

Project: Partnership for the development of training standards for tree assessors in Central and Eastern Europe  
PROJECT NUMBER – 2019-1-PL01-KA202-065670



"TREE  
ASSESSOR"  
Favizsgáló

## Haladó műszeres favizsgálatok

Haladó faápolás és favizsgálat –  
kézikönyv szakemberek számára

# "TREE ASSESSOR"

## Favizsgáló

Haladó faápolás és favizsgálat – kézikönyv szakemberek számára  
Haladó műszeres favizsgálatok

### INFORMÁCIÓK A PROJEKTRŐL:

#### A Projekt neve és száma:

Partnership for the development of training standards for tree assessors in Central and Eastern Europe. 2019-1-PL01-KA202-065670

#### A projekt megvalósításának ideje:

1.09.2019 – 31.12.2021

#### A projekt vezetője:

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

#### A projekt partnerei:

Instytut Drzewa sp. z o.o. (PL., a Firma Ekorozwoju sp. z o.o. helyett),  
Latvian Arboriculture Society (LV),  
FAKOPP Enterprise Bt. (HU).

Jelen publikáció létrejöttét az Erasmus + program keretein belül az Európai Bizottság támogatta. A publikáció csupán a szerzők véleményét tartalmazza. Az Európai Bizottság e kiadvány elkészítéséhez nyújtott támogatása nem jelenti a tartalom jóváhagyását, amely csak a szerzők véleményét tükrözi, és a Bizottság nem tehető felelőssé az abban szereplő információk bármilyen felhasználásáért. Az esetleges (fordítási) hibákért sem a szerzők, sem a Bizottság nem felelős.

**Szerkesztő:** Buza Ágnes Kinga

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

**Közreműködők:** Beata Pachnawska, Jerzy Stolarczyk, Piotr Tyszko-Chmielowiec, Kamil Witkoś-Gnach, Anna Pszkit, Andris Spaile, Szaller Vilmos, Németh Kristóf, Ócsvár Gábor, Markovits István

**Fotók:** Buza Ágnes Kinga, Divós Ferenc, Bejő László, Jaroslav Kolařík, Fakopp fotó archívum, EKO-TREK fotó archívum, a különböző gyártók fotói – a kép után jelölt forrásból, engedéllyel használva

**Kompozíció és grafikai tervezés:** Marta Płonka

Dobre Kadry. Research and Training Centre Ltd.

Jęczmienna Street 10/1, 53-507 Wrocław

Phone: +48 71 343 77 73, +48 71 343 77 74, fax: +48 71 343 77 72



Creative Commons License

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

Wrocław 2021



**“TREE  
ASSESSOR”  
Favizsgáló**

# **Haladó műszeres favizsgálatok**

Haladó faápolás és favizsgálat –  
kézikönyv szakemberek számára

A projektet az Erasmus + program keretein belül az Európai Bizottság támogatta  
Stratégiai partnerség az oktatás és a szakképzés területén



## Tartalomjegyzék

<b>MŰSZERES FAVIZSGÁLAT .....</b>	<b>8</b>
<b>I. A FÁK BIOMECHANIKÁJA – HALADÓ SZINTEN .....</b>	<b>10</b>
1. Alapok, alapelvek .....	11
a. Biztonsági tényező (Safety Factor, SF) .....	11
b. Ellenállási tényező (ellenállási koeficiens vagy aerodinamikai, vagy közegellenállás) .....	12
c. A fa önsúlya .....	13
2. A számításhoz használt adatok és fizikai mennyiségek .....	14
a. A fa adatai, ideértve a mérések során szerzeteket is .....	14
b. A szélre vonatkozó, a számítások során használt adatok .....	15
c. A EUROCODE előírása szerinti szélteher és a térség kategóriák .....	15
3. Szélteher .....	16
a. A másodrendű nyomaték, inercia .....	17
4. Önsúly – tömeg és dőlés .....	17



5. A mért adatok és következtetések .....	19
a. A tomográfiából származó adatok .....	19
b. A húzóvizsgálat során nyert adatok .....	19
c. A dinamikus mérésből származó adatok .....	21
d. Táblázatból származó fa és nedves faanyag tulajdonságok .....	22
6. Más feszültségek – nyírási és növekedési feszültségek .....	23
7. A biztonsági tényező kiszámítása, egyenletei .....	24
Fizikai mennyiségek .....	32
Egyenletek .....	32
<b>II. MŰSZERES FAVIZSGÁLAT: KORHADÁS DETEKTÁLÁSA .....</b>	<b>34</b>
1. Pressler-fúró és fraktométer .....	35
2. Fúrásellenállás mérések .....	35
3. Akusztikus és ultrahang jelek faanyagban, egy vonalmenti akusztikus mérések .....	37
4. Akusztikus tomográfia .....	39
5. Elektromos impedancia tomográfia .....	45
6. Átlalók .....	47
7. Más lehetőségek korhadások érzékelésére .....	48
MŰSZERES VIZSGÁLATOK: KORHADÁS – ESETTANULMÁNYOK .....	49
1. Akusztikus tomográfia, 7 éven át .....	49
2. Nagy (350 cm feletti kerületű) fák mérése .....	50
3. Hatalmas, korhadt fák (kerület 400 cm felett) .....	52
4. Tomogramok egy villa alatt .....	53
5. Részben fagyott törzs .....	54
6. Miért ne koppintsunk a tollunkkal? .....	56
7. Egy sebzési reakció vizsgálata .....	58
8. Egy parkoló béli fa biztonságossága .....	58
9. Az akusztikus és impedancia tomográfia összehasonlítása .....	59
10. Transzport aktivitási mérés – az impedancia tomográfia egy kísérleti alkalmazása .....	61
MŰSZERES MÉRÉSEK – A KORHADÁS DETEKTÁLÁSÁNAK HATÁRAI .....	62
MŰSZERES MÉRÉSEK – A HASZNÁLAT ELŐNYEI .....	62
<b>III. MŰSZERES VIZSGÁLAT: ÁLLÉKONYSÁG .....</b>	<b>64</b>
1. A fák állékonyságáról általában .....	64
2. A húzóvizsgálat .....	65
a. Eszközök .....	65
b. A vizsgálat menete .....	70
c. Az eredmények értékelése .....	77
d. A húzóvizsgálat előnyei és limitációi .....	80
3. A dinamikus vizsgálat .....	81
a. Eszközök .....	84
b. A mérés menete .....	87
c. Az eredmények értékelése .....	88

d.	A dinamikus vizsgálat megbízhatóságát befolyásoló tényezők .....	89
e.	A dinamikus mérés előnyei és limitációi .....	91
f.	A dinamikus teszt megbízhatósága .....	92
4.	A fák állékonyságát befolyásoló tényezők .....	94
a.	Lombozat .....	94
b.	Csapadék .....	95
c.	Fagyott talaj .....	95
d.	Szezonális változások .....	96
d.	A mérés iránya .....	96
<b>VI.</b>	<b>GYÖKÉRKERESÉSI MÓDSZEREK – MŰSZERES, RONCSOLÁSMENTES</b>	
	<b>LEHETŐSÉGEK .....</b>	<b>98</b>
1.	Szűrőbotos Talajszonda .....	98
2.	Akusztikus módszerek .....	99
3.	Georadar .....	102
4.	Elektromos ellenállás tomográfia (ERT) .....	105
5.	Esettanulmányok .....	107
5.1.	Gyökérzet feltérképezése és feltárásának összehasonlítása .....	107
5.2.	Van-e a gyökérzet elhelyezkedésének kapcsolata a stabilitással? .....	108
<b>V.</b>	<b>TÁVOLSÁGI, MŰSZERES FAFELMÉRÉSEK .....</b>	<b>111</b>
1.	Bevezetés .....	111
2.	Helymeghatározás .....	112
3.	Kép feldolgozás .....	114
4.	Színkép elemzés .....	114
5.	Neurális hálók és mesterséges intelligencia .....	115
6.	LiDAR .....	115
7.	Drónok .....	116
<b>VI.</b>	<b>DENDROKRONOLÓGIA .....</b>	<b>119</b>
1.	Történet és alapelvek .....	119
2.	Átfedés és mester kronológia .....	120
3.	Mintavételezés és felhasználás .....	121
	<b>FELHASZNÁLT ÉS AJÁNLOTT IRODALOM .....</b>	<b>124</b>





## Műszeres favizsgálat

A tomográfia és a húzóvizsgálat a két legelterjedtebb haladó műszeres vizsgálat a favizsgálatban. Évtizedek óta használják őket Japántól Spanyolországig, Kolumbiától Németorszáig, Nagy-Britanniától Ausztráliáig, és természetesen Lengyelországban és Magyarországon is.

Mielőtt belevágnánk a következő, információdús fejezetekbe, engedjétek meg, hogy arra emlékeztessem az olvasókat, hogy ezek mind-mind eszközök csupán, melyek akkor hasznosak, ha a céljukra használjuk őket.

Néhány évvel ezelőtt igencsak megfájdult a fogam. Elmentem a fogászhoz, aki panoráma röntgenre küldött. Nem utalt be vérvételre,

vagy PET-CT-re, annak ellenére, hogy ezek is kiváló diagnosztikai eszközök.

A fogorvos képes volt kiválasztani a megfelelő eszközt, meg is találta a problémát. Igaz, hogy már körülbelül négy évtizede praktizált, korábban csupán egyszer látott ehhez hasonlót. Specialistához küldött, aki sikeresen ellátott, az eredmény "happy end".

Az akusztikus mérések, a dinamikus tesztek,... kiváló eszközök, de tudnunk kell kiválasztani a megfelelőt. Nincs közöttük egyetlen olyan, amely minden esetben jó választás, a különböző esetek más és más megközelítést és vizsgálatot igényelnek.



Békefi-Buza Ágnes Kinga, PhD  
Szerkesztő







# I.

## *A fák biomechanikája – haladó szinten*

A fák biomechanikája egy igazán széles, sokak által, többféle szempontból kutatott tudományterület, mely a fák szélben való viselkedésének modellezésétől, a hajlításra adott válaszokon át a faanyag tulajdonságainak alakulásáig, és ezen felül is még számos területet ölel fel.

Néhány szakértő a „fák és szél” témára egyszerűsíti a területet, így emelve ki az egyik fő kérdéskört. Valóban, megérteni, és előre jelezni egy fa viselkedését (biztonságosságát) mondjuk egy szélvihar közben, az egyik legfontosabb gyakorlati kérdés, hiszen törekednünk kell a fák miatt bekövetkező sérülések, károk kockázatának minimalizálására.

A fák nem sétálhatnak el, ott nőnek, ahol kibújtak a földből, vagy ahová ültették őket, alkalmazkodniuk kell a körülményeikhez. A különböző „kihívásokra” vagy növekedéssel, a helyzetnek megfelelő struktúra kialakításával, vagy hajlítással, dőléssel, az ágak lengedezésével tudnak válaszolni.

A gyakorlat során hasznos alapinformációkat (pl. fabiológia) az alapfokú favizsgálati tankönyvek tartalmazzák, míg a terepen történő mérések során használt műszereket a Műszeres vizsgálat: állékonyosság és a Műszeres favizsgálat: korhadás detektálása fejezetek mutatják be. Jelen részben azokra a fizikai alapelvekre, definíciókra és számításokra helyezzük a hangsúlyt, melyek megértése segíti a megfelelő módszerek kiválasztását, használatát és a kapott eredmények értelmezését.

Még ha a téma száraznak tűnik is, a fő szempont az, hogy a fejezet tartalma segítse a gyakorló szakembereket, hiszen, ha jobban megértjük a hátteret, az alapelveket, jobban tudjuk használni

a műszereket, hamarabb kiszúrhatjuk, ha valami hibádzik, és könnyebben összefoglalhatjuk a tudnivalókat a nem szakmabeliek számára is. Fejezetünk fő kérdése az, hogy biztonságos-e a fa. Hogyan tudjuk megválaszolni ezt a kérdést? A biztonsági tényezők és terhek (szélteher, a fa önsúlyának megtartása, dőlésből adódó terhelés,...) számításai, a számítási modellek és az alapvető fizikai fogalmak segítenek ebben. A statikus húzóvizsgálat alapelvei és eredményként kapott adatainak értelmezése is önálló alfejezetet kapott, ahogy az új, és egyre inkább teret nyitó dinamikus „húzóvizsgálat” hátterét és a mérés használhatóságát is saját alfejezet ismerteti meg az olvasóval.

A fejezetet a használt mennyiségek és egyenletek összefoglalása zárja (munkánk segítségével, ha csak egy gyors felelevenítésre van szükség).

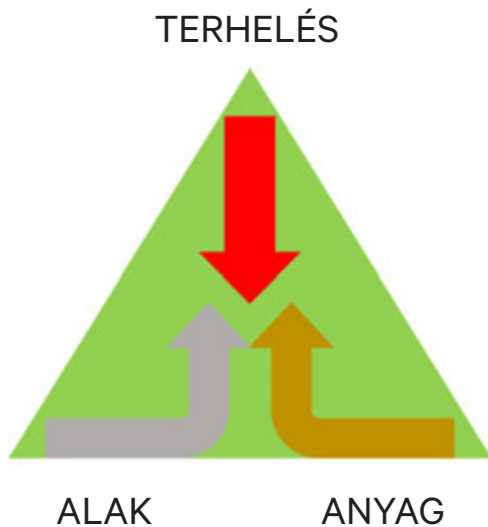




## 1. ALAPOK, ALAPELVEK

A fák biomechanikáját évtizedek óta kutatják, a német Wessolly, Erb, vagy Mattheck neve ismerősen csenghet a témával foglalkozóknak, hiszen több, átfogó, és többnyire jól illusztrált könyv szerzői.

A teherbírás alapkoncepcióját talán a legjobban a Wessolly-féle „statikai háromszög” illusztrálja. Ezen látható, hogy egy fa kétféleképpen tarthatja meg a rá nehezedő terheket. Egyrészt, a faanyag tulajdonságai segítségével, másrészt alakjával, szerkezetével. (Látsd 1.1. ábra)



1.1. ábra:

A „statikai háromszög” (Wessolly és Erb 2016-os könyve nyomán), forrás: saját rajz

Annak számszerűsítésére, hogy az alaki és anyagi tulajdonságokból származó teherbírás hogyan viszonyul a becsült terheléshez, vezették be a biztonsági tényező (Safety Factor, SF) fogalmát. Ezen kívül, a későbbi számítások megértését segítő, a fejezet az ellenállástényezőt és a fa önsúlyának egy számítási módját is bemutatja.

### A. BIZTONSÁGI TÉNYEZŐ (SAFETY FACTOR, SF)

A biztonsági tényező egy szám, vagy egy százalék, mely a becsült teherbírás és a becsült terhelés aránya (pl. 3,12 vagy 312%). Egy egyszerű egyenlet írja le (bár megjegyzendő, hogy a mind a teherbírás, mind a terhelés kiszámítása bonyolult lehet).

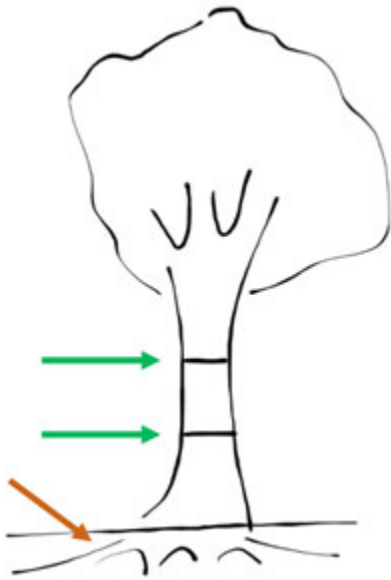
$$SF = (\text{teherbíró képesség}) / (\text{össz. terhelés})$$

Figyeljünk arra, hogy a biztonsági tényező 1-nél, vagy 100%-nál nagyobb lehet, sőt, egy egészséges fa esetében nagyobb is. Mivel ez egy arány, így a 100% vagy éppen a 150% nem jelenti azt, hogy a fa biztosan nem törik el vagy fordul ki a következő viharban.

A számolás során történő becslések miatt általában 150% vagy 200% fölötti biztonsági tényező esetén tarjuk biztonságosnak a fát (adott szél és egyéb körülmények mellett). Természetesen lehetséges egy teljes fa, annak teljes koronájának modellezése, de ez jelenleg még nem része a napi gyakorlatnak, és még a legpontosabb modell is csak becsülni tudja a fa anyagának tulajdonságait.

A biztonsági tényező mértékegység nélküli mennyiség, mivel egy arány. Ez azt is jelenti, hogy csak két azonos mértékegységű mennyiségből képezhető (vagyis nem jöhet létre például egy erő és egy nyomaték hányadosaként – ennek a számolás során lesz jelentősége, emiatt kell a szél terhelését többféleképpen számolni, hozzáigazítva a megfelelő anyagi tulajdonsághoz).

A biztonsági tényező a törzs egy-egy rétegeire vagy a gyökérzetre vonatkozhat. Mivel valamilyen mérés (pl. húzóvizsgálat, tomográfia, stb.) során szerzett információk alapulnak, így csak és kizárólag a mért rész(ek)re vonatkozhatnak. Nincs olyan, hogy „az egész fa biztonsági tényezője”, a gyökérzet biztonsági tényezője a gyökerestől való kifordulásra vonatkozik, míg



1.2. ábra:

A biztonsági tényező a törzs egy rétegére (zöld nyílak), vagy a gyökérzetre (barna nyíl) vonatkozhat

a törzs réteginek biztonsági tényezője a törzs adott szinten való kettétörésére. Ha bármilyen okból az egész fát kell jellemezni, akkor a rendelkezésre állók közül a legkisebb biztonsági tényezőt kell használni. A favizsgáló felelős azért, hogy a vizuális értékelés után, ha szükséges további mérés, akkor az a kritikus részeken, magasságokban történjen.

A mai napig nincs „ág biztonsági tényező”, mivel viharok során az ágak akár kifejezetten nagy amplitúdóval is mozoghatnak, egy egészséges, korhadásmentes ág is leszakadhat annak érdekében, hogy a fa így csökkentse a törzsre nehezedő terhelést.

Amikor szeles helyzeteket elemeznek, általában a szél sebessége fontos tényező a terhelés számításában. Ezért fontos kiemelni, hogy a biztonsági tényező mindig egy adott szélességhez tartozik, és csökken, ha a szélesség emelkedik. A megfelelő, várható, maximális szélesség beállítása kritikus. (Például, ha egy mérés után 120 km/órás szelet állítva be

3,1-es biztonsági tényezőt kapunk, sajnos egy gyorsabb, mondjuk 160 km/órás széllelés esetén lehet, hogy már csak 1,7-es értéket számolunk ugyanarra a fára.)

A biztonsági tényező értelmezése során általában három kategóriát különböztetünk meg. A magas kockázatú helyzeteket, – 1, vagy 100% alatti értékek – ekkor a számolt teher nagyobb, mint a becsült teherbírás, így a törésnek, kifordulásnak komoly esélye van. Az 1 és 1,5 (vagy akár 2), másképpen 100% és 150% (akár 200%-ig) eső értékek a „szürke zónát” jelentik, mely általában valamilyen megelőző tevékenységet igényel (pl. koronaterület csökkentés, stb.). Az 1,5 (2), illetve 150% (200%) feletti értékek általában alacsony kockázatot jelentenek.

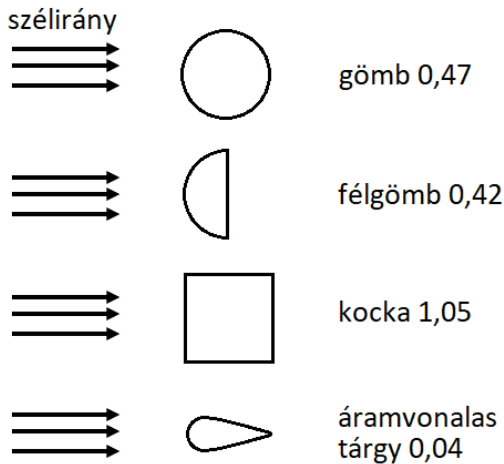
Érdekes tudunk róla, hogy (kb. másfél évtizedes tapasztalatok alapján) az egészséges fák gyökérzetére és törzsének rétegeire vonatkozó biztonsági tényezők általában egymáshoz közeli, 300% körüli, fölötti értéket szoktak adni (120 km/órás szél esetén). Az egészséges fák egyenletesen erősítik önmagukat.

## B. ELLENÁLLÁSI TÉNYEZŐ (ELLENÁLLÁSI KOEFFICIENS VAGY AERODINAMIKAI, VAGY KÖZEGELLENÁLLÁS)

A közegellenállást többféleképpen lehet megközelíteni, melyek közül az egyiket, az áramló közegben (akár szélben) fixen álló tárgy esetét fogjuk használni. (Egy másik eset, amikor egy közegben halad egy tárgy.)

Mivel a fák biztonságossága a kérdés, így azzal a feltételezéssel élünk, hogy a fa egyhelyben áll, és csak annyit mozdul, amennyire a széllelések billentik, hajlítják, stb.

Így nézve, az ellenállási tényező azt mutatja meg, hogy a haladó közeg milyen mértékben hat a közegben lévő tárgyra. Az 1.3. ábrán látható néhány példa. (Természetesen nem az alak az egyetlen, az ellenállási tényezőt befolyásoló



1.3. ábra:

Néhány példa ellenállás tényezőre

tulajdonság. Az áramlás sebessége, a közeg tulajdonságai, a tárgy felszínének tulajdonságai, stb. is ilyenek.)

(Az angol nyelvű favizsgálati irodalomban Wessolly nyomán a „drag factor” kifejezés is használatos a „drag coefficient” helyett.)

Fákra vonatkozó ellenállási tényezőket Wessolly és Erb munkája folytán találunk, a „stuttgarti” táblázatban, mely 45 fafaj ellenállási tényezőit

tartalmazza. Ebből láthatjuk azt is, hogy a mért fafajok ellenállási tényezői 0,12 és 0,3 közötti értékek, azonban a fák nagyobb részénél egy jóval kisebb intervallumba estek (0,2 és 0,25 közé).

(A „stuttgarti” táblázat a fejezet végén található meg.)

Általában ezekből az értékekből indulnak ki a biztonságossági számítások során. Az ellenállási tényező egy szorzó a szélteher becslésében.

### C. A FA ÖNSÚLYA

Nyilvánvaló, hogy egy nem veszélyes fának meg kell tartania a saját tömegét, súlyát. Ebben az alfejezetben a fa egy adott szint feletti tömegéről fogunk beszélni (a gyökérzet tömege nem része ennek a témának).

Mivel a fák alakja, mérete nagyon különböző lehet, kifejezetten időigényes (nem feltétlenül szükséges) lenne, ha ténylegesen minden levél, ág, és a törzs tömegét mérnénk. Ezért egy egyszerűbb, közelítő modellel fogunk dolgozni. Ez a modell az esetek többségében 5-15%-kal felül becsüli a tömeget. (Biztonságosság szempontjából a terhek némi túlbecslése és így a



biztonságosság bizonyos mértékű alul becslése történik.)

A fa modellje egy homogén rúd, mely ugyanolyan sűrűségű és magasságú, mint a fa. A rúd átmérője állandó, a fa mellmagassági (DBH) átmérőjével azonos („Diameter at breast height”, ami az 1,3 m-es, „mell” magasságban mért átmérő).

$$m_{fa} = \rho_{fa} \cdot H \cdot D_{1.3}^2 \cdot \pi / 4$$

$m_{fa}$  – a fa tömege (kg)

$\rho_{fa}$  – a nedves, zöld fa sűrűsége (kg/m<sup>3</sup>)

H – a fa magassága (m)

$D_{1.3}$  – a mellmagassági átmérő (m)

Érdeemes tudnunk róla, hogy a szélteher általában 10-szer, 20-szor akkora, mint az önsúlyból adódó teher. Így a tömeg túlbecslése az összterhelést általában kevesebb, mint 1%-kal növeli csupán.

## 2. A SZÁMÍTÁSHOZ HASZNÁLT ADATOK ÉS FIZIKAI MENNYISÉGEK

### A. A FA ADATAI, IDEÉRTVE A MÉRÉSEK SORÁN SZERZETTEKET IS

A vizsgálat tárgyától (törzs vagy gyökérzet) és a használt eszköztől (tomográfia, húzó- vagy dinamikus vizsgálat) függően, különböző adatokat kell gyűjtenünk a biztonságosság becsléséhez. Először nézzük, mely adatok szükségesek, ha a törzs biztonságosságára vagyunk kíváncsiak és tomográfiával mértünk. Ebben az esetben a fa magassága, átmérője, a korona terület és a korona közép magassága, valamint a tomográfiai mérés(ek) magassága(i), illetve, ha a törzs nem egyenesen áll, akkor a dőlés szöge és iránya. A zöld faanyag sűrűsége, illetve más tulajdonságai, mint a szilárdság, a faanyagbeli hangsebesség, vagy éppen a fára vonatkozó ellenállási tényező a fafajra jellemzőek. Ezen tulajdonságok terepen történő megmérése meglehetősen idő- és

eszközigényes lenne, így azzal egyszerűsíthetjük a munkánkat, ha táblázatokból vesszük ezeket az adatokat. Ebben az esetben (is) nagyon fontos a faj faj pontos felismerése.

A húzóvizsgálat mind a törzs, mind a gyökérzet felmérésére használható. Mindkét esetben szükséges adat a kötél megkötésének magassága a vizsgált fán, a kötél szöge (vagy a horgonyzásra használt tereptárgy távolsága a vizsgált fától), a korona területe és a korona közepének magassága. Továbbá természetesen, a vizsgálat során kifejtett erő és a törzs talajszinten (vagy ahhoz a lehető legközelebb) történt dőlése, és/vagy a törzs megnyúlása adott magasságban (és ez a magasság is). Ha csak a gyökérzet biztonságosságára vagyunk kíváncsiak, ennyi adat elég (a megnyúlás nem kell). Ha a törzsre vonatkozóan szeretnénk számításokat végezni, akkor viszont a faj is szükséges a megfelelő rugalmassági határ kiválasztásához.

A korona területe és középpontja becsülhető közelítő táblázatok, vagy fénykép segítségével is, ez utóbbi esetben fontos a megfelelő terület kijelölése. A fénykép készülhet a fa lombtalan állapotában is, de fontos, hogy a korona teljes területe látható legyen rajta, legyen kijelölhető a képen.

A dinamikus mérések nagy előnye, hogy valódi szélben mérnek. Emiatt, hogy a fát, ahogy, ahol áll, dől és hajlik, és a valós szellőkések sebességét mérik, kevesebb külön is mérendő/becsülendő adatra van szükségünk a kritikus (a fát kidöntő vagy eltörő) szél becsléséhez. Ha a gyökérzet biztonságosságát kell becsülni, akkor a szélesebességeken kívül csak a gyökérnyak dőlési adataira van szükség. A fa magassága, a korona területe, de még a faj sem szerepel a számításokban, mert maga a fa (és környezete) volt mérve, mindenféle közelítés, feltételezés nélkül. Ha a törzs biztonságossága a kérdés, a szélesebességen kívül, a megnyúlás adatok és a faj (a rugalmassági határ miatt) ismerete elengedhetetlen.





1.4. ábra:

A helyesen kijelölt korona terület

Fontos azonban tudunk, hogy különböző szoftverek más és más adatokat is kérhetnek, attól függően, hogy pontosan hogyan végzik a számításokat.

Ha törzs felhasadása is előfordulhat, akkor a nyírószilárdsági adatok is szükségesek a számításokhoz, ahogy a pontos geometria és a faanyag sűrűsége is (valamint természetesen a becsült szélteher).

## B. A SZÉLRE VONATKOZÓ, A SZÁMÍTÁSOK SORÁN HASZNÁLT ADATOK

A biztonságossági számítások általában valamilyen szél adatot is tartalmaznak. Ez a legtöbb esetben egy szélsébség, amit km/órában

vagy m/s-ban kell megadni. A korábbi magyar standard 120 km/órát (33 m/s-ot) javasol.

A hőmérséklet a szélterhen keresztül hat a biztonságosságra, hiszen változásával változik a levegő sűrűsége.

## C. A EUROCODE ELŐÍRÁSA SZERINTI SZÉLTEHER ÉS A TÉRSÉG KATEGÓRIÁK

A szélterhek EUROCODE szerinti számítási módjának teljes részletességgel történő bemutatása túlmutat a fejezet tartalmán, de érdemes lehet ismernünk a számítás alapelveit.

A EUROCODE EN 1991 a tárgyakat maximum hat sávra osztja (hogy pontosan hányra, ez a tárgy magasságától és az adott terület besorolásától függ), a sávokra terheléseket számít, majd ezeket összegzi, mint szélterhelés.

Maga a szélsébség különböző a különböző sávokban, de elég megadnunk az úgynevezett „alap szélsébséget”, a modell ebből számítja ki a megfelelő értékeket. (Az alap szélsébségeket a standard területenként adja meg, Magyarországon többnyire 26 m/s-t ír elő, míg például Lengyelországban, régiótól függően 20 m/s és 30 m/s közötti értékeket ad meg.)

A térség kategóriák az adott területen lévő tereptárgyak magasságára, szélárnyékoló képességére utalnak. A kategóriák: tengerpart (itt semmilyen szélárnyék nincs, a szél teljes energiája eléri az itt álló tárgyat), tópart (itt nagyon kicsiny árnyékolás történik csak), mezőgazdaság (ebben az esetben ritkán fák, növények, alacsony épületek vannak a területen), falu (a környező épületeknek hála legalább részben és bizonyos magasságig szélárnyékban áll a fa) és város (ahol már egészen magasan épületek is lehetnek a környéken).

A számolás konstansai a térség kategóriáktól függenek, a tengerparti teljes teher csökken, ahogy egyre városiasabb a környezet. Néhány szoftver (mint például az ArborSonic, a 5.3.118-as

verzió óta) EUROCODE EN 1991 szerinti számításokat is tartalmaz.

Érdekes tudnunk róla, hogy a következő fejezetben bemutatott szélteher számítás általában nagyobb terhet ad eredményül, mint az EN 1991, ha a fa 26 méternél alacsonyabb, és valamivel a EUROCODE-nál kisebb terhet számolhatunk vele, ha a fa magasabb, mint 26 méter.



### 3. SZÉLTEHER

A fákkal kapcsolatban a '80-as évek óta használják, az áramlástanból vett (a valós helyzetet némileg egyszerűsítő), közelítő szélteher számítást (Jones, 1983; Lajos Tamás: Az Áramlástan Alapjai, 1992), ahol a következő egyenlet írja le a szélterőt:

$$F_{szél} = 0,5 \rho_{levegő} c_{fafaj} A_{korona} v_{szél}^2$$

$\rho_{levegő}$  – levegő sűrűsége (a hőmérséklettől függ, de általában 1,2 kg/m<sup>3</sup>-t használnak)

$c_{fafaj}$  – faj faj függő ellenállási tényező (nincs mértékegysége)

$A_{korona}$  – korona szélnek kitett felülete (m<sup>2</sup>)

$v_{szél}$  – szélesebesség (m/s)

Fontos észben tartanunk, hogy a levegő sűrűsége a földrajzi és a topográfiai helyzettől, valamint a szezonális és meteorológiai hatásoktól is függ.

Hogyan használjuk a szélterőt a biztonsági számításokhoz?

A különböző számítások más-más módon használják fel ezt az erőt. Húzóvizsgálatnál a szél forgatónyomatékára van szükség, míg tomográfiaánál hajlító feszültséget kell kiszámolnunk, ha pedig dinamikus vizsgálat történt, akkor a szélnyomást fogjuk tudni használni.

A szél forgatónyomatéka:

$$M_{szél} = F_{szél} h_{kk}$$

$h_{kk}$  – korona középpontjának magassága (m)

A szél által létrehozott, a törzs alján mért hajlító feszültség:

$$\sigma_{szél} = M_{szél} (z/l_m)$$

$z$  – a semleges tengelytől mért távolság (ez az a tengely, ahol a hajlítás során nincs feszültség) (m)

$l_m$  – az adott magasságbeli inercia, másodrendű nyomaték (m<sup>4</sup>) (bővebben az a) alfejezetben)

Mivel a tomográfiaát általában más magasságokban is használják, nem csak talajszinten, ezért egy lépést „vissza” kell lépnünk a forgatónyomaték definíciójához (erő szorozva magassággal), így kapjuk azt az egyenletet, ami alapján más magasságban is számolhatunk:

$$\sigma_{szél} = F_{szél} (h_{kk} - h_{réteg}) (z/l_m)$$

$h_{réteg}$  – a vizsgált réteg magassága (m)

A dinamikus vizsgálatok során használt szélnyomás:

$$p_{szél} = F_{szél} / (c_{fafaj} A_{korona}) = 0,5 \rho_{levegő} v_{szél}^2$$

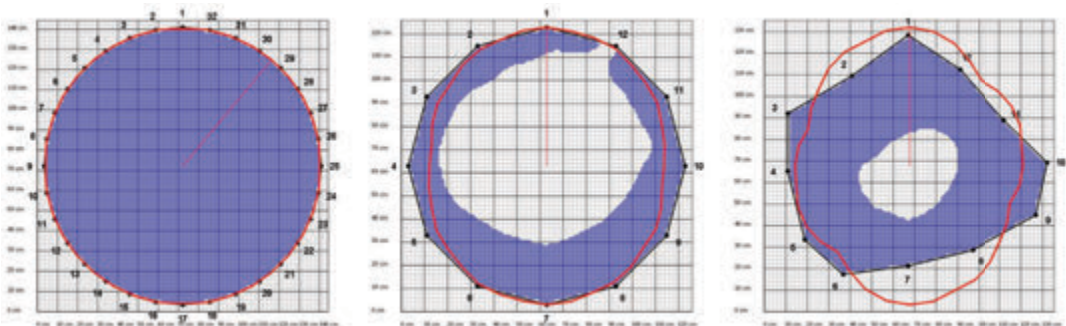


## A. A MÁSODRENDŰ NYOMATÉK, INERCIA

A másodrendű nyomaték vagy inercia (nyomaték) azt adja vissza, hogy egy két dimenziós alak, terület mennyire áll ellen a hajlításnak. A következő egyenlettel számolható:

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

Ha a keresztmetszet kör alakú, akkor az integrál értéke  $(\pi d^4) / 64$ , ahol a  $d$  a kör átmérője, egyéb esetekben érdemes valamilyen programot használnunk az inercia kiszámításához. Így nem csak felgyorsul a számítás, de akár több irányba is kiszámítható az inercia, és láthatóvá válik, a terhelés irányfüggése (nem kör keresztmetszetű törzseknél, vagy nem kör alakú korhadás, vagy nem egyenesen álló törzs esetén; hiszen maga az inercia is irányfüggő ilyen esetekben). Néhány példa a terhelés irányfüggésére látható az 1.5. ábrán.



1.5. ábra:

A kék terület azt mutatja, hol ép a törzs az adott keresztmetszetben. A piros körvonal, a középtől való távolsága a terheléssel arányos, így adva vissza az irányfüggést. A középtől a körvonalig menő piros szakasz a leggyengébb irányt mutatja meg. Balra – kör keresztmetszetű, ép törzs; középen – kör keresztmetszetű, aszimmetrikusan korhadt törzs; jobbra – irreguláris törzs korhadással.

## 4. ÖNSÚLY – TÖMEG ÉS DŐLÉS

A fa tömege terhelést hoz létre, mivel tartani kell ezt a tömeget, dőlt törzs esetén pedig további terhelés keletkezik. Biztonsági szempontból egyik terheléstől sem tekinthetünk el. A törzs dőlése a teherbírás irányfüggését is befolyásolja. Az önsúlyból adódó nyomófeszültség, ép törzs esetén, adott magasságban:

$$\sigma_{\text{önsúly}} = m_{\text{fa}} g / A_{\text{törzs}}$$

$g$  – a gravitációs állandó (Magyarországon, általában  $9,81 \text{ m/s}^2$ )

$A_{\text{törzs}}$  – a törzs keresztmetszete ( $\text{m}^2$ )

Ha felidézünk, hogy  $m_{\text{fa}} = \rho_{\text{fa}} H D_{1.3}^2 \pi / 4$ , és ezt általánosabb formában írjuk, kör terület helyett a keresztmetszet területével, akkor a következő formulát kapjuk:

$$m_{\text{fa}} = A_{\text{törzs}} H \rho_{\text{fa}}$$

Ez még mindig egy kis átalakításra szorul.



$$\sigma_{\text{önsúly}} = (A_{\text{törzs}} (H-h_{\text{réteg}}) \rho_{\text{fa}} g) / A_{\text{törzs}}$$

majd,  $A_{\text{törzs-zsel}}$  egyszerűsítve:

$$\sigma_{\text{önsúly}} = (H-h_{\text{réteg}}) \rho_{\text{fa}} g$$

Ha a vizsgált magasságban, rétegben korhadás, üreg van jelen, akkor a teljes keresztmetszet és a valóban terhet hordó terület arányával (ez látható késsel az 1.6. ábrán) még meg kell szoroznunk a fenti egyenletet.

$$\sigma_{\text{önsúly_korhadt}} = (H-h_{\text{réteg}}) \rho_{\text{fa}} g (A_{\text{törzs}} / A_{\text{ép_rész}})$$

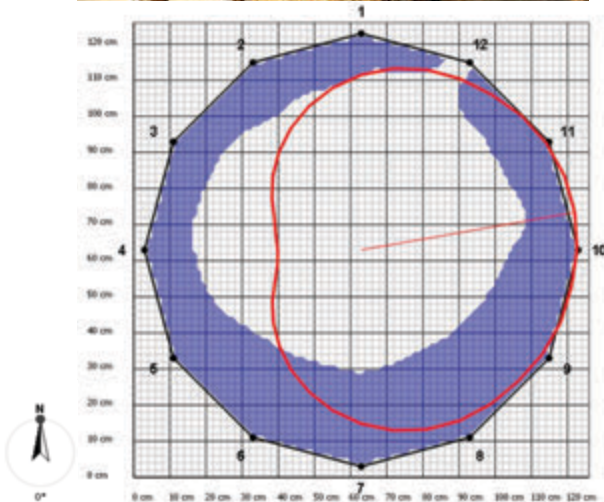
$A_{\text{ép_rész}}$  – a valóban terhet tartó, ép faanyag területe (m<sup>2</sup>)

Ha a törzs dől, a dőlésből fakadó hajlító feszültség

$$\sigma_{\text{hajlítás}} = (m_{\text{fa}} g h_{\text{kk}} \sin\alpha) (z / I_m)$$

$\sin\alpha$  – a törzs dőlési szöge a függőlegeshez képest

A terhek (szél, önsúly, dőlés) által keltett feszültségek összegződve adják ki azt a feszültséget, amit a faanyagoknak el kell viselnie, amit a törzs egyes rétegeinek képesnek kell lennie megtartani. A törzsre számolt biztonsági tényezőt az I. 7) fejezet ismerteti.



1.6. ábra:

Egy Keleti irányba dőlő platánfa, mely számára a nyugati szél jelenti a legnagyobb kockázatot

Hiszen nem a fa teljes tömegére vagyunk kíváncsiak jelen helyzetben, hanem csak a vizsgált réteg feletti tömegre, mivel a rétegeknek csak az önmaguk feletti részt kell megtartaniuk.

$$m_{\text{fa}} = A_{\text{törzs}} (H-h_{\text{réteg}}) \rho_{\text{fa}}$$

$h_{\text{réteg}}$  – a vizsgált réteg magassága (m)

Ezt behelyettesítve az önsúlyból adódó nyomófeszültségbe:



## 5. A MÉRT ADATOK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

Ebben a fejezetben bemutatjuk a megfelelő, roncsolásmentes eszközzel történt mérés során összegyűjtött adatokat, valamint azokat az adatokat, amelyeket a roncsolással járó vizsgálatok során mértek és különböző táblázatokban található meg. Mindkét féle adat szükséges a biztonsági számításokhoz.

### A A TOMOGRÁFIÁBÓL SZÁRMAZÓ ADATOK

A tomográfia során időket és távolságokat mérünk, melyből sebességeket, majd azokból a réteg egy két dimenziós képét számíthatjuk (részletesebben: Műszeres favizsgálat: korhadás detektálása fejezetben). Az így készült kép a tomogram, melyen jó közelítéssel látható, hogy hol van ép vagy korhadt faanyag, vagy éppen üreg.

A biztonsági számításokhoz használatos érték a tomogramból származik, ez az  $A_{\text{ép,rész}}$ , a keresztmetszet terheket hordozó része, vagy az  $A_{\text{törzs}}/A_{\text{ép,rész}}$ , mely a teljes keresztmetszet és az ép rész aránya. Ez utóbbival olyankor számolnak, amikor a keresztmetszet teljes területe sem triviális (szabálytalan alakú, általában ekkor már a keresztmetszet teljes területét is program számítja ki a felhelyezett érzékelők pozíciói alapján).

(Természetesen vannak olyan szoftverek, melyek számos, különböző adatot tárolnak a fa koordinátáitól a koronaterületéig, és akár a biztonsági becslést is kiszámolják.)

### B. A HÚZÓVIZSGÁLAT SORÁN NYERT ADATOK

Ahogy felállunk a húzóvizsgálathoz, a vizsgált fa és a horgonyzás közötti távolságot és a vizsgált

fán a kötélmegkötési magasságát kell felírunk, míg a mérés során az alkalmazott erőt, és a törzs aljának dőlését és/vagy a törzs egy szeletének megnyúlását.

A feladat az, hogy (a gyűjtött adatok alapján) megbecsüljük a fa gyökerestől való kifordításához, vagy a törzs kettétöréséhez szükséges erőt és forgatónyomatékokot. (A húzóvizsgálat kivitelezésével a Műszeres vizsgálat: állékonyság fejezet foglalkozik részletesen.)

Nézzük először a kifordulás esetét.

Ha grafikonon ábrázoljuk a húzóvizsgálat során gyűjtött dőlés és erő adatokat, a pontokra egy tangenciális függvényt illeszthetünk. (A valós mért adatok elő szűrésére is szükség lehet, ha a húzóerő nem egyenletesen emelkedik, vagy ha a fa meg-megdől, de relaxálódik is valamennyit a húzás után.)

$$\varphi_c = 0,333 \tan(1,35(F/F_{ki})) + 0,333(F/F_{ki})^2 - 0,1(F/F_{ki})$$

$\varphi_c$  – az illesztett dőlés (1.8. ábrán a lila görbe)

$F$  – a mért erő (N)

$F_{ki}$  – a fát gyökerestől már éppen kifordítani képes erő (N)

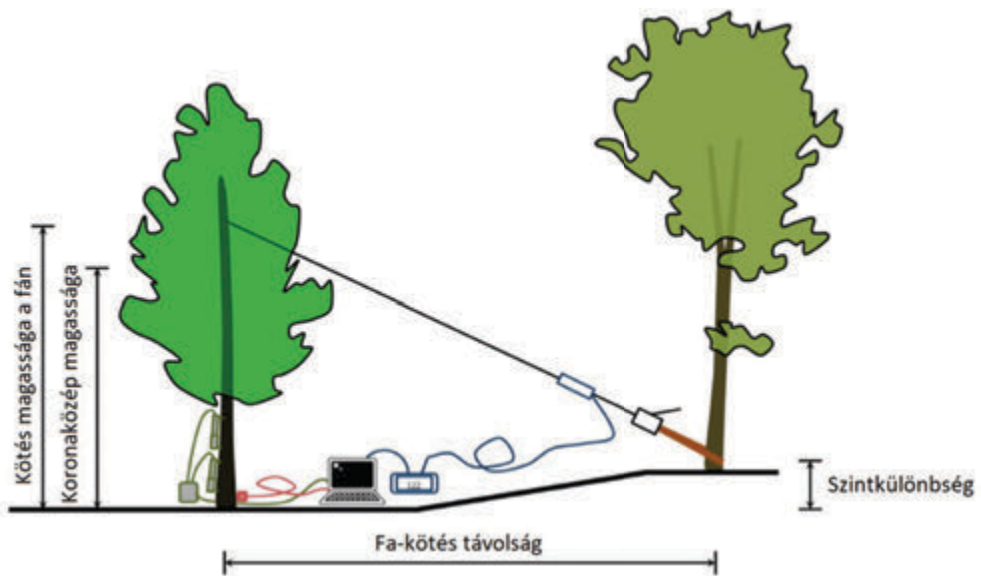
Az  $F_{ki}$  erő és a megfelelő geometriai adatok ismeretében a fát kifordítani képes forgatónyomaték számolható:

$$M_{ki} = F_{ki} L / \cos\alpha$$

$L$  – a kábel (kötél) magassága a vizsgált fán (m)

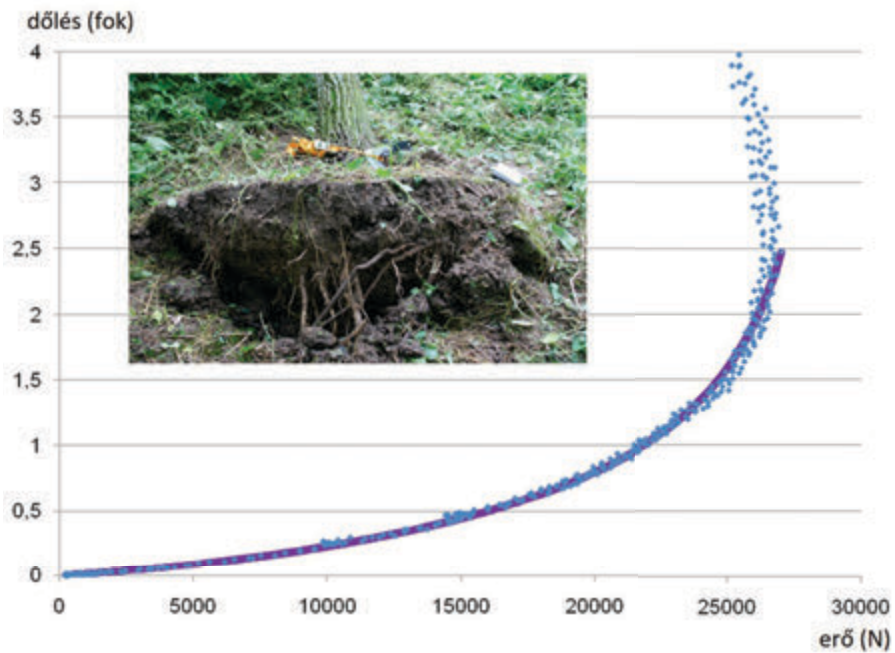
$\alpha$  – a (sodrony) kötélmegkötés szöge (általában a fa és a horgonyzás távolságából és a horgonyzás és a megkötés magasságkülönbségéből számolják)

A biztonsági számításokhoz a fát kifordítani képes forgatónyomatékokat használják.



1.7. ábra:

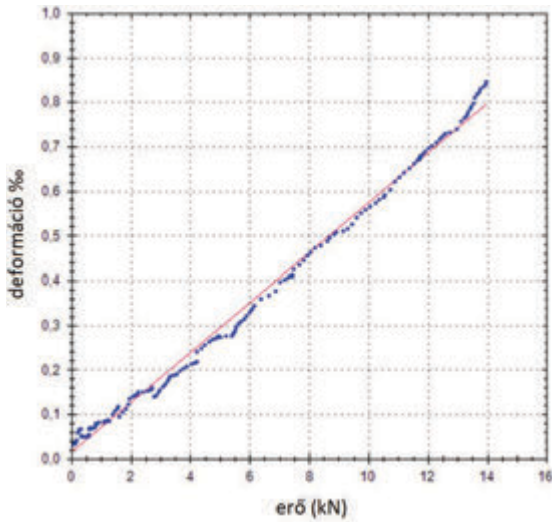
A biztonsági számításokhoz szükséges távolságok húzóvizsgálat esetén



1.8. ábra:

Egy kifordítás során mért dőlés és erő adatok (kék pontok) és az adatokra illesztett tangens függvény (lila vonal). Fontos, hogy húzóvizsgálat során (azért, hogy a mérés biztosan roncsolásmentes maradjon) a dőlés ne haladja meg a 0,25 fokot.





1.9. ábra:

Egy húzóvizsgálat során mért erők és deformációk (kék pontok). Megfigyelhető a lineáris összefüggés (piros vonal).

Ha a törzs állapota kérdéses, a húzás során a törzs egy szeletének megnyúlását, összenyomódását is mérhetjük. Nagyon kicsiny változásról, deformációról van szó, mindössze néhány mikrométerről. Azonban ez bőven elég a relatív megnyúlás meghatározásához

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

$\Delta l$  – a hosszváltozás ( $\mu\text{m}$ )

$l$  – a megnyúlásmérő eredeti hossza

A deformáció-erő grafikonon jól látható a lineáris összefüggés, ami általában a rugalmasság határáig fenn is áll. A kísérletek azt mutatták, hogy a törzs akkor törik ketté, ha a relatív megnyúlás eléri a rugalmasság határát. (Ami általában 0,26% vagy 2,6%, ám ez az adat is függ a fajtától, értékei a Wessolly-féle „stuttgarti” táblázatban találhatóak.)

A törzs töréséhez szükséges erő leolvasható az illesztett egyenesről, melyből a korábbiakhoz hasonlóan forgatónyomaték számolható, a kötél

magasságának és szögének segítségével. Az így kapott  $M_{\text{törés}}$  az a forgatónyomaték, mely képes kettétörni a törzset a mért magasságban (ahol a megnyúlásmérő volt).

## C A DINAMIKUS MÉRÉSBŐL SZÁRMAZÓ ADATOK

A dinamikus mérések fő ötlete, hogy valós szelet, szélökéseket használjunk terhelésként. Ha így teszünk, a számítások egyszerűsödnek, hiszen a fát úgy mérjük, amilyen (amilyené nőtt, amilyen a lombja, stb.), ott, ahol valóban áll. (Környezetének árnyékoló hatása is benne van a mérésben, amiből viszont következik az is, hogy ha megváltozik a környezet, például, ha kivágnak egy szomszédos fát, akkor a korábbi dinamikus mérés adatai már nem használhatóak.)

Dinamikus mérés során a szélesebséget és a törzs aljának dőlését és/vagy a törzs egy szeletének megnyúlását mérjük, ez utóbbiak azonosak a húzóvizsgálat során mértekkel.

A szélnyomás a szélesebségből számolható:

$$p_{\text{szél}} = 0.5 \rho_{\text{levegő}} v_{\text{szél}}^2$$

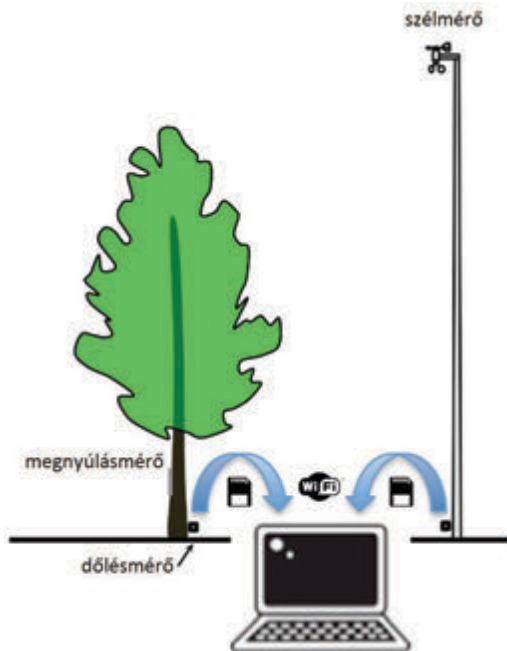
A nyomás, a húzóvizsgálat során létrehozott húzóerőhöz hasonlóan viselkedik, a dőlés-nyomás adatpárokra tangens függvény illeszthető, a megnyúlás és a nyomás között pedig lineáris az összefüggés (lásd előző alfejezet).

Az illesztett függvények elvezetnek minket a  $p_{\text{ki}}$  nyomásig, mely képes kifordítani a fát, és a  $p_{\text{törés}}$  nyomásig, mely képes ketté törni a törzset a mért magasságban.

Fontos megértenünk, hogy a fák rugalmas rendszerek. Ha fúj a szél, a fák lengedezni kezdenek, de az energia egy részét elnyelik, tárolják. Amikor „túl sok” az energia, akkor a fa „kirobban”, vagyis a korábban begyűjtögetett energiát egyetlen, nagyobb dőléssel, lengéssel adja le. Ez a jelenség jól megfigyelhető a dinamikus mérések adatait elemezve.

Másrészt, ez a jelenség jól mutatja, hogy nincs értelme egy-egy időpillanat konkrét szél és dőlés/megnyúlás adatait rendelni egymáshoz, hiszen lehet, hogy a fa még energiát „raktározó” fázisban van, vagy, éppen „kirobbanhat” olyankor is, amikor a pillanatnyi szélesség viszonylag alacsony.

A témában folyt kutatások alapján azt mondhatjuk, hogy a legjobb korreláció akkor adódik az adatokban, ha 10 perc hosszúságú időablakokon belül vizsgáljuk a szél és dőlés/megnyúlás adatokat. A megfelelő (statisztikai) matematikai modellel az adatokból párok állíthatók elő, majd ezekre lehet tangens függvényt illeszteni (dőlés adatok esetén), illetve lineáris függvényt illeszteni (megnyúlás adatok esetén).



1.10. ábra:

A dinamikus mérés elemei

(A gyakorlatban valamivel rövidebb, például 5 perces, esetleg még annál is rövidebb időablakok is használhatóak. Mivel a függvényillesztéshez szükség van bizonyos számú adatpárra, így, ha rövidebb időablakkal dolgozunk, rövidebb ideig történt mérés is elégséges lehet. 5 perces időablaknál a minimális szükséges mérési idő

1 óra. Természetesen a hosszabb mérés több adatot és biztosabb eredményt szolgáltat, akár két napnál hosszabb mérést is érdemes végezni.) Ha dinamikus vizsgálatot szeretnénk végezni, megfelelő, gyors, vagyis másodpercenként legalább egy adatot mérni tudó szélmérőre lesz szükségünk, hogy elkaphassuk a szélhőkeket is, ne csak egy „átlagos” szélességet lássunk. A mintavételi frekvencia tehát legalább 1 Hz, 1 adat/másodperc kell, hogy legyen.

A szélmérőt javasolt a mérendő fa környezetébe, szélnek kitett helyre, 10 méter magasra tenni. Kísérleteztek vele, hogy milyen messze lehet a szélmérő a vizsgált fától, és még 5 km-es távolságnál is használható adatpárokat kaptak, vagyis elvileg akár meteorológiai állomások adatai is felhasználhatóak lehetnek a kiértékelés során. (Abban az esetben, ha a szélmérés a fától messze történt, hosszabb időablak, például 20 perc, beállítása javasolt, ami magával hozza a mérési idő növekedését is.)

A kiértékelés sikerességéhez (hogy ne csak a nulla környékén legyenek adatok, hanem a tangens/egyenes függvény „felfelé” haladó részein is) legalább 25 km/órás szélhőkeket során gyűjtött adatok szükségesek. (Ezek hiányában a függvényillesztés bizonytalansága túl nagy.) (A jelen fejezetben bemutatott dinamikus mérés a Fakopp Enterprise Kutató-fejlesztő és Kereskedelmi Bt. által kifejlesztett mérési elrendezésre, érzékelőkre igazak. A piacon más gyártók műszerei is elérhetőek, ezek, jelenlegi legjobb tudásunk szerint, sokkal erősebb szelet és hosszabb mérési időt igényelnek.)

## D. TÁBLÁZATBÓL SZÁRMAZÓ FA ÉS NEDVES FAANYAG TULAJDONSÁGOK

A biztonsági számításokhoz szükség van a faanyag néhány olyan tulajdonságára, melyeket roncsolásos tesztek során határoztak meg, és különböző táblázatokban találhatjuk meg őket.



Ilyenek például a már bemutatott ellenállási tényező, a faanyagbeli hangsebesség (mely általában irányfüggő is), a rugalmasság határa, és a nyomószilárdság  $\sigma_{\text{nyszil}}$  (N/m<sup>2</sup>).

A nyomószilárdság azt adja vissza, hogy az adott anyag mennyire áll ellen, illetve mennyire bírja ki, ha terhelik. Ez az az „erő”, ami tartja a fa többi részét, és megtartja a fát, amikor fúj a szél. Érdekes tudnunk róla, hogy a bizonyos számítások a folyáshatárt is használják. A folyáshatár az a határ, amin belül maradván, annak húzása során, nem hozunk létre maradandó deformációt. (Bizonyos értelemben hasonló a rugalmasság határához, de amíg az egy relatív érték, százalék, a folyáshatár egy konkrét, mértékegységgel (N/m<sup>2</sup>) rendelkező érték.)



## 6. MÁS FESZÜLTSEGEK – NYÍRÁSI ÉS NÖVEKEDÉSI FESZÜLTSEGEK

Általánosságban a nyírófeszültség a nyíró erők-ből eredő feszültség, melyet úgy képzelhetünk el, mint a vizsgált tárgy piciny része alakjának a megváltozásakor, „megdőlésekor” fellépő feszültség.

Fák esetében a nyírás a törzs hosszanti hasadását hozhatja létre.

A törzs hasadása jelentősen csökkenti a teherbíró képességet, az ilyen esetek nagyon veszélyesek lehetnek.

A nyírófeszültséget a következőképpen számolhatjuk ki:

$$\tau_{\text{nyíró}} = (F_{\text{nyíró}} S) / (I_m b)$$

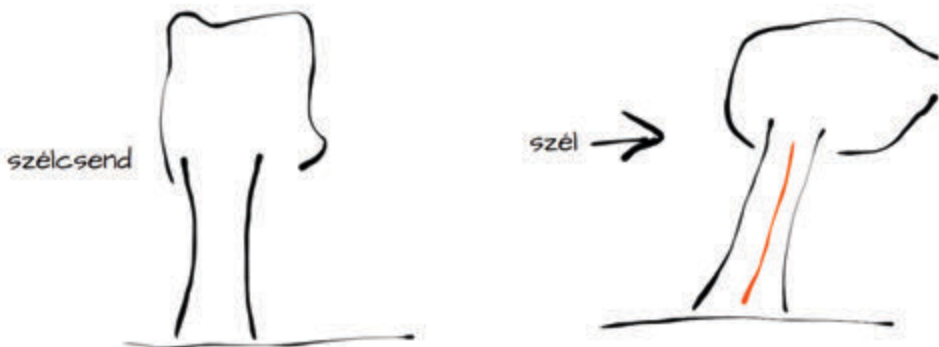
$F_{\text{nyíró}}$  – nyíróerő (N)

S – a keresztmetszet elsőrendű nyomatéka (m<sup>3</sup>)

b – a keresztmetszet nyírásra merőleges szélesség (m)

$S$ ,  $I_m$  és  $b$  a fa geometriájából származnak

( $S$  számolása bemutatásra kerül a fejezetben).



1.11. ábra:

Szeles időben a törzs szélirányba lévő oldala kicsi hosszabb lesz, míg az ellenoldali rész kicsit rövidül, a törzs képzeletbeli két része „szeretne elcsúszni” egymáson, az ebből adód feszültség a nyírófeszültség (narancssárga vonal)

A fa tömegközéppontja alatt:

$$F_{nyíró} = F_{nyíró\_szél} + F_{nyíró\_önsúly}$$

$$F_{nyíró\_szél} = F_{szél} \cos(\alpha)$$

$\alpha$  – a törzs vízszintessel bezárt szöge

$$F_{nyíró\_önsúly} = m_{fa} g \sin(\alpha)$$

$m_{fa}$  – a fa tömege (kg)

$g$  – a Föld gravitációs gyorsulása (9,81 m/s<sup>2</sup>)

A keresztmetszet elsőrendű nyomatéka, egy adott tengelyre vonatkoztatva a terület, és a tengely távolságának szorzata, a következő formulával lehet kiszámítani:

$$S = \int y_i dA$$

Értéke például körre  $S = 0.25 \pi R^3$ .



(A konkrét kiszámításhoz tudnunk kell, hogy nem a teljes terület integráljára lesz szükségünk, hanem a terület felének integráljára.

A nyírás a törzs közepén a legnagyobb, így erre a tengelyre kell elvégezni a számítást.

Szintén érdemes lehet tudnunk róla, hogy a nyírófeszültség két indexszel rendelkezik, pl.

$\tau_{RL}$ , ahol az első index az erő irányára, a második a sík normálisára, a síkra merőleges irányra utal. A bemutatott egyenlettel  $\tau_{RL}$  számítható ki, míg a törzs felhasadását  $\tau_{LR}$  okozza. Azonban  $\tau_{RL} = \tau_{LR}$  a dualitás miatt.)

Claus Mattheck nyomán azt mondhatjuk, hogy a nyírófeszültség alacsony, széles törzseknél a legkritikusabb.

A fákban is megjelenik a növekedési stressz, ami az élő fát előre terhelt anyaggá teszi. Brudi és munkatársai szerint ennek általában biztonság-növelő hatása van, ezért általában a (szárított) faanyagon mért és a biztonsági számításokhoz használt szilárdsági adatok alábecsülik a biztonságosságot, a fa által még éppen kibíráható nyomatékot vagy szélesebbeséget.

## 7. A BIZTONSÁGI TÉNYEZŐ KISZÁMÍTÁSA, EGYENLETEI

A korábbi fejezetek alapján a biztonsági tényező kiszámítása egyértelmű. Hat különböző esetet különböztetünk meg, tomográfiára, húzó- és dinamikus vizsgálatra, illetve felhasadásra vonatkozóan.

A törzs ketté törésére vonatkozó, tomográfián alapuló biztonsági tényező (a mért rétegre, és csak akkor, ha a törzs nem hasadt fel):

$$SF_{törzs\_tomogram} = \sigma_{nyiszil} / (\sigma_{szél} + \sigma_{önsúly} + \sigma_{hajlítás})$$

A gyökérezetre vonatkozó, húzóvizsgálat során meghatározható biztonsági tényező:

$$SF_{gyökér\_húzás} = M_{ki} / M_{szél}$$

A törzs ketté törésére, húzóvizsgálattal kapható biztonsági tényező:

$$SF_{törzs\_húzás} = M_{törés} / M_{szél}$$

A gyökérezetre vonatkozó, dinamikus mérés után számolható biztonsági tényező:

$$SF_{\text{gyökér\_dinamikus}} = p_{ki} / p_{szél}$$

A törzs ketté törésére, dinamikus vizsgálattal meghatározható biztonsági tényező:

$$SF_{\text{törzs\_dinamikus}} = p_{\text{törés}} / p_{szél}$$

A törzs felhasadására (a geometria alapján) számolható biztonsági tényező:

$$SF_{\text{hasadás}} = \sigma_{nyíró} / \tau_{nyíró}$$

$\sigma_{nyíró}$  a fajtára vonatkozó nyírószilárdság, mérésekből vagy táblázatokból származik.



## 1.1. táblázat

FAFAJ	NEDVESSÉG-TARTALOM	ROSTIRÁNYÚ NYÍRÓSZILÁRDSÁG (kPa)
Amerikai ámbrafa ( <i>Liquidambar styraciflua</i> ) * Sweetgum	élő nedves 12%	6800 11000
Amerikai bükk ( <i>Fagus grandifolia</i> ) Beech, American	élő nedves 12%	8900 13900
Amerikai gesztenye ( <i>Castanea dentata</i> ) Chestnut, American	élő nedves 12%	5500 7400
Amerikai hárs ( <i>Tilia americana</i> ) Basswood, American	élő nedves 12%	4100 6800
Amerikai kőris ( <i>Fraxinus pennsylvanica</i> ) Ash, green	élő nedves 12%	8700 13200
Amerikai mocsártölgy ( <i>Quercus palustris</i> ) Oak, red – pin	élő nedves 12%	8900 14300
Amerikai rezgő nyár ( <i>Populus tremuloides</i> ) Aspen, quaking	élő nedves 12%	4600 5900
balzsamos nyár ( <i>Populus balsamifera</i> ) Cottonwood, balsam poplar	élő nedves 12%	3400 5400
Bíbor tölgy ( <i>Quercus coccinea</i> ) Oak, red – scarlet	élő nedves 12%	9700 13000
Cukorjuhar ( <i>Acer saccharum</i> ) Maple, sugar	élő nedves 12%	10100 16100
Cukornyír ( <i>Betula lenta</i> ) Birch, sweet	élő nedves 12%	8500 15400
Ezüst juhar ( <i>Acer saccharinum</i> ) Maple, silver	élő nedves 12%	7200 10200
Fehér akác ( <i>Robinia pseudoacacia</i> ) Locust, black	élő nedves 12%	12100 17100
Fehér hikoridió ( <i>Carya ovata</i> ) Hickory, true, shagbark	élő nedves 12%	10500 16800
Fehér tölgy ( <i>Quercus alba</i> ) Oak, white – white	élő nedves 12%	8600 13800
Fekete dió ( <i>Juglans nigra</i> ) Walnut, black	élő nedves 12%	8400 9400
Fekete kőris ( <i>Fraxinus nigra</i> ) Ash, black	élő nedves 12%	5900 10800
Festő tölgy ( <i>Quercus velutina</i> ) * Oak, red – black	élő nedves 12%	8400 13200
<i>Fraxinus quadrangulata</i> Ash, blue	élő nedves 12%	10600 14000
Hegyeslevelű liliomfa ( <i>Magnolia acuminata</i> ) Magnolia, cucumber tree	élő nedves 12%	6800 9200
Héjas kérgű hikoridió ( <i>Carya laciniosa</i> ) Hickory, true, shellbark	élő nedves 12%	8200 14500
Juhar ( <i>Acer nigrum</i> ) Maple, black	élő nedves 12%	7800 12500
Kerek hikoridió ( <i>Carya glabra</i> ) Hickory, true, pignut	élő nedves 12%	9400 14800
Keresztkarójú tölgy ( <i>Quercus stellata</i> ) Oak, white – post	élő nedves 12%	8800 12700
Kései meggy ( <i>Prunus serotina</i> ) Cherry, black	élő nedves 12%	7800 11700

TREE ASSESSOR

FAFAJ	NEDVESSÉG-TARTALOM	ROSTIRÁNYÚ NYÍRÓSZILÁRDSÁG (kPa)
Kőris, fehér ( <i>Fraxinus americana</i> ) Ash, white	élő nedves 12%	9300 13200
Nagyfogú nyár ( <i>Populus grandidentata</i> ) Aspen, bigtooth	élő nedves 12%	5000 7400
Nagylevelű tölgy ( <i>Quercus macrocarpa</i> ) Oak, white – bur	élő nedves 12%	9300 12500
Nagyvirágú liliomfa ( <i>Magnolia grandiflora</i> ) Magnolia, southern	élő nedves 12%	7200 10500
<i>Nyssa aquatica</i> Tupelo, water	élő nedves 12%	8200 11000
<i>Nyssa sylvatica</i> Tupelo, black	élő nedves 12%	7600 9200
Nyugati platán ( <i>Platanus occidentalis</i> ) Sycamore, American	élő nedves 12%	6900 10100
Oregoni juhar ( <i>Acer macrophyllum</i> ) Maple, bigleaf	élő nedves 12%	7700 11900
Oregoni kőris ( <i>Fraxinus latifolia</i> ) Ash, oregon	élő nedves 12%	8200 12300
Papírnnyír ( <i>Betula papyrifera</i> ) Birch, paper	élő nedves 12%	5800 8300
Pekándió ( <i>Carya illinoensis</i> ) Hickory, pecan	élő nedves 12%	10200 14300
<i>Quercus bicolor</i> Oak, white – swamp white	élő nedves 12%	9000 13800
<i>Quercus lyrata</i> Oak, white – overcup	élő nedves 12%	9100 13800
<i>Quercus michauxii</i> Oak, white – swamp chestnut	élő nedves 12%	8700 13700
<i>Quercus montana</i> Oak, white – chestnut	élő nedves 12%	8300 10300
<i>Salix nigra</i> Willow, black	élő nedves 12%	4700 8600
Sallangoslevelű tölgy ( <i>Quercus falcata</i> ) Oak, red – southern red	élő nedves 12%	6400 9600
Sárganyír ( <i>Betula alleghaniensis</i> ) Birch, yellow	élő nedves 12%	7700 13000
Szasszafrász babérfa ( <i>Sassafras</i> ) * Sassafras	élő nedves 12%	6600 8500
Szilfa ( <i>Ulmus americana</i> ) Elm, American	élő nedves 12%	6900 10400
Szilfa ( <i>Ulmus thomasii</i> ) Elm, rock	élő nedves 12%	8800 13200
Szögletes nyár ( <i>Populus deltoides</i> ) Cottonwood, eastern	élő nedves 12%	4700 6400
Szöröstermésű nyár ( <i>Populus trichocarpa</i> ) Cottonwood, black	élő nedves 12%	4200 7200
Szürke dió ( <i>Juglans cinerea</i> ) Butternut	élő nedves 12%	5200 8100
Tölgy ( <i>Quercus hemisphaerica</i> ) * Oak, red – laurel	élő nedves 12%	8100 12600
Tölgy ( <i>Quercus nigra</i> ) Oak, red – water	élő nedves 12%	8500 13900

FAFAJ	NEDVESSÉG-TARTALOM	ROSTIRÁNYÚ NYÍRÓSZILÁRDSÁG (kPa)
Tölgy ( <i>Quercus pagoda</i> ) Oak, red – cherrybark	élő nedves 12%	9100 13800
Tövises lepényfa ( <i>Gleditsia triacanthos</i> ) Honeylocust	élő nedves 12%	11400 15500
Vörös éger ( <i>Alnus rubra</i> ) Alder, red	élő nedves 12%	5300 7400
Vörös juhar ( <i>Acer rubrum</i> ) Maple, red	élő nedves 12%	7900 12800
Vörös szil ( <i>Ulmus rubra</i> ) Elm, slippery	élő nedves 12%	7700 11200
Vörös tölgy ( <i>Quercus rubra</i> ) Oak, red – northern red	élő nedves 12%	8300 12300
Zelnisemeggy ( <i>Prunus padus</i> ) * Hackberry	élő nedves 12%	7400 11000

## 1.1. táblázat:

Néhány fafaj nyírószilárdsága

forrás: <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.

\*ahol az angol név nem egyértelmű



1.2. táblázat

FAFAJ	RUGALMASSÁGI MODULUSZ (N/MM <sup>2</sup> )	FOLYÁSHATÁR, LONGITUDINÁLIS IRÁNYBAN (N/ MM <sup>2</sup> )	RUGALMASSÁG HATÁRA (%)	JAVASOLT ELLENÁLLÁSI TÉNYEZŐ (C <sub>w</sub> )
Abies alba	9500	15	0,16	0,2
Acer campestre	6000	25,5	0,43	0,25
Acer negundo	5600	20	0,36	0,25
Acer pseudoplatanus	8500	25	0,29	0,25
Acer saccharinum	6000	20	0,33	0,25
Acer saccharum	5450	20	0,37	0,25
Aesculus hippocastanum	5250	14	0,26	0,35
Ailanthus altissima	6400	16	0,25	0,15
Alnus glutinosa	8000	20	0,25	0,25
Betula pendula	7050	22	0,31	0,12
Carpinus betulus	8800	16	0,18	0,2
Castanea sativa	6000	25	0,42	0,25
Cedrus deodora	7650	15	0,2	0,2
Cercis siliquastrum	0	15	-	0,2
Chamaecyparis lawsonia	7350	20	0,27	0,2
Fagus sylvatica	8500	22,5	0,26	0,25-0,30
Fraxinus excelsior	6250	26	0,42	0,2
Larix decidua	5035	17	0,32	0,15
Liriodendron tulipifera	5000	17	0,34	0,25
Picea abies	9000	21	0,23	0,2
Picea omorika	9000	16	0,18	0,2
Pinus pinaster	8500	18	0,21	0,2
Pinus sylvestris	5800	17	0,29	0,15
Platanus x hybrid	6250	27	0,43	0,25
Populus alba	6400	20	0,31	0,2
Populus nigra	6520	20	0,31	0,2
Populus nigra 'Italica'	6800	16	0,24	0,3
Populus x canescens	6050	20	0,33	0,2-0,25
Pseudotsuga menziesii	1000	20	0,2	0,2
Pyrus communis	5800	17	0,29	0,3
Quercus robur	6900	28	0,41	0,25
Quercus rubra	7200	20	0,28	0,25
Robinia monophyla	5200	20	0,38	0,15-0,2
Robinia pseudoacacia	7050	20	0,28	0,15
Salix alba	7750	16	0,21	0,2
Salix alba 'Tristis'	7000	16	0,23	0,2
Sequoiadendron giganteum	4550	18	0,4	0,2

FAFAJ	RUGALMASSÁGI MODULUSZ (N/MM <sup>2</sup> )	FOLYÁSHATÁR, LONGITUDINÁLIS IRÁNYBAN (N/ MM <sup>2</sup> )	RUGALMASSÁG HATÁRA (%)	JAVASOLT ELLENÁLLÁSI TÉNYEZŐ (C <sub>w</sub> )
Sophora japonica	6450	20	0,31	0,15
Sorbus aria	6000	16	0,27	0,25
Tilia cordata	8300	20	0,24	0,25
Tilia euchlora	7000	17,5	0,25	0,25
Tilia platyphyllos	8000	20	0,25	0,25
Tilia tomentosa	8350	20	0,24	0,25-0,30
Tilia x hollandica	4500	17	0,38	0,25
Ulmus glabra	5700	20	0,35	0,25

## 1.2. táblázat:

Szilárdsági adatok faanyagokra, Wessolly és Erb (Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. Patzer Verlag, Berlin, Germany, 1998.) nyomán



## FIZIKAI MENNYISÉGEK

$\rho_{fa}$  – a nedves, zöld fa sűrűsége (kg/m<sup>3</sup>)

H – a fa magassága (m)

$D_{1.3}$  – a mellmagassági átmérő (m)

$\rho_{levegő}$  – levegő sűrűsége (a hőmérséklettől függ, de általában 1,2 kg/m<sup>3</sup>-t használnak)

$c_{fafaj}$  – fajfaj függő ellenállási tényező (nincs mértékegysége)

$A_{korona}$  – korona szélnek kitett felülete (m<sup>2</sup>)

$v_{szél}$  – szélesebesség (m/s)

$h_{kk}$  – korona középpontjának magassága (m)

z – a semleges tengelytől mért távolság (ez az a tengely, ahol a hajlítás során nincs feszültség) (m)

$I_m$  – az adott magasságbeli inercia, másodrendű nyomaték (m<sup>4</sup>) (bővebben az a) alfejezetben)

$h_{réteg}$  – a vizsgált réteg magassága (m)

g – a gravitációs állandó (Magyarországon, általában 9,81 m/s<sup>2</sup>)

$A_{törzs}$  – a törzs keresztmetszete (m<sup>2</sup>)

$A_{ép_rész}$  – a valóban terhet tartó, ép faanyag területe (m<sup>2</sup>)

$\alpha$  – a törzs dőlési szöge a függőlegeshez képest

$\varphi_c$  – az illesztett dőlés

F – a mért erő (N)

$F_{ki}$  – a fát gyökerestől már éppen kifordítani képes erő (N)

L – a kábel (kötél) magassága a vizsgált fán (m)

$\alpha$  – a (sodrony) kötél szöge (általában a fa és a horgonyzás távolságából és a horgonyzás és a megkötés magasságkülönbségéből számolják)

$M_{törés}$  – a fát adott szintben eltörni képes forgatónyomaték

$p_{ki}$  – a nyomás, mely képes kifordítani a fát

$p_{törés}$  – nyomás, mely képes ketté törni a törzset a mért magasságban

$\sigma_{nyiszil}$  – nyomószilárdság (N/m<sup>2</sup>).

$F_{nyíró}$  – nyíróerő (N)

S – a keresztmetszet elsőrendű nyomatéka (m<sup>3</sup>)

b – a nyírásra merőleges szélessége (m)

$\alpha$  – a törzs vízszintessel bezárt szöge

$m_{fa}$  – a fa tömege (kg)

$\sigma_{nyíró}$  – a fafajra vonatkozó nyírószilárdság

## EGYENLETEK

SF = (teherbíró képesség) / (össz. terhelés)

$$F_{szél} = 0,5 \rho_{levegő} c_{fafaj} A_{korona} v_{szél}^2$$

$$m_{fa} = \rho_{fa} H D_{1.3}^2 \pi/4$$

$$M_{szél} = F_{szél} h_{kk}$$

$$\sigma_{szél} = M_{szél} (z/l)$$



$$\sigma_{szél} = F_{szél} (h_{kk} - h_{réteg}) (z/l)$$

$$\rho_{szél} = F_{szél} / (c_{fafaj} A_{korona}) = 0,5 \rho_{levegő} v_{szél}^2$$

másodrendű

$$I_m = \iint x y x^2 dx dy$$

nyomaték vagy inercia (nyomaték)

$$I_{kör} = (\pi d^4) / 64$$

$$\sigma_{önsúly} = m_{fa} g / A_{törzs}$$

$$m_{fa} = A_{törzs} H \rho_{fa}$$

$$m_{fa} = A_{törzs} (H - h_{réteg}) \rho_{fa}$$

$$\sigma_{önsúly} = (A_{törzs} (H - h_{réteg}) \rho_{fa} g) / A_{törzs}$$

$$\sigma_{önsúly} = (H - h_{réteg}) \rho_{fa} g$$

$$\sigma_{önsúly\_korhadt} = (H - h_{réteg}) \rho_{fa} g (A_{törzs} / A_{ép\_rész})$$

$$\sigma_{hajlítás} = (m_{fa} g h_{kk} \sin \alpha) (z / I_m)$$

$$\Phi_c = 0,33 \tan(1,34(F/F_{ki})) + 0,5(F/F_{ki})^2 - 0,1(F/F_{ki})$$

$$M_{ki} = F_{ki} L / \cos \alpha$$

$$\rho_{szél} = 0,5 \rho_{levegő} v_{szél}^2$$

$$\tau_{nyíró} = (F_{nyíró} S) / (I_m b)$$

$$F_{nyíró} = F_{nyíró\_szél} + F_{nyíró\_önsúly}$$

$$F_{nyíró\_szél} = F_{szél} \cos(\alpha)$$

$$F_{nyíró\_önsúly} = m_{fa} g \sin(\alpha)$$

$$S = \int y_i dA$$

a keresztmetszet elsőrendű nyomatéka

$$S_{kör} = 0,25 \pi R^3$$

A törzs ketté törésére vonatkozó, tomográfián alapuló biztonsági tényező (a mért rétegre, és csak akkor, ha törzs nem hasadt fel):

$$S_{Ftörzs\_tomogram} = \sigma_{nyzil} / (\sigma_{szél} + \sigma_{önsúly} + \sigma_{hajlítás})$$

A gyökérzetre vonatkozó, húzóvizsgálat során meghatározható biztonsági tényező:

$$S_{Fgyökér\_húzás} = M_{ki} / M_{szél}$$

A törzs ketté törésére, húzóvizsgálattal kapható biztonsági tényező:

$$S_{Ftörzs\_húzás} = M_{törés} / M_{szél}$$

A gyökérzetre vonatkozó, dinamikus mérés után számolható biztonsági tényező:

$$SF_{gyökér\_dinamikus} = p_{ki} / p_{szél}$$

A törzs ketté törésére, dinamikus vizsgálattal meghatározható biztonsági tényező:

$$SF_{törzs\_dinamikus} = p_{törés} / p_{szél}$$

A törzs felhasadására (a geometria alapján) számolható biztonsági tényező:

$$SF_{hasadás} = \sigma_{nyíró} / \tau_{nyíró}$$





## II.

### *Műszeres favizsgálat: korhadás detektálása*

A korhadások fontos jelzések a fa egészségére nézve. Néha a korhadás látható, amikor egy seb miatt alakul ki, vagy amikor a belső korhadás már eléri a kérget. De vannak kívülről láthatatlan korhadások és üregek is. A korhadás észlelése a vizuális felméréssel indul, hiszen lehetnek ráutaló jelek (pl. gomba termőtestek), és a fakalapács hangja is megváltozhat, ha jelentősebb az üreg. A korhadás helyzetének és az érintett terület méretének megállapítása többféle pontossággal lehetséges roncsolásmentes, vagy csekély mértékű roncsolást okozó eszközök segítségével. Jelen fejezet a Pressler-fúró és a fraktométer,

mint egyszerűbb eszközök bemutatásával kezdődik, az egyvonalon mérő akusztikus műszerek a kiterjedtebb korhadás észlelésére alkalmasak, ahogy a fúrásellenállást mérő eszközök is egy vonal mentén szolgáltatnak információt, míg a tomográfiák a vizsgált réteg részletesebb képét adják vissza.

Az átlalók használatára, valamint a biztonsági tényező és a korhadt terület közötti összefüggésre is kitér a fejezet.

Az egyre inkább a napi használat részévé váló tomográfiát használó esettanulmányok is bemutatásra kerülnek.



Fontos észben tartanunk, hogy ezen eszközök mind csupán a mért magasság(ok)ban, réteg(ek)ben adnak információt a vizsgált fárólól, nem fedik le annak egészét. A vizuális vizsgálat a műszeres vizsgálatok alapja, melynek során azt is el kell tudunk dönteni, hogy szükség van-e műszeres vizsgálatra, s ha igen, mely magasság(ok)ban, mely rész(ek)en.

## 1. PRESSLER-FÚRÓ ÉS FRAKTOMÉTER

A Pressler- vagy növedékfúró egy faanyag mintavévi eszköz, egy belülről lukas, és egy tálcát is tartalmazó fúró, mely segítségével például a törzs anyagából lehet mintát venni.

A minta akár vizuálisan is vizsgálható és hasznos lehet, hiszen, ha korhadt a vizsgált fa, akkor ez a faanyag is látszódnak.



2.1. ábra:  
*Pressler-fúrós mintavétel*



2.2. ábra:  
*Egy (egészséges) faanyag minta a fúró tálcáján*

A Pressler-fúróval való mintavétel általában néhány percet igényel (fánként), de néha komolyabb fizikai erőt is kíván. A súrlódás hőt termel, így mind a minta, mind a fúró nagyon meleg lehet rögtön a mintavétel után.

Ez a technika nem sorolható a roncsolásmentes mérések közé, hiszen általában 10-15 mm átmérőjű, akár több 10 centiméter hosszú luk marad a fában, melyet megfelelően kell kezelni, elősegítendő a fa egészségességének megőrzését. Az ilyen vizsgálatok előnye maga a kinyert minta, melyen részletes analízis végezhető. (A minta az utolsó évek növekményének becslésére is alkalmas.)

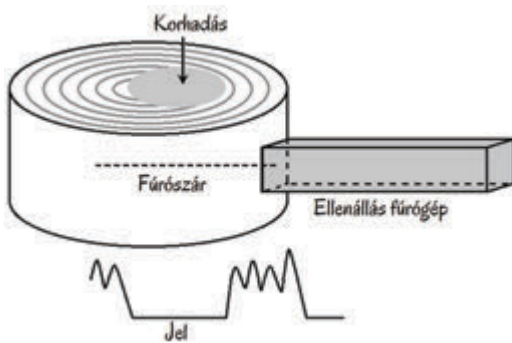
A fraktométer egy kézi műszer, melyet a Pressler-fúró által vett minta gyors, akár terepen végezhető elemzésére fejlesztettek ki. A fraktométer meghajlítja és eltöri a mintát, s így annak szilárdságáról ad információt.

A szilárdság függ a fafajától (általában a fafaj függő értékek táblázatát is mellékelik az eszközhöz), a hajlítás irányától (rosttal párhuzamosan vagy arra merőlegesen történik-e) és a mintabeli faanyag állapotától (egészséges vagy korhadásnak indult).

## 2. FÚRÁSELLENÁLLÁS MÉRÉSEK

Az ellenállásfúrás egy speciális, igen vékony (néhány mm-es), de általában hosszú (a fát keresztmetszetben átérő) fúrószárral történik, s a fúrással magával szemben érzékelhető ellenállást méri. Ezen ellenállás apró változásai, hogy mennyire halad könnyebben vagy nehezebben előre a fúró, a faanyag minőség változásaira utalhatnak. Korhadásokat meg lehet találni ezzel a technikával, de még az évgűrűszerkezet is láthatóvá válhat a rezisztogramon. (2.3. ábra)

A használt eszköztől függően a rezisztogramot papírra nyomtatja a fúró, vagy megjeleníti a kijelzőjén és digitálisan tárolja.



2.3. ábra:

Az ellenállásfúrás elve. Ahogy a fúrószár halad a faanyagban, annak tulajdonságainak változásai megváltoztatják jelet. Az évgyűrűk és a korhadások is megjelenhetnek a rezisztogramon.

Ezzel a technikával megtalálhatjuk és/vagy igazolhatjuk egy korhadás vagy egy gyűrűs elválás jelenlétét.

Fúrás során a fa (és a fúró is) nagyon felmelegszik. Ez elvileg akár sterilizálhatja is a faanyagot,

de a fúrási be- (és ki-) meneti lukak kezelése alapvető fontosságú.

Egy mérés körülbelül öt percig tart, de általában, vizsgált rétegenként több mérés is szükséges, hiszen egy fúrás csak egyetlen vonalról ad információt.

Ez a mérés vonalmenti akusztikus vizsgálat és tomográfia után lehet csak javasolt, azok ellenőrzésére szolgálhat. Fontos tudnunk, hogy a fúrásellenállás mérés – Lin és kollégái 2013-as tanulmánya alapján – áttörheti a korábban már kialakult kompartmentalizációs zónát, szabad utat engedve a gombák részére a még ép faanyag felé. (Lin et al. 2013)

Általában maga a fúró is nehéz, vízszintesen és a kéreg felületére merőlegesen tartani a fúrás ideje alatt erőfeszítést igényel.

Ha a fában kiterjedt korhadás található, a fúrószár meghajolhat az üregben. Ezért ajánlott néhány cm-nyi "üres" jel után megállítani a fúrást (visszahúzni a szárat). (Van olyan fúró, mely ezt automatikusan is megteszi.)



2.4. ábra:

Fúrásellenállás mérés egy bemutató során, a fúró a megfúrt rönkön. (A rezisztogram egy része látható a kijelzőn, a teljes mérés elérhető és elemezhető a gombot forgatva.)

### 3. AKUSZTIKUS ÉS ULTRAHANG JELEK FAANYAGBAN, EGY VONALMENTI AKUSZTIKUS MÉRÉSEK

Az, hogy a hang mennyire jól terjed a faanyagban, jól hallható a különböző hangszereket hallgatva. Ahogy az atomok, molekulák rezegnek, rezgésbe hozzák a szomszédjaikat, így terjed a jel, a hanghullám. A faanyag molekulái „szorosán” egymás mellett vannak, így viszonylag könnyen hozzák mozgásba a szomszédokat.

A hanghullám lassabb, ha levegőben vagy gyengébb minőségű (pl. korhadt) faanyagban halad. Ezt a tulajdonságot lehet arra használni, hogy a faanyag minőségéről roncsolásmentesen kapjunk információt.

A hang „gyorsan” (rostirányra merőlegesen kb. 2000 m/s) halad egészséges faanyagban (a pontos érték fajfaj függő is), míg levegőben a „lassan” (kb. 340 m/s).

Mivel ekkora a különbség (még ha a fából levegőbe és visszaterjedés gördülékenyen is menne),

ha van egy korhadás, az a jel ér át elsőként a túloldalra, amely az egészséges faanyagban halad, még akkor is, ha ez azt jelenti, hogy meg kell „kerülnie” a korhadt részt. Ezt mutatja be a 2.5. ábra.

Másrészről, ha összehasonlítunk egy teljesen egészséges esetet egy korhadttal, akkor, természetesen az egészséges fában lesz gyorsabb a megfigyelhető sebesség.

A legegyszerűbb ilyen mérést 1D-s, vagy vonalmenti mérésnek hívjuk (esetleg „TOF”-nak az angol „time-of-flight”, vagyis kb. „repülési, átérési idő”-ből). Ilyenkor egyetlen jeladót és egyetlen jelvevő érzékelőt használunk.

Fontos megértenünk, hogy az akusztikus módszerek a leggyorsabb jelet mérik, mely a faanyagon keresztül eléri az érzékelőt. Ha korhadás is jelen van, akkor ez az a jel, amely „megkerülte” a korhadt részt, vagyis a korhadt rész belsejéről nem kapunk így információt.

Olyan anyagok is vannak, melyekben kb. ugyanolyan gyorsan, vagy akár gyorsabban terjed a hang, mint egészséges faanyagban. Például,



2.5. ábra:

Példa egy 1D-s, vagy vonalmenti akusztikus mérésre. A műszer a két érzékelő között a jel terjedési idejét méri. Ha korhadt az anyag, a jelnek „kerülnie” kell, így az idő megnövekszik.



ha egy üreget jég, esetleg beton tölt ki, a jel áthaladhat ezeken, egészségesnek mutatva a fát. Hogy elkerüljük az ilyen hibákat, nem ajánlott olyankor mérni, amikor a vizsgált fa belseje fagyott lehet. (Ez olyankor is előfordulhat, amikor a levegő hőmérséklete már nulla fok fölött van, nézzünk utána a korábbi napok időjárásának, hogy adott körülmények között átfagyhatott-e a fa.)

A jel áthaladásának ideje természetesen nem csak attól függ, hogy egészséges-e a faanyag, hanem az érzékelők közti távolságtól is. Annak érdekében, hogy az értékek összehasonlíthatóak legyenek, az időből és a távolságból számított sebesség a későbbi elemzés alapja.

Számos fafaj egészséges faanyagára vonatkozó sebesség megtalálható olyan táblázatokban, melyekhez az értékeket laborokban, vagy terepen mérték ki. De referencia sebességet vehetünk fel úgy is, ha a vizsgált fa egy biztosan egészséges részén mérünk.

A hangsebesség a fafajtól, az egészségi állapottól és az iránytól is függ.

A vonalmenti mérések csak durva becslést adnak a korhadás kiterjedésével kapcsolatban. Ehhez a mért ( $V_{\text{mért}}$ ) és a referencia ( $V_{\text{ref}}$ ) sebességek szükségesek. A következő egyenlet a relatív sebesség csökkenést (RSCS, angolul „relative decrease of velocity”, így RDSV) adja meg, %-ban.

$$\text{RSCS} = (V_{\text{ref}} - V_{\text{mért}}) / V_{\text{ref}} * 100$$

A vonalmenti méréseket általában sugár irányban, a mért réteg középpontján áthaladó egyenes mentén végzik (látsd 2.5. ábra). A törzzsel párhuzamosan mért vonalmenti sebesség a faanyag minőségbecslését, így a faültetvényeken a legjobb minőségű faanyaggal rendelkező fák kiválasztását segítik.

Az akusztikus és ultrahang jelek sok szempontból hasonlóan viselkednek, vannak mérőműszerek, amik az egyiket, illetve a másikat használják. A praktikus különbségek:

2.1. táblázat:

A relatív sebesség csökkenés és a korhadat terület aránya közti kapcsolat

A KORHADT TERÜLET ARÁNYA A KERESZTMETSZETBEN %	RELATÍV SEBESSÉG CSÖKKENÉS %
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

- az ultrahangot egy jeladó egység generálja, az ilyen jeladót nem kell (kalapáccsal) ütni
- az ultrahangnál nagyon fontos a jel megfelelő akusztikus csatolása, műszertől függően előfordulhat, hogy a faanyagot géllal kell bekenni, vagy az érzékelőket kifejezetten rá kell nyomni a felületre (erővel) a mérés során
- a hanghullámokat az érzékelőkön/mérési pontokon egy kalapács ütésével generálják.

Az akusztikus érzékelők használata során is fontos, hogy megfelelő csatolás alakuljon ki, az érzékelőnek a kérgen át, faanyagba kell érnie. Ez azt is jelenti, hogy a használt érzékelőnek hosszabbnak kell lennie, mint a vizsgált fa kérgének vastagsága. Erre általában 6 cm-es érzékelő elég, de néhány esetben ennél hosszabbra van szükség.

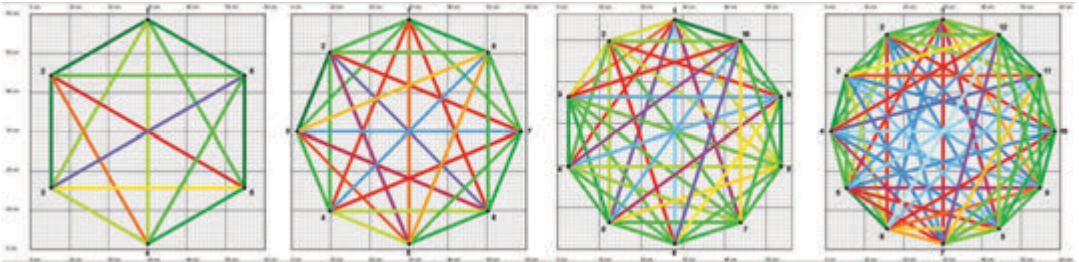
Például, egy (kb. száz éves) mamutfenyőt 12 cm-es érzékelőkkel tudunk megmérni (látsd 2.6. ábra).





2.6. ábra:

Mérés egy park mamutfenyőin (jobbra és balra), és a 7-10 cm-es kéregvastagság miatt használt 12 cm-es érzékelő összehasonlítva a „normál” 6 cm-essel (középen)



2.7. ábra:

Ha a törzs mentén több érzékelőt is elhelyezünk, több mérési lehetőség, „mérési vonal” adódik az érzékelők között

## 4. AKUSZTIKUS TOMOGRÁFIA

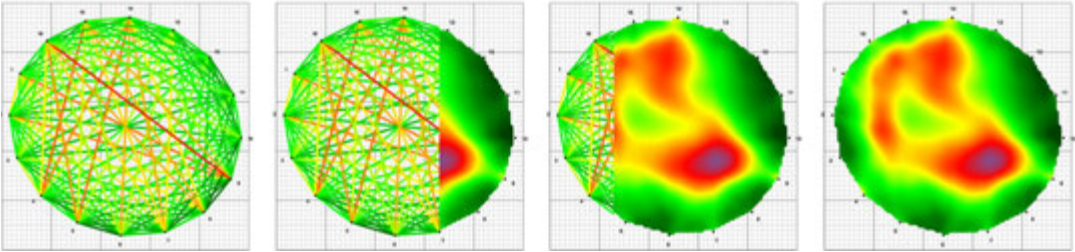
Mind az akusztikus, mind az ultrahang tomográfia az előző alfejezetben bemutatott elveken alapszik. Tomográfia esetében több érzékelőt helyeznek fel körbe a törzsre vagy a vágásra, és a jel terjedését minden lehetséges mérési vonalon (látsd 2.7. ábra) mérik. A „vonalakból” (a sebesség adatokból) 2D-s tomogram számítható.

A 2.7. ábrán megfigyelhetjük, hogy az érzékelők számának növelése többek között kisebb nem mért területekhez vezet. Vagyis mind a tomogram felbontása, mind pedig a megbízhatósága is növekszik, ha több érzékelőt használunk. Viszont két érzékelőt 5 cm-nél közelebb már nem érdemes tenni egymáshoz.

A tomogram képet a megfelelő program több lépésben át számítja ki, melyek során idő- és iránykorrekciók is történnek, a faanyag inhomogenitása miatt. (Ami a hangsebesség irányfüggését hozza magával. Ez az egyik oka annak, hogy a vonalmenti mérések csak vagy sugárirányban, vagy a törzs mentén történnek.)

Elvileg a képalkotáshoz szükséges számítások papíron elvégezhetőek, de a lépések száma és időigénye miatt ez nem része sem a tananyagnak, sem a (napi) gyakorlatnak.

A mérési rétegnek a fa növekedési irányára merőlegesnek kell lennie, ez általában vízszintest jelent, és ennek a rétegnek a magasságát is ajánlott lemérni. Nem csupán azért, hogy tudjuk, hogy pontosan hol mértünk, hanem a teherbírási számításokhoz, illetve a 3D-s képalkotáshoz is fontos a magasság adat.



2.8. ábra:

Mérési vonalak és a számított tomogram

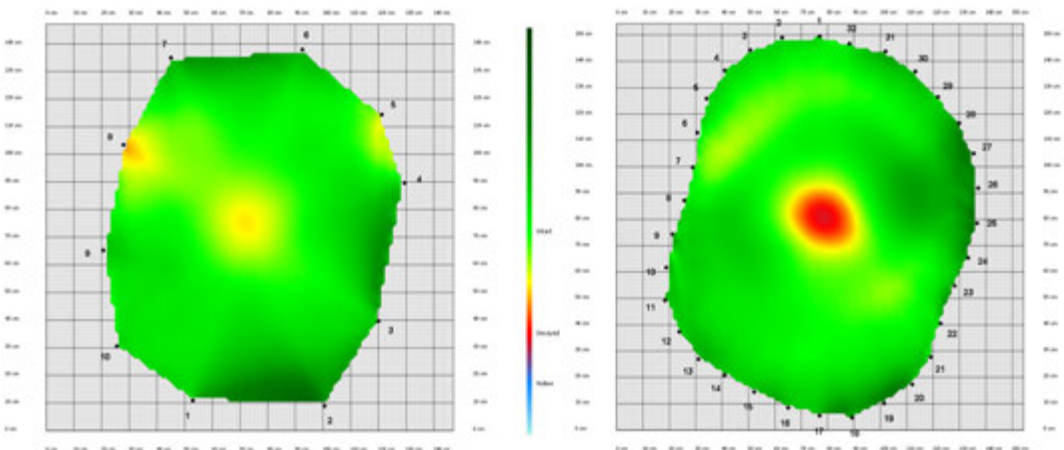
A megfelelő geometria alkalmazása is fontos, hiszen, ha az érzékelők közti távolság a programban eltér a valóstól, az a számított sebességekre is hatással van.

A szoftverek különböző geometriákat ajánlanak, általában kört, ellipszist és szabálytalant. A szabálytalan geometria használata az ajánlott. Szabálytalan geometria esetén szükségünk van az érzékelők helyzetére (míg a „szabályos” geometriáknál a program jelöli ki az érzékelők helyét az optimális felbontás érdekében). Általában az érzékelők valamely másik érzékelőtől való távolságait kell lemérni, ami néhány/több percig tart (az érzékelők számától függően). Ajánlott

digitális átlalót használni, hogy gyorsítsuk ezt a lépést. (Természetesen a mechanikus átlaló is jó, csak akkor várhatóan jóval hosszabb ideig tart majd a távolságok regisztrálása.)

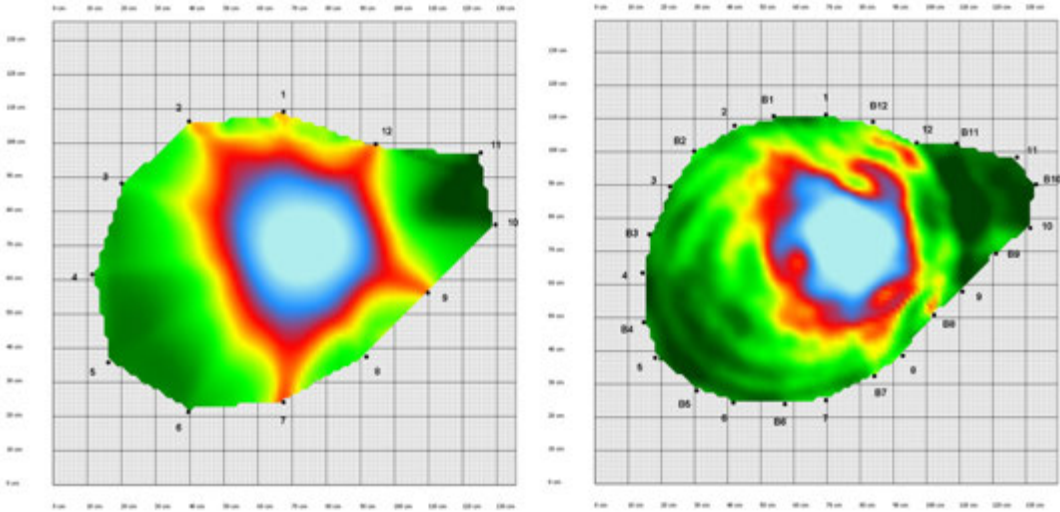
A nem megfelelő geometria használata esetén előfordul a korhadás alul becslése, és emiatt a biztonsági tényező felül becslése, akár 40%-ot meghaladó mértékben is. Soha ne mérjünk kör vagy ellipszis geometriával, ha az a törzs adott rétegén látszik, hogy alakja messze nem kör vagy ellipszis.

Javul a felbontás, ha több érzékelőt vagy úgy nevezett „mérési pontot” (pl. Ludwig szögeket) használunk. Egy-egy példa a 2.9. és a 2.10. ábrán látható.



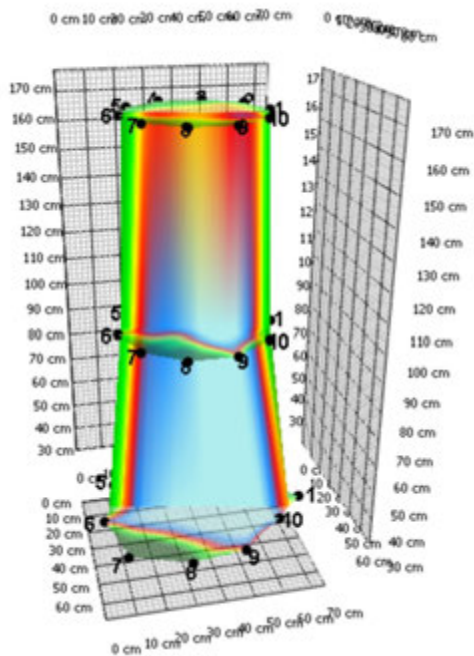
2.9. ábra:

Ugyanannak a platán fának (ugyanannak a rétegnek) a mérése 10 (balra) és 32 érzékelővel (jobbra)



2.10. ábra:

Egy másik platán fa adott rétegének mérése 12 érzékelővel (balra) és 12 érzékelővel és 12 Ludwig szöggel (jobbra)



2.11. ábra:

A mért tomogramok alapján interpolációval készült 3D-s kép

Egy, kényelmes magasságban lévő réteg mérése, egy mérőpárnak általában belefér 10 percbe, míg a teljes kiértékelés, a jelentés elkészítésével bezárólag ennél több idő.

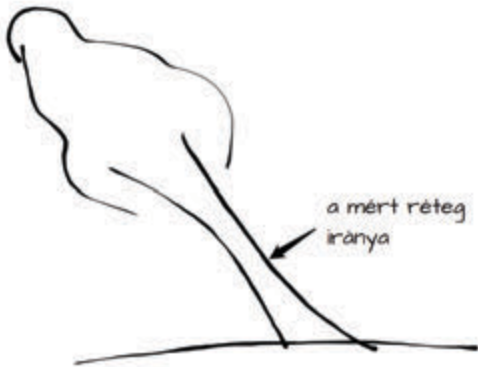
Természetesen, ha több réteget, vagy a talajról nem elérhető rétegben mérünk, a szükséges idő jelentősen megnő. A párokban való munkavégzés általában ideális a feladatok megosztása, párhuzamosíthatósága miatt.

Ha ugyanazt a fát több rétegben is mértük, akkor 3D-s képet is kaphatunk a rétegek tomogramjai alapján. (2.11. ábra)

#### A TOMOGRÁFIA AJÁNLOTT LÉPÉSEI:

- a vizuális értékelés alapján válassza ki a leggyengébb, legkockázatosabb réteget;
- döntse el, hogy lehetséges-e szabályos (kör, ellipszis) geometria használata, ha igen, mérje le a megfelelő adatokat (kerület,...) és helyezze az érzékelőket a program által kért helyekre;
- ha szabálytalan geometriát használ, helyezze fel az érzékelőket a törzs alakját követve, majd mérje le a megfelelő érzékelők távolságait;

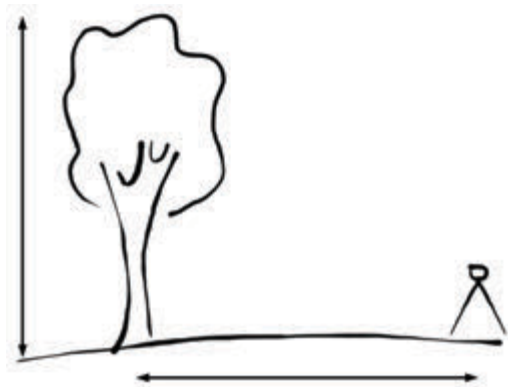
- a mért réteg legyen merőleges a törzs növekedésének irányára (ez általában vízszintes irányt jelent, de egy jelentősen megdőlt fa esetén a mért rétegnek is megdőntöttnek kell lennie).



2.12. ábra:

A mért rétegnek a növekedés irányára kell merőlegesnek lennie

- ellenőrizze, hogy az érzékelők elég mélyre vannak-e ütvve, hogy biztosan átérték-e a kárgen, hogy megfelelő-e az akusztikus csatolás
- távolítsa el a mérőszalagot
- csatlakoztassa a tápellátást (kábelekre és egyebekre lehet szüksége), kapcsolja be a műszert
- mérjen, minden érzékelőt/mérési pontot üssön meg legalább 3-szor (javasolt 5-ször ütni)
- a programban ellenőrizze a tomogramot, hogy meggyőződhesen a mérés sikerességéről
- azonnal értesítse a megrendelőt / tulajdonost, ha (a tomogram alapján) fennál a sérülés / károkozás kockázata
- mérjen másik réteget is, ha szükséges
- készítsen fotót, melyen az egész fa látszik. Legalább annyira messze menjen a fától, mint amilyen magas a fa, így csökkentve a távolságok torzulását



2.13. ábra:

A fotó legalább a fától olyan messziről készüljön, mint amilyen magas a fa

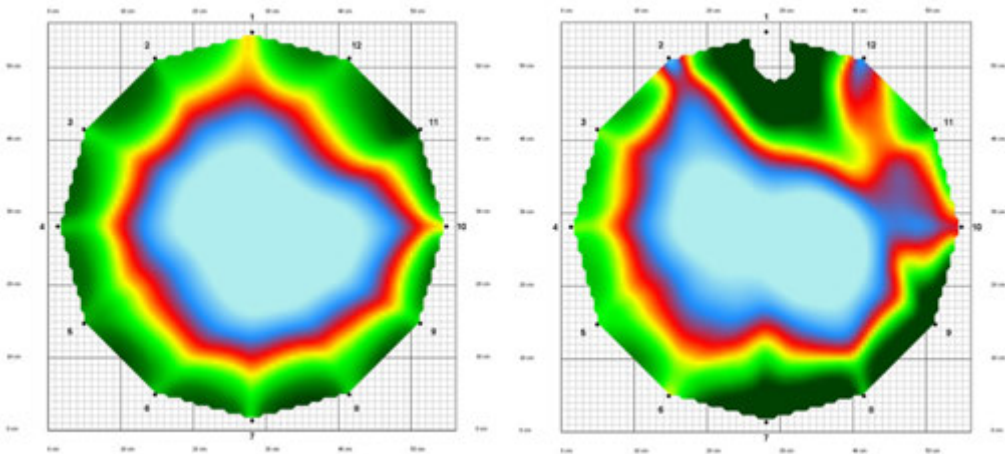
- kapcsolja ki az eszközt
- mentse el az adatokat
- bontsa le a mérési elrendezést és tisztítsa meg az eszközt
- menjen tovább a következő fához
- végezzen biomechanikai / biztonságossági becslést, ha szükséges és lehetséges (a használt szoftvertől függ)
- készítse és küldje el a jelentést a megrendelőnek / tulajdonosnak / hatóságoknak ...

## TANÁCSOK A TOMOGRÁF HASZNÁLATÁHOZ

- a megfelelő vizuális értékelés során döntse el, hogy szükséges-e tomográfiát végezni, vagy sem, számos esetben a fa állapota már a szemrevételezés során egyértelműen látszik, ilyenkor nem érdemes az időt erre a mérésre szánni
- ne mérjen tomográfiával, ha fagyott lehet a törzs / vázág. Az alacsony hőmérséklet a műszerre is hatással lehet, a kábelek merevebbé és sérülékennyé válhatnak.
- ne mérjen akusztikus tomográffal szakadó esőben
- ne mérjen akusztikus tomográffal ha a hőmérséklet 40°C felett van



- ne mérjen egyszerre ugyanazon a fán akusztikus és impedancia tomográfia. Egymás után végezze a két mérést
- a megfelelő akusztikus csatolás nagyon fontos, ügyeljen arra, hogy az érzékelőket elég mélyre verje, hogy azok áthaladjanak a kérgen és elérjék faanyagot (ahogy az a 2.5. ábrán látható)
- ha fém mérőszalagot használ, akkor mindenképpen távolítsa el azt még a mérés megkezdése előtt, ellenkező esetben a mérőszalagban is terjedhet a hang (jóval hamarabb elérhet egyik érzékelőről a másikra, mint a faanyagban), ez tönkre teheti a mérést
- amikor csak lehetséges, a valós geometriát használja. Az egyszerűsített geometriák kihatással vannak mind a korhadás mértékének, mind a biztonsági becslésekre
- ellenőrizze az elemet, mielőtt kimegy terepre, vigyen magával elég elemet
- ajánlott egy összehajtható asztalt is vinni, hogy erre tehesse a készüléket
- tartsa az érzékelőket tisztán, és sterilizálja őket, ha fertőzés veszélye áll fenn
- érdemes egy kis (gyógyszertári) alkoholt vagy benzint tartania magánál, hogy el tudja távolítani a gyantát az érzékelőkről
- az érzékelők/szögek vége kifejezetten hegyes lehet, legyen figyelmes mind a felhelyezés mind a leszedés során, hogy senki ne sérüljön meg
- ajánlott az egyes számú érzékelőt az északi irányban helyezni fel
- amikor nem talajszinten dolgozik, érdemes tablettel vagy okostelefonnal mérnie (ez a terepen máskor is praktikus lehet)
- mérés során minden érzékelőn / mérési ponton mérjen („koppintson”) legalább három alkalommal
- a nagyobb ágak vizsgálhatóak tomográfiaival, de biztonsági tényező ezekre nem számolható
- ha a törzs felhasadt, a számított biztonsági tényező jóval a valós felett lehet
- tartsa észben, hogy a szoftver csak a mért réteg(ek)ről rendelkezik információval, a biztonsági tényező(k) ez(ek)re a réteg(ek)re vonatkoznak, nem az egész fára
- mentse az adatait, nem minden szoftverben van automatikus mentés
- vegyen részt betanításon mielőtt önállóan kezdene tomográfiaival dolgozni.



2.14. ábra:

Egy korhadt fa tomogramja (balra), és ugyanez a mérés a fán felejtett fém mérőszalaggal (jobbra)





## 5. ELEKTROMOS IMPEDANCIA TOMOGRÁFIA

Az ötlet, hogy elektromos jeleket mérve kapjunk információt a törzs belső állapotáról, Alex Shigo-ig nyúlik vissza, aki megalkotta az úgynevezett shigométert. Ez az eszköz a törzs ellenállásáról adott információt, az eredmények értelmezése kifejezetten bonyolult volt.

Az elektromos impedancia vagy ellenállás tomográfiát a geofizikában már évtizedek óta sikeresen alkalmazzák, innen tért vissza a favizsgálat területére.

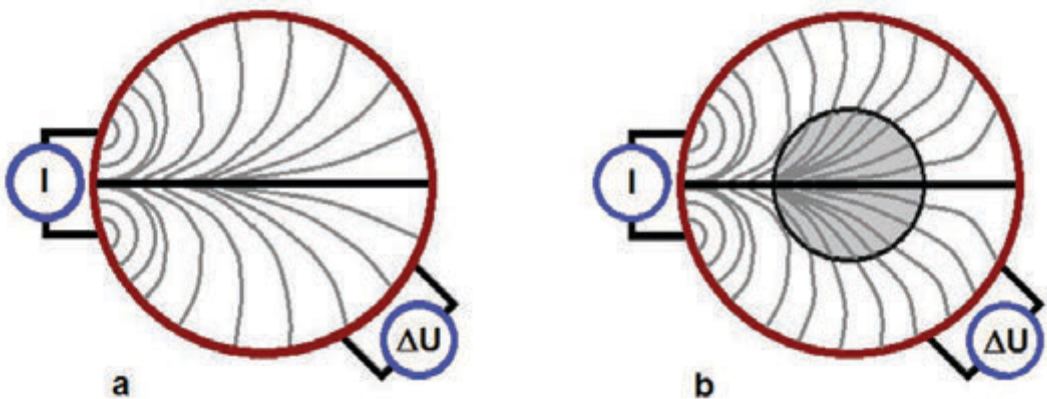
Míg az akusztikus jeleket elképzelhetjük egyenesek mentén, az elektromos erőter „vonalai” görbék, cylinder felületek. Az eredmények értelmezése is bonyolultabb. A tomogram pedig iterációs lépések sorozatán keresztül „készül”, vagyis az értékelő szoftver „kitalál” egy olyan helyzetet, tomogramot, amely esetén ugyanazt mérhettük volna, mint amit valóban mértünk is. Az impedancia tomográfia elsősorban az anyag

inhomogenitásait képes megtalálni (2.15. ábra). A mérés során elektródákat kell felhelyezni a törzsre (az elektródáknak át kell érniük a kérgen). Az elektródák közül kettőn keresztül áramot vezetnek a fába, míg másik két elektróda méri a feszültséget.

Az anyag inhomogenitásai megváltoztatják a mérhető feszültséget, ezek a változások több vagy kevesebb víz vagy ionok jelenlétére utalhatnak, álgesztesedésre, sérülésekre (pl. ághelyekre) vagy aktív gomba jelenlétre. A fa elszíneződése, anyagcseréje, gesztje és szijácsa tanulmányozható impedancia tomográfiával.

Ahogy maga a mért mennyiség, az elektromos ellenállás különbözik a hangsebességtől, a belőle kapható tomogram szintén jelentősen eltér az akusztikus tomogramtól.

Elektromos ellenállás tomográfiával a faanyag változásai „kaphatóak” el, követhetőek nyomon, akár már a változás olyan korai szakaszában, amikor a sűrűség nem változott meg. Például egy gombatámadás korai szakaszát ezzel a



2.15. ábra:

- Az ekvipotenciális vonalak sematikus ábrája egy impedancia tomográfiás mérés során. Az áramot, „I”, itt egy homogén anyagba vezetve látjuk, miközben a feszültséget mérjük („ $\Delta U$ ”). Az impedancia tomográfia során feszültségmérés „lépked” a törzs mentén. Vagyis a felrakott (pl. 16 db) elektródák közül egyszer valamelyik, adott kettő történik, aztán másik kettő között, az elektródák egyformák, szerepeik (vezet vagy mér) felcserélhetőek. A mérések alapján a mért anyag vezetőképesség vagy ellenállás térképe, tomogramja számítható vissza.
- Egy törzsen végzett impedancia tomográfia sematikus modellje. Az anyag változása az ekvipotenciális vonalak eltolódását, a mért feszültség megváltozását eredményezi.

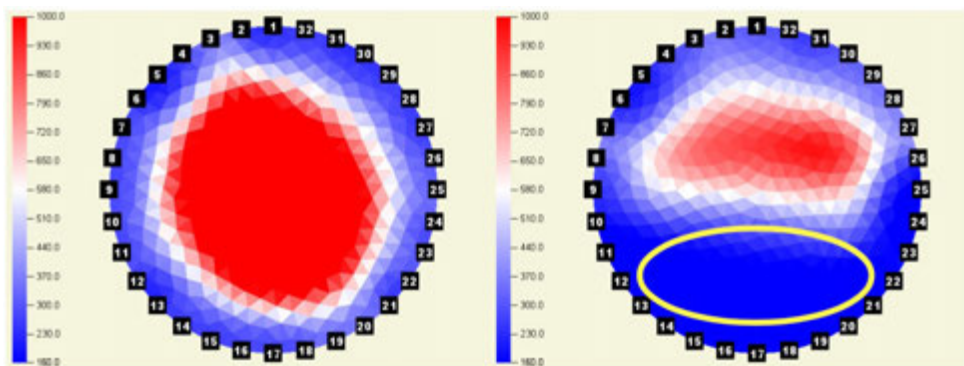


módszerrel már olyankor is észlelhetjük, amikor más tomogramon még nem jelenik meg változás. Ahhoz, hogy a változást észlelhessük, először az egészséges állapot mintáját kell megmérnünk. Ez a minta fafaj függő.

Nézzük meg egy mérés menetét (konkrét mérési eredmények, illetve az akusztikus és az elektromos ellenállás tomográfia eredményeinek összehasonlítása az esettanulmányok között található).

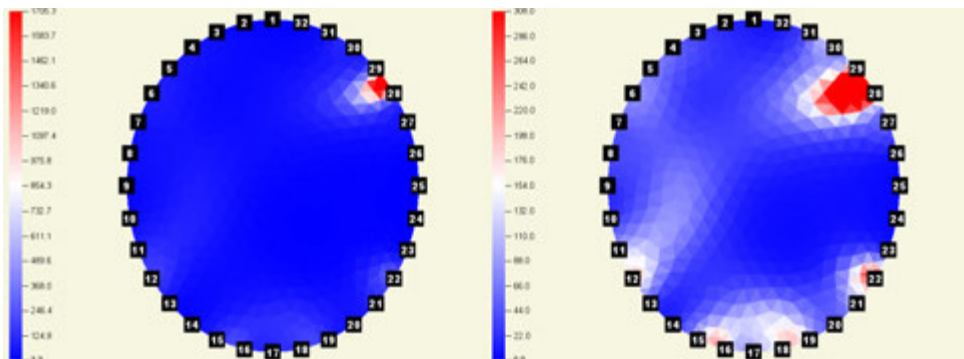
#### AZ IMPEDANCIA TOMOGRÁFIA LÉPÉSEI:

- válassza ki a vizsgálandó réteget (gombaferőtőzés állhat fent, göcsök lehetnek benne,...);
- helyezze fel a rozsdamentes acél elektródákat (szögeket) a törzsre, figyeljen arra, hogy átérjenek a kérgen;
- indítsa el a számítógépes programot;
- vigye be a programba az elektródák pozícióit (az impedancia tomográfia kifejezetten geometria érzékeny);



2.16. ábra:

Egészséges (balra) fenyő tomogramja, középen magasabb ellenállású területtel. Az ellenállás csökkenése (jobbra, a megjelölt terület) szabad ionok jelenlétére, ezáltal pedig valamilyen aktív gombatámadásra utal. Mindkét fa lucfenyő.



2.17. ábra:

Egy egészséges vadgesztenye tomogramja sebreakciókkal. (Az egészséges vadgesztenye impedancia tomogramja homogén, nincs a közepén magasabb ellenállású rész.) Bal oldalon a tomogram automatikus skálával (melynek végei 3,3 és 1705,3). Azért, hogy kiemeljük a sebzési reakciót, átállítottuk a skálát 0 és 308 közé, ez látható jobb oldali ábrán.

- helyezze a krokodilcsipeszeket a szögekre, csatlakoztassa a kábeleket;
- kapcsolja be a műszert és csatlakoztassa a számítógéphez;
- indítsa el a mérést, hagyja, hogy a program vezérelje a műszert, a mérés több percig is eltarthat;
- amikor a mérés véget ért, kapcsolja ki a műszert és mentse az adatokat;
- a program segítségével számítsa ki a tomogramot;
- hasonlítsa össze a mért tomogramot egy azonos fajú egészséges fa tomogramjával.

### GYAKORLATI TANÁCSOK AZ ELLENÁLLÁS TOMOGRÁFIÁS MÉRÉSEKHEZ:

- általában az automatikus skálával készült tomogramokat érdemes összehasonlítani, nem a tényleges mért értékeket (a konkrét értékek hőmérsékletfüggők)
- a skálát akkor érdemes átállítani, ha ki szeretnénk emelni egy érdekes részletet
- ez a technika nagyon geometria érzékeny, ajánlott minden esetben a valós (szabálytalan) geometriával mérni
- megfelelően töltött műszerrel érdemes csak mérni (lemerülőfélben lévő műszer teljesen fals adatokat is mérhet)
- a tomogramok csak akkor hasonlíthatók össze egymással, ha a mérő elektródák száma (és az úgynevezett maximális elektróda távolság) azonosak
- az ellenállás időszakosan változik (a hőmérséklet miatt), de ez a mintát nem befolyásolja 16 elektródával, kényelmes magasságban, egy réteg mérése kb. 15 percig tart.

## 6. ÁTLALÓK

A távolságok és a geometria mérése kifejezetten fontos mind a tomográfiák, mind az egy-vonalmenti mérések során.



2.18. ábra:  
Mechanikus átlaló

A műszeres vizsgálatok során legalább 0,5 cm-es pontosságú mechanikus vagy elektromos átlalók használhatóak az érzékelők közti távolság mérésére. (Természetesen az átlalóval, azok mérési tartományán belül, más távolságokat is mérhetünk, a fa átmérőjét, vagy, például ellipszisszerű keresztmetszetű fánál az ellipszis két tengelyét.)

A mechanikus átlalók viszonylag olcsó és praktikus eszközök a vonalmenti mérések során.



2.19. ábra:  
Elektromos átlaló használata



A favizsgálat során az elektromos átlalók használatának előnye, hogy általában Bluetooth-on keresztül csatlakoznak a mérést végző eszközhöz, számítógéphez vagy okostelefonhoz.

Ez a kapcsolat nagyban meg tudja gyorsítani a szabálytalan geometriák regisztrálást, hiszen az épp mért távolságot az átlaló karján lévő gomb megnyomásával vihetjük be (nem kell kézíleg írni be).

Néhány tanács az átlalók használatához:

- a megfelelő mérési tartományú átlalót használjuk
- az elektromos átlalót töltsük fel terepi munka előtt
- ne erőltessük az átlalót.

## 7. MÁS LEHETŐSÉGEK KORHADÁSOK ÉRZÉKELÉSÉRE

A bemutatott, viszonylag ismert és elterjedt módszereken kívül is van néhány fejlesztés a témakörben.

Az úgy nevezett fa radar, gyakorlatilag egy talaj radar vagy ahhoz hasonló eszköz törzseken való használata. Ilyen mérés során általában egy kézi radart szorítanak rá a törzsre és járnak körbe vele a vizsgált magasság(ok)ban. A különböző anyagok (pl. levegő) radar visszhangja eltérő, ez alapján tomogram-szerű képeket kaphatunk egy ilyen mérés során gyűjtött adatokból.

Többször próbálkoztak optikai módszerekkel is, infrakamerákkal a kéreghez közeli (2 cm-nél nem mélyebben lévő) üregek kimutatása sikerült. A törzs(ön lévő marker) mozgásának és deformációinak rögzítése is reménnyel kecsegtető kutatási terület, néhány esetben találtak összefüggést a mért adatok és a korhadás között.

Néhány technika, mint például hordozható CT-készülékek használata a törzs belső állapotának feltérképezésre, igen ritkán használt (általában a költségek miatt).

Fontos megjegyeznünk, hogy több műszergyártó cég foglalkozik a fejezetben bemutatott eszközökkel, a fejezetben látható képek és ábrák a működési alapelvek és a felhasználhatóság bemutatását célozzák. Az, hogy melyik a leginkább ismert cég, regionálisan változó, de ha kíváncsiak vagyunk a gyártókra, akkor a Fakopp, a Rinntech és az Argus Electronic honlapjai jó kiindulási pontot szolgáltatnak.



## Műszeres vizsgálatok: korhadás – esettanulmányok

### 1. AKUSZTIKUS TOMOGRÁFIA, 7 ÉVEN ÁT

2013-ban egy botanikus kertben, tuskógomba (*Armillaria mellea*) által fertőzött lucfenyőt (*Picea abies*) választottunk ki kutatási céllal. 2013 és 2019 között a fán akusztikus tomográfiát mértük, a talajszinttől mért 30, 100 és 170 cm-en. (A 2017-es adat elveszett.)

Meglepő lehet, hogy a korhadt terület a 30 cm-es rétegben még csökkent is pár évig, de ahogy a fa szélesítette magát, a keresztmetszet teljes területe többet tudott nőni, mint a viszonylag izolált korhadt rész.

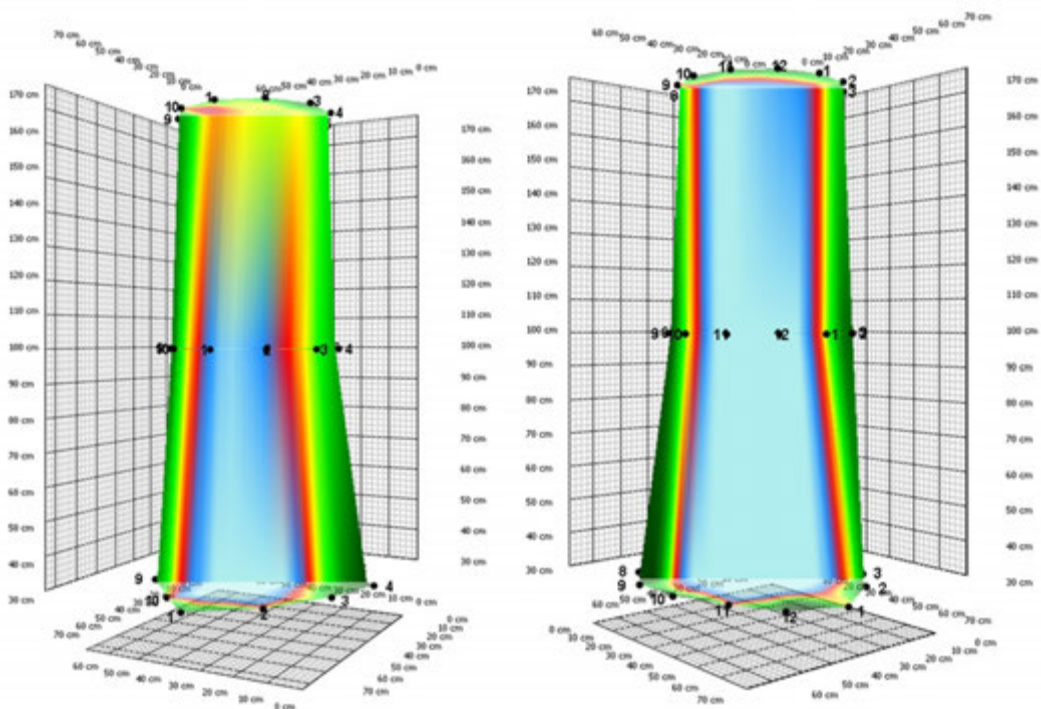


2.20. ábra:  
Gombatermőtestek a fa tövén

Height	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%

2.2. táblázat:

A mért korhadás mértéke a keresztmetszet területéhez viszonyítva



2.21. ábra:

A törzs 3D-s modellje 2013-ból (balra) és 2019-ből (jobbra). A korhadás függőlegesen erőteljesen tudott terjedni, míg 30 cm-en a keresztmetszetben alig lett nagyobb

A törzs törésére vonatkozó biztonsági tényező (120 km/órás széllekek mellett) 2018-ban, a 170 cm-es rétegben volt a legkisebb, 249%, ami azt mutatja, hogy a törzs ketté törésének kockázata viszonylag kicsi (legalábbis ebben a magasságban). A fa még mindig áll (2021 tavaszán), ékesen bizonyítva, hogy képes még ez ellen a veszélyes fertőzés ellen is védekezni.

cm) egy épület mellett áll, míg a platán (k=438 cm) egy ligetesebb rész közepén.

Mivel a mamutfenyők kérge 6-10 cm széles, ezért esetükben a 12 cm-es érzékelőkkel mértünk. Az első fa 1% korhadást mutatott, míg a második teljesen egészséges volt.

## 2. NAGY (350 CM FELETTI KERÜLETŰ) FÁK MÉRÉSE

A Soproni Egyetem botanikus kertjében 3 jókora fa, két mamutfenyőt és egy platánt mértünk meg, ellenőrzendő az állapotukat.

Az első mamutfenyő (k=380 cm) állományban áll, fák veszik körül, a másik mamutfenyő (k=472



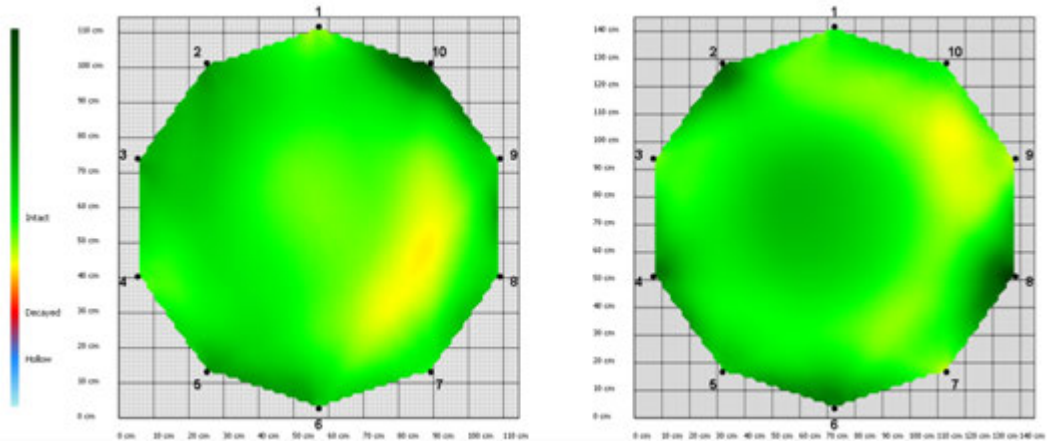
2.22. ábra:

Tomográfia egy mamutfenyőn

A platán fát a szokásos, 6 cm-es érzékelőkkel mértük, először kör, majd szabálytalan geometriával is.

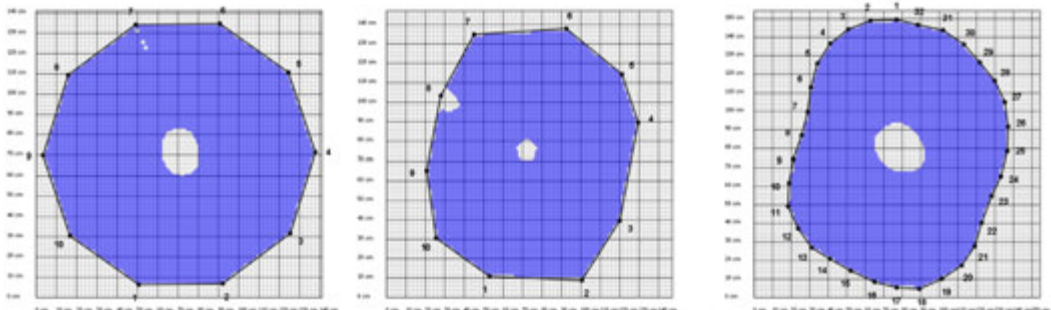
Néhány hónappal később 32 érzékelővel is megmértük a platán fát. (A 2.24. ábra mutatja a 10 és a 32 érzékelős mérések kiértékelését, a mért korhadás 1%-ról 4%-ra emelkedett a geometria és a felbontás pontosításával.)

A 32 érzékelős mérés egy műszer ellenőrzésére szolgált, a különböző mérések képeinek összehasonlítása így is érdekes, annak ellenére, hogy a korhadás viszonylag kicsi és központi elhelyezkedésű.



2.23. ábra:

Az első (balra) és a második (jobbra) mamutfenyő tomogramja



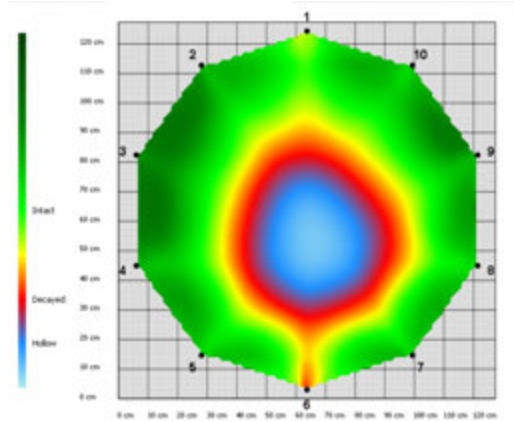
2.24. ábra:

A korhadás becsült mértéke a platán fán



### 3. HATALMAS, KORHADT FÁK (400 CM FELETTI KERÜLETŰ)

Az akusztikus tomográfiát fizikailag a csillapítás korlátozza, hiszen a generált jelnek el kell jutnia az érzékelőig. A különböző faanyagok különböző tulajdonságokkal bírnak. A legnagyobb, tomográfiával mért fák kerülete meghaladja a 10 métert. Ha a fa még korhadt is, az akusztikus jel „megkerüli” a korhadt részt, vagyis hosszabb úton halad, jobban gyengül, vagy akár el is tűnik. Három példát gyűjtöttünk ilyen mérésekre. Az első egy tölgy, egy hotel mellett, az erdő szélén áll (Sopron). A mérési magasságban a kerület 402 cm, a korhadás a keresztmetszet 33%-át tette ki.

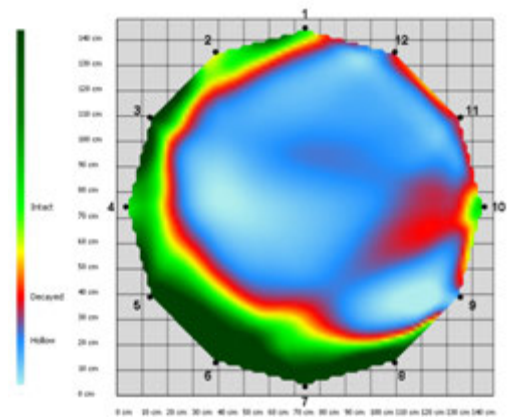


2.26. ábra:  
A tölgyfa tomogramja



2.25. ábra:  
A mérés épp befejeződött, a tomogram az okostelefon kijelzőjén látható

A második fa egy parkban álló nyárfa (Hidegség). Itt a mérési magasságban a kerület 448 cm, a korhadt terület aránya pedig 76% volt. A harmadik fa egy másik nyárfa, mely egy út mentén áll (Nagylózs). A koronát feltűnően viszszavágták a fa állapota miatt. A mérési magasságban 664 cm volt a kerület (az átmérő kicsit 2 méter felett volt) és 82% volt a korhadt terület aránya.



2.27. ábra:  
A hidegségi nyárfa tomogramja

Miután ez a mérés is sikerült, tomogram, illetve biomechanikai kiértékelés is készült. A biztonsági tényező extrém magas (1000% feletti) értéket mutatott, ami a koronacsökkentés eredménye.

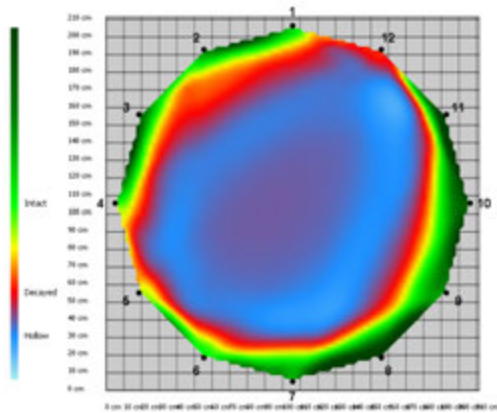


2.28. ábra:  
A nagylózsi nyárfa

Mind a két törzsön készült tomogram, melyek 47% és 55% közötti korhadt területeket mutattak (három rétegben, 65, 75 és 100 cm-en történtek a mérések).



2.30. ábra:  
A villás elágazású fa mérése



2.29. ábra:  
A nagylózsi nyárfa tomogramja

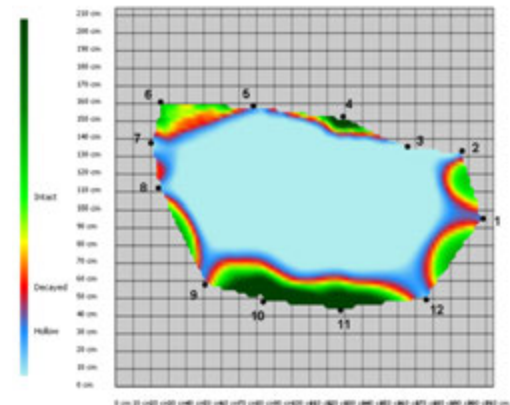
#### 4. EGY VILLÁS ELÁGAZÁS TOMOGRAMJAI

Ebben az esetben, a tulajdonos kérésére vizsgáltuk meg egy villás elágazású tölgyet (véltetően egy jól megnőtt tuskósarj), mely közvetlenül egy épület mellett áll.

Az alapot (30 cm-es magasságban) kétféleképpen vizsgálták meg. Először az egész alapot egyben mérték, utána pedig külön a villa két ága alatti részeket.

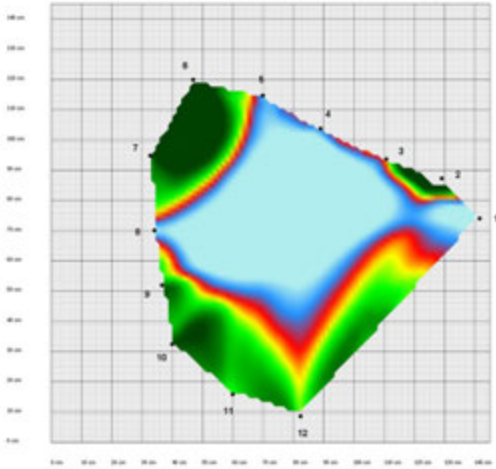
Amikor egyben mérték az alapot, a korhadt terület 86%-ot ölelt fel.

Amikor külön mérték a két részt, a korhadt terület aránya mindkét esetben 63% volt.

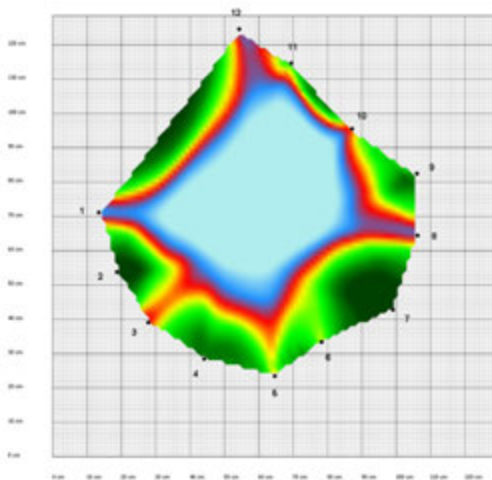


2.31. ábra:  
A villa alatti rész tomogramja

Valószínűleg kéreg található a két villa alatti rész közepén, az egyben mérés ezért becsülte túl a korhadás méretét, mert az akusztikus jelnek meg kellett „kerülnie” a kéreg benövését.



2.32. ábra:  
A bal oldali rész tomogramja

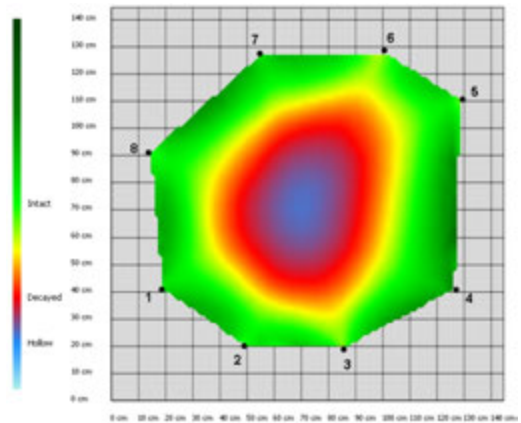


2.33. ábra:  
A jobb oldali rész tomogramja

## 5. RÉSZBEN FAGYOTT TÖRZS

Egy park fenntartója tomográfiát is magába foglaló favizsgálatot rendelt. A hőmérséklet nulla fok alatt volt (ahogy a megelőző napokban is), a parkot hó és jég borította.

Mivel sürgették a vizsgálatot, megtörtént a vizuális felmérés (kb. 5 méter magasan egy korábbi nagyméretű ág eltávolítása után maradt metszlapja nagyrészt bekorhadt) és akusztikus tomogram is készült, 95 cm-es magasságban, mely ekkor 41%-nak mutatta a korhadt részt.

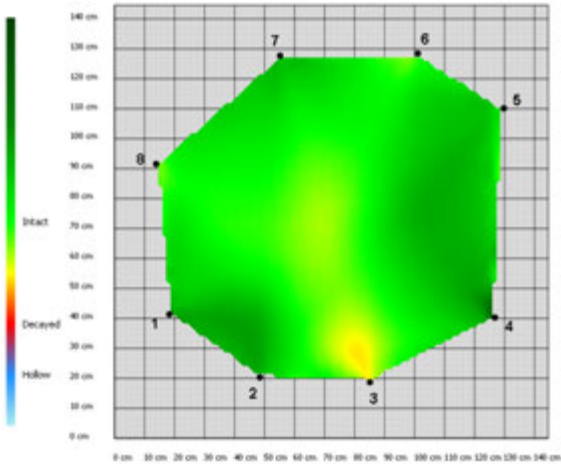


2.34. ábra:  
A törzs tomogramja, 95 cm-en,  
részben fagyott állapotban

A favizsgáló szakember véleménye alapján a fát újra megvizsgálták, kb. 2 héttel az első vizsgálat után, amikor a hőmérséklet már több napja melegebb volt, vagyis az volt várható, hogy a törzsben lévő víz már nem fagyott. Az érzékelőket pontosan ugyanoda helyezték. A megismételt mérés csupán 1%-nyi korhadást mutatott.

A jelenség magyarázata: a törzs külső része fagyott volt az első mérés idején. Így ott, akkor az akusztikus jelek gyorsabbak voltak. (Ezt bizonyítja a sebességek ellenőrzése is, az első mérés során 2000 m/s körüli értékeket találunk a



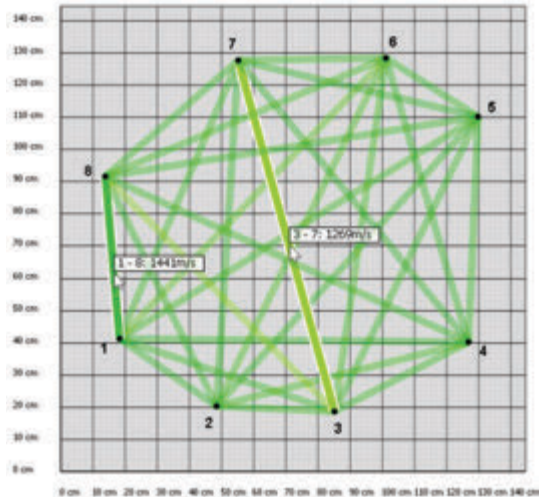


2.35. ábra:

A törzs tomogramja, 95 cm-en,  
„normál”, nem fagyott állapotban

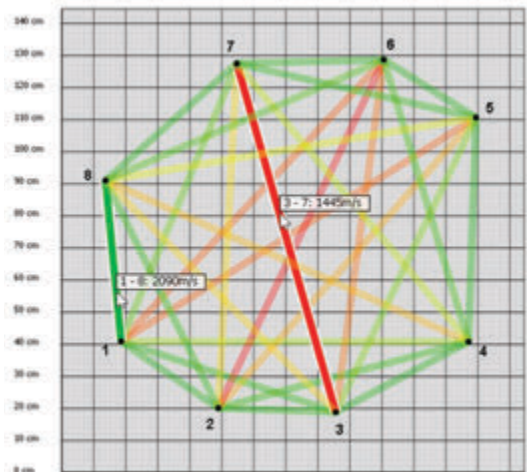
törzs szélein, míg egészséges platán fában csak 1300-1400 m/s-nak kellene lenniük). A fagyott külsőhöz képest valóban lassabbak voltak a törzs közepén átmenő jelek (1400 m/s körüli sebességekkel), emiatt tűnt korhadtnak a fa. Hasonló helyzet „visszafele” is előfordult már, amikor egy korhadásban víz volt, megfagyott, a tomogram nem mutatott korhadást. A (melegebb időben) megismételt mérés már kimutatta a korhadást.

Megjegyzés a fejezetben bemutatott esethez: a visszakorhadt metszlap miatt a fa 2 méter felett már korhadt volt, de a mérés időpontjában a korhadás még nem ért le a 95 cm-es rétegig.



2.37. ábra:

A második, nem fagyott állapot beli mérés gráf nézete. A sebességek az egészséges faanyagénak megfelelőek. (Érdemes észben tartanunk, hogy az egészséges faanyag beli hangsebesség fafajfüggő.)



2.36. ábra:

az első mérés gráf nézete, melyen jól látszik, hogy a fagyás miatt a szélső sebességek nagyobbak, mint ahogy az egészséges fában várható lenne



## 6. MIÉRT NE KOPPINTSUNK A TOLLUNKKAL?



2.38. ábra:  
A kísérlet során koppintásra használt eszközök



2.39. ábra:  
A kontroll mérés

A Főkert (mely Budapesten kb. 700 ezer fát kezel) favizsgálói egy érdekes ötlettel álltak elő annak kiderítésére, hogy mi történik, ha éppen nincs náluk a fém kiskalapács, és azzal koppintanak, amit épp találnak. Kísérletükbe 12 különböző eszközt vontak be.

A tomográfhoz tartozó fém kalapáccsal kontroll mérést készítettek. A többi „koppintó”:

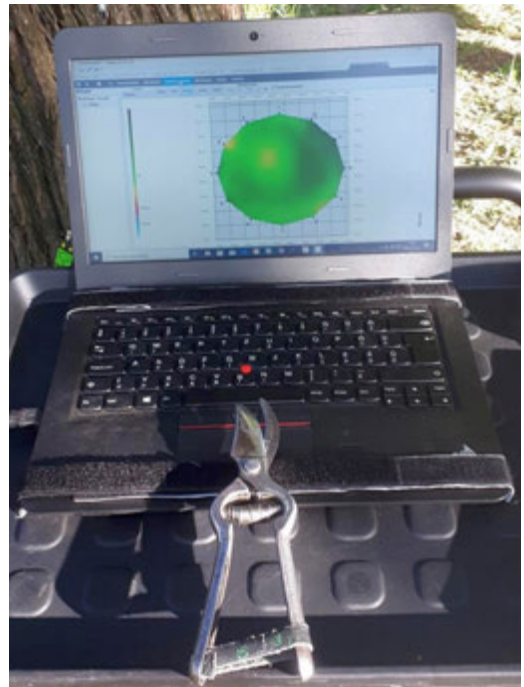
- zselés toll;
- karosszéria lakatosok által használt (általunk az érzékelő beütésére használt) 'Wiha' kémélőkalapács gumi feje;
- a karosszéria lakatosok által használt 'Wiha' kémélőkalapács „Superplastik” műanyag feje,
- alumínium fejű kalapács;
- bronz fejű kalapács;
- „SK kalapács” - 'Simplex 300' kémélő kalapács műanyag fejébe illesztett és PE műanyaggal beforrasztott kb. 12×12×30 mm acél hasáb (félbevágott 150 grammos acélkalapács fej);
- 'Simlex 300' kémélő kalapács nyele – anyaga lakkozott fehérakác;
- fakalapács – anyaga kőris;



2.40. ábra:  
A legrosszabb mért tomogram, a zselés tollal koppintva készült



2.41. ábra:  
Az „SK kalapács” ütéseivel mért tomogram  
(fent) és a kalapács feje (lent)



2.42. ábra:  
A metszőollóval “készült” tomogram

- fenyőléc – a műszer érzékelőinek tartóléce anyaga fenyő;
- PE műanyag forrasztórúd;
- 'Kunde' acél metszőolló.

A kontrollhoz képest a legrosszabb hangsebességeket, és tomogramot a zselés toll használatkor mérték. Fakalapáccsal vagy a fenyőléccel mérni sem a legjobb ötlet.

A hangsebességek valamivel jobbák voltak a gumi, a bronz, és a műanyag fejű kalapáccsokkal, illetve a forrasztórúddal. Míg az alumínium fejű kalapáccsal és a metszőollóval készült mérések már alig mutattak eltérést az eredetihez képest. A legjobb koppintónak (ha az eredeti fém kiskalapács nincs kéznél) az „SK kalapács” fém feje bizonyult.

## 7. EGY SEBZÉSI REAKCIÓ VIZSGÁLATA

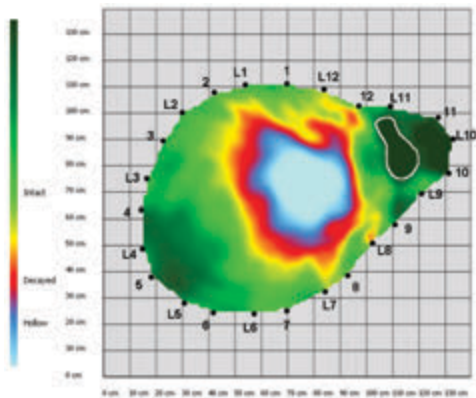
Néhány évvel ezelőtt fagyási sérülést szenvedett egy, botanikus kertben álló platán fa.



2.43. ábra:

A vizsgált platán, a sérülés fölé nőtt rész pirossal jelölve

A fát tomográfiával vizsgálva korhadást találtunk. A mérést pontosabb geometriával ismételtük meg, megnézendő, hogy mennyivel kaphatunk pontosabb képet a korhadt területről. A második tomogram nem csak a korhadásról adott részletesebb képet, de a megerősített faanyag is megjelent rajta, pontosan a korábbi sebzés fölé nőtt részen.



2.44. ábra:

A részletes tomogram, a sebzési reakció bejelölésével

## 8. EGY PARKOLÓ BÉLI FA BIZTONSÁGOSSÁGA

Egy sudártörtött platán fa állt egy parkoló mellett.



2.45. ábra:

A sudártörés

A korhadás jól látszott a tomogramon, ami alapján, a fáról készült fénykép segítségével, a törzs törésére vonatkozó biztonságosságot lehetett becsülni.

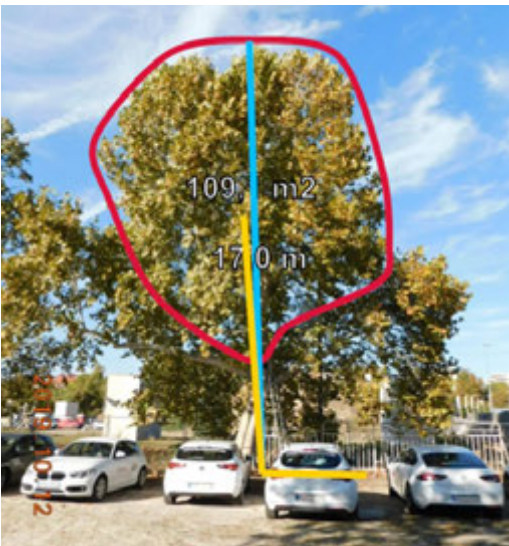
A biztonsági tényezőhöz a szélterhelést az EN1991 európai szabvány szerint végezték, így 70%-ra adódott. A kockázat csökkentése érdekében a koronaterület csökkentését szimulálták. A biztonsági tényező csak egy kicsit, 80%-ra emelkedett a szimuláció során. Az EN1991 szabvány egyre nagyobb szélteherrel számol, minél magasabban vagyunk, így, ha a korona felsőbb részei maradnak meg, akkor a terhelés nem csökken eléggé.





2.46. ábra:

A koronaterület kijelölése  
a biztonságossági becsléshez



2.47. ábra:

Koronaterület csökkentési szimuláció

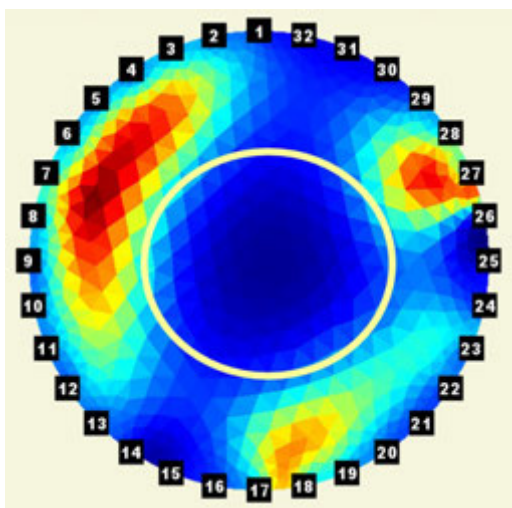
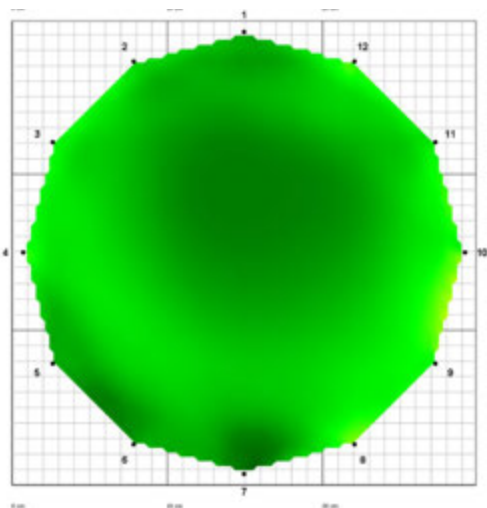
## 9. AZ AKUSZTIKUS ÉS IMPEDANCIA TOMOGRÁFIA ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Impedancia tomográfiával aktív, éppen zajló gomba támadásokat találhatunk meg, így jelezve vagy mutatta meg előre egy korhadást, még azelőtt, hogy az láthatóvá válna az akusztikus tomogramon. Másrészt az impedancia tomográfia alátámaszthatja azon gyanúkat, hogy a gomba (még mindig) jelen van egy korhadat területen.

A Göttingeni Egyetemen folyt kísérletek során impedancia tomográfiával fehér korhasztó gombák kimutatása is sikeres volt (Bieker et al., 2009). Mivel a fehér korhasztó gombák a lignint „eszik meg”, miközben a cellulóz megmarad, egy akusztikus jel jelentősebb lassulás nélkül tud áthaladni az anyagon, így az ilyen korhadásokat az akusztikus tomográfia kevésbé mutatja, főleg, ha annak korai szakaszáról van szó.

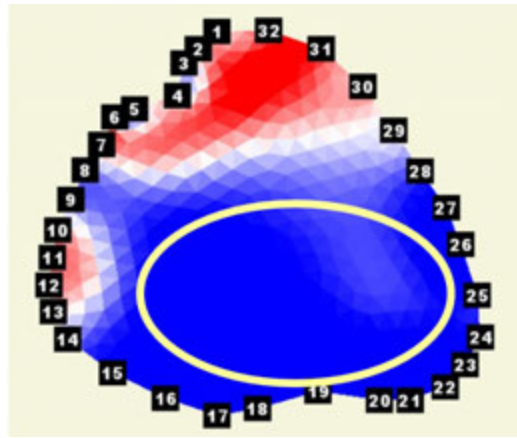
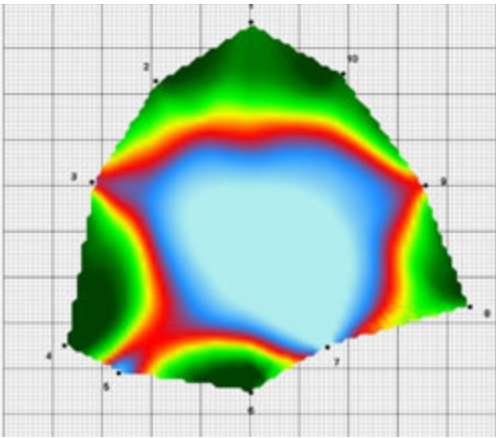
Fenyőn, kőrisen, nyárfán, gesztenyén, cédruson és tölgyön mérve is hasonló jelenség jelent meg.





2.48. ábra:

Egy tuskógomba által támadott kőrisfa (balra fent), a gomba termőtestei (jobbra fent). A fa láthatóan rossz állapotban volt a mérés idején (elvesztette koronáját). Az akusztikus tomográfia nem mutatott korhadt vagy problémás területet (balra lent). Az impedancia tomogramom (jobbra lent) viszont megjelent egy központi, alacsony ellenállású terület (kiemelve a képen), ami gomba jelenlétére utal.



2.49. ábra:

Az akusztikus tomográfia jelentős korhadást mutat (balra). Az impedancia tomográfia eredménye (jobbra) szerint alacsony ellenállású részek találhatóak a törzsben, melyek szabad ionokra, aktív gombatamadásra utalnak. A mérés lucfenyőn történt. (Egészséges esetben a tomogram a 2.16. ábraihoz hasonlítana.)

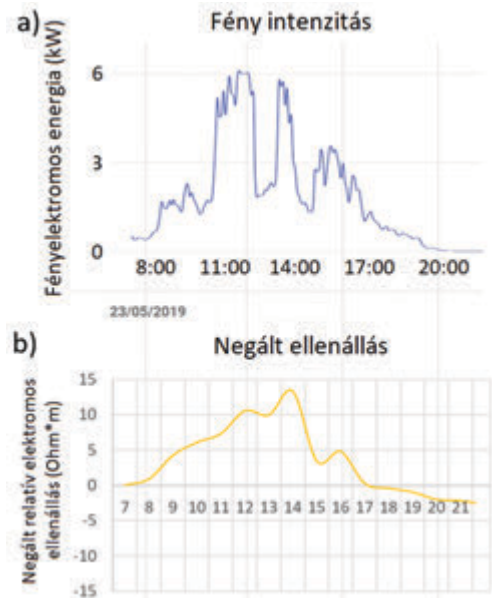
## 10. TRANSPORT AKTIVITÁSI MÉRÉS – AZ IMPEDANCIA TOMOGRÁFIA EGY KÍSÉRLETI ALKALMAZÁSA

Amikor a fa „ébred” van, a gyökérzet és a lomb között transzport folyik, különösen igaz ez tavasszal, a levelek növekedése közben.

25 órán át óránként mértünk egy bükkfát impedancia tomográfiával. Természetesen maga a tomogram, annak mintája gyakorlatilag nem változott – a gombák nem terjednek ennyire gyorsan. De a mért értékek változtak kicsit, ezeket a fényintenzitással vetettük össze, és azt találtuk, hogy az ellenállás követi a fényintenzitás változásait.

Mivel az ellenállás csökkent, amikor a fényintenzitás nőtt, a könnyebb összehasonlíthatóság érdekében a (relatív) ellenállás értékek mínusz egyszeresét vettük.

A fa vitalitásának mérése felfutóban lévő kutatási terület, meglehet, hogy egy nap ezt a technikát is fogják használni a mérésére.



2.50. ábra:

A fényintenzitás változása (a) és az azt követő (negatív) ellenállásváltozás (b). Az x-tengelyen az idő, órákban (reggel 7-től). (A grafikon csak a nappali időszakot mutatja, a mérés maga 25 órán át zajlott.)

## *Műszeres mérések – a korhadás detektálásának határai*

Az akusztikus technikák alapja az a jelenség, hogy a hangjel „kerülő úton” megy, hosszabb idő alatt éri el az érzékelőt, ha korhadás, vagy más, stabilitást csökkentő helyzet (pl. repedés) van jelen, mintha egészséges faanyagban haladna. Ahogy már korábban említettük, fehér korhasztó gomba esetén a hanghullám akár az egészséges helyzetnek megfelelő sebességgel is haladhat, amiből a szakembert félrevezető tomogram állhat elő. Hasonló történhet, ha lárvák vagy bogarak eszik a faanyagot, az akusztikus jel minimális késedelemmel érkezik még akkor is, amikor már igen sok luk, járat van a fában. Félrevezető lehet az is, ha nem csak faanyag van jelen, például, ha egy korhadást betonnal öntöttek ki, vagy ha a fa „körbenőtt” egy oszlopot, kerítést vagy akár egy épület egy részét. Az ilyen helyzetek a fagyott esethez hasonlíthatnak, a hang kifejezetten gyorsan haladhat a nem fa elemekben, melyeket aztán a tomogram egészséges faanyagként mutathat.

Néha pont fordítva történik, ha hang annak ellenére halad lassabban (és ezáltal a tomogram korhadást mutat), hogy nincs jelen (kiterjedt) korhadás, hanem repedés, gyűrűs repedés vagy benőtt kéreg található a fában. Biztonságossági szempontból ez utóbbiak nem vezetnek félre a szakembert, hiszen egy repedés kb. annyi teherbírás veszteséget hoz, mintha (kiterjedtebb) korhadás lenne a faanyagban.

## *Műszeres mérések – A használat előnyei*

Az előnyök első pillantásra láthatóak – a tomogramok több információt adnak a törzs belsőjének állapotáról, mint akármilyen vizuális értékelés. Még egy gyors, egy vonalmenti mérés is kimutathat egyébként láthatatlan, ám már komoly sérülést, ezzel segítve a vagyontárgyak megóvását és a sérülések elkerülését. Másrészt a tomogramok könnyen bemutathatóak, megoszthatóak, az ábrák segíthetik a helyzet megértését és a faápolási munka kommunikációját.









# III.

## Műszeres vizsgálat: állékonyság

Városi környezetben fontos szempont a fák állékonysága. A fák jó szolgálatot tesznek: árnyékolnak, lefogják a szelet, gyönyörködtetik a szemet és megnyugtatják a lelket, javítják a levegő minőségét, és csökkentik a hőmérsékletet. Sajnos azonban a városi fák időnként veszélyt is jelentenek. A letört ágak, kitört törzsek vagy a kidőlés nem csak kellemetlenséget és költséget jelentenek. Jelentős kárt is okozhatnak a köz- és magánvagyonban, és személyi sérülések, szélsőséges esetekben akár halálesetek is előfordulhatnak. A fák állékonyságának és biztonságának vizsgálata tehát elengedhetetlen az ilyen súlyos problémák megelőzéséhez. Ebben a fejezetben részletesen leírjuk a fák állékonyságának két vizsgálati módszerét. Ezeket az első fejezetben leírt biomechanikai alapelvek alapján fejlesztették ki. Bemutatjuk az alapvető koncepciót, a gyakorlati eszközöket és a hagyományos húzóvizsgálatok, valamint az újabb, dinamikus vizsgálatok kivitelezését és kiértékelését. Tárgyaljuk a kétféle módszer megbízhatóságát, előnyeit és hátrányait is. Végül megvizsgálunk néhány olyan tényezőt, amelyek hatással vannak a fák állékonyságára és annak vizsgálatára, amelyeket nem árt szem előtt tartani a mérések és az eredmények értékelése során.

### 1. A FÁK ÁLLÉKONYSÁGÁRÓL ÁLTALÁBAN

A fák kidőlésének fő, ha nem a kizárólagos oka a koronát érő vízszintes szélterhelés. A fák hasonlóan működnek egy befogott tartóhoz, amelyben a szélterhelés hatására hajlító feszültségek ébrednek, amelyek a törzs töréséhez vezethetnek, vagy kihúzzhatják a földből a fát lehorgonyzó gyökereket. Az állékonyságvizsgálat célja, hogy meghatározzuk ezeknek a valószínűségét.

Alapvető kérdés, hogy pontosan mit is értünk a fák biztonsága alatt. Mit jelent az, ha azt mondjuk, hogy egy fa biztonságos?

Elsőre nyilvánvalónak tűnhet a válasz: a fának semmilyen körülmények között sem szabad kidőlnie vagy kitörnie. Ez azonban lehetetlen elvárás; kellőképpen jelentős szélterhelés hatására még a legbiztonságosabb fák is kidőlhetnek. A fák állékonyságát mindig a várható legnagyobb szélerősség alapján határozzuk meg, és a biztonságot mindig egy ún. referencia szélesebbséghez (az adott földrajzi területen várható maximális szélesebbséghez) viszonyítva értékeljük.

Ahogy az első fejezetben már láthattuk, a fák állékonyságát a fát érő legnagyobb várható szélterhelés és a fa törése vagy kidőlése nélkül elviselhető legnagyobb terhelés összehasonlításával értékeljük. Egyszerűen megfogalmazva, ha az előbbi magasabb, mint az utóbbi, erős szélben a fa könnyen kitörhet vagy kidőlhet, tehát nem biztonságos.

Ez elméletben elég egyszerűnek tűnik. Sajnos azonban mind a várható maximális szélterhelés, mind a fa által elviselhető, ún. kritikus terhelés meghatározása során több probléma és bizonytalanság felmerül. Ezeket a nehézségeket részletesen bemutatjuk a húzóvizsgálatról szóló fejezetben.

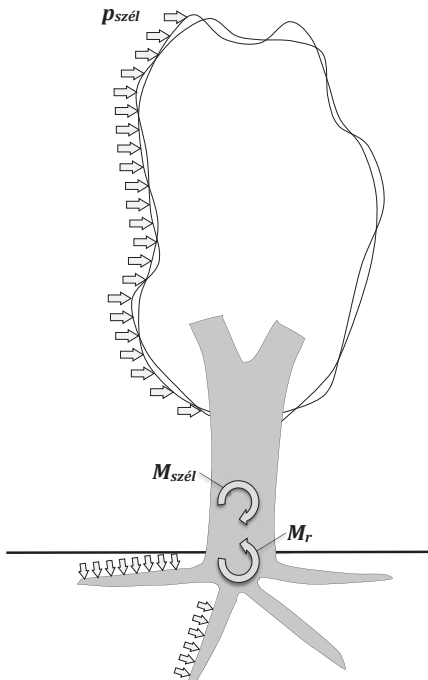
Az egyik probléma, ami a fák állékonyságának a kérdését bonyolítja, az, hogy a szélterhelés nem állandó, statikus terhelés. Különösen viharos időben a szél csendesebb időszakokkal tarkított lökések formájában érkezik. A fák szerkezete összetett, és az ilyen rendszertelen dinamikus terhelésben sokszor kiszámíthatatlanul viselkednek. Ezért a hagyományos állékonyságvizsgálati módszer (azaz a húzóterhelés) statikus méréseken alapul. A húzóvizsgálat könnyebben irányítható, és az eredmények kiszámítása is egyszerűbb, de rosszabbul jellemzi a fák viselkedését dinamikus szélterhelés hatására. Ma már létezik olyan módszer, amivel a fák valós

szélterhelésben vizsgálhatók, és statisztikai módszerekkel értékelhetők. Mindkét módszer lényegét, előnyeit és korlátait be fogjuk mutatni a következő fejezetekben.

## 2. A HÚZÓVIZSGÁLAT

A húzóvizsgálat egy roncsolásmentes, kíméletes állékonyságvizsgálati módszer, amelyet Wessolly és Sinn kutatásai alapján fejlesztettek ki (Sinn, 1983, Wessolly, 1991).

Amint az első fejezetben olvashattuk, a húzóvizsgálat során egy kábelt rögzítünk a fa koronájában (lehetőleg a középpontjához közel), és azon keresztül fokozatosan növekvő, oldalirányú terhelést fejtünk ki, miközben folyamatosan mérjük a gyökérfő dőlését és/vagy a fatörzs alakváltozását. Az állékonysági biztonságot a dőlési, a törési biztonságot pedig a deformációs adatok alapján lehet értékelni.



3.1. ábra:

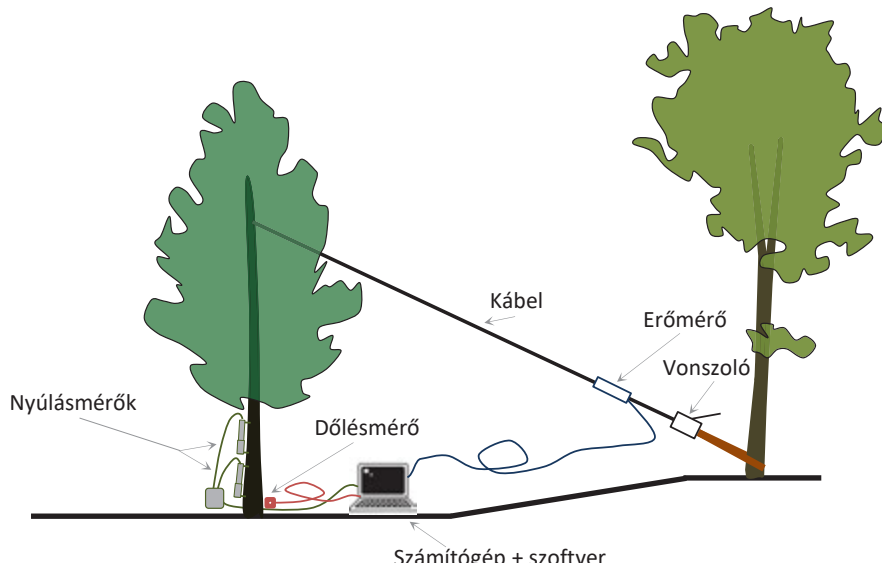
A szélterhelés ( $M_{szél}$ ) és a rögzítési nyomaték ( $M$ ) egyensúlya

### A. ESZKÖZÖK

A 3.2. ábra mutatja a húzóvizsgálat tipikus mérési elrendezését, és a rendszer fő részeit.

#### KÁBEL ÉS VONSZOLÓ

Az oldalirányú terhelést megfelelő hosszúságú (általában legalább 20 méteres) és terhelhető fém vagy műanyag (pl. dyneema) kábel segítségével hozzuk létre. A fa méreteitől, és a kábel rögzítési pontjának magasságától függően a lombkoronában jelentős húzóerőre lehet szükség a megfelelő dőlés vagy alakváltozás eléréséhez. Ehhez egy olyan vonszolóra van szükség, amely megsokszorozza a kezelő által kifejtett erőt, és megfelelő húzóerőt hoz létre a kábelben. Mind a kábelnek, mind a vonszolónak elég erősnek (általában 1,5 – 3,5 tonnásnak) kell lennie, hogy kibírja a húzóvizsgálat során ébredő erőket.



3.2. ábra:  
A húzóvizsgálat mérési elrendezése és a rendszer főbb részei



3.3. ábra:  
A húzóerő kifejtéséhez használt kábel, vonszoló és heveder

A kábelt a lombkoronában kell rögzíteni (a fatörzshöz, vagy egy nagyobb ághoz), a vonszolót pedig egy talajhoz közeli ponthoz (gyakran egy másik fa törzséhez) kell erősíteni. Mivel jelentős terhelések ébrednek, a kábel könnyen megsértheti a fá(ka)t. Ennek megelőzésére a fákhöz való rögzítéshez széles, puha hevedereket vagy köteleket használunk.



3.4. ábra:  
A fákat hevederek alkalmazásával védjük.



3.5. ábra:  
A heveder teherbírásának ellenőrzése

A hevedernek vagy kötélnek nyilván szintén elég erősnek kell lennie, hogy elviselje a kábelben ébredő erőket. A húzóvizsgálathoz alkalmazott hevederek teherbírása minősített; a teherbírást a vizsgálat előtt ellenőrizni kell.

### ERŐMÉRŐ

A kábelben ébredő erőnek (tehát a fa oldalirányú terhelésének) a pontos mérése alapvető fontosságú a terhelés-dőlés illetve terhelés-alakváltozás görbék felvételéhez, és ez által a fa biztonságának a meghatározásához. A húzóerőt egy kalibrált erőmérő cellával mérjük.

Az erőmérőt vagy a kábelre rögzítik, vagy a kábel és a heveder közé helyezik el. A műszer pontos, valós idejű terhelési adatokat szolgáltat megfelelő gyakorisággal (legalább 1 adat másodpercenként), amelyet a kiértékelő szoftver rögzít és megjelenít. Az erőmérőnek tartósnak, megbízhatónak és időjárásállóknak kell lennie.

### DŐLÉSMÉRŐ(K)

A fa állékonyság vizsgálatához a gyökérfő (azaz a fa töve) dőlésének a pontos mérésére van szükség. Fontos szempont a dőlésmérő eszköz megfelelő érzékenysége ( $\pm 0.001$  fok) és mérési tartománya.

A dőlésmérőt általában egy, a fa tövéhez csavarozott rögzítő elemmel erősítjük hozzá a gyökérfőhöz. A műszert egy szintező eszközzel



3.6. ábra:  
Kábelre szerelt, kalibrált erőmérő



3.7. ábra:  
A kábel és a heveder közé helyezett erőmérő (Argus Electronic GmbH)

(általában gömbcsuklóval) csatlakoztatjuk hozzá a rögzítő elemhez. A mérés során a dőlésmérőt kábelrel vagy Bluetooth kapcsolattal csatlakoztatjuk a számítógéphez. A műszer megfelelő gyakorisággal megküldi a dőlésértékeket a kiértékelő szoftvernek.

### NYÚLÁSMÉRŐ(K)

A törzs törés elleni biztonságának a meghatározásához a törzs deformációjának a mérésére van szükség. Ehhez nagyon érzékeny ( $\pm 0.001$  mm pontosságú) nyúlásmérő eszközre van szükség. Az alakváltozást vagy a kábel felőli, vagy az ellentétes oldalon mérjük (azaz a nyomott vagy a húzott oldalon, esetleg mindkettőn).





3.8. ábra:

A fa tővéhez rögzített dőlésmérők (fent: Argus Electronic GmbH illetve lent: FAKOPP Bt.)



3.9. ábra:

A dőlésmérőhöz használt rögzítőelem, kétirányú szintező csuklóval

Ehhez általában egy LVDT (Lineárisan Változó Differenciál Transzformátor) típusú nyúlásmérőt használunk. Az LVDT nyúlásmérők nagyon pontosan mérik a törzs relatív alakváltozását. Az LVDT nyúlásmérő egy álló házból és egy mozgó magból áll. Mindkettőt a fához kell

erősíteni, ezután a viszonylagos elmozdulásuk nagyon pontosan mérhető. A viszonylagos elmozdulás értékeket szintén a kiértékelő szoftverhez továbbítják, amely elkészíti belőle a terhelés-alakváltozást görbét.



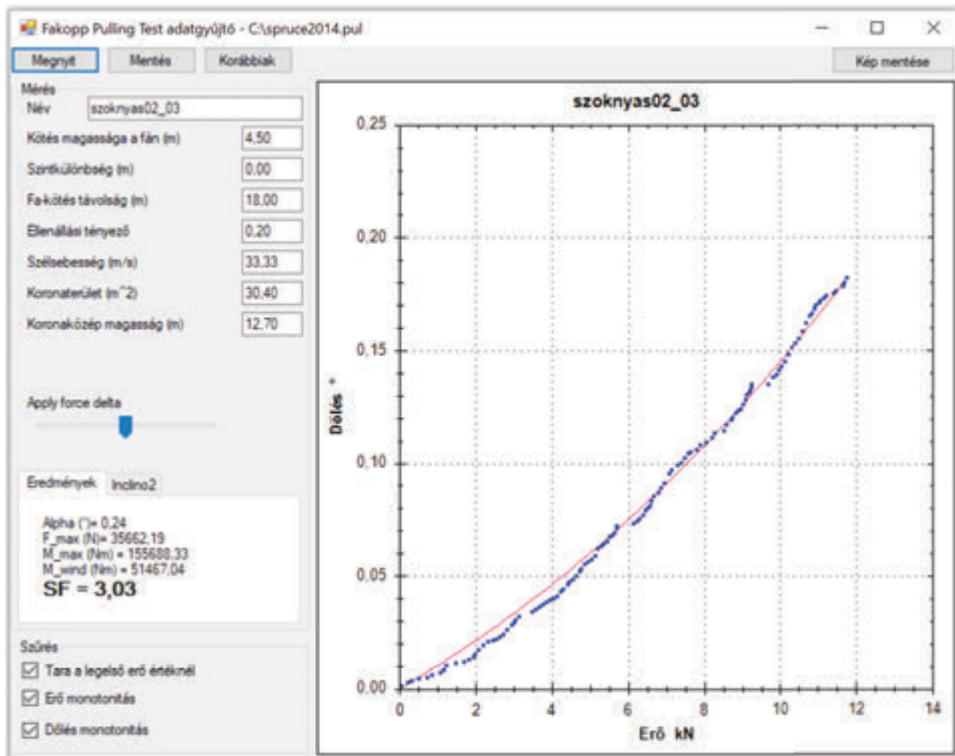
3.10. ábra:

A fa törzsére szerelt nyúlásmérő (Argus Electronic GmbH)



3.11. ábra:

Nyúlásmérő zárt (bal) és nyitott (jobb) állapotban (1 – kábel, 2 – ház, 3,4,5 – rögzítő mechanizmus, 6 – mozgó mag) (FAKOPP Bt.)



3.12. ábra:

A húzóvizsgálati szoftver képernyője a mérési adatokkal

## SZÁMÍTÓGÉP ÉS HÚZÓVIZSGÁLATI SZOFTVER

A vizsgálat végrehajtásához és az eredmények értékeléséhez megfelelő számítógépes szoftverre van szükség. A piacon többféle húzóvizsgálati szoftver is elérhető (általában a húzóvizsgálati eszközökkel együtt szállítják). A szoftver a típustól függően az alábbiakra alkalmas:

- A vízszintes terhelés kiszámítása a beírt geometriai paraméterek alapján;
- Valós idejű terhelés-, dőlés- és nyúlásmérés;
- Terhelés-dőlés és terhelés-alakváltozás görbék létrehozása;
- Automatikus biztonsági tényező számítás kidőlésre és törésre, a beírt geometriai paraméterek, ellenállástényező, elasztikus

határérték és referencia szélesség értékek alapján;

- Jelentés generálása, vagy az adatok exportálása táblázatos formában.

Az adatok valós idejű gyűjtése és értékelése fontos a vizsgálat során, mert ebből tudjuk, hogy mikor kell leállítani a mérést, hogy ne okozunk kárt a fában. Ehhez hordozható számítógépre (laptopra vagy tabletre) van szükség, amely fogadja az adatokat és jelzi a kezelő számára, hogy állítsa le a mérést, a megfelelő dőlés vagy alakváltozás elérése után. A rendszer specifikációi az adott mérőszoftverről függenek, de általában nincs szükség komoly számítási kapacitásra.

A terhelés-dőlés és/vagy terhelés-alakváltozás diagramok mellett az eredmények értékeléséhez bizonyos geometriai paraméterekre is szükség van, mint a lombkorona felülete és a közép-pontjának magassága. Ezt becsléssel is meg lehet állapítani, de ez nagy gyakorlatot kíván, és általában pontatlan. A szakértők manapság a fáról készült digitális fényképek elemzésével határozzák meg ezeket (amelyhez húzóvizsgálati vagy más szoftvert használnak.) Erről bővebben látsd az értékelésről szóló fejezetet.

### LÉTRA VAGY MÁSZÓ FELSZERELÉS

A vizsgált fa magasságától függően szükség lehet létrára, vagy fel kell másznunk ahhoz, hogy megfelelő magasságban rögzíthessük a hevedert, amelyhez a húzókábelrel csatlakoztatjuk. A könnyű, hosszabbítható vagy összecsuksukható létrák a legalkalmasabbak erre a célra. A mászófelszerelés rugalmasabb és könnyebben hordozható, de a használata megfelelő hozzáértést és gyakorlatot kíván. A biztonságra mindkét esetben fokozottan ügyelni kell.



3.13. ábra:

Könnyű, összecsuksukható létra (bal), és famászó felszerelés (jobb, Dr. Puskás Lajos képe)

## B. A VIZSGÁLAT MENETE

A 3.2. ábra egy általános mérési elrendezést mutat. Ebben a fejezetben lépésről lépésre bemutatjuk, hogyan kell előkészíteni és végrehajtani a húzóvizsgálatot.

Mielőtt a tesztet előkészítjük és elkezdjük, néhány általános szabályra oda kell figyelni:

- A húzóvizsgálathoz viszonylag szélcsendes időre van szükség, 25 km/h szélsébség alatt. Az erős szél befolyásolja a mérést, és téves eredményekhez vezet.
- A fák stabilitása és teherbírása irányfüggő. A fák az ún. uralkodó szélirányban (abban az irányban, amerről a szél általában fúj) a legerősebbek. Optimális eredményhez a mérést ugyanebben az irányban kell elvégezni, vagy legalábbis minél közelebb az uralkodó szélirányhoz.

- A vizsgálat előkészítése, lefolytatása és leszerelése kb. 30-60 percet vesz igénybe minden fa esetében. Ennek megfelelően kell tervezni.
- Az előkészítés és a vizsgálat során be kell tartani a biztonsági előírásokat (látsd a fejezet végén).

Először is, a húzóvizsgálati felszerelést oda kell szállítani a vizsgálat helyszínére. Mivel a felszerelés több része (pl. a kábel, vonszoló, létra és/vagy mászófelszerelés) nehéz és ormótlan, ehhez általában segítőre van szükség, aki segít a vizsgálat összeállításában is.

A vizsgálat előkészítése a következő lépésekből áll:



**1.****A KÁBEL RÖGZÍTÉSE A LOMBKORONÁBAN**

A vizsgálat első lépése a kábel felszerelése a lombkoronában. Amint az előbbiekben említettük, a fa károsítását elkerülendő a kábelt nem közvetlenül a fára akasztjuk. Ehelyett egy puha, széles hevedert tekerünk a törzs köré, és ebbe akasztjuk bele a kábelt.

A hevedert általában a fa törzsére tekerjük, megfelelő magasságban a lombkoronában. Minél magasabb a rögzítési pont, annál kisebb erőt kell kifejteni a kábellel, mivel az erőkar annál hosszabb. Ez különösen hasznos, ha idős, nagy átmérőjű fákat vizsgálunk, amelyeknél a szükséges dőlés vagy deformáció létrehozásához jelentős terhelésre van szükség. Azonban, ha magasan akarjuk rögzíteni a hevedert, hosszú létrára vagy famászásra van szükség.



3.14. ábra:

*A heveder rögzítése a fa törzse köré*



3.15. ábra:

*A kábel beakasztása a hevederbe*

**2.****A VONSZOLÓ**

Miután a kábel egyik végét a fához rögzítettük, a másik végét a vonszolóba húzzuk be.

A vonszolót magát egy talajhoz közeli ponthoz kell rögzíteni. Ez jelentheti egy másik fa törzsét (a tövéhez közel), lehet egy fatönc, vagy bármely más tárgy, amely stabilan áll a földben. Amennyiben egy másik fát használunk, itt is puha hevedert kell közbe iktatni, hogy megelőzzük a fatörzs károsodását.



3.16. ábra:

*A kábel behúzása a vonszolóba*





3.17. ábra:

A vonszoló kikötése a rögzítési ponthoz széles hevederrel

A vonszoló rögzítési pontját a fának az uralkodó széliránnyal átellenes pontján kell megválasztani. Ez nem mindig egyszerű, mivel nem feltétlenül találunk használható rögzítési pontot pontosan a megfelelő irányban, de törekednünk kell rá, hogy a lehető legközelebb kerüljünk hozzá. Arra is ügyelni kell, hogy a kábel ne fusson túlságosan meredek szögben, különben nem tudunk elegendő vízszintes húzóerőt kifejteni, és belenyomjuk a fát a talajba. Megfeszítés után a kábel maximum 30-os szöget zárjon be a vízszintessel.

Figyelem: a vonszoló igen nagy teljesítményű műszer, amely nagy erőt tud kifejteni a kábelben. A személyi sérülések elkerülése végett fontos, hogy a kezelő jól ismerje a vonszoló működését, és nagy körültekintéssel használja azt.

### 3. AZ ERŐMÉRŐ FELSZERELÉSE

Az erőmérő cella a használt rendszertől függően vagy a kábel és a heveder közé, vagy a vonszoló és a rögzítő heveder közé kerül, vagy a kábelre szereljük fel.

Kábelre szerelt erőmérő cella használatakor a műszert közvetlenül a kábelre szereljük, egy

kicsit távolabb attól a ponttól, ahol a kábelt bebújtattuk a vonszolóba. Ennek nem szabad túl közel lennie a vonszolóhoz, mivel a kábelt még jobban be kell majd húzni, hogy ki tudjuk fejteni a szükséges erőt. Túl magasra se tegyük, mert akkor nehéz lesz csatlakoztatni az adatgyűjtő rendszerhez. Amikor a kábel már majdnem feszes, az erőmérőnek kb. 50-60 cm-re kell lennie a vonszolótól.



3.18. ábra:

A kábelre szerelt erőmérő cella felszerelésre



3.19. ábra:

Az erőmérő cella legyen megfelelő távolságra a vonszolótól

## 4. A DŐLÉSMÉRŐ(K) FELSZERELÉSE

A dőlésmérő a gyökérfőre kerül, azaz a fa tövére, olyan közel a földhöz, amennyire csak lehet. Stabilitásvizsgálathoz a gyökérfő dőlését kell mérnünk. Ha a dőlésmérőt túl magasan helyezük el, a törzs deformációja miatt magasabb dőlésértékeket mérünk, és a számított biztonsági tényező alacsonyabb lesz, mint a valós értékek. Az alkalmazott dőlésmérő típusától függően először általában a rögzítőelemet kell felszerelni a fára. Ehhez általában facsavart alkalmazunk (a fatörzs károsodása elhanyagolható), vagy ritkábban hevederekkel rögzíthetjük.



3.20. ábra:

*A rögzítőelem felszerelése a fa tövére*

A rögzítőelem felszerelése után következik a dőlésmérő csatlakoztatása. Végül, az alkalmazott dőlésmérő típusától függően általában szintezni kell az érzékelőt, különben kifuthatunk a mérési tartományból. A műszert mindkét irányban szintezni kell. Ehhez használhatunk egy kis hagyományos vízmértéket, de léteznek

olcsó (vagy akár ingyenes) mobil applikációk is. Létezik beépített vízmértékkel szállított rögzítőelem is (3.22. ábra).



3.21. ábra:

*A dőlésmérő szintezése kis vízmérés (fent) vagy mobilalkalmazás (lent) segítségével*

Egészséges, viszonylag nagy átmérőjű fák esetén általában egy dőlésmérő elegendő a gyökérfő dőlésének pontos mérésére. Kisebb átmérőjű vagy korhadt fák könnyebben meghajlanak, és még ha az érzékelőt elég közel helyeztük is a talajhoz, a törzs extra deformációja miatt mégis téves értékeket kapunk. Ilyen esetekben kettő, vagy akár még több dőlésmérőt is alkalmazhatunk egyszerre.





3.22. ábra:  
Rögzítőelem beépített vízmértékkel



3.23. ábra:  
Több dőlésmérő használata ugyanazon  
a fatörzsön

Nagyon fiatal, kis átmérőjű fák nagyon meghajolhatnak a vizsgálat során. Ilyenkor ezt is hozzá mérjük a gyökérfő dőléséhez, ami magasabb dőlésértékeket, és csökkent biztonsági tényezőt eredményez. Emiatt lehetőleg ne végezzünk méréseket 40 cm-nél kisebb törzsméretű fákön.

## 5. A NYÚLÁSMÉRŐ(K) FELSZERELÉSE

A nyúlásmérőket a fa törzsére kell felszerelni, abban a magasságban, ahol a törzs törése a legvalószínűbb. Ha a törzsön sehol sem látunk gyengébb szakaszokat, a nyúlásmérőt mellmagasságban szereljük fel. Ha több nyúlásmérőn is van, több törzszakaszt is vizsgálhatunk egyszerre.



3.24. ábra:  
A nyúlásmérő felszerelése a törzsre,  
zárt állapotban

A nyúlásmérő felszerelése általában egyszerű feladat. A házat és a mozgó magrészt egy-egy facsavar vagy szeg segítségével rögzíthetjük a fa törzsére.

A felszerelés során a nyúlásmérőnek zárt állapotban kell lennie (lásd 3.11. ábra). A rögzítő követően kinyithatjuk a zármechanizmust a vizsgálthoz. A nyúlásmérőt vagy a kábel felőli (nyomott), vagy az ellentétes (húzott) oldalra szereljük fel. A nyúlásmérőt soha ne tegyük ettől eltérő helyre, mert ez esetben alacsonyabb, vagy (ha a nyúlásmérő az ún. semleges zónában van) akár zéró deformáció értékeket mérünk. Az összes mérőeszköz felszerelését követően csatlakoztatni kell azokat a számítógéphez.



3.25. ábra:  
A fa törzsére felszerelt nyúlásmérő  
nyitott állapotban

## 6. A MÉRÉS

Az előkészületek után most már készen állunk a teszt elkezdésére. Először el kell indítani a húzóvizsgálati szoftvert, és be kell írni bizonyos geometriai és egyéb paramétereket:

- Fa geometria: a lombkorona területe és a korona középponti magassága
- A mérési összeállítás geometriája: a rögzítési pont és a fa távolsága, a kötél rögzítési magassága, rögzítési pont és fa szintkülönbsége
- Referencia szélessége
- Légellenállás tényező
- Lineáris elasztikus határérték (csak a törésbiztonság meghatározásához).

A fa geometriai paramétereit általában digitális fényképek elemzésével határozzuk meg. Ehhez egy jó digitális képre van szükség a fáról, egy jól kivehető referencia távolsággal, amit megjelölünk a képen. A kezelőnek kell beírnia a megjelölt szakasz hosszát. Minél hosszabb ez a távolság, annál pontosabbak lesznek a geometriai paraméterek – legjobb, ha a fa magasságát használjuk referenciának.

A kép alapján a program kiszámítja a korona területét és a középpont magasságát. A program

vagy egy megadott alak (pl. ellipszis) szerint számítja ki a korona területét, vagy a kezelőnek kell bejelölnie a korona hozzávetőleges kontúrját, és a szoftver ebből számítja ki a területet és a középpont helyét.



3.26. ábra:  
A fáról készült kép, a korona kontúrjának  
(piros), és a referencia magasság  
(a fa magassága, kék) megjelölésével



3.27. ábra:  
A vizsgálat lefolytatása



Miután megadtuk a szükséges adatokat, elkezdhetjük a vizsgálatot. A vizsgálat során fokozatosan növeljük a kábel húzóerejét a vonszoló lassú és egyenletes működtetésével. Ez nyomatókat hoz létre a fában, ami meghajlíthatja a fát és billenti a gyökérfőt.

A vizsgálatot akkor kell abba hagyni, amikor a dőlés eléri a 0,25 fokos értéket, hogy megelőzzük a fa károsodását, és különösen a kidőlést, amely kárt okozhat a közeli fákban vagy építményekben. (A fák jellemzően 2 fokos megdőlés alatt nem dőlnek vagy törnek ki, így bőségesen a biztonságos tartományon belül maradunk. Ezzel együtt, a biztonság kedvéért viseljük védőfelszerelést, és a nézelődők álljanak biztonságos távolságban!)

A gyökérfő dőlését a vizsgálat alatt folyamatosan figyeljük, hogy tudjuk, mikor kell a vizsgálatot abbahagyni. A mérőszoftver általában vizuálisan és/vagy hangjelzéssel figyelmeztet a 0,25 fokos dőlés, vagy a vonszoló maximális terhelésének elérésekor.



3.28. ábra:

A számítógép képernyője mutatja a mért adatokat. A számítógép figyelmeztetést küld a kezelőnek, ha elérte a dőlési vagy terhelési határértéket.



## BIZTONSÁGI FIGYELMEZTETÉSEK:

A húzóvizsgálathoz jelentős terhelést kell kifejteni, ami veszélyes lehet, ha nem figyelünk a biztonsági előírásokra. A kábel szakadása komoly sérüléshez vezet, így kérjük az alábbi biztonsági előírások betartását:

- A vizsgáló csapat vezetője felelős a vizsgálat biztonságos végrehajtásáért.
- A húzóvizsgálatot csak megfelelően kiképzett személyzet végezheti.
- A vizsgáló berendezésnek, beleértve a hevedereket, kábelt és vonszolót, sérülésmentesnek kell lennie. Vizsgáljuk meg a berendezést, hogy hibátlan műszaki állapotban van-e.
- Minden eszközt védeni kell a nedvesség, fagy és hosszabb napsütés hatásaitól.
- A munkaterületet el kell zárni a közönség elől. A személyzeten kívül más nem jöhet a kábel közelébe, nem bújhat át alatta vagy mászhat át rajta.
- A vizsgálatot végzőknek védőfelszerelést kell viselniük, beleértve a sisakot és acélbetétes bakancsot. Védőkesztyű viselése szintén javasolt a kábel és a vonszoló kezeléséhez, famászáshoz, stb.)
- A vizsgáló csapat tagjai álljanak legalább 2 méterre a kábeltől, kivéve a vonszoló kezelőjét.
- A mérés megkezdése előtt a csapat vezetője határozza meg menekülési útvonalat a vizsgálat helyszínéről biztonságos helyre, valamint jelölje ki a fedezéket is. Váratlan esemény, mint pl. a fa kitörése vagy a kábel elszakadása esetén mindenki azonnal menjen a kijelölt fedezék mögé.
- 1 kN terhelés felett a vonszoló kezelője használjon rúd hosszabbítót, és álljon olyan távol a kábeltől, amennyire csak tud.
- A 0,25 fokos dőlés elérésekor állítsuk le a mérést.
- Ha a fa recsegní kezd, azonnal állítsuk le a mérést! (Ezt ne tévessze össze a hevederrel, amely hasonló hangot ad ki miközben a fatörzsön elmozdul.)
- Tartson be minden, a berendezés használati útmutatójában található előírást.
- A húzóvizsgálatot nem szabad esőben vagy fagyban végezni.

## MEGJEGYZÉS:

Lehetőség van arra is, hogy a fákat törésig vagy kidőlésig teszteljük, ha nem jelent problémát, hogy kárt okozunk a fában (pl. ha a fa nagyon beteg vagy már amúgy is kidöntenek). Ehhez jelentős nyomatékot kell kifejteni, vagy hosszú erőkar (azaz a kábel rögzítése minél magasabban a koronában), vagy jelentős húzóerő alkalmazásával. Ilyen esetekben még inkább oda kell figyelni a biztonságra; a nézelődők álljanak jó messzire, és a kezelők viseljenek alkalmas, megfelelően erős védőfelszerelést. Az ilyen vizsgálatokat általában kutatási célból végzik.

## C. AZ EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

A húzóvizsgálati szoftver a mérés elején beírt paraméterek, valamint a terhelés-alakváltozás, illetve terhelés-dőlés görbék alapján automatikusan értékeli az eredményeket, ami könnyebbé teszi a kezelőnek. Fontos azonban, hogy megértsük ezeknek a lényegét, és ez alapján értelmezni tudjuk az eredményeket:

### VÁRHATÓ SZÉLTERHELÉS

A szoftver kiszámítja a várható maximális szélterhelési nyomatékot ( $M_{szél}$ ), a megadott lombkorona geometria, referencia szélsebesség és ellenállási tényező értékek alapján, az első fejezetben bemutatott formulák segítségével. Ez az a maximális nyomaték, amit a fának ki kell bírnia kidőlés, vagy a törzs törése nélkül.

## A TERHELÉS-DŐLÉS GÖRBE ÉS A DÖNTÉSI NYOMATÉK

A terhelés-dőlés görbe adatpontjai egy speciális, másodrendű tangenciális függvényt követnek. Az első fejezet 1.8. ábrája jól szemlélteti ezt a kapcsolatot. Ezen a diagramon egy olyan fa terhelés-dőlés görbéjét mutatja, amelyet egészen a kidőlésig terheltek, így a döntéshez szükséges erő ( $F_{ki}$ ) jól látható a grafikonon, és a döntési nyomaték egyszerűen kiszámítható.

Amikor a fa stabilitását vizsgáljuk csak 0,25 fokok dőlésig tesztelünk, így ennek a görbének csak az első szakasza áll rendelkezésre. A döntési nyomatékot ( $M_{ki}$ ) ebből a görbéből úgy tudjuk meghatározni, hogy a tangenciális görbét ráillesztjük a meglévő adatpontokra, és ebből extrapolálva meghatározzuk  $F_{ki}$  értékét (3.29. ábra).

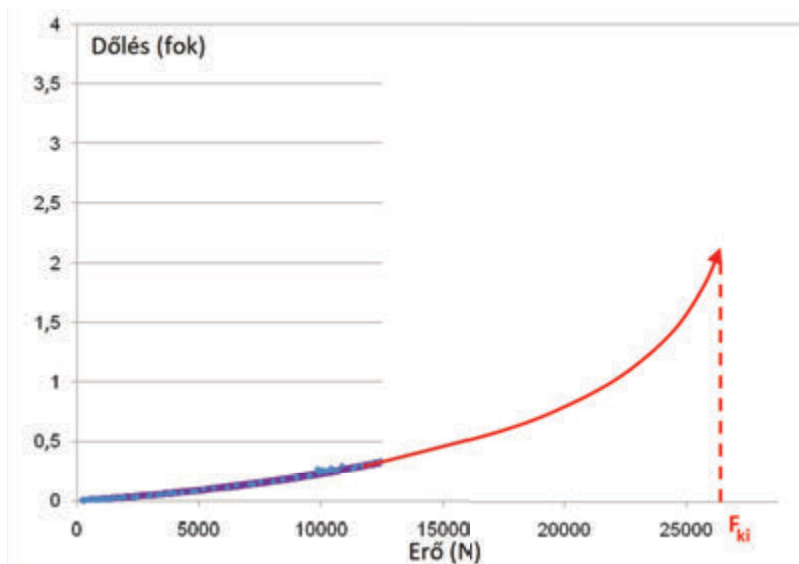
(A 3.29. ábrán feltüntetett terhelés értékek a kábelben ébredő erő vízszintes komponensét jelentik, amelyet a szoftver a beírt geometriai adatok alapján számít ki.)

## TERHELÉS-ALAKVÁLTOZÁS GÖRBE, ÉS A KITÖRÉSI NYOMATÉK

Amint az első fejezetben tárgyaltuk, a törzs alakváltozási görbéje lineáris jellegű, egészen az ún. lineáris elasztikus határ eléréséig. Ezen a ponton a törzs még ugyan nem törik el, de innentől visszafordíthatatlan károsodások történnek benne. Emiatt a biztonsági számításokhoz a maximális törési erő helyett ezt a határértéket használjuk.

Itt is az a helyzet, hogy a terhelés-alakváltozás görbének csak az első szakaszát mérjük. A szoftver ezt a görbét extrapolálja a beírt lineáris elasztikus határig, a kritikus vízszintes terhelőerő ( $F_{törés}$ , látsd 3.30. ábra) eléréséig, és ebből meghatározza a töréshez szükséges nyomatékot ( $M_{törés}$ ).

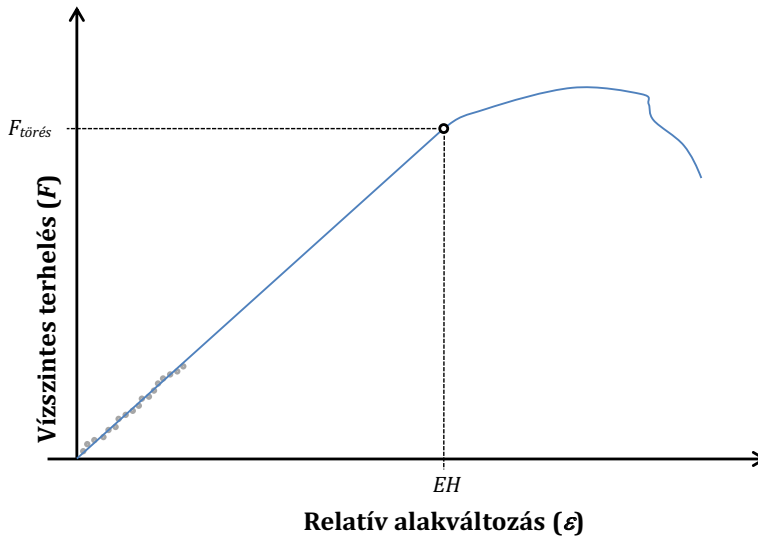
A lineáris elasztikus határérték (EL) fafajtól függő érték, amelyet az ún. „Stuttgart” teherbírási táblázat tartalmaz (látsd első fejezet).



3.29. ábra:

A döntéshez szükséges terhelés ( $F_{ki}$ ) meghatározása a terhelés-dőlés diagram első részéből extrapolációval, a speciális másodrendű tangenciális összefüggés segítségével





3.30. ábra:

A törzs töréséhez szükséges terhelés ( $F_{\text{törés}}$ ) meghatározása a terhelés-alakváltozás diagram első feléből extrapolációval a lineáris elasztikus határig (EH) történő extrapolációval

## BIZTONSÁGI TÉNYEZŐ

A szoftver a fa kidőlési, illetve kitörési biztonsági tényezőjét (BT) a döntési nyomaték (Mki) vagy kitörési nyomaték (Mtörés) és a várható szélterhelésből származó nyomaték (Mszél) egyszerű hányadosaként számítja ki. A biztonsági tényező értelmezését lásd az 1.7) fejezetben.

Néhány dolgot fontos észben tartani a biztonsági tényező értelmezésekor:

- A szélterhelési nyomatékokat, és ennek megfelelően a biztonsági tényezőt mindig a referencia szélességből számítjuk. Ha a fa biztonsági tényezője viszonylag magas ennél a szélességnél, erősebb szélben akkor is kidőlhet!
- A törési biztonsági tényező a fának arra a szakaszára érvényes, ahová a nyúlásmérőt felszereltük a mérés során. Ha a törzsnek van ennél gyengébb szakasza, akkor a

biztonságosnak nyilvánított törzs is kitörhet a referencia szélességnél vagy alatta is. Az értékelés megbízhatósága javítható több törzszakasz vizsgálatával, vagy a mérés kombinációjával valamilyen más vizsgálati eljárással (pl. akusztikus tomográfiával).

- A biztonsági tényező értékek azok között a körülmények között érvényesek, amelyeknél az értékelés történt. Bizonyos tényezők, mint pl. a lombzat változása, fagyott talaj, illetve a talaj nedvességtartalma befolyásolhatják a fa biztonságosságát. Ha a biztonsági tényező 1 alatt van, a fa nem biztonságos, beavatkozást igényel. Az 1,5 feletti biztonsági tényezőjű fát biztonságosnak tekintjük. Mivel az értékelésben vannak bizonytalanságok, 1 és 1,5 BT értékek között mérsékelt kidőlési vagy kitörési veszéllyel számolhatunk, és a fát folyamatosan figyelni kell. A bővebb információt lásd a fejezet végén, a 4) pontban.

## D. A HÚZÓVIZSGÁLAT ELŐNYEI ÉS KORLÁTAI

A húzóvizsgálat (amit esetenként „elasztikus-dőlése vizsgálatnak” is neveznek), az 1980-as évek óta elterjedt és a faápolók körében elfogadott eljárás. Megbízható biomechanikai alapelvek alapján fejlesztették ki, és jelenleg ez a standard eljárás a fák állékonyságvizsgálatára. Vannak viszont hátrányai és korlátai is.

### A HÚZÓVIZSGÁLAT ELŐNYEI:

- A fák állékonysági és törési biztonságának meghatározásának elfogadott és bevett módszere;
- Jól használható szélcsendes időben (25 km/h szélesebbesség alatt);
- A kezelő dönt a mérés körülményeinek nagy részéről (mérési irány, terhelési ráta, stb.);
- Nagyon jó az összefüggés a mért paraméterek között, ami növeli az eredmények megbízhatóságát.

### HÁTRÁNYOK ÉS KORLÁTOK:

- A geometriai paraméterek bizonytalansága: a lombkorona geometria meghatározása nem mindig egyszerű. Ez vagy becsléssel történik, mely esetben nagy a pontatlanság kockázata, vagy digitális képelemzéssel. Az utóbbihoz a kezelőnek kell kijelölnie a lombkorona kontúrját, ami némileg szubjektív, és a jelenlegi szoftverek nem tudják figyelembe venni az esetleges lyukakat, nyílásokat a lombkoronában. Szükség van egy referencia távolság megadására is, ami további pontatlanság forrása.
- Bizonytalanságok a fafaj-függő paraméterekben: az értékeléshez szükséges konstansok, mint pl. a lineáris elasztikus határérték, vagy a légellenállás-tényező

meghatározásához szakirodalmi forrásokat használunk. Ugyanakkor jelentős különbségek lehetnek egyazon fafaj különböző egyedei között (ún. ontogenetikus különbségek), amelyek jelentősen befolyásolhatják ezeket az értékeket.

- A szélerősség bizonytalansága: a terep geometriája, más fák vagy mesterséges tereptárgyak árnyékoló hatása, illetve a függőleges szélerősség profil jelentősen befolyásolhatja a valós szélterhelést, amely erős szélben a fára hat. Ez befolyásolhatja a fa valós biztonságát.
- A húzóvizsgálat nem végezhető el erős szélben (25 km/h szélesebbesség felett).
- A mérés nehéz és ormótlan felszerelést és komoly előkészületeket kíván.
- Végül, a húzóvizsgálat statikus terhelésen alapszik. A fák nagyon másképpen reagálhatnak egy kábelre keresztül kifejtett, fokozatosan növekvő statikus terhelésre, mint a kiszámíthatatlan, dinamikus széllehelések sorozatára, amelyek a levelek, gallyak, ágak és fatörzs alkotta, bonyolult rendszerre hatnak erős szélben. A realitás, dinamikus terheléses helyzetben történő vizsgálat pontosabban jellemezheti a fák a biztonságát és stabilitását.

### 3. A DINAMIKUS VIZSGÁLAT

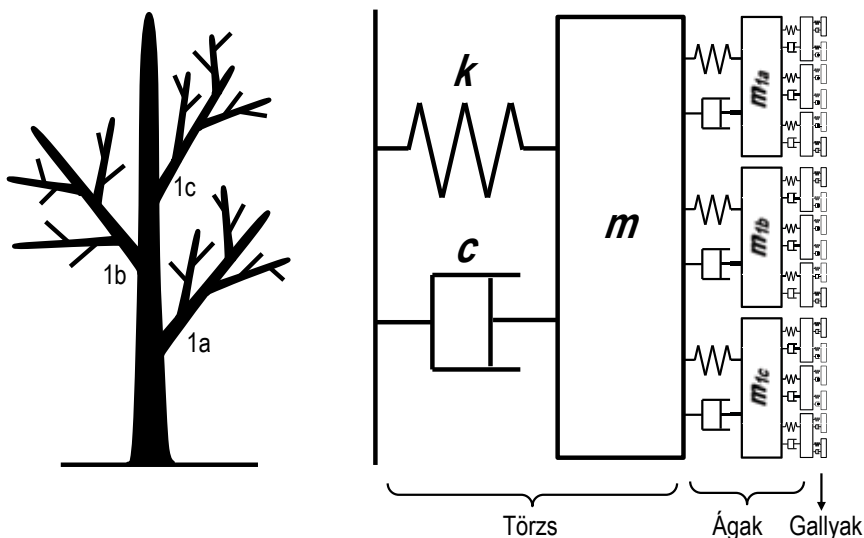
Jelenleg a fák stabilitásvizsgálatának legelfogadottabb módja a statikus húzóterhelés, annak az előző pontban tárgyalt számos hátránya és korlátja ellenére. A legnagyobb gond, hogy a statikus vizsgálat rosszul jellemzi a fák valós szélterhelésre adott reakcióját (Moore and Maguire, 2004). Sokkal jobb lenne, ha fák viselkedését valós szélterhelésben vizsgálhatnánk.

Sajnos a fák viselkedése valós szélterhelési viszonyok között nagyon összetett képet mutat. A fák – különösen a városi környezetben gyakran előforduló, szabad növekedésű egyedek – egy fatörzsből, fő- és mellékágakból, gallyakból és levelekből álló, komplex rendszert képeznek (James és tsai., 2006, 2014, látsd 3.31. ábra). Dinamikus terhelési viszonyok között az ilyen fák viselkedése nagyon kiszámíthatatlan. A valóságban egyáltalán nem figyelhető meg közvetlen kapcsolat a pillanatnyi szélesség, és a törzs dőlési adatai között. Erős széllokécek megjelenésekor sokszor nem látunk nagy mozgásokat, míg máskor viszonylag csendesebb

időszakokban a fák törzse erős kilengést mutat (látsd 3.32. ábra).

A fa különböző részei közötti komplex kölcsönhatások miatt a fa reakcióját gyakorlatilag lehetetlen modellezni vagy megjósolni a tudomány mai állása szerint (Sellier and Fourcaud, 2009). Valójában az egyes alkotórészek – törzs, ágak, gallyak – igen hasonlóan viselkednek, mint egy többszörös csillapított inga (Bejo et al. 2017).

Az ágak és a törzs nemlineáris rezgőrendszert alkotnak, melynek viselkedése kiszámíthatatlan. Az ilyen rendszerek viselkedése nagyon érzékeny a kezdeti feltételekre, és hosszú távon szinte teljesen megjósolhatatlan. Ezt a fajta viselkedést kaotikus mozgásnak hívjuk. (A többszörös ingákat ugyanezen okból kaotikus ingáknak is szokták nevezni.) Ezért nincs látszólag semmilyen közvetlen összefüggés a pillanatnyi szélesség és törzs dőlése között. Nagy széllokécek idején a törzs sokszor stabilan áll, majd egy viszonylag csendesebb időszakban erőteljesen stabilitását veszti (látsd 3.32. ábra). Ez a jelenség több, mint egy egyszerű időbeli



3.31. ábra:

A fa, mint az egymással összekapcsolt alkotóelemek összetett rendszere (James és tsai., 2006 alapján)

késleltetés; majdnem teljesen véletlenszerűen következik be (Divos és tsai., 2015).

A kaotikus rendszerek tanulmányozására is van azonban lehetőség. Ennek alapját egy statisztikai megközelítés képezi (Strogatz, 2014). Míg közvetlen kapcsolat nem figyelhető meg a terhelés és a dőlés között, a hosszabb intervallumok (1, 2, vagy akár 10 perces időszakok) során mért szélesség és dőlés adatok átlagértékei között hasonló kapcsolat figyelhető meg, mint a statikus mérésel meghatározott terhelés és dőlés értékek között.

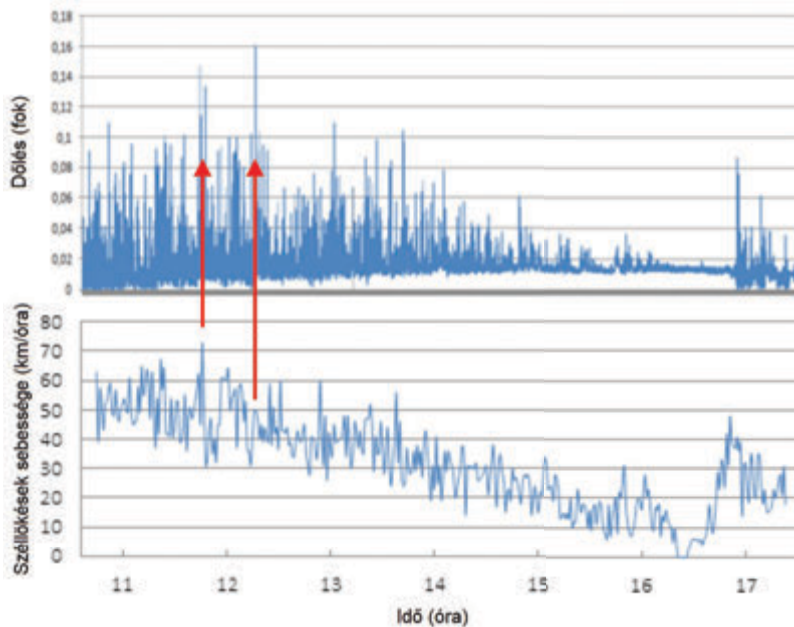
A dinamikus vizsgálat ugyanazon elveken alapszik, mint a statikus vizsgálat, kivéve, hogy a statikus vízszintes terhelést a valós szélterhelésből számolt statisztikai értékekkel helyettesítjük. Pl. a 3.32. ábrán látható terhelés és dőlés adatokat hosszabb időszakokra osztjuk, és ezen időszakokra számolunk statisztikai jellemzőket (pl. az 5 vagy 10 perc alatt mért összes adat átlagát), amint a 3.33. ábrán látható. Ezekből az

ábrából látható, hogy bár a pillanatnyi adatok között nem lehet összefüggést találni, de a (3.33. ábrán piros vonalakkal jelölt) átlagok már viszonylag jó korrelációt mutatnak.

Ha a szélességet és a gyökérfő dőlését hosszabb időszakokon, több órán keresztül mérjük, majd ezeket néhány perces csoportokba osztjuk, és minden csoporthoz kiszámítjuk az átlagértékeket, hasonló terhelés-dőlés adatpárokhöz jutunk, mint amiket a húzóvizsgálat során mérhetünk.

Amint az első fejezetben bemutattuk, a terhelés-dőlés és terhelés-alakváltozás adatpontokra ugyanolyan jellegű görbék illeszthetők, mint a statikus terhelés esetében (tangenciális görbe, illetve egyenes vonal, lineáris görbe). Mindössze két fontos különbséget kell említeni:

- az adatpontok nem egymás után, hanem véletlenszerűen következnek,
- vízszintes erő adatok helyett szélesség vagy szélnyomás értékeket mérünk.



3.32. ábra:

A pillanatnyi dőlés és szélesség adatok nem mutatnak közvetlen összefüggést (Bejó és tsai., 2017)



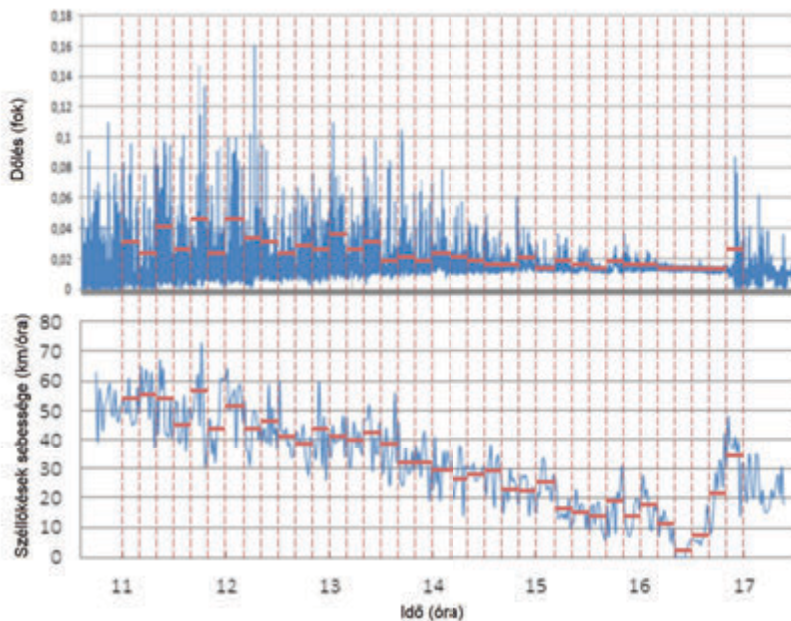
Az első különbségnek nincs jelentősége, mivel a görbe illesztése szempontjából érdektelen, hogy az adatok milyen sorrendben követik egymást. Minél több adatpárunk van, annál pontosabban az illesztett görbe. A második különbség azt jelenti, hogy a biztonsági tényező számítása kissé eltér, mivel a szélterhelést kell használnunk a statikus erő értékek helyett az  $M_{ki}$  döntési nyomaték meghatározásához. Ennek megfelelően a biztonsági tényezőt (SF) az alábbiak szerint lehet meghatározni:

$$SF = \frac{M_{ki}}{M_{szél}} = \frac{p_{ki} A_{korona} c_{fafaj} h_{kk}}{p_{szél} A_{korona} c_{fafaj} h_{kk}}$$

Látható, hogy ha a szélnyomást használjuk a döntési ( $M_{ki}$ ) és a maximális szélterhelési ( $M_{szél}$ ) nyomaték meghatározásához, a lombkorona terület ( $A_{korona}$ ) és a korona középpont magasság ( $h_{kk}$ ) egyszerűsíti a hányadost, mivel ezek a paraméterek azonosak, attól függetlenül, hogy a döntési/törési vagy a maximális szélterhelés nyomatékot számítjuk-e.

A helyzet már kevésbé egyértelmű a légellenállási tényező ( $c_{fafaj}$ ) tekintetében, amely változik a szélerősség függvényében, és a görbe kezdeti részét kevésbé befolyásolja, mint a nagy szélerősségekben mért adatokat. Mivel azonban az ellenállástényező alacsonyabb erős szélben, ha az egész görbéhez ugyanazt a magas  $c_{fafaj}$  értéket használjuk, konzervatív becsléshez jutunk, azaz a biztonság javára tévedünk. Így az ellenállástényezővel is egyszerűsíthető a hányados.

Így a biztonsági tényező egyszerűen, a döntési szélnyomás és a maximális szélterhelési nyomás (a legerősebb szélben várható nyomás) hányadosaként számítható. A döntési szélnyomás ( $p_{ki}$ ) a nyomás-dőlés görbéből határozható meg, szinte ugyanúgy, mint ahogy az  $F_{ki}$  a terhelés-dőlés görbe alapján. A biztonsági tényező ilyen módon nem csak egyszerűen számítható, de valószínűleg jobban is jellemzi a fák viselkedését dinamikus szélterhelési viszonyok között.



3.33. ábra:

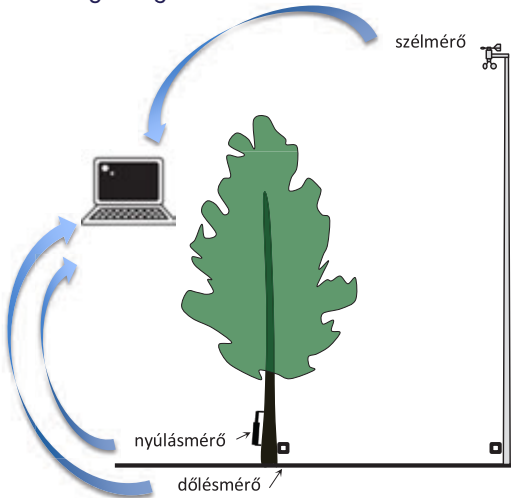
Ha a szélesebb és gyökérfő dőlés adatokat csoportokba osztjuk, majd kiszámítjuk az egyes csoportok átlagértékeit, a korreláció sokkal jobb

## A. ESZKÖZÖK

A 3.34. ábrán látható a dinamikus állékonyság-vizsgálat mérési elrendezése. A rendszer az alábbi részekből áll:

### ANEMOMÉTER (LÉGSEBESSÉG MÉRŐ)

Az anemométer a szélesebbesség és szélirány mérésére és feljegyzésére szolgáló berendezés, a vizsgált fánál vagy annak közelében. Minél közelebb van az anemométer a fához, annál jobb. A legjobb, ha az anemométer nyílt területen van, a szelet leárnyékoló tárgyaktól távol, 10 m magasságban.



3.34. ábra:

Mérési összeállítás dinamikus faállékonyság méréshez



3.35. ábra:

Kanalas anemométer

Két különböző szélmérő berendezés létezik:

**A mechanikus anemométer** egyszerű berendezés, amely kis csatornák vagy légcsovar segítségével méri a szélerősséget, a szélirányt pedig egy szélkakas segítségével határozza meg.

**Az ultrahangos anemométer** különböző irányokban kiküldött hanghullám terjedési idejét méri, míg eléri az egyik szenzortól a másikat. Szélcsendes időben a hang terjedési ideje minden irányban megegyezik. Szeles időben, ha a jel a széllel megegyező irányban halad, rövidebb idő alatt ér a másik szenzorhoz, míg széllel szemben több időre van szüksége. Az ultrahangos szélmérők általában két, egymásra merőlegesen elrendezett szélmérő-párból állnak, és szélesebbesség- és szélirány-mérésre egyaránt alkalmasak. Kevésbé hajlamosak a meghibásodásra, mivel nincsenek mozgó alkatrészek.

Amint az első fejezetben említettük, a szélmérőknek megfelelő gyakorisággal kell adatokat szolgáltatnia (általában 1 adat/másodperc).



3.36. ábra:

Ultrahangos anemométer

Az anemométerek lehetnek fixen telepítve, pl. egy épület tetején, vagy használhatunk mobil szélmérőket, ha fix szélmérő nem áll rendelkezésre. A mobil szélmérőket szétszedhető vagy teleszkópos rúdra szerelik.

A rudat jól ki kell pányvázni, hogy ne dőljön el.



3.37. ábra:  
Épület tetejére telepített anemométer

Nagyon fontos a szélesebbesség, dőlés és/vagy alakváltozás adatok tökéletes szinkronizálása. Mivel az adatok általában nem közvetlenül a számítógépre érkeznek, a mérés idejét is nagyon pontosan fel kell jegyezni.

A földrajzi helytől függően a közeli meteorológiai állomás által mért szélesebbesség és -irány adatok nyilvánosan elérhetőek lehetnek. Ilyen esetekben az időbeli felbontásnak elég jónak kell lennie (legalább 1Hz), és a pontos időadatokat is kellene.

### **DŐLÉSMÉRŐ(K)**

Ahhoz, hogy a viszonylag gyenge (25-50 km/h) szélben létrejövő, kisebb mozgásokat is mérni tudjunk, nagyon érzékeny dőlésmérőkre van szükség (0,001 pontosság). A dőlésmérőnek saját (több órára elegendő) áramforrás kell, és viszonylag nagy mennyiségű adatot kell tárolnia. Egyes modellek egyszerű adatátvitelre alkalmasak Bluetooth vagy wi-fi kapcsolaton keresztül. A műszernek a pontos idő adatokat is el kell tárolnia a dőlés adatokkal együtt.



3.38. ábra:  
Teleszkópos rúd tetejére szerelt szélmérő



3.39. ábra:

Nagy pontosságú dőlésmérő,  
rögzítőelemmel és áramforrással



3.40. ábra:

Olcsó, alacsonyabb felbontású, könnyen kezelhető  
érezkelők a dőlés hosszútávú megfigyelésére  
(Argus Electronic GmbH)



3.41. ábra:

A napelemes töltővel felszerelt,  
távolról leolvasható dőlésmérő szenzor  
több hónapnyi folytonos mérést tesz  
lehetővé (Argus Electronic GmbH)

Léteznek olcsóbb dőlésmérő típusok is. Ezeknek az eszközöknek alacsonyabb a felbontásuk, és csak nagyobb gyökérfő mozgásokat tudnak pontosan érzékelni (erős szélben). Ezeknek a legfontosabb előnye a kedvező árfekvés. Léteznek olyan változatok is, amelyeket nem kell színtezni, napelem segítségével automatikusan tölthetők, és az adatok akár távoli leolvasással is kinyerhetők, így több hónapig működhetnek zavartalanul, emberi beavatkozás nélkül.

### NYÚLÁSMÉRŐ(K)

A dinamikus méréssel a törzs törésbiztonsága is értékelhető. Ehhez nagy érzékenységgű nyúlásmérők kellenek. Ezek hasonlóak a húzóvizsgálathoz alkalmazott eszközökhöz, kivéve, hogy az alakváltozás mellett a mérés idejét is fel kell jegyezniük, és saját áramforrással rendelkeznek, az előzőekben említett, nagy pontosságú dőlésmérőkhöz hasonlóan.

### KIÉRTÉKELŐ SZOFTVER

A dinamikus állékonyság- és törésbiztonság vizsgálatához használt szoftver hasonló a húzóvizsgálathoz alkalmazott programhoz. Az értékek beolvasása után a program csoportokba osztja az adatpontokat. Majd kiszámítja a statisztikai paraméter(ek)et (az átlagot vagy valamilyen egyéb jellemzőt) az összes csoportra, adatpárokba rendezi őket. Ezután illeszti a megfelelő modellt (a dőlés adatokra a másodrendű tangenciális függvényt, az alakváltozás esetén pedig egyenest), majd kiszámítja a kidőléshez vagy töréshez szükséges szélnyomást.



## B. A MÉRÉS MENETE

A dinamikus faállékonyság és törési biztonság mérés lefolytatása bizonyos fokig hasonló, de jóval egyszerűbb, mint a húzóvizsgálaté. A következő lépésekből áll:

- **A méréshez szükséges feltételek:** a dinamikus mérés során jóval kevésbé tudjuk befolyásolni a mérés körülményeit, mint a statikus vizsgálatnál. A dinamikus vizsgálathoz legalább 25 km/h szélesebbégre van szükség. A legjobb az, ha a szélirány megegyezik az uralkodó iránnyal, és az egyéb körülmények (pl. a talaj nedvességtartalma, a lombkorona állapota, fagyott talaj, stb.) szintén fontosak. Érdeemes figyelni az időjárási előrejelzést, és a mérés időpontját a szerint megválasztani.
- **A pózna felállítása:** ha mobil szélmérőt használunk, a póznát a dőlésmérők és/vagy nyúlásmérők felszerelése előtt fel kell állítani. Az anemométernek legalább 10 m magasan kell lennie, lehetőleg nyílt terepen, épületektől, magas fáktól és egyéb szerkezetektől távol. Miután a póznát felállítottuk, és a műszert üzembe helyeztük, be kell kapcsolni, és az adatgyűjtést megkezdeni.



3.42. ábra:

A mobil szélmérő felállítása

- **A dőlésmérő(k) felszerelése:** ennek módja megegyezik a húzóvizsgálatnál leírtakkal. A fő különbség az, hogy a dőlésmérőt nem csatlakoztatjuk számítógéphez. A műszer bekapcsolás után megkezdik a dőlésadatok gyűjtését. Ha kétirányú dőlésmérőt használunk, nem számít, hogy melyik oldalra szereljük fel azt, de fiatal, vagy gyenge törzsű egyedek esetén érdemes több dőlésmérőt is felszerelni.



3.43. ábra:

A fa törzsére, egymásra merőleges pozícióban felszerelt nyúlásmérők lehetővé teszik a deformáció pontos számítását a törzs szél felőli vagy széllel szembeni oldalán

- **A nyúlásmérők felszerelése:** a nyúlásmérők felszerelése szintén hasonló a húzóvizsgálatnál leírtakhoz. Legjobb, ha a nyúlásmérőt vagy a széliránnyal megegyező, vagy az azzal ellentétes oldalra szereljük fel. Sajnos a mérés megkezdésekor nem feltétlenül ismert a pontos szélirány (és akár meg is változhat a mérés folyamán). Emiatt a szakértők sokszor két nyúlásmérőt használnak a fatörzsön, egymásra 90-os pozícióban felszerelve. Az értékelő szoftver ki tudja számítani a maximális megnyúlást vagy összenyomást a két műszer által mért adatokból.

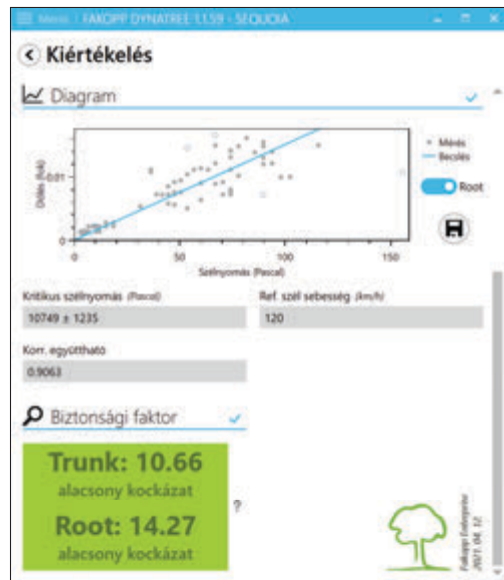
A széliránytól, szélereősségtől, a fa és szélmérő távolságától és bármely más tényezőtől függetlenül, minél hosszabb ideig tart a mérés, annál jobb. A mérés időtartamát behatárolhatja a szeles időszak hossza, vagy a használt akkumulátor kapacitása. A mérés általában legalább két-három óráig, vagy még tovább tart, ami azt jelenti, hogy a dinamikus mérés időigényesebb, mint a statikus vizsgálat. Másrészt viszont ezzel a technikával egyszerre több fát is mérhetünk. Tíz, vagy akár több törzs mérése is lehetséges egyszerre; a mérések számának csak az szab határt, hogy hány dőlés- és/vagy nyúlásmérő áll rendelkezésre, mivel a felszerelés csak 1-2 percet vesz igénybe.

Az előző pontban bemutatott egyszerűbb, olcsóbb dőlésmérők általában hosszabb idejű mérésekre alkalmasak (akár több hónapon keresztül, ha távoli eléréssel és napelemmel vannak felszerelve). Hátrányuk a gyengébb érzékenység, ami miatt csak erős szélben kapunk használható adatokat.

A mérés befejezése után az adatokat ki kell nyerni a műszerekből. Az eszközök típusától függően ez a memóriakártya eltávolításával, Bluetooth-on vagy wi-fi kapcsolaton, vagy akár távoli eléréssel, az interneten keresztül is történhet.

### C. AZ EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

A szélesebbesség, dőlésmérés és/vagy alakváltozás adatok importálását követően a program csoportokba rendezi az értékeket. Egy csoport az 1, 5 vagy 10 percen keresztül mért adatokat tartalmazza (a kezelő döntésétől függően.) Minél hosszabb ez az időszak (azaz az ún. statisztikai ablak), annál jobban illeszkednek az adatok modellhez, de annál kevesebb adatpontot kapunk. A mérés teljes időtartamától függően általában 5 perces statisztikai ablak az ideális.



3.44. ábra:

*Egy példa a dinamikus állékonyságvizsgálat eredményére*

Amint a 3.44. ábrán látható, az adatpontok nem illeszkednek a görbére olyan szépen, mint a statikus húzóvizsgálatnál, ez a helyzet valamekkora bizonytalanságot jelent a dinamikus vizsgálatnál. Másrészt ezzel a technikával a fa viselkedését a valós szélterhelésben vizsgáljuk, nem statikus terhelés hatására, és így a húzóvizsgálattal kapcsolatos több bizonytalansági tényezőt kiküszöböljük.

A 3.44. ábrán látható korrelációs együttható (Korr. együttható) érték az adatok illeszkedéséről ad információt. Minél közelebb van ez az érték 1-hez, annál jobb az illeszkedés, és annál megbízhatóbb az értékelés. Több tényező is befolyásolja a korrelációt. Ezekről a későbbiekben szólnunk.

A program a biztonsági tényezőt nagyon hasonlóan számítja, mint ahogy korábban a húzóvizsgálatnál leírtuk. A legfőbb különbség, hogy a másodrendű tangenciális függvényt vagy az

egyenes vonalat nem a pillanatnyi értékekre, hanem az 1, 5, illetve 10 percnyi adatcsoportból számított átlagértékekre (vagy egyéb statisztikai paraméterekre) illeszti. A görbe illesztése után a szoftver ugyanúgy végzi az extrapolációt, ahogyan a 3.29. és 3.30. ábrákon bemutattuk. Az értékelés annyiban egyszerűbb, hogy a kezelőnek nem kell a korona terület, középpont magasság és légellenállási tényező értékeit megadnia, mivel ezek nem szükségesek az értékelés során, és a biztonsági tényezőt egyszerűen a döntéshez vagy töréshez szükséges nyomás, illetve a várható maximális szélnyomás hányadosaként kapjuk. A törzs törés biztonságának értékeléséhez viszont továbbra is meg kell adni a lineáris elasztikus határértéket.

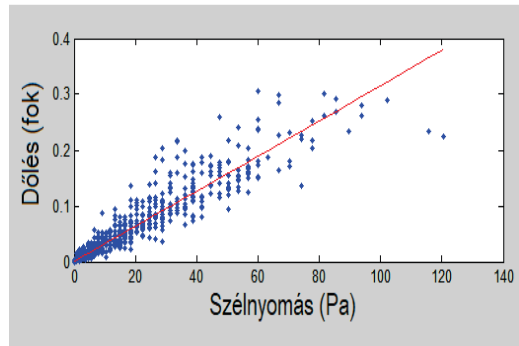
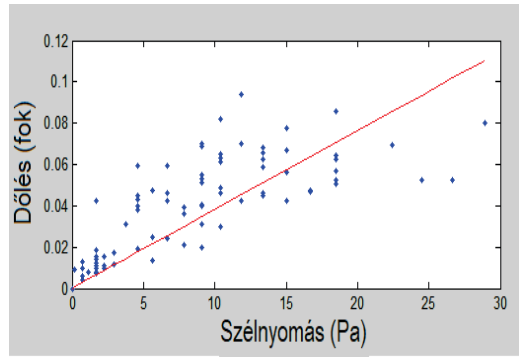
#### D. A DINAMIKUS VIZSGÁLAT MEGBÍZHATÓSÁGÁT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

Amint korábban említettük, a dinamikus élőfa vizsgálat egyik hátránya, hogy az adatpontok közel sem illeszkednek olyan jól a görbékhez, mint a statikus húzóvizsgálatnál. Az illeszkedés pontossága – amit a korrelációs együttható jellemez – alapvető fontosságú az ilyen mérések esetén. A mérést viszonylag megbízhatónak tekinthetjük, ha a korrelációs együttható értéke legalább 0,75.

Több olyan tényező van, ami befolyásolja a szélerősség és a mért dőlés/alakváltozás közötti korrelációt. Sajnos ezek közül sok van, amit nem tudunk befolyásolni, de igyekezzünk a körülményeket úgy megválasztani, hogy a lehető legjobb eredményekre jussunk.

### 1. SZÉLERŐSSÉG

A dinamikus élőfa vizsgálat legfontosabb feltétele a szeles idő. Az alkalmazott berendezéstől függően 25 km/h-tól már használható adatokat



3.45. ábra:

Gyenge (25 km/h, felül) és erős szélben (65 km/h, alul) gyűjtött szélnyomás és dőlés adatok

nyerhetünk. Viszont minél erősebb szélben mérünk, annál jobban mozognak a fák, és ennek megfelelően annál megbízhatóbb a dőlés és alakváltozás mérése.

Az erős szél mellett nagyobb dőlés és/vagy alakváltozás adatokat is eredményez, ami javítja az illeszkedést és a becsült  $p_{ki}$  and  $p_{törés}$  (a fát kifordítani, illetve annak törzsét eltörni képes nyomás) értékeket, és ezáltal a biztonsági tényező értékek pontosságát.

Sajnos a szélerősség értékét nyilván nem mi választjuk meg. Ettől függetlenül törekednünk kell rá, hogy minél szelesebb időszakokban gyűjtsük a dinamikus szélerősség, dőlés és alakváltozás értékeket.

## 2. A MÉRÉS IDŐTARTAMA ÉS A STATISZTIKAI ABLAK SZÉLESSÉGE

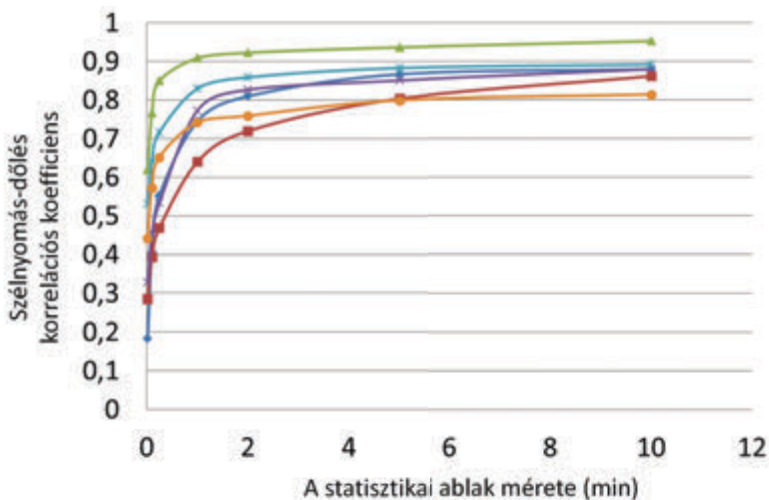
Általánosságban, minél szélesebb az ún. statisztikai ablak – az az időtartam, aminek az adatait összevonjuk egy csoportba, és arra statisztikát számolunk – annál jobban illeszkednek az adatpontok a nyomás-dőlés vagy nyomás-deformáció diagramra, és annál jobb a korreláció (lásd 3.46. ábra). Ugyanakkor, minél szélesebb ez az ablak, annál kevesebb adatpontunk lesz, ugyanolyan teljes mérési időtartamot feltételezve. A kevesebb adatpont viszont vezethet rosszabb korrelációra. A valós helyzetet legjobban megközelítő számítási eredmény elérése érdekében a számítást többször is megismételhetjük különböző hosszúságú időablakok választásával.

Ha széles statisztikai ablakot használunk, akkor is lehet elég adatpontunk. Ehhez hosszabb mérési időszakokra van szükség. Pl. ha

10 perces statisztikai ablakot választunk, és legalább 50 adatpontot szeretnénk, több, mint 8 órányi adatra van szükségünk. 5 perces ablak szélesség esetén ugyanennyi adatponthoz 4 órányi adat is elegendő, de a korrelációs együttható valamivel gyengébb lehet.

Akárcsak a szélerősség esetében, általában itt sem mi döntünk a teljes mérési időtartam felől. Nagy kapacitású akkumulátorokkal akár 10 órás, vagy hosszabb méréseket is végezhetünk, de ez időjárásfüggő is. Ha a szél hamarabb elcsitul, akkor lehet, hogy csak 3-4 órányi adatot tudunk gyűjteni. Ebben az esetben kénytelenek vagyunk 5 percre, vagy még lejjebb csökkenteni a statisztikai ablak szélességét, hogy elég adatpontunk legyen.

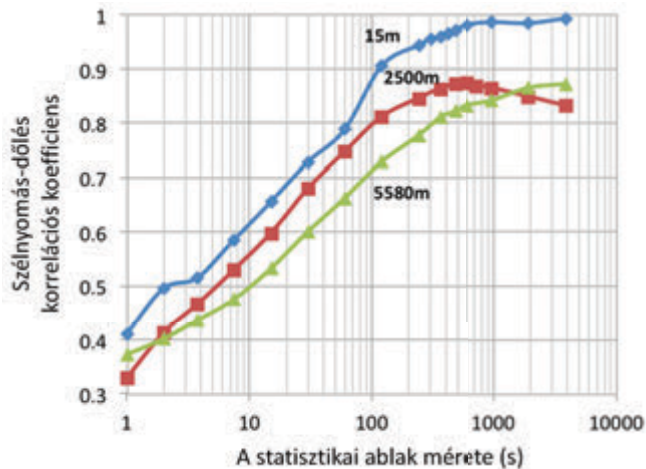
(A 3.46. ábrán, látható, hogy 2 perc felett az ablak szélességének növelésével egyre kevésbé javuló eredményeket kapunk. Az 5 perces statisztikai ablak szélesség általában jó kompromisszum a pontos illeszkedés és a minél több adatpont között.)



3.46. ábra:

A statisztikai ablak mérete és a korrelációs koefficiens közötti összefüggés





3.47. ábra:

A fa és a szélmérő távolságának a hatása a korrelációs koefficiensre

### 3. A FA ÉS A SZÉLMÉRŐ TÁVOLSÁGA

A helyi időjárás – beleértve a szélereősséget és -irányt – földrajzi helytől függően jellemzően eléggé hasonló néhány száz méteres, vagy akár pár kilométeres körön belül. Ettől függetlenül a szélereősség változhat, különösen erős szélben és viharban. Emiatt legjobb, ha a szelet a vizsgált fá(k)hoz minél közelebb mérjük.

A 3.47. ábra szemlélteti a fa és a szélmérő közötti távolság hatását. Az értékelés pontossága kb. 10 %-kal romlik, ha 2,5 km távolságban, és további 10%-kal, ha még messzebb (5,58 km) végezzük a szélérést. Ennek ellenére akár több kilométeres távolságban mért szélereősség adatokkal is kaphatunk használható adatokat. A pontosság ilyenkor általában javítható szélesebb statisztikai ablak használatával.

Ez különösen akkor hasznos, ha több fát akarunk mérni egyszerre (sokszor némi távolságra egymástól), vagy, ha fixen telepített szélérést, vagy egy közeli meteorológiai állomás adatait használjuk.

### E. A DINAMIKUS MÉRÉS ELŐNYEI ÉS KORLÁTAI

Ahogy korábban már tárgyaltuk, a dinamikus állékonyági és törésbiztonsági vizsgálat viszonylag új módszer. Fejlesztése és megbízhatóságának igazolása még mindig folyamatban van, de az eddigi eredmények biztatóak.

A dinamikus faállékonyág vizsgálat előnyei a következők:

- A méréseket realisztikus, dinamikus terhelés viszonyok között végezzük. Ez jobban megfelel a fák biztonságosságának meghatározására erős szélben, mint a statikus terhelés.
- A mérőfelszerelés egyszerűbb és könnyebb. Nem kell nehéz és ormóttan felszerelést (pl. kábelt, vonszoló, hevedert, létrát, stb.) magunkkal hurcolni.
- Biztonságosság. Még ha minden lehetséges biztonsági előírásra odafigyelünk is, a húzóvizsgálat kivitelezése többféle biztonsági kockázattal jár, pl. a fára vagy létrára

mászásból, a vonszoló kezeléséből vagy a kábelszakadásból kifolyólag, stb. (Megj.: pl. a fák kidőléséből fakadó, fatális problémák valószínűsége szinte elhanyagolhatóan kicsi a húzóvizsgálatnál, de így is történhetnek súlyos sérülések.) A dinamikus mérés szinte teljesen kockázatmentes, hacsak nem viharos időben állítjuk össze a mérést, ami nem ajánlatos.

- Az adatok értékelése is egyszerűbb; nincs szükség a fa geometriájának mérésére és megadására, sem az ellenállástényező kikeresésére. Ez kiküszöböli az ezekkel kapcsolatos bizonytalanságot is.
- Az olyan környezeti tényezők, mint pl. a közeli épületek vagy fák szelet leárnyékoló hatása, ugyanúgy befolyásolja a dinamikus mérést, mint ahogy a fák biztonságát. Az ilyen tényezőket nem tudjuk figyelembe venni a húzóvizsgálatnál, ahol emiatt alábecsülhetjük a fák biztonságát.
- Számos (akár 10 vagy több) fát is vizsgálhatunk egyszerre.
- A statikus méréssel szemben a dinamikus mérés erős szélben is végezhető.

A dinamikus vizsgálat hátrányai és korlátai az alábbiak:

- A dinamikus mérés új módszer, amelyet még nem fogadtak el és vezettek be a gyakorlatban. Az új technika megbízhatóságának igazolása folyamatban van. A következő pontban osztunk meg információkat ezzel kapcsolatban.
- A dinamikus mérés adatpontjai, amelyet több percnyi adat összevonásával és statisztikai értékelésével nyerünk, nem illeszkednek a tangenciális illetve lineáris modellekhez olyan jól, mint a húzóvizsgálat adatai. Ez

bizonyos mértékű bizonytalanságot jelent az egyes paraméterek, illetve a fa biztonságának meghatározása szempontjából.

- A dinamikus vizsgálat nem lehetséges szélcsendes időben. Legalább 25 km/h szélsebesség szükséges a használható mérésekhez, de erősebb szélben megbízható és pontosabb adatokat kapunk.
- A dinamikus vizsgálat hosszabb ideig (legalább 3 óráig) tart, mint a húzóvizsgálat (kb. ½–1 óra). Ezt a hátrányt ellensúlyozza, hogy egyszerre több fa is vizsgálható.
- A dinamikus mérés körülményeit nem mi választjuk meg. A szélterhelés és szélirány sok esetben nem ideális a mérés idején. Más körülmények, mint pl. a talaj nedvességtartalma, a lombzat vagy a fagyott talaj, szintén nem kedveznek a mérésnek. (Bővebben látsd a 4. pontban).
- Végül, mivel nem szükséges a kezelő folyamatos jelenléte, a műszerek ki vannak téve az időjárás, vadkárosítás, lopás vagy vandalizmus következményeinek.

## F. A DINAMIKUS TESZT MEGBÍZHATÓSÁGA

Amint említettük, a dinamikus teszt viszonylag új megközelítés, amit még nem vizsgáltak meg olyan mélységig, mint a statikus húzóvizsgálatot. Emiatt a szakértők még nem fogadták el a dinamikus mérést standard faállékonyság-vizsgálati módszerként.

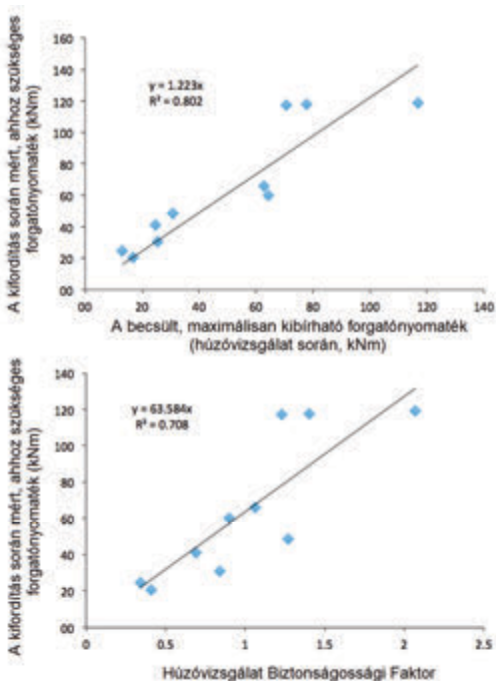
A dinamikus vizsgálat megbízhatóságát nem egyszerű igazolni. A biztonsági tényező pontosságát csak úgy bizonyíthatjuk, ha a fa kidől (ismert szélesebesség mellett). Megmérhetjük persze a döntési vagy törési nyomatókat, ha egy statikus vizsgálat során kidöntjük a fát, de, mint

korábban jeleztük, a szélterhelés másképpen hat a fára, mint a statikus húzás, így a statikusan mért döntési/törési nyomaték eltérő lehet a kidöntéshez szükséges szélterheléstől.

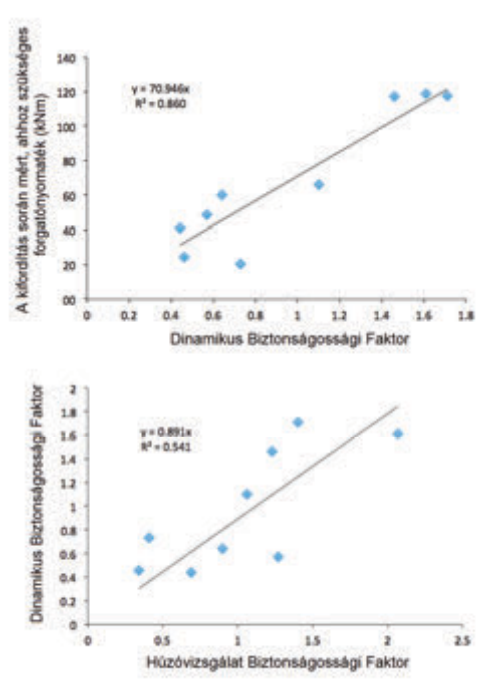
Egy nemrégiben megjelent tanulmányban (Fathi, 2020) a kutatók beteg kőrísfák biztonsági tényezőjét vizsgálták húzással és a dinamikus módszerrel. A mérések után a fákat a húzó felszerelés segítségével ki is döntötték, és mérték a döntéshez szükséges nyomatékokat.

A 3.48. ábrán látható a húzóvizsgálattal becsült paraméterek és a tényleges döntési nyomaték közötti összefüggés. A diagram egyértelműen mutatja, hogy a húzóvizsgálat nagyon pontosan előre jelezte a döntési nyomatékokat, és a nyomaték a biztonsági tényezővel is szoros kapcsolatban van.

A 3.49. ábra mutatja a dinamikus vizsgálat megbízhatóságát. Meglepő módon a dinamikus biztonsági tényező még jobban becsülte a valós döntési nyomatékokat, mint a statikus érték. Lehet, hogy ez csupán egybeesés, mivel a dinamikus szélnyomás-dőlés diagramból számolt döntési nyomás a valós szélterhelés viszonyok között érvényes, ami némileg eltér a statikus terhelési helyzettől. Ezt azonban sehogyan nem lehet kísérletileg megmérni, így a dinamikusan mért biztonsági tényezőt csak a statikus döntési nyomatékkal tudjuk összehasonlítani. Mindenesetre ez a jó korreláció biztató a dinamikus módszer megbízhatóságát illetően (lásd 3.49 ábrán fent). Végezetül, a statikus és dinamikus biztonsági tényezők között viszonylag elfogadható, bár nem nagyon szoros összefüggés látható. (Lásd



3.48. ábra:  
A húzóvizsgálat megbízhatósága: a becsült és a valós döntési nyomaték (felül), és a biztonsági tényező és a döntési nyomaték (alul) közötti kapcsolat



3.49. ábra:  
A dinamikus vizsgálat megbízhatósága: a dinamikus biztonsági tényező és a döntési nyomaték (fent), illetve a statikus és dinamikus biztonsági tényező (lent) kapcsolata

3.49 ábra lent.) Ez nem meglepő, hiszen a két mérés eltérő módon történik, és a két tényező közötti különbségek a vártnak megfelelőek. Amint korábban említettük, a statikus és dinamikus biztonsági tényezőt szinte lehetetlen a valós döntési szélnyomással összehasonlítani, hacsak nem történik egy „szerencsés véletlen”, ami bizonyítja a mérés pontosságát valós helyzetben. Ilyen eset történt a Soproni Egyetem botanikus kertjében. Itt a korábbi dinamikus mérések az egyik fa esetében 70 km/h referencia sebességnél 1 alatti biztonsági tényező értéket mutattak. Néhány héttel később a fa kidőlt egy viharban, ahol 63 km/h volt a maximális szélsébség. (Szerencsére senki sem sérült meg.) Egyetlen, az adott esetben jónak bizonyult fa megbízható dinamikus mérési eredményei



3.50. ábra:  
63 km/h maximális szélsébségű viharban kidőlt juharfa. A korábbi dinamikus mérések 1 alatti biztonsági tényező értéket mutattak 70 km/h-s referencia szélsébségnél

természetesen nem bizonyítják egyértelműen a mérés megbízhatóságát. Ez, valamint a dinamikus és statikus értékek összehasonlítása utal a módszer megbízhatóságára. A megbízhatóság igazolására és javítására vonatkozó kísérletek tovább folytatódnak.

## 4. A FÁK ÁLLÉKONYSÁGÁT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

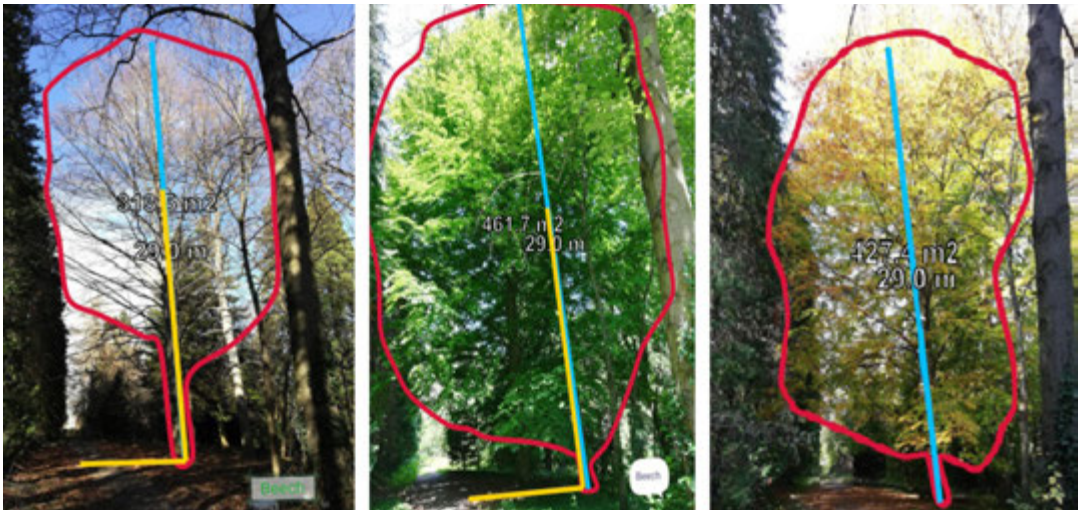
Akár statikus húzóvizsgálatot, akár dinamikus állékonyságvizsgálatot használunk, több tényező befolyásolja az eredményeket. Nem árt tudni, hogy az adott körülmények közt mért eredményeink nagyban eltérhetnek, ha más feltételek között mérjük azokat. Itt bemutatjuk a legfontosabb, az állékonyságot befolyásoló tényezőket.

### A. LOMBOZAT

A fák lombzata jelentősen befolyásolhatja a fák állékonyságát és a törzs törésbiztonságát. A szél a levelek és az ágak felületére fejt ki nyomást. Ha ez a felület megváltozik, a koronára ható erő, és ezzel együtt a fatörzsre és gyökérfőre ható nyomaték is eltérő lesz. Két dolog okozhat jelentős változást a lombzatban:

**Szezonális változások:** a lombos fák ősszel elvesztik a leveleiket, ami csökkenti a korona felületét. Ez elvileg csökkenti a szélterhelést, és így javítja a fa állékonyságát. Levelek hiányában azonban a korona deformációja is csökken, a pusztán ágak pedig jobban ellenállnak a szélnek, és így a légellenállás tényező magasabb lesz. Újabb tanulmányok szerint (Göcke és tsai., 2018, Fathi, 2020) a dinamikus biztonsági tényező gyakran inkább csökken, semmint növekszik a téli időszakban, a kisebb lombkorona felület ellenére.





3.51. ábra:

A lombzat szezonális változása (balról jobbra: télen, ősszel és tavasszal)

**Metszés:** a korona egy részének eltávolítása gyakran alkalmazott faápolási technika. Az erdészek a fűrészáru minőségének javításához használják, a városi faápolók pedig esztétikai, illetve biztonsági okokból. A metszéssel eltávolítjuk a korona egy részét, beleértve az ágakat és gallyakat is. A szezonális változásokkal szemben a metszés mindig javítja a fák állékonyságát.

## B. CSAPADÉK

Az eső – különösen a tartósan esős idő – mind a fát, mind a talajt érinti. Az esőáztatta lombzat tehetetlensége valamivel nagyobb, de a talaj esetében sokkal jelentősebb hatás. Elméletben az esővíz behatol a talajba és meglazítja azt, így a fa mozgásai nagyobbak, és kevésbé áll ellen a kidőlésnek. Ez azonban a fa gyökérszerkezetétől is függ.

Fathi (2020) kimutatta, hogy nedves talajban a fenyők stabilitása jellemzően javul. Sok fenyőnek mélyen a talajba nyúló főgyökérzete van. Az esővel átitatott felső talajrétegek súlya

tömörítheti az alsóbb rétegeket, és ez stabilizálhatja a mély gyökérzetet. Más fák (pl. a mamutfenyő) gyökérzete sűrű, sok földet is magába foglaló szövedék, itt a közrefogott föld megnövekedett súlya „lehorgonyozza” a fát, javítva annak stabilitását (Fathi és tsai., 2020).

A hó jellemzően csökkenti a fák stabilitását. A hó nem folyik be a talajba, és nem lazítja fel azt. Ehelyett felhalmozódik az ágakon (és a fenyők tűlevelein), esetenként nagyon jelentős mennyiségben, és a hó súlya jelentősen megnöveli a tehetetlenségi erőket, amikor a fák mozognak a szélben, és így megnövelik a dinamikus terhelést. A hó súlya ugyanakkor jobban belenyomja a fát a talajba, ami valamennyire ellensúlyozza ezt a hatást, azonban a hóterhelés még így is inkább az állékonyság csökkentése irányába hat. (A jegesedésnek hasonló hatása van.)

## C. FAGYOTT TALAJ

Télen, a mérsékelt és hideg égövben a hőmérséklet hosszabb időre fagypontra alá süllyedhet.

Így a talajban levő nedvesség is megfagy, és ez korlátozza a gyökerek mozgását. Részben a törzsben levő nedvesség is megfagy, ami javítja a szilárdságot is.

A tartós hidegben irreálisan magas biztonsági tényező értékeket mérhetünk (függetlenül attól, hogy melyik módszert használjuk). Ilyen körülmények között nem érdemes húzóvizsgálatot vagy dinamikus állékonyságvizsgálatot végezni.

## D. SZEZONÁLIS VÁLTOZÁSOK

Az itt leírt tényezők egy része, mint a lombkorona változása, fagyott talaj, illetve a hó hatása az évszakok változásához is köthető, és figyelembe kell venni a biztonsági tényező eredmények értelmezésekor. Egy további tényező az, hogy a téli időszakban a fák élettevékenysége is minimumra csökken.

Ez hatással van a gyökérzetre, amely tavasszal és nyáron a nedvek mozgása folytán megduzzad, és ez által jobban rögzíti a fát a talajhoz, ősszel és télen viszont összezsugorodik, így a gyökérzet lazábbá válik. Ez negatívan befolyásolja az állékonyságot, bár nem olyan mértékben, mint a lombzat változása vagy a fagyott talaj hatása (Bieker és tsai., 2010).

## E. A MÉRÉS IRÁNYA

Amint a korábbiakban már elhangzott, minden földrajzi területnek megvan a maga uralkodó széliránya. A fák úgy növekednek, hogy a törzsük és gyökérrendszerük ebben az irányban legyen a legerősebb. Általában az állékonyságot és a törésbiztonságot is ebben az irányban értékeljük, mivel a legerősebb szélterhelést is valószínűleg ebből az irányból kapja majd.

Ez általában könnyen megoldható statikus húzóvizsgálattal, ahol mi választjuk meg a mérés irányát. Ennek egyetlen feltétele, hogy a vonszolónak megfelelő rögzítési pontot találjunk,

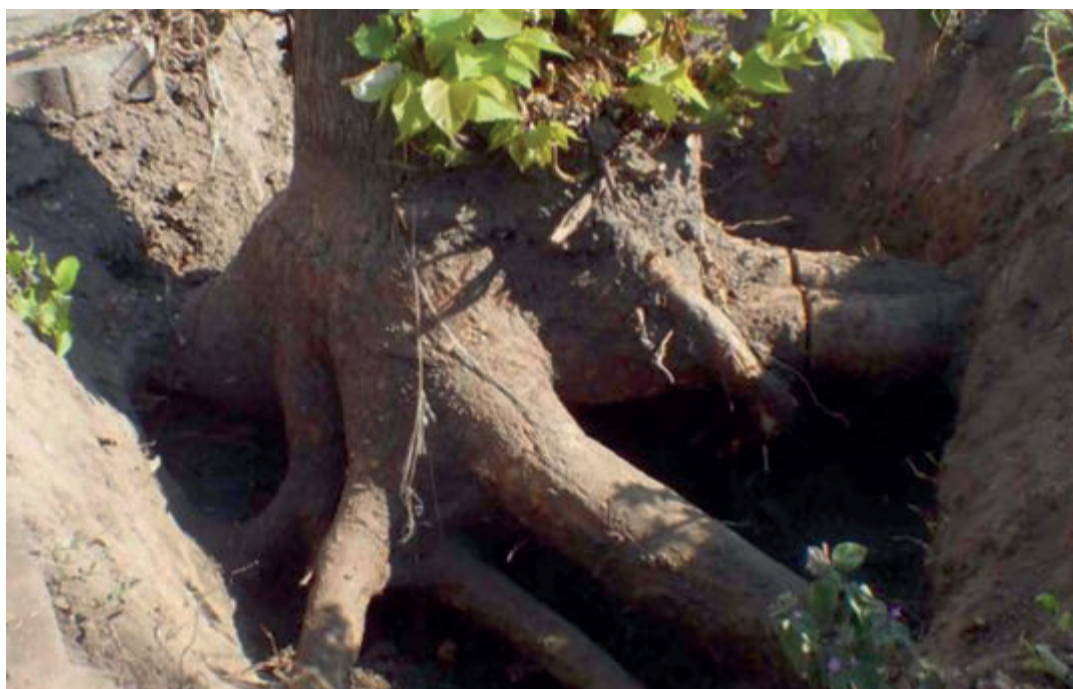
hozzávetőlegesen ebben az irányban, ami városi környezetben nem mindig egyszerű feladat.

Dinamikus mérés esetén nem tudjuk befolyásolni a mérés irányát; kénytelenek vagyunk elfogadni az adott szélirányt a mérés időpontjában. Szerencsére ez legtöbbször megegyezik az uralkodó széliránnyal, mivel a kereszt- vagy ellenirányú széljárás viszonylag ritka.

Nemrégiben végzett kísérletek (Fathi, 2020) tanulsága szerint a szélirány kevésbé meghatározó, mint más tényezők, mint pl. a talaj nedvességtartalma és a lombzat hatása. Ettől függetlenül mindig érdemes törekedni arra, hogy az uralkodó szélben végezzük a mérést, amennyiben lehetséges.



4.1. ábra:  
Egy fa, két telekommunikációs akna között. Forrás: saját munka



4.2. ábra:  
Hársfa kiásás közben, a főgyökerek jól látszanak. Forrás: Buza Antal



## IV.

# Gyökérkeresési módszerek – műszeres, roncsolásmentes lehetőségek

A fák gyökérzetének ismerete kulcsfontosságú lehet, hogy elkerüljük azok megsebzését. Erre elsősorban városi környezetben van szükség; építkezéseken, közmű felújítások során stb. A gyökérvizsgáló módszerek általánosságban a fák főgyökereit tudják feltérképezni (20mm fölötti átmérő) a felszín közeli talajrészben (többnyire maximum 2 méter mélységig).

A gyökerek feltérképezésére az elérhető roncsolásmentes vagy minimális roncsolással működő műszerek a következők: talajszondák (viszonylag olcsó és egyszerű), akusztikus módszerek (melyek azzal az előnnyel bírnak, hogy a vizsgált fának tudják a gyökérzetét feltérképezni, nem csak a talajban lévő összes gyökeret hovatartozás nélkül), talajradar és multielektrodás ellenállásmérő módszer (ez utóbbi kettő mélyebb tartományban is tud keresni). Gyökérkeresésre feltárás is rendelkezésre áll, sűrített levegős feltáró gép alkalmazása hatékony lehet, mivel ezzel lehet elérni a legkisebb roncsolást a gyökérzetben. A feltárásnak természetesen kutatási szempontból is fontos szerepe van, mivel ezzel ellenőrizhetjük, hogy a feltárás nélküli módszerek által feltérképezett gyökerek valóban meg egyeznek-e a feltárás során talált gyökerekkel. Ezzel az összehasonlítással a gyökérkereső műszerek minősíthetők lesznek és hosszú távon megbízhatóbbak.

A módszerek és megvalósításaik széles skálán változhatnak, ezek közül néhány példát és azok működési elveit mutatjuk be a következő fejezetben. Figyelmet fordítva a különböző módszerek korlátaira, előnyeire és hátrányaira. Külön meg

kell jegyeznünk, hogy a gyökérzet feltérképezése által nyert információk és a fák stabilitása, illetve biztonsági állapota között rendkívül csekély kapcsolat áll fenn. (Természetesen a nagyobb gyökerek hiánya stabilitási hibákat feltételez. Néhány korrelációs példát bemutatunk az esettanulmányban.) A következőkben bemutatott módszerek célja, hogy a feltérképezést a főgyökérzet megsebzése és a talaj feltárása nélkül valósítsa meg.

A gyökérzet biztonságát és a kiszakadás kockázatát biomechanikai és műszeres kiértékelésekkel vizsgálják. A törzs és a gyökérnyak vizsgálatára akusztikus tomográffal és fúrással van lehetőség.

A bemutatott technológiák közül nem mindegyik terjedt el széles körben, mindössze kis számban alkalmazzák hozzáértő személyek, de kutatásuk és fejlesztésük folyamatos. Azonban ahogy az igény folyamatosan nő az egyre pontosabb és megbízhatóbb favizsgálatok irányába, úgy fognak ezek a módszerek is egyre elterjedtebbé válni. Ez már mostanában is megfigyelhető bizonyos országokban, különösen olyan esetekben, ha a vizsgálni kívánt fa különleges értékkel rendelkezik.

### 1. SZÚRÓBOTOS TALAJSZONDA

A szúróbotos talajszonda bemutatásra kerül az „Egyszerű favizsgáló eszközök” fejezetben



is, itt csak röviden összefoglaljuk a használatát. A szúróbotos talajszonda egy hosszú fém rúd, melynek lekerekített vége van (a gyökerek megsebzését elkerülendő) fogókarral a tetején (4.3. ábra).

A rudat kézzel (vagy lábbal) lehet a földbe nyomni. A talajon keresztül halad mindaddig, amíg kövekbe vagy gyökerekbe (vagy bármi egyébbe) nem ütközik. Az ütközéskor keletkező hang és érzet anyagminőségtől függően változik. Ezzel a gyökerek helye „kitapintható” és a felszínen megjelölhető.

Ez az eszköz viszonylag olcsó és egyszerűen alkalmazható. Természetesen a hosszánál (általában kevesebb mint, 1,5 m) mélyebben elhelyezkedő gyökerek felkeresésére alkalmatlan. Fedett talaj esetén (járda, autópút) a szúróbotos szondát nem lehet a talajba juttatni, így a gyökerek feltérképezésére ilyen esetekben sem használható.



4.3. ábra:  
Szúróbotos talajszonda  
(forrás: Jerzy Stolarczyk)

## 2. AKUSZTIKUS MÓDSZEREK

Ahogy korábban említettük, a legnagyobb előnye az akusztikus módszereknek, hogy a vizsgált fához tartozó nagyobb gyökerek találhatóak meg vele. Más fákhoz tartozó gyökerek, vezetőek, illetve csövek és egyéb földbe temetett anyagok csak kis mértékben zavarják az ilyen módszereket.

További előnyként említhető, hogy ezek a műszerek, legtöbb esetben az akusztikus tomográfiához hasonló elvvel és eszközökkel működnek. A gyökérvizsgáló eszközök többnyire a tomográfiához kiegészítésként is elérhetőek. Ennek oka, hogy ugyanazok az akusztikus érzékelők használhatók arra, hogy „halljuk” azokat a jeleket, amelyek a gyökérszöveten és a talajon mennek át, mint amelyekkel a törzset vizsgáljuk. Az akusztikus tomográfia alkalmazása viszonylag jól ismert és elterjedt élő fák törzsének vizsgálatára és ezen a módszeren keresztül a gyökerek akusztikus vizsgálata is elérhetővé válik.

Az alapvető elv az akusztikus gyökérkeresés mögött az, hogy a hanghullámok a gyökérben gyorsabban terjednek, mint a talajban. A különbség számottevő; míg a talajban a hang terjedési sebessége 250-400 m/s között van, addig a gyökerekben 2000-4000 m/s között. A változó értékek a talajtípustól, fajától és a nedvességtartalomtól is függenek. (Bucur 1995; Divós és tsai. 2009).

Az akusztikus gyökérkeresésre két különböző módszer áll rendelkezésre. Az egyik lehetőség az, hogy a hanghullámot a talajt ütve gerjesztjük és annak az érkezését vizsgáljuk a gyökér nyakánál, vagy a gyökérnyaknál gerjesztünk jelet és azt egy talajba helyezett szondával vizsgáljuk. Az előbbi módszer a gyökerek elhelyezkedését a törzstől radiális irányba feltételezi, míg amikor az érzékelés a talajban történik, ilyen feltételezésekre nincs szükség.

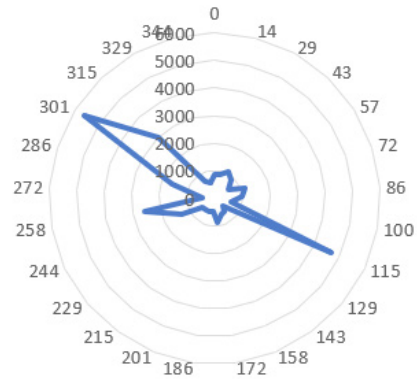
Mindkét esetben időt (és távolságot) mérünk, a jel terjedési ideje lecsökken, ha gyökér van a közelben.



4.4. ábra:

Akusztikus gyökérvizsgálat a gyökér közelében a törzsön elhelyezett jeladóval és földbe szúrható vevőkészülékkel. Ebben az esetben a jeladó jelet gerjeszt, amely a faanyagon keresztül halad. Gyökér közelében a vevőkészülék által fogott jel jelentősen megváltozik. Forrás: saját munka

Amikor a jelet a gyökérnyakon keltjük, az gyorsan terjed a gyökerekben és a talajba is behatol. Ha a vevőkészülék közelében nincsenek gyökerek, akkor a jel viszonylag lassan jut el a talajszondáig. Ahogy a vevőkészülék közelebb és közelebb kerül a gyökerekhez úgy csökken az idő. A jeladót a törzsön úgy kell elhelyezni, hogy a földhöz lehető legközelebb legyen. A jeladót fémkalapáccsal ütve gerjeszthetünk jelet a fában és gyökérzetében.



4.5. ábra:

A hang terjedési sebessége vizualizálva a törzs körül. A terjedési sebesség megnövekedett értékei gyökerek jelenlétére utalnak. (Körben az irány, fokokban, a gyűrűkön pedig a mért hangsebesség 1000 m/s-os lépésekkel, a nagyobb sebesség gyökér jelenlétét valószínűsíti)

A vevőkészülék egy talajszonda 30 cm-es tűskével ellátva, amely a talajjal szemben jó akusztikus csatolással rendelkezik. A jel terjedési ideje jelentősen megváltozik, ha a szonda 10 cm-es környezetében gyökér található. (Divós és tsai. 2009, Buza and Göncz 2015).

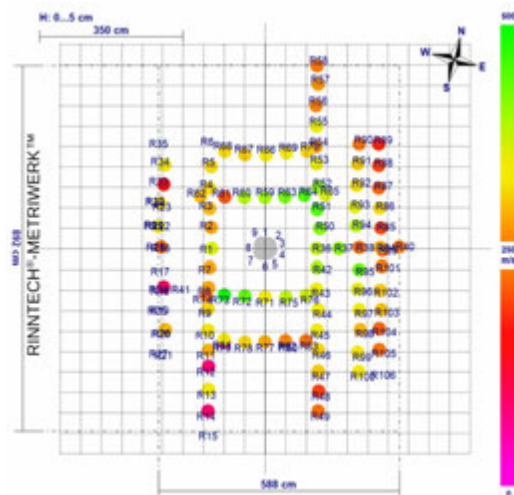
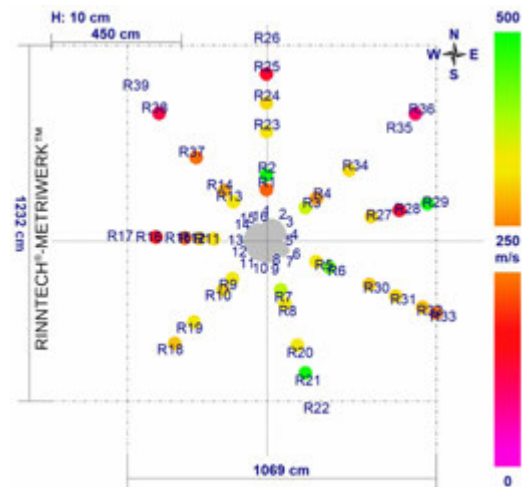
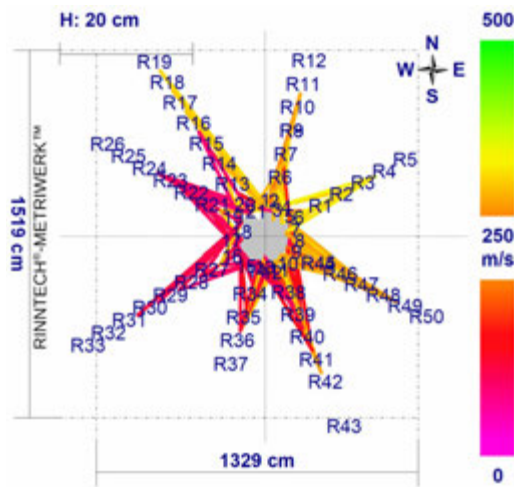


Az időt detektálhatjuk, vagy az adatok számítógépre küldve értékelhetők ki.

Akusztikus gyökerkereséssel csak nagyobb (min. 4 cm átmérőjű) gyökek térképezhetők fel. Ez a módszer a gyökeket is el tudja különíteni egymástól, ha azok távolsága legalább 20 cm. Ennek a technikának az alkalmazása egy esettanulmányon keresztül kerül bemutatásra, amely az 5) alatti alfejezetben található.

A másik esetben is, amikor az érzékelők vannak a gyökérvonalon, és a talajon keltjük a jelet, hasonló eredményeket kapunk. A fejlesztő szerint az Arborix™ rendszerrel

- ellenőrizhető a kifordulással szembeni biztonságosság,
- meghatározható a gyökértányér tömege és térfogata,
- meghatározható a gyökek elhelyezkedése.



4.6. ábra:

Az Arborix™ rendszer eredményeinek különböző megjelenítési lehetőségei

(balra fent, lent, jobbra fent). Forrás: <http://www.rinntech.de/>, Frank Rinn engedélyével.

Érzékelők a gyökérvonalon (jobbra lent). Forrás: saját munka



### 3. GEORADAR

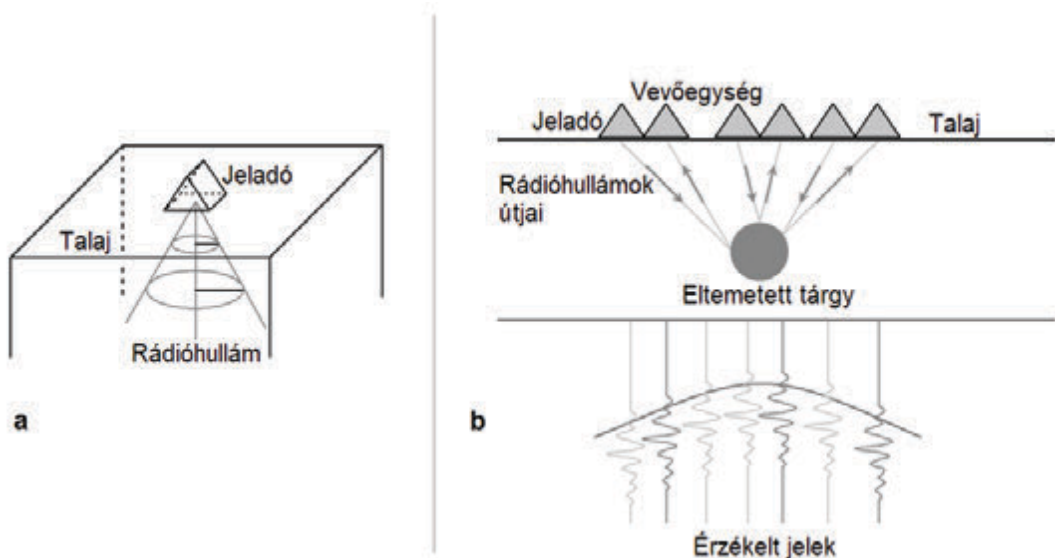
A georadar képes föld alatti objektumok felkutatására. Gyökérvizsgálat szempontjából az eszköz kezelése közben kihívást jelent az, hogy meg tudjuk állapítani, hogy az érzelt objektum valóban gyökér vagy valami más tárgy, esetleg repedés a földben stb.

A működési elve ennek a technikának – röviden – az, hogy vannak olyan anyagok amelyek a rádióhullámok számára „áttetszők”, míg más anyagok a hullámokat visszaverik vagy éppen elnyelik őket. A megfelelő frekvencia beállítása mellett a talaj áttereszti a hullámokat, míg a földben található gyökerek, vezetékek, egyéb eltemetett anyagok visszaverik azokat. A visszavert hullámokat lehet észlelni és a földalatti objektum(ok) helyét és mélységét ezek alapján megbecsülni.

A georadaros (angolul: Ground penetration radar vagy GPR) mérés elve geofizikusoktól származik, mivel különböző objektumokat és egyéb geofizikai szempontból fontos dolgokat képes felfedezni a földfelszín alatt. Gyökérkeresésre történő alkalmazása már évtizedek óta ismert és kutatott, a világ számos országában alkalmazták már sikeresen. (Hruska et al 1999; Cermak et al 2000; Guo et al. 2013; Wu et al 2014)

A módszerrel akár a nagyobb gyökerek 83%-a is megtalálható, míg a fals pozitív jelzések szűrhetők, illetve minimalizálhatók.

A szabványos georadar rendszer elrendezését Gou és kollégái az alábbiakban adják meg: „A szabványos georadar rendszer három alapvető részből áll: a vezérlő egységből (ez magába foglalja az impulzus generátort, a számítógépet és a hozzátartozó szoftvert), az antennákból (párosított adó és vevő antennákkal együtt), és a kijelző egységből.” (Gou és tsai. 2013)



4.7. ábra:

- A rádióhullámok kúp formában behatolnak a talajba. A kúp alakzat lehetővé teszi a radar számára az oldalirányú detektálást is.
- Felső: A georadar (GPR) egység a felszínen mozog, míg a felszín alatti objektum visszaveri a jelet. Alsó: A visszavert jelek egy hiperbolikus jelet hoznak létre, amely megadja a felszín alatti objektum helyzetét.



A georadar adó egységének jele behatol a talajba és visszaverődik a földben található objektumokról. A mért reflexió hiperbolikus formát vesz fel, ami terjedési idővel és amplitúdóval rendelkezik, ami információt ad az objektum méretéről, anyagáról és mélységéről (4.7. ábra). A jel frekvenciája általánosságban 400 és 2000 MHz között kell, hogy legyen. Ez fontos a felbontás és a mérés behatolási mélységének szempontjából, ami természetesen függ a talajminőségtől is. A legnagyobb frekvencia a 0,25 cm-es felbontáshoz tartozik, ami kb. a talaj felső 35-70 cm-es rétegében képes objektumok megtalálására, míg a legalacsonyabb frekvenciák körülbelül 4 cm-es felbontást tesznek lehetővé és akár 250 cm mélyen található objektumokat is képesek elérni (Guo és tsai. 2013).

Különböző kutatások alapján, önálló gyökerek és a teljes gyökérzet is feltérképezhető Georadar segítségével, valamint ez a technológia

megfelelő a biomassa becslésre fajoknál, akár aszfalt vagy kövek alatt található gyökerek esetén is. (Ferrara és tsai. 2014, Zhu és tsai. 2014, Cermak és tsai. 2000). Egy másik kutatás alapján a Beijing-i Egyetemen a módszer automatizálásán dolgoznak. Az ő összeállításuk a gyökerek 87,32%-át találta meg, és képes volt egy gyökérrendszer modellt készíteni, mely 82,75%-ban egyezik meg a (talaj eltávolítása utáni) referenciával. (Wu és tsai. 2014)

Az eszköz használatához nem szükséges különösebb fizikai erő, mivel a radar antennák legtöbbször kerekekre vannak szerelve és a georadart csak a meghatározott vonalak mentén kell tologatni, mint egy bevásárlókocsit. Maga a mérés egy lassú sétához hasonlítható.

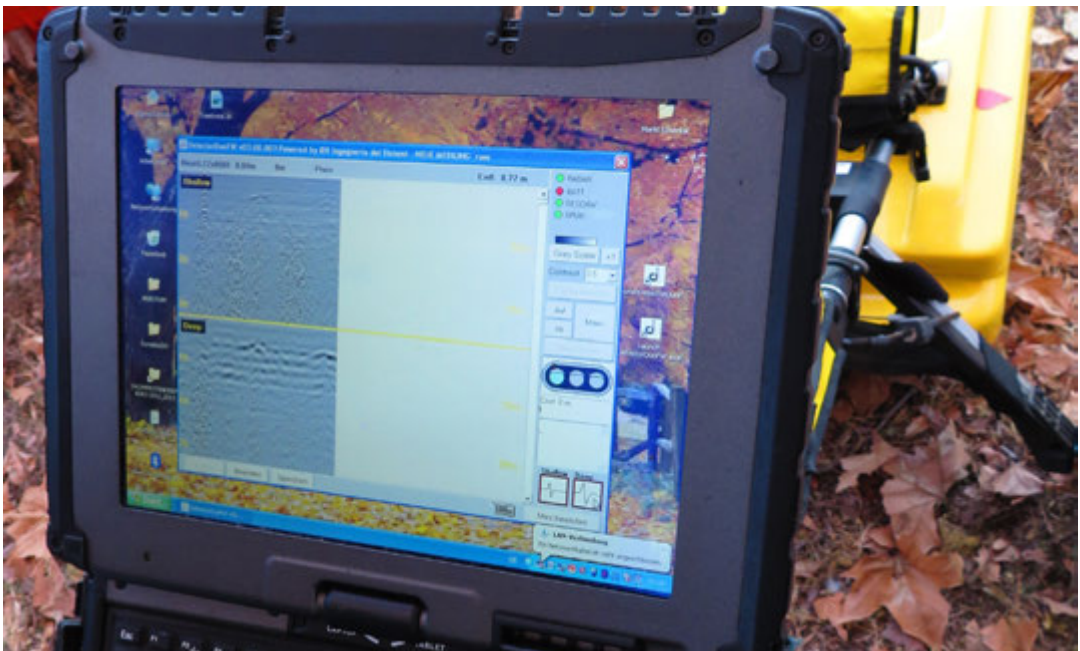
A technikában rejlő nagy lehetőségek ellenére is a georadaros gyökérfeltárásnak megvannak a saját korlátai.



4.8. ábra:

Georadar működés (demonstráció) közben. A kezelőnek lassan haladva kell tolnia a radart

- Talaj minőség: A talaj víztartalma rontja a mérés minőségét. Az ideális talaj georadaros méréshez száraz és homokos. (Hirano és tsai. 2008)
- Felületi geometria: A felületnek közel laposnak kell lennie.
- A gyökerek nedvességtartalma: A gyökerek és talaj nedvességtartalma közötti arány rendkívül fontos. Száraz gyökereket (térfogati nedvességtartalom 20% alatt) georadarral nem lehet megtalálni. (Dannoure és tsai. 2008; Hirano és tsai. 2009; Gou és tsai. 2013)
- Gyökér átmérő és pozíció: A gyökerek mélysége, iránya és szöge befolyásolja a detektálható jelet, továbbá a szomszédos gyökerek távolsága és kereszteződése is. (Butnor és tsai. 2001; Stokes és tsai. 2002; Barton és Montgau 2004; Hirano és tsai. 2009; Gou és tsai. 2013)
- Közeleli gyökerek: Ha két egymás melletti gyökér távolsága kellően kicsi, a georadar nem tudja őket egymástól elkülöníteni. Például, a 900MHz-es georadar képes megtalálni akár 1,9 cm átmérőjű gyökereket is, de két gyökeret egynek tekint, ha távolságuk 10-20 cm vagy kisebb. (Ha a vizsgált területen sok kis gyökér található, a radar lehet, hogy egy nagyobb gyökérnek fogja tekinteni.) (Hirano és tsai. 2009).
- Egyéb földalatti objektumok: Bizonyos tárgyak (pl.: kövek, kábelek, csővezetékek, vízvezetékek) a gyökerektől könnyen elkülöníthetők, míg más tárgyak (pl.: elhalt gyökerek, üres PVC csövek, idős csővezetékek stb.) nem. (Hruska és tsai. 1999; Stokes és tsai. 2002; Butnor és tsai. 2005; Cox és tsai. 2005; Zenone és tsai. 2008; Leucci 2010; Guo és tsai. 2013)



4.9. ábra:

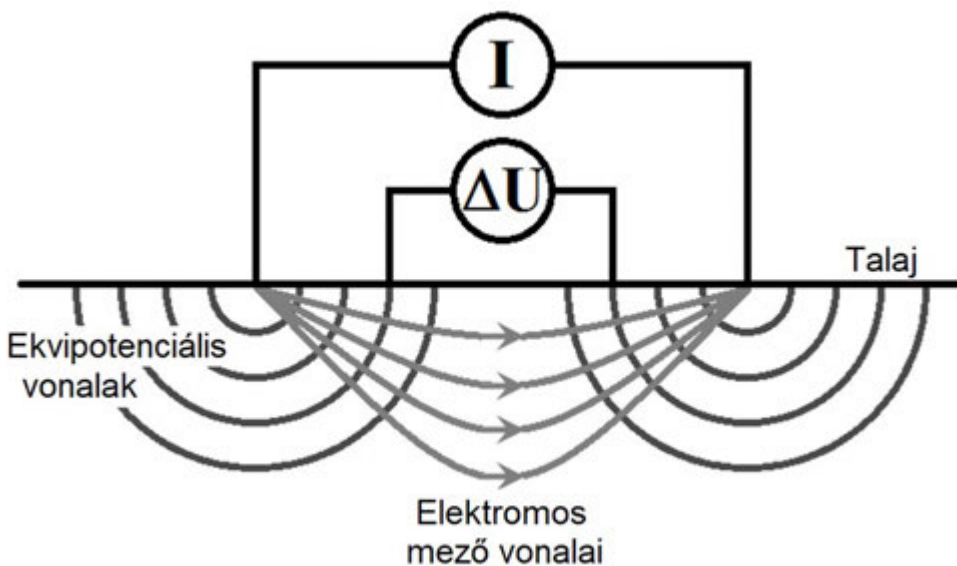
Egy georadar készülék képernyője. A készülék kezelése önmagában nem igényel különösebb tudást, azonban az adatok helyes leolvasása és kiértékelése egyaránt igényel szakmai és szoftver ismereteket is. Forrás: saját munka

A georadaros módszer képes megtalálni a vastagabb gyökereket roncsolásmentesen, a fent említett korlátokkal. Ahogy a gyártók megszokták jelölni, a technológia jelentős előnyei és lehetőségei, hogy a mérés könnyen ismételhető; az in vivo megfigyelés és a hosszútávú megfigyelése és tanulmányozása a gyökérszét felépítésének és fejlődésének. (Ez utóbbi kijelentés általában minden roncsolásmentes módszerre igaz.)

Nem csak az ismételhetőség figyelemreméltó, hanem a módszernek azon képessége, hogy megfelelő kalibrálás és szoftver használatával együtt képes utak és járdák alatt is a gyökerek feltérképezésére. Bizonyos esetekben érdemes megfontolni szakértő segítségét a gyökerek megtalálásában.

#### 4. ELEKTROMOS ELLENÁLLÁS TOMOGRÁFIA (ERT)

Az elektromos ellenállás tomográfia (ERT az angol „Electric Resistivity Tomography”-ból) vagy multielektrodás ellenállás képkészítés egy másik technológia, amely információt ad a talajról és a benne található különböző anyagokról. Hasonlóan hangozhat az előző fejezetben tárgyalt georadaros mérési módszerhez, azonban mind működési elvében, mind a mérés végrehajtásában is különbözik. A bemutatott módszerek közül ez a módszer még alapvetően kísérleti fázisban van. Ennek ellenére érdemes azokról a módszerekről is beszélni, amelyek jelenleg nem tartoznak az elterjedt és bejáratott módszerek közé, mivel a jövőben könnyen azzá válhatnak.



4.10. ábra:

Két elektróda áramot vezet a talajba ("I" a forrás). Az áram egy speciális elektromos mezőt hoz létre, amely leírható az elektromos mező vonalak és ekvipotenciális vonalak segítségével. A gerjesztett feszültség két másik elektródával mérhető. Egy bizonyos helyzete az elektródáknak információt ad a talaj egy hengeres szeletéről. Abban az esetben, ha a talaj minősége/állapota megváltozik vagy egy eltemetett tárgy vagy egyéb zavar van jelen a vizsgált területen, a mért értékek megváltoznak. Ahogy az elektródákat mozgatjuk, különböző szeletek vizsgálhatók és így a talajról egy 2D-s képet kapunk. Forrás: saját munka



Az ERT az elektromos ellenállást méri egy hengeres felületen a földben. Az elektromos ellenállás (a radar reflexiókhoz hasonlóan) változik a különböző minőségű anyagoktól függően. (Amato és tsai. 2008; Zenone és tsai. 2008)

Az ERT működéséhez legalább 4 elektródára van szükség, kettő az áram folyásának létrehozásához a talajban, kettő pedig a feszültség és elektromos potenciál méréséhez. Abban az esetben, ha a vezető és mérő elektródákat új pozícióba helyezjük, változik a hengeres felület, amelyet vizsgál. Több elektródát egymás után vagy másféle elrendezésbe helyezve a talajréteg, vagy akár több talajréteg is értékelhető. (Hagrey 2006; Morelli és tsai. 2007)

A fő gyökérzet ezekben a rétegekben található. Emellett arra is lehetőség nyílik, hogy 3D modellt készítsünk a gyökérzetről és – megfelelő

kalibráció után – megbecsülhessük a biomasszát a gyökerek térfogatával együtt. A nedvesség dinamikai jelenségek is vizsgálhatók a talaj elektromos ellenállásának mérésével. (Morelli és tsai. 2007; Amato és tsai. 2008; Rossi és tsai. 2011; Srayeddin and Doussan 2009; Garre és tsai. 2011; Robinson és tsai. 2012)

Annak érdekében, hogy még inkább részletes és megbízható adatokat kapjunk, az ERT hatékonyan párosítható a Georadaros méréssel. (Hagrey 2006; Morelli és tsai. 2007; Zenone és tsai. 2008; Zhu és tsai. 2011)

(Vegyük figyelembe, hogy egy másik módszer is – amelyet törzs vizsgálatra használnak – szoktak elektromos- vagy elektromos ellenállás tomográfának nevezni. A gyakorló anyagban a technikát amellyel a törzset lehet vizsgálni hasonló módon, impedancia tomográfának nevezzük.)





## 5. ESETTANULMÁNYOK

Két esettanulmányt mutatunk be ebben a fejezetben a roncsolásmentes gyökérkeresés lehetőségeit és korlátait bemutatva az akusztikus gyökérkeresésre fókuszálva.

Mindkét esetben a 2)-es fejezetben bemutatott akusztikus módszert használtuk. A hangot a gyökérnyakban generáltuk és a jelet egy földbe helyezett szondával érzékeltük. Az első esetben a gyökérrendszer került feltérképezésre, majd feltárás történt. A második esetben pedig a feltételezett gyökérrendszer lett megállapítva és azzal biztonsági kalkulációkat végeztünk.

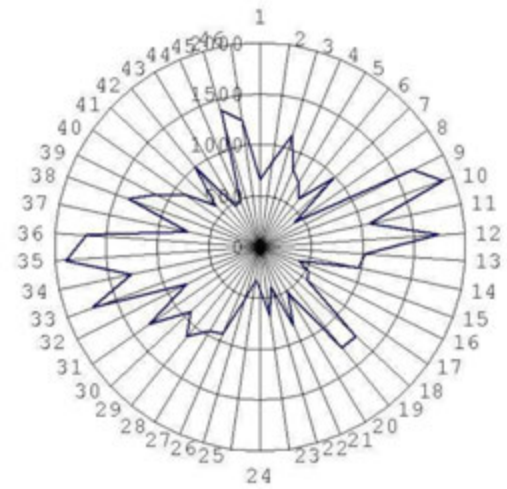
### A GYÖKÉRZET FELTÉRKÉPEZÉSE ÉS FELTÁRÁSÁNAK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A Soproni Egyetem botanikus kertjében egy nyírfa került kiválasztásra az esettanulmány elkészítéséhez. A gyökérzet akusztikus feltérképezése 8 talajszondával készült. (A feltérképezéshez egy szonda is elegendő, azonban több szonda felgyorsítja a mérést.)

A mérés a törzs körül több körben lett végrehajtva. A talajtól a talajszondák tuskójának

tetejét is mérve lehetőség nyílt a gyökerek mélységének a meghatározása is. Emellett az idő adatokat mértük. Ezek után egy körgrafikonon vizualizáltuk a mért hangterjedési sebességeket. Ezt szemlélteti a 4.12. ábra.

Később a gyökerek feltárásra kerültek. A roncsolásmentes mérésből származó eredményeket rá lehetett vetíteni a feltárt gyökerekre. Az eredmények jól láthatóan illeszkedtek a feltárt gyökerekre, ahogy azt az 4.13. ábra is mutatja.



4.12. ábra:  
A terjedési sebességek vizualizálása



4.11. ábra:  
Talajszondák

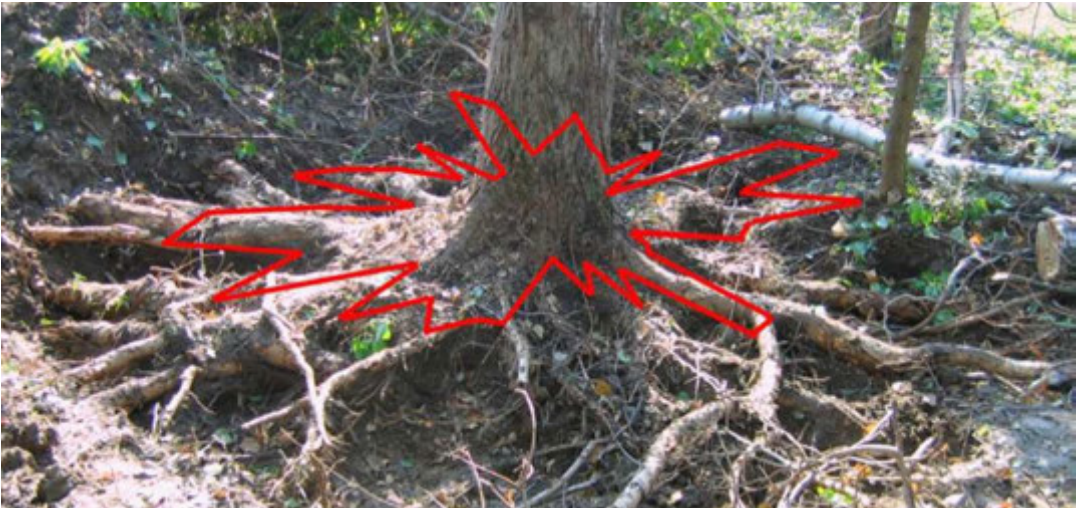


Figure 4.13. ábra:

A terjedési sebességek vizualizálása rávetítve a feltárásról készült fotóra

## A VAN-E A GYÖKÉRZET ELHELYEZKEDÉSÉNEK KAPCSOLATA A STABILITÁSSAL?

Újra és újra felmerülő kérdés, hogy vajon a gyökérzet elhelyezkedése összefüggésben van-e a fa stabilitásával. Kimutatható azonban, hogy a gyökérzet teherbírási készsége más tényezőktől is függ, nem csak önállóan a fő gyökerek elhelyezkedésétől. Ennek ellenére készült egy kutatás arról, hogy a főgyökerek felmérése használható-e az egész gyökérzet stabilitásának becslésére.

Ehhez a vizsgálathoz két lucfenyő (*Picea Abies*) került kiválasztásra szintén a Soproni Egyetem botanikus kertjében. A két fa egymáshoz közel helyezkedik el, így az életkörülményeik azonosnak tekinthetők. Egyetlen feltűnő különbség a két fa között, hogy az egyiket Gyűrűs Tuskógombatámadás érte (*Armillaria mellea*). A kutatás első részeként a gyökérzeteket akusztikus módszerrel térképeztük fel. A gyökerek elhelyezkedését különböző sugarú (0,5 m, 1 m és 1,5 m) körökben adtuk meg. A körök középpontjai a törzsek voltak. A talajszonda 15 cm-es lépésekkel volt a talajba szúrva. 40

cm-es tuskéjú talajszondákat használtunk, melyek a fél méternél nem mélyebb gyökerek feltérképezésére alkalmasak. Ezt a mélységet lucfenyő esetében elegendőnek vettük. (A jeladó a gyökérnyakba volt beszúrva, a szöge a föld felé mutatott 45°-os szöget zárva és a jeladót legalább három alkalommal kalapáccsal megütve gerjesztettünk jelet a talajszonda minden különböző állásában.)

Annak érdekében, hogy az eredményeket összehasonlíthassuk egy bizonyított mérési módszerrel, húzóvizsgálatot végeztünk mindkét fán. A projekt célja az volt, hogy összefüggést találjunk a gyökérzet és a stabilitás között, azonban csak a gyökerek helye nem elegendő adat ahhoz, hogy összehasonlítsuk a húzóvizsgálatokból származó biztonsági tényezőkkel. Ennek a problémának a leküzdése érdekében egy gyökér tányér területet becsültünk a gyökerek elhelyezkedése alapján. (látsd 4.15. ábra)

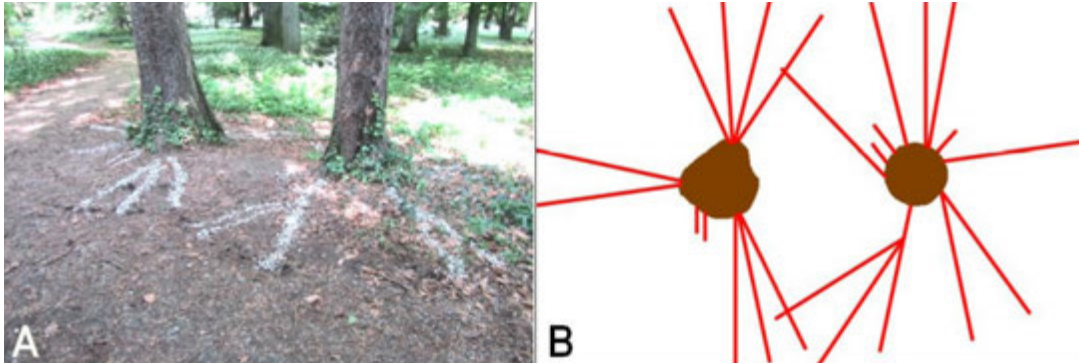
Olyan területeket becsültünk meg, amelyeken a gyökerek önmagukat „tartani” képesek. Továbbá

a talaj tulajdonságait is felvettük és a gyökerek kiszakadásához szükséges forgatónyomatékokat kiszámoltuk.

A gyökérzet feltérképezéséből származó biztonságosságra vonatkozó becslések messze voltak a húzóvizsgálat nyújtotta eredményektől (kevesebb mint a fele), de az adatok biztató

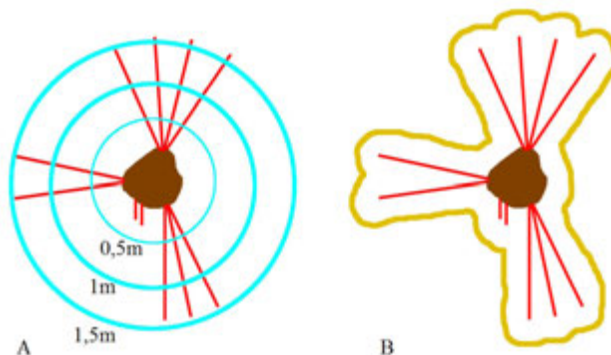
tendenciát mutatnak, amelyek hasznos előrejelzésekhez vezethetnek a jövőben. Az adatokat a 4.1. táblázatban találhatók.

Érdekes felfedezése a méréseknek, hogy mindkét fánál a főgyökerek növekedési iránya a szomszédos fát elkerüli (4.14. ábra).



4.14. ábra:

Gyökérzet feltérképezése. A talált gyökerekről készült fotó (A) és számítógép által készített modell (B)



4.15. ábra:

Gyökér térkép (A) és a gyökerek által elért felület (B) a 2. számú fánál

	SF_húzó	SF_gyökértérkép	Biztonsági tényezők aránya
1. Fa	5.07	1.94	2.61
2. Fa	3.02	1.27	2.38
Arány (1. Fa / 2.Fa)	1.68	1.53	

4.1. táblázat:

A húzóvizsgálatból származó biztonsági tényezők (SF húzó) és a gyökérzet feltérképezéséből származó (SF gyökértérkép) és arányaik. Érdekes megállapítás, hogy a két fa biztonsági tényezőinek aránya közel áll egymáshoz, függetlenül a vizsgálat módszerétől.







## V.

# Távolsági, műszeres fafelmérések

## 1. BEVEZETÉS

A távolsági műszeres fafelmérés kifejezés minden olyan fára vonatkozó adatgyűjtési módszerre utal, amely nem igényli a favizsgáló, faápoló közvetlen jelenlétét a vizsgált fánál. Ezek általában egyben olyan módszerek is, amelyek lehetővé teszik a mennyiségi megközelítést – azaz nagyszámú adat gyűjtését, nagy populációkról. A megközelítés nagy előnye, hogy minden bemeneti adat tárolásra kerül (archiválják őket), és ezeket később különféle szempontok szerint,

kívánt részletességgel lehet elemezni az utófeldolgozás során. Ezeket az eljárásokat jelenleg az alábbiak korlátozzák, nehezítik:

- professzionális berendezések szükségessége
- jelentős mennyiségű továbbított adat
- jelentős pontatlanság jelentkezik bármely technológiai elem elhanyagolása vagy meghibásodása esetén.

Ebben a fejezetben a következő területekről fogunk beszélni:

MÓDSZEREK	TULAJDONSÁGOK	GYAKORLATI PÉLDÁK A HASZNÁLATRA
<b>Helymeghatározás GNSS segítségével</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Műholdakon alapuló hely(zet) információk</li> <li>• Az ingyenes (vagy nem katonai) felhasználás pontossága korlátozott</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Saját helyzet megállapítása</li> <li>• Térképek letöltése a kívánt, vizsgált területről</li> <li>• A kérdéses fa helyzetének egyszerű meghatározása</li> </ul>
<b>Pozíció elemzés IMU-val kombinált GNSS segítségével</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precíz, műholdas helymeghatározás</li> <li>• Többféle érzékelőt (pl. giroszkóp, gyorsulásmérő, ...) igényel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A kérdéses tárgyak, fák helyzetének pontos meghatározása</li> <li>• Lehetőség pontos (kalibrált) fényképek készítésére</li> </ul>
<b>Képfeldolgozás (vízszintes képek)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Számos módszer létezik az adatok mind kvalitatív, mind kvantitatív elemzésére</li> <li>• Mind speciális szoftver és hardver is szükséges hozzá</li> <li>• Akár AI-val és LiDARral is kombinálható</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fafaj meghatározás</li> <li>• A fák paramétereinek mérése</li> <li>• A választott kvalitatív adat (vitalitás, vízszintes lombterület index, stb.) mérése</li> </ul>
<b>LiDAR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Részletes információk a szerkezetek alakjáról vízszintes (légi) vagy függőleges (földi) használat esetén</li> <li>• A nagy felbontású LiDAR pont halmazok a törzs szerkezetének pontos mérésére is használhatóak</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Digitális modell az adott területről</li> <li>• Egyes fák törzseinek, vagy akár az egész fának a pontos 3D-s modellezése</li> </ul>
<b>Drónok</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A különböző érzékelők a felhasználás magasságába juttathatóak általa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A fák állapotának felmérése a koronáig való felmérés nélkül</li> <li>• A faállományok állapotának területi felmérése, nagy részletességgel</li> </ul>

## 2. HELYMEGHATÁROZÁS

**A GNSS-t, a globális navigációs műhold rendszert** (Global Navigation Satellite Systems) az utóbbi években széles körben alkalmazták a fák helyének meghatározására. Európában a következő rendszerek állnak rendelkezésre (vagy lesznek elérhetőek a következő években):

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

A szolgáltatás elve a térbeli hely meghatározásának lehetővé tétele műholdak segítségével. A kliens eszközök kisméretű elektronikus rádióvevőket használnak, amelyek a műholdakról küldött jelek alapján lehetővé teszik helyzetük méteres pontossággal történő kiszámítását. A pontosság speciális vagy tudományos alkalmazásokban akár néhány centiméteres is lehet, különféle kalibrálási eljárások használatával. Némileg leegyszerűsítve, a műholdas helymeghatározó rendszerek műholdas rádiós távolságmérő rendszerek:

- A rádiós rendszer rádióhullámokat használ egy bizonyos paraméter mérésére. A „rádiós távolságmérő” rendszer rádióhullámokat használ a távolság mérésére az alábbiak szerint: Az adó egy ismert helyzetű pontra kerül, innen időbélyegzett rádióhullámokat továbbít. Abban a pontban, amelynek pozícióját mérik, egy vevőt helyeznek el, amely összehasonlítja az időbélyegeket az „órájával”. Ez lehetővé teszi a késés mérését. Mivel a rádióhullámok ismert sebességgel mozognak, elegendő a mért késést megszorozni ezzel a sebességgel a szükséges távolság kiszámításához. A helyzet meghatározásához a távolságot több pontról kell megmérni ugyanúgy, mint az első esetben. Ezután a vevő pozíciója kiszámítható például trilaterációval vagy multilaterációval.

- A műholdas rendszer által ismert helyek a Föld körül keringő műholdak. Ezért az általuk továbbított üzeneteknek nem csak az időbélyegeket kell tartalmazniuk, hanem a műhold útparamétereit is, amelyekből az üzenet elküldésekor érvényes pozíció kiszámítható.

A GNSS rendszerrel kapcsolatban a következő problémák merülhetnek fel:

- A GNSS jelek nagyon „egyenesekek”, az épületek blokkolhatják azokat.
- A vevőkészülékeknek eltérő az indítási ideje (meleg és hideg indítás), általában tíz másodperc és egy perc közöttiek. Ez az indítási idő azért szükséges, hogy a vevő több műhold jelét is befogja, ezek a helyzet kiszámításához szükségesek.
- A csak GNSS-re támaszkodó pozíciófrissítések másodpercenként egy alkalomra korlátozottak. Ez nagy, lassan mozgó tárgyak követésére alkalmas. Az indítási idő túl hosszú, és a frissítési gyakoriság kevés a beágyazott alkalmazások számára.
- A GNSS pontosságát méterben mérik, ami túl durva ahhoz, hogy a legtöbb beágyazott alkalmazásban használható legyen.

Az **inerciális méréseket** (IMU az angol „Inertial measurement unit” után) a GNSS-sel kombinálva alkalmazzák a módszer hiányosságainak kiküszöbölésére és a pontosság növelésére. Az IMU-k pontosabb helymeghatározást és gyorsabb frissítéseket biztosítanak. Az IMU-k relatív pozíció adatokat szolgáltatnak egy ismert kiinduló pontról, míg a GNSS-vevők abszolút helyzetinformációkat nyújtanak. Tehát ez a két módszer kiegészíti egymást.

Az IMU-k az alábbi típusú mozgás, elmozdulás, gyorsulás érzékelők közül egyet vagy többet tartalmaznak:

- A giroszkópos érzékelők mérik a helyzet szögének változását, általában másodpercenként, fokban kifejezve. Az integrált szögsebesség felhasználható az irány változásának



5.1. ábra:

A GNSS rendszer által meghatározott hely és annak bizonytalansága légi felvételen

nyomon követésére. A giroszkópos érzékelők egy, két vagy három tengellyel rendelkeznek. A giroszkópok a relatív mozgást a gravitációtól függetlenül figyelik. Emiatt „drift” („sodródás”) nevű helyzethiba léphet fel.

- A gyorsulásmérők érzékelik a lineáris gyorsulást, beleértve mind az eszköz mozgásából adódó gyorsulást, mind a Föld gravitációjából adódót. A gyorsulást G egységekben mérik, amelyek a Föld gravitációs erejének többszörösei. A gyorsulásmérők egy, kettő vagy három tengellyel állnak rendelkezésre, amelyek meghatározzák az X, Y, Z koordinátarendszert. A gyorsulásmérő adatai felhasználhatók a készülék statikus irányának mérésére a készülék szögének mérésével és a gravitációs kompenzáció kiszámításával.
- A mágneses átalakítók a mágneses tér intenzitását mérik, általában microTesla ( $\mu\text{T}$ ) vagy Gauss ( $100 \mu\text{T} = 1 \text{ Gauss}$ ) egységekben. A

mobil elektronikához használt leggyakoribb mágneses érzékelő a Hall-effektív három-tengelyű magnetométer. A Föld mágneses mezőjének nagysága 25 és 65  $\mu\text{T}$  között mozog, a földrajzi elhelyezkedéstől és a dőlésszögtől függően. A mágneses tér szögének és a gravitációs szög érzékelésének köszönhetően olyan adatokat kapunk, amelyek felhasználhatóak a pozíció nagy pontosságú meghatározására. Ahogy valóban a megfelelő koordinátákat kapjuk, ismernünk kell az aktuális szélességi és hosszúsági fokot.

- A nyomásérzékelők hektopascal (hPa) vagy milliBar (mbar) egységekben mérik nyomások különbségét vagy az abszolút nyomást. A szokásos légköri nyomás tengerszinten 1013,25 hPa. A magasságváltozások a környezeti levegő nyomásának megfelelő változásokat okoznak, és felhasználhatók a függőleges mozgás monitorozására.



### 3. KÉP FELDOLGOZÁS

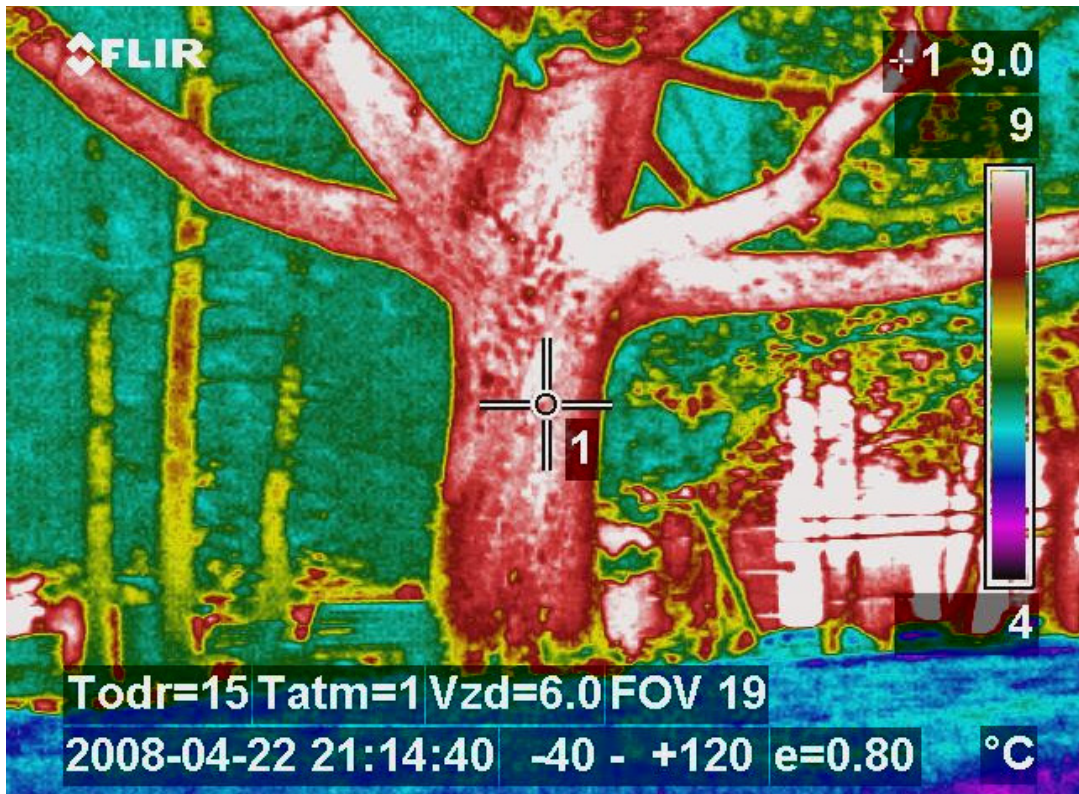
A fák jó minőségű fényképeiből számos paraméter – kvantitatív és kvalitatív is – határozható meg. Erre a célra földi fényképeket használnak, amelyeket vagy „szabadkézzel” készítettek vagy olyan hordozó segítségével, melynek helyzete pontosan ismert a fényképezett fákhoz képest (lásd fent a GNSS-t). A fénykép dimenziói elemzésének előfeltétele, hogy ismerjük a kamera paramétereit (a beolvasó chip és az objektív jellemzőit). Ezt kalibrálással érjük el. A kamerákat úgy kalibrálják, hogy fényképet készítenek a kalibrációs mezőről meghatározott fényviszonyok között, ennek eredményeként YM számítással (fényerővel súlyozott átlagolással) a pixelek helyzete meghatározható az érzékelő mezőben.

A fényképek elemzéséből a következő adatok nyerhetők:

- Dendrometriai paraméterek (törzs és korona mérete, fa magassága),
- A törzs alakjellezői (biomechanika, térfogat-elemzés céljából),
- Vízszintes levélfelület-index (lombozat mértéke),
- A törzs horgonyzásának, rögzítésének, változásainak elemzése (összehasonlító kalibrált mérésekhez, az időbeli változást figyelve).

### 4. SZÍNKÉP ELEMZÉS

Infravörös fotózáskor a használt fényérzékelő érzékeny az infravörös tartományra. A mérés



5.2. ábra:

*Infra fotó egy fa törzséről és vázágairól*



során használt spektrum egy részét közeli infravörösnek nevezzük, hogy megkülönböztessük a távoli infravörös tartománytól, amely a hőképzés területe. A fényképezéshez 700 és 900 nm közötti hullámhosszakat használnak. Az érzékelő általában érzékeny a látható fényre, ezért infraszűrőt is használnak; ez lehetővé teszi az infravörös (IR) fény átjutását a kamerába, de blokkolja a látható fény spektrumának egészét vagy nagy részét (a szűrő fekete vagy sötétvörös színűnek néz ki).

A klorofill erősen elnyeli a sugárzást a vörös és a kék hullámhosszakon, de tükrözi azt a spektrum zöld sávjában. A leveleket a legzöldebbnek nyáron érzékeljük, amikor a klorofilltartalom eléri a maximumot. Ősszel, amikor kevesebb a klorofill a levelekben, kevesebb az abszorpció és nagyobb a reflexió a spektrum vörös sávjában. Ezért a leveleket sárgának vagy vörösnek érzékeljük (a sárga a zöld és a vörös kombinációja). Az egészséges levél belső felépítése a közeli infravörös sugárzás kiváló diffúz reflektoraként működik. A közeli infravörös tartományban mért értékekkel meg lehet különböztetni az egészséges növényzetet a sérült vagy beteg vegetációtól.

Korábban próbálkoztak a törzs infravörös fényképezésével is, üregek, korhadások kimutatására. Az összehasonlító tesztek azonban nem bizonyították, hogy a spektrális fényképezés ezen alkalmazása a gyakorlatban érvényes és használható lenne.

## 5. NEURÁLIS HÁLÓK ÉS MESTERSÉGES INTELLIGENCIA

A közeljövőben számítani lehet a fényképek neurális hálózatokkal történő feldolgozására. A mesterséges neurális hálózat a mesterséges intelligencia egyik számítási modellje. Ez egy párhuzamos adatfeldolgozásra tervezett

struktúra. Mesterséges (vagy formális) idegsejtekből (neuronokból) áll, amelyek a biológiai idegsejtek működését utánozzák nagyon leegyszerűsített formában. A neuronok összekapcsolódnak, jeleket továbbítanak egymásnak, és bizonyos átviteli funkciók segítségével átalakítják azokat. Az idegsejtek tetszőleges számú bemenete van, de csak egy kimenete van. A neurális hálózatok használata lehetővé teszi a szükséges paraméterek automatikus keresését nagy mennyiségű adat gyűjtése során. Jelenleg a fényképek alapján meg lehet határozni a fa taxonjait, és más paraméterek elemzésén is dolgoznak.

## 6. LiDAR

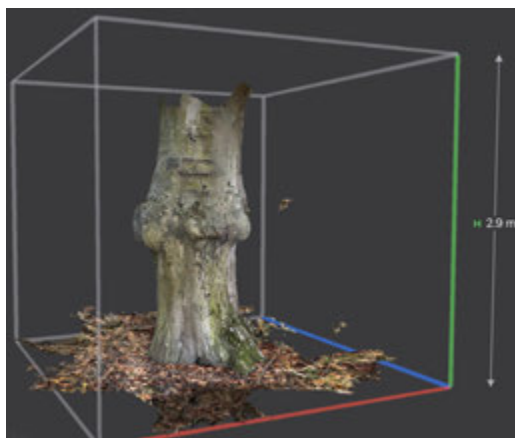
A LiDAR (Light Detection and Ranging), egy betűszó, mely a lézeres távérzékelésre utal. Vonalmenti mérés során két objektum távolságát lehet mérni vele, a fény segítségével. Azt méri, hogy egy fénysugár mennyi idő alatt éri el az adott tárgyat és verődik is vissza onnan. Jelenleg ezt a technológiát is viszonylag elterjedten alkalmazzák a környezet vagy tárgyak 3D térképeinek létrehozására.

A fák 3D szkennelésével számos elemzés végezhető az egyszerűtől (a paraméterek pontos mérése a törzs vagy a teljes korona egyes szakaszain) a komplexekig (az egyes profilok teherbírásának kiszámítása, figyelembe véve a szabálytalan keresztmetszetet vagy üregek miatt felhasadt törzset is). Haladó biomechanikai elemzésnek (Advanced Biomechanical Analysis, [www.adbian.com](http://www.adbian.com)) hívjuk a rendszert, mely mind a fák és részeik 3D-s modelljeit, mind a vizuális és műszeres felmérés eredményeit ötvözi.

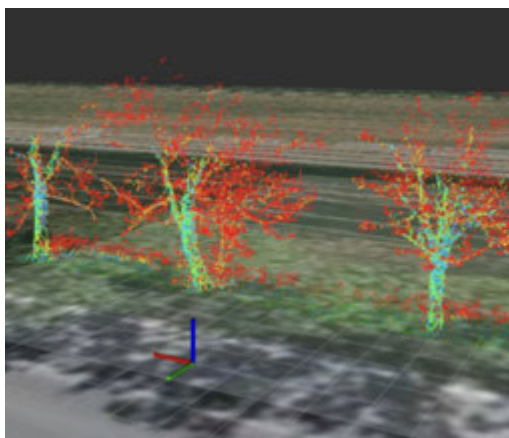
A LiDAR-ok használhatók „szabadkézben”, vagy hordozhatóak olyan eszközökön, amelyek pontos helyzet meghatározást is adnak. Ez az eszköz lehet például drón, mérőautó vagy mobil gyűjtőkészlet (kerékpár stb.).



5.3. ábra:  
Egy fa LiDAR-ral mért pontfelhője (balra) és fotója (jobbra)



5.4. ábra:  
Egy törzs 3D modellje, kézi LiDAR mérés alapján



5.5. ábra:  
Egy fasor LiDAR-os felmérése, 60 km/órával menő autóból mérve

## 7. DRÓNOK<sup>1</sup>

A pilóta nélküli repülőgép (amelyet néha UAV-nak hívnak az angol „Unmanned Aerial Vehicle” – pilóta nélküli légi jármű után), vagy drón, egy kisméretű repülőgép, amely távolról is üzemeltethető, vagy képes önállóan repülni előre beprogramozott repülési tervek vagy bonyolultabb dinamikus autonóm rendszerek segítségével. A drónok számos fent leírt eszköz hordozói lehetnek, amelyek a fák tetejére helyezhetők, és

ezáltal információt szolgáltatnak a megfigyelt egyének minőségi / mennyiségi paramétereiről. A fák nagyobb populációinak (állományainak) vizsgálatakor könnyű hozzáférést biztosíthatnak a földi hozzáférés biztosítása nélkül. Ez jelentős

1. A fordító megjegyzése: a fejezet a cseh szabályzások alapján készült, a Magyarországon érvényes szabályzás a leirtaktól eltérhet.

előnyt jelent, különösen bonyolult terepen (zord, rögös vagy lejtős terep, belépési korlátozások stb.). Ugyanakkor a drónok használatának számos korlátja van.

Ha egy személy bármilyen drónnal vagy kvadrokopterrel repül, akkor a légi forgalom résztvevőjévé válik, és be kell tartania bizonyos szabályokat. A repülést az emberektől biztonságos távolságban kell végezni. A légi forgalmat is el kell kerülni. Ez azt jelenti, hogy nem szabad repülni a repülőterek közelében. Az ajánlott távolság 5500 méter. El kell kerülni a repülőtéren kívüli légi forgalmat is, ezért nem szabad a talajszint felett 300 méternél magasabbra repülni. Szintén tilos repülni korlátozott légtérben vagy repüléstilalmi zónában. A drónok repülésénél elengedhetetlen az is, hogy a drónpilóta mindig szem előtt tartsa a gépet, ami de facto kizárja a felhasználót követő funkcióval rendelkező drónok használatát.

Ha a felhasználó kereskedelmi célokra üzemeltet drónt, regisztrálnia kell magát a Polgári Repülési Hatóságnál, és ott meg kell szereznie a megfelelő engedélyt. Ehhez kapcsolódik a felelősségbiztosítás megkötésének követelménye a károk fedezésére.





# VI.

## *Dendrokronológia*

Mit gondolunk, milyen esztendő lehetett az i.e. 147. év, vajon száraz év volt? A dendrokronológusok Dániából, Georgia államból, Angliából, Írországból, Kaliforniából, vagy éppen Németországból képesek megadni erre a kérdésre a választ. Az általuk úgynevezett “messter-kronológia” segítségével képesek választ adni e kérdésre cirka 2300, 7000 vagy akár 12000 évre visszamenőleg. A dendrokronológia tudománya a fák évgyűrűinek időbeni besorolásával foglalkozik, mellyel képesek egy-egy adott évgyűrű korát elhelyezni egy naptári évben. Legfőbb felhasználói különböző területeken dolgozó történészek, illetve klímaszakértők, mivel az évgyűrűk fejlődését jelentősen befolyásolják a környezeti hatások is. Nézzük a részleteket.

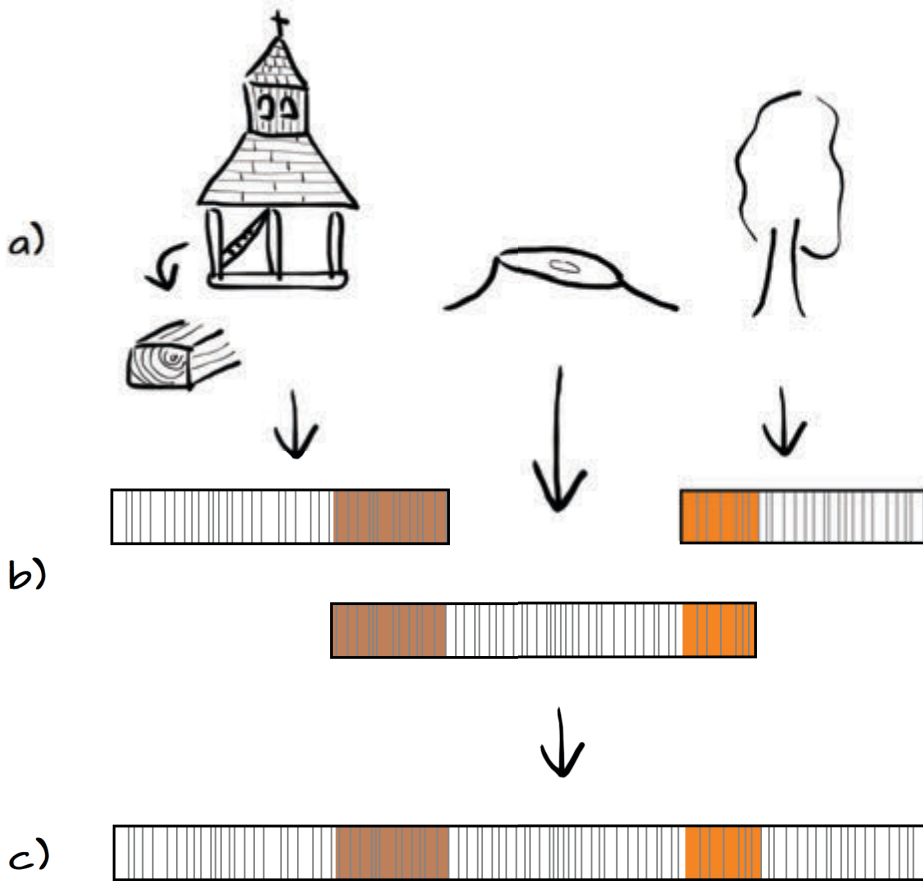
### 1. TÖRTÉNET ÉS ALAPELVEK

Az az elképzelés, miszerint a fák növekedését befolyásolják az adott környezeti hatások és körülmények és ezáltal a múltbéli klímaviszonyok tanulmányozhatóvá válnak, egészen a 18. századig nyúlik vissza. Míg a fák maradványainak kormeghatározása valamivel fiatalabb. Ez az ötlet 1830 körül jelent meg, ekkor vélhetően még csak elméleti szinten

A dendrokronológia széleskörű elterjedése bizonyos A. E. Douglass, amerikai csillagással kezdődött, aki a naptevékenységek klímára

gyakorolt hatását próbálta bebizonyítani. Fák évgyűrűit vizsgálta azzal a céllal, hogy megtalálja bennük a napkitörések 11 éves ciklusának jelenlétét. Olyan sikereket ért el ezen a területen, hogy 1937-ben létrehozta a Fa-Évgyűrű Kutató Laboratóriumot (Laboratory of Tree Ring Research) az Arizonai Egyetemen (University of Arizona), amellyel a dendrokronológia atyjává vált. (Maga a kifejezés magába foglalja a “dendro” mint fa, “krono” mint idő és “lógia” mint valaminek a tanulmányozása kifejezéseket.)

Az évgyűrűk növekedése függ a fafajtól, a környezettől (talaj, folyóparti egyed vagy sem, stb.), az időjárástól (napsütéses órák száma, páratartalom, szél, hőmérséklet, stb.), kártevők jelenlététől, valamint a fa életkorától. Azok a fák, amelyek az ideális életterük határán élnek, érzékenyebbek a klímaváltozásra. Dendrokronológiai szempontból ez annyit jelent, hogy bizonyos esetekben egy 500 km sugarú területről akár két egymástól 1000 km-re elhelyezkedő egyed is együtt kezelhető, míg bizonyos esetekben igen kicsiny régiók a saját önálló klímájukkal rendelkeznek, ebből kifolyólag csak az ott található egyedek vizsgálhatók együtt. Általában egy évgyűrű egy év alatt alakul ki. Példaként a tölgyek rendkívül megbízhatók ebből a szempontból, míg más fák, például az éger, vagy a fenyők évente változóan 0-2 évgyűrűt fejlesztenek, megint más fafajok, mint például a nyír és a fűz, egyáltalán nem is használatosak a dendrokronológiában. Az évgyűrűk különbözhetnek szélességben, színben és a kémiai összetételük is változhat évről évre.



6.1. ábra:

A mester kronológia létrehozásának lépései a) példák faminták forrásaira, egy öreg templomtorny gerendája, egy fatuskó és egy élő fa b) az egyéni faminták az évgyűrű mintázataikkal. Az átfedések színezettek. c) a mester kronológia (a korábbi átfedések továbbra is színezettek) Forrás: saját munka

Szakértők egyetértenek abban, hogy egy 30 éves mintapéldány mintázata egyedi, mind az életkor, mind a származási terület szempontjából.

## 2. ÁTFEDÉS ÉS MESTER KRONOLÓGIA

Vegyünk mintát egy park közepén álló 100 éves fából. A mintája az évgyűrűk növekedésének mintázatát mutatja 1920 és 2020 között.

Emellett, ha rendelkezünk egy mintával egy fatuskóból (ugyanarról a területről és fafajból), amely 1870 és 1960 között élt, a mintázataik 1920 és 1960 között hasonlóak kell, hogy legyenek. Képzeljünk el egy puzzle kirakóst, ahol minél több darabnak van párja, annál nagyobb lesz az összkép is. Ezen példa alapján, a teljes évgyűrű mintázat 1870-ig visszamenőleg egészíthető ki. A minták azon részei, melyek azonos mintázattal rendelkeznek, átfedést hoznak létre, ez maga az átfedéses vagy keresztező-kormeghatározás. (lásd 6.1. ábra)

Találhatunk egy megfelelő darab faanyagot egy faházban vagy tetőszerkezetben, amely rendelkezik például az 1820 és 1905 közötti évgyűrű mintázattal, de fellelhetünk ennél öregebb gerendákat, maradványokat is, így a teljes mintázat még tovább bővíthető. Ezeket a bővített mintázatokat hívjuk mester kronológiáknak. (lásd. 6.1. ábra)

### 3. MINTAVÉTELEZÉS ÉS FELHASZNÁLÁS

Faminták gyűjthetők mind roncsoló, mind roncsolásmentes eljárásokkal is. Bizonyos esetekben elegendő az adott fáról, gerendáról stb. készített makroszkopikus fotó is. Más esetekben viszont a kutatóknak szükségük lehet egy, a fából vágott vékony rétegre, aminek vételezése esetén növedékfúrót (más néven Pressler fúrót) is alkalmaznak.

A közelmúltban összegyűjtött mintáknak csak kb. 40%-a használható dendrokronológiai célokra. Például előfordulhat, hogy egy folyóparton álló fa mintázata nem passzol a kronológiához, hiszen hiába volt száraz az adott

év, a fa nem növesztett kései pásztát. Még ha a párosítás megfelelő is, a kormeghatározás ettől függetlenül nehéznek bizonyulhat.

Ha stimmel a minta, és az rendelkezik az utolsó évgyűrűvel is, akkor a vágás éve és akár az évszak is megállapítható. Azonban, ha az utolsó évgyűrűt nem tartalmazza az adott minta, de legalább néhány évgyűrű a szíjácsból rendelkezésre áll, a vágás éve megbecsülhető.

Az erdélyi tölgyfáknak például  $15 \pm 2$  évgyűrű széles szíjácsuk van. Ha egy ilyen tölgyfából származó mintának 5 évgyűrű széles szíjácsa van, akkor a vágás éve kb. 10 évvel később volt, mint a legutóbbi látható és dátumozott évgyűrű.

Abban az esetben, ha sem az utolsó, sem a szíjácsból származó évgyűrű sem található meg a mintában, akkor pontos kormeghatározás nem lehetséges. A következőhöz hasonló kijelentések tehetők: "A fa kivágásának időpontja bizonyosan .... dátum után volt". Fából készült szerkezetek és építmények, műalkotások pontos kormeghatározása nehéznek bizonyulhat, mert az adott faanyagot elkészülése után lecserélhetik vagy a felhasznált faanyag eleve bontott szerkezetekből származhat. Bizonyos esetekben, amikor egy mintázat nem passzol az adott területen



6.2. ábra:

Egy templomtorony történelmi faszervezete

készült mester kronológiához, még megtalálható más területeken. A történelem folyamán rönköket, gerendákat, hajófat, festménykereteket stb. szállítottak kereskedelmi áruként szerte a világban. A dendrokronológia bizonyítékot biztosíthat az említett kereskedelmi útvonalokról. Más esetekben viszont az adott mintákat nem lehet a mester kronológiához párosítani, de más módon bizonyítható, hogy ugyanarról a területről származik. Ezekben az esetekben megállapítható, hogy a minták azonos év(ek)ből valók vagy sem.

Úgynevezett lebegő-kronológiák készíthetők több különböző mintából, amelyek egymással átfedést képeznek, de nem lehet a meglévő minták egyikéhez sem társítani, így a pontos kora az évgyűrűknek ismeretlen marad. Ezeket arra lehet használni, hogy egy adott minta fiatalabb vagy öregebb a másikinál, illetve további kutatás eredményeképpen esetleg hozzá lehet kötni egy meglévő mintához, aminek segítségével ezek a minták is mester kronológiákká válhatnak. Az évgyűrűk szélességének, színének, sejt, sejtfa struktúrájának vagy kémiai összetevőinek analizálásával információkat szerezhetünk az

adott év klímájáról. Különböző fajok érzékenyek lehetnek különböző körülményekre, de a leggyakoribb úgynevezett "évgyűrű szűkülés" jelenség, legtöbbször csapadéhiányra vezethető vissza.

A dendrokronológia és az izotópos dendrokronológia (általában oxigén izotópok vizsgálatával keresnek hiányzó évgyűrűket) fontos részét képezik a klimatológiának. A múltbéli klímák modellezhetővé válnak és a modellek tesztelésével kideríthető, hogy a jelenlegi adatokkal kiegészítve, lehetséges-e a jövőbeni klímát megbecsülni.

Mivel a dendrokronológiai kormeghatározás rendkívül pontos, radioaktív karbonos kormeghatározás kalibrálására és ellenőrzésére is alkalmazzák.

A közelmúltban élt fák vizsgálata nem a dendrokronológiai kutatások fő iránya, de voltak kutatások, melyek a hegytetőn és a szomszédos völgyekben nőtt fákat hasonlították össze. Mivel az időjárás alakulása évtizedek óta feljegyzésre kerül, a kutatók tudták mely évek voltak szárazok és megvizsgálták, hogy ez jobban kihatott-e a hegytetőn található faállományra.



6.3. ábra:  
Évgyűrűk egy fa padlón



Az eredmények azt mutatták, hogy azokon a területeken, ahol a víz gyorsan el tudott folyni és így hamarabb lettek szárazabbak, az évgyűrűk növekedése is jelentősen változott. A hegytetőn elhelyezkedő faállomány tagjai sokkal inkább az ideális élőhely határán élnek, ennek következtében jobban kitéttek a környezeti változásoknak. A dendrokronológia egy kiváló eszköz, de mint minden egyéb műszeres vizsgálati módszer, használhatósága korlátozott. A leginkább nehezítő tényező a szükséges minták száma egy adott területről, ugyanazon fafajból. Továbbá, hogy a minták minimum 30 évesek legyenek. Nem hiába van azonban jelenleg is rengeteg folyamatban lévő dendrokronológiai kutatás, mivel ez a tudományterület betekintést ad(hat) nekünk mind a múlt, mind a jövő egy adott szeletébe. (A klímamodellek helyállóságát tesztelve.)

Mire használhatjuk a dendrokronológiai tudást és eszközöket a favizsgálat során?

- » egy kivágott fa korának becslésére (pl., ha szabály tiltja adott korú fák vágását, bizonyítékként)
- » segíthet abban, hogy eldöntsük, a fa ideális életterben, vagy annak határán áll-e
- » a precíz ellenállás fúrás akár évgyűrű analízisre is használható lehet (látsd a Rinntech-es hivatkozást)
- » Pressler-fúrós minták is vizsgálhatóak



## FELHASZNÁLT ÉS AJÁNLOTT IRODALOM

Bejo, L., F. Divos, and S. Fathi 2017. Dynamic root stability assessment – basics and practical examples. Proc. 20th Int. NDTE Wood Symp. Sept. 12-15, 2017, Madison, WI pp. 262-269

Bieker, D., R. Keh, G. Weber, S. Rust 2010. Non-destructive monitoring of early stages of white rot by *Trametes versicolor* in *Fraxinus excelsior*. Annals of Forest Science 67:210

Botár, I., Grynaeus, A. & Tóth, B. (2008). A "new" dating method for historical wood structure. Transsylvania Nostra. II/8

Dávid, S. & Kern, Zoltán. (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 book: Archaeology and Ethnography of Forest and Wood / Az erdő és a fa régészete és néprajza (pp.89-102)

Divos, F., L. Bejo, and L. Puskas 2015. Evaluation of the root system's stability based on actual wind intensity and inclination measurements. Proc. 19th Int. NDTE Wood Symp. Sept. 12-15, 2017, Rio de Janeiro, Brazil. pp. 514-519.

Erk Brudi, Philip van Wassenauer: Trees and Statics: Non-Destructive Failure Analysis, 2002, from "How trees stand up and fall down. Tree structure an mechanics conference proceedings", p. 53-70.

Fathi S., L. Bejo, F. Divos 2020. Investigating the Effect of Weather and Seasonal Factors on Root Stability Using Dynamic Measurements, Open Journal Forestry, 10:124-134

Fathi, S. 2020. The reliability and applications of dynamic tree stability inspection. Doctoral Dissertation, University of Sopron, Hungary. 99 pp. (*In preparation*)

Göcke, L., S. Rust, F. Ruhl. 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.

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

<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.thoughtco.com/dendrochronology-tree-rings-170704>

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

James, K.R., J. Grabosky, G. Dahle, B.C. Kane 2014. Tree Biomechanics Literature Review: Dynamics Arboriculture & Urban Forestry 40(1)

James, K.R., N. Haritos, P.K. Addes. 2006. Mechanical stability of trees under dynamic loads. American Journal of Botany 93(10):1361–1369.

Jones, H.G., (1983) Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology. Cambridge University Press, Cambridge

Karl J. Niklas: Plant Biomechanics (An Engineering Approach to Plant Form and Function), 1992

Mattheck: Aktualisierte Feldanleitung für Baumkontrollen mit Visual Tree Assessment, 2007

Moore, J.R, D.A. Maguire 2004. Natural sway frequencies and damping ratios of trees: Concepts, review and synthesis of previous studies, Trees 18:195–203

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.

Sellier, D., and T. Fourcaud. 2009. Crown structure and wood properties: Influence on tree sway and response to high winds. American Journal of Botany 96:885–896.

Sinn, G. 1983. Standsicherheit von Parkbäumen Das Gartenamt, Heft 3, März S. 161–164.

Sinn, G. and L. Wessolly. 1989. A contribution to the proper assessment of the strength and stability of trees. Arboriculture Journal 13(1):45-65.

Strogatz, S.H. 2014. Nonlinear Dynamics and Chaos (Studies in Nonlinearity). 2<sup>nd</sup> ed., CRC Press, ISBN 13: 9780813349107

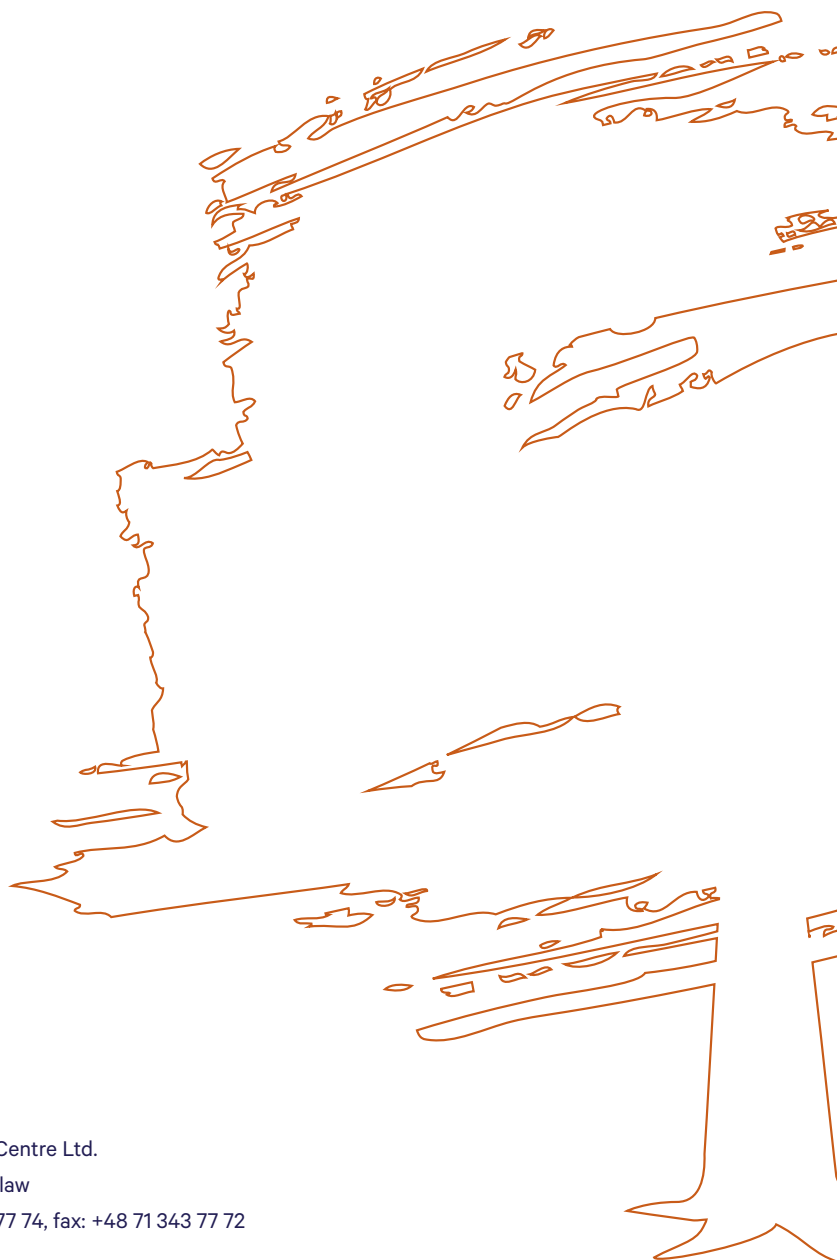
Wessolly and Erb: Tree Static and Tree Inspection, 2016

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.



Project: Partnership for the development of training standards for tree assessors in Central and Eastern Europe

PROJECT NUMBER – 2019-1-PL01-KA202-065670



Dobre Kadry. Research and Training Centre Ltd.

Jęczmienna Street 10/1, 53-507 Wrocław

Phone: +48 71 343 77 73, +48 71 343 77 74, fax: +48 71 343 77 72

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

Wrocław 2021

This project has been funded with support from the European Commission under the Erasmus+ Programme Strategic partnerships in the field of education and vocational training