyczna próba obciążeniowa, mimo że ma wiele wad i ograniczeń, o których pisaliśmy w poprzednim podrozdziale. Największy problem stanowi fakt, że nie jest to dobry sposób na modelowanie reakcji drzewa na rzeczywiste obciążenie wiatrem (Moore, Maguire, 2004). Byłoby znacznie lepiej zmierzyć reakcję drzewa na rzeczywiste obciążenie wiatrem.

Niestety, zachowanie drzew w warunkach rzeczywistego obciążenia wiatrem nie jest proste. Drzewa, zwłaszcza te rosnące na otwartej przestrzeni, co jest typowe dla terenów miejskich, stanowią złożony system pni, głównych konarów oraz gałęzi, pędów i liści (James i in. 2006, 2014, zob. ryc. 3.31). Zachowanie takich drzew w warunkach obciążenia dynamicznego jest bardzo nieprzewidywalne. W rzeczywistości wydaje się, że nie ma bezpośredniego związku między chwilową prędkością wiatru a nachyleniem pnia. Często dochodzi do sytuacji, w której ruch drzewa jest niewielki nawet, gdy prędkość wiatru osiąga wartość szczytową, a gdy następuje względna cisza, drzewo mocno się kołysze (zob. ryc. 3.32).

Ze względu na złożoną interakcję różnych elementów oraz uwzględniając nasze obecne możliwości naukowe, rzeczywistej reakcji drzewa praktycznie nie można modelować ani przewidzieć (Sellier, Fourcaud 2009). W rzeczywistości zachowanie różnych elementów tj. pnia, gałęzi, pędów nie różni się od zachowania wielokrotnie tłumionego wahadła (Bejo i in. 2017).



Ryc. 3.31.  
Model drzewa jako złożonego systemu składającego się z różnych wzajemnie połączonych elementów (na podstawie James i in. 2006)



Ryc. 3.32.  
Dane dotyczące chwilowej inklamacji i prędkości wiatru nie wykazują bezpośredniej korelacji między tymi dwoma czynnikami (Bejo i in. 2017)



Gałęzie i pień tworzą nieliniowy układ wibracyjny, który zachowuje się w nieregularny sposób. Zachowanie takich systemów jest niezwykle wrażliwe na początkowe warunki brzegowe i jest praktycznie niemożliwe do przewidzenia w dłuższej perspektywie. Ten typ zachowania nazywany jest ruchem chaotycznym, a wielokrotne wahadła są również określane mianem wahadeł chaotycznych (z tego samego powodu). Dlatego wydaje się, że nie ma bezpośredniego związku między chwilową prędkością wiatru a inklinacją pnia. W rzeczywistości przy silnych porywach wiatru drzewo często pozostaje względnie stabilne, podczas, gdy czasami w okresie względnej ciszy można zauważyć znaczną utratę stabilności (zob. ryc. 3.32.). Zjawisko to znacznie wykracza poza zwykłe przesunięcie w czasie i wydaje się mieć charakter losowy (Divos i in. 2015).

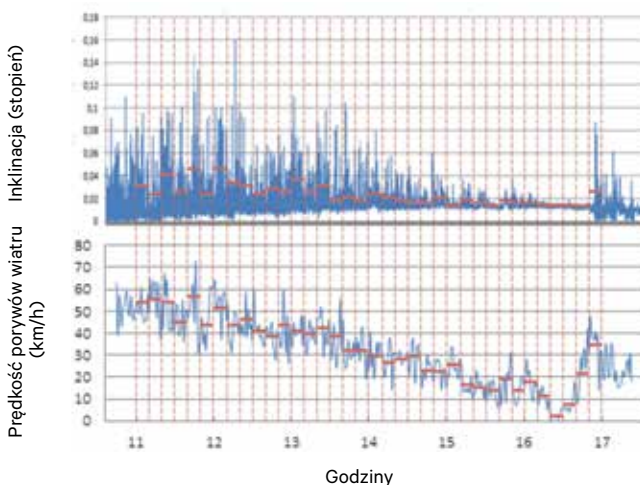
Mimo to systemy chaotyczne można badać metodami statystycznymi (Strogatz 2014). Chociaż nie ma bezpośredniego związku między chwilowym obciążeniem wiatrem a inklinacją, średnia prędkość wiatru i średnie wartości wychylenia przyjęte w dłuższych okresach (np. w odstępach 1,5 lub 10 minut) wykazują podobną zależność, jak między obciążeniem a wychyleniem podczas testów statycznych.

Testy dynamiczne opierają się na tych samych zasadach, co testy statyczne, z tym że statyczne obciążenie poziome jest zastępowane statystycznymi parametrami rzeczywistego obciążenia wiatrem. Na przykład, wykresy obciążenia wiatrem i wychylenia przedstawione na rysunku 3.32. można podzielić na dłuższe interwały, a parametry statystyczne (np. średnia z okresu 5 lub 10 minut) można obliczyć, jak pokazano na rysunku 3.33. Z wykresów wynika, że chociaż chwilowe wartości nie mogą być skorelowane, średnie (zaznaczone czerwonymi liniami na rysunku) są stosunkowo zgodne.

Mierząc intensywność wiatru i nachylenie szyi korzeniowej w kilkugodzinnych okresach, grupując je w kilkuminutowe partie i obliczając średnie, można uzyskać podobne pary danych obciążenia i wychylenia, jakie stosuje się do oceny wyników próby obciążeniowej.

Jak wyjaśniono w rozdziale I, punkty danych dotyczące obciążenia wiatrem–wychylenia i obciążenia wiatrem–zmiany długości wykazują tę samą tendencję, jak w przypadku obciążenia statycznego (odpowiednio krzywa tangens i liniowa). Istnieją dwie istotne różnice:

- punkty danych nie następują jeden po drugim, ale są losowe;
- zamiast siły poziomej mierzona jest prędkość lub napór wiatru.



Ryc. 3.33.  
Korelacja ulega poprawie po zgrupowaniu danych dotyczących prędkości porywów wiatru i nachylenia w partie oraz obliczeniu ich średnich

Pierwsza kwestia jest nieistotna, ponieważ dopasowanie krzywej można wykonać niezależnie od kolejności punktów, o ile dostępna jest wystarczająca liczba punktów danych. Druga kwestia oznacza, że obliczenie współczynnika bezpieczeństwa jest nieco inne, ponieważ obciążenie wiatrem jest zastąpione obciążeniem statycznym w celu określenia  $M_{krytyczny}$ . Dlatego też współczynnik bezpieczeństwa można wyrazić w następujący sposób:

$$SF = \frac{M_{krytyczny}}{M_{wiatr}} = \frac{p_{krytyczne} A_{drzewo} c_w h_{s\_korony}}{p_{wiatr} A_{drzewo} c_w h_{s\_korony}}$$

Należy zauważyć, że podstawiając napór wiatru do obliczenia inklacji i maksymalnych momentów wiatru (odpowiednio  $M_{krytyczny}$  i  $M_{wiatr}$ ), obszar korony ( $A_{drzewo}$ ) i wysokość środka korony ( $h_{srodek\ korony}$ ) redukują się w równaniu, ponieważ te parametry są takie same niezależnie od tego, czy bierzemy pod uwagę maksymalne lub wywracający/łamiący napór wiatru. Sytuacja jest bardziej złożona w przypadku współczynnika oporu powietrza ( $c_w$ ) dla danego gatunku drzewa, który zależy od intensywności wiatru i nie wpływa tak bardzo na odcinek krzywej o słabym wietrze jak na obszar silnego wiatru. Jednak ponieważ współczynnik oporu powietrza jest niższy przy silnym wietrze, użycie tej samej, wysokiej wartości  $c_w$  na całej krzywej skutkuje ostrożnym szacowaniem. W ten sposób możemy również wyeliminować z obliczeń współczynnik oporu.

Zatem równanie sprowadza się do stosunku naporu wiatru krytycznego (wywracającego) do maksymalnego naporu wiatru (naporu w przypadku największej spodziewanej prędkości wiatru). Napór wywracający drzewo ( $p_{krytyczne}$ ) jest określany na podstawie krzywej naporu–wychylenia w taki sam sposób, jak  $F_{krytyczna}$  jest określana z krzywej obciążenia–wychylenia. Wyznaczony w ten sposób współczynnik bezpieczeństwa jest nie tylko prostszy do obliczenia, ale jest też bardziej prawdopodobne, że będzie odpowiadał obciążeniu dynamicznemu, którego doświadczają drzewa na wietrze.

### A. SPRZĘT

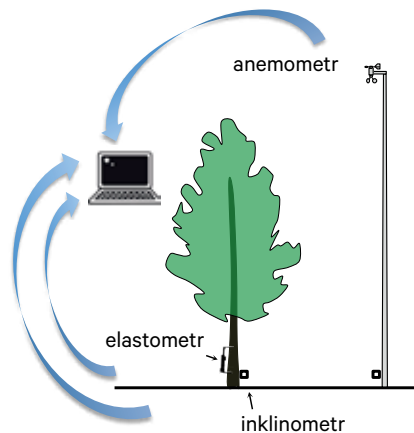
Ryc. 3.34. przedstawia konfigurację testową wymaganą do dynamicznych testów stabilności. System składa się z następujących elementów:

#### ANEMOMETR

Anemometr to przyrząd do pomiaru i rejestracji prędkości i kierunku wiatru przy ocenianym drzewie lub w jego pobliżu. Im bliżej drzewa znajduje się anemometr, tym lepiej. W idealnej sytuacji anemometr powinien znajdować się na wysokości 10 metrów i daleko od budynków lub innych obiektów, które mogą zasłaniać wiatr.

Obecnie używane są dwa rodzaje anemometrów:

**Anemometry czasowe** to proste przyrządy z obrotowymi czaszami do pomiaru prędkości wiatru oraz wiatrowskazem do określania jego kierunku.



Ryc. 3.34. Konfiguracja testu do dynamicznej oceny stabilności drzewa

**Anemometry ultradźwiękowe** emitują sygnały w różnych kierunkach i mierzą czas potrzebny na ich dotarcie do przeciwnego czujnika (tzw. *time-of-flight*, czyli TOF). Przy bezwietrznej pogodzie czas przebiegu jest taki sam we wszystkich kierunkach. Przy wietrznej pogodzie, czas przebiegu impulsów jest krótszy jeśli sygnał porusza się z wiatrem, ale wydłuża się, jeśli sygnał porusza się pod wiatr. Anemometry ultradźwiękowe mają zwykle dwie pary czujników ułożonych prostopadle i mogą określać zarówno prędkość, jak i kierunek wiatru. Są mniej podatne na awarie, ponieważ nie zawierają ruchomych części. Jak wspomniano w rozdziale I, anemometr musi zapewniać odczyty prędkości wiatru z wystarczającą częstotliwością (zwykle 1 odczyt na sekundę).

Anemometry mogą być zamocowane na stałe np. na budynkach lub mobilne. Anemometr mobilny można zamontować na szczycie składanego lub teleskopowego masztu. Sam maszt musi być zabezpieczony tak, aby nie został przewrócony przez wiatr.

Bardzo ważne jest, aby podczas dokonywania oceny dane dotyczące prędkości wiatru, wychylenia i/lub odkształcenia były doskonale zsynchronizowane. Ponieważ dane nie są zwykle przesyłane bezpośrednio do komputera, ale rejestrowane przez przyrząd, należy dokładnie notować czas.

W zależności od położenia geograficznego, prędkość i kierunek wiatru mogą być dostępne z pobliskiej stacji meteorologicznej. W takich przypadkach rozdzielczość czasowa powinna być wystarczająca (co najmniej 1 Hz). Należy również uzyskać odpowiednie dane dotyczące czasu.



Ryc. 3.35.

*Anemometr czasowy*



Ryc. 3.36.

*Anemometr ultradźwiękowy*



Ryc. 3.37.

*Anemometr zamontowany na stałe na dachu budynku*



Ryc. 3.38.

*Anemometr zamontowany na przenośnym maszcie teleskopowym*



Ryc. 3.39.  
Czujnik inklinacji wyposażony w zasilanie słoneczne z możliwością zdalnego monitorowania umożliwia kilkumiesięczną pracę bez nadzoru (zdjęcie dzięki uprzejmości Argus Electronic GmbH)



Ryc. 3.40.  
Bardzo precyzyjny inklinometr z płytką montażową i źródłem zasilania



Ryc. 3.41.  
Tanie czujniki o niższej rozdzielczości zapewniające łatwą obsługę i długoterminowe monitorowanie wychylenia drzew (zdjęcie dzięki uprzejmości Argus Electronic GmbH)

## INKLINOMETR

W celu zarejestrowania stosunkowo niewielkich ruchów podstawy pnia drzewa, przy słabszych wiatrach 25–50 km/h należy zastosować bardzo czuły inklinometr (w zakresie 0,001 stopnia). Inklinometr musi mieć własne źródło zasilania (wystarczające na kilka godzin pracy) i być przystosowany do przechowywania stosunkowo dużej ilości danych dotyczących nachylenia. Niektóre modele są wyposażone w Bluetooth lub Wi-Fi w celu łatwego przesyłania danych. Przyrząd powinien również rejestrować dokładny czas równoległe do inklinacji.

Dostępne są również tańsze wersje inklinometrów. Tego typu przyrządy mają mniejszą rozdzielczość i wymagają większych ruchów nasady pnia (tj. silnych wiatrów) w celu uzyskania dokładnych odczytów. Ich podstawową zaletą jest niska cena. Niektóre wersje tych przyrządów nie wymagają poziomowania. Mogą być wyposażone w ogniwa słoneczne do automatycznego ładowania, a nawet mogą umożliwiać zdalne monitorowanie nieprzerwanej i nienadzorowanej pracy przez kilka miesięcy.

## ELASTOMETR

Testy dynamiczne pozwalają również na ocenę bezpieczeństwa pnia, ale wymaga to zastosowania elastometrów o wysokiej czułości. Urządzenia te są podobne do tych stosowanych w próbie obciążeniowej, z tym że muszą być w stanie rejestrować dane dotyczące odkształcenia wraz z czasem pomiaru oraz mieć własne źródło zasilania, podobnie jak inklinometr o wysokiej precyzji wspomniany powyżej.

## OPROGRAMOWANIE DO DOKONYWANIA OCENY

Oprogramowanie do oceny bezpieczeństwa używane przy ocenie dynamicznej stabilności drzewa i pnia jest podobne do oprogramowania stosowanego w statycznej próbie obciążeniowej. Po zaimportowaniu danych oprogramowanie grupuje je w partie, oblicza wartość statystyczną (średnią lub inny parametr) dla każdej partii danych, tworzy pary danych oraz dopasowuje odpowiedni model (funkcja tangens drugiego rzędu lub prosta, odpowiednio dla nachylenia i odkształcenia) w celu obliczenia naporu prowadzącego do wywrócenia lub pęknięcia/złamania drzewa.

## B. PROCEDURA TESTU

Procedura testu dynamicznej stabilności drzewa i oceny bezpieczeństwa pnia jest nieco podobna do tej stosowanej w teście obciążeniowym, ale znacznie prostsza. Składa się z następujących etapów:

### **Odpowiednie warunki pomiaru:**

w testach dynamicznych mamy znacznie mniejszą kontrolę nad warunkami pomiaru niż w testach statycznych. Testy dynamiczne wymagają prędkości wiatru minimum 25 km/h. Najlepiej, jeśli kierunek wiatru jest zbliżony do przeważających wiatrów, przy czym należy pamiętać, że inne warunki (np. wilgotność gleby, obecność liści, zamrznięta gleba itp.) nie są bez znaczenia. Najlepszym sposobem jest monitorowanie prognozy pogody i wybranie odpowiedniego momentu na czas pomiaru.

### **Ustawienie masztu:**

jeśli używany jest maszt mobilny, należy go ustawić przed zainstalowaniem inklinometrów i/lub elastometrów. Anemometry powinny znajdować się na wysokości co najmniej 10 metrów, najlepiej na otwartej przestrzeni, z dala od budynków, wysokich drzew lub innych przeszkód. Po ustawieniu masztu i przygotowaniu urządzenia należy je włączyć i rozpocząć zbieranie danych.

- **Instalowanie inklinometru(-ów):** procedura wygląda tak samo jak w przypadku próby obciążeniowej. Kluczowa różnica polega na tym, że inklinometr nie jest podłączony do komputera, ale zbiera dane dotyczące czasu i nachylenia po jego włączeniu. Jeśli używany jest dwuosiowy inklinometr, nie ma znaczenia, gdzie jest on zainstalowany. Natomiast w przypadku młodych drzew lub drzew z osłabionym pniem użycie kilku inklinometrów może być dobrym pomysłem.
- **Instalacja elastometru(-ów):** elastometry są instalowane w podobny sposób jak w statycznej próbie obciążeniowej. W celu uzyskania najlepszych wyników, czujniki powinny znajdować się po tej samej lub przeciwnej stronie drzewa względem kierunku wiatru. Niestety, dokładny kierunek wiatru nie jest zawsze znany przed rozpoczęciem pomiaru i może ulec zmianie w jego trakcie. Dlatego eksperci często używają dwóch elastometrów zainstalowanych na pniu drzewa prostopadle względem siebie. Na podstawie dwóch odczytów program może obliczyć maksymalne naprężenie lub ściskanie pnia drzewa.

Niezależnie od kierunku wiatru, jego intensywności, odległości drzewa od anemometru lub innego czynnika, im dłuższy pomiar, tym lepiej. Czas pomiaru może być ograniczony długością okresu wietrznego lub pojemnością baterii w urządzeniach. Zwykle trwa on co najmniej trzy godziny lub dłużej, co oznacza, że test dynamiczny jest bardziej czasochłonny niż statyczny. Z drugiej strony, za pomocą tej metody można testować kilka drzew jednocześnie, nawet dziesięć lub więcej.



Ryc. 3.42.

*Ustawianie mobilnego masztu*



Ryc. 3.43.

*Elastometry zamontowane na pniu pod kątem 90 stopni do siebie, aby umożliwić obliczenie odkształcenia po nawietrznej lub zawietrznej stronie drzewa*

Jedynym ograniczeniem jest liczba dostępnych inklinometrów i/lub elastometrów, ponieważ ich montaż trwa zwykle tylko kilka minut.

Prostsze i tańsze inklinometry opisane w poprzednim podrozdziale zwykle pozwalają na dłuższe przeprowadzanie testów (nawet kilka miesięcy, jeśli zdalnie obsługiwane przyrządy są wyposażone w zasilanie słoneczne). Wadą jest niższa czułość, co oznacza, że przydatne dane wymagają przeprowadzania testów w warunkach silnego wiatru.

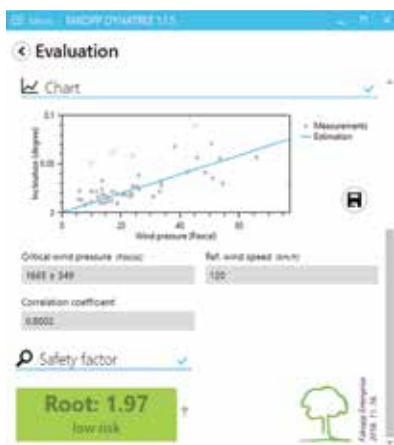
Po zakończeniu testu należy zebrać dane z przyrządów. Są one zazwyczaj zapisywane na karcie pamięci lub można uzyskać do nich dostęp za pomocą Bluetooth lub Wi-Fi, albo nawet zdalnie przez Internet.

### C. OCENA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Po zaimportowaniu wyników dotyczących prędkości wiatru, wychylenia i/lub odkształcenia drzewa, program grupuje dane w partie. Jedna partia zawiera wszystkie dane zmierzone w 1,5 lub 10 minutowym okresie pomiarowym (określonym przez użytkownika). Im dłuższy okres czasu (lub tzw. okno oceny statystycznej), tym lepiej punkty danych będą pasować do zastosowanego modelu. 5-minutowe okno statystyczne jest zwykle optymalne, w zależności od czasu trwania pomiaru.

Jak widać na ryc. 3.44. punkty danych nie pasują do krzywej estymacji tak dobrze, jak w przypadku statycznej próby obciążeniowej, co wprowadza pewien stopień niepewności do testu dynamicznego. Z drugiej strony, metoda ta mierzy reakcję drzew na rzeczywiste obciążenie wiatrem, a nie na obciążenie statyczne i eliminuje wiele niepewności związanych z próbą obciążeniową.

Współczynnik korelacji na ryc. 3.44. dostarcza informacji na temat zgodności rozkładów. Im bliżej 1 znajduje się ta wartość, tym lepsza zgodność i bardziej wiarygodna ocena. Na korelację wpływa kilka czynników – opiszemy je w dalszej części tekstu.



Ryc. 3.44.

Przykładowy wynik oceny dynamicznej stabilności drzewa

Program oblicza współczynnik bezpieczeństwa (SF) tak samo jak w przypadku testu obciążeniowego. Jedynym wyjątkiem jest to, że krzywa tangens drugiego rzędu lub prosta są dopasowywane do średnich (lub innych estymatorów statystycznych) 1,5 lub 10 minutowych partii danych, a nie do wartości z danego momentu pomiaru. Po dopasowaniu krzywej program przeprowadza ekstrapolację w sposób, jaki pokazano na ryc. 3.29. i 3.30.

Jednym z ułatwień podczas oceny jest to, że operator nie musi podawać danych dotyczących powierzchni korony, wysokości środka korony i wartości współczynnika oporu aerodynamicznego, ponieważ te wartości nie są brane pod uwagę w ocenie. Współczynnik bezpieczeństwa jest obliczany jako stosunek obciążenia prowadzącego do wywrótu lub pęknięcia/łamania pnia do maksymalnego naporu wiatru podczas silnych porywów. Jednak dla obliczenia bezpieczeństwa pnia na złamanie, program nadal wymaga wartości granicy elastyczności specyficznej dla danego gatunku drzewa.

## D. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA WIARYGODNOŚĆ TESTÓW DYNAMICZNYCH

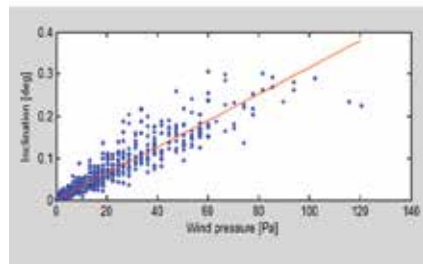
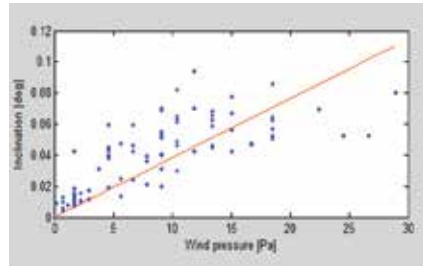
Jak wspomniano wcześniej, jedną z wad testów dynamicznych jest to, że punkty danych nie są zgodne z linią trendu w takim stopniu, jak w przypadku statycznej próby obciążeniowej. Zgodność rozkładów – wyrażona współczynnikiem korelacji – jest kluczową kwestią w tego typu testach. Uzyskane wyniki mogą być uznane za wiarygodne, jeśli współczynnik korelacji wynosi co najmniej 0,75. Istnieje szereg czynników, które wpływają na korelację pomiędzy intensywnością wiatru a mierzonym wychyleniem/odkształceniem. Na wiele z nich nie mamy wpływu. Możemy jedynie dążyć do wyboru warunków testu, które zapewnią najlepsze rezultaty.

### 1. INTENSYWNOŚĆ WIATRU

Najważniejszym warunkiem zastosowania techniki dynamicznej jest wietrzna pogoda. W zależności od rodzaju stosowanego przyrządu minimalna prędkość wiatru do pomiaru ważnych danych może wynosić zaledwie 25 km/h. Jednak im większa jego prędkość, tym intensywniej drzewa się kołyszają i tym dokładniej możemy mierzyć ich wychylenie oraz odkształcenie.

Co więcej, przy silnych wiatrach mamy wyższe poziomy wychylenia/inklinacji i/lub odkształcenia, co poprawia dokładność dopasowania krzywej, dokładność szacowanych wartości  $p_{\text{krytyczne}}$  oraz  $p_{\text{złamanie}}$  oraz finalnie dokładność współczynnika bezpieczeństwa.

Naturalnie, operator nie jest w stanie kontrolować intensywności wiatru. Niemniej jednak należy dążyć do wyboru okresów szczytowych prędkości wiatru w celu zebrania danych o obciążeniu dynamicznym, wychyleniach i odkształceniach.



Ryc. 3.45.

Dane dotyczące naporu wiatru i nachylenia drzewa zebrane przy słabym (25 km/h, górny wykres) oraz przy silnym wietrze (65 km/h, dolny wykres)

### 2. CZAS TRWANIA POMIARU I WIELKOŚĆ OKNA STATYSTYCZNEGO

Ogólnie rzecz biorąc, im większe okno statystyczne, czyli długość okresu, w którym dane są grupowane i obliczane są parametry statystyczne, tym bardziej punkty danych pasują do modeli naporu–wychylenia lub naporu–odkształcenia i tym lepsza jest korelacja (zob. ryc. 3.46.). Jednak im większe okno statystyczne, tym mniej punktów danych otrzymujemy dla tego samego czasu trwania pomiaru. Aby uzyskać najlepsze wyniki należy zrównoważyć te dwie kwestie.

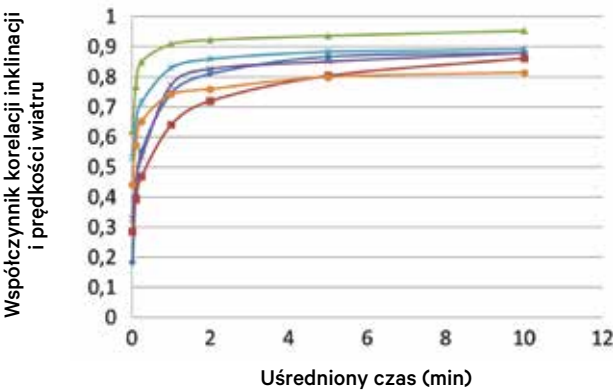
Można użyć większego okna statystycznego i nadal mieć wystarczającą liczbę punktów danych, ale wymaga to dłuższych okresów pomiarowych. Jeśli np. wybierzemy 10-minutowe okno statystyczne i chcemy uzyskać co najmniej 50 punktów danych, potrzebujemy danych z więcej niż 8 godzin. W przypadku 5-minutowego okna statystycznego ta sama liczba punktów wymaga tylko 4 godzin pomiaru, ale współczynnik korelacji będzie nieco niższy.

Podobnie jak w przypadku intensywności wiatru, zwykle nie mamy wpływu na czas trwania pomiaru. Jeśli sprzęt posiada dobre baterie, pomiar może być prowadzony przez 10 godzin lub dłużej, ale zależy to również od pogody. Wiatr może uciąć wcześniej i możemy mieć jedynie 3–4 godziny danych. W takim przypadku musimy zmniejszyć okno statystyczne do 5 minut lub krócej, aby mieć wystarczającą liczbę punktów danych (na ryc. 3.46. należy zwrócić uwagę na fakt, że zwiększając okno statystyczne powyżej 2 minut otrzymujemy w zamian mniej wyników. 5-minutowe okno statystyczne jest dobrym kompromisem pomiędzy dokładnością a większą liczbą punktów danych).

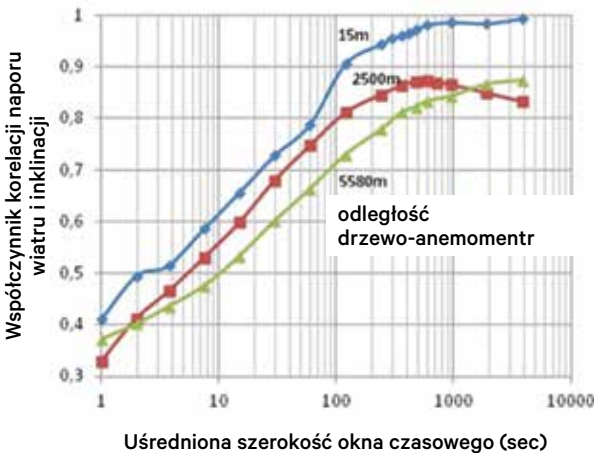
### 3. ODLEGŁOŚĆ MIĘDZY ANEMOMETREM A DRZEWEM

Lokalne warunki pogodowe, włączając intensywność i kierunek wiatru, wyglądają dość podobnie w promieniu kilkuset metrów, a nawet kilku kilometrów, w zależności od położenia geograficznego. Niemniej jednak wiatr często się zmienia, zwłaszcza podczas burz, dlatego też najlepiej jest mierzyć jego prędkość jak najbliżej badanego drzewa (lub drzew).

Ryc. 3.47. przedstawia wpływ odległości anemometru od drzewa. Dokładność analizy spada o około 10%, gdy przesuwamy urządzenie na odległość 2,5 km, oraz o kolejne 10%, gdy zwiększymy ten dystans. Warto jednak zauważyć, że przeprowadzenie analizy jest możliwe, nawet jeśli anemometr znajduje się w odległości kilku kilometrów od drzewa, a mniejszą dokładność możemy skompensować stosując większe okno statystyczne.



Ryc. 3.46.  
Zależność między wielkością statystycznego okna czasowego a współczynnikiem korelacji



Ryc. 3.47.  
Wpływ różnych odległości drzewa od anemometru na współczynnik korelacji



Jest to szczególnie przydatne, jeśli chcemy dokonywać pomiaru dla kilku drzew jednocześnie (czasem znajdujących się w pewnej odległości od siebie) lub gdy korzystamy z zainstalowanego na stałe anemometru lub danych z pobliskiej stacji meteorologicznej.

## E. ZALETY I OGRANICZENIA TESTU DYNAMICZNEGO

Jak wspomniano wcześniej, dynamiczny test sprawdzający stabilność drzewa oraz bezpieczeństwo pnia jest stosunkowo nową metodą, która wciąż się rozwija, ale wyniki są obiecujące.

### ZALETY TESTU DYNAMICZNEGO

- Pomiaru są przeprowadzane w warunkach realistycznego dynamicznego obciążenia. Ten rodzaj pomiaru, w porównaniu do obciążenia statycznego, jest lepszy do badania bezpieczeństwa drzewa przy dynamicznym i silnym wietrze.
- Urządzenia stosowane do pomiarów są prostsze i lżejsze. Nie trzeba dźwigać ciężkiego sprzętu jak np. liny, wciągarka, pasy, waga/dynamometr, drabina itp.
- Bezpieczeństwo operacji. Nawet jeśli przestrzegane są wszystkie możliwe środki bezpieczeństwa, próba obciążeniowa niesie ze sobą pewne niebezpieczeństwo związane np. z wchodzeniem po drabinie, obsługą wciągarki lub pęknięciem liny. Należy pamiętać, że podczas tego typu testów śmiertelne wypadki w wyniku np. upadku drzewa są ekstremalnie mało prawdopodobne, ale poważne obrażenia niestanowiące zagrożenia dla życia stanowią istotne ryzyko. Test dynamiczny jest praktycznie pozbawiony takiego ryzyka, chyba że jest przeprowadzany w trakcie burzy, co nie jest zalecane.
- Analiza danych jest prostsza; nie ma potrzeby wykonywania pomiarów i dostarczania danych dotyczących drzewa i jego wymiarów geometrycznych, ani sprawdzania współczynnika oporu aerodynamicznego. Nie ma tutaj również niepewności związanej z określaniem tych parametrów.
- Czynniki środowiskowe, jak np. pobliskie budynki lub drzewa, które chronią przed wiatrem, wpływają na pomiar dynamiczny w taki sam sposób, jak wpływają na bezpieczeństwo drzew. Takie czynniki nie mogą być brane pod uwagę podczas statycznej próby obciążeniowej, co może skutkować niedoszacowaniem bezpieczeństwa drzewa.
- Można dokonać pomiaru wielu drzew jednocześnie (np. 10 lub więcej).
- Pomiaru dynamiczne można przeprowadzać przy wietrze, podczas gdy pomiaru statyczne wymagają bezwietrznej pogody.

### OGRANICZENIA ORAZ WADY TESTU DYNAMICZNEGO

- Testy dynamiczne to pionierska metoda, która nie zdobyła jeszcze pełnej akceptacji i nie jest szeroko stosowana w branży. Jej walidacja wciąż trwa. W kolejnej części tekstu przedstawiono więcej informacji na temat wiarygodności tej nowej metody.
- Punkty danych z testu dynamicznego, generowane statystycznie poprzez grupowanie danych uzyskanych z kilku minut, nie pasują do odpowiednich modeli tangens czy liniowych dla wychylenia i odkształcenia tak dobrze, jak w przypadku próby obciążeniowej. To prowadzi do pewnych wątpliwości przy określaniu parametrów oraz bezpieczeństwa drzewa.
- Przeprowadzenie testu dynamicznego jest możliwe tylko przy wietrznej pogodzie. Minimalna prędkość wiatru wynosząca co najmniej 25 km/h jest niezbędna do generowania jakichkolwiek znaczących wyników. Jednak dla większej niezawodności i precyzji preferowane są większe prędkości wiatru.

- Test dynamiczny trwa dłużej niż statyczna próba obciążeniowa (co najmniej 3 godziny), jednak możliwość badania kilku drzew jednocześnie kompensuje ten fakt.
- W trakcie tego testu mamy mniejszą kontrolę nad warunkami, w jakich jest przeprowadzany. Obciążenie wiatrem lub jego kierunek mogą nie być idealne w trakcie wykonywania pomiaru, tak samo jak poziom wilgotności lub zamarznięcia gleby, ulistnienie, itd. (więcej na ten temat w części 4).
- Na koniec, jako że pomiar nie jest monitorowany w sposób ciągły, przyrządy mogą być narażone na uszkodzenia spowodowane warunkami atmosferycznymi, ingerencją zwierząt, kradzieżą lub aktami wandalizmu.

## F. WIARYGODNOŚĆ TESTU DYNAMICZNEGO

Jak wspomniano wcześniej, test dynamiczny jest stosunkowo nową metodą, która nie została przebadana na taką skalę, jak statyczna próba obciążeniowa. Z tego powodu nie została jeszcze uznana przez ekspertów jak standard w przypadku testowania stabilności drzew.

Nie jest łatwo wykazać rzetelność testu dynamicznego. Jedynym sposobem na udowodnienie dokładności współczynnika bezpieczeństwa jest wyrócenie drzewa (przy znanej prędkości wiatru). Można również zmierzyć rzeczywisty moment krytyczny (wywrotu) oraz złamania w statycznej próbie obciążeniowej, ale, jak wspomniano wcześniej, obciążenie wiatrem działa inaczej niż obciążenie statyczne. Dlatego moment krytyczny (wywrotu/złamania) zmierzony w ten sposób może różnić się od dynamicznego obciążenia wiatrem potrzebnego do wyrócenia drzewa.

W niedawno przeprowadzonym badaniu (Fathi 2020) badacze zmierzili współczynnik bezpieczeństwa kilku chorych jesionów w Austrii za pomocą próby obciążeniowej oraz metody dynamicznej. Drzewa zostały wyrócone podczas próby obciążeniowej, co pozwoliło na zmierzenie właściwego momentu krytycznego (wywrotu).

Ryc. 3.48. przedstawia zależność między parametrami próby obciążeniowej a momentem wywrotu. Wykresy wyraźnie pokazują, że w badaniu przewidziano bardzo dokładnie moment wyrócenia się drzewa. Istnieje również ścisła zależność pomiędzy statycznym współczynnikiem bezpieczeństwa a momentem krytycznym/wywrotu.

Ryc. 3.49. przedstawia wiarygodność testu dynamicznego. Zaskakujące jest to, że dynamiczny SF przewidział ostateczny moment wyrócenia się drzewa lepiej niż współczynnik statyczny. Może być to jedynie zbieg okoliczności, ponieważ dynamiczna krzywa naporu–wychylenia jest w rzeczywistości miarą ostatecznego obciążenia, które jest wymagane do wyrócenia drzewa w sytuacji obciążenia dynamicznego, co różni go nieco od obciążenia statycznego. Niestety nie istnieje żaden obiektywny sposób, aby to sprawdzić. Można jedynie porównywać zmierzoną dynamicznie wartość współczynnika bezpieczeństwa ze statycznym momentem krytycznym/wywrotu. W każdym razie dobra korelacja jest pozytywnym sygnałem wiarygodności metody dynamicznej.

Dodatkowo, statyczne i dynamiczne współczynniki bezpieczeństwa mają dość dobrą korelację, ale ta zależność nie jest bardzo ścisła. Nie jest to zaskakujące, ponieważ te dwa pomiary działają na różne sposoby, a różnice między nimi były zgodne z oczekiwaniami.

Jak wspomniano wcześniej, porównanie statycznych i dynamicznych wartości współczynnika bezpieczeństwa z rzeczywistym obciążeniem wiatrem prowadzącym do wyrócenia drzewa jest praktycznie niemożliwe, chyba że wydarzy się coś przypadkowego, co udowodni dokładność

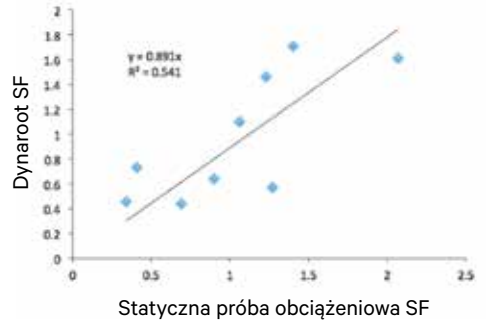
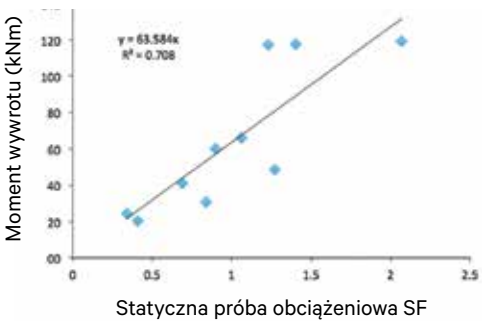
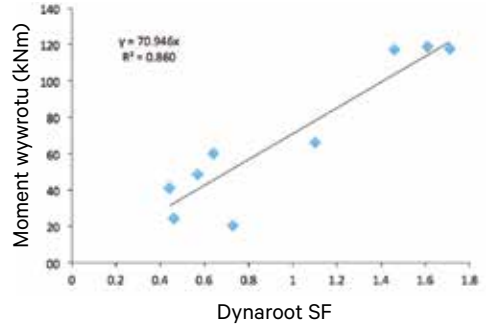
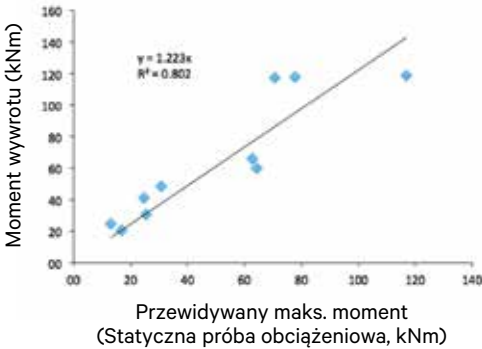
pomiaru w rzeczywistej sytuacji. Jednym z takich przykładów jest słaby klon w ogrodzie botanicznym Uniwersytetu w Sopron na Węgrzech. Dynamiczne pomiary wykazały, że współczynnik bezpieczeństwa dla tego drzewa wynosi mniej niż 1 przy referencyjnej prędkości wiatru 70 km/h. Kilka tygodni po przeprowadzeniu badania drzewo przewróciło się podczas burzy, gdzie wiatr wiał maksymalnie 63 km/h. Na szczęście nikt nie został ranny.

Oczywiście, wyniki dynamicznych pomiarów dla jednego drzewa nie dowodzą pełnej wiarygodności tej metody. Jest to jednak wskazówka mówiąca o tym, że metoda działa, co zostało dodatkowo potwierdzone przez porównanie statyczno-dynamiczne. W chwili obecnej trwają wysiłki mające na celu wykazanie i poprawę niezawodności testów dynamicznych.



Ryc. 3.50.

Klon wyrwany z korzeniami podczas burzy z wiatrem o prędkości 63 km/h. Wcześniejsze pomiary dynamiczne wykazały, że współczynnik bezpieczeństwa wyniósł <1 przy referencyjnej prędkości wiatru 70 km/h



Ryc. 3.48.

Wiarygodność statycznej próby obciążeniowej: zależność pomiędzy przewidywanym i rzeczywistym momentem krytycznym/wywrótu (na górze) oraz pomiędzy współczynnikiem bezpieczeństwa a momentem wywrótu (na dole)

Ryc. 3.49.

Wiarygodność dynamicznej próby obciążeniowej: zależność pomiędzy SF a momentem krytycznym/wywrótu (na górze) oraz pomiędzy statycznym a dynamicznym współczynnikiem bezpieczeństwa (na dole)

## 4. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA BADANIE STABILNOŚCI DRZEWA

Niezależnie od tego, czy przeprowadzamy statyczną próbę obciążeniową, czy test dynamiczny mający ocenić stabilność drzewa, istnieje kilka czynników, które mogą wpływać na wyniki badań. Należy pamiętać o tym, że wyniki uzyskane w określonych warunkach mogą wyglądać zupełnie różnie w innych okolicznościach. Poniżej przedstawiamy najważniejsze aspekty, które mogą wpływać na stabilność drzewa.

### A. ULISTNIENIE

Liście mogą bardzo znacząco wpływać na stabilność drzewa oraz bezpieczeństwo pnia na złamanie. Dzieje się tak dlatego, że liście oraz gałęzie stanowią powierzchnię, na którą oddziałuje wiatr. Kiedy ta powierzchnia ulega zmianom, zmienia się również obciążenie korony, a co za tym idzie – moment działający na pień czy szyję korzeniową, a także zmienia się współczynnik bezpieczeństwa. Istnieją dwie główne przyczyny istotnych zmian ulistnienia:

#### **Zmiany powodowane porami roku:**

liściaste gatunki drzew zrzucają liście jesienią, co zmniejsza powierzchnię ich korony. Teoretycznie, powinno się to przełożyć na mniejszy napór wiatru oraz większe bezpieczeństwo drzewa. Mimo to, gdy nie ma liści, odkształcenia korony drzewa są mniejsze, nagie gałęzie stanowią większy opór dla wiatru, a współczynnik oporu aerodynamicznego staje się wyższy. Ostatnie badania (Göcke i in. 2018; Fathi 2020) wykazały, że w okresie zimowym dynamiczny współczynnik bezpieczeństwa często ulega zmniejszeniu zamiast się zwiększać, pomimo mniejszej powierzchni korony drzewa.

#### **Przycinanie:**

usuwanie części korony jest częstym zabiegiem arborystycznym. Leśnicy przeprowadzają go w celu poprawy jakości drewna, podczas gdy na terenach miejskich ma on za zadanie poprawić estetykę oraz bezpieczeństwo drzewa. W trakcie przycinania usuwa się różne części korony, włączając gałęzie i pędy. W przeciwieństwie do sezonowej utraty liści, przycinanie zawsze zmniejsza obciążenie wiatrem i – przynajmniej doraźnie – poprawia współczynnik bezpieczeństwa drzewa.



Ryc. 3.51.

Zmiany ulistnienia w różnych porach (od lewej: zima, jesień i wiosna)

## B. OPADY ATMOSFERYCZNE

**Deszczowa pogoda**, szczególnie jeśli utrzymuje się dłużej, ma wpływ zarówno na drzewa, jak i na glebę. Pokryte kroplami deszczu liście mają nieco większą bezwładność, natomiast drzewo staje się teoretycznie mniej odporne na wywrócenie. Dzieje się tak dlatego, ponieważ woda deszczowa przenika glebę, przyczynia się do jej spulchnienia i umożliwia większy ruch drzewa. Mimo to należy pamiętać, że zależy to w dużej mierze od struktury korzeni.

Fathi (2020) odkrył, że stabilność drzew iglastych poprawia się wraz ze wzrostem wilgotności gleby. Wiele z nich ma system korzeni pierwotnych, z głównym korzeniem sięgającym głęboko w ziemię. Zagęszczenie dolnych warstw gleby powodowane przez dodatkowy ciężar jej wierzchniej warstwy może stabilizować rosnące głęboko korzenie. Inne drzewa (jak np. sekwoja) mają gęsty i splątany system korzeniowy, który zajmuje znaczną część gleby. Dodatkowo, ciężar gleby pomaga zakotwiczyć drzewo i poprawia jego stabilność (Fathi i in. 2020).

**Śnieg** ma tendencję do zmniejszania stabilności drzew, ponieważ nie wnika do gleby i nie przyczynia się do jej spulchniania. Zamiast tego gromadzi się na gałęziach (lub na igliwiu drzew iglastych), często zwiększając siłę bezwładności, gdy drzewo porusza się na wietrze, prowadząc do dużych obciążeń dynamicznych. Z drugiej strony, ciężar śniegu pomaga kotwiczyć drzewo, co w pewnym stopniu łagodzi zwiększone obciążenie. Niemniej jednak obciążenie śniegiem – włączając śnieg z deszczem – przyczynić się może do zmniejszania stabilności drzew.

## C. ZAMARZNIĘTY GRUNT

W klimacie umiarkowanym i chłodnym temperatura może spaść poniżej zera i może utrzymywać się na tym poziomie przez dłuższy okres w miesiącach zimowych. Powoduje to zamarznięcie wody w gruncie i ograniczenie ruchu korzeni. Woda w pniu również ulega częściowemu zamarznięciu, co poprawia wytrzymałość drzewa.

Pomiary stabilności w dłuższych okresach niskich temperatur mogą przynosić nierealistycznie wysokie wartości współczynnika bezpieczeństwa (niezależnie od stosowanej metody pomiaru). W takich okolicznościach najlepiej nie stosować próby obciążeniowej ani dynamicznego testu stabilności drzewa.



## D. ZMIANY WYNIKAJĄCE Z PÓR ROKU

Wiele zagadnień opisanych w kontekście zmiany ulistnienia, zamarzniętego gruntu i opadów atmosferycznych (śniegu) jest również związanych ze zmianami wynikającymi z pór roku i należy wziąć je pod uwagę podczas oceny współczynnika bezpieczeństwa. Dodatkowym problemem jest okres spoczynku roślin zimą, kiedy ich aktywność biologiczna jest na minimalnym poziomie. Wpływa to na system korzeniowy, który wiosną i latem ma tendencję do pęcznienia i silniejszego kotwienia w glebie z powodu zwiększonego przepływu soków, ale jesienią i zimą ta aktywność ulega zmniejszeniu. Działa to niekorzystnie na stabilność drzew, chociaż nie tak silnie, jak zmiana ulistnienia lub zamarznięta gleba (Bieker i in. 2010).

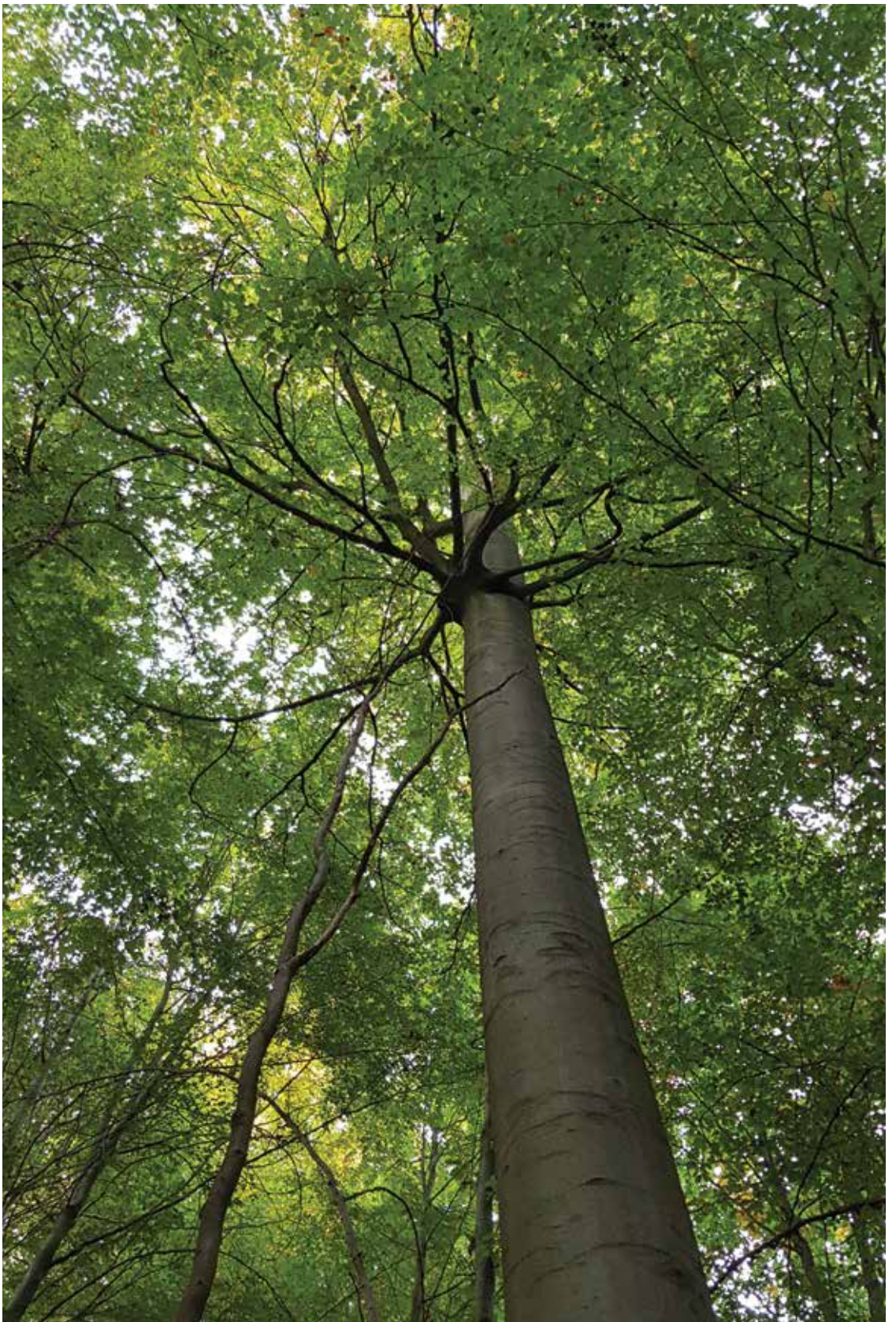
## E. KIERUNEK POMIARU

Jak wspomniano wcześniej, każdy obszar geograficzny ma charakterystyczny i przeważający kierunek wiatru. Drzewa mają tendencję do rozwijania swoich pni i systemów korzeniowych w taki sposób, aby zapewnić najlepszy opór przed najsilniejszym wiatrem wiejącym z danego kierunku. Jest to zwykle również kierunek, w którym oceniamy stabilność drzewa i wytrzymałość jego pnia, gdyż najsilniejszy wiatr może wieść właśnie z tej strony.

Zwykle nie stanowi to problemu podczas próby statycznej, gdzie mamy kontrolę nad kierunkiem przeprowadzania takiego testu. Jedynym problemem jest fakt, że musimy znaleźć punkt zaczepienia mniej więcej w tym kierunku, co bywa trudne w środowisku miejskim.

W testach dynamicznych nie mamy kontroli nad kierunkiem wiatru i musimy zaakceptować to, z jakiego kierunku wieje. Na szczęście w wielu przypadkach jest to przeważający kierunek wiatru w danym regionie, podczas gdy wiatry boczne lub wiejące z przeciwnego kierunku są stosunkowo rzadkie.

Ostatnie badania (Fathi 2020) wskazują, że kierunek wiatru prawdopodobnie nie ma tak dużego wpływu jak zmiany wilgotności gleby lub listowia. Niemniej jednak, o ile to możliwe, należy przeprowadzać testy z uwzględnieniem kierunku dominującego w danym regionie.





Ryc. 4.1.  
Drzewo rosnące pomiędzy dwiema studniami telekomunikacyjnymi

Ryc. 4.2.  
Lipa podczas usuwania drzewa. Można dostrzec główne korzenie drzewa; źródło: Antal Buza.





## *IV. Metody wykrywania korzeni – techniki instrumentalne i nieniszczące*

Informacje o systemach korzeniowych mogą być bardzo istotne, zwłaszcza na terenach miejskich, na placach budowy lub podczas przebudowy infrastruktury technicznej, np. aby uniknąć ich uszkodzenia. Metody wykrywania korzeni pozwalają na wykrycie głównych, większych korzeni (powyżej 20 mm średnicy) w górnych warstwach gleby (zwykle nie głębiej niż 2 m).

Aby wykonać mapowanie korzeni bez wyrządzenia prawie żadnej szkody, można skorzystać z dostępnych narzędzi takich jak sondy (względnie proste i tanie), metody akustyczne (dzięki którym można znaleźć korzenie badanego drzewa, a nie jakiegokolwiek korzenie), georadar i wieloelektrodowe obrazowanie oporowe (dzięki którym można zobaczyć więcej na większych głębokościach). Możliwe jest też odsłanianie korzeni, przyrządy usuwające glebę przy pomocy sprężonego powietrza mogą być relatywnie mało szkodliwe, a są przydatne, gdy trzeba rozpocząć prace ziemne w obszarze korzeni. Oczywiście takie wykopy są też również potrzebne do badań i rozwoju, ponieważ korzenie odnalezione za pomocą mapowania można porównać z tymi, które są odkopane. Dzięki temu narzędzia do wykrywania korzeni można zweryfikować i sprawić, aby były bardziej niezawodne. W niniejszym rozdziale przedstawiono różne metody, obowiązujące zasady ich stosowania oraz kilka przykładów. Wymienione zostały ograniczenia, wady oraz zalety.

Należy pamiętać, że mapowanie korzeni ma bardzo ograniczoną korelację ze stabilnością lub bezpieczeństwem (choć oczywiście brak większych korzeni oznacza problem ze stabilnością drzewa). Przedstawione tutaj techniki mają na celu raczej uniknięcie uszkodzenia lub podcięcia głównych korzeni w trakcie przeprowadzania wykopu.

Bezpieczeństwo systemu korzeniowego lub ryzyko związane z wywrotem drzewa zostało zawarte w tematach dotyczących biomechaniki i oceny instrumentalnej. W trakcie badania podstawy pnia lub szyi korzeniowej można skorzystać z tomografii lub wiertarki oporowej.

Niektóre z prezentowanych technik są stosunkowo słabo rozpowszechnione i stosowane przez niewielu ekspertów, choć prace badawczo-rozwojowe odbywają się cały czas. Wraz z rosnącym zapotrzebowaniem na coraz dokładniejsze badania drzew, wzrasta również zastosowanie tych metod, co można zaobserwować w niektórych krajach, zwłaszcza gdy badane drzewo ma unikalną i szczególną wartość.



Ryc. 4.3.

Sonda arborystyczna

Źródło: Jerzy Stolarczyk.

## 1. SONDA

Sonda została omówiona w osobnej publikacji – nt. podstawowej diagnostyki – „Inspekcja drzew”, więc tutaj dokonamy bardzo krótkiego przeglądu jej zastosowania do wykrywania korzeni. Sonda to długi metalowy pręt z zaokrąglonym końcem (aby nie uszkodzić korzeni) i uchwytem.

Pręt można wbić w ziemię ręką. Będzie on przechodził przez warstwy gleby do momentu, w którym natknie się na kamień lub korzenie. Towarzyszący temu dźwięk oraz wrażenia fizyczne będą się różnić w zależności od napotkanego materiału. W ten sposób można odnaleźć korzenie oraz oznaczyć ich obecność na powierzchni ziemi.

Narzędzie to jest względnie proste w użyciu i tanie. Należy jednak pamiętać, że za jego pomocą można odnaleźć korzenie znajdujące się nie głębiej niż sama długość sondy (zwykle mniej niż do 1,5 metra). Barierą dla tej metody jest obecność chodnika lub nawierzchni drogi, przez którą sonda nie jest w stanie się przebić.

## 2. METODY AKUSTYCZNE

Jak wspomniano wcześniej, największą zaletą tych metod jest możliwość zlokalizowania większych korzeni badanego drzewa. Korzenie innych drzew lub inne przedmioty znajdujące się w ziemi nie wprowadzają zaburzeń w tej technice.

Kolejną zaletą tej metody jest fakt, że narzędzia te mają wiele wspólnego z tomografią akustyczną. Instrumenty/oprogramowanie może być dostępne jako rozszerzenie do tomografu sonicznego. Dzieje się tak dlatego, że te same czujniki akustyczne mogą zostać użyte do „usłyszenia” zarówno sygnałów z korzeni (i gleby), jak i z pnia drzewa. Jako że tomografia pnia jest już stosunkowo dobrze znana i rozpowszechniona, akustyczne wykrywanie korzeni może wkrótce stać się tak samo dostępne. Główną ideą akustycznego mapowania korzeni jest fakt, że fale dźwiękowe przemieszczają się szybciej w korzeniach niż w glebie. Różnica jest znacząca, ponieważ prędkość sygnału akustycznego w glebie wynosi około 250–400 m/s, a w korzeniach 2000–4000 m/s w zależności od rodzaju gleby i korzeni oraz wilgotności (Bucur 1995; Divos i in. 2009).

Istnieją dwie metody akustycznego mapowania korzeni. W pierwszej z nich sygnały są generowane przez uderzenie w grunt i odczytywane na szyi korzeniowej (Arborix™, Rinntech). W drugiej sygnały są wysyłane od szyi korzeniowej przez grunt i są wykrywane przez sondę glebową (Root Detector, Fakopp). W pierwszej metodzie zakłada się, że korzenie rosną promieniście w kierunku od pnia. To uproszczenie jest pokazane na ryc. 4.6., gdzie korzenie są zwizualizowane jak kolce ułożone jak promienie wokół okręgu. Gdy detekcja zachodzi w glebie, takie założenie nie jest przyjmowane.

W obu przypadkach mierzy się czas i odległość. Im bliżej do korzenia, tym szybciej dociera do niego sygnał. Tak samo wygląda kwestia obliczanej prędkości – im bliżej znajduje się korzeń, tym większa prędkość sygnału.

Kiedy sygnały są przesyłane do szyi korzeniowej, biegną szybko po korzeniach, ale też penetrują glebę. Jeśli w pobliżu odbiornika nie ma korzeni, sygnał dobiega względnie powoli. Kiedy blisko odbiornika jest korzeń, czas przejścia sygnału jest krótszy. Nadajnik należy umieścić na pniu drzewa jak najbliżej ziemi i uderzyć w niego metalowym młotkiem (w celu wystania sygnałów). Sam odbiornik jest sondą glebową z metalowym kolcem o długości 30 cm. Czas przejścia sygnałów zmienia się znacząco, gdy korzeń jest blisko (około 10 cm) (Divos i in. 2009; Buza, Goncz 2015).

Czas można zmierzyć lub przesłać dane do programu komputerowego. W taki sposób można wykryć tylko większe korzenie (średnica > 4 cm). Warto również wspomnieć, że ta technika akustyczna „widzi” korzenie, jeśli są one oddalone od siebie co najmniej 20 cm. Zastosowanie tej techniki zostało przedstawione w studium przypadku w podrozdziale 5.

Podobne wyniki można uzyskać w sytuacji, gdy czujniki znajdują się na szyi korzeniowej. Według twórcy, system o nazwie Arborix™ może:

- sprawdzić bezpieczeństwo na wywrot,
- określić objętość i wagę korzeni,
- zlokalizować korzenie.

(Dodatkowe informacje – por. ryc. 4.6.).

### 3. GEORADAR

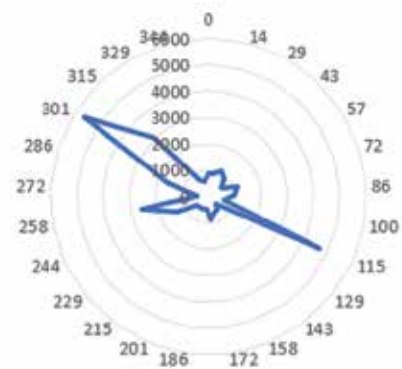
Georadar może wykrywać obiekty znajdujące się w gruncie. Trudnym aspektem tej metody jest podjęcie decyzji, czy wykryty obiekt jest korzeniem, czy też nie. Podstawową zasadą działania tej metody jest fakt, że niektóre materiały są „transparentne” dla fal radaru, podczas gdy inne odbijają je lub pochłaniają. Jeśli zostanie ustawiona odpowiednia częstotliwość fal, będą one mogły swobodnie przemieszczać się przez glebę i natrafiać na obiekty takie jak korzenie lub instalacje, które będą je „odbijać”.

Można wykryć „echa” fal i oszacować położenie podziemnego obiektu (łącznie z głębokością). Zastosowanie georadaru (GPR – *ground penetration radar*) wywodzi się z geofizyki, ponieważ może on znajdować różne rzeczy pod poziomem gruntu. Idea lokalizowania korzeni sięga dziesięcioleci, a pomyslnie użycie tej metody było prezentowane w kilku krajach na całym świecie. (Hruska i in. 1999; Cermak i in. 2000; Guo i in. 2013; Wu i in. 2014). Można znaleźć nawet 83% większych korzeni, a fałszywe potwierdzenia mogą być filtrowane i ograniczane.



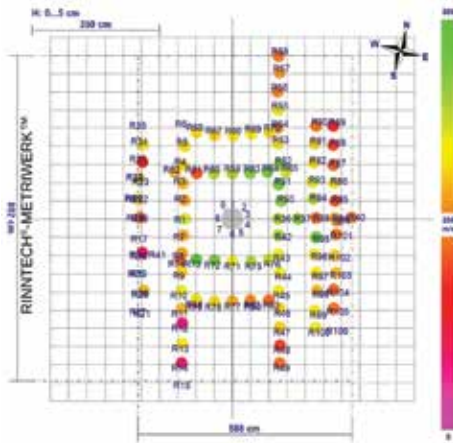
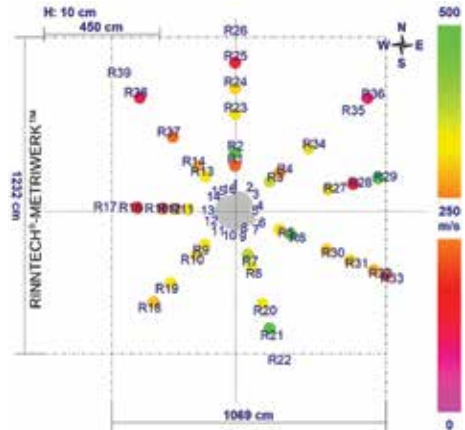
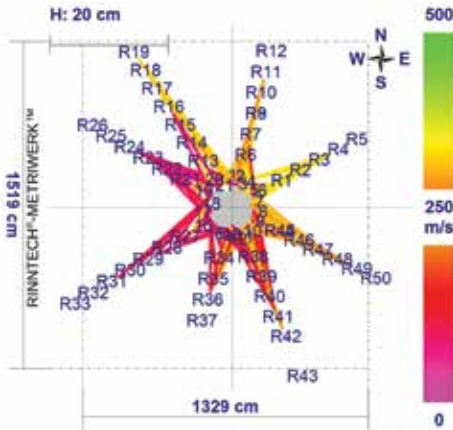
Ryc. 4.4.

Akustyczna detekcja korzeni za pomocą nadajnika umieszczonego na pniu drzewa blisko ziemi i odbiornika, który można wbić w ziemię. W tym przypadku nadajnik generuje sygnał akustyczny, który przechodzi przez drzewo. Jeśli odbiornik znajduje się blisko korzenia, sygnał ulega zmianie



Ryc. 4.5.

Prędkość sygnałów akustycznych wizualizowanych wokół pnia. Wzrost prędkości zależy od obecności korzeni



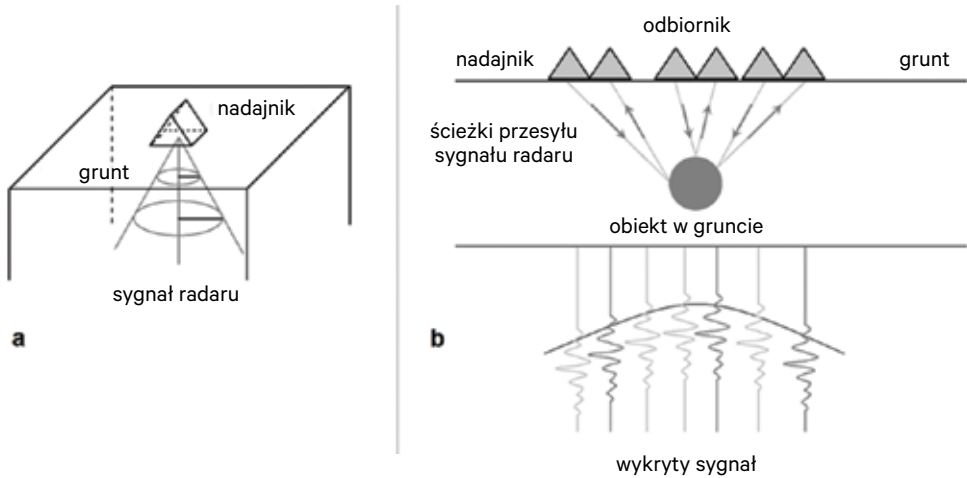
Ryc. 4.6.

Wyniki z Arborix™ (u góry po lewej i po prawej, u dołu po lewej)

Źródło: Frank Rinn, za zgodą, <http://www.rinntech.de/>. Czujniki na szyi korzeniowej (na dole po prawej).

Rozmieszczenie standardowego systemu GRP zostało opisane przez Gou i in. w następujący sposób. „Standardowy system GPR składa się z trzech podstawowych elementów: jednostki sterującej (w tym generatora impulsów, komputera i powiązanego oprogramowania), anten (w tym sparowanych anten nadawczych i odbiorczych) oraz wyświetlacza” (Guo i in. 2013). Sygnał nadajnika GPR przenika do ziemi i odbija się od znajdujących się w niej obiektów. Zmierzone odbicie ma kształt hiperboliczny i zawiera dane dotyczące czasu i amplitudy sygnału, które z kolei informują nas o rozmiarze, materiale i głębokości na której jest dany obiekt (ryc. 4.7).

Częstotliwość sygnału wynosi zwykle od 400 MHz do 2000 MHz. Jest to istotne dla rozdzielczości i głębokości pomiaru, które zależą również od rodzaju gleby (najwyższa częstotliwość należy do rozdzielczości około 0,25 cm i dotyczy obiektów w górnych częściach gleby na wysokości 35-70 cm, podczas gdy najniższa rozdzielczość wynosi około 4 cm i może dotyczyć obiektów nawet na głębokości 250 cm (Guo i in. 2013).



Ryc. 4.7.

- a) Sygnał radaru wnika w ziemię jak rozszerzający się stożek. Taki kształt pozwala radarowi wykrywać obiekty znajdujące się również z boku
- b) Na górze: georadar (GPR) porusza się po powierzchni ziemi, a obiekt w gruncie odbija sygnał. Na dole: odbite sygnały tworzą hiperboliczny sygnał wskazujący położenie obiektu w ziemi

Według artykułów badawczych, za pomocą georadaru można znaleźć zarówno pojedyncze korzenie, jak i cały system korzeniowy, a technika ta może być również wykorzystywana do oceny biomasy gatunków drzewiastych nawet pod asfaltem lub skałami (Ferrara i in. 2014; Zhu i in. 2011; Hirano i in. 2012; Borden i in. 2014; Zhu i in., 201; Cermak i in. 2000). Na Beijing Normal University prowadzone są również badania dotyczące automatyzacji tego systemu – dzięki jego konfiguracji będzie można wykryć 87,32% korzeni i skonstruować system korzeniowy, który będzie pasował do referencyjnego w 82,75% (Wu i in. 2014).

Wykonanie pomiaru nie wymaga wysiłku fizycznego, ponieważ anteny radaru są zwykle montowane na kółkach, a jednostkę georadarową wystarczy pchać po zaznaczonych liniach jak wózek sklepowy. Wykonywanie pomiaru przypomina zatem powolny spacer.



Ryc. 4.8.

Użycie georadaru (do pokazu). Operator powinien iść powoli pchając przed sobą radar



Ryc. 4.9.

Ekran georadaru. Wykonanie pomiaru nie wymaga specjalnych umiejętności, natomiast do interpretacji danych potrzebne jest zwykle zarówno specjalne oprogramowanie, jak i doświadczenie

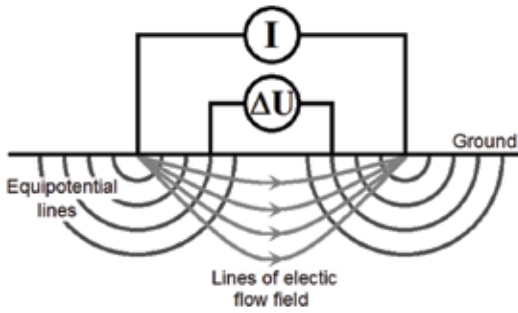
Oprócz ogromnych możliwości, jakie daje ta technika, georadar ma pewne ograniczenia:

- Warunki glebowe. Zawartość wody w glebie ma negatywny wpływ na zebrane dane. Idealna gleba jest sucha i piaszczysta (Hirano i in. 2008).
- Geometria powierzchni gruntu. Powierzchnia powinna być płaska (lub prawie płaska).
- Zawartość wody w korzeniach. Ważny jest gradient między zawartością wody w glebie i w korzeniu. Wykrycie zaschniętych korzeni (o zawartości wody poniżej 20%) za pomocą georadaru jest niemożliwe. (Dannoura i in. 2008; Hirano i in. 2009; Guo i in. 2013).
- Średnica i pozycja korzenia. Głębokość, kierunek oraz kąt korzeni wpływa na wykrywalny sygnał tak samo jak odległość lub krzyżowanie się sąsiednich korzeni (Butnor i in. 2001; Stokes i in. 2002; Barton, Montagu 2004; Hirano i in. 2009; Guo i in. 2013).
- Sąsiadujące ze sobą korzenie. Jeśli dwa sąsiadujące ze sobą korzenie znajdują się zbyt blisko siebie, georadar może ich nie odróżnić. Na przykład, georadar (900 MHz) może odnaleźć korzenie o średnicy powyżej 1,9 cm, ale może je rozróżnić jako dwa oddzielne korzenie wtedy, gdy odległość między nimi wynosi 10–20 cm (jeśli na danym obszarze jest wiele małych korzeni, system może je rozpoznać jako jeden większy korzeń, por. Hirano i in. 2009).
- Inne przedmioty znajdujące się w gruncie. Niektóre obiekty (np. kamienie, kable, instalacje kanalizacyjne) można odróżnić od korzeni, ale w przypadku takich jak martwe korzenie, puste instalacje wykonane z PCV czy przestarzałe rury może to być niemożliwe (Hruska i in. 1999; Stokes i in. 2002; Butnor i in. 2005; Cox i in. 2005; Zenone i in. 2008; Leucci 2010, Guo i in. 2013), co utrudnia stosowanie go też w miejscach o dużych zniszczeniach wojennych.

Za pomocą georadaru można odnaleźć grubsze korzenie bez narażania ich na zniszczenie. Jak podkreślali już wcześniej twórcy tej niezwykle efektywnej metody, jej zalety to powtarzalność pomiarów, monitorowanie obiektów w ziemi oraz możliwość długoterminowego badania systemu korzeniowego (to stwierdzenie jest prawdziwe dla wszelkiego rodzaju nieniszczących metod badawczych). Nie tylko powtarzalność pomiaru jest godna uwagi. Jeśli przyrząd jest dobrze skalibrowany i jeśli używane jest odpowiednie oprogramowanie, dzięki tej technice można znaleźć korzenie nawet pod drogą lub chodnikiem. W niektórych przypadkach warto jednak poprosić o pomoc eksperta.

#### 4. TOMOGRAFIA ELEKTROOPOROWA

Tomografia elektrooporowa (ERT) lub obrazowanie wieloelektrodowe to kolejna technika, która dostarcza informacji o glebie i różnych zawartych w niej obiektach. Może przypominać zastosowanie georadaru, ale zarówno zasady działania tej techniki jak i wykonanie pomiaru wyglądają inaczej. Być może metoda ta wygląda na najbardziej eksperymentalną ze wszystkich omówionych w tym artykule, ale nie oznacza to, że nie zyska na popularności w przyszłości. ERT mierzy opór



elektryczny na cylindrycznej powierzchni gruntu. Opór elektryczny (podobnie jak w przypadku odbicia fal radarowych) zależy od różnych właściwości obiektów (Amato i in. 2008; Zenone i in. 2008).

Ryc. 4.10.

Dwie elektrody przewodzą prąd do gruntu (źródłem jest „I”). Prąd wytwarza pole elektryczne, które można opisać liniami pola przepływu elektrycznego i liniami ekwipotencjalnymi. Generowane napięcie jest mierzone ( $\Delta U$ ) za pomocą dwóch innych elektrod, które dostarczają informacji o jednym cylindrycznym fragmencie gleby. Jeśli zmieniają się warunki w glebie, jeśli pojawia się w niej obiekt lub jakiegokolwiek inne zakłócenie, mierzone wartości ulegają zmianie. Gdy elektrody są przesuwane, można mierzyć różne warstwy ziemi i oceniać powstały w ten sposób obraz gleby 2D

Technika ERT wymaga wykorzystania co najmniej 4 elektrod – 2 do przewodzenia prądu do gleby i 2 do pomiaru napięcia. Jeśli elektrody przewodzące lub pomiarowe zostaną przesunięte w inne miejsce, mierzona linia cylindryczna ulega zmianie (ryc. 4.10.). Używając kilku elektrod w linii lub w innym układzie można ocenić jedną lub więcej warstw gleby (Hagrey 2006; Morelli i in. 2007). W badanych warstwach gleby można wykryć główne korzenie i następnie wykonać ich model w technice 3D, a po odpowiedniej kalibracji – ocenę biomasy oraz objętości korzeni. Za pomocą tej metody można również badać dynamikę wilgotności gleby (Morelli i in. 2007; Amato i in. 2008; Rossi i in. 2011, Srayeddin, Doussan 2009; Garre i in. 2011; Robinson i in. 2012).

W celu uzyskania bardziej szczegółowych informacji urządzenie ERT można połączyć z GPR (Hagrey 2006; Morelli i in. 2007; Zenone i in. 2008; Zhu i in. 2011 (Należy pamiętać, że istnieje jeszcze inna technika czasami nazywana metodą elektrooporową, ale służąca do oceny pnia drzewa, w tym podręczniku technika ta jest nazywana tomografią impedancyjną i opisana została w rozdz. 2.9).



## 5. STUDIA PRZYPADKÓW

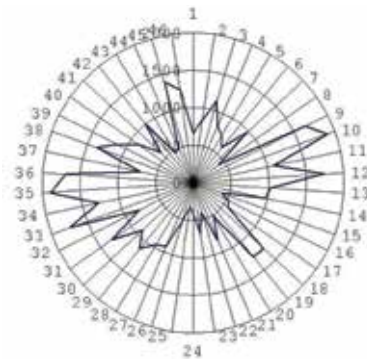
Aby zilustrować możliwości i ograniczenia technik detekcji korzeni, a zwłaszcza akustycznego mapowania korzeni, w tym rozdziale przedstawiono dwa studia przypadków. W obu z nich zastosowano metodę akustyczną opisaną w podrozdziale 2. Dźwięk został wygenerowany na szyi korzeniowej, a sygnał został wykryty przez sondę glebową. W pierwszym przypadku wykonano mapowanie korzeni, a następnie wykop. W drugim przeprowadzono ocenę systemu korzeniowego i wykonano próbę oceny bezpieczeństwa.

### 1. MAPOWANIE KORZENI VS. ODSŁONIĘCIE KORZENI

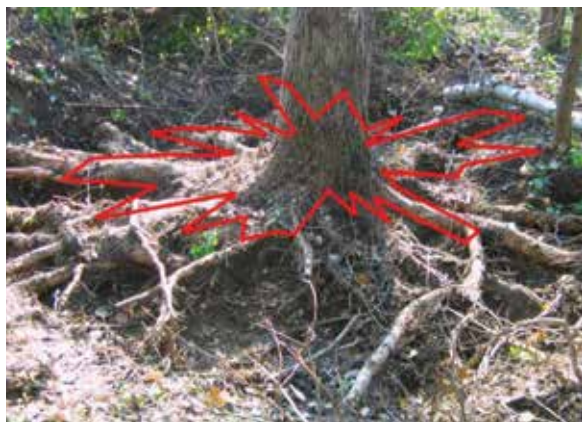
W roku 2008 wybrano brzozę w ogrodzie botanicznym Uniwersytetu w Sopron, a następnie wykonano mapowanie akustyczne korzeni za pomocą 8 czujników (do pomiaru wystarczy jeden czujnik, ale 8 znacznie przyspiesza ten proces).



Ryc. 4.11.  
Czujniki glebowe



Ryc. 4.12.  
Wizualizacja prędkości sygnału



Ryc. 4.13.  
Wizualizacja prędkości nałożona na zdjęcie odsłoniętych korzeni



Pomiaru dokonano wokół pnia drzewa. Zebrano dane dotyczące czasu, wysokości czujników glebowych nad ziemią oraz głębokości, na której znajdowały się korzenie.

Wykonano wizualizację prędkości dźwięku w formie okręgu (ryc. 4.12.). Po odsłonięciu korzeni można było porównać otrzymane wyniki pomiaru ze stanem rzeczywistym. Jak widać na ryc. 4.13. otrzymane wyniki pasowały do systemu korzeniowego.

## 2. CZY MAPOWANIE KORZENI MA ZWIĄZEK ZE STABILNOŚCIĄ?

Raz po raz pojawia się pytanie, czy mapowanie korzeni może dostarczyć informacji na temat ich stabilności. Nośność systemu korzeniowego zależy od wielu czynników mechanicznych, nie tylko od umiejscowienia głównych korzeni. Mimo to przeprowadzono pewne badania mające na celu sprawdzenie, czy główne korzenie drzewa mogą coś powiedzieć o stabilności całego systemu.

W celu przeprowadzenia takiego pomiaru wybrano dwa świerki pospolite (*Picea abies*). Ponieważ rosły blisko siebie założono, że ich warunki życia będą takie same. Jediną istotną różnicą był fakt, że jedno drzewo zostało zasiedlone przez opieńkę miodową (*Armillaria mellea*).

Na pierwszym etapie badania system korzeniowy został zmapowany za pomocą metody akustycznej. Umiejscowienie korzeni zostało określone wzdłuż okręgów w odległości 0,5 m, 1 m oraz 1,5 metra w kierunku od pnia drzewa. Sonda glebowa była wbijana w glebę po okręgu co 15 cm. Do badania użyliśmy sondy z 40 cm szpicą, która może wykryć korzenie znajdujące się na maksymalnej głębokości 50 cm, ale dla świerków jest to wystarczające. Nadajnik został umieszczony na szyi korzeniowej pod kątem 45 stopni względem poziomu gruntu, a następnie uderzony co najmniej 3 razy dla każdej pozycji sondy.

W celu porównania wyników mapowania korzenie z już uznanym sposobem pomiaru stabilności przeprowadzono statyczne testy obciążeniowe obu drzew.

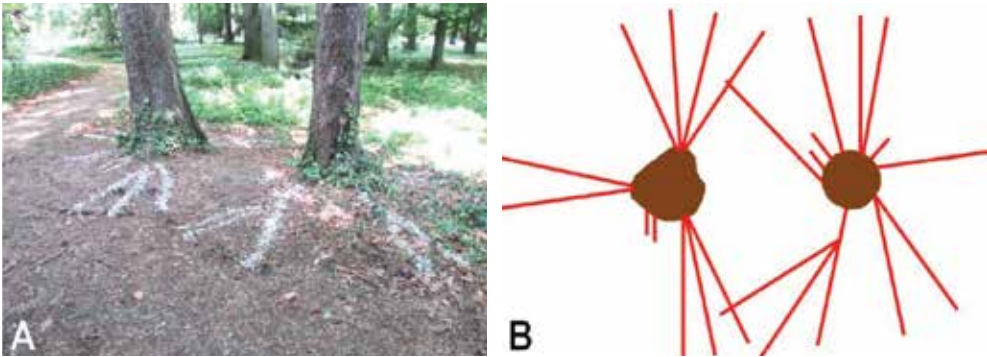
Celem tego badania było znalezienie związku pomiędzy systemem korzeniowym a stabilnością drzewa, ale sama informacja o umiejscowieniu korzeni nie wystarczy, aby dokonać porównania z czynnikami bezpieczeństwa z testów obciążeniowych drzewa. Aby rozwiązać tę kwestię, dokonaliśmy oceny korzeni na podstawie ich lokalizacji (zob. ryc. 4.15.).

Określono obszary, w których korzenie mogą się „utrzymać” w gruncie. Oszacowano również parametry gleby i obliczono moment, w którym może dojść do wyrwania drzewa. W ten sposób można było również obliczyć współczynnik bezpieczeństwa.

Szacunki dotyczące bezpieczeństwa dokonane na podstawie mapowania korzeni były dalekie od tych uzyskanych z próby obciążeniowej drzewa (mniej niż połowa), ale ponieważ wskazały na prawidłowy trend, być może będą przydatne do prognozowania w przyszłości. Uzyskane dane przedstawiono w tabeli 4.1.

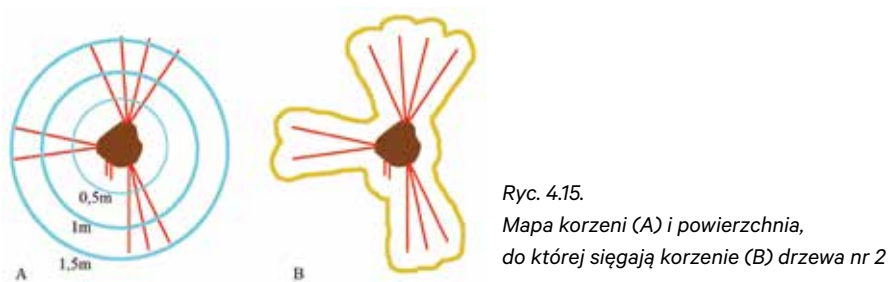
Ciekawym odkryciem w dokonanym pomiarze był fakt, że żadne główne korzenie nie rosły w kierunku drugiego drzewa.





Ryc. 4.14.

Mapowanie korzeni. Zdjęcie znalezionej korzeni (A) i model wykonany komputerowo (B)



Ryc. 4.15.

Mapa korzeni (A) i powierzchnia, do której sięgają korzenie (B) drzewa nr 2

	SF_próba obciążeniowa	SF_mapowanie korzeni	Porównanie (iloraz) obu SF
Drzewo 1	5,07	1,94	2,61
Drzewo 2	3,02	1,27	2,38
Porównanie SF (Drzewo 1 / Drzewo 2)	1,68	1,53	

Tabela 4.1.

Współczynniki bezpieczeństwa określone na podstawie próby obciążeniowej (SF\_ próba obciążeniowa) i mapowania korzeni (SF\_ mapowanie korzeni). Interesujące jest to, że stosunek uzyskanych współczynników bezpieczeństwa dla obu drzew jest do siebie zbliżony, niezależnie od zastosowanej techniki



## V.

*Zdalna instrumentalna ocena drzew***WPROWADZENIE**

Określenie „zdalna instrumentalna ocena drzew” odnosi się do wszystkich metod zbierania danych o drzewach, które nie wymagają bezpośredniego dostępu arborysty do badanego drzewa. Są to również techniki, które pozwalają na skalowalne podejście tj. gromadzenie danych z dużych populacji na dużą skalę. Zaletą tego rozwiązania jest to, że wszystkie dane wejściowe mogą być przechowywane (archiwizowane), a następnie analizowane z różnym (opcjonalnym) poziomem szczegółowości w ramach dalszego przetwarzania. Obecnie ograniczenia tej procedury obejmują:

- konieczność posiadania profesjonalnego sprzętu,
- duże ilości przesłanych danych,
- poważne problemy z dokładnością w przypadku zaniedbania/awarii któregokolwiek z urządzeń.

W tym tekście omówimy następujące obszary usług:

USŁUGA	ZAŁOŻENIA	PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA
<b>Analiza pozycyjna z wykorzystaniem GNSS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• informacje satelitarne o lokalizacji</li> <li>• bezpłatna usługa z ograniczoną dokładnością</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• informacje satelitarne o lokalizacji</li> <li>• bezpłatna usługa z ograniczoną dokładnością</li> </ul>
<b>Analiza pozycyjna z wykorzystaniem GNSS z IMU</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dokładne informacje satelitarne dotyczące lokalizacji</li> <li>• wymóg bardziej skomplikowanego połączenia większej liczby komponentów sprzętu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dokładna lokalizacja danych obiektów (drzew)</li> <li>• możliwe tworzenie dokładnych (skalibrowanych) zdjęć</li> </ul>
<b>Analiza zdjęć (zdjęcia poziome)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• duża liczba metod ilościowej/ jakościowej analizy danych</li> <li>• konieczność użycia zaawansowanego oprogramowania i sprzętu</li> <li>• możliwe połączenie z SI (AI – <i>Artificial Intelligence</i>), LiDAR i innymi metodami</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie gatunków drzew</li> <li>• pomiar drzew</li> <li>• wybrane dane jakościowe (żywołność, wskaźnik pokrycia koroną itp.)</li> </ul>
<b>LiDAR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• szczegółowe informacje o kształcie struktur zarówno w zastosowaniu horyzontalnym (z powietrza) jak wertykalnym (z gruntu)</li> <li>• wysokiej rozdzielczości chmury punktów LiDAR mogą służyć do dokładnych pomiarów struktur pnia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• cyfrowy model terenu</li> <li>• precyzyjne wykonanie modeli 3D pni lub całych drzew</li> </ul>
<b>Drony</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nośniki czujników do ich stosowania na wysokości</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• badanie stanu drzew bez konieczności wejścia w koronę</li> <li>• badanie obszarowe stanu drzewostanów z detalami w dużej rozdzielczości</li> </ul>

## 1. ANALIZA POZYCYJNA

W ostatnich latach do lokalizacji drzew stosowano **globalne systemy nawigacji satelitarnej (GNSS)**. W Europie dostępne są (lub w najbliższych latach będą):

- GPS (I, II oraz III),
- GLONAS,
- Galileo,
- Bei Dou-3.

Usługa umożliwia autonomiczne pozycjonowanie przestrzenne za pomocą satelitów. Urządzenia kupowane przez klientów wykorzystują niewielkie elektroniczne odbiorniki radiowe, które na podstawie sygnałów wysyłanych z satelitów pozwalają obliczyć ich położenie z dokładnością do kilku metrów. W przypadku naukowego bądź specjalistycznego użycia, przy zastosowaniu różnych procedur kalibracji, ta odległość może być ograniczona nawet do kilku centymetrów.

Ogólnie rzecz biorąc, satelitarne systemy pozycjonowania można opisać jako satelitarne systemy radiodalmierzy:

- System radiowy wykorzystuje fale radiowe do pomiaru określonego parametru, a system radiodalmierza – do pomiaru odległości. Odbywa się to w następujący sposób: nadajnik, który przesyła fale radiowe ze znacznikiem czasu, umieszcza się w punkcie o znanej pozycji. W punkcie, którego pozycja jest mierzona, umieszczony jest odbiornik, który porównuje znaczniki czasu ze swoim „zegarem”. Dzięki temu można dokonywać pomiarów opóźnienia. Ponieważ fale radiowe poruszają się ze znaną prędkością, wystarczy pomnożyć opóźnienie przez tę prędkość, aby obliczyć wymaganą odległość. Aby określić położenie, odległość należy zmierzyć z wielu punktów w taki sam sposób, jak w pierwszym przypadku. Położenie odbiornika można następnie obliczyć, na przykład, poprzez trilaterację lub multilaterację.
- W systemie satelitarnym znanymi pozycjami są satelity krążące wokół Ziemi. Dlatego ich przekaz musi zawierać nie tylko znaczniki czasu, ale też parametry ścieżki satelity, z których można obliczyć pozycję podczas wysyłania wiadomości.

W momencie stosowania GNSS mogą wystąpić następujące problemy:

- Sygnały GNSS są kierunkowe i mogą być blokowane przez budynki.
- Czas uruchomienia się odbiornika może być różny (ciepły i zimny start) – od kilku sekund to jednej minuty. Jest on niezbędny, aby odbiornik mógł uzyskać więcej sygnałów satelitarnych potrzebnych do obliczenia pozycji.
- Aktualizacje pozycji GNSS są ograniczone do jednej na sekundę. Jest to wystarczające do śledzenia dużych i wolno poruszających się obiektów.
- Czas uruchamiania jest zbyt długi, a częstotliwość aktualizacji jest niewystarczająca dla wielu wbudowanych aplikacji.
- Dokładność GNSS jest mierzona w metrach. Jest to niewystarczające, aby używać ten system w większości wbudowanych aplikacji.

**Pomiary inercyjne (IMU)** są stosowane w połączeniu z GNSS, aby wyeliminować wady metody i zwiększyć wymaganą dokładność. IMU zapewniają dokładniejszą lokalizację i szybsze aktualizacje. Dostarczają również dane o położeniu względnym ze znanego punktu początkowego, podczas gdy odbiorniki GNSS dostarczają informacji o położeniu bezwzględnym. Oznacza to, że te dwie metody wzajemnie się uzupełniają.



Ryc. 5.1.  
Obszar błędu systemu  
GNSS pokazany na mapie

IMU zawierają co najmniej jeden z następujących rodzajów czujników ruchu:

- Czujniki żyroskopowe mierzą zmiany kąta położenia, zwykle wyrażane w stopniach na sekundę. Zintegrowana prędkość kątowa może służyć do monitorowania zmiany orientacji. Czujniki żyroskopowe są dostępne z jedną, dwiema lub trzema osiami. Żyroskopy monitorują ruch względny niezależnie od grawitacji. Z tego powodu może wystąpić błąd pozycji zwany „dryftem”.
- Czujniki akcelerometryczne mierzą przyspieszenie liniowe, włączając przyspieszenie spowodowane ruchem urządzenia i przyspieszenie grawitacyjne. Przyspieszenie jest mierzone w jednostkach  $g$ , które są wielokrotnościami siły grawitacji Ziemi. Akcelerometry są dostępne z jedną, dwiema lub trzema osiami, które definiują układ współrzędnych X, Y i Z. Dane akcelerometru mogą być wykorzystane do pomiaru orientacji statycznej urządzenia poprzez obliczenie zmierzonego kąta urządzenia i kompensacji siły grawitacji.
- Przetworniki magnetyczne mierzą natężenie pola magnetycznego zazwyczaj w mikrotteslach ( $\mu T$ ) lub gausach ( $100 \mu T = 1 \text{ gaus}$ ). Najpopularniejszym czujnikiem magnetycznym używanym w mobilnej elektronice jest trójosiowy magnetometr wykorzystujący efekt Halla. Natężenie pola magnetycznego Ziemi waha się od 25 do 65  $\mu T$  w zależności od położenia geograficznego i kąta nachylenia. Dzięki detekcji kąta pola magnetycznego oraz kąta względem grawitacji uzyskujemy dane, które można wykorzystać do określenia położenia z dużą dokładnością. Aby uzyskać właściwą pozycję, należy znać aktualną szerokość i długość geograficzną.
- Czujniki ciśnienia mierzą ciśnienie różnicowe lub bezwzględne w hektopaskalach (hPa) lub milibarach (mbar). Standardowe ciśnienie atmosferyczne na poziomie morza wynosi 1013,25 hPa. Zmiany wysokości powodują zmiany w ciśnieniu powietrza i mogą służyć do monitorowania ruchu pionowego.

## 2. ANALIZA OBRAZÓW

Wiele parametrów – zarówno ilościowych, jak i jakościowych – można uzyskać z wysokiej jakości zdjęć drzew. W tym celu wykorzystywane są zdjęcia naziemne wykonane ręcznie lub na nośniku z dokładnie znaną pozycją względem skanowanego drzewa (patrz GNSS powyżej). Warunkiem koniecznym do przeprowadzenia ewentualnej analizy wymiarów ze zdjęć jest znajomość parametrów

aparatu (charakterystyka chipa skanującego i obiektywu). Można to osiągnąć za pomocą kalibracji. Aparaty kalibruje się poprzez wykonanie zdjęcia pola kalibracyjnego w określonych warunkach oświetleniowych, a następnie przez obliczenie położenia pikseli w wykrytym polu.

Analizując zdjęcia można uzyskać następujące dane:

- parametry dendrometryczne (wymiary pnia i korony, wysokość drzewa),
- charakterystykę kształtu pnia (biomechanika, analiza objętości),
- wskaźnik powierzchni liści (pokrycie koroną, poziom defoliacji),
- analizę zmian kotwienia pnia (dla porównawczych pomiarów kalibrowanych w czasie).

### 3. ANALIZA SPEKTRALNA

W fotografii w podczerwieni stosowany czujnik obrazu jest czuły na światło podczerwone. Część wykorzystywanego widma określa się mianem bliskiej podczerwieni, aby odróżnić go od obszaru dalekiej podczerwieni, który jest domeną obrazowania termicznego. Długość fal używanych w fotografii waha się od około 700 nm do 900 nm. Czujnik jest zwykle czuły na światło widzialne, dlatego należy użyć filtra podczerwieni; umożliwia to przenikanie światła podczerwonego (IR) do aparatu, ale blokuje całe widmo światła widzialnego lub jego większość (przez co filtr wygląda na czarny lub ciemnoczerwony).

Chlorofil silnie pochłania promieniowanie o długości fali czerwonej i niebieskiej, ale odbija promieniowanie w zielonym paśmie widma. Liście postrzegamy jako najbardziej zielone latem, kiedy zawartość chlorofilu osiąga maksimum. Jesienią, gdy w liściach jest go mniej, następuje mniejsze wchłanianie i większe odbicie w czerwonym paśmie widma. Dlatego postrzegamy liście jako żółte lub czerwone (żółty to połączenie zieleni i czerwieni). Można zatem stwierdzić, że wewnętrzna struktura zdrowego liścia działa jak doskonały odbłyśnik bliskiej podczerwieni. Mierząc wartości w bliskiej podczerwieni, można odróżnić zdrową roślinność od uszkodzonej lub chorej.

W przeszłości podejmowano już próby zobrazowania pnia w podczerwieni, aby ujawnić pewien poziom ubytków wewnętrznych. Niemniej jednak badania porównawcze nie dowiodły, że takie wykorzystanie fotografii widmowej jest słuszne i użyteczne w praktyce.



Ryc. 5.2.  
Obraz w podczerwieni  
pnia drzewa  
i głównych konarów



## 4. SIECI NEURONOWE I SZTUCZNA INTELIGENCJA

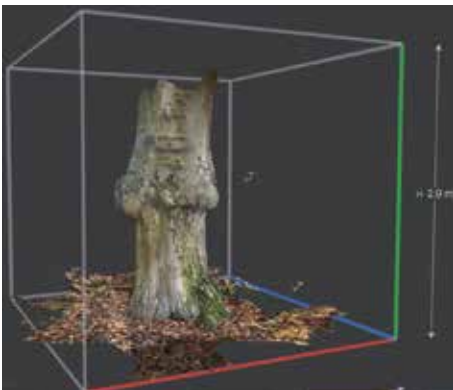
W niedalekiej przyszłości będzie można przeprowadzić obróbkę zdjęć za pomocą sieci neuronowych. Sztuczna sieć neuronowa jest jednym z modeli obliczeniowych wykorzystywanych w sztucznej inteligencji. Jest to struktura przeznaczona do rozproszonego przetwarzania danych równoległych. Składa się ze sztucznych (lub też formalnych) neuronów, bazujących na systemie neuronów biologicznych. Neurony są ze sobą połączone i przekazują sobie sygnały oraz przekształcają je za pomocą określonych funkcji transmisji. Neuron ma dowolną liczbę wejść, ale tylko jedno wyjście. Zastosowanie sieci neuronowych umożliwia automatyczne wyszukiwanie wymaganych parametrów podczas gromadzenia danych o dużej wydajności. Obecnie są one wykorzystywane do określania taksonów drzew na podstawie zdjęć. Trwają także prace nad analizą innych parametrów jakościowych.

## 5. LiDAR

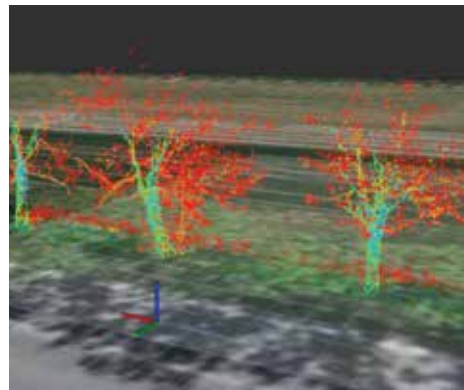
LiDAR to urządzenie służące do wykrywania obiektów i pomiaru odległości od nich za pomocą impulsów świetlnych (*Light Detection and Ranging*). Skaner ToF (*Time of Flight*) służy do określania odległości światła między dwoma obiektami. Mierzy czas, w jakim światło dociera do obiektu i odbija się od niego. Ostatnio technologia ta została wykorzystana do tworzenia trójwymiarowych map środowiska lub obiektów.



Ryc. 5.3.  
Chmura punktów w obrazie drzewa z LiDAR (po lewej) i fotografia tego drzewa (po prawej)



Ryc. 5.4.  
Trójwymiarowy model pnia drzewa na podstawie ręcznego pomiaru techniką LiDAR



Ryc. 5.5.  
Skan alei wykonany przy pomocy LiDAR z samochodu jadącego z prędkością 60 km/h

Dzięki skanowaniu drzew w technice 3D można przeprowadzać różnorodne analizy od prostych (dokładny pomiar parametrów w poszczególnych odcinkach pnia lub całej korony) do złożonych (obliczenie nośności poszczególnych profili z uwzględnieniem nieregularnego przekroju lub pozostałych włókien w ubytku otwartym w drzewie). System tworzenia trójwymiarowych modeli drzew i ich części w połączeniu z wizualną i instrumentalną oceną stanu drzew nosi nazwę Zaawansowanej Analizy Biomechanicznej (ang: *Advanced Biomechanical Analysis*, [www.adbian.com](http://www.adbian.com)).

Urządzenia LiDAR mogą być używane ręcznie lub umieszczone na innym urządzeniu z dokładną detekcją pozycji np. na dronie, samochodzie pomiarowym lub mobilnym zestawie do zbierania danych (np. na rowerze).

## 6. DRONY

Bezzałogowy statek powietrzny (czasami nazywany UAV-em z angielskiego *Unmanned Aerial Vehicle* lub dronem) to rodzaj małego samolotu, który może być obsługiwany zdalnie lub latać samodzielnie korzystając ze wstępnie zaprogramowanych planów lotu lub bardziej złożonych dynamicznych systemów autonomicznych.

Drony mogą być nośnikami wielu opisanych powyżej urządzeń, które można umieszczać w koronach drzew i tym samym przekazywać informacje o parametrach jakościowych/ilościowych monitorowanych obiektów. Przy badaniu większych populacji drzew (drzewostanów) mogą zapewnić łatwy dostęp bez konieczności dostępu z poziomu ziemi. Jest to ważna zaleta, zwłaszcza jeśli teren jest trudno dostępny, nierówny lub pochyły. Należy jednak pamiętać, że nawet w przypadku tej technologii istnieje wiele ograniczeń.

Jeśli dana osoba posługuje się dronem lub kwadrokopterem, staje się uczestnikiem ruchu powietrznego i musi przestrzegać określonych zasad. Loty tego typu urządzeniami muszą się odbywać w bezpiecznej odległości od ludzi. Należy również unikać ruchu lotniczego, co oznacza, że latanie dronami w pobliżu lotnisk jest zakazane. Rekomendowany dystans wynosi 5500 metrów. Nie można zakłócać ruchu lotniczego również poza obszarem lotniska i tym samym latać wyżej niż 300 metrów nad ziemią. Nie można posługiwać się dronem w przestrzeni, w której ruch lotniczy jest ograniczony lub zakazany. Podczas użytkowania dronu operator musi mieć urządzenie w zasięgu swojego wzroku, co wyklucza stosowanie funkcji śledzenia użytkownika.

Jeśli użytkownik obsługuje dron w celach komercyjnych, musi dokonać rejestracji w Urzędzie Lotnictwa Cywilnego i uzyskać odpowiednią licencję. Jest to związane z wymogiem wykupienia ubezpieczenia od odpowiedzialności cywilnej na wypadek szkód.





# VI.

## *Dendrochronologia*

Czy rok 147 p.n.e. był rokiem suchym? Odpowiedzi na to pytanie mogą udzielić dendrochronolodzy z Danii, stanu Georgia, Anglii, Irlandii, Kalifornii czy Niemiec, ponieważ korzystają z tzw. „chronologii wzorcowej” dla minionych 2300, 7000, a nawet 12 000 lat.

Dendrochronologia to nauka datująca słoje drzew, dzięki czemu można dany każdy z nich przypisać do określonego roku kalendarzowego. Głównymi jej użytkownikami są przedstawiciele różnych dziedzin historii i klimatologii, ponieważ powstawanie słoików zależy również od warunków środowiskowych. Zapoznajmy się z tym bliżej.

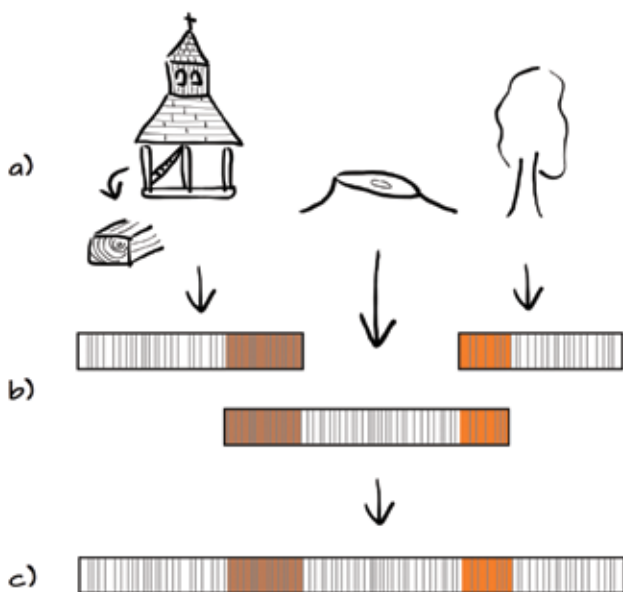
### 1. HISTORIA I GŁÓWNE ZAŁOŻENIA

Pogląd mówiący o tym, że warunki środowiskowe wpływają na przyrost słoików drzew i że dzięki nim można badać klimat panujący w przeszłości sięga XVIII wieku. Nieco później, bo około 1830 r., pojawił się pomysł datowania szczątków drzew. Obie idee traktowano jedynie jako teorie.

Szerokie zastosowanie dendrochronologii zapoczątkował amerykański astronom A. E. Douglass, który próbował udowodnić wpływ aktywności słonecznej na klimat. Sprawdzał słoje drzew i starał się w nich odnaleźć 11-letni okres, który mógłby być powiązany z cyklami rozbłysków słonecznych. Odnosił w tym sukces, założył Laboratorium Badań Przyrostów Rocznych Drzew na Uniwersytecie w Arizonie w 1937 roku i stał się ojcem dendrochronologii. (Samo wyraz „dendrochronologia” składa się z członu „dendro”, czyli „drzewo”, „chrono”, czyli „czas” i „logia” – badanie czegoś). Przyrost słoików zależy od gatunku, środowiska (gleba, lokalizacja nad brzegiem rzeki, ...), pogody (liczba godzin słonecznych, wilgotność, opady, wiatr, temperatura ...), obecności szkodników oraz wieku drzewa. Drzewa rosnące na skraju swojego idealnego środowiska naturalnego są bardziej wrażliwe na zmiany klimatyczne.

W dendrochronologii zakłada się, że czasami jednolity obszar może mieć promień 500 km. Oznacza to, że można zbierać i analizować razem próbki drzew rosnących w odległości nawet 1000 km. Zdarza się jednak, że dany region, mimo iż jest mały, posiada swój własny klimat, przez co można zbierać i analizować razem próbki pochodzące tylko z konkretnego miejsca.

Zazwyczaj jeden pierścień tworzy się w ciągu jednego roku, dobrym przykładem są tu dęby. Inne drzewa jak np. olchy i sosny wytwarzają od 0 do 2 słoików rocznie, podczas gdy niektóre gatunki jak brzozy czy wierzby w ogóle nie są wykorzystywane w dendrochronologii. Słoje mogą mieć różną szerokość i kolor, a ich skład chemiczny może się różnić z roku na rok. Eksperci są zgodni co do tego, że wzór 30-letniej próbki jest unikalny zarówno pod względem wieku, jak i obszaru, z którego pochodzi.



Ryc. 6.1.

Etapy tworzenia chronologii wzorcowej:

a) przykłady źródeł próbek drewna: belka ze starej dzwonnicy, pniak i drzewo;

b) poszczególne próbki drewna z układem słoików. Wspólne fragmenty („zakładki”) oznaczono kolorami;

c) chronologia wzorcowa (poprzednie zakładki nadal oznaczone kolorami)

Źródło: opracowanie własne.

## 2. ZAKŁADKI I CHRONOLOGIA WZORCOWA

Spójrzmy na próbkę pochodzącą ze stuletniego drzewa, które rośnie w parku. Pokazuje ona wzór słoików od 1920 do 2020 roku. Jeśli posiadamy próbkę z pnia drzewa (ten sam obszar i gatunek), które rosło od 1780 do 1960, wzór między 1920 a 1960 rokiem powinien być podobny. Działa to na zasadzie układanki – kiedy dopasujemy do siebie wszystkie elementy, uzyskany obraz staje się większy. W tym przykładzie cały wzór słoików mógłby zostać wydłużony w przeszłość do 1780 roku. Próbki zawierające ten sam wzór, „dopasowane” – są określane mianem „zakładek”. Gdy dwie próbki mają częściowo taki sam wzór, oznacza to, że nachodzą na siebie, stosowana jest wówczas zasada tzw. *cross-dating*, bazująca na przypisaniu każdego słoika do określonej daty (zob. ryc. 6.1). Możemy również znaleźć odpowiedni kawałek drewna pochodzący z drewnianego domu lub dachu, który zawiera wzór słoików z lat 1780–1815, ale ma również starszą część. Oznacza to, że wzorec słoików może zostać poszerzony. Takie poszerzone wzorce noszą nazwę chronologii wzorcowej (ryc. 6.1).

## 3. POBIERANIE PRÓBEK I ICH UŻYCIĘ

Próbki drewna mogą być pobierane zarówno w sposób nieniszczący, jak i niszczący. Czasami wystarczy zdjęcie makro drzewa lub belki, a innym razem konieczne może być wycięcie cienkiej warstwy drewna. Kiedy potrzebne jest pobranie próbki z drzewa, wykorzystywany jest do tego świder przyrostowy (świder Presslera).

W dendrochronologii daje się wykorzystać 40% ostatnio zebranych próbek. Dzieje się tak na przykład dlatego, że nawet jeśli dany rok był suchy, drzewo rosnące nad rzeką może nie wykształcić cięszych słoików, przez co ich wzór nie będzie pasował do chronologii.

Nawet jeśli dopasowanie jest poprawne, datowanie może być trudne. Jeśli w próbce jest widoczny ostatni pierścień, można określić rok jego ścięcia, a nawet porę roku. Jeśli w próbce nie ma ostatniego przyrostu, można rok ścięcia tylko oszacować, jeśli widocznych jest choć kilka pierścieni w biału. Na przykład dęby siedmiogrodzkie mają biel o szerokości 15 ( $\pm 2$ ) słojów. Jeśli znaleziono próbkę drewna zawierającą 5 słojów w biału, rok ścięcia drzewa będzie przypadał na około 10 lat po ostatnim widocznym i datowanym słoju.



Ryc. 6.2.

*Historyczna drewniana konstrukcja dzwonnicy*

Jeśli nie można znaleźć ostatniego pierścienia lub pierścienia w biału, dokładne datowanie nie jest możliwe. Można jedynie stwierdzić, że drzewo zostało ścięte po „jakiejs” dacie.

Dokładne datowanie konstrukcji drewnianych, budynków i artefaktów może być trudne, ponieważ tego typu elementy mogły być wymienione, lub mogły być zastosowane np. belki pochodzące z rozbiórek. Czasami, gdy wzór nie pasuje do chronologii wzorcowej danego obszaru, można go odnaleźć w innym regionie. Kłody drewna, belki, drewniane konstrukcje statków, ramy do obrazów itp. były stale transportowane i sprzedawane, a dzięki dendrochronologii można ustalić ich szlaki. W niektórych przypadkach pewne próbki nie mogą być dopasowane do chronologii wzorcowej, ale udowodniono już, że pochodzą z tego samego obszaru. W takiej sytuacji można określić, czy próbki pochodzą z tego samego roku, czy nie.

Tak zwane chronologie pływające (względne) mogą być tworzone z kilku próbek, które nakładają się na siebie, ale których nie można powiązać z żadnymi próbkami z czasów obecnych, przez co dokładna data słojów nie jest znana. Można ich użyć do określenia, czy dana próbka jest starsza czy młodsza od innej, a dalsze badania mogą oczywiście połączyć te chronologie z teraźniejszością i przekształcić je w chronologie wzorcowe.

Analiza szerokości, koloru słojów, struktury komórek/ścian komórkowych czy składników chemicznych może dostarczyć informacji o klimacie panującym w danym roku. Różne gatunki drzew mogą być wrażliwe na różne warunki atmosferyczne, ale najczęstszą przyczyną „wyszcuplenia słojów” jest brak opadów.



Ryc. 6.3.

*Słoje widoczne na drewnianej podłodze*

Zarówno dendrochronologia jak i badania izotopów (zwykle mierzy się izotopy tlenu, aby znaleźć brakujący słoń) odgrywają istotną rolę w klimatologii. Ponieważ można ustalić model klimatu z przeszłości, można również sprawdzić, czy istnieje możliwość przewidzenia warunków atmosferycznych w przyszłości na podstawie posiadanych danych.

Jako że datowanie dendrochronologiczne jest precyzyjne, służy ono również do kalibracji i sprawdzania datowania radiowęglowego.

Oceny żywych drzew nie są głównym przedmiotem zainteresowania dendrochronologii, ale były prowadzone takie badania, w których przeprowadzono porównania drzew rosnących na szczytach wzgórz i w bardziej zacisznych dolinach w ich pobliżu. Ponieważ pogoda jest obserwowana przez wiele dziesięcioleci, naukowcy wiedzieli, który rok był suchy, więc mogli sprawdzić, czy te lata miały większy wpływ na drzewa rosnące na wzgórzach. Zaobserwowano, że sytuacja obszarów, z których woda mogła odpłynąć szybciej i które szybciej mogły wyschnąć, miała znaczenie dla przyrostów. Wynika z tego, że szczyty wzgórz stanowią skraj idealnego środowiska naturalnego, więc drzewa tam rosnące są bardziej wrażliwe na zmiany. Kierując się szerokością słoje można też zidentyfikować znaczącą utratę aparatu asymilacyjnego, na przykład wskutek obłamania części korony lub intensywnych cięć.

## JAK MOŻNA WYKORZYSTAĆ WIEDZĘ I NARZĘDZIA DENDROCHRONOLOGICZNE DO OCENY DRZEW?

- oszacowanie wieku ściętego drzewa (jeśli istnieją restrykcje/ograniczenie dot. ścinania drzew w danym wieku – jako wskazówka dla prawników, itp.); inne zadania specjalne,
- pomoc w podjęciu decyzji, czy drzewo rośnie na skraju swojego idealnego środowiska,
- w celu wykonania analizy słoje można użyć precyzyjnego odwiertu rezystografem (zob. odniesienie do firmy Rinntech w rozdz. II i V),
- można również badać próbki pobrane za pomocą świdra przyrostowego.



Dendrochronologia to świetne narzędzie, ale podobnie jak wszystkie inne badania instrumentalne, jej użyteczność jest ograniczona. Głównymi czynnikami ograniczającymi są zapotrzebowanie na próbki z tego samego gatunku i obszaru oraz minimalny wiek próbki (30 lat).

W chwili obecnej przeprowadzanych jest wiele badań dendrochronologicznych, ponieważ ta dziedzina może pokazać nam zarówno fragment naszej przeszłości, jak i przyszłości.



## LITERATURA

1. Bejo L., Divos F., Fathi S. 2017. *Dynamic root stability assessment – basics and practical examples*. Proc. 20<sup>th</sup> Int. NDTE Wood Symp. Sept. 12–15, Madison, s. 262–269.
2. Bieker D., Keh R., Weber G., Rust S. 2010. *Non-destructive monitoring of early stages of white rot by *Trametes versicolor* in *Fraxinus excelsior**. Annals of Forest Science 67:210.
3. Botár I., Grynaeus A. & Tóth B. 2008. A “new” dating method for historical wood structure. Transsylvania Nostra. II/8.
4. Brudi E., van Wassenae P. 2002. *Trees and Statics: Non-Destructive Failure Analysis*. In: How trees stand up and fall down. Tree structure an mechanics conference proceedings, s. 53–70.
5. Dávid S. & Kern Z. 2007. *Keleti- bakonyi és gerecsei tölgyek dendrokronológiai és dendroökológiai vizsgálata / Dendrochronological and dendroecological research of oak from Eastern Bakony Mts and Gerecse Mts, Hungary*. In: Archaeology and Ethnography of Forest and Wood / Az erdő és a régészete és néprajza, s. 89–102.
6. Divos F., Bejo L. and Puskas L. 2015. *Evaluation of the root system’s stability based on actual wind intensity and inclination measurements*. Proc. 19<sup>th</sup> Int. NDTE Wood Symp. Sept. 12–15, 2017, Rio de Janeiro, Brazil, s. 514–519.
7. Fathi S., Bejo L., Divos F. 2020. *Investigating the Effect of Weather and Seasonal Factors on Root Stability Using Dynamic Measurements*, Open Journal Forestry, 10:124–134.
8. Fathi S. 2020. *The reliability and applications of dynamic tree stability inspection*. Doctoral Dissertation, University of Sopron, Hungary.
9. Göcke L., Rust S., Ruhl F. 2018. *Assessing the Anchorage and Critical Wind Speed of Urban Trees using Root-Plate Inclination in High Winds*. Arboriculture & Urban Forestry 44(1):1–11.
10. Green D.W., Winandy J.E., Kretschmann D.E. 1999. *Wood handbook – Wood as an engineering material. – Mechanical Properties of Wood*. Forest Products Laboratory. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
11. James K.R., Grabosky J., Dahle G., Kane B.C. 2014. *Tree Biomechanics Literature Review*. Dynamics Arboriculture & Urban Forestry 40(1).
12. James K.R., Haritos N., Addes P.K. 2006. *Mechanical stability of trees under dynamic loads*. American Journal of Botany 93(10):1361–1369.
13. Jones H.G. 1983. *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Cambridge University Press, Cambridge.
14. Niklas K.J. 1992. *Plant Biomechanics (An Engineering Approach to Plant Form and Function)*, University of Chicago Press.
15. Mattheck C. 2007. *Aktualisierte Feldanleitung für Baumkontrol-len mit Visual Tree Assessment*.
16. Moore J.R., Maguire D.A. 2004. *Natural sway frequencies and damping ratios of trees: Concepts, review and synthesis of previous studies*, Trees 18:195–203.
17. Peltola H. 1990. *Model computations on the critical windspeed for windthrow and stem breakage of Scots pine*. University of Joensuu Thesis for Licentiate Degree in Forest Sciences.
18. Sellier D., Fourcaud T. 2009. *Crown structure and wood properties: Influence on tree sway and response to high winds*. American Journal of Botany 96:885–896.
19. Sinn G. 1983. *Standesicherheit von Parkbäumen*. Das Gartenamt, Heft 3, März S. 161–164.
20. Sinn G., Wessolly L. 1989. *A contribution to the proper assessment of the strength and stability of trees*. Arboriculture Journal 13(1):45–65.
21. Strogatz S.H. 2014. *Nonlinear Dynamics and Chaos (Studies in Nonlinearity)*. 2<sup>nd</sup> ed., CRC Press, ISBN 13: 9780813349107.
22. Wessolly L., Erb M. 2016. *Tree Static and Tree Inspection*, Patzer Verlag, Berlin.
23. Wessolly L. 1991. *Verfahren zur Bestimmung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen* [Methods for determining the safety against uprooting and stem fracture]. Holz Roh- Werkst. 49:99–104.

<http://www.pbs.org/time-team/experience-archaeology/dendrochronology/>

<http://www.rinntech.de/content/view/33/54/lang,english/index.html>

<https://dendro.cornell.edu/whatisdendro.php>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Dendrochronology>

<https://lrr.arizona.edu/about/treerings>

<https://troweltales.com/2019/02/15/put-a-ring-on-it-a-brief-overview-of-dendrochronology/>

[https://www.academia.edu/4908891/Dendrokronol%C3%B3giai\\_kutat%C3%A1sok\\_Erd%C3%A9lyben](https://www.academia.edu/4908891/Dendrokronol%C3%B3giai_kutat%C3%A1sok_Erd%C3%A9lyben)

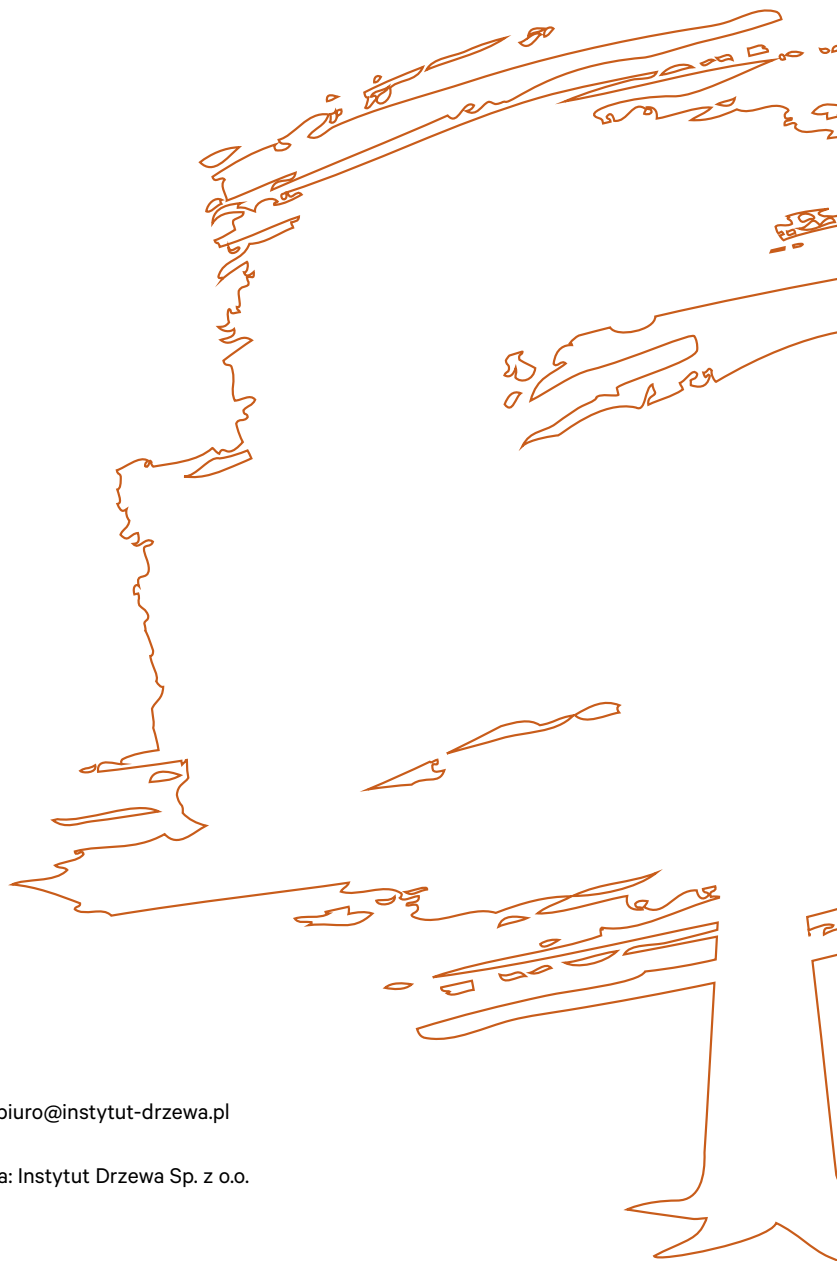
<https://www.environmentalscience.org/dendrochronology-tree-rings-tell-us>

<https://www.thoughtco.com/dendrochronology-tree-rings-170704>

<https://www.youtube.com/watch?v=-Vfg4GieRTc>



Partnerstwo na rzecz rozwoju standardów szkoleń diagnostów drzew w Europie środkowo-wschodniej.  
Numer Projektu – 2019-1-PL01-KA202-065670



Instytut Drzewa sp. z o.o.  
[www.instytut-drzewa.pl](http://www.instytut-drzewa.pl)  
tel.: 789-032-424, e-mail: [biuro@instytut-drzewa.pl](mailto:biuro@instytut-drzewa.pl)

© Copyright wersja polska: Instytut Drzewa Sp. z o.o.  
Wrocław 2021

ISBN 978-83-67265-03-4

Projekt realizowany przy wsparciu finansowym Komisji Europejskiej w ramach Programu Erasmus+:  
Partnerstwa strategiczne w obszarze edukacji i kształcenia zawodowego