



Doktori (PhD) értekezés

Nyugat-magyarországi Egyetem

Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar

Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola

Vezető: Prof. Dr. Tolvaj László egyetemi tanár

Doktori program: Faanyagtudomány

Programvezető: Prof. Divós Ferenc

Tudományág: anyagtudomány és technológiák

**Élő fák stabilitása –**

**Az ágak és a gyökérzet vizsgálata**

Készítette: Buza Ágnes Kinga

Témavezető:

Prof. Divós Ferenc

Dr. Németh László

Sopron

2016.

**Élő fák stabilitása –  
Az ágak és a gyökérzet vizsgálata**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében  
a Nyugat-magyarországi Egyetem Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák  
Doktori Iskolája

Faanyagtudomány programja

Írta:  
Buza Ágnes Kinga

Készült a Nyugat-magyarországi Egyetem Cziráki József Faanyagtudomány és  
Technológiák Doktori Iskola

Faanyagtudomány programja keretében

Témavezető: Prof. Dr. Divós Ferenc  
Elfogadásra javaslom (igen / nem)

.....  
(aláírás)

Témavezető: Dr. Németh László  
Elfogadásra javaslom (igen / nem)

.....  
(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton ..... %-ot ért el,  
Sopron, .....

.....  
Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen / nem)

Első bíráló (Dr. ....) igen / nem

.....  
(aláírás)

Második bíráló (Dr. ....) igen / nem

.....  
(aláírás)

(Esetleg harmadik bíráló (Dr. ....) igen / nem

.....  
(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján .....%-ot ért el

Sopron, .....

.....  
Bírálbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése .....

.....  
EDT elnöke

## Kivonat

A dolgozat célja szerint az élő fák roncsolásmentes stabilitásának vizsgálatára szolgáló eszközök skáláját kívántuk szélesíteni. Kiemelt figyelemmel fordulva az ágak és a gyökér állapotának felméréseire.

Három új mérési elrendezést valósítottunk meg. Ezek egyike a kimondottan ágak vizsgálatára kidolgozott és tesztelt optikai rendszer. Másodikként a dőlésméréses húzóvizsgálat dőlésmérőjét helyettesítettük egy lézer mozgásait követni tudó, és abból a dőlést visszaszámoló méréssel és feldolgozási protokollal. Ehhez szorosan kapcsolódik a harmadik elrendezés, melyben a húzóvizsgálat során a szélterhelést szimuláló kötelet helyettesítettük valós szél méréssel. Az elrendezéseken kívül egy korábban nem használt számolási lehetőséget is kipróbáltunk, ez egyszerűsítheti, gyorsíthatja a biztonságosság becslését.

Az elrendezéseket és a hozzájuk tartozó adatfeldolgozást sikeresen teszteltük, a kiértékelés során kapott eredmények más mérések eredményeivel összhangban vannak.

Az ágakat figyelő optikai rendszerrel az ágak biztonságosságának vizsgálatát végeztük. Megállapítottuk, hogy az ágak esetén azok felső vagy alsó irányból történő vágása, roncsolása más-más jellegű változásokat okoz az ág mozgásában.

A dőlésmérő kiváltása, a lézer mozgásának követésével sikeres volt. A mozgáskövetésből származó információ megfelel a dőlésmérő által mérteknek, sőt, a dőlésmérőhöz képest apróbb, finomabb dölések nyomon követésére is képes.

A szél méréses rendszerrel nyomon követhettük egy fa tövének széllekek közbeni elmozdulásait. Ezen fa ellenállás tényezőjét is meghatároztuk, így az ellenállás tényező meghatározására is új lehetőséget mutat be a dolgozat.

## **Abstract**

The aim of the research presented in this paper was to develop and test new nondestructive methods for tree safety. The focus was on the branches and on the root system's stability.

An optical detecting system was made to follow the braches' movements. This system and the data analyzing protocol were tested. The results were compared to the results of other measurements. The results of the optical system were found to be good. This system was then used for a research on the safety of the branches.

For testing the stability of the roots the only system is the 'inclino'-type pulling test. In our work the inclinometer was changed to a laser and a system to detect the movement of the laser.

In other experiment the pulling rope was 'changed'. The real wind velocity was measured while the trunk's movements at the bottom were also recorded. The drug factor of a tree was measured using this system.

To make safety evaluations faster and easier a new evaluation calculation was developed as well.

# Tartalomjegyzék

<b>Kivonat</b> .....	4
<b>Abstract</b> .....	5
<b>1. Bevezetés</b> .....	8
1.1. Célkitűzések .....	8
1.2. A téma aktualitása .....	9
<b>2. Elméleti háttér</b> .....	10
2.1. Rezgő mozgás .....	10
2.2. Sajátfrekvencia, rudak rezgései .....	17
2.3. Fourier-transzformáció .....	19
2.4. Szélterhelés és biztonsági faktor számítása .....	20
<b>3. Irodalmi háttér áttekintése</b> .....	22
<i>Élő fán végzett roncsolásmentes vizsgálatok</i> .....	22
3.1. Vizuális értékelés .....	23
3.2. Gyökér keresés radarral .....	24
3.3. Gyökér keresés elektromos rezisztencia módszerével .....	25
3.4. Gyökértérképezés .....	26
3.5. Dőlésméréses húzóvizsgálat .....	28
3.6. Megnyúlást mérő húzóvizsgálat .....	29
3.7. Évgyűrűszerkezet felmérése fűréssal .....	31
3.8. Tomográfiákról általánosságban .....	32
3.8.1. Akusztikus tomográfia .....	33
3.8.2. Ultrahang tomográfia .....	36
3.8.3. Impedancia tomográfia .....	37
3.9. Egyéb módszerek .....	38
3.9.1. Nem tomográfia jellegű akusztikus, ultrahangos módszerek .....	38
3.9.2. Röntgenes felmérés, CT .....	39
3.9.3. Hőkamerás vizsgálatok .....	40
3.9.4. Mikrohullámú, NMR és neutron sugárzásos mérési lehetőségek .....	41
<b>4. A mérések anyagai, eszközei, eszközfejlesztés</b> .....	42
4.1. Optikai rendszer kidolgozása ágak mozgásának megfigyelésére .....	42

4.1.1. A MarkerTracker2 program bemutatása.....	43
4.1.2. A használt fényképezőgépek bemutatása .....	44
4.1.3. A kiértékelés lépései .....	45
4.1.4. Összegzés .....	46
4.2. Gyökérzet stabilitásának vizsgálata .....	46
4.2.1. Lézeres rendszer a fa töve dőlésének követésére.....	47
4.2.1.1. A használt lézer.....	48
4.2.1.2. A FaMoc program bemutatása.....	48
4.2.1.3. A mért adatok feldolgozása .....	50
4.2.2. Szélmérő, szélmérés .....	50
4.2.3. Húzóvizsgálat – kiértékelés .....	51
4.3. Akusztikus gyökértérképezés.....	52
<b>5. Eredmények és értelmezésük .....</b>	<b>53</b>
5.1. Az ágak mozgását figyelő rendszer tesztelése, eredményei .....	53
5.2. Az ágak biztonságosságának vizsgálatai.....	55
5.2.1. Ágak vágása, alulról és felülről.....	56
5.2.2. Ellenőrző mérések .....	57
5.2.3. Az ágakon való mérések eredményeinek összegzése .....	58
5.3. Húzóvizsgálat és lézer mozgása .....	58
5.4. A szélmérés eredményei, ellenállás tényező meghatározása.....	60
5.5. A gyökértérképezés eredményei.....	61
<b>6. Összefoglalás .....</b>	<b>63</b>
<b>7. Az új tudományos eredmények összefoglalása .....</b>	<b>64</b>
<b>8. Köszönetnyilvánítás .....</b>	<b>65</b>
<b>9. Irodalomjegyzék.....</b>	<b>66</b>
<b>10. Ábrajegyzék.....</b>	<b>75</b>
<b>Mellékletek.....</b>	<b>76</b>
I. Ágak megfigyelése, vágása, sajátfrekvencia adatok .....	76
II. Az ellenőrző mérések eredményei .....	81
III. A húzóvizsgálatok, a lézer mozgásainak és a szélmérés eredményeiből néhány	84

# 1. Bevezetés

Valószínűleg mindannyian sétáltunk már erdőben, csodáltunk már meg évszázados fát, vagy éppen egy városi park lombjainak köszönhetően találtunk menedéket a nyári nap melegében. Pszichológiai kísérletekkel igazolták, hogy már egyetlen növény jelenléte kreatívabbá teszi az embereket. Statisztikai adatok tanúskodnak arról is, hogy parkosított lakótelepi környezetben alacsonyabb a bűnözés, mint annak „betondzsungel” párjában. (Shibata 2004, Taylor 1998)

Ma már köztudott, hogy a faanyagok megkötve tárolják a légköri a CO<sub>2</sub>-t, azonban valószínűleg még nem vagyunk teljesen tisztában azzal, hogy életünkre, életkörülményeinkre, kedvünk vagy éppen boldogságunkra nézve mit jelent, ha fából készült tárgyakkal, vagy éppen növényekkel, élő fákkal vesszük, vehetjük körül magunkat.

Benyomásaink alapján mégis elmondható, hogy egy városrész hangulata barátságosabb, ha az utcákat fasorok szegélyezik, s parkok törik meg az épületek egyenes rendjét. Az ott élő, tanuló, munkálkodó vagy éppen pihenni vágyó emberek kedvét, jó-érzetét, betegségből való felépülésük gyorsaságát, de a bűnözési statisztikákat is befolyásolja a jelen levő növényzet, vagy annak hiánya. (Moore 1982, Ulrich 1984, Kuo 2001)

Városi, nagyvárosi környezetbe azonban nem egyszerű fákat telepíteni, s a lombok sem terebélyesednek ki néhány év alatt. Így fontossá válik egyrészt a városi környezet figyelmes, előrelátó tervezése, de a már meglévő fák gondozása, „karbantartása” is.

Tudjuk, hogy a sérült, öreg vagy éppen kiszáradt fák kifordulásukkal, ágaik letörésével károkat okozhatnak, akár személyi sérülést is. Ezek mindenképpen megelőzendők.

Nem elég utólag okosnak lennünk, későn ritkítani meg egy lombkoronát, vágni ki egy fát, ahogy ennek ellentettje, egy egészséges fa kivágása sem lehet cél.

Így juthatunk el az élő fákon végzett roncsolásmentes vizsgálati módszerekhez, melyek segítségével képet kaphatunk akár egy törzs belsejéről, akár a gyökérzet állapotáról anélkül, hogy a fa későbbi biztonságosságát kockáztatnánk. A roncsolásmentes vizsgálatok előnyei egyértelműek, s az ilyen típusú mérésekre egyre nagyobb igény mutatkozik. (Clark 1994, Larsson 2004)

## 1.1. Célkitűzések

Doktori munkám célja a jelenleg elérhető roncsolásmentes fa vizsgálatok körének bővítése volt, elsősorban optikai jellegű rendszerek kifejlesztése, kipróbálása, ezek összehasonlítása a már működő, jól bevált módszerekkel. Másodsorban kiegészítő mérésekkel foglalkoztunk, mint a szellőkések mérése, illetve a gyökérkeresés és az ebből végezhető becslések.

Az ágak biztonságosságának vizsgálata kevésbé kutatott terület, az ágvizsgálatra is használható eszközöket (mint például az akusztikus tomográfia, mely a vastagabb ágakról képes képet adni, vagy a hőkamerás vizsgálatok alkalmazhatóak ágak felmérésére, ez inkább a vékonyabb ágakon) a törzs vizsgálatára fejlesztették ki. Ezért úgy döntöttünk, hogy az ágak vizsgálatával kiemelten foglalkozunk, hiszen egy-egy nagyobb ág leszakadása is komoly károkozásra képes. Célunk volt egy optikai jellegű rendszer kifejlesztése, mely segítséget adhat egy ág biztonságosságának megbecslésében.

A gyökér állapotának felmérésére használt dőlésméréses húzóvizsgálat jelenleg az egyetlen, a gyökér stabilitását elég jól felmérő módszer. Az eszköztár bővítésének célja volt



egy, a dőlésmérési húzóvizsgálatot kiváltani képes, újfajta mérési eljárás kidolgozása. Egy olyan eljárásé, amely a statikus jellegű húzóvizsgálat (melynél a szélterhelést egy sodronykötél szimulálja) dinamikussá történő átültetése, s ennek segítségével magára a szélterhelésre, a széllökésekre a fa által adott válasz vizsgálatával elvégezni a stabilitással kapcsolatos számításokat.

Ugyanezt a kérdést egy másik irányból megközelítettük, gyökértérképezést végeztünk, és ebből becsültük meg a gyökérzet biztonságosságát.

A biztonságossági becslések elvégzéséhez szükséges a szélben álló fák úgynevezett ellenállás tényezője is. A rendelkezésre álló ilyen jellegű adatok jó része olyan területeken végzett mérések eredménye, ahol a szél nagyjából állandó. A kifejlesztett rendszer segítségével az ellenállás tényező megállapítására is célunk volt olyan módszert adni, mely más helyzetekben is jól alkalmazható. (Wessolly 1989)

## *1.2. A téma aktualitása*

A városiasodás tendenciája majdnem az egész világon megfigyelhető. Környezetünk kellemesebb, ha azt növények, fák is változatosabbá teszik.

Jelen téma, hogy több, pontosabb vagy könnyebben kezelhető eszközünk legyen a környezetünkben lévő fák biztonságosságának megítélésére, várhatóan egyre nagyobb hangsúlyt kap a közeljövőben, mivel néhány, a média által felkapott eset (vihár, károkozás, sérülés) hatására erre a területre is figyelem irányult. Egyértelmű az emberek igénye arra, hogy biztonságban tudhassák önmagukat és vagyontárgyaikat egy-egy komolyabb vihar alkalmával is. Ezzel párhuzamosan viszont – nyilvánvalóan – nem szeretnénk az összes fa kivágást.

Az optikai detektálás térnyerése más területeken is nyilvánvaló. A korábban számítási korlátok miatt nehezen vagy nagyon időigényesen végzett kép-, illetve videó feldolgozás az eszközök és programok fejlődésének köszönhetően ma már akár egy kisméretű lappal, okostelefonnal is elvégezhetőek. Ezért is előremutatóak a korábbi vizsgálati módszerek optikai jellegűekkel történő kiváltásának irányába tett lépéseink.

## 2. Elméleti háttér

Jelen fejezetben a munkám során felhasznált elméleti háttérrel mutatom be.

Egyrészt az ágak vizsgálatához, és az eredmények megértéséhez segítségül szolgál, ha áttekintjük a fizika, illetve a matematika néhány fejezetét. Hiszen az ágakra vonatkozó mérések során az ágakat hol azokat meglökve bírtuk mozgásra, hol a szél által „lengedezni” engedve jött létre a mozgás. Mind a lökés hatására kialakult csillapított rezgést, mind a szél fújására kialakult szabálytalan mozgást Fourier-transzformációs elemzés után tudtuk összehasonlítani, értelmezni, ezért fontos, hogy tisztában legyünk néhány alapelvvel és fogalommal az eredmények és a levont következtetések megértésének segítésére.

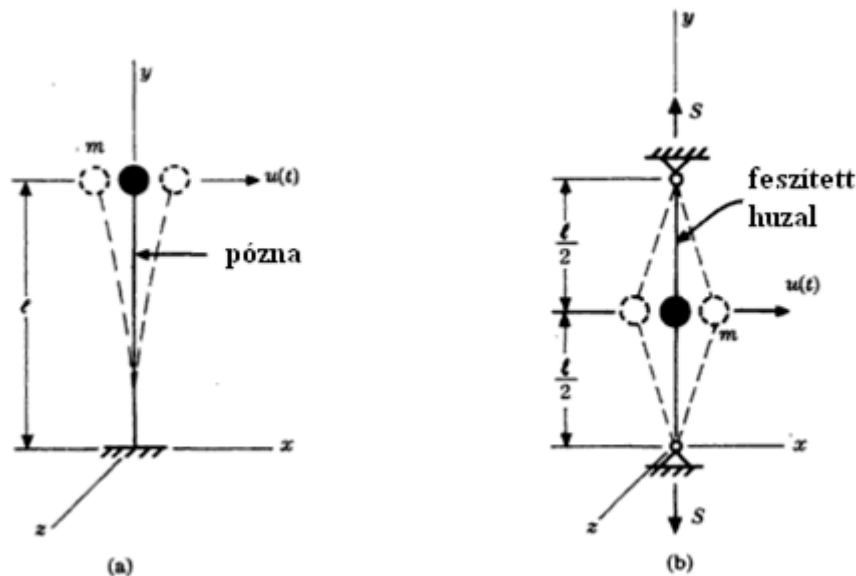
Másrészt a fák biztonságosságára vonatkozó számításokat is leírom, mivel a gyökérzetre vonatkozó mérések célja a biztonságosság becslése volt. Bemutatásra kerül a biztonsági faktor, valamint a szélterhelés számítása és a gyökérzet teherbírásának becslésére vonatkozó képletek. Ezek tapasztalati összefüggések, kutatók több évtizedes munkájának eredményei.

### 2.1. Rezgő mozgás

Rezgő mozgással már az ókorban is foglalkoztak, csak két példát említve, az első, ránk maradt megfigyeléseket Püthagorasz és tanítványai tették húrok hosszait és a megszólaló hangokat leírva, míg a rezonancia jelenségét már Euler is ismerte. (Simonyi 1998)

Definíció szerint „rezgésről beszélünk általában akkor, ha valamilyen mennyiség az időben periodikusan változik, vagyis az időnek periodikus függvénye.” (Budó 1968)

A legegyszerűbben leírható rezgésfajta az egy szabadsági fokú, csillapítatlan harmonikus rezgőmozgás. A szabadsági fokok száma a mozgást leírni képes független változók száma. Egy szabadsági fokú rendszerre látható alább, a 2.1.1. ábrán, néhány példa. (Timoshenko 1989)



2.1.1. ábra: Példák egy szabadsági fokú rendszerek rezgéseire

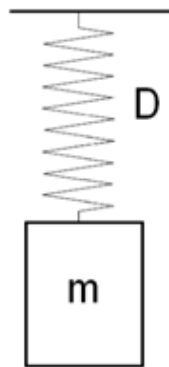
### Csillapítatlan harmonikus rezgőmozgás

A harmonikus, más néven szinuszos rezgőmozgás könnyen kezelhető és elképzelhető modellje egy súrlódás és légállás nélküli helyzetben egy rugóra kötött test, mely a rugó meghúzása után le-fel mozog, ez az egyszerű modell látható a 2.1.2. ábrán. (Gombos 1971, Györgyi 2003)

Ebben az esetben a rugó által testre kifejtett erő:

$$F_y = -Dy \quad (2.1.1.)$$

Ahol  $F_y$  [N] az  $y$  („lefele”) irányú erő,  $D$  [N/m] a rugóállandó,  $y$  [m] pedig az  $y$  irányú kitérés.



2.1.2. ábra: Rugóra kötött test modellje

A 2.1.1. egyenlethez tartozó mozgás egyenlete

$$m\ddot{y} = -Dy \quad (2.1.2.)$$

Ahol  $m$  a test tömege,  $\ddot{y}$  az  $y$  irányú gyorsulás ( $y$  idő szerinti második deriváltja). Ez másodrendű differenciálegyenletként megoldható az  $y(t)$  függvényre:

$$\ddot{y} = -(D/m)y \quad (2.1.3.)$$

Bevezetve  $\omega_0$  [Hz] saját körfrekvenciát, mely definíció szerint:

$$\omega_0^2 = D/m \quad (2.1.4.)$$

Megjegyzendő, hogy  $\omega_0^2$  a következő levezetés során tűnhet csak egy egyszerűsítő jelölésnek, ám mint körfrekvencia fennáll az  $\omega = 2\pi f$  egyenlőség is, melyben  $f$  [Hz]a frekvenciát jelöli. Ez lesz segítségünkre az eredmény fizikai értelmezésénél is.

A bevezetett jelöléssel a mozgásegyenlet:

$$\ddot{y} = -\omega_0^2 y \quad (2.1.5.)$$

Mely rendezés után:

$$\ddot{y} + \omega_0^2 y = 0 \quad (2.1.6.)$$

alakot ölt.

Eme másodrendű differenciálegyenlet megoldását általános,  $y = e^{\lambda t}$  alakban keressük.  
 (A differenciálás szabályai szerint ekkor  $\dot{y} = \lambda e^{\lambda t}$ , illetve:  $\ddot{y} = \lambda^2 e^{\lambda t}$  lesznek.)  
 A 2.1.6. egyenletbe beírva  $y=e^{\lambda t}$ -t:

$$(\lambda^2 + \omega_0^2) e^{\lambda t} = 0 \quad (2.1.7.)$$

Mivel  $e^{\lambda t} = 0$  nem lehetséges a hatványozás szabályainak megfelelően, ezért

$$(\lambda^2 + \omega_0^2) = 0 \quad (2.1.8.)$$

kell, hogy teljesüljön.

Innen a megoldások  $\lambda$ -ra:

$$\lambda_1 = i \omega_0 \text{ és } \lambda_2 = -i \omega_0 \quad (2.1.9.)$$

(Ahol  $i = \sqrt{-1}$ .)

Melyből keresett megoldásaink  $y$ -ra:

$$y_1 = e^{i \omega_0 t} \text{ és } y_2 = e^{-i \omega_0 t} \quad (2.1.10.)$$

A másodrendű differenciálegyenletek megoldására vonatkozó tételek miatt az egyenletünk általános megoldása:

$$y = c_1 e^{i \omega_0 t} + c_2 e^{-i \omega_0 t} \quad (2.1.11.)$$

Ahol  $c_1$  és  $c_2$  tetszőleges komplex együtthatók.

Ha  $y$  valós, akkor a  $c_1$  szám a  $c_2$  szám komplex konjugáltja ( $c_1^* = c_2$ ) és  $c_1$  felírható  $c_1 = (a/2) e^{i \alpha}$  alakban.

Így megoldásunk a következő alakra hozható:

$$y = a/2 (e^{i(\omega_0 t + \alpha)} + e^{-i(\omega_0 t + \alpha)}) \quad (2.1.12.)$$

Az Euler-formulák segítségével az exponenciális tagok szögfüggvényekké írhatóak át:

$$e^{i\alpha} = \cos\alpha + i\sin\alpha \quad (2.1.13.)$$

$$e^{-i\alpha} = \cos\alpha - i\sin\alpha \quad (2.1.14.)$$

Amiket beírva 2.1.12. egyenletbe már „ismerős” formát ölt az eredmény:

$$y = A \cos(\omega_0 t + \alpha) \quad (2.1.15.)$$

ahol  $A$  és  $\alpha$  a kezdeti feltételekből határozhatóak meg,  $A$  a kitérés maximális amplitúdója,  $\alpha$  pedig a kezdőfázis,  $\omega_0$  a körfrekvencia.

A rezgés periódusideje:  $T = 2\pi / \omega_0 = 2\pi (m/D)^{1/2} \quad (2.1.16.)$

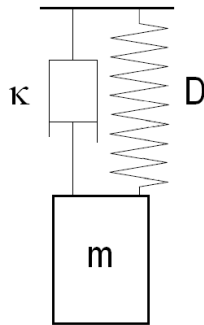
Frekvenciája:  $f = 1/T \quad (2.1.17.)$

### Csillapított harmonikus rezgőmozgás

Ebben az esetben az előző fejezetben bemutatott modellt csillapítással egészítjük ki. Vagyis a testre hat még egy, kis sebességek esetén a sebességgel egyenesen arányos, de azzal ellentétes irányú csillapító vagy súrlódási erő is. (Gombos, 1971; Budó 1972)

$$F_s = -\kappa \dot{y} \quad (2.1.18.)$$

Ahol  $\kappa$  [kg/s vagy (N\*s)/m] a csillapítási tényező.  $\kappa > 0$   
Ezt az esetet láthatjuk a 2.1.3. ábrán.



2.1.3. ábra: Csillapítással ellátott rezgés modellje

Esetünkben a mozgásegyenlet

$$m\ddot{y} = -Dy - \kappa \dot{y} \quad (2.1.19.)$$

formát ölt, melyet rendezve az

$$\ddot{y} + (\kappa/m) \dot{y} + (D/m) y = 0 \quad (2.1.20.)$$

egyenlethez jutunk.

A megoldás kereséséhez a csillapított esethez hasonlóan, segítségünkre van, ha bevezetjük a következő jelöléseket:

$$\alpha = \kappa/(2m), \text{ és } \omega_0 = (D/m)^{1/2} \quad (2.1.21.)$$

A behelyettesítés után a mozgásegyenlet:

$$\ddot{y} + 2\alpha \dot{y} + \omega_0^2 y = 0 \quad (2.1.22.)$$

Ami egy homogén, lineáris, másodrendű differenciálegyenlet, melynek általános megoldását  $y=e^{\lambda t}$  alakban kereshetjük.  $y=e^{\lambda t}$ -t beírva 2.1.22. egyenletbe megkapjuk:

$$\lambda^2 e^{\lambda t} + 2\lambda\alpha e^{\lambda t} + \omega_0^2 e^{\lambda t} = 0 \quad (2.1.23.)$$

egyenletet.  $e^{\lambda t}$ -t kiemelve:

$$y=e^{\lambda t}(\lambda^2 + 2\lambda\alpha + \omega_0^2) = 0 \quad (2.1.24.)$$

2.1.24.-ből a hatványozás szabályai miatt következik:

$$\lambda^2 + 2\lambda\alpha + \omega_0^2 = 0 \quad (2.1.25.)$$

melynek gyökei:

$$\lambda_{1,2} = -\alpha \pm (\alpha^2 - \omega_0^2)^{1/2}$$

Megoldásunkat ezután három különböző esetre kell szétválasztanunk  $\alpha^2$  és  $\omega_0^2$  egymáshoz való viszonyai szerint. Eseteink:

- a)  $\alpha^2 - \omega_0^2 < 0$  (gyenge csillapítás)
- b)  $\alpha^2 - \omega_0^2 > 0$  (erős csillapítás)
- c)  $\alpha^2 - \omega_0^2 = 0$  (aperiodikus határeset)

a) Gyenge csillapítás

$\alpha^2 - \omega_0^2 < 0$  esetben két egymástól különböző, komplex megoldást kapunk, így egyenletünk:

$$y = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t} \quad (2.1.26.)$$

lesz. Érdeemes újabb jelöléseket bevezetnünk, melyek legyenek:

$$\gamma = (\omega_0^2 - \alpha^2)^{1/2} \quad \text{és} \quad \lambda_{1,2} = -\alpha \pm i\gamma \quad (2.1.27.)$$

Ezek segítségével a megoldás átírható

$$y = c_1 e^{(-\alpha+i\gamma)t} + c_2 e^{(-\alpha-i\gamma)t} = e^{-\alpha t} (c_1 e^{i\gamma t} + c_2 e^{-i\gamma t}) \quad (2.1.28.)$$

alakba, amit tovább „egyszerűsíthetünk” az Euler-formuláknak megfelelően a következőképpen:

$$\begin{aligned} y &= e^{-\alpha t} [c_1(\cos \gamma t + i \sin \gamma t) + c_2(\cos \gamma t - i \sin \gamma t)] \\ y &= e^{-\alpha t} [(c_1+c_2)\cos \gamma t + i(c_1-c_2)\sin \gamma t] \\ y &= e^{-\alpha t} (a \cos \gamma t + b \sin \gamma t) = c e^{-\alpha t} \sin(\gamma t + \delta) \\ y &= e^{-\alpha t} c \sin(\gamma t + \delta) \end{aligned} \quad (2.1.29.)$$

A 2.1.29.-es egyenletben  $c$  a kitérés maximális amplitúdója,  $\delta$  a kezdőfázis,  $\gamma$  pedig a csillapított rezgés körfrekvenciája. A rezgés periódusideje:

$$T = 2\pi/\gamma \quad (2.1.30.)$$

A 2.1.29. megoldásból az is jól látható, hogy a rezgés amplitúdója exponenciálisan csökken, ezt a folyamatot nevezzük kváziperiodikusnak. Megjegyezhetjük, hogy  $\gamma$  a csillapítatlan rezgés ( $\kappa=0$  határeset)  $\omega_0$  körfrekvenciájához képest kisebb, a rezgésidő pedig hosszabb.

A kitéréseket vizsgálva az látható, ahogy az exponenciális függvény „ráül” a szinuszosra, amiből következik, hogy „periódusonként” véve egy-egy kitérést, azok arányai azonosak. A  $t_n$  időpillanatban:

$$y_n = y(t_n) = c e^{-\alpha t_n} \sin(\gamma t_n + \delta) \quad (2.1.31.)$$

egy „periódussal” később,  $t_n + T$  pillanatban:

$$y_{n+T} = y(t_n + T) = c e^{-\alpha(t_n + T)} \sin(\gamma t_n + T + \delta) \quad (2.1.32.)$$

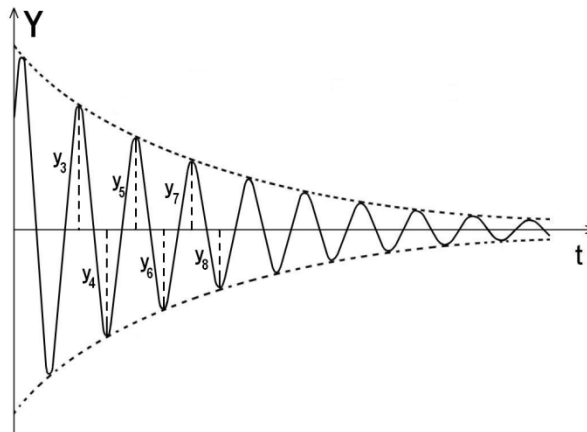
e kettő hányadosa:

$$\frac{y_n}{y_{n+T}} = \frac{y(t_n)}{y(t_n + T)} = e^{\alpha T} \quad (2.1.33.)$$

( $y_n \neq 0$  és  $y_{n+T} \neq 0$ )

A 2.1.4. ábrát segítségül hívva a szemléltetéshez, láthatjuk, hogy például két, egymás utáni, azonos oldali maximális kitérés nagyságainak hányadosairól van szó, melyek (2.1.33.) szerint egyenlők:

$$y_1/y_3 = y_2/y_4 = \dots = y_n/y_{n+2} (= e^{\alpha T})$$



2.1.4. ábra: Csillapított rezgés során megfigyelhető mozgás az idő függvényében

Innen jön a csillapodási hányados elnevezés, mely definíció szerint

$$K = e^{\alpha T} \quad (2.1.34)$$

amit gyakran helyettesítünk a logaritmikus dekrementummal, ami:

$$\Lambda = \ln K = \kappa T \quad (2.1.35.)$$

Az amplitúdók méréséből  $K$ , illetve  $\Lambda$  meghatározható, amit ha a  $T$  rezgésidő mérése is kiegészít, akkor  $\kappa$  csillapítási tényező kiszámolható.

b) Erős csillapítás

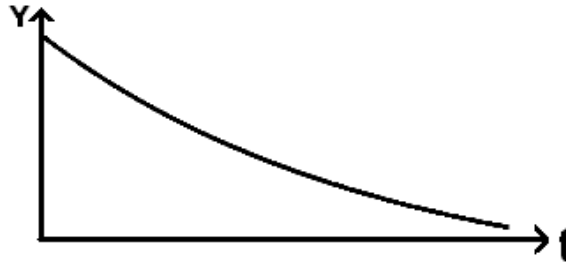
$\alpha^2 - \omega_0^2 > 0$  esetben is különbözőek lesznek a gyökök, a megoldás

$$y = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t} \quad (2.1.36.)$$

bevezetve a  $\beta = (\alpha^2 - \omega_0^2)^{1/2}$  jelölést a megoldás átírható

$$y = (c_1 e^{\beta t} + c_2 e^{-\beta t}) e^{-\alpha t} \quad (2.1.37.)$$

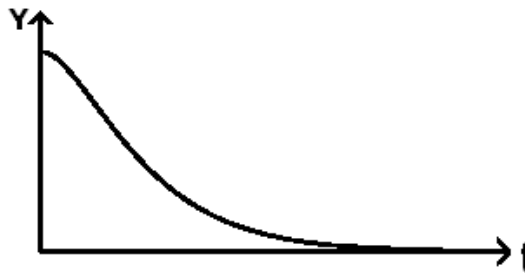
Látható, hogy minden tag exponenciálisan csökken, a jelenség nem rezgés, mivel az egyensúly elérésekor véget ér, aperiodikus, mint azt a 2.1.5. ábra mutatja.



2.1.5. ábra: Erősen csillapított rendszer mozgása

c) Kritikus csillapítás, aperiodikus határeset

Ilyen mozgás látható 2.1.6. ábrán.



2.1.6. ábra: Az aperiodikus határesetben létre jövő mozgás

Itt  $\alpha^2 - \omega_0^2 = 0 \rightarrow$  az egyenletnek egy gyöke van.

Az egy partikuláris megoldást,  $e^{-\alpha t}$ -t, kiegészítjük egy második megoldással,  $te^{-\alpha t}$ -vel, melyről könnyen meggyőződhetünk, hogy valóban megoldása az egyenletnek.

Így a megoldásunk

$$y = (c_1 + c_2 t) e^{-\alpha t} \quad (2.1.38.)$$

Kritikus csillapításnak nevezzük azt is, ha egy rendszernél addig növeljük a csillapítást, amíg az meg nem áll. Ekkor  $\kappa_{krit.} = 2(Dm)^{1/2}$ .  
(Mivel  $\alpha^2 - \omega_0^2 = 0$ ,  $\alpha$  és  $\omega_0$  definícióból.)

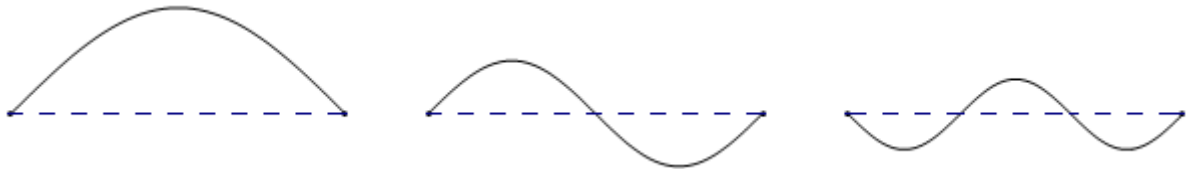


## 2.2. Sajátfrekvencia, rudak rezgései

### Saját rezgés, sajátfrekvencia

Ha egy rezegni képes rendszert egy egyszeri behatás („lökés”) után magára hagyunk, akkor a rendszer annak sajátfrekvenciájával kezd el rezegni (Budó 1968).

A sajátfrekvencia magától a rendszertől függ. Legegyszerűbben talán egy megpendített húr segítségével tudjuk elképzelni. A kialakuló rezgés (hallható hang) a húr hosszától függ. Egy rendszernek több sajátfrekvenciája lehetséges, ezt mutatja a 2.2.1. ábra.

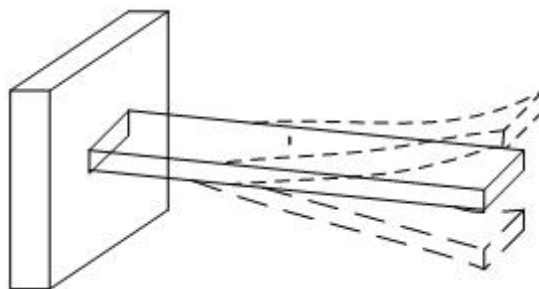


2.2.1. ábra: Egy mindkét végén rögzített húr rezgései

A sajátfrekvencia ismerete az úgy nevezett rezonancia katasztrófa miatt is nagyon fontos. Ebben az esetben, például hidak vagy épületek esetében a szél, mint külső, gerjesztő erő olyan lökésekben érkezik, illetve olyan örvényeket kelt, amik frekvenciái, „ritmusa” a rendszer sajátfrekvenciáinak felelnek meg. Az ilyen gerjesztés hatására – elvileg – végtelen nagy amplitúdójú rezgés jön létre. A valóságosan létrejövő mozgás amplitúdója is lehet akkora, hogy túl nagy feszültséget keltsen a rendszerben, és így megbontsa annak folytonosságát, „szétszakítsa”. Szerencsére egy gondosan tervezett rendszer esetében a gerjesztés hatására elérhető maximális amplitúdó nagyban csökkenthető. Ezt későbbi példánkon, egy ágak nélkül álló „fa” és egy néhány ággal rendelkező fa esetén látni fogjuk.

### Rudak rezgései

Egy fa, vagy egy ág legegyszerűbb modellje egy függőlegesen vagy vízszintesen elhelyezkedő alsó vagy egyik végén befogott rúd. 2.2.2. ábra.



2.2.2. ábra: Egy egyik végén befogott rúd rezgése

Ebben az esetben – Timoshenko gondolatmenetét követve – a peremfeltételek szerint felírt egyenletekből a saját frekvenciákra

$$\cos(k L) \cosh(k L) = -1 \quad (2.2.1.)$$

adódik. Ahol  $L$  a rúd hossza.

A „k” a rúd sajátrezgéseirez rendelt érték, mely attól függ, hogy a rúd az alap frekvenciáján, vagy a felharmonikusai közül épp melyen rezeg

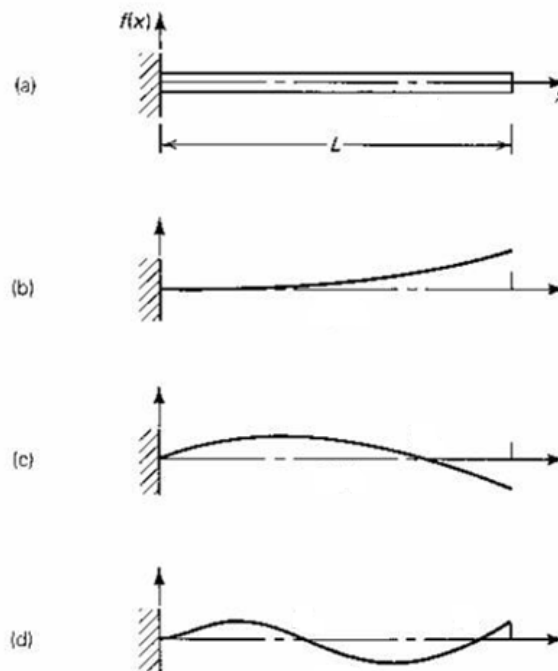
$$k_i L \approx (i-0,5) \pi \quad (2.2.2.)$$

$k_1 L = 1,875$	$k_2 L = 4,694$	$k_3 L = 7,855$
$k_4 L = 10,996$	$k_5 L = 17,279$	stb.

A fentiekböl kiszámolható k értékekkel az

$$\omega_i = a k_i^2 \quad (2.2.3.)$$

egyenlet adja meg a rúd rezgéseinek saját körfrekvenciáit. Ezek közül az első három látható a következő 2.2.3. ábrán.



2.2.3. ábra: Egyik végén befogott rúd lehetséges mozgásai

Az  $a$  egyszerűsítő jelölés,

$$a = [ (E I) / (\rho A) ]^{1/2} \quad (2.2.4.)$$

Ahol  $E$  [N/m<sup>2</sup>] az anyagra jellemző Young modulus,  $I$  [m<sup>4</sup>] az alakra jellemző inercia,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] a sűrűség,  $A$  [m<sup>2</sup>] pedig a keresztmetszet.

Az inercia a legegyszerűbb, kör keresztmetszetre

$$I = (\pi d^4) / 64 \quad (2.2.5.)$$

ahol  $d$  [m] a kör átmérője.

Az inercia egy  $c$  és  $d$  oldalhosszúságú téglalapra

$$I = (c d^3) / 12 \quad (2.2.6.)$$

ahol  $c$  [m] a vízszintes irányú szélesség,  $d$  [m] pedig a rúd vastagsága.

### 2.3. Fourier-transzformáció

Jelen dolgozatnak nem célja a Fourier-transzformáció részletes taglálása. Mivel a mérési adatok értékelésénél használtuk, ezért tartottuk fontosnak, hogy a lényeget bemutassuk.

A Fourier-transzformáció egy időbeli függvény „átírása” a frekvencia függvényébe. A transzformáció alkalmazható minden úgy nevezett Lebesgue-integrálható függvényre. Mérés során kapott, fizikai jelenségekhez tartozó függvények teljesítik ezen integrálhatóság feltételeit.

Az  $f(t)$  függvény Fourier-transzformáltját jelölje  $\mathbf{F}$ , amit a következőképpen kapunk meg:

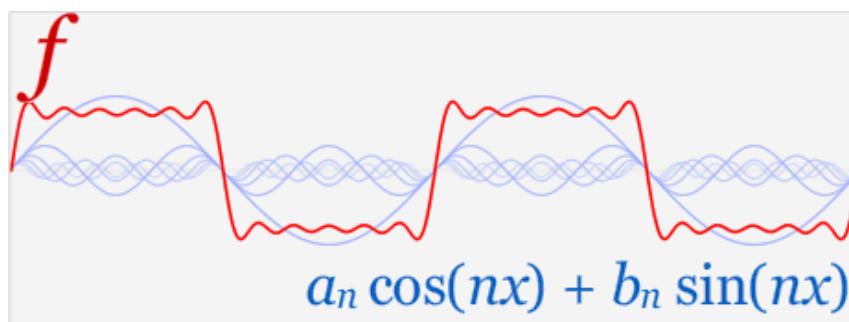
$$\mathbf{F}(u) = (1/(2\pi)) \int f(t) e^{-iut} dt \quad (2.3.1.)$$

Ahol  $u$  a frekvencia spektrumsűrűsége, amplitúdója,  $f(t)$  az eredeti függvény,  $i$  pedig az imaginárius szám,  $i = \sqrt{-1}$ . (Bronstejn 1980)

A Fourier-transzformáltban, valós függvények esetén az exponenciális tag, az Euler-formulának megfelelően átírható szögfüggvények összegére. (Zeldovics 1978)

Egyszerűsítve, képszerűen, ha van egy összetett jelünk, mint mondjuk egy ág rezgése szélben, akkor ebből az időbeli jelből a Fourier-transzformáció segítségével tudjuk előállítani a jelet alkotó szinuszos vagy koszinuszos rezgések sorozatát.

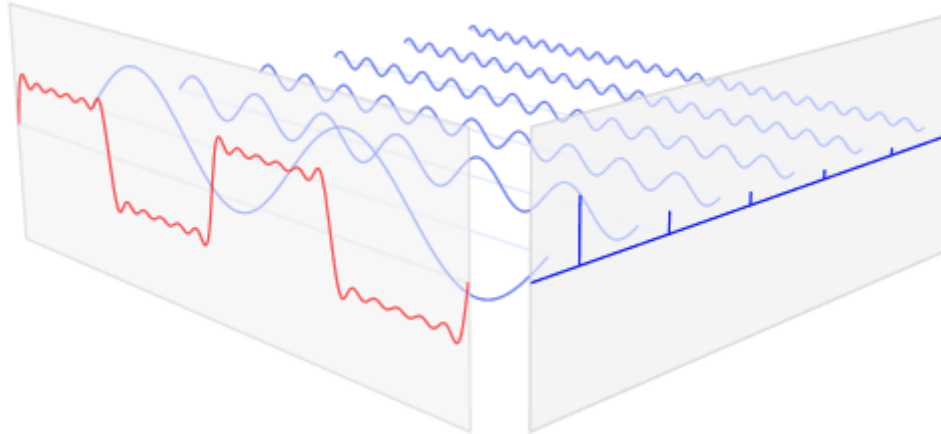
A következő ábrákon (2.3.1., 2.3.2., 2.3.3.) látható példa segít megérteni a transzformáció lényegét.



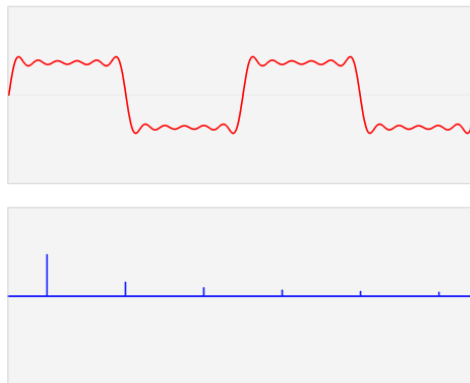
2.3.1. ábra: Egy függvény (pirossal) és annak felbontása szinusz és koszinusz függvényekre (kézzel)

A 2.3.1. ábrán pirossal látható eredeti, közel négyzetes függvény felbontható szinusz és/vagy koszinusz függvények sorozataira. Ez is látható az ábrán, halványabb kézzel.

A transzformáció eredménye megmutatja, hogy mely frekvenciák vannak jelen az adott jelben, és azt is, hogy a jelen lévő frekvenciákhoz mekkora amplitúdó tartozik. Ez látható a 2.3.2. ábrán.



2.3.2. ábra: Egy függvény (piros) felbontása az öt összetevő körfüggvényekre (kék)



2.3.3. ábra: Eredeti függvény (piros) és Fourier-transzformáltja (kék)

A 2.3.3. ábra egy függvényt, annak felbontásaival és azok amplitúdóival együtt mutat, míg a 2.3.4. ábrán csak a függvény és Fourier-transzformáltja látható. Az eredeti mozgás, jel által tartalmazott frekvenciák fontosak számunkra. A mérési adatok kiértékelése során az ágak esetében azok sajátfrekvenciáit kerestük, illetve annak változását az ág sérülésekor.

Természetesen egy valóságos jel zajjal terhelt, azonban a zaj az általunk mért helyzetekben csak viszonylag kis amplitúdóval jelent meg, így nem volt nehéz megtalálni a keresett értékeket.

## 2.4. Szélterhelés és biztonsági faktor számítása

A városias környezetben lévő fákkal kapcsolatban a biztonság kiemelt szempont, számszerűsítése fontos feladat. Ezért került bevezetés a biztonsági faktor (az angol safety factor után rövidítése SF).

A biztonsági faktor általánosságban egy arány, mely a mérésekből becsült teherbírási képesség és a terhelés hányadosa.

$$SF = \text{teherbírási} / \text{terhelés} \quad (2.4.1)$$

Biztonsági faktort fákkal kapcsolatban általában szélterhelésre (ritkábban hó vagy sziklacsuszamlás eseteire) számítanak. A két fő kár a kifordulás és a törzs kettétörése. Ezekre

külön-külön, más számítások, becslések alkalmazandóak. Általában a gyökérzet és a törzs állapota nem egyezik meg.

Szélterhelés esetében a biztonsági faktort adott szélesebbesre számítják. (Ami általában 120 km/h-s, vagy az adott területen előforduló legnagyobb mért szélesebbes.) A biztonsági faktor értékét 1,5 fölött tartják elfogadhatónak. (Egészséges fák esetében a 3 fölötti érték sem ritka.)

A szélterhelés becsléséhez a szél által kiváltott forgatónyomatékokat használtuk, a következő képletek szerint (Divos 2008).

$$M_{\text{szél}} = F_{\text{szél}} h_{\text{koronaközép}} \quad (2.4.2.)$$

$$F_{\text{szél}} = (\rho/2) v^2 A C \quad (2.4.3.)$$

Ahol  $F_{\text{szél}}$  [N] a szél által létrehozott erő,  $h_{\text{koronaközép}}$  [m] a koronaközép magassága,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] a levegő sűrűsége,  $v$  [m/s] a szél sebessége,  $A$  [m<sup>2</sup>] a korona és a törzs adott iránybeli felülete,  $C$  a fafajfüggő ellenállás tényező. (Wessolly 1998)

(Megjegyzendő, hogy a becslés nem a Eurocode szabvány szerint történt, hanem a korábban érvényes magyar szabvány szerint. Mivel a meglévő eszközeink és az ezekhez tartozó programok is a korábbi szabvány szerint számoltak, ezért a saját mérések összehasonlíthatósága miatt döntöttünk a korábbi számítási mód mellett.

A korábbi szabvány alapján számolt szélterhelés 22 m-es famagasságig, állományban álló fára erősebb megkötést jelent, mint a Eurocode, a biztonságosnak mért fák megfelelnek a jelenleg érvényes szabályzásnak is.)

A gyökérzet biztonságosságának becslése a fa tövestül kifordításához szükséges forgatónyomatékokat hasonlítja a szélterheléshez.

$$SF_{\text{gyökér}} = M_{\text{kifordítás}} / M_{\text{szél}} \quad (2.4.4.)$$

Ahol  $M_{\text{kifordítás}}$  [Nm] a valamely mérési módszer segítségével az adott fa által kibírható maximális forgatónyomaték. A kiforduláshoz szükséges forgatónyomaték húzóvizsgálat segítségével történő becslését a húzóvizsgálat fejezetben mutatom be.

Megjegyzendő, hogy a törzs kettétörésére vonatkozó biztonsági faktorok a mérési módszertől (megnyúlásméréses húzóvizsgálat, tomográfiák) függően számíthatóak, vagy hasonlóan forgatónyomatékok segítségével, vagy pedig az  $SF_{\text{tomográfia}} = \sigma_{\text{nyszil}} / (\sigma_{\text{szél}} + \sigma_{\text{önsúly}})$  összefüggés szerint. Itt  $\sigma_{\text{nyszil}}$  [N/m<sup>2</sup>] a fafaj függő nyomószilárdság,  $\sigma_{\text{szél}}$  [N/m<sup>2</sup>] a beállított szélértéknek megfelelő hajlító feszültség,  $\sigma_{\text{önsúly}}$  [N/m<sup>2</sup>] pedig a fa súlyából számolt nyomófeszültség.

### 3. Irodalmi háttér áttekintése

A roncsolásmentes fa- és faanyagvizsgálatok célja, hogy úgy kapjunk információt a fa vagy faanyag állapotáról, fizikai tulajdonságairól, teherbírásáról, hogy közben egyáltalán nem, vagy csak nagyon kicsiny, a mérendő tulajdonságot még nem befolyásoló mértékben okozunk károsodást a vizsgált anyagban.

Elmondható, hogy a roncsolásmentes vizsgálatok egyre elterjedtebbek. Technikái, mérési eljárásai hozzá járulnak a faanyagok, a fűrészárak minősítéséhez, szabvány szerinti besorolásához. De segítségünkre vannak például történelmi faszerkezetek állapotának felmérése során is.

Vizsgálati módszereiben nagyon széles kört ölel át a roncsolásmentes terület, a vizuális értékeléstől a próbaterheléseken át a vezetési képességek (nedvességtartalom) vizsgálatáig. Továbbá ide tartozik több tomográfias módszer (akusztikus, impedancia), használhatunk ultrahangos vagy éppen mikrohullámmal működő eszközöket, de akár röntgent, CT-t vagy más sugárzásokat is (NMR, neutron-sugárzás, stb.). (Bucur 2003)

Ebből a nagyon széles körből az élő fán végzett roncsolásmentes vizsgálatok bemutatása történik meg részletesebben.

#### *Élő fán végzett roncsolásmentes vizsgálatok*

Az élő fák roncsolásmentes vizsgálatainak célja információt szerezni a fa vagy a faanyag tulajdonságairól anélkül, hogy maradandó, jelentős kár érné a fát. A kutatás fő irányvonalai

a) biomassa mennyiségének becslése; egyes fákban, talajban, erdős területeken (Morelli et al. 2007; Borden et al. 2014)

b) kitermelhető faanyag minőségének becslése, annak kutatása, hogy mely tényezők befolyásolják döntően a szárított faanyag minőségét (Wang et al. 2006; Grabianowski et al. 2006; Wang 2013)

c) statikus és dinamikus terhelésekre adott válaszok (Dorren– Berger 2005; James és Kane 2008)

d) biztonságosság becslése, kifordulás és a törzs töréseinek eseteire (Brudi és Wassenaer 2002; Wu et al. 2014)

A roncsolásmentes vizsgálatok előnye az ismételhetőség is, így növekedést, növekedési válaszokat is megfigyelhetővé tesznek, a roncsolásmentes vizsgálatokra egyre nagyobb az igény. (Clark 1994, Larsson 2004)

A módszerek bemutatását a minimális eszközigénnyel bíró, vizuális értékeléssel kezdem, majd a gyökérről foglalkozó mérések következnek. A húzóvizsgálat során mind a gyökérről mind pedig a törzs állapotáról tájékozódhatunk, ennek bemutatásával térek át a törzs vizsgálataira, mint a tomográfiák, fúrások. A fejezet végén pedig a viszonylag ritkán használt, speciálisabb módszereket foglalom össze.



### 3.1. Vizuális értékelés

Talán a legkisebb eszközigényű, ám tudást és tapasztalatot igénylő módszer a vizuális értékelés, a „szemrevételezés”. Ilyen módon is rengeteg hibára figyelhetünk fel, például gombatámadásra vagy rovarkárosításra (lásd 3.1.1. ábra), korhadásokra, repedezettségekre, keresztmetszeti hiányokra. De észlelhetők az alaki hibák, a terpeszesség, a görbeség vagy a villás elágazások. (3.1.2. ábra) Felfigyelhetünk göcsökre, rózsákra, csavart növényre vagy gyanta jelenlétére is. (Day 1927, szerk. Molnár 2006, Allison 2007, Shigo 1972, Shigo 1991, Wagener 1963, Fahiba adattár)



3.1.1. ábra: Rovarrágás (balra) és gombatámadás (jobbra) fákon

A vizuális értékelés felhívhatja figyelmünket a problémákra, segítheti azok súlyosságának felmérését, azonban fontos megjegyeznünk, hogy sajnos nem minden károsodás látható kívülről. Előfordulhat, hogy épnek és egészségesnek tűnő fa valójában törzsének jelentős részét már elvesztette, vagy épp ellenkezője, hogy egy ránézésre „rossz állapotban” lévőnek tűnő fáról más mérések során kiderült, hogy az akár 150 km/h-s szelet is gond nélkül kibír, vagyis kivágása nem indokolt.



3.1.2. ábra: Keresztmetszeti hiány (balra), villás elágazás (középen) és terpeszesség (jobbra)

A mellmagassági átmérő (az angol „diameter at breast height” után DBH) és a magasság (H) egészséges fák esetében előre jelzői lehetnek a fák teherbíró képességének. Ilyen összefüggést találtak többek között Peltola és kollégái (2000), egy 95 fa kifordításával járó kísérletsorozat segítségével. Méréseik során összefüggést találtak a gyökérzet stabilitása a mellmagassági átmérő négyzetének a fa magasságával alkotott szorzata ( $DBH^2 \cdot H$ ) között, a

szorzat jól jelezte előre a fák (egymáshoz viszonyított) terhelhetőségét. Hasonlóan a törzs ketté törését is vizsgálták, itt a mellmagassági átmérő harmadik hatványával ( $DHM^3$ ) tudták összefüggésbe hozni a káreseményeket. Lundstrom és kollégái (2007) 84 fán végeztek kísérleteket, a gyökérszét stabilitásának előjelzőjeként ők is a mellmagassági átmérő négyzetének a fa magasságával alkotott szorzatát ( $DHM^2 H$ ) találták a legjobbnak, míg Achim és Nicol (2009) kísérletei a mellmagassági átmérő és a gyökérszét stabilitása közötti összefüggésre mutattak rá.

Az említett eredmények jól mutatják a fa látható és láthatatlan részei közötti kapcsolatot, ám számos eset van, amikor fontos, hogy pontosabb becslést kapjunk, amihez már műszeres vizsgálatokkal is ki kell egészíteni a vizuális értékelést.

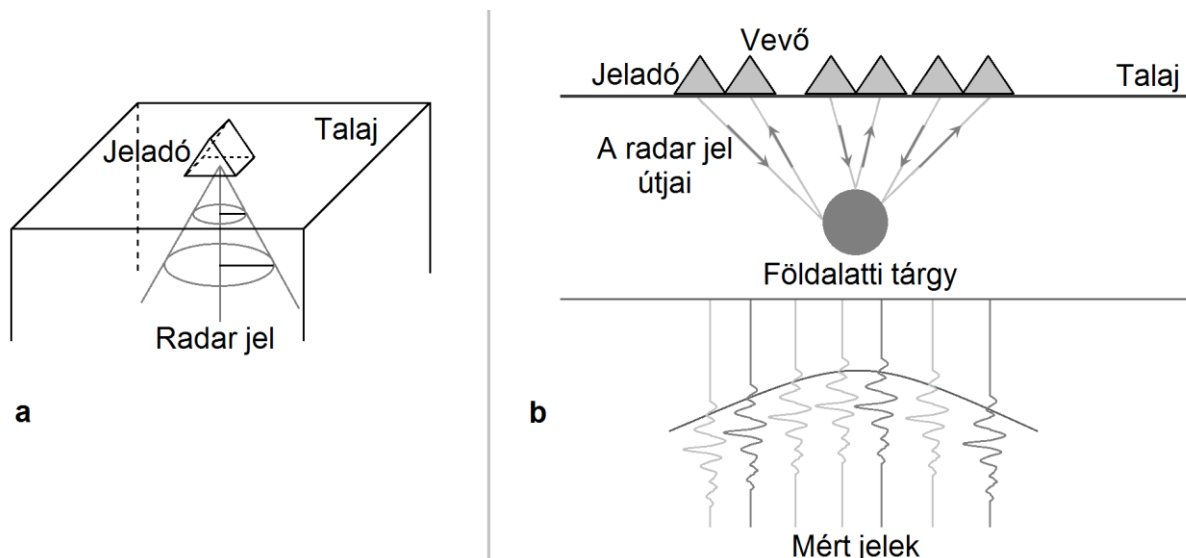
### 3.2. Gyökér keresés radarral

A talajradar egy geofizikai mérési módszer, melyet föld alatti, elásott vagy betemetett tárgyak megtalálására használnak, és emiatt, bizonyos megkötések mellett, alkalmas gyökerek feltérképezésére is. (Hruska et al 1999; Cermak et al 2000; Guo et al. 2013; Wu et al. 2014)

A módszer az elektromos hullámok terjedésén és visszaverődésén alapszik és ezek által korlátozott is, a felbontás és a vizsgált mélység nem növelhető tetszőlegesen.

Gyökerek felkutatásakor általában egy három egységből álló elrendezést használnak. A kontrol egység jelgenerátort és számítógépes vezérlést tartalmaz, az antenna egységet párban lévő adó és vevő antennák alkotják, míg a harmadik egység a megjelenítést biztosítja. (Guo et al. 2013)

A talajradar jele a 3.2.1. (a) ábra szerint terjed, és ha van olyan anyag a talajban, amin visszaverődhet, akkor a 3.2.1. (b) ábrán is látható, hiperbolikus jel jelenik meg, mely idő és amplitúdó adatokat tartalmaz, így a föld alatt lévő tárgy méretéről, anyagáról és mélységi helyzetéről is információt hordoz.



3.2.1. ábra: Radarjel terjedés a talajban (a) és földalatti tárgyról visszaverődő jel (b)

Általában 400 MHz és 2000 MHz közötti frekvenciákon dolgoznak. A használt frekvencia meghatározza a behatolási mélységet és az elérhető felbontást is, míg magasabb frekvenciákon akár 2,5 mm-es felbontást is elérhetünk, bár csak a talaj felső 35-70 cm-e



látható be vele, addig alacsonyabb frekvenciák segítségével akár 250 cm mélységben lévő tárgyak is megtalálhatóvá válnak, 40 mm-es felbontással. (Guo et al. 2013)

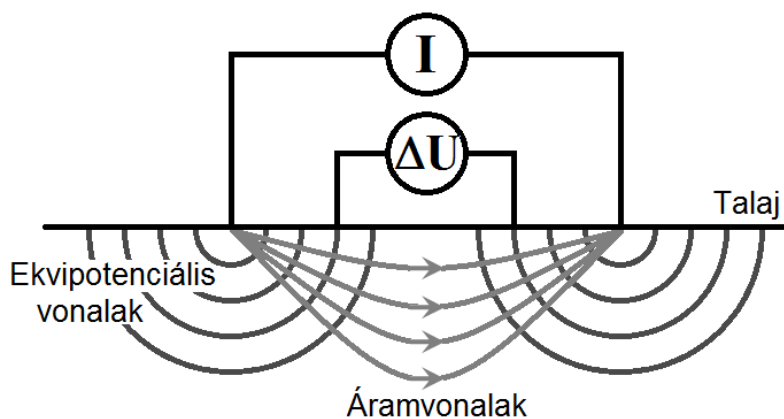
A talajradar vitathatatlan előnye más módszerekkel szemben, hogy akár aszfalt alatt lévő gyökerek is megtalálhatóak, mérhetőek segítségével. (Cermak et al. 2000)

A radar segítségével történő gyökérkeresés korlátozó tényezői között érdemes tudnunk arról, hogy a nedvesség nagyban befolyásolja a mérés lehetőségei, sem a talajban, sem a gyökérzetben jelen lévő víz hatásai nem hanyagolhatóak el. (Hirano et al. 2008, Dannoura et al. 2008; Hirano et al. 2009; Guo et al. 2013) A gyökerek helyzete, egymáshoz viszonyított pozíciójuk szintén bizonytalanságot jelenthet, illetve bizonyos más anyagok (bizonyos kőzetek, vagy régi vízvezetékek) sem mindig különböztethetőek meg a radar által készített képeken. (Butnor et al. 2001; Stokes et al. 2002; Barton and Montagu 2004; Hirano et al. 2009; Guo et al. 2013, Hruska et al. 1999; Butnor et al. 2005; Cox et al. 2005; Zenone et al. 2008; Leucci 2010)

### 3.3. Gyökér keresés elektromos rezisztencia módszerével

A talaj elektromos rezisztencia segítségével való vizsgálata a gyökérzet felmérésében a talajradarhoz áll a legközebb. Ez a módszer is a talaj, illetve az eltemetett vagy elásott anyagok eltérő elektromos tulajdonságai miatt képes megtalálni bizonyos tárgyakat, ásványokat. (Amato et al. 2008; Zenone et al. 2008)

Magát a módszert szokás vertikális elektromos szondázásnak (VESZ), elektromos rezisztencia tomográfiának (ERT), vagy multi-elektrodás ellenállás képalkotásnak is nevezni. A gyökerek feltárását célzó mérés egy méréssorozat, mely hengerfelületeken megy végbe, két-két elektróda között. Többféle elrendezés létezik, melyek lényege, hogy két elektródapár közül az egyik áramot vezet a talajba, míg a másik a feszültséget méri, vagy fordítva, fix feszültség mellett az áramot mérik. (3.3.1. ábra.)

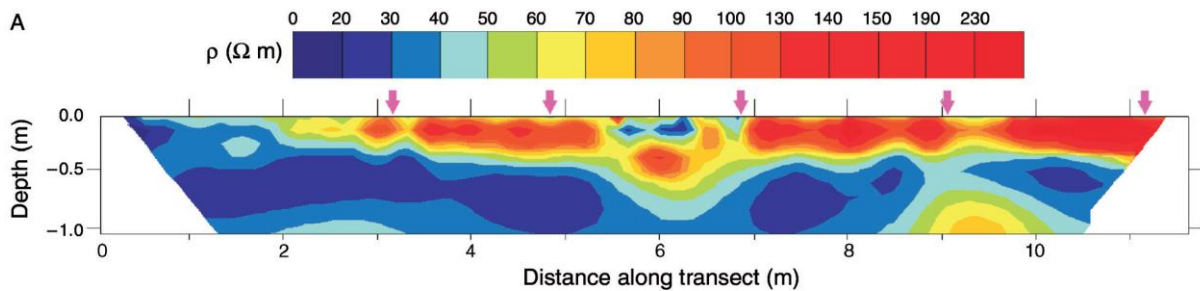


3.3.1. ábra: Két elektróda között létrehozott áram és feszültség

Az áram vagy a feszültség vagy az elrendezés (az elektródák máshova helyezése) változtatásával a talaj egy más felülete válik mérhetővé. A méréssorozat segítségével pedig egy talajszelet, vagy akár több talajszelet készíthető, melyeken megjelennek a gyökerek, s a gyökérzetről akár 3D-s modell is számolható. Praktikusan egyszerre nem csak négy, hanem több elektródát is használnak, adott elrendezés szerint. (Hagrey 2006; Morelli et al. 2007)

Egy mérési eredmény látható a 3.3.2. ábrán.

A fő gyökerek megtalálása mellett a módszer alkalmas a talaj gyökértartalmának, biomassza tartalmának becslésére, és a nevelés változásainak nyomon követésére is. (Amato et al. 2008; Zenone et al. 2008, Morelli et al. 2007; Rossi et al. 2011, Srayeddin and Doussan 2009; Garre et al. 2011; Robinson et al. 2012)

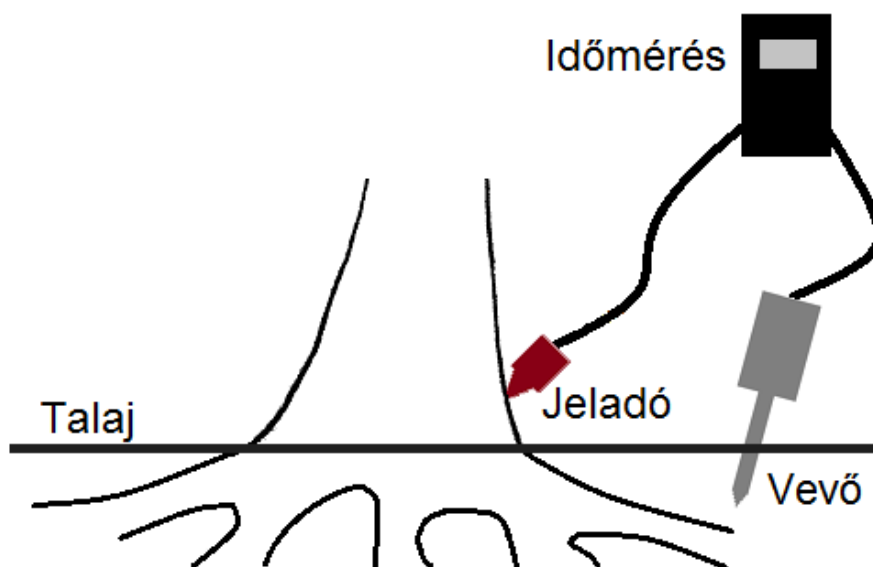


3.3.2. ábra: Egy talajszelet elektromos rezisztencia mérésének eredménye. A nyilak a fák helyzetét jelölik.

### 3.4. Gyökértérképezés

Az előző fejezetekhez hasonlóan a gyökérzet állapotának felmérésére szolgál az akusztikus gyökérkeresés is. Az akusztikus gyökérkeresés előnye, hogy gyakorlatilag csak a mérni kívánt fa gyökereit találja meg, a talajban lévő más tárgyak a mérést minimálisan befolyásolják.

A hang terjedési sebessége jelentősen eltér talajban (kb. 300 m/s) és a gyökérzetben (kb. 3000 m/s). Ezt a jelenséget kihasználva megtalálhatjuk, feltérképezhetjük a vastagabb, főbb gyökerek helyzetét. Ha meg szeretnénk tartani egy fát, akkor valamilyen építési, ásási munkánál figyelembe lehet venni a főbb gyökerek helyzetét. (Bucur 1995)



3.4.1. ábra: Az akusztikus gyökértérképezés sematikus rajza

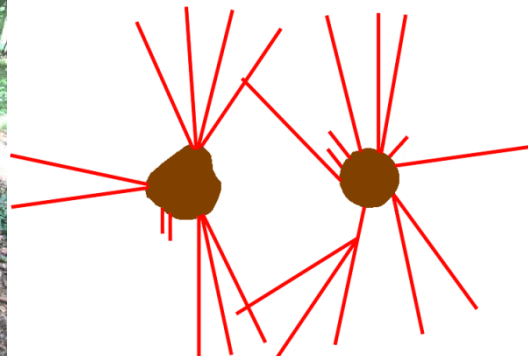
Maga a mérés a következőképpen történik. A fa törzsére, a talajhoz közel felhelyezünk egy jeladó tüskét. Ezt kalapáccsal megütve hang indul el a fában, a gyökerekben. A hang megérkezését detektáljuk egy vevővel, mely egy 40 cm-es fém „tüske”. A mérési elrendezés látható a 3.4.2. ábrán. Így kb. 0,5 méteres mélységig találhatjuk meg a gyökereket. (Divós 2009)



3.4.2. ábra: Gyökértérképező eszköz használatban

A jeladóból indított jel és a detektálás között eltelt időt mérjük. A fa törzsétől adott, állandó távolságban – mely általában 0,5 m, 1 m és 1,5 m – 15 cm-enként lépkedve a detektorral mérünk (3.4.2. ábra). Ahol az idő lecsökken, ott gyökér jelenléte valószínűsíthető. Ezeket a helyeket megjelöljük. (Divós 2008)

A jelölt helyek, irányok kirajzolják a fa főbb gyökereit. A gyökerek megléte, szerkezete, helyzetet pedig fontos lehet a stabilitás becsléséhez. Egy gyökérkeresés és az ebből megrajzolt gyökértérkép látható a 3.4.3. ábrán. (Coutts 1983)

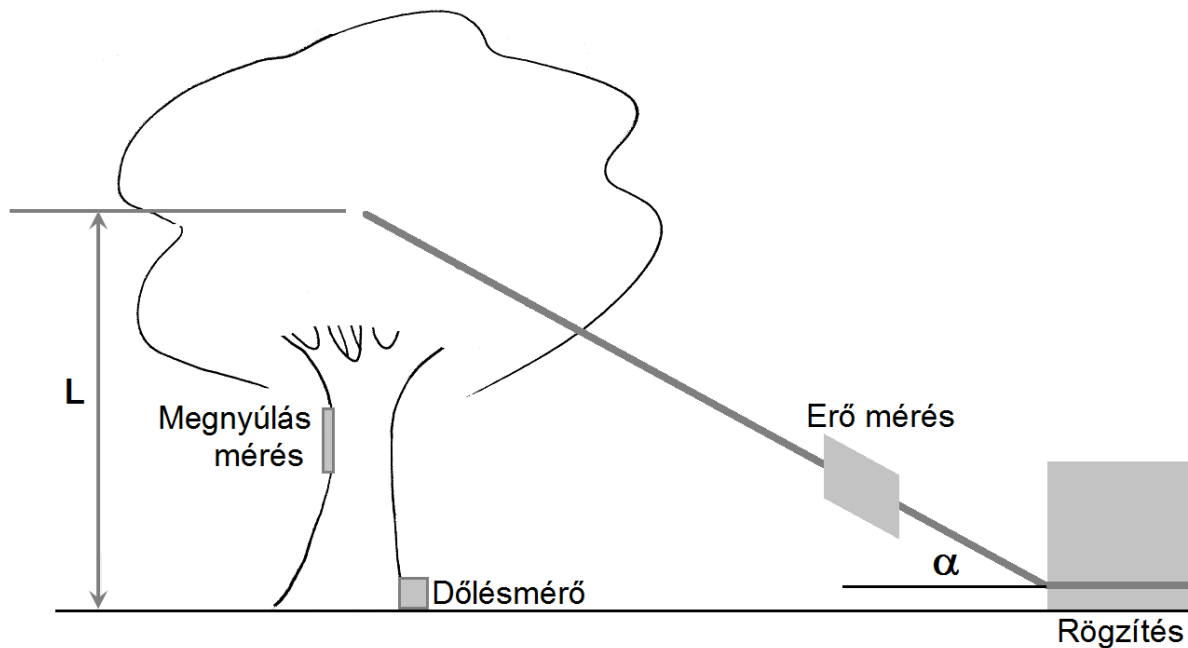


3.4.3. ábra: Fényképfelvétel (balra) a feltérképezett gyökerekről és számítógép segítségével megrajzolt gyökértérkép (jobbra)

### 3.5. Dőlésméréses húzóvizsgálat

A dőlésméréses húzóvizsgálat jelenleg az egyetlen, a gyökér teherbírását kellő pontossággal, az adott talaj és gyökér állapot felmérésére képes eszköz.

A mérési elrendezés a 3.5.1. ábrán látható.



3.5.1. ábra: Dőlésméréses húzóvizsgálat áttekintő rajza

A mérés során egy acélsodrony-kötél szimulálja a szélterhelést, miközben mind a húzó erőt, mind a törzs dőlését mérjük. Fontos, hogy ez a mérés csak szélcsendes időben végezhető el.

Jól látható, hogy a kötelet a mért fán – a lehetőségekhez képest – a korona közepéhez minél közelebb kell rögzíteni. A dőlésmérőnek pedig a talajhoz kell minél közelebb lennie. A horgonyzásra másik fa vagy megfelelő tereptárgy szolgál. (Brudi 2002, Neild 1999, Peltola 2000)

A mérés során a kötéllal maximum 0,2°-os dőlésig húzzák a fát, folyamatosan mérve az erőt és a dőlést. A dőlés-erő értékekre függvény illeszthető. Ebből megbecsülhető a fa gyökerestül történő kifordulásához szükséges forgatónyomaték.

A mért adatokból, valamint a már részletezett szélterhelés becslés felhasználásával a gyökér biztonsági faktora,  $SF_{\text{gyökér}}$  számolható. (Ahogy azt már a 2.4.4.-es egyenletben bevezettük.)

$$SF_{\text{gyökér}} = M_{\text{kifordítási}} / M_{\text{szél}} \quad (3.5.1.)$$

Ahol  $M_{\text{szél}}$  [Nm] a szél által létrehozott forgatónyomaték,  $M_{\text{kifordítási}}$  [Nm] pedig a gyökert kifordítani képes, a mérésből becsült forgatónyomaték.

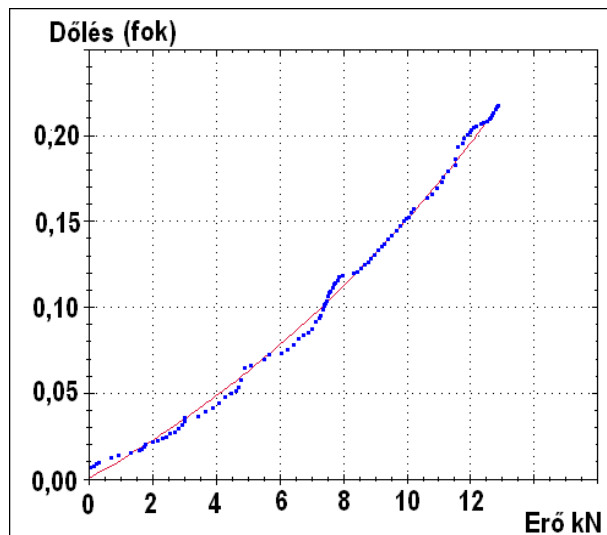
$$M_{\text{kifordítási}} = F_{\text{ki}} L \cos\alpha \quad (3.5.2.)$$

Ahol  $F_{ki}$  a kifordításhoz szükséges erő,  $L$  a kötélmagassága a mért fán,  $\alpha$  az acélsodrony kötélszöge (lásd 3.5.1. ábra).

$F_{ki}$  azzal a függvénnyel közelíthető, melynél a  $(\varphi - \varphi_{calc})^2$  különbség minimális. Itt  $\varphi$  [°] a mért szög,  $\varphi_{calc}$  [°] pedig a közelítő függvény szerinti szög.

$$\varphi_{calc} = 0,33 \tan(1,34 (F / F_{ki})) + 0,5 (F / F_{ki})^2 - 0,1 (F / F_{ki}) \quad (3.5.3.)$$

Ahol  $F$  [N] a mért erő. Az egyenlet konstansai mérésorozat által kerültek meghatározásra. Egy húzóvizsgálati adatsor és az arra illesztett görbe látható a 3.5.2. ábrán.



3.5.2. ábra: Egy mérési adatsor, a fa tövének dőlése a sodronykötél által létrehozott erő

Az így kapott biztonsági faktor jól jellemzi a fa kifordulásának esélyét, adott talaj és szél körülmények között.

### 3.6. Megnyúlást mérő húzóvizsgálat

A húzóvizsgálat során nem csak a törzs talajszinti dőlése mérhető, hanem a törzs megnyúlása is. Vagyis a dőlés mérés és a megnyúlást mérő húzóvizsgálatban az a közös, hogy mindkét módszer a sodronyköteles húzást használja a szélterhelés szimulálására. A két vizsgálat akár egyszerre is elvégezhető, mint a 3.5.1 és a 3.6.1. ábrák elrendezésein. (Brudi 2002, James 2008)

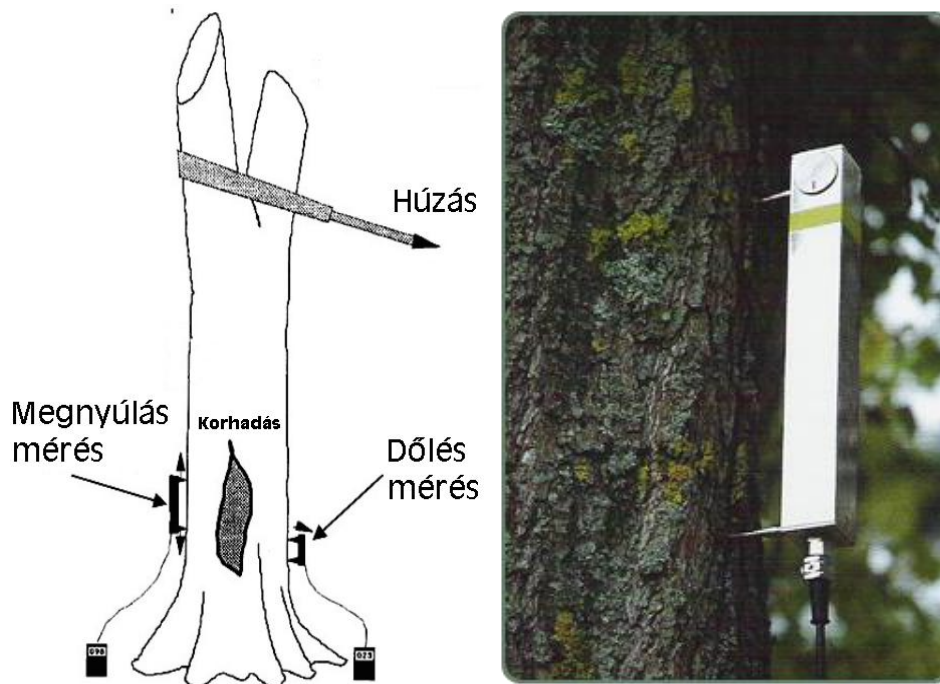
A törzs elváltozásának, megnyúlásának mérésével a törzs állapotáról kapunk információt, vagyis a törzs adott szinten történő ketté töréséhez szükséges nyomaték becsülhető meg a gyűjtött információk alapján. (Ilyen szempontból az akusztikus tomográfia párjának tekinthető, mivel ott is a törzs állapotának felmérése történik, a kettészakadás valószínűsége kerül becslésre.)

A nyúlást mérve megkapjuk a relatív megnyúlást, mely

$$\varepsilon = \Delta l / l \quad (3.6.1.)$$

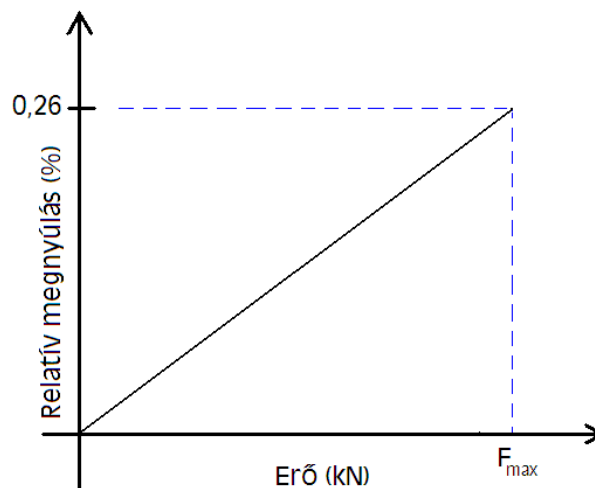
ahol  $\Delta l$  [m] a megnyúlás,  $l$  [m] az eredeti hossz.





3.6.1. ábra: Megnyúlásos és dőlésméréses húzóvizsgálat rajza (balra), egy megnyúlásmérő fényképe (jobbra)

$\varepsilon$  egyenesen arányos az őt létrehozó erővel.  $\varepsilon$  maximális, a törzs eltörését jelentő értéke 0,26%. A mérés során felvett erő és relatív megnyúlás adatokból egyértelműen kijön a kettétöréshez szükséges erő. Ezt a 3.6.2. ábra mutatja. (Brudi 2002)



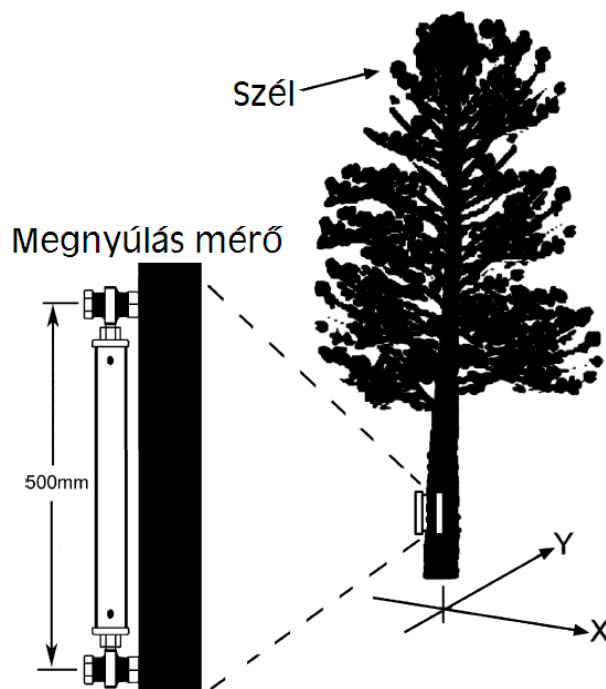
3.6.2. ábra: A relatív megnyúlás az azt létrehozó erő függvényében

A törzs adott szinten való kettétöréséhez szükséges nyomaték

$$M_{\text{tör}} = F_{\text{max}} L \cos \alpha \quad (3.6.2.)$$

ahol  $F_{\text{max}}$  [N] a kettétöréshez szükséges erő,  $L$  a kötel magassága a mért fán,  $\alpha$  az acélsodrony kötel szöge (lásd 3.5.1 ábra, a dőlésméréses húzóvizsgálatnál).

A nyomaték ismeretében a 2.4.1. egyenlet segítségével biztonsági faktor számolható.



3.6.3. ábra: Egy fa két, egymásra merőlegesen elhelyezett megnyúlásmérővel felszerelve

A megnyúlásmérők elég gyorsak ahhoz, hogy egy fa szélre, szellökésekre adott válaszait is mérni lehessen általuk. Egy ilyen elrendezés látható a 3.6.3. ábrán.

Itt két, egymásra merőleges irányba felhelyezett megnyúlásmérő gyűjti az információkat. Ezek, valamint a szél sebességének ismeretében a szélterhelés megbecsülhető, akár egy viharban is. (James 2008)

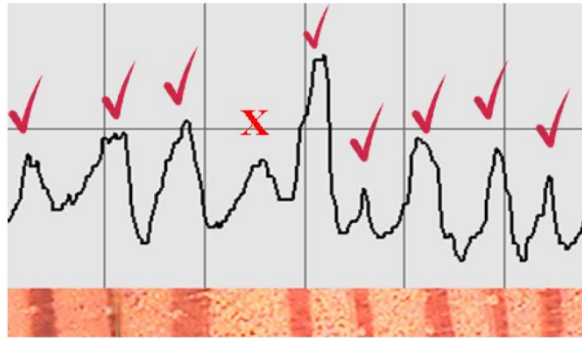
### 3.7. Évgűrűszerkezet felmérése fúrással

A törzs állapotáról információt szerzünk akkor is, ha egy megfelelő, vékony fúróval átfúrjuk azt. Ezt az elterjedt technikát korábban kézi fúróval is alkalmazták, mind élő fára, mind beépített faanyagra. (A Presler fúró pl. növedékcsap vételére is alkalmas.) A megfigyelés szerint a fúrás jelentősen könnyebbé válik, ahol korhadt, sérült faanyag található. (An 2008, Pellerin 2002)

Ma már a korszerűbb, gépi fúrást alkalmazzák, mellyel által mind analóg mind digitális jelek kaphatók. Általában 3 mm-es átmérőjű fúrót használnak. Egy ilyen mérés során az évgűrűk váltakozásának megfelelően hol nagyobb, hol kisebb ellenállással találkozó fúrófej által küldött információból kirajzolható az évgűrűszerkezet is, egy ilyen mérés látható a 3.7.1. ábrán. (Guller 2012, Kappel 2000, Wang 2007A, Mattheck 1997)

Egy fa törzse mellett ezzel a módszerrel a nagyobb ágak is vizsgálhatóak, azok belső sérülései is feltárhatóak. (Guerrero 2011)

Korhadt, károsodott, kisebb sűrűségű anyag esetében a fúró által érzékelt, mért ellenállás lecsökken, akár teljesen el is „tűnik”. Ez látható a 3.7.2. ábrán. (Rinn 1996)

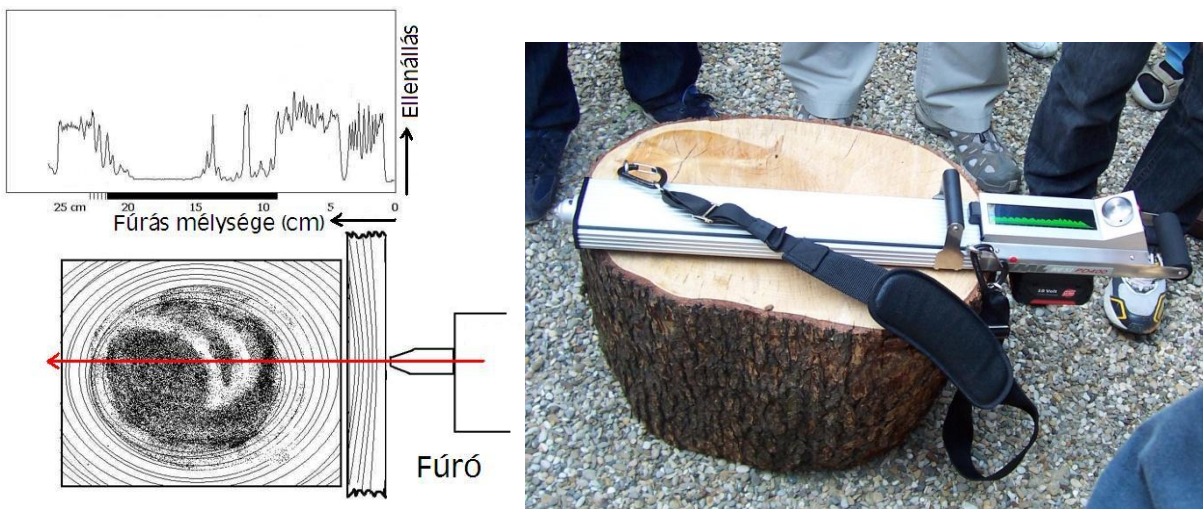


3.7.1. ábra: Egy évgűrűszerkezet (alul) és az arról készült ellenállásgörbe (felül)

Néhány fűrész elvégzésével hozzávetőleges képet kaphatunk a törzs belsejének állapotáról, a sérült rész nagysága és helyzete lokalizálható. A kapott információ megfeleltethető az akusztikus tomográfia, illetve a CT felvételek által készített képeknek is. (Bethge 1999, Allison 2011)

Az ép és sérült, korhadt, teherbírási szempontból nem megfelelő részek helyzete és aránya megbecsülhető a mérés eredményéből. Ebből a törzs adott helyen történő kettétörésének valószínűsége számolható adott körülmények között.

Fontos megjegyeznünk, hogy a fűrész a kivágás előtti utolsó vizsgálatnak tartják, valamint, hogy a fűrész során keletkező roncsolás súlyosságáról viták folynak. A fa védekezési zónájának átfűrése veszélyezteti a fák egészséges, a védekezési zóna által védett területeit.



3.7.2. ábra: Egy fűrész elméleti rajza az átfűrt rönkkel (balra) és egy eszköz fényképe mérés után a mért farönkkel (jobbra)

### 3.8. Tomográfiákról általánosságban

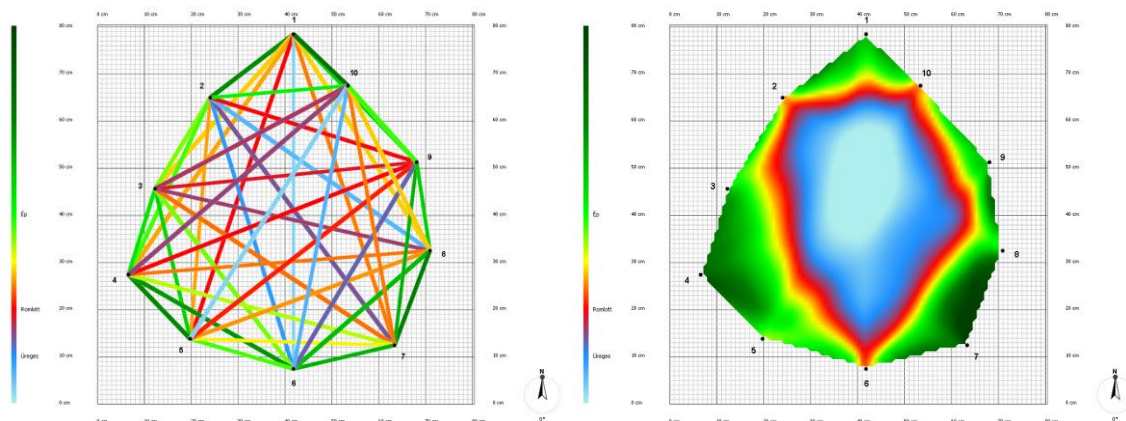
A tomográfia szó a görög „tomos” és „graphein” szavakból ered, előbbi réteget, sík szeletet, utóbbi „írni”-t jelent. A tomográfias módszerek lényege, hogy a vizsgálni kívánt test, szervezet egy, belső síkjáról képesek képet adni. Tomográfiával sok helyen találkozunk, talán az orvosi alkalmazások, mint CT vagy az MRI a legismertebbek ezek közül. (Szerk: Damjanivics 2007, Maróti 1998)

A tomográfias módszerek különböznek a használt fizikai jelenségek szerint (pl. hang, ultrahang, elektromos ellenállás, Röntgen-sugárzás, stb.). Megkülönböztetünk ezeken kívül



direkt és számított tomográfiákat is. A direkt esetben (pl. orvosi ultrahang) az adott rétegből származó információ direkt detektálható, míg a számított esetben több rétegből származó információ „mosódik össze”, amiből utólag lehet visszaszámolni az adott rétegre vonatkozókat.

Számított tomográfia például az akusztikus tomográfia, ami a 3.8.1. ábrán látható. A rétegre vonatkozó információt valamilyen kis térfogatban, sík darabkában keressük, míg információt, két érzékelő között, *látszólag* egy-egy egyenes mentén kapunk. (A terjedés nem vonal mentén történik, hanem mindig a Fermat-elv szerint a legrövidebb időt biztosító út mentén, ami különösen hiba esetén görbült.) A megfelelő számítógépes értékelés segítségével válik megjeleníthetővé a réteg 2D-s képe.



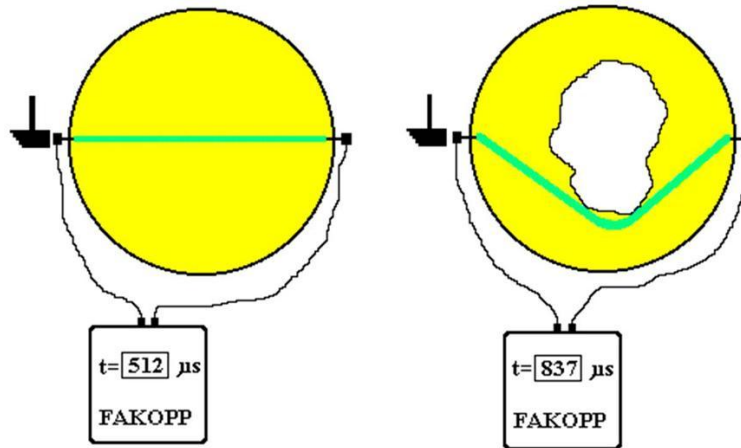
3.8.1. ábra: Akusztikus tomográfia „mérési vonalai” (balra) és az adatokból számolt kép (jobbra)

### 3.8.1. Akusztikus tomográfia

Az akusztikus tomográfia egy jól ismert, elterjedtnek tekinthető mérési módszer, amit ma már több, kimondottan a fák vizsgálatára kifejlesztett műszerrel is végezhetünk. Célja a törzs vagy egy vastagabb ág vizsgálata, hibáinak, korhadásának, üregeinek feltárása. (Divós 1994, Wang 2001A, Glibert 2004, Smiley 1992, Fink 2008, Nicolotti 2008, Socco 2004)

Működése elve, hogy a hang áthaladási ideje különbözik a különböző közegekben. Ha egy ép törzsön mérjük a hang áthaladási idejét, az kisebb lesz, mintha egy korhadt törzsön mértünk volna, azonos fafaj és méretek esetében. Ezt mutatja a 3.8.1.1. ábra is. Mivel a hang a levegőben sokkal lassabban halad, a fa ép részén át érkezik először a hang a detektorhoz, akár „kerülő úton” is. Ezt számos esetben, több fafajra is kimérték a kutatók, a mért idő változása arányos a belső hibával. Természetesen a mérések során először ép fára kell megállapítani az idő, a hangsebesség adatokat. (Szerk.: Divós, 1999, Mattheck 1993, Liang 2009, Comino 2000, Coder 1989, Wang 2000, Wang 2001B, Rust 2000, Divós 1994, Divós 2002, Divós 2007, Liang 2007, Gilbert 2004, Rioux 2004)

Természetesen, ha csak egy vonalon mérünk, az még nem tomográfia. Az akusztikus tomográfia jelenleg elérhető verziói 8-32 érzékelővel dolgoznak. Az érzékelők mindegyike jeladó is egyben, így detektálási adatok  $n$  érzékelő esetén  $\frac{[(n-3)*n]}{2}+n$  számúak mérésenként, ez is látható a 3.8.1. ábra bal oldalán. (Az átlagszámításhoz legalább három mérésre van szükség.)



3.8.1.1. ábra: A hang legrövidebb útja egészséges (balra) és korhadt (jobbra) fában

Az akusztikus tomográfia során szerzett információk a törzs egy adott szintjét adják vissza, annak biztonságossága válik becsülhetővé. (A függőleges irányú hangterjedés jóval lassabb, ezért vékony a vizsgált réteg.)

Az akusztikus tomográfiára bevezethető biztonsági faktor a következőképp írható le, figyelembe véve a fának az adott szint feletti, az arra ránehezülő önsúlyát is.

$$SF = \sigma_{\text{nyszil}} / (\sigma_{\text{szél}} + \sigma_{\text{önsúly}}) \quad (3.8.1.1)$$

Ahol  $\sigma_{\text{nyszil}}$  ( $\text{N/m}^2$ ) a fafajfüggő nyomószilárdság,  $\sigma_{\text{szél}}$  ( $\text{N/m}^2$ ) a beállított szélértéknek megfelelő (ez a magyar szabvány szerint 120 km/h) hajlító feszültség,  $\sigma_{\text{önsúly}}$  pedig a fa súlyából számolt nyomófeszültség ( $\text{N/m}^2$ ).

$$\sigma_{\text{szél}} = M_{\text{szél}} z / I \quad (3.8.1.2.)$$

Ahol  $M_{\text{szél}}$  a szélterhelés (bővebben a 2.4. fejezetben található a leírása),  $z$  (m) a semleges száltól (az a szál, mely sem nem húzódik, sem nem hajlik) való távolság,  $I$  ( $\text{m}^4$ ) a keresztmetszet másodrendű nyomatéka.

Az önsúlyból származó terhelés

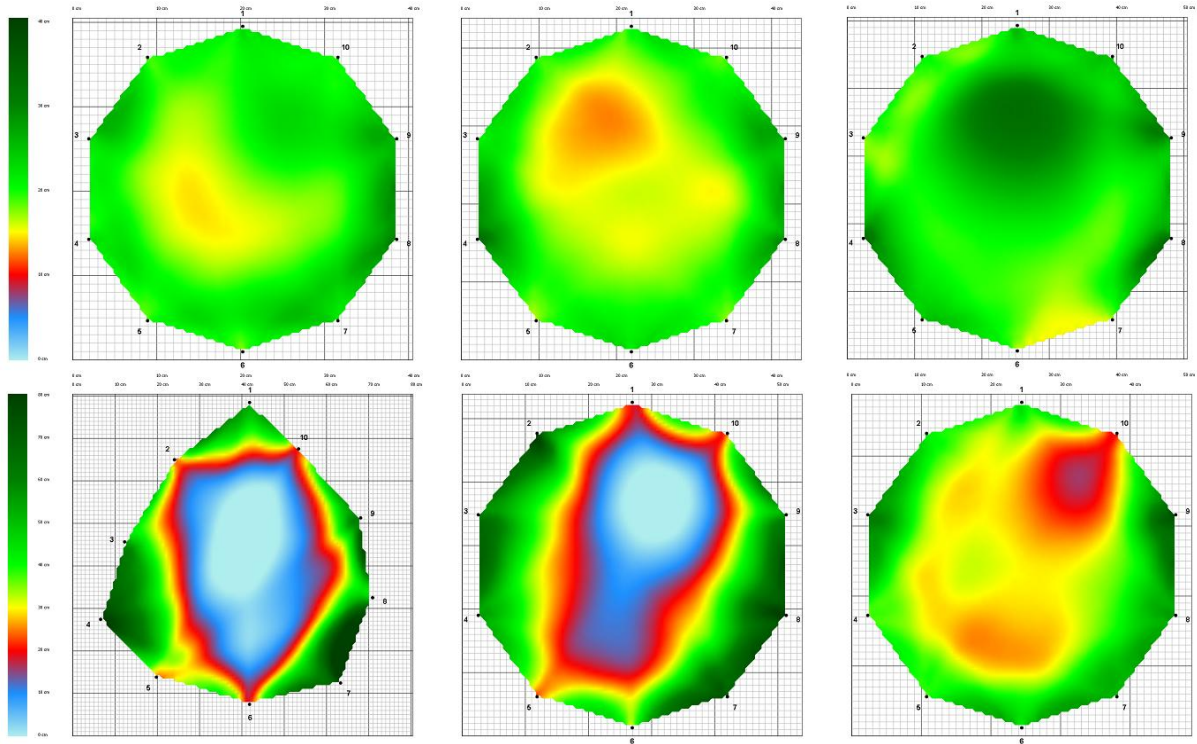
$$\sigma_{\text{önsúly}} = m / A \quad (3.8.1.3.)$$

Ahol  $m$  (kg) a fa tömege (törzs + ágak) az adott szint felett. Ezt állandó keresztmetszetű rúddal közelítettük. (Ez a közelítés általában nagyobb tömeget jelent, mint a fa tényleges tömege.) Az  $A$  ( $\text{m}^2$ ) pedig az adott szintbeli keresztmetszet.

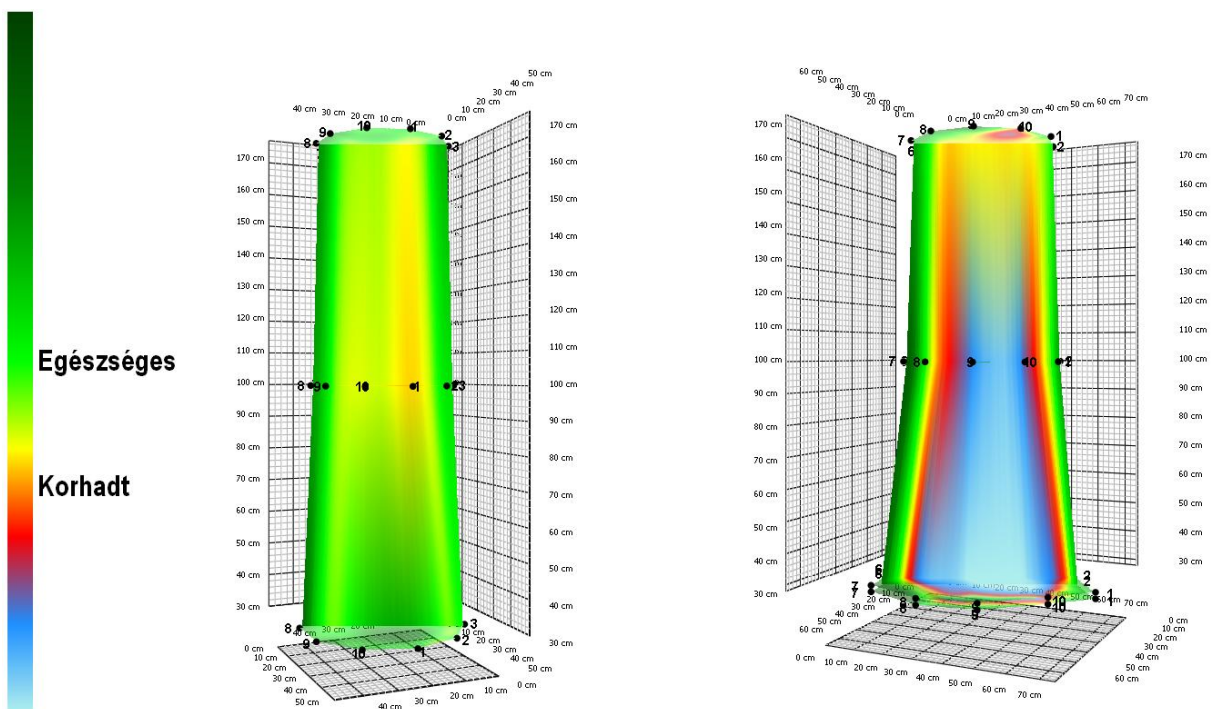
Az így kiszámított biztonsági faktor a törzs adott szinten történő kettétörésének biztonságosságát adja vissza. Tipikus a több 100%-os érték, a becslések pontatlansága miatt a 150-200% feletti érték számít jónak.

Az egy-egy szintbeli felvételekből 3D-s modell is készíthető egy adott fára. Ekkor a korhadás nagysága lineáris interpolálással kerül meghatározásra a mért rétegek között. Erre láthatunk példát a 3.8.1.2. és 3.8.1.3. ábrákon. (Shigo 1979)

(Érdeemes megjegyeznünk, hogy a detektált jel „kerülő úton” halad, a 3.8.1.1. ábrának megfelelően, ezért a korhadt vagy üreges részről nincs információnk a jelben. A hiba helyzete és mérete becslésen alapszik. Például egy, az évgűrű mentén lévő viszonylag kicsiny repedést általában jóval nagyobbnak mutat a tomográfia.)



3.8.1.2. ábra: Egy egészséges (felső sor) és egy beteg (alsó sor) fa akusztikus tomográfiával, különböző szinteken készült képei



3.8.1.3. ábra: A 2D-s képekből készíthető 3D-s modellek

### 3.8.2. Ultrahang tomográfia

Ultrahang segítségével is megkereshetőek, kimutathatóak különböző elváltozások, az ultrahang főbb felhasználási területei a kompozitok, faanyagok, faszerkezetek vizsgálatai. (Tomikawa 1990, Palaia-Perez 1994, Bucur 2003)

Az ultrahang tomográfia élő fákon való felhasználása az akusztikus tomográfiához hasonló, ma már ennek is létezik hordozható változata is. Lásd 3.8.2.1. ábra. (Song 2011, Sandoz 1994, Bucur 2005, Kim 2007)



3.8.2.1. ábra: Egy élő fán végezhető ultrahang tomográfias mérés modellje

A tapasztalatok szerint az ultrahang sebessége szignifikánsan változik roncsolás, károsítás vagy korhadás jelenlétében. De ahogy a reakciófa tulajdonságaiban is különbözik a rendes növénytől, így a reakciófa kimutatása is sikeres lehet ultrahangos technikával. (Prieto 1990, Najafi 2007, Yang 2007, Coutand 2004, Muller 2006, Karlinasari 2011, Najafi 2009A, B, Lin 2000, Wang 2001B)

Ultrahang segítségével megtalálhatóak a fa belsejében lévő üregek, bár az alak modellezésében még vannak torzítások, ahogy nagyon kicsi üreget sem talál meg ez a technika. Ilyen mérések láthatóak a 3.8.2.2. ábrán is. (Goncalves 2011, Li 2009)



3.8.2.2. ábra: Ultrahangos tesztek korongokon.

Ezzel a technikával is egy adott szelet épségét mérhetjük fel, s a fa törzsének adott szinten történő kettétörését előidézni képes szelet becsülhetjük meg.

Érdeemes megjegyeznünk, hogy az ultrahangos mérések során egy hullámcsomagot küld ki a jeladó, s csupán az induló hullámcsomag frekvenciája ismert. A kialakult hullám



frekvenciája, amplitúdója, áthaladási ideje mérhető, s ezekből a megfelelő számítógépes feldolgozás után kép nyerhető. Lásd 3.8.2.2. ábra. (Bucur 2003)

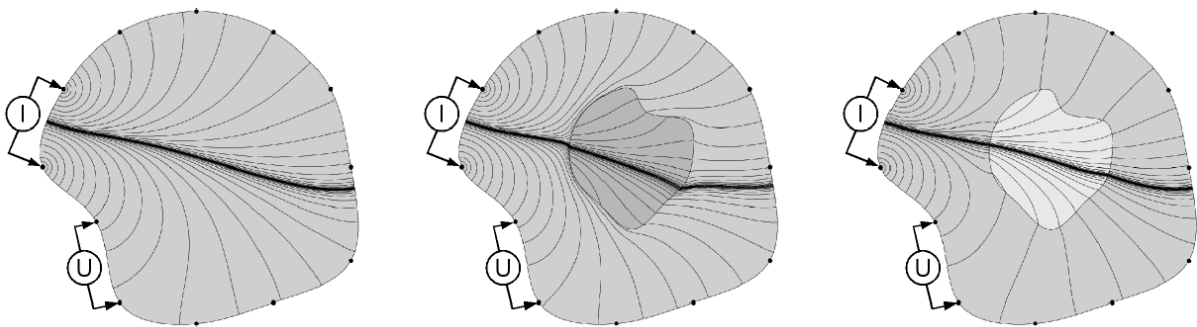
Szintén fontos megjegyeznünk, hogy ultrahang használatánál kiemelten figyelni kell a megfelelő csatolásra a jeladó, a jelvevő és a faanyag között, mivel a magas frekvencián a csillapítás jelentős. Ezért nagy átmérőjű (1m felett) fák vizsgálata nem lehetséges. Megfelelő csatolás hiányában az ultrahang csak nagyon csekélyen hatol be a faanyagba (visszaverődik a felületen) vagy csak nagyon kicsiny jel észlelhető.

### 3.8.3. Impedancia tomográfia

Az élő fán alkalmazott impedancia tomográfia is a belső szerkezetről, annak elváltozásáról ad információt. Az előzőleg bemutatott tomográfias módszerekkel szemben azonban itt az elektromos ellenállás, és az általa kialakított elektromos mező által létrehozott feszültségek kerülnek mérésre.

Maga a mérés elektródákkal történik (általában kétszer annyi elektróda szükséges azonos felbontáshoz, mint ahány detektor az akusztikus tomográfia használatakor). Az elektródák közül kettőn áramot vezetünk az anyagba, míg a többin folyik a mérés, miközben biztonságos távolságot kell tartani a mért fától. A mérés síkját is úgy kell megválasztanunk, hogy az a talajtól magasabban legyen, mint a fa átmérője. Ellenkező esetben a gyökerek kilépései vagy a talaj víztartalma túl bizonytalanná tehetik az adatok értelmezését.

A bevezetett áram hatására elektromos mező alakul ki, melynek eloszlása az ellenállás függvénye. Ha az ellenállás nem homogén, hanem eltérő ellenállású részek is találhatóak a fában, akkor azok „eltorzítják” az elektromos mezőt. A magasabb ellenállású részen az erőter feszültségvonalai kifele tolódnak, s magasabb feszültség mérhető, míg ha jól vezető rész található az anyagban, az „vonzza” a feszültségvonalakat, s kisebb feszültség lesz mérhető. Ennek modellje látható a 3.8.3.1. ábrán.



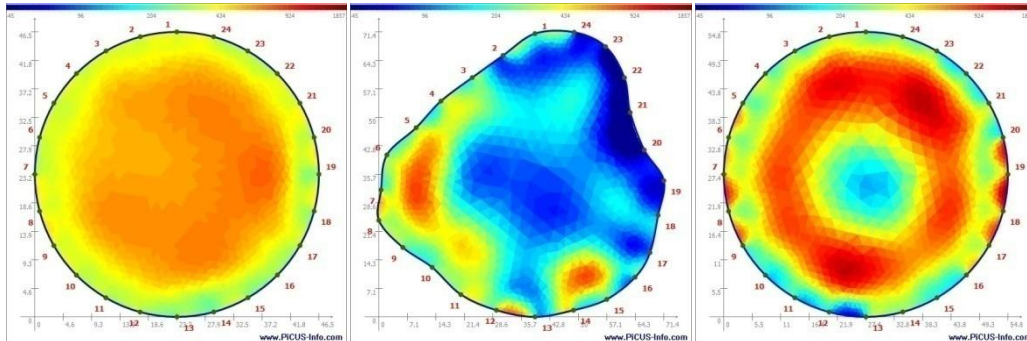
3.8.3.1. ábra: Az elektromos mező modellje homogén ellenállású anyagban (balra), rosszul (középen) és jól (jobbra) vezető rész jelenlétében

Mivel az elektromos mező máshogy viselkedik, mint a hang vagy az ultrahang, az eredmény is más információkat ad vissza. Míg akusztikus vagy ultrahangos úton üregeket, korhadásokat találhatunk egy adott fában, addig az impedancia tomográfia által készített képek értelmezése nem ennyire egyszerű.

Ugyanazok a mérési eredmények, értékek más-más jelenségre is utalhatnak. Például a magas víztartalom vagy ionkoncentráció, egy üreg vagy egy gombatámadás képe lehet nagyon hasonló.

Élő fára 3 alapesetet különböztethetünk meg. Ahogy a 3.8.3.2. ábrán is látható

- a) „normál” eloszlás, belül magas, kívül kisebb ellenállás
- b) „beteg” vagy, megnövekedett belső nedvességtartalomra utaló eloszlás, belül alacsonyabb, kívül magasabb ellenállás
- c) magas ionkoncentrációra utaló eloszlás, belül kisebb, majd gyűrű alakban magasabb, kívül ismét alacsonyabb ellenállás



3.8.3.2. ábra: „Normál” (balra) „beteg” (középen) és magas ionkoncentrációra utaló impedancia tomográfias képek

Az impedancia tomográfia kimutathat egy kezdődő gombafertőzést, a nedvességtartalom évszakos változását, vagy akár az álgeszteket is, a fa egészségességéről ad általános információt. És az akusztikus tomográfiahoz hasonlóan az impedancia tomográfia által mért adatokból is lehet 3D-s modellt készíteni. (Martin 2009, Göcke 2007)

### 3.9. Egyéb módszerek

Az előző fejezetekben bemutatásra kerültek az elterjedtebbnek tekinthető, élő fán végzett roncsolásmentes vizsgálatok. Ezekon kívül is vannak még eljárások, melyek azonban kevésbé hozzáférhetőek, nem elterjedtek, túl drágák, kísérleti stádiumban vannak, vagy ugyan faanyagra széles körben alkalmazzák, élő fán mégis ritkaságnak számítanak.

A dolgozat szeretne egy jó összefoglaló képet adni az élő fák roncsolásmentes vizsgálatairól, ezért, ha rövidebb terjedelemben is, de bemutatásra kerülnek ezek a módszerek is.

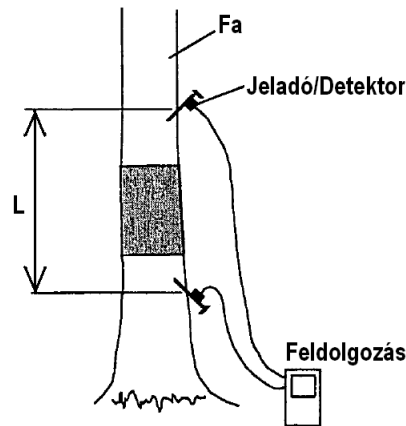
#### 3.9.1. Nem tomográfia jellegű akusztikus, ultrahangos módszerek

A tomográfia mellett egy-egy akusztikus, illetve ultrahangos módszert mindenképpen érdemes még megemlíteni. Ezek egyike a rost irányú mérés, a másik pedig a facsometék felmérése.

Az egy vonalon történő mérést a 3.9.1.1. ábra mutatja. (Wang 2000)

Ilyen mérések segítségével becsülhető a kinyerhető faanyag minősége. A nagyobb hangsebesség nagyobb rugalmassági modulust jelez, ami nagyobb szilárdságot valószínűsít. (szerk. Pellerin 2002)

Maga a mérés nagyon egyszerű, a két jeladó, jelvevő közötti távolságot kell lemérni, majd az időt, ami alatt a hang megteszi azt.



3.9.1.1. ábra: Rostirányú hangsebesség mérés

A másik említésre méltó mérés a facsémterek által a későbbiekben létrehozott faanyag korai megbecslése. A palántákon mérhető ultrahang sebessége előrejelzője lehet a majdan kitermelhető faanyag minőségének. Így korai kiválasztás történhet. Ez látható a 3.9.1.2. ábrán. (szerk. Takata 2006, Huang 2006, Divós 2010)



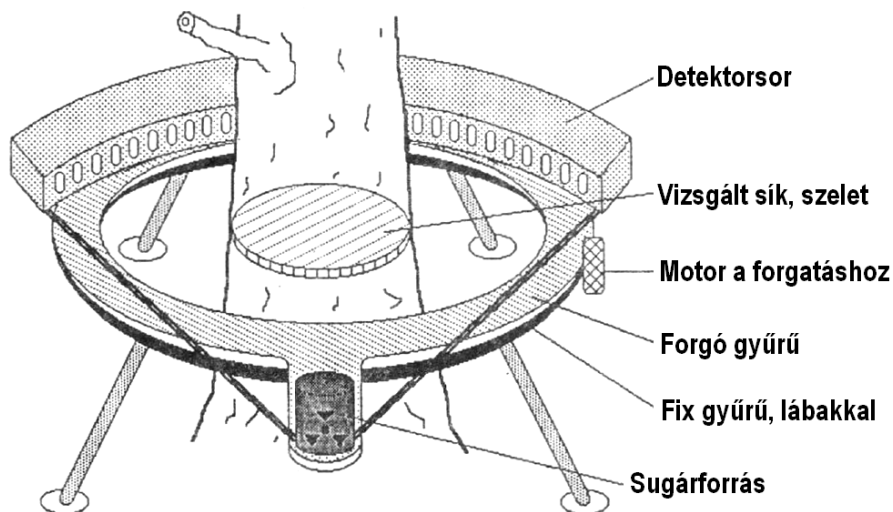
3.9.1.2. ábra: Ultrahangos mérés facsémteken

### 3.9.2. Röntgenes felmérés, CT

Röntgenes vizsgálatokat első sorban rönkökön, fűrészárún, kész faszerkezeteken végeznek. Az élő fákon végzett röntgenes vizsgálatok közül a CT emelkedik ki. A röntgensugárzás ionizáló, élettanilag veszélyes, és viszonylag drága is. (Johnasson 1985, Gupta 1999, Benson-Cooper 1982, Burgess 1985, Cown 1983)

Ennek ellenére számos kísérletet végeztek, hordozható favizsgáló CT is kialakításra került. (Habermehl 1994, Onoe 1984)

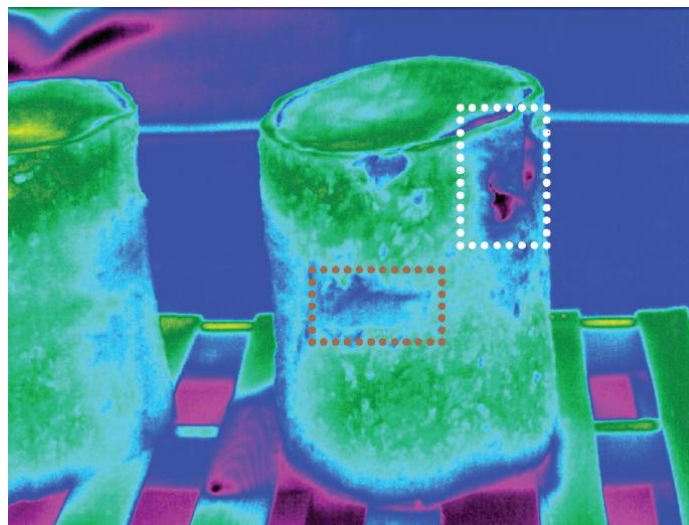
Ahogy az a 3.9.2.1. ábrán látható, egy megfelelő sugárforrás és detektorsor forog körbe egy fa körül, mialatt kép készül annak egy síkjáról. Ezzel az eljárással a nedvességtartalmat, szennyeződések, sűrűségváltozásokat, az évgűrűszerkezetet, és bizonyos fahibákat, mint például a göcsösséget lehet kimutatni. (Bucur 2003, Ridder 1994, Sismándy-Kiss 2012)



3.9.2.1. ábra: Élő fa CT-s vizsgálata

### 3.9.3. Hőkamerás vizsgálatok

A tárgyak hőmérsékletüknek megfelelő elektromágneses sugárzást adnak le. Ezt tudjuk hőkamerával detektálni. Egy adott felület hőmérséklete, annak változásai utalhatnak a vizsgált tárgy, növény belsejének inhomogenitására, de inkább csak a felszínhez közeli részeken, egy rönk mérése látható a 3.9.3.1-es ábrán. (Bucur 2003, Tuli 2011, Burcham 2011)



3.9.3.1. ábra: Felszíni fahibák (kopás – barna jelölés; levált kéreg – fehér jelölés), melyek alacsonyabb hőmérsékletüként látszanak az infrakamera képén

Egyes kutatók reményei szerint a fák infravörös sugárzásának vizsgálata kiválthatja a fák „kopogtatását”, hiszen a belső elváltozás miatt megváltozott hővezetés a törzs felszínének infraképén is láthatóvá válhat, néhány kép készítésével sokkal gyorsabban, és nagyobb felületről lehet információt szerezni. Hasonló próbálkozások voltak a víz, a nedvességtartalom kimutatására is. (Al-Sulaiman 2005, Catena 2002)



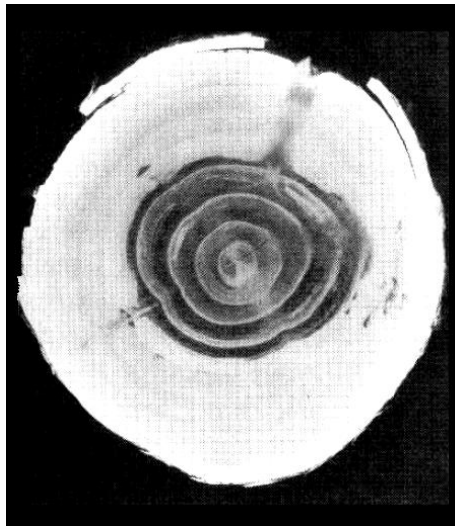
### 3.9.4. Mikrohullámú, NMR és neutron sugárzásos mérési lehetőségek

Élő fák tekintetében mikrohullámú mérés biomassza becslésként történik. Mikrohullámú radar segítségével egy adott terület, erdő biomasszája mérhető fel. A korona (levelek, ágak, gyümölcsök) mikrohullámra adott válasza más, mint az őt körül vevő levegőé. (Bucur 2003)

Holt fára több mikrohullámú alkalmazás létezik, nedvesség, rostkifutás, illetve göcsök meghatározására. (Sismándy-Kiss 2011)

A NMR, MRI vagy MR, eredetileg mag-mágneses rezonanciás képalkotás az orvostudomány területén terjedt el. Segítségével alap kutatások végezhetőek az élő fákon, csíranövényeken, magokon, palántákon. MR segítségével nyomon követhető a víz útja egy növényen belül.

Méréseket végeztek rügyekre, magokra, ezeket sikerült megkülönböztetni, mint egészséges és beteg rügyek, illetve csírázó képes és arra képtelen magok. Ezeken kívül az ép és a beteg, támadott szövetek közti különbség feltárására is alkalmazták az MR méréseket, de még fagyási folyamatot is nyomon tudtak követni vele. (Bucur 2003, Pearce 1997)



3.9.4.1. ábra: Egy japán feketefenyő neutronsugárzás segítségével készült képe

A neutronsugárzást is a víz, a nedvességtartalom kimutatására használják (3.9.4.1. ábra). Több kísérletet végeztek már ennek segítségével, különböző fák víztartalmának összehasonlítására. A legfrissebb évgyűrűk, valamint a „hamis” gyűrűk láthatóak a képeken. A geszt kimutatása annak kisebb nedvességtartalma miatt nehezebb. (Bucur 2003, Vontobel 2002, Nakanishi 1995)

## 4. A mérések anyagai, eszközei, eszközfejlesztés

Jelen fejezetben bemutatásra kerülnek az általam felhasznált eszközök, programok, anyagok. A célkitűzésekben megfogalmazottak szerint új mérési elrendezéseket raktunk össze, teszteltünk, fejlesztettünk ki, ezért az eszközök nem választhatóak el az eszközök fejlesztésétől. A bemutatott eszközök nagy része saját, vagy részben saját elgondolás illetve elrendezés, ezek kerülnek külön részletezésre is. A nem saját fejlesztések (gondolok elsősorban a számítógépes programokra) tárgyalása rövidebb, csupán a felhasználást, a mérési adatok értékelésének megértését szolgáló szintű.

### 4.1. Optikai rendszer kidolgozása ágak mozgásának megfigyelésére

Habár egy-egy leszakadó, nagyobb ág komoly kárt okozhat, az ágak biztonságossága kevésbé kutatott terület, mint a gyökérzeté vagy a törzsé. A célunk egy egyszerű, viszonylag olcsó, könnyen kezelhető rendszer kidolgozása volt, mellyel az ágak mozgása figyelhető meg. A mérésekből az ágak biztonságosságára vonatkozó, használható információ nyerés volt a célunk.

Az első kísérletek mindössze egy fényképezőgép segítségével történtek. A megfigyelni kívánt ágra egy markert rögzítettünk, ahogy az a 4.1.1. ábrán látható. Mivel csak egy kameránk volt, ezért az ág mindkét oldalának egyidejű megfigyelését egy tükör segítségével tudtuk megoldani.

Felvételt készítettünk az ág, és egyben a marker mozgásáról. Majd felkockáztuk a videót, és képkockáinként kézileg állapítottuk meg a jelölő négyzet közepének koordinátáit az egyes időpillanatokban. Ezeket az adatokat vittük át a Microsoft Excel programba, ahol grafikont rajzoltunk a mozgásra, x, vízszintes és y, függőleges irányokra. A kézi kiértékelés túlságosan időigényesnek bizonyult. Ezért a kiértékelés gyorsításának érdekében egy program kidolgozását kértük, ami meg is valósult. Ennek hála két programot és hat markert tesztelhettünk a következő körülbelül három hónapban.



4.1.1. ábra: Felmarkerezett ág, mögötte tükörrel

A mérések folytatásához a MarkerTracker2 programot használtuk (Schmuck Ákos fejlesztése).

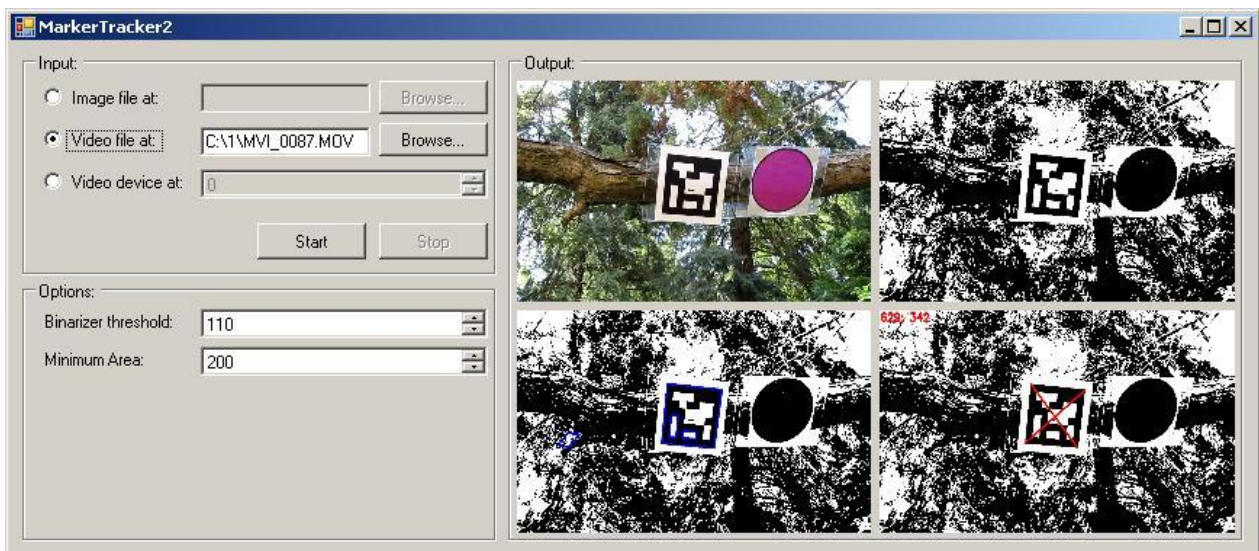
Ezzel párhuzamosan egy pályázat keretében két fényképezőgépet nyertünk, amelyek segítségével egyszerre tudtunk felvételt készíteni az ág mindkét oldaláról. Ahogy a 4.1.2. ábra elrendezése mutatja.



4.1.2. ábra: A két kamerás rendszer elméleti rajza (balra) és egy megvalósított mérés (jobbra)

#### 4.1.1. A MarkerTracker2 program bemutatása

A MarkerTracker2 program kimondottan számunkra, a méréseink kiértékelésére lett tervezve. A program egy pillanatsfelvétele látható a 4.1.1.1. ábrán.



4.1.1.1. ábra: A MarkerTracker2 program kezelő felülete

A program háromfajta bemeneti jelet tud kezelni, egyéni képkockákat, kész videókat és webkamera jelét, melyet valós időben képes feldolgozni.

A kép fájlok az „Image file at” menüvel tölthetők be. A program a .bmp, .dib, .jpeg, .jpg, .jpe, .png, .pbm, .pgm, .ppm, .sr, .ras, .tiff, .tiff formátumú képeket képes kezelni.

A videó fájlok a „Video file at” móddal érhetőek el, ezekből az .avi, .mpeg, .mpg, .flv, .mov formátumokat kezeli a program.

A webkamera csatlakozása a „Video device at” bejelölésével észleltethető.

A „Start” gombbal indítja a program a kiértékelést, amit a „Stop”-pal tudunk megállítani. A program nem áll le a videó fájl végénél, végtelenítve tovább írja ugyanazokat az értékeket.

Miután a program betöltötte a kijelölt fájlt, fényerő alapján fekete-fehér képet hoz létre belőle. Ezen a képen keres egy négyszöget, melyet fekete és fehér kontrasztváltozás határol egyértelműen. A négyszög átlói metszéspontjának koordinátáit jegyzi a program egy .csv saját fájlba, videó esetén az összes képkocka adataiból készül egy fájl.

A koordinátákat a program a kép bal felső sarkába tett origóhoz viszonyítja, pixelben, pozitív irányokat jelölve ki jobbra és lefele. Ha egy felvételen nem tud megfelelő négyszöget kijelölni, azt a -1,-1 értékekkel jegyzi fel. Mivel ezek az értékek lehetetlenek a programban, így egyből kiderül, hogy hibás a kiértékelés.

A programban beállítható a „Binarizer threshold”, ami a feketének, illetve fehérnek sorolt fényerő határa. Az ez alatti értékekkel rendelkező pixelek feketékké konvertálódnak, míg nagyobb fényerővel bírók fehérékké. A kiértékelést segítő, vagy éppen „elrontó” paramétról van szó. Segítségével a fényviszonyok változásai ellenére is kiértékelhető adatsorokat kaphatunk.

Beállítható még a „Minimum Area” is, ami a keresett téglalap minimális területét jelenti pixelben. Ezzel a háttér apróbb részleteinek kijelölését tudjuk „megtiltani”. Aminek hiányában előfordulna, hogy a marker helyett a háttér egy részletének mozgásából (vagy állásából) készül el az adatsor, ami mindenképpen elkerülendő.

Az elkészült fájlban csupán az x és y koordináták szerepelnek. Az idő adatokat a videó fájl saját adataiból (másodpercenkénti felbontásából) tudjuk a koordinátákhoz rendelni. A .csv fájlok könnyen átvihetők Excelbe, .xls fájlkká. A továbbiakban már ezekkel dolgoztunk.

#### *4.1.2. A használt fényképezőgépek bemutatása*

Méréseinkhez 2 db Canon PowerShot SX210 IS fényképezőgépet használtunk, melyeket a Faipari Egyetemi Kutatásért Alapítvány pályázatának hála tudtunk beszerezni.

A fényképezőgép fontosabb paraméterei:

- effektív 14,1 megapixel
- felbontás: 4320 x 3240 pixel
- zoom: 14x optikai, 4x digitális
- fókusz távolság: 28 mm - 392 mm
- képfarmátumok: JPEG
- megvilágítás-korrekción (automatikus): opcionális
- fényérzékenység: Auto, ISO 80, ISO 100, ISO 200, ISO 400, ISO 800, ISO 1600
- videófelvétel
- videóformátumok: H.264
- videófelbontás: 1280 x 720 pixel
- videó képfrekvencia: 30 kép/s
- min. felvételi távolság: 5 cm
- kereső: LCD monitor

A fényképezőgép kiválasztásakor fontos volt az optikai zoom nagysága (messzebb lévő markerek jó láthatósága miatt), a videózási képesség, a videó mind pixelbeli mind időbeli felbontása. Választásunk az anyagi kereteken belül a legjobbnak talált gép volt.

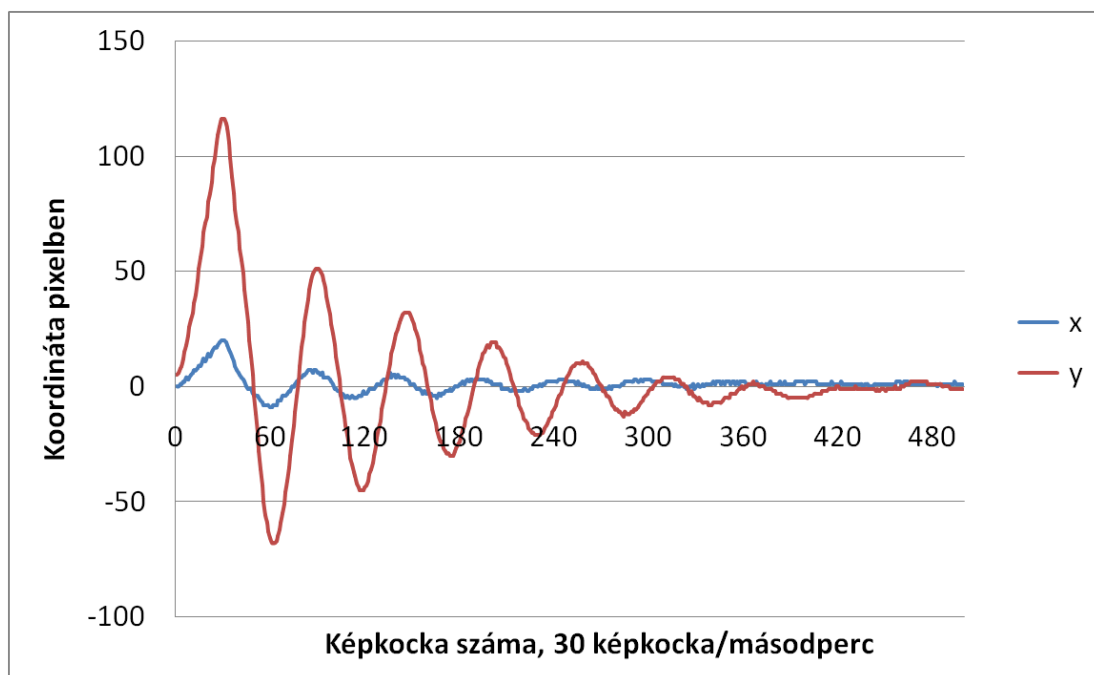
### 4.1.3. A kiértékelés lépései

A mérések kiértékelése a következő lépésekkel történt:

1. Ág kiválasztása, marker felhelyezése
2. Videofelvétel készítése a 2 fényképezőgéppel .mov formátumban, 30 képkocka/másodperc
3. A felvétel betöltése, elemzése a MarkerTracker2 programban, .csv fájl mentése a mozgás adataival.
4. A .csv fájl beolvasás Microsoft Excel programba, .xls fájl létrehozása.
5. A Microsoft Excel „Analysis ToolPak” bővítmény segítségével Fourier-transzformáció elvégzése az adatokon, majd az eredmény grafikus ábrázolása, a grafikonról a legnagyobb amplitúdóval rendelkező frekvencia leolvasása.

A fényképezőgépről és a MarkerTracker2 program kezeléséről az előző fejezetekben volt szó, itt a mozgás saját frekvenciájának megállapítását mutatom be.

A mozgást tartalmazó adatokat a nyugalmi helyzetet nullának véve igazítottuk, vagyis általában a kezdeti koordinátákat kivontuk az adatokból. Az elemzés megkönnyítése érdekében általában a kezdeti tranziens szakaszt is kivágtuk. Egy ilyen adatsor látható a 4.1.3.1. ábrán, az ág x és y irányú mozgásaival.



4.1.3.1. ábra: Egy ág mozgása lökés után függőlegesen (y) és vízszintesen (x)

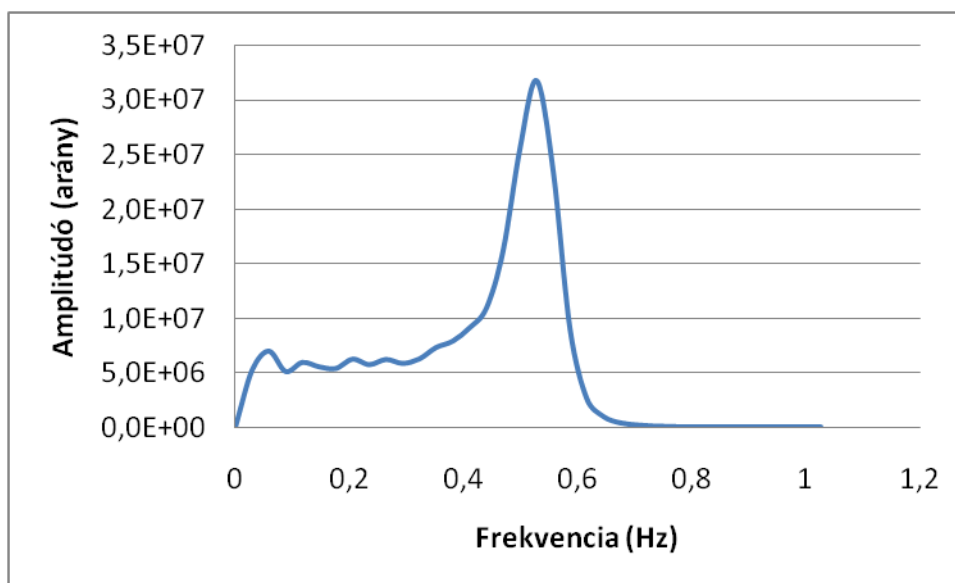
A Microsoft Excel program „Analysis ToolPak” bővítményét a „Tools” menü „Add-Ins...” parancsával aktiválhatjuk, az „Add-Ins” felugró ablakban történő kiválasztással, „bepipálással”, amit a „Select” parancssal hagyhatunk jóvá. Ezután a program létrehoz egy „Data Analysis” nevű lehetőséget a „Tools” menüben.

A „Data Analysis” megnyíló ablakában a lehetőségek közül kiválaszthatjuk a „Fourier Analysis”-t.



A transzformáció Microsoft Excel-ben történő elvégzéséhez 2 hatványainak (2, 4, 8, 16, stb.) megfelelő hosszúságú adatsorokra van szükség. Ezt egyrészt a mért adatok vágásával, másrészt az elért nyugalmi helyzetnek megfelelő nulla értékekkel való feltöltéssel értük el. A mérések értékelését 512 adatos sorokkal végeztük (ennél többre nem volt szükség, összehasonlításkor minimális volt különbség az ezzel és a nagyobb adatszámú kapott eredmények között).

A transzformáció amplitúdókat ad vissza, komplex számok formájában. A komplexeket valósakká alakítottuk egyszerű négyzetösszegzéssel (a számított amplitúdó =  $(a \text{ valós rész})^2 + (a \text{ komplex rész})^2$ ). Az amplitúdókhöz tartozó frekvenciákat a fényképezőgép frekvenciájának figyelembevételével állapítottuk meg. E két adatból grafikont készítettünk, amin általában könnyen meg lehetett találni az amplitúdó maximumát, a keresett frekvenciát. Egy frekvencia-amplitúdó grafikon látható a 4.1.3.2. ábrán. A fentiekben bemutatott módon megállapított frekvenciákat (melyek a rendszer, az ág sajátfrekvenciái, hiszen a kezdő lökés után magára hagytuk a rendszert) használtuk összehasonlításra.



4.1.3.2. ábra: Egy ág függőleges mozgásának Fourier-transzformáltja

#### 4.1.4. Összegzés

Összegzésként elmondható, hogy sikerült kialakítanunk egy olyan mérési eljárást, mellyel az ágak mozgása megfigyelhető. A rendszer viszonylag olcsónak, elérhetőnek számít, mind a mérés, mind az elemzés „felhasználóbarát”.

A mérési eredmények részletezése során bemutatásra kerül az is, hogy a mozgás adatsora, az arról készült grafikon (mint a 4.1.3.1. ábra) és/vagy a sajátfrekvenciák változnak különböző helyzetekben, így az elrendezés kutatásra alkalmas.

## 4.2. Gyökérzet stabilitásának vizsgálata

A gyökérzet felmérésére, a gyökerestül kifordulás becslésére jelenleg csak a dőlésméréses húzó vizsgálat alkalmas kellő biztonsággal. (Bővebben a 3.5. fejezetben.) A

húzóvizsgálat kivitelezése bizonyos esetekben (túl sűrű állományban áll a fa, a dőlésmérő nem rögzíthető a talaj közelében, túl szeles a környezet, nincs horgonyzásra megfelelő alap, stb.) nehézkessé válik, vagy akár kivitelezhetetlenné is.

Két fő irányba indultunk el a húzó vizsgálatot kiváltani képes vizsgálati módszer kidolgozásakor. Egyrészt a dőlésmérő eszközt próbáltuk kicserélni egy lézeres rendszerre, másrészt a köteles szimulációt szeretnénk volna valódi szélre „cserélni”.

Harmadikként, mint egy mellékszálon, az akusztikus gyökérkeresés eredményeinek felhasználhatóságát néztük meg a biztonságosság becslésének szempontjából.

#### 4.2.1. Lézeres rendszer a fa töve dőlésének követésére

Méréseinkhez egy zöldlézert pointert használtunk, amit a fa törzsére, a talajszinthez a lehető legközelebb rögzítettük. A lézer fényét egy ernyő fogta fel, amelyet beárnyékolunk a jobb kontraszt érdekében, és amelyhez fixen egy USB-s webkamera van rögzítve. Az ernyő a lézerfolttal (a lézerforrástól kb. 20 méterre, a távolság miatt tűnik foltnak) és a webkamerával látható a 4.2.1.1. ábrán.



4.2.1.1. ábra: A lézert felfogó ernyő és a web kamera (pirossal körbevéve)

A web kamera USB porton csatlakozik egy laptop-hoz, melyen a FaMoc program fut. (Ezt a programot kimondottan ehhez tervezték, Schmuck Ákosnak köszönhetjük.) A program a megjelenő lézerfoltra ellipszist illeszt, ennek közepét számolja. A középpont koordinátáit rögzíti 5 adat/2 másodperccel, pixelben.

Az ernyő nagyságának, a web kamera felbontásának és a lézerforrástól való távolságnak az ismeretében a mozgás nagysága és a dőlés kiszámolható.

#### 4.2.1.1. A használt lézer

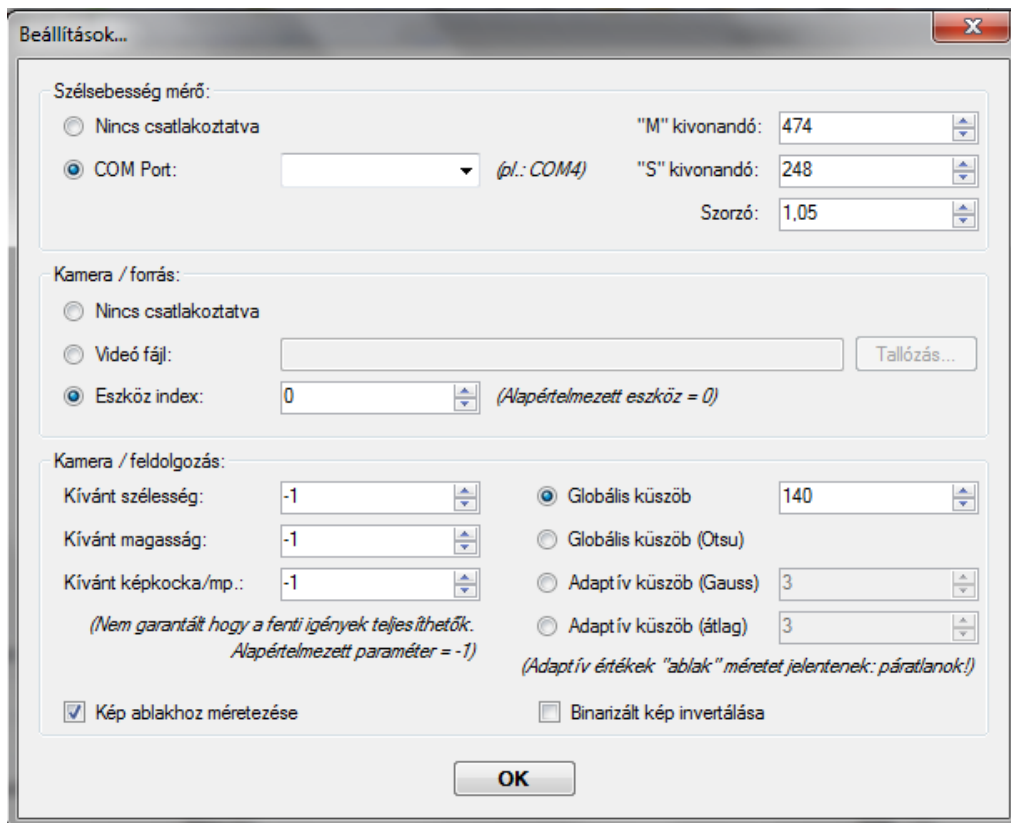
A méréseinkhez használt lézer, a Laser Pointer JD-851 típusú. 532 nm-es hullámhosszon világít, teljesítménye 100 mW. Tölthető akkumulátora kb. egy óra folyamatos világításra elég.

#### 4.2.1.2. A FaMoc program bemutatása

Az adatok gyűjtéséhez, értékeléséhez a FaMoc programot használtuk.

A program egyszerre képes kezelni „lézerpötty” mozgását és a – későbbiekben bemutatásra kerülő – szélmérő adatait. Az egyszerűség kedvéért jelen fejezetben a program minden, általunk használt funkciójára kitérek.

A FaMoc az alább látható beállítási képernyővel indul, 4.2.1.2.1. ábra.



4.2.1.2.1. ábra: A FaMoc program indítóképernyője

A beállítások a szélességmérőre, a bemeneti videojelre és a videojel kiértékelésére vonatkoznak.

A szélességmérő beállításai:

- „Nincs csatlakoztatva” – amikor nem csatlakoztatjuk a szélmérőt
- „COM Port” + lenyíló menü – itt a szélmérő csatlakozási portját lehet megadni. Az ezen a porton érkező információk kerülnek feldolgozásra és rögzítésre mint szélesség adatok.



- „M” kivonandó” + értékválasztás – a szélmérő főirányában (az M a „master”, míg az S a „slave” szavakból jön, e két irány egymásra merőleges) álló érzékelő(pár) által küldött adat korrekciója, sima kivonás, melynek értéke a kalibrálás során került megállapításra.

- „S” kivonandó” + értékválasztás – a szélmérő másik irányában álló érzékelő(pár) által küldött adat korrekciója, sima kivonás, melynek értéke a kalibrálás során került megállapításra

- „Szorzó” + értékválasztás – a szélmérő érzékelői által küldött adat korrekciója, nagyságrendi korrekciója, sima szorzás, melynek értéke szintén a kalibrálás során került megállapításra.

A „Kamera / forrás”, a bemeneti videojel beállításai:

- „Nincs csatlakoztatva” – ha nincs bemeneti videojel.

- „Videó fájl” + lenyíló menü, „Tallózás...” gomb – a program bemeneti jelként korábban elkészült video fájl is feldolgozható, ezt lehet itt betölteni.

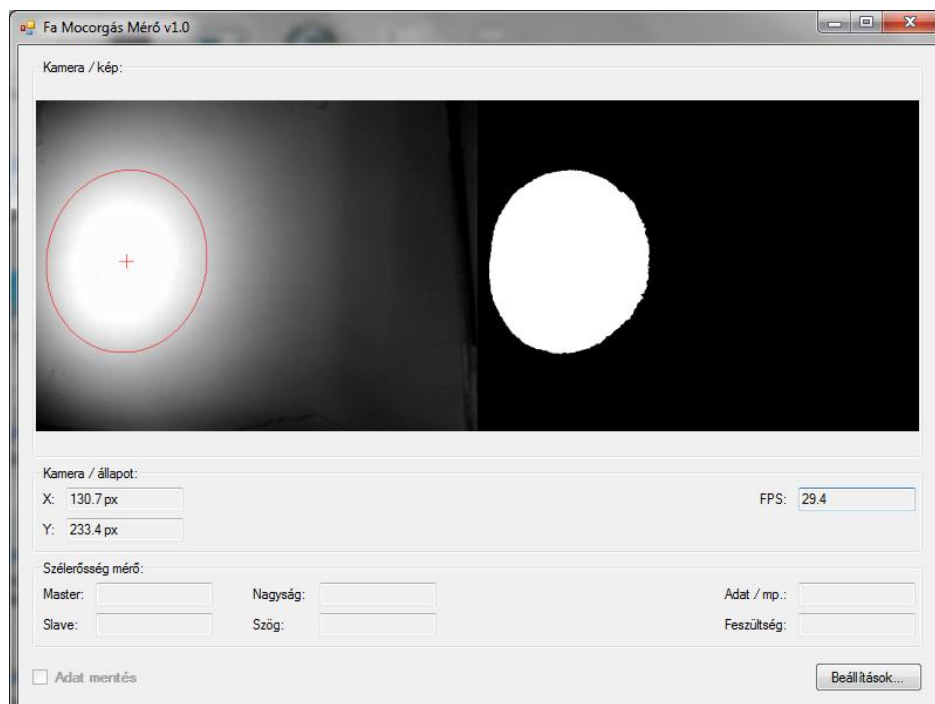
- „Eszköz index” + értékválasztás – az alapértelmezett eszköz a „0”, ezt használtuk a mérések során.

A „Kamera / feldolgozás” beállításai

- „Kívánt szélesség”, „Kívánt magasság”, „Kívánt képkocka/mp” + értékválasztás – a felvétel feldolgozása során figyelembe vett video kocka szélessége, magassága, illetve a másodpercenkénti képkockák száma. A „-1” (lehetetlen) paraméter a video eszköz vagy felvétel saját értékeit adja vissza, ezt használtuk.

- „Kép ablakhoz méretezés” + jelölőnégyzet – a megjelenő kép, képeknek az ablakhoz való méretezését írja elő

- „Globális küszöb” + értékválasztás – a fényerő azon értékének megadása (0 és 255 között) ami alatt „fekete” és ami felett „fehér” értékeket kap egy képkocka, a jel megtalálhatósága szempontjából fontos, az adott fényviszonyok között kell megfelelően beállítani. A küszöbök közül csak ezt használtuk.



4.2.1.2.2. ábra: FaMoc program mérés közben

Ha minden értéket megadtunk, és beállításaink a program által értelmezhetőek, akkor az „OK” gombbal léphetünk tovább, ha nem értelmezhetőek, akkor erre egy hibüzenet figyelmeztet minket, és nem engedi a továbblépést.

A megnyíló mérési ablak látható a 4.2.1.2.2. ábrán.

A mérőablakon két kép látható, a bal oldali a web kamera jele fekete-fehérben (szürkeárnyalatokként), jobb oldalt pedig a küszöbnek megfelelő szűrés után. A program a jobb oldali képen egy ellipszist keres, majd ennek közepét jelöli be. Ennek mozgását rögzíti pixelben, az origóként szolgáló bal alsó sarokhoz viszonyítva. A mozgás értékei akkor felelnek meg tényleges mérésnek, ha azok pozitív számok. A keresett pont pillanatnyi helyzetének koordinátáit mutatják a „Kamera / állapot” X és Y értékei, pixelben.

Az „FPS” (frame/secundum) a másodpercenként érkező képkockák számát jelzi.

Az ablak a szélességmérő adatait is mutatja m/s-ban, külön-külön a két irány „Master” és „Slave”. A két irányt a mérés során a program nem adja meg, csak annyit „tud”, hogy azok egymásra merőlegesek. Hogy melyik irány milyen valós iránynak (észak-déli, kelet-nyugati, stb.) felel meg, az a széltorony felállításától függ. A program a szélesség nagyságát is számolja (Pithagoras tétellel a merőleges irányok szélesség adatai alapján), valamint annak a „Master” irányához viszonyított szögét (fokban).

A szélességmérő által küldött adatok sűrűsége is feltüntetésre kerül az „Adat / mp” kijelzőn, ahogy alatta a műszer feszültsége is.

Bal sarokban található az „Adat mentés” funkció. A program csak akkor menti a mérési adatokat, ha a jelölő négyzet bepipálásra került, és csak addig menti azokat, amíg bepipálva van. A program minden mérési adatsornak saját maga generál egy nevet (a számítógépen beállított dátum és időadatokból), az adatsort saját könyvtárába menti.

A jobb alsó sarokban látható „Beállítások...” gombbal a kezdő ablakba jutunk vissza.

#### *4.2.1.3. A mért adatok feldolgozása*

A program egy .dat fájlt hoz létre, melyben a számítógéptől kért időadatok, a program által megtalált ellipszis adatai és a szélesség értékei találhatóak meg. A nyers adatokat ebben az eredeti formában megőriztük minden mérésnél. A .dat fájlból másolással (Ctrl-C, Ctrl-V parancsokkal) vittük át adatokat Microsoft Excel-be, ahol az adatokból csak a szélességre és az ellipszis közepére vonatkozókat tartottuk meg (az ellipszis többi adatát, főtengely, kistengely, stb. nem), ha voltak ilyen adataink (vagyis amikor csak a „lézerpötty” mozgását mértük, akkor csak a koordinátákat, amikor csak szélességet, akkor csak a szélesség adatait tartottuk meg).

A mért adatok attól függően, hogy mivel szerettük volna összehasonítani kerültek további feldolgozásra (ahogy például a dőlésmérési húzó vizsgálatnál a lézer mozgásának és a dőlésmérő adatainak az időbeli illesztése történt), ezekről a megfelelő fejezetek szólnak bővebben.

#### *4.2.2. Szélmérő, szélmérés*

A szél fára, fákra gyakorolt hatásának vizsgálatához szükségünk volt egy olyan szélesség mérő eszközre, melynek időfelbontása nem átlagolja ki a szellökéseket. A használt, ultrahangos szélmérő a labor (elsősorban Divós professzor úr) saját fejlesztése.

Működési elve a Doppler-effektuson alapszik. Két-két pár adó-vevő van egymással szemben elhelyezve. Ezek között, a levegőben halad az ultrahang. Ha a levegő maga is mozgásban van, akkor az észlelhető ultrahang hullámhossza megváltozik, a változás mértékéből következtetni lehet a közeg sebességére. A szélesebességmérőt a feldolgozó program és ismert sebességek segítségével kalibráltuk. A szélesebességmérő látható a 4.2.2.1. ábrán.

A szélmérő 5 adat / másodperces mintavételezéssel működik, amit elégnek találtunk a széllelőkések detektálására.

A szélméréseket egy összeszerelhető torony segítségével, 10 méteres magasságban végeztük.



4.2.2.1. ábra: A szélesebességmérő (balra) és a széltorony (jobbra)

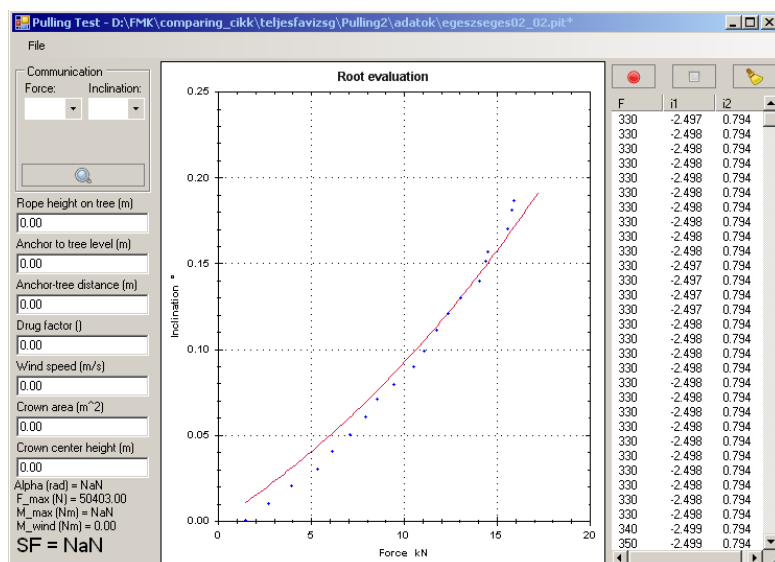
#### 4.2.3. Húzóvizsgálat – kiértékelés

Nyilvánvaló, hogy vizsgálatainkat össze akartuk hasonlítani a dőlés méréses húzóvizsgálat eredményeivel. Ezért ilyen méréseket is végeztünk, a 3.5. fejezetben bemutatott séma szerint. Itt a konkrét kivitelezést írom le.

A húzó vizsgálatához a következőket használtuk; a mérendő fa szélterhelésének szimulálására egy puhább hevedert, egy acélsodronykötelet, egy a kötél feszítésre alkalmas eszközt és egy a kötél feszülését mérő erőmérőt alkalmaztunk. A puhább hevedert rögzítettük a mérendő fához, majd ebbe beleakasztottuk az acélsodronykötelet, amin rajta volt a feszítő kar és az erőmérő. A kikötést, horgonyzást általában egy másik fa segítségével oldottuk meg.

A dőlésmérést egy dőlésmérő végezte (mely egy buborék helyzetváltozása miatt bekövetkező kapacitás változásának segítségével mér, ezért reagálása nem lehet tetszőlegesen gyors), melyet vízszintezővel állítottunk be és rögzítő hevederrel fixáltunk a megfelelő helyre.

Az erőmérő és a dőlésmérő egy laptop-hoz volt csatlakoztatva, az gyűjtötte az adatokat a PullingTest nevű program által, ami a 4.2.3.1. ábrán látható.



4.2.3.1. ábra: A PullingTest program képernyője, közepén egy dőlés-erő illesztéssel

A program folyamatosan méri a dölést és az erőt, majd egy megfelelő algoritmus szerint szűri az adatokat, végül a 3.5. fejezetben bemutatott módon görbét illeszt azokra, és kiszámolja a kifordításhoz szükséges erőt.

Ezután – a megfelelő adatok (vizsgálni kívánt szélesség, a kötel rögzítésének magassága, a horgonyzás távolsága, a fa koronaterülete, stb.) betáplálásával – kiszámolja a biztonsági faktort. (A 2.4. fejezetnek megfelelően.)

Ez a program nem kimondottan a jelen feladatra készült, elkészülte, felhasználása jóval korábbi, a húzóvizsgálathoz fejlesztették ki.

### 4. 3. Akusztikus gyökértérképezés

A Nyugatmagyarországi-egyetem botanikus kertjében két fán akusztikus gyökértérképezést végeztünk, a 3.4. fejezetben bemutatott módon. A célunk az volt, hogy összehasonlíthassuk a húzóvizsgálat és a gyökértérképezés eredményeit. Mivel a húzóvizsgálat során használt eszközök nagyok, nehezek, és a méréshez általában létra is szükséges ahhoz, hogy a húzó kötelet megfelelő magasságban lehessen rögzíteni a vizsgálandó fán, ezért gondoltuk úgy, hogy érdemes megnézni, hogy kiváltható lehet-e ez a mérés egy könnyebben, egyszerűbben kivitelezhető méréssel.

A mért két, egymás mellett lévő lucfenyő gyökereit másfél méteres körben kerestük meg, az adatokat számítógépre vittük, és becslést végeztünk a gyökerek által elért területre (5.5.1. ábra). A területek segítségével bevezettünk egy nagyon egyszerű modellt a biztonsági faktor számolására.

$$SF_{\text{kifordulás}} = M_{\text{talaj}} / M_{\text{szél}} \quad (4.3.1.1.)$$

ahol  $M_{\text{talaj}}$  [Nm] a kiforduláshoz szükséges forgatónyomaték,  $M_{\text{szél}}$  [Nm] pedig a szélterhelés.

$$M_{\text{talaj}} = c_{\text{talaj}} A_{\text{tányér}} h_{\text{gyökér}} \quad (4.3.1.2.)$$

ahol  $c_{\text{talaj}}$  [N/m<sup>2</sup>] a talaj nyírószilárdsága,  $A_{\text{tányér}}$  [m<sup>2</sup>] a gyökértányér területe,  $h_{\text{gyökér}}$  [m] pedig a gyökerek mélysége.

## 5. Eredmények és értelmezésük

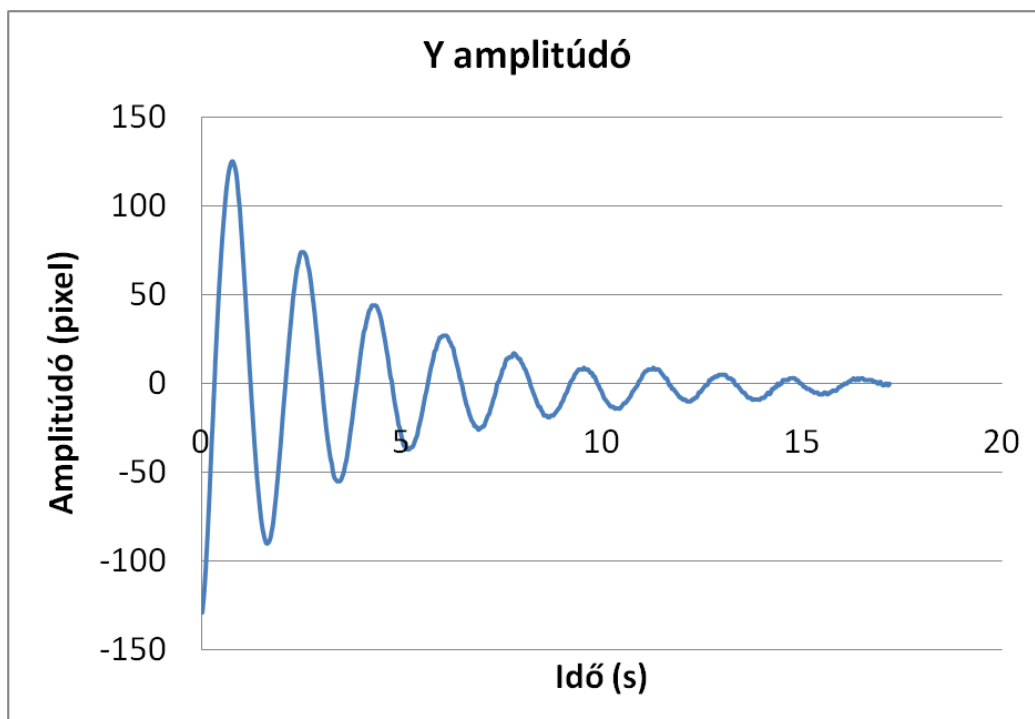
A korábbiakban leírt elméleti, gyakorlati, felhasználási és kiértékelési részek után bemutatom, hogy melyik eszközzel, mérési elrendezéssel, milyen eredményeket értünk el. Kezdem ezt a már bemutatott optikai rendszer tesztelésének leírásával, amit annak alkalmazása követ. A harmadik alfejezettől a húzóvizsgálat kiváltására szánt lehetőségeket mutatom be, majd a valós szélben történő mérés egy újabb lehetőségét, az ellenállás tényező meghatározását, legvégül pedig a gyökértérképezés szerény eredményei találhatóak.

### 5.1. Az ágak mozgását figyelő rendszer tesztelése, eredményei

A 4.1. fejezetben bemutatott optikai, az ágak figyelésére szánt rendszert természetesen számos helyzetben teszteltük, ellenőriztük. Ezeket foglalom össze.

Elsőként meglöktünk néhány ágat, és felvettük ezek mozgását. Egy ilyen lökés utáni helyzet látható az 5.1.1. ábrán. Elvégeztük az adatok kinyerését és az elemzést. Az így kapott sajátfrekvenciát összehasonlítottuk azzal a nagyon egyszerű méréssel, miszerint egy stopperrel lemértük 10 lengés idejét, és ebből is visszaszámoltuk a frekvenciát. A két adat kellően közel volt egymáshoz ahhoz, hogy megállapíthassuk, hogy a rendszer és a kiértékelés működőképes, valós adatokat ad vissza.

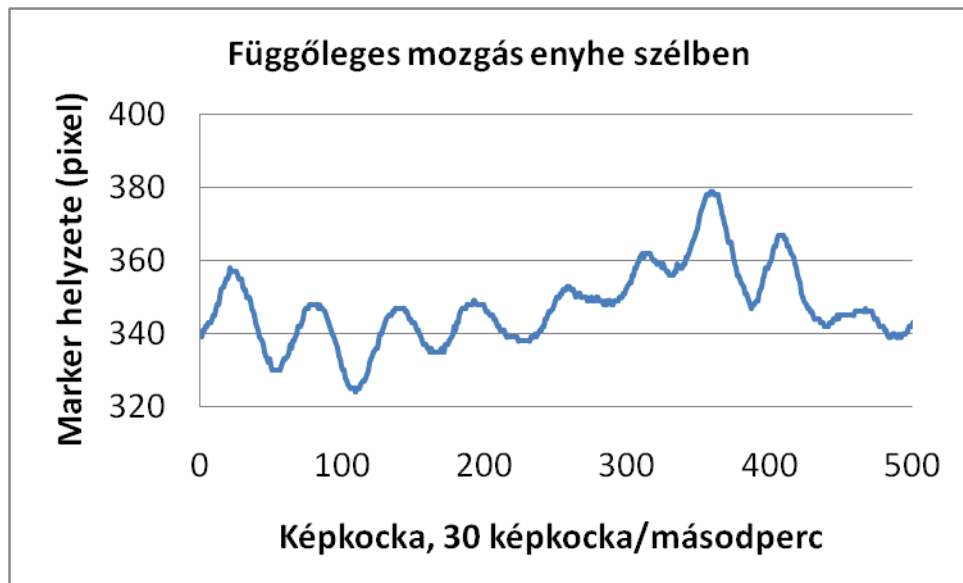
A konkrét mérési adatok a mellékletek I. fejezetében találhatóak. Mivel a mérési elrendezés használhatóságát, hasznosságát kívánja bemutatni a fejezet, ezért nem itt szerepelnek a részletes adatok.



5.1.1. ábra: Egy ág lökés utáni mozgása (a tranziens rész után)

A szél által létrehozott mozgás megfigyelése volt a következő lépés. Ezt gyenge szélben (10 km/h körül) végeztük. Rendelkeztünk ugyanerre az ágra a lökés utáni mérési

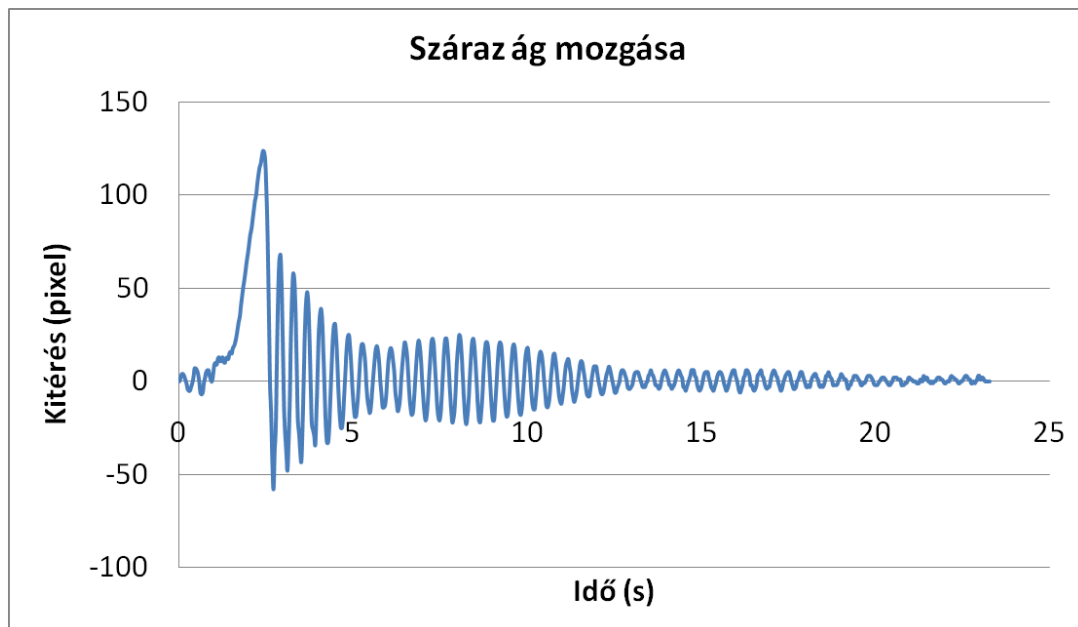
eredményekkel, így megállapíthatunk, hogy az ág gyenge szélben sajátfrekvenciájával mozog. A gyenge szélben történt mozgás látható az 5.1.2. ábrán.



5.1.2. ábra: Egy ág gyenge szélben végzett mozgása

Ezek után olyan méréseket végeztünk, ahol számíthattunk arra, hogy különbségeket találunk. Ezért megmértünk egy ágat, majd megfosztottuk a levélzettől és újra mértünk rajta. Ekkor azt tapasztaltuk, hogy egyrészt változik a mozgás sajátfrekvenciája (kb. 15%-ot), másrészt lebegés jelent meg.

Szintén lebegés megjelenését vehettük észre, amikor kiszáradt ágon mértünk. Ez látható az 5.1.3. ábrán. (Mivel az ág eredetileg is száraz volt, nem mi szárítottuk ki, így itt a sajátfrekvenciában nem láthattunk változást.)



5.1.3. ábra: Egy kiszáradt ág mozgása



Újra megállapíthatjuk, hogy a mérési elrendezés és a kiértékelés jól vizsgázott. Értelmes adatokat kaptunk, és a rendszer felbontása is elégségesnek bizonyult ahhoz, hogy az egymástól különböző esetekben különbségeket kapjunk.

Utoljára említést érdemel az is, hogy ezt a rendszert is kipróbáltuk törzsek mozgásának mérésére is. Ez azonban nem volt sikeres, mert még egy-egy kisebb fát is csak annyira tudtunk mozgásba hozni, hogy az egyetlen kitérés, vagyis rögtön a lökés/húzás után visszaálljon eredeti helyére.

## 5.2. Az ágak biztonságosságának vizsgálatai

Alapvetően azért készítettük el az előző fejezetekben részletesen bemutatott mérési elrendezést, hogy egy fa ágainak biztonságosságáról is tehessünk megállapításokat. A tesztelés befejezése után nekiláttunk a biztonságosságra fókuszáló méréseknek.

Az ág gyengülését, sérülését fűrészeléssel „szimuláltuk”. Amihez egyszerű kézi fűrészeket használtunk. Méréseinket szélcsendes időben végeztük.

A mérés menete a következő volt:

1. Beállítottuk a kamerákat, elhelyeztük a markert az ágra
2. Vágás előtt „meglöktük” az ágot, felvételt készítettünk
3. Bevágtuk az ágot, lehetőség szerint néhány mm mélyen
4. Újra „meglöktük” az ágot, és felvételt készítettünk.

5. A vágás mélyítését és az újabb és újabb felvételek készítését folytattuk egészen addig, amíg az ág a) letört b) lefeküdt a talajra és már nem volt mozgásba hozható.

6. A mérési eredmények feldolgozása

A bevágásnál és a mélyítésnél folyamatosan figyeltünk arra, hogy a vágás elég széles legyen, mozgás közben ne érjenek össze a szélei. Egy ilyen bevágás látható az 5.2.1. ábrán.

Általában 4-5 mérést tudtunk végezni egy-egy ágon.

A fejezet célja a trendek bemutatása, az egyes konkrét mérési adatok a mellékletek I. fejezetében találhatóak.



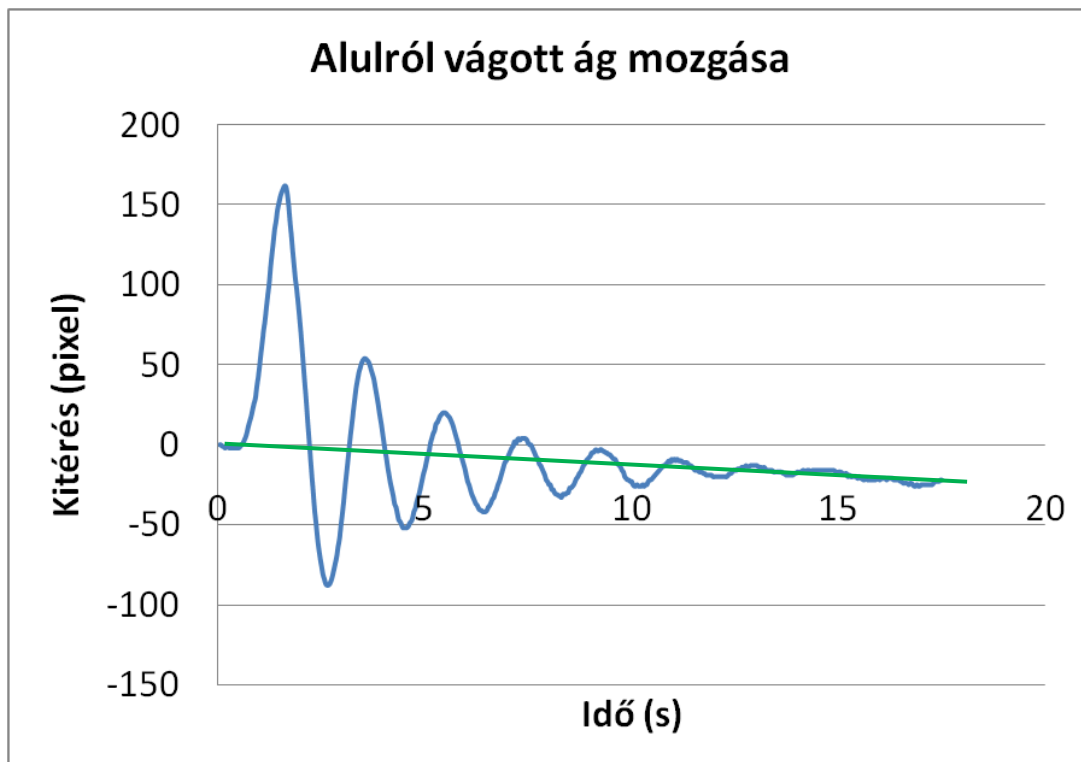
5.2.1. ábra: Ág alulról vágva



### 5.2.1. Ágak vágása, alulról és felülről

Méréseinket az ágak alulról való vágásával kezdtük. Ekkor azt tapasztaltuk, hogy a mozgás sajátfrekvenciája minimálisan, gyakorlatilag mérési hibán belül változik csak. A sajátfrekvencia változása 5% körüli volt.

Tapasztaltuk viszont a mozgás alapvonalának (zöld vonal az 5.2.1.1. ábrán) lefele „kúszását”, vagyis, hogy mozgását az ág nem egy adott középpont körül végzi, hanem az folyamatosan lejjebb kerül, ezt mutatja az 5.2.1.1. ábra.



5.2.1.1. ábra: Egy alulról vágott ág mozgása (kék) és az alapvonal süllyedése (zöld)

Az ágak felülről való vágásánál tapasztaltuk, várakozásainak megfelelően, a sajátfrekvencia „látványos” változást. Az egyes ágakra ez 18-25 % volt. Az alapvonal lefele „kúszását” ebben az esetben nem tapasztaltuk.

A felülről és alulról való vágások közti különbségre valószínűleg az ágban jelenlévő reakciófa jelenti a magyarázatot. Teherbírás, faanyag minőség szerint különbség van a húzott (felső) és a nyomott (alsó) rész között. Ezt ellenőriztük a következő fejezetben olvasható mérések során.

Fontos megjegyeznünk, hogy ugyan az ág alsó része fontosabb a tartás szempontjából, a felülről vágás, a felső részen lévő sérülés, hiba is nagyon veszélyes. Alulról vágásnál ha csak a sajátfrekvenciát vizsgálnánk, akkor az ág „észrevétlenül” érne el azt a pontot, ahol már leszakad.

### 5.2.2. Ellenőrző mérések

A reakciófa megjelenésének vizsgálatára ellenőrző méréseket végeztünk. Mértük a hangsebességet vágás közben, végeztünk befűrészelést homogénnek tekinthető (nem ág részből készült) fa boton, valamint két ultrahangos ellenőrzést is végeztünk.

A hangsebesség mérése a 3.9.1. fejezetben leírt szálirányú hangsebesség mérés volt. Ezt elvégeztük egy bevágás előtt, és közben folyamatosan is. Így ellenőriztük – ami valószínű volt – hogy a faanyag nem változik (mérhető mértékben) a bevágás alatt (például nem távozik nedvesség ennyire gyorsan), vagyis hogy nem maga a bevágás okozza a mérhető különbségeket.

Homogénnek tekinthető, fából készült rúdon is elvégeztük a bevágásos kísérletet. A rudat egyik végén rögzítettük, befogtuk, a másik vége szabadon maradt. A bevágás sorozat alatt a rúd sajátfrekvenciája – az elvárásoknak megfelelően – folyamatosan csökkent. (Ahogy az az 5.3.2.1. ábrán is megfigyelhető.)

A fentiekén kívül végeztünk néhány ultrahangos mérést is az ág faanyaga különbségeinek felderítésére. Ezt kétféleképpen tettük.

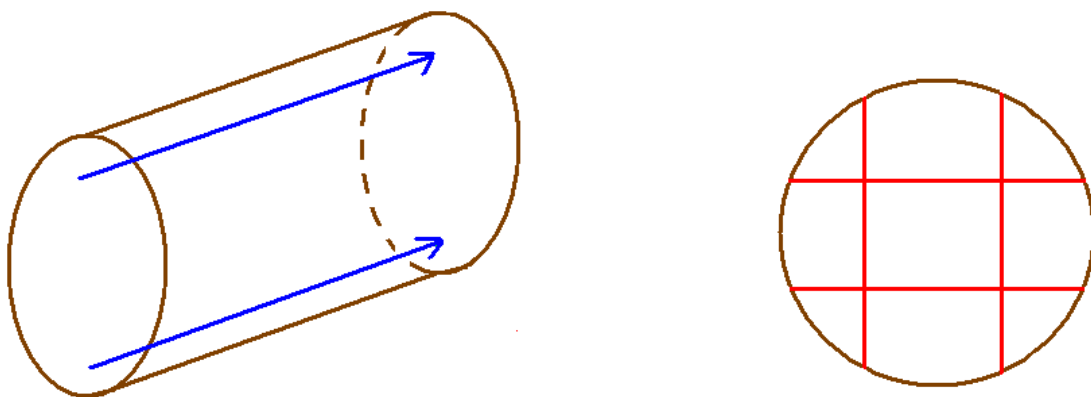
Mindkét esetben fogtuk a vizsgált, levágott ágat és kivágtunk belőle, az ág eredéséhez minél közelebről egy 10-60 cm-es ép, a vágás és a letörés által már nem befolyásolt darabot. Ezen jelöltük az alsó és felső részeket.

Az ultrahangos mérésekhez egy Ultrasonic Timer műszert használtunk, mely az ultrahang áthaladási idejét méri  $\mu$ s-ban. Ebből a darab hosszának ismeretében kiszámoltuk a sebességeket.

Az első esetben fogtuk a levágott ágdarabot, és annak felső, illetve alsó részén mértünk. Az idő adatok egyértelmű eltérést mutatnak, az alsó részen nagyobb értékeket kaptunk vissza.

Második ellenőrző mérésünk során az ágdarabot további darabokra osztottuk, ahogy azt az 5.2.2.1. ábra mutatja.

Az alsó és felső területek közötti különbséget minden esetben megtaláltuk, ami 3-15% közé esett.



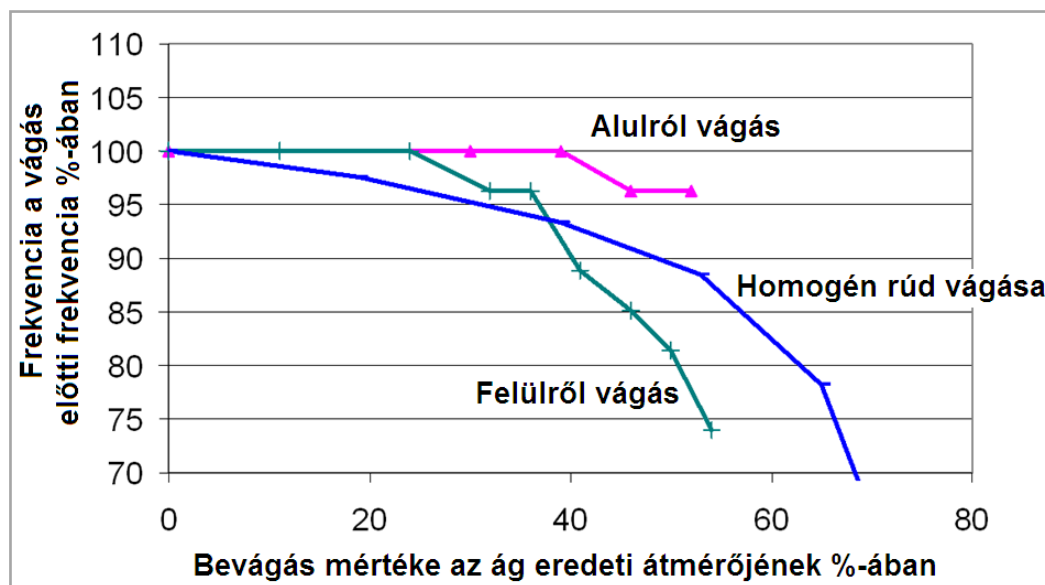
5.2.2.1. ábra: Ultrahangos mérés az ágdarab alsó és felső részein (balra) és az ág darabokra fűrészelésének vonalai

### 5.2.3. Az ágakon való mérések eredményeinek összegzése

Összegzésként elmondható, hogy az ágak alulról és fölülről való vágása, ami az ott jelen lévő sérüléseket, korhadásokat próbálja szimulálni, különböző eredményeket ad, a jelenség valószínűleg a reakciófa helyzetével magyarázható. A vágás mindkét esetben tetten érhető az ágak mozgásának megváltozásában.

Az alulról vágott ágaknál a mozgás alapvonalának lefele „kúszását” vehetjük észre, míg a felülről való vágásnál a sajátfrekvencia is jelentősen változik.

Az 5.2.3.1. ábra egy-egy tipikus felülről és alulról vágás eseteiben, valamint a homogénnek tekintett rúd vágásakor mérhető sajátfrekvenciákat mutatja.



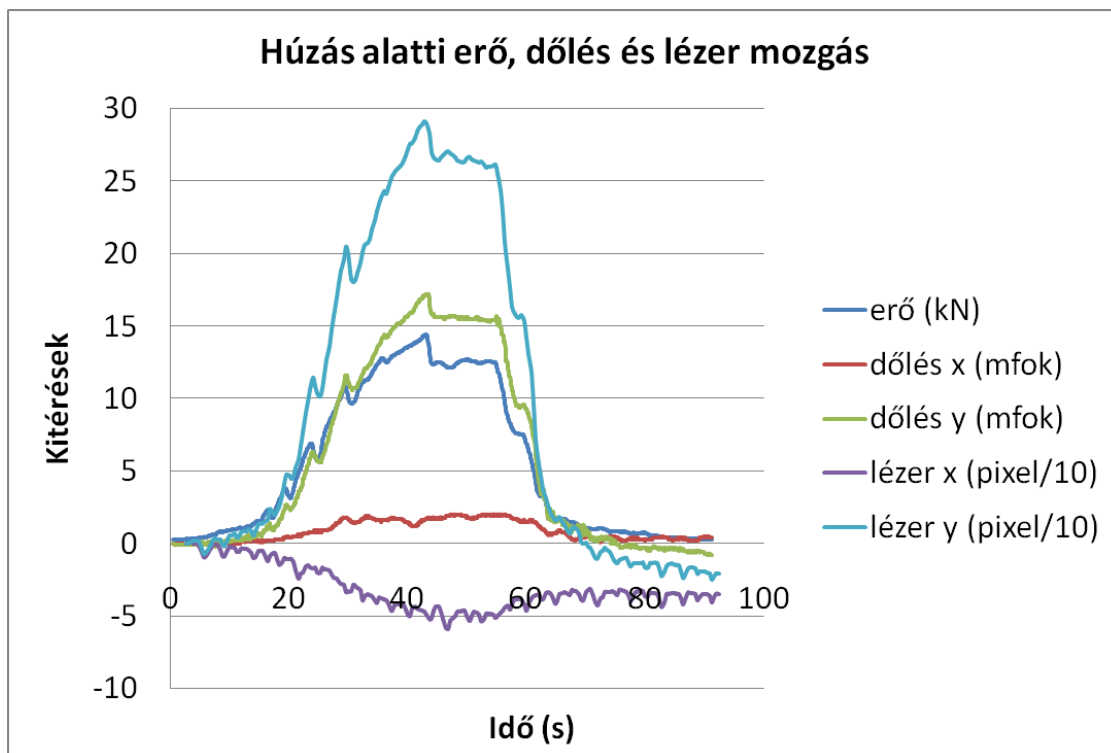
5.2.3.1. ábra: Három tipikus sajátfrekvencia görbe; rózsaszín – ág alulról vágva; kék – homogén rúd; zöld – felülről vágott ág

### 5.3. Húzóvizsgálat és lézer mozgása

A dőlésmérési húzóvizsgálat kiválthatóságának vizsgálatához meg kellett néznünk, hogy a lézer mozgása képes-e a dőlésmérőéhez hasonló, azzal megfeleltethető, annak helyettesítésére is használható adatsort adni.

Ezért úgy végeztünk dőlésmérési húzóvizsgálatokat, hogy közben a lézert is a vizsgált fa törzséhez rögzítettük. A sodronykötéllal meghúztuk a fát, miközben a PullingTest programmal a dőlés és erő adatokat (az  $F_{max}$  megkereséséhez szükséges szűrést kikapcsoltuk), a FaMoc programmal pedig a „lézerpötty” mozgását mértük és mentettük.

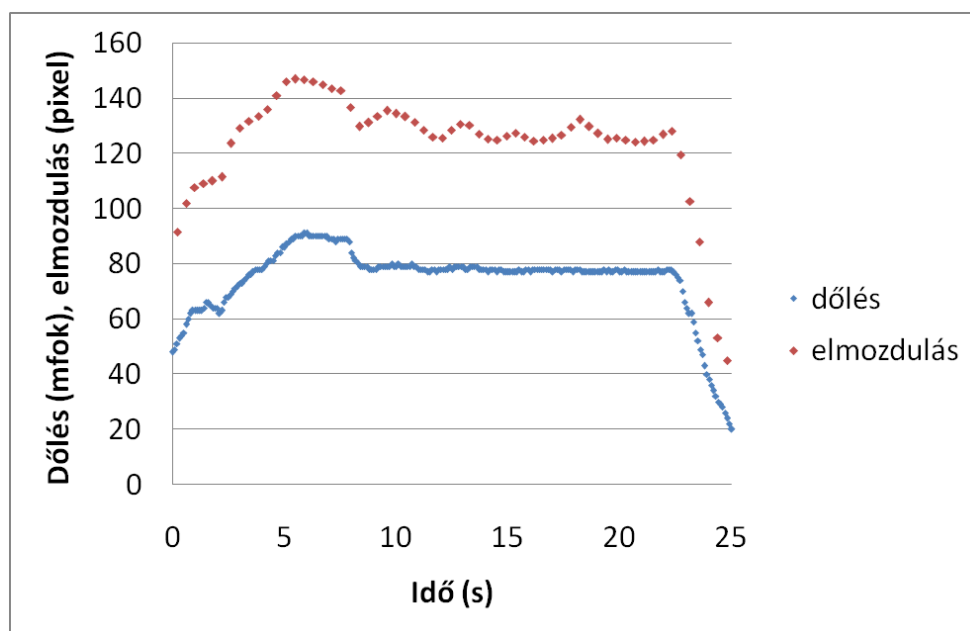
A programok által készített fájlokat Microsoft Excelben tudtuk egyesíteni, ahol az időillesztés is megtörtént. Az adatokat az ábrázolhatóság érdekében nagyságrendileg is „illesztettük” (a megfelelő  $10^n$  hatványos szorzók használatával). Ezután grafikusán ábrázoltuk az adatsorokat az idő függvényében. Egy ilyen grafikon látható az 5.3.1. ábrán. A húzás a dőlésmérő „y” irányában történt, a lézer mozgásai közül is az „y” mutatja a húzást, míg az „x” irányú mérések az ezekre merőleges irányú elmozdulás értékei.



5.3.1. ábra: Grafion a dőlésmérés adataival és a lézer mozgásával; a nagyságrendi igazítás miatt a függőleges tengely mértékegységei a jobb oldali kiírás szerint értelmezendők

A mérés során megállapíthatjuk, hogy a lézer mozgásának követése az általunk létrehozott mérési összeállításban megfeleltethető a dőlésmérő adatainak. A dőlésmérő időbeli felbontása 10 Hz, míg a lézer mozgását 5 adat/2 másodperccel mértük (mert ez felel meg a szélmérő által küldött jeleknek, a FaMoc program ezzel az időfelbontással dolgozik).

Igaz, hogy az időbeli felbontása a dőlésmérőnek jobb, de a mozgás finomságait még így is a lézer mozgása adja jobban vissza. (5.3.2. ábra) Ezért gondoltuk, hogy valós, de nem viharos szélben a lézeres követés képes lehet kiváltani a dőlésmérőt.



5.3.2. ábra: A dőlésmérő és a lézer mozgásának adatai kinagyítva

Megpróbáltuk a gyengébb szél által a tőben létrehozott mozgásokat a dőlésmérővel követni, nem jártunk sikerrel. Ugyanezt megtettük a „lézerpötty” követésével is, ami sikeresnek is bizonyult.

#### 5.4. A szél mérés eredményei, ellenállás tényező meghatározása

A húzóvizsgálat gyengéje, hogy a szélterhelést, ami tipikusan szélleköésekben érkezik, dinamikus jellegű, statikus, állandó erővel történő húzással szimulálja. A húzóvizsgálat értelemszerűen csak szélcsendes időben végezhető, a szükséges felszerelés (hevederek, sodronykötél, általában létra a kötél megfelelő magasságú rögzítéséhez, stb.) súlyosak és térfogati igényeik is nagyok lehetnek.

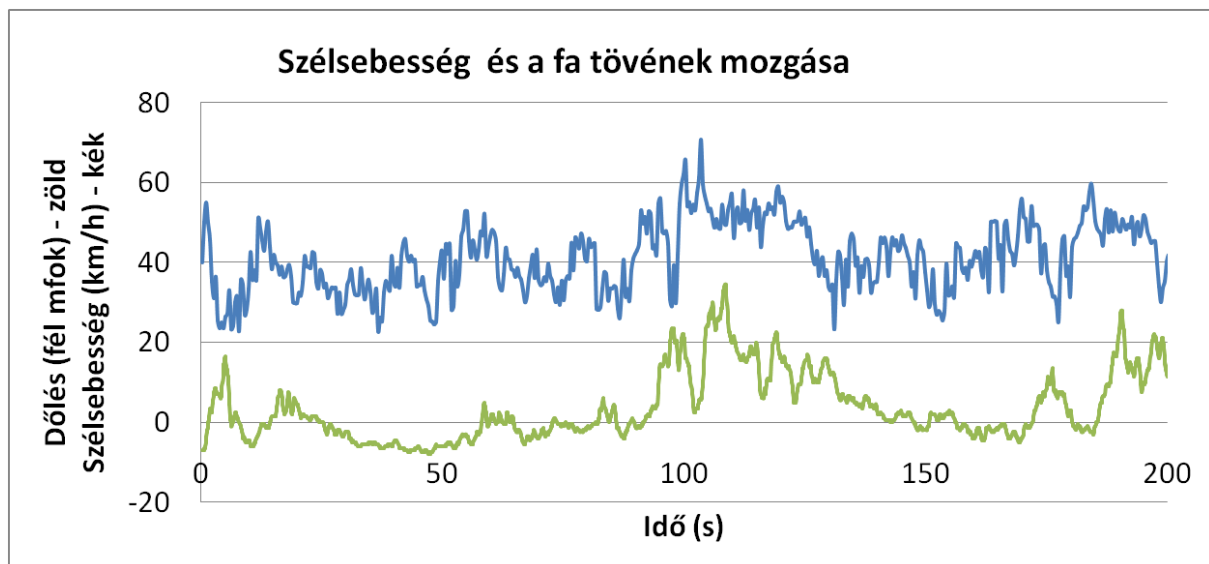
A 4.2.2. fejezetben bemutatott szélmérő ehhez képest még a toronnyal együtt is jóval könnyebb és kisebb helyen fér el.

A fák mérése során a számunkra elérhető maximális, 10 méteres magasságban mértük a szélesebességet.

Első méréseink során a Nyugat-magyarországi Egyetem botanikus kertjében mértünk két, kb. 20 méter magas lucfenyőn, melyek a kert állományának részei. A mérés ugyan sikeres volt, a szélesebesség és a tő elmozdulása között azonban nem tudtunk korrelációt megállapítani. Vagyis az állományban álló fák tövének mozgása és a tőlük kb. 20 méterre, 10 méter magasban mért szélesebesség között nem találtunk összefüggést.

Méréseinket Sopron egy parkjában folytattuk, egy 12 méter magas, kellően egyedül álló gesztenyefán. („Kellően egyedül álló” – a helyszínen fújó főszélirányban nem volt más fa környezetében, míg a főszélirányra merőlegesen néhány méterre voltak fák.)

Erre a fára sikerült megállapítani a főszélirányból fújó szél sebessége és a tő elmozdulásának összefüggését. Egy ilyen mérés látható az 5.4.1. ábrán.



5.4.1. ábra: Szélesebesség adatok és a fa tövének mozgása (a fa tövének mozgása néhány másodperc eltolással követi csak a szelet)

A vizsgált fán dőlésméréses húzóvizsgálatot is végeztünk, amely során gyűjtött adatok segítségével határoztuk meg az ellenállás tényezőt.

Ehhez először is időillesztettük az adatokat, hiszen a fa tövének elmozdulása néhány másodperccel később következett be, mint ahogy a széllelkést mérhettük. Másodszor magasság-igazítottuk a 10 méteren mért szélsébséget a fa koronaközép magasságához (6,5 méter). Majd az egyes széllelkések által létrehozott dölésekhez kikerestük a húzóvizsgálat értékeire illesztett görbéből (lásd 3.5. fejezet) az adott dölésekhez tartozó erőket, amikből kiszámoltuk a forgatónyomatékokat, melyeket a kötél hozott létre a húzás során. A forgatónyomatékok ismeretében azokból a szélterhelésre vonatkozó képlettel (2.4.2. képlet;  $M_{szél} = F_{szél} h_{koronaközép}$ ) meghatároztuk a szél által keltett erőket.

Ebből a 2.4.2. képlet átrendezésével kapott 5.4.1. képlet segítségével számoltuk az ellenállás tényezőt.

$$F_{szél} = (\rho/2) v^2 A C \quad (2.4.3.)$$

Innen kapjuk

$$C = (2 F_{szél}) / (\rho v^2 A) \quad (5.4.1.)$$

ahol  $F_{szél}$  [N] a szél által létrehozott erő,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] a levegő sűrűsége,  $v$  [m/s] a szél sebessége,  $A$  [m<sup>2</sup>] a korona és a törzs adott iránybeli felülete,  $C$  a fafajfüggő ellenállás tényező.

A mérést egy vadgesztenyefán (*Aesculus hippocastanum*) végeztük.

Az általunk kapott ellenállás tényező  $0,302 \pm 0,049$ .

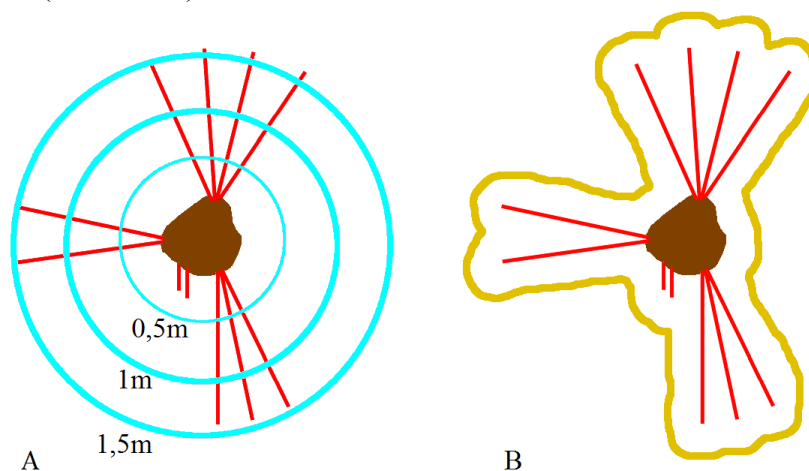
Az irodalomból ismert adat 0,35. (Wessolly 1998)

Összességében elmondható, hogy kellően egyedül álló fa tövének mozgása és az őt erő szél közötti összefüggés mérhető az általunk létrehozott mérési elrendezéssel. Valamint sikerrel jártunk egy fa ellenállás tényezőjének meghatározásában is. (Bár a szórás csökkentése további mérések feladata.)

Az ellenállás tényező meghatározásával kapcsolatban fontos kiemelni, hogy míg a jelenleg elfogadott és használt értékek állandó szélsébség jelenlétében kerültek mérésre, addig nekünk a „széllelkésekkel szembeni” ellenállás tényezőt sikerült meghatározunk. Ugyan csak egyetlen fára végezhetjük el ezt a mérést és számolást, maga a mérési elrendezés mindenképpen előre mutató, s a mérés kibővítése későbbi kutatás tárgya lehet.

## 5.5 A gyökértérképezés eredményei

A megtalált gyökerekből térképet készítettünk és megbecsültük a gyökerek által elért terület nagyságát. (5.5.1. ábra)



5.5.1. ábra: Gyökértérképezés eredménye és a gyökerek által lefedett terület becslése

Biztonsági faktort számoltunk, mind a gyökértérképezésből, mind pedig egy, ugyanezen a két fán végzett húzóvizsgálat sorozatból. Az 5.5.1. táblázat foglalja össze az eredményeket.

	$SF_h$	$SF_{gy}$	$SF_h / SF_{gy}$
<b>1. fa</b>	5,07	1,94	2,61
<b>2. fa</b>	3,02	1,27	2,38
<b>1. fa / 2. fa</b>	1,68	1,53	

5.5.1. táblázat: Két fa húzóvizsgálattal ( $SF_h$ ) és gyökértérképezéssel ( $SF_{gy}$ ) becsült biztonsági faktorai, és ezek arányai

Az eredményekből látható, hogy a gyökértérképezés és az általunk használt becslés a húzóvizsgálathoz képest igencsak alulbecsüli a biztonságot. Amiért mégis említésre méltó az eredmény, az a két fa becsült biztonságainak aránya, mely azt sugallja, hogy ugyan a gyökértérképezés jelenleg még nem adja vissza a valós biztonsági faktorokat, de azokkal arányos értékeket ad. A gyökérzet felülete arányosnak tűnik a fa biztonságosságával.

Az eltérés oka pontosan nem ismert. Elképzelhető, hogy a módszerrel nem detektálható kisebb gyökerek okozzák azt. Ezek nem vehetőek figyelembe a számításnál, azonban az eddigi eredmények alapján úgy tűnik, hogy ez arányos a detektálható gyökerekből számított felülettel. Ez alapján bevezethető lehet egy korrekciós tényező, amivel a gyökérből számított tényezőt megszorozva becsülhető a valós biztonsági faktor. Természetesen két fából erre nézve nem lehet megbízható következtetéseket levonni, de jövőbeni vizsgálatok erre választ adhatnak, ahogy a mérés különböző fafajokon történő megismétlése is fontos feladat, hogy a végén egy könnyen felhasználható eszközt kapjunk.



## 6. Összefoglalás

A doktori munka során elértük a célkitűzésekben megfogalmazott fő célokat.

Létrehoztunk és sikeresen teszteltünk egy, az ágak megfigyelésére alkalmas optikai mérési elrendezést. A tesztelés során bebizonyosodott, hogy az ágak mozgása jól követhető, a mozgás kiértékelhető.

Az ágak biztonságosságának kutatását elkezdtük. Fűrészeléssel sérülést szimuláltunk az ágakon. A mért eredmények kimutatták, hogy az ág alsó és felső részének faanyaga különböző. Ezt ultrahangos mérésekkel hasonlítottuk össze, s egyező eredményt kaptunk.

Homogénnek tekinthető rúdon is végeztünk ellenőrző mérést, melynek eredményei szintén azt erősítették meg, hogy a rúddal ellentétben az ág alsó és felső részei különböznek egymástól.

Egy ág sérülése annak elhelyezkedése szerint másfajta különbségeket hoz létre a nem sérült ágak mozgásához képest.

Az alulról vágott ágak esetében a sajátfrekvencia alig változik, míg a mozgás alapvonalának süllyedése figyelhető meg. A felülről vágott ágak esetében az alapvonal megváltozását nem figyeltük meg, ellenben a sajátfrekvencia csökkent.

A vágás hatását az ágra akusztikus méréssel is követtük, amiből az derült ki, hogy az ágakban nem történik olyan gyors reakció, ami kiválthatná annak mozgásában mért változásokat.

A dőlésmérési húzóvizsgálat kiváltására tett próbálkozásaink során megállapíthattuk, hogy a dőlésmérő (mely egy buborék helyzetváltozása miatt bekövetkező kapacitás változásának segítségével mér, ezért reagálása nem lehet tetszőlegesen gyors) helyettesíthető egy lézer mozgásának megfigyelésével, sőt, a lézeres mérés során finomabb mozgások is észlelhetőek.

A húzóvizsgálat szélterhelést szimuláló köteles húzás kiváltására alkalmas lehet magának a szélnek a megfigyelése. Itt fontos, hogy a szélmérés másodperc alatti időfelbontásban történjen (a klasszikus kanalas szélmérő eszközök ennél lassabbak), hogy az egyes széllehelések megkülönböztethetőek legyenek.

Állományban álló fák esetében nem találtunk összefüggést a szélesebb és a fák tövének mozgása között, míg a szél főirányából nem takart, viszonylag egyedül álló esetben megállapíthattuk, hogy a fa tövének mozgása, némi időeltolással követi a szél változásait, a szélleheléseket.

A különálló fára (mely egy vadgesztenyefa, *Aesculus hippocastanum*) a fa széllal szembeni ellenállás tényezőjét is megállapítottuk, a szél, az általa a töben kiváltott mozgások és egy viszonyítási alapként elvégzett dőlésmérési húzóvizsgálat segítségével. A mért ellenállás tényező az irodalmi adat közelében van. Fontos megjegyeznünk, hogy míg a jelenleg elfogadott és használt értékek állandó szélesebb jelenlétében kerültek mérésre, addig nekünk a „széllehelésekkel szembeni” ellenállás tényezőt sikerült meghatározni, így teljes egyezésre nem is számítottunk.

Az ellenállás tényező ilyen ismeretében elvileg a dőlésmérési húzóvizsgálat kiváltható egy, szélben történő méréssel.

A húzóvizsgálat gyökértérképezéssel történő kiváltásra tett próbálkozásaink szerény, de említésre méltó eredményekkel jártak.

## 7. Az új tudományos eredmények összefoglalása

1. A fák ágainak mozgása megfigyelhető, mérhető a dolgozatban bemutatott optikai rendszer segítségével. Az adatok kiértékelése során megkapott mozgás-idő grafikon és a mozgás sajátfrekvenciája (melyet Fourier-analízissel kaptunk meg a mozgás időfüggvénye alapján) jól jellemzik az ágakat.

A tesztelés során megállapításra került, hogy az ágak lökés hatására kialakult és enyhe szélben való mozgásuk frekvenciája azonos.

2. Megállapításra került, hogy egy ág sérülésének hatása az ág mozgására eltérő annak függvényében, hogy az ág alsó vagy felső felét érinti a sérülés.

Fűrészeléssel ágak különböző mértékű sérüléseit szimuláltuk. Az ekkor megfigyelhető mozgásnak alulról vágás esetében alig változik meg a sajátfrekvenciája, míg a mozgás alapvonalának süllyedése figyelhető meg. Felülről vágás esetében az ág mozgásának sajátfrekvenciája változott.

A különbségek értelmezésére ellenőrző mérések kerültek elvégzésre, melyek során megerősítést nyert, hogy a fa anyaga más az ág felső, illetve alsó részében.

3. A dőlésméréses húzóvizsgálat során használt dőlésmérő kiváltható egy lézer mozgásának figyelésével.

Ha egy megfelelő teljesítményű lézert rögzítünk a fa tővére (ugyanúgy, hogy azt a dőlésmérővel is tennénk), akkor a lézer útjába helyezett ernyőn felfogható „lézerpötty” mozgásából a dőlésmérő által gyűjtött adatoknak megfelelő adat számolható. Mivel a dőlésmérőben a mérés egy buborék helyzetváltozása miatt bekövetkező kapacitás változásának segítségével történik, ezért „tehetetlenebb”, mint a lézer mozgása. Vagyis a lézer mozgásának követésével finomabb elmozdulás is megfigyelhető.

4. A 10 méteres magasságban mért szélesebbesség és a fa tővének mozgása között akkor állapítható meg az összefüggés, ha a fa egyedül állónak tekinthető. Abban az esetben, mikor a fák állományban álltak, nem találtunk összefüggést a szélesebbesség és a tő dőlése között. Egy-egy szellőkés hatása az állományban álló fák mozgásában nem jelent meg a méréseink során. A szél irányából nem takart, szellősebben álló fa tővének mozgása követte a szél lökéseit.

5. Szellőkéseket is detektálni képes szélmérő és viszonyítási alapként elvégzett húzóvizsgálat segítségével meghatározható egy fa fajra jellemző széllal szembeni ellenállás tényezője. Ezt a mérést, számolást egy vadgesztenyefán (*Aesculus hippocastanum*) végeztük.

6. A gyökértérképezés segítségével becsülhető, a fa kifordulására vonatkozó biztonsági faktorok alacsonyabbak, mint a húzóvizsgálat során számoltak. A biztonsági faktorok arányai azonban közel állnak egymáshoz, a fa, vastagabb, akusztikus gyökértérképezés során megtalálható gyökérszete által lefedett terület és a biztonságosság között nagy valószínűséggel összefüggés állapítható meg.

## 8. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani azoknak, aki segítettek a doktori munka és a dolgozat elkészítésében.

Köszönöm Divós Tanár Úrnak, hogy lehetőséget adott arra, hogy doktorandusz lehessen, irányításával segítette a tanulmányaim és kutatásom végzését. Valamint azt, hogy részesévé válhattam a roncsolásmentes faanyagtudományt kutatók családjának, többek között a 17. Nemzetközi Roncsolásmentes Faanyagvizsgálati Konferencia szervezésének kapcsán.

Köszönöm szüleimnek a végig pozitív hozzáállásukat, szellemi és anyagi támogatásukat.

A lehetőséggel élve megköszönöm Göncz Balázsnak és Sismándy-Kiss Ferencnek, hogy mint doktorandusz társak bármivel fordulhattam hozzájuk segítségért, információért.

Az egyetemi ügyes-bajos dolgokban Hontiné Marika, Honti Bea és Nagyné Tolvaj Vera igazított el, néha kacifántos utakon is, csak jót kívánhatok nekik.

Schmuck Ádám ellenérték nélkül, hobbiból írta meg azt a két programot, melyek adatgyűjtése nélkül doktori munkám nem készülhetett volna el. Hálával gondolok rá.

Végül szeretném megköszönni a segítséget azoknak a doktoranduszoknak, hallgatóknak, oktatóknak, egyetemi dolgozóknak és munkatársaimnak, akik hozzájárultak a feladataim sikeres elvégzéséhez.

KÖSZÖNÖM.

## 9. Irodalomjegyzék

- 1 Achima A., Nicoll B.C.: Modelling the anchorage of shallow-rooted trees. *Forestry* 82,3: 273-284. 2009.
- 2 Allison R. B., Wang X., Ross R. J.: Visual and Nondestructive Evaluation of Red Pines Supporting a Ropes Course in the USFS Nesbit Lake Camp, Sidnaw, Michigan. *Proceedings of the 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood* (szerk.: Ross R. J., Wang X., Brashaw B. K.). 43-48. old., Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA, 2007.
- 3 Allison R. B.: Acoustic tomography and microdrill resistance density measurements compared to x-ray CT scan on white birch (*Betula papyri/era*). *Proceedings of the 17th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood* (szerk.: Divós Ferenc). 191-197. old., University of West Hungary, Sopron, 2011.
- 4 Al-Sulaiman F. A., Hawwa M. A.: Nondestructive Diagnosis of Date Palm Trees. *Proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood* (szerk.: Bröker Friedrich-Wilhelm.). 171-179. old., Shaker Verlag, Germany, 2005.
- 5 Amato M., Basso B., Celano G., Bitella G., Morelli G., Rossi R.: In situ detection of tree root distribution and biomass by multi electrode resistivity imaging. *Tree Physiology* 28: 1441-1448. old., 2008.
- 6 An Y., Yin Y., Jiang X.: Inspection of decay distribution in wood column by stress wave and resistograph techniques. *Journal of Building Materials*, 11 (4):457-463. 2008.
- 7 Benson-Cooper, D. M., Knowles R. L., Thompson F. J., Cown D. J.: Computed tomographic scanning for the detection of defects within logs. *Bull. No.8. Forest Res. Inst., New Zealand Forest Serv., Rotorua, New Zeland* 9 1982.
- 8 Bethge K., Mattheck C.: Instruments for detection and evaluation of decay and wood quality in standing trees. *Proceedings of the 11th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood* (szerk.: Pollock David G.). 105-115. old., Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA, 1999.
- 9 Bronstejn I. N., Szemengyajev K. A.: *Matematikai zsebkönyv*, Műszaki Kiadó, Budapest, 1980.
- 10 Bucur Voichita: *Acoustics of Wood*. CRC Press, 1995.
- 11 Bucur Voichita: *Nondestructive Characterization and Imaging of Wood*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003.
- 12 Bucur, V.: Ultrasonic techniques for nondestructive testing of standing trees. *Ultrasonics* 43: 237-239. 2005.
- 13 Budó Ágoston: *Kísérleti Fizika 1*, Tankönyvkiadó, Budapest 1968.

- 14 Budó Ágoston: *Mechanika*, Tankönyvkiadó, Budapest 1972.
- 15 Burcham C. D., Ghosh S., Choon L. E., King F. Y.: Evaluation of an Infrared Camera Technique for Detecting Mechanically Induced Internal Voids in *Syzygium grande*. *Arboriculture & Urban Forestry* 37(3): 93-98. 2011.
- 16 Burgess, A. E.: Potential applications of medical imaging techniques to wood products. 1st International Conf. on Scanning Technology in Sawmilling. (szerk.: Szymani R.) Forest Industries, World Wood, San Francisco, CA. 1985.
- 17 Catena A.: Thermal infrared detection of cavities in trees: an update. *Atti Della "Fondazione Giorgio Ronchi"*. LVII. 761-775. 2002.
- 18 Cermak J., Hruska J., Martinkova M., Prax A.: Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques. *Plant and Soil* 219: 103–116. old., 2000.
- 19 Clark J. R., Matheny N. P.: Evaluation of Hazard Trees in Urban Areas. Int. Society of Arboriculture. USA. Savoy. Illinois. 1994.
- 20 Coder K. D.: Should you or shouldn't you fill tree hollows. *Grounds Maintenance*, 24(9): 68-70, 98-100. 1989.
- 21 Comino E., Martinis R., Nicolotti G.: Low current tomography for tree stability assessment, 278. International symposium on plant health in urban horticulture (szerk.: Backhaus G F, H Balder, and E Idczak), Braunschweig, Germany, 22-25, May, 2000.
- 22 Coutand C., Jeronimidis G., Chanson B., Loup C.: Comparison of mechanical properties of tension and opposite wood in *Populus*. *Wood Sci. Techn.* 38: 11-24. 2004.
- 23 Coutts M. P.: Root architecture and tree stability. *Plant and soil* 71: 171. 1983.
- 24 Cown D. J., Clement B. C.: A wood densitometer using direct scanning with X-rays. *Wood Sci. and Tech.* 17(2):91-99. 1983.
- 25 Damjanovics Sándor, Fidy Judit, Szöllösi János (szerkesztők): *Orvosi biofizika, Medicina Könyvkiadó Zrt., Budapest, 2007.*
- 26 Day W. R.: The parasitism of *Armillaria mellea* in relation to Conifers, *Quarterly Journal of Forestry*, 21: 9-21. 1927.
- 27 Deflorio, G., Fink S., Schwarze F.W.M. R.: Detection of incipient decay in tree stems with sonic tomography after wounding and fungal inoculation. *Wood Science and Technology* 42: 117-132. 2008.
- 28 Divós F., Bejó L., Tóth Á.: Instrument Supported Tree Evaluation in Hungary Proceedings of the 16th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Zhang Houjiand, Wang Xiping). 71-76. old., Beijing Forestry University, Beijing, Kína 2009.

- 29 Divós F., Divós P., Divós G.: Acoustic Techniques: From Seedling to Wood Structures. Proceedings of the 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Ross R. J., Wang X., Brashaw B. K.). 3-12. old., Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA, 2007.
- 30 Divós F., Szalai L.: Tree Evaluation by Acoustic Tomography. Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Beall Frank C.). 251-256. old., Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA, 2002.
- 31 Divós Ferenc (szerkesztő): Roncsolásmentes faanyagvizsgálat – Mérési útmutató, Soproni Egyetem, Sopron, 1999.
- 32 Divós Ferenc: Szakmai beszámoló Fák gyökérzetének akusztikus vizsgálata a stabilitás meghatározásához „Baross jelentés” Készült: a Nyugat-magyarországi Egyetem Faipari Mérnöki Kar Bódig József Roncsolásmentes Faanyagvizsgáló Laborban 2008.
- 33 Divos, F., Meszaros K.: Root decay detection by stress wave technique. Proceedings of the 1st European Symposium on Nondestructive Testing 524. Sopron, 1994.
- 34 Fahiba adattár: <http://fahiba.fmk.nyme.hu/> [2015. 05. 02.]
- 35 Fink G. D. S., Schwarze F. W. M. R.: Detection of incipient decay in tree stems with sonic tomography after wounding and fungal inoculation. Wood Sci Technol, 42: 117-132. 2008.
- 36 Garre S., Gunther T., Diels J., Vanderborcht J.: Sensitivity and resolution of ERT for soil moisture monitoring in contour hedgerow intercropping systems: a methodological analysis. Berichte Geol. B.-A., 93, ISSN 1017 8880 – International Workshop on Geoelectric Monitoring p. 221-227. old., 2011.
- 37 Glibert E. A., Smiley E. T.: Picus sonic tomography for the quantification of decay in white oak (*Quercus Alba*) and hickory (*Carya spp.*). Journal of Arboriculture, 30(5): 277-280. 2004.
- 38 Gocke L., Rust S., Weihs U., Gunther T., Rucker C.: Combining Sonic and Electrical Impedance Tomography for Nondestructive Testing of Trees. Proceedings of the 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Ross R. J., Wang X., Brashaw B. K.). 31-42. old., Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA, 2007.
- 39 Gombos Pál, Kisdi Dávid: Bevezetés az elméleti fizikába 1, Akadémiai Kiadó, Budapest 1971.
- 40 Goncalves R., Secco C. B., Cerri D., Batista F.: Behaviour of ultrasonic wave propagation in presence of holes on Pequia (*Aspidosperma desmanthum*) wood. Proceedings of the 17th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Divós Ferenc). 159-165. old., University of West Hungary, Sopron, 2011.
- 41 Guerrero C. C., Herbias A. E., Nunez D. J. A., Saiz de Gonzalez O. J.A.: Relevance of resistance drilling method and computerbased mapping in street tree management interventions in Madrid (Spain). Proceedings of the 17th International Symposium on

Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Divós Ferenc). 199-206. old., University of West Hungary, Sopron, 2011.

42 Guller B., Guller A., Kazaz G.: Is Resistograph An Appropriate Tool for the Annual Ring Measurement of *Pinus Brutia*? Czech Society for Nondestructive Testing NDE for Safety / DEFEKTOSKOPIE 89-94. 2012.

43 Guo L., Chen J., Cui X., Fan B., Lin H.: Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: a review. *Plant and Soil* 362: 1–23. old., 2013.

44 Gupta N. K., Schmoldt D. L., Isaacson B.: Tangential scanning of hardwood logs: developing an industrial computer tomography scanner. Proceedings of the 11th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Pollock David G.). 131-139. old., Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA, 1999.

45 Györgyi József: *Dinamika*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2003.

46 Habermehl, A., Ridder, H.: Applications of computed tomography in forest and tree sciences. International Symposium on Computer Tomography Indust. Applic., 71-81, Dt. Ges. Zerst.fr. Prof., Berlin. 1994.

47 Hagrey-al S.A.: Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity. *Journal of Experimental Botany* 58: 839–854. old., 2006.

48 Hruska J., Cermak J., Sustek S.: Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Tree Physiology* 19: 125-130. old., 1999.

49 Huang C. L., Lambeth C. C.: Methods For Determining Potential Characteristics Of A Specimen Based On Stress Wave Velocity Measurements. United States Patent: US20060288784 A1. 2006.

50 James K. R., Kane B.: Precision digital instruments to measure dynamic wind loads on trees during storms. *Agricultural and Forest Meteorology* 148. 1055–1061. 2008.

51 James, K., R., Haritos, N., K. Ades P., K.: Mechanical stability of trees under dynamic loads. *American Journal of Botany* 93(10): 1522-1530. 2006.

52 James, K.: Dynamic Loading of Trees, *Journal of Arboriculture* 29(3): May 165-171, 2003.

53 Johnsson, L.: Experience from using x-ray tomography, isotope-bases nontomographic measuring and NMR for testing logs before sawing. Swedish Institute for Wood Technology Research. Stockholm, Sweden. Memeograph. 1985.

54 Kappel R., Mattheck C.: Distribution of drilling resistance and strength properties at the base of trees. Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.:Divós Ferenc). 207-213. old., University of Western Hungary, Sopron, 2000.

55 Karlinasari L., Mariyanti I. L., Nandika D.: Ultrasonic wave propagation characteristic of standing tree in urban area. Proceedings of the 17th International Symposium on



Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Divós Ferenc). 151-157. old., University of West Hungary, Sopron, 2011.

56 Kim K-M., Park J-S., Lee S-J., Yeo H., Lee J.-J.: Development of a Portable Ultrasonic Computed Tomography System for Detecting Decay in Wood. Proceedings of the 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Ross R. J., Wang X., Brashaw B. K.). 191-195. old., Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA, 2007.

57 Kuo F. E., Sullivan W. C.: Environment and Crime in the Inner City: Does Vegetation Reduce Crime? *Environment and Behavior* 33, 343-365. 2001.

58 Larsson B., Bengtsson B., Gustafsson M.: Nondestructive Detection of Decay in Living Trees. *Tree Physiology*. 24: 853-858. 2004.

59 Li L., Wang X., Wang L., Allison R. B.: Acoustic Tomography in Relation to 2D Ultrasonic Velocity and Hardness Mappings. Proceedings of the 16th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Zhang Houjiand, Wang Xiping). 28-35. old., Beijing Forestry University, Beijing, Kína 2009.

60 Liang S., Lin L., Hu N., Fu F.: Defect Diagnosis and Hazard Assessment of Historic Trees with Stress Wave Tomography Proceedings of the 16th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Zhang Houjiand, Wang Xiping). 20-26. old., Beijing Forestry University, Beijing, Kína 2009.

61 Liang S., Wang X., Wiedenbeck J., Cai Z., Fu F.: Evaluation of Acoustic Tomography for Tree Decay Detection. Proceedings of the 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Ross R. J., Wang X., Brashaw B. K.). 49-54. old., Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA, 2007.

62 Lin C. J., Chiu C. M., Wang S. Y.: Application of ultrasound in detecting wood decay in squirrel-damaged standing trees of Luan-ta China fir. *Taiwan Journal of Forest Science* 15: 267-279. 2000.

63 Lin C., Kao Y., Lin T., Tsai M., Wang S., Lin L., Wang Y., Chan M.: Application of an ultrasonic tomographic technique for detecting defects in standing trees. *International Biodeterioration & Biodegradation* 62(2008): 434-441. 2008.

64 Lundström T., Jonas T., Stöckli V., Ammann W.: Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, root-soil plate geometry and root growth orientation. *Tree Physiology* 27: 1217-1227. old., 2007.

65 Maróti Péter-Laczkó Gábor: Bevezetés a biofizikába, JATE Press, Szeged, 1998.

66 Martin T.: Complex Resistivity ( $\sim R$ ) of Wood and Standing Trees. Proceedings of the 16th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Zhang Houjiand, Wang Xiping). 10-15. old., Beijing Forestry University, Beijing, Kína 2009.

67 Mattheck, C. G., Bethge K. A.: Detection of decay in trees with the Metriguard Stresswave timer. In: *J. of Arboriculture*. 16(6):374-378. 1993.

- 68 Molnár Sándor (szerkesztő): Fahibák, fakárosítások, Hillebrand Nyomda Kft., Sopron, 2006.
- 69 Moore E. O.: A Prison Environment's Effect on Health Care Service Demands. *Journal of Environmental Systems* Volume: 11. 17-34. 1982.
- 70 Morelli G.F., Zenone T., Teobaldelli M., Fischanger F., Matteucci M., Seufert G.: Use of ground-penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT) to study tree roots volume in pine forest and poplar plantation. In: *Proceedings of the 5th International Workshop on Functional-Structural Plant Models* p. 21-1 21-4. 2007.
- 71 Muller M., Burghammer M., Sugiyama J.: Direct investigation of the structural properties of tension wood cellulose microfibrils using microbeam X-ray fibre diffraction. *Holzforschung*. 60: 474-479. 2006.
- 72 Najafi S. K., Bolandbakht F., Najaji A.: Detection of Internal Decay in Standing Beech Trees Using Ultrasonic Technique. *Proceedings of the 16th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood* (szerk.: Zhang Houjiand, Wang Xiping). 16-19. old., Beijing Forestry University, Beijing, Kína 2009.
- 73 Najafi S. K., Ebrahimi G., Shalbfan A.: Nondestructive Evaluation of Beech Trees Using the Ultrasonic Technique. *Proceedings of the 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood* (szerk.: Ross R. J., Wang X., Brashaw B. K.). 55-58. old., Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA, 2007.
- 74 Najafi S. K., Shalbfan A., Ebrahimi G.: Internal decay assessment in standing beech trees using ultrasonic velocity measurement. *European Journal of Forest Research* Volume 128. Number 4. 345-350. 2009.
- 75 Nakanishi T. M., Watanabe S.: Water Distribution Inside the Woods by Neutron Radiography. *Bull Tkoy Univ. For.* 93, 13-19, 1995.
- 76 Neild S. A., Wood C. J.: Estimation stem and root-anchorage flexibility in trees. *Tree Physiology* 19. 141-151. 1999.
- 77 Nicolotti G., Socco L. V., Martinis R., Godio A., Sambuelli L.: Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. *Journal of Arboriculture* 29(2) 66-78. 2003.
- 78 Onoe M., Tsao J., Yamada H.: Computer tomography for measuring the annual rings of a live tree. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 221: 213-220. North-Holland, Amsterdam. 1984.
- 79 Palaia-Perez L., Galvan-Llopis V., Cervera-Moreno F., Monzo-Hurtado V.: Using ultrasonic waves for the detection of timber decay in old buildings. *Proceedings of the 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood* (szerk.: Pellerin Roy, McDonald Kent A.). 71-77. old., Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA, 1994.
- 80 Pearce R. B.: Decay development and its restriction in trees. *Journal of Arboriculture* 26(1): 1-11. 2000.

- 81 Pellerin Roy F., Ross Robert J. (szerkesztők): *Nondestructive Evaluation of Wood*, Forest Products Society, Madison, Wisconsin, 2002.
- 82 Peltola H., Kellomaki S., Hassinen A., Granander M.: Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management* 135: 143-153. 2000.
- 83 Picus Tresstroni User Manual, ARGUS ELECTRONIC GMBH. 2010.
- 84 Prieto G.: Detection and estimation of *Hylotrupes Bajulus* L. wood damage by ultrasonics. *Inter. Res. Group on Wood Preserv.*, Rotura, New Zealand. 1990.
- 85 Ridder H.-W., Habermehl A.: Mobile Computed Tomography for Non Destructive Examination of Standing Trees. *Proceedings of the 1st European Symposium on Nondestructive Testing* 512-520. Sopron, 1994.
- 86 Rinn F., Schweingruber F. H., Schar E.: Resistograph and x-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. *Holzforschung*, 50(4): 303-311. 1996.
- 87 Rioux D. A.: Non-invasive acoustic tool revealing decay in trees. *Phytoprotection*, 85(2): 68. 2004.
- 88 Robinson J.L., Slater L.D., Schäfer K.V.R.: Evidence for spatial variability in hydraulic redistribution within an oak–pine forest from resistivity imaging. *Journal of Hydrology* 430–431: 69–79. 2012.
- 89 Rossi R., Amato M., Bitella G., Bochicchio R., Gomes J.J.F., Lovelli S., Martorella E., Favale P.: Electrical resistivity tomography as a non-destructive method for mapping root biomass in an orchard. *European Journal of Soil Science* 62: 206–215. 2011.
- 90 Rust S.: A new tomographic device for the non - destructive testing of trees. *Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood* (szerk.: Divós Ferenc). 233-237. old., University of Western Hungary, Sopron, 2000.
- 91 Sandoz J. L., Lorin P.: Standing tree quality assessment using ultrasound. *Proceedings, First European symposium on nondestructive evaluation of wood*, University of Sopron. Vol. 2, 493-502. 1994.
- 92 Shibata S., Suzuki N.: Effects of an indoor plant on creative task performance and mood, *Scandinavian Journal of Psychology*, 45: 373–381. 2004.
- 93 Shigo, A. L.: *Modern Arboriculture*. Shigo and Associates, NH. 1991.
- 94 Shigo, A. L.: *Tree Decay: An Expanded Concept*. USDA Forest Service Information Bulletin 419.72. 1979.
- 95 Simonyi Károly: *A fizika kultúrtörténete*, Akadémiai Kiadó, Budapest 1998.

- 96 Sismándy-Kiss Ferenc: Roncsolásmentes faanyagvizsgáló technikák áttekintése, Doktori Szigorlat, 2011.
- 97 Smiley E. T., Fraedrich B. R.: Determining strength loss from decay. *Journal Arboriculture*, 18(4): 201-204. 1992.
- 98 Socco L.V., Sambuelli L., Martinis R., Comino E., Nicolotti G.: Feasibility of ultrasonic tomography for nondestructive testing of decay on living trees. *Research in Nondestructive Evaluation*. 15(1): 31-58. 2004.
- 99 Song S., Wang L., Xu H., You X.: Research on propagation velocity of stress wave and ultrasonic wave on indefectible cross section of standing tree. *Proceedings of the 17th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood* (szerk.: Divós Ferenc). 167-174. old., Univesity of West Hungary, Sopron, 2011.
- 100 Srayeddin I., Doussan C.: Estimation of the spatial variability of root water uptake of maize and sorghum at the field scale by electrical resistivity tomography. *Plant and Soil* 319(1-2): 185-207. 2009.
- 101 Takata Katsuhiko, Kitin Peter (szerkesztők): Non-destructive evalutaion for wood and woody materials for development new functional wood-based materials, Oogata Printing Co., LTD, Noshiro, Akita, Japán, 2006.
- 102 Taylor A. F., Wiley A., Kuo F. E., Sullivan W. C.: *Growing Up in the Inner City: Green Spaces As Places to Grow*. *Environment and Bhavior*, 30: 154-168. 1998.
- 103 Timoshenko S., Weaver W., Young H. D.: *Vibration Problems in Engineering*. John Wiley and Sons Inc, New York, 1989.
- 104 Tomikawa Y.I., Arita K., Yamada H.: Nondestructive inspection of wooden poles using ultrasonic computed tomography. *IEEE Transactions UFFC* 33 (4): 354-358. 1990.
- 105 Tuli S., Chugh S., Chatterjee K., Singh S., Sudhakar P.: Sub-surface Thermal Imaging of Bamboo and Bamboo-Glue Interface. *Proceedings of the 17th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood* (szerk.: Divós Ferenc). 657-664. old., Univesity of West Hungary, Sopron, 2011.
- 106 Ulrich R. S.: View through a window may influence recovery from surgery. *Science*. 224. 420-421. 1984.
- 107 Vontobel P., Lehmann E., Niemz P., Usbeck T.: First Neutron Tomography Investigations of Wood: Problems and Their Pragmatical Solution. *Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood* (szerk.:Beall Frank C.). 257-262. old., Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA, 2002.
- 108 Wagener W W.: Judging hazards from native trees in California recreational areas: A guide for professional foresters. *USFS Research Paper PSW-PI*, 29. 1963.
- 109 Wang L., Yin Y., Jiang X.: Predicting Radial Distribution of Tree Ring Micro-Density in Chinese Poplar Plantation Wood Using the Resistograph Method *Proceedings of the 15th*

International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Ross R. J., Wang X., Brashaw B. K.). 125-128. old., Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA, 2007A.

110 Wang Li., Yang X., Xu K.: Current situations and research development of non-destructive testing for wood properties. *Forestry Engineering*, 17(6): 1-3. 2001A

111 Wang X., Ross R. J., Erickson J. R., Forsman J. W., McClellan M., Barbour R. J., Pellerin R. F.: Nondestructive Evaluation of Standing Trees With Stress Wave Methods. *Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Divós Ferenc)*. 197-206. old., University of Western Hungary, Sopron, 2000B

112 Wang X., Ross R. J., Erickson J. R., Ligon J. B.: Technique for nondestructive evaluation of standing trees. *Experimental Techniques*. 24. 27-30. 2000A

113 Wang X., Ross R. J., McClellan M., Barbour R. J., Erickson L. R., McGinnis G. D.: Nondestructive evaluation of standing trees with stress wave methods. *Wood and Fiber Science* 33: 522- 533. 2001B

114 Wang X., Ross R. J.: Acoustic Evaluation of Alaskan Young-Growth Wood. *Proceedings of the 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Ross R. J., Wang X., Brashaw B. K.)*. 97-105. old., Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA, 2007B.

115 Wessolly L., Erb M.: *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*. Patzer Verlag, Berlin, Germany. 1998.

116 Wessolly L.: A contribution to the proper assessment of the strength and stability of trees – Summary. *Arboricultural Journal* 13. 45-65. 1989.

117 Wu Y., Guo L., Cui X., Chen J., Cao X., Lin H.: Ground-penetrating radar-based automatic reconstruction of three-dimensional coarse root system architecture. *Plant and Soil* 383: 155–172. 2014.

118 Yang J. L., Bucur V., Ngo D., Ebdon N.: Detection of Tension Wood in Eucalypt Discs Using Ultrasonic and Stress Wave Techniques. *Proceedings of the 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (szerk.: Ross R. J., Wang X., Brashaw B. K.)*. 143-148. old., Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA, 2007.

119 Zeldovics J. B., Miskisz A. D.: *Az alkalmazott matematika elemei*, Gondolat, Budapest, 1978.

120 Zenone T., Morelli G., Teobaldelli M., Fischanger F., Matteucci M., Sordini M., Armani A., Ferre C., Chiti T., Seufert G.: Preliminary use of ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography to study tree roots in pine forests and poplar plantations. *Functional Plant Biology* 35: 1047–1058. 2008.

## 10. Ábrajegyzék

A nem saját készítésű, fényképezésű ábrák forrásainak jegyzéke.

Az irodalomjegyzékben szereplő hivatkozások első szerzővel és évszámmal szerepelnek.

- 2.1.1. Timoshenko 1989
- 2.1.4. <http://www.vasynet.com/downloads/doc2/elektro/fizika/fiz-1/node11.htm>  
felhasználásával
- 2.1.5. Budó 1968.
- 2.1.6. Budó 1968.
- 2.2.1. [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Standing\\_waves\\_on\\_a\\_string.gif](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Standing_waves_on_a_string.gif)  
felhasználásával
- 2.2.2. <http://iitg.vlab.co.in/?sub=62&brch=175&sim=1080&cnt=1>
- 2.2.3. <http://iitg.vlab.co.in/?sub=62&brch=175&sim=1080&cnt=1>
- 2.3.1. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fourier\\_transform\\_time\\_and\\_frequency\\_domains.gif](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fourier_transform_time_and_frequency_domains.gif) felhasználásával
- 2.3.2. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fourier\\_transform\\_time\\_and\\_frequency\\_domains.gif](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fourier_transform_time_and_frequency_domains.gif) felhasználásával
- 2.3.3. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fourier\\_transform\\_time\\_and\\_frequency\\_domains.gif](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fourier_transform_time_and_frequency_domains.gif) felhasználásával
- 3.3.2. Amato 2008
- 3.6.1. Bal oldali: <http://jsia.sourceforge.net/> ; jobb oldali:  
<http://www.treeworks.co.uk/seminars/seminar4review.php>
- 3.6.3. James 2008
- 3.7.1. Guller 2012
- 3.7.2. Bal oldali: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Resistograph.jpg>  
felhasználásával (jobb oldali saját fotó)
- 3.8.1.1. Divós 2007
- 3.8.2.1. [http://woodndt.nyme.hu/fileadmin/dokumentumok/fmk/faimei/docs/woodndt\\_-\\_pptk/1\\_tree\\_and\\_log/ok\\_2.2011-09-14-Brancheriau-WoodNDT2011-Conf1.pdf](http://woodndt.nyme.hu/fileadmin/dokumentumok/fmk/faimei/docs/woodndt_-_pptk/1_tree_and_log/ok_2.2011-09-14-Brancheriau-WoodNDT2011-Conf1.pdf)  
felhasználásával
- 3.8.2.2. [http://woodndt.nyme.hu/fileadmin/dokumentumok/fmk/faimei/docs/woodndt\\_-\\_pptk/1\\_tree\\_and\\_log/ok\\_7\\_RaqGonc.pdf](http://woodndt.nyme.hu/fileadmin/dokumentumok/fmk/faimei/docs/woodndt_-_pptk/1_tree_and_log/ok_7_RaqGonc.pdf) felhasználásával
- 3.8.3.1. Göcke 2007
- 3.8.3.2. Göncz Balázs mérései
- 3.9.1.1. Wang 2000
- 3.9.1.2. Divós 2010
- 3.9.2.1. Ridder 1994
- 3.9.3.1. Burcha 2011
- 3.9.4.1. Nakanishi 1995

## Mellékletek

### *I. Ágak megfigyelése, vágása, sajátfrekvencia adatok*

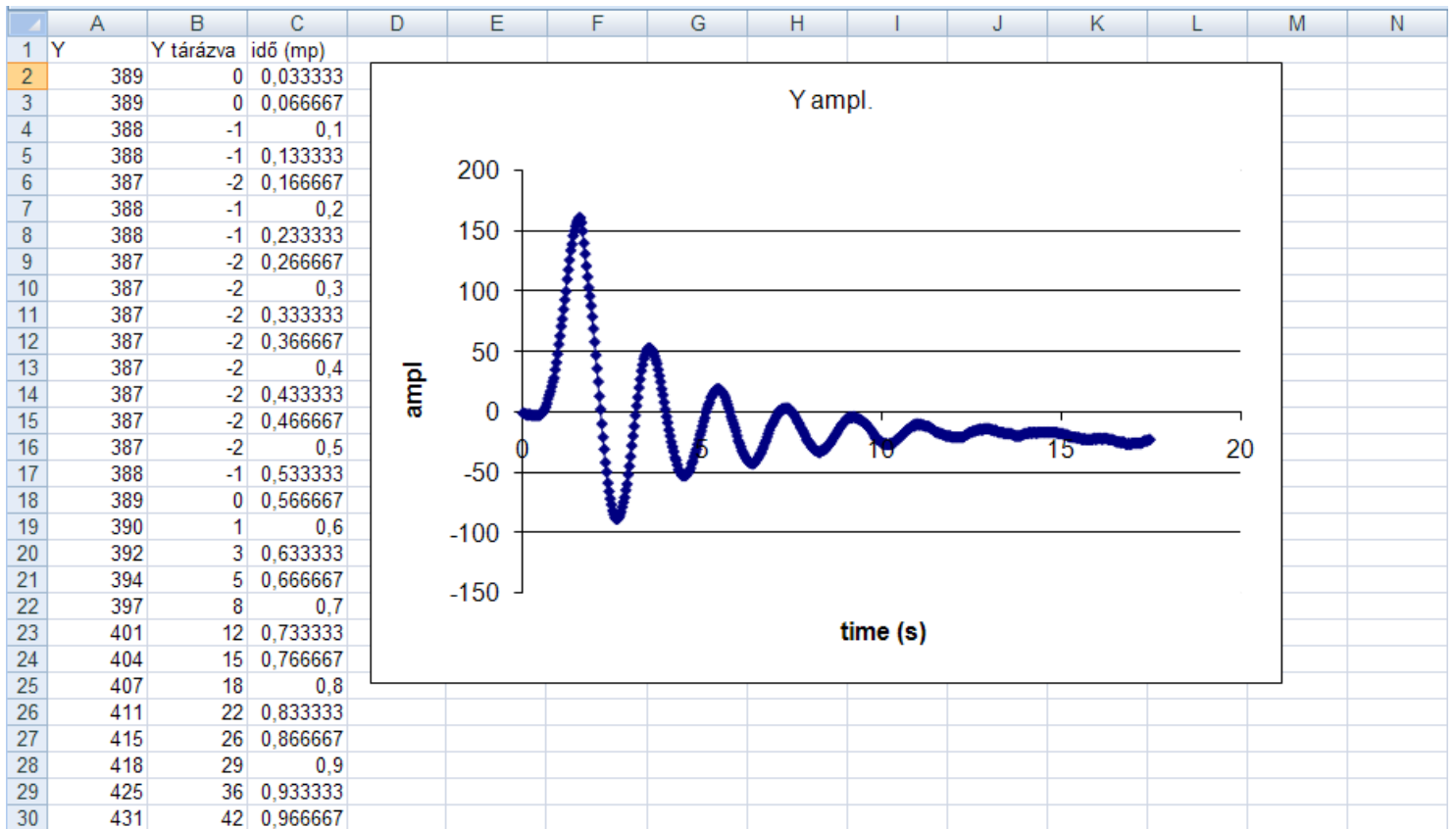
I.I. A MarkerTracker2 program által készített, MVI\_0086 1.csv fájl részlete, az első 104 adat pár (a teljes adatsor 841 adatpár)

A mérés: ág alulról vágása (2011.05.31.), a marker közepének x és y koordinátái.

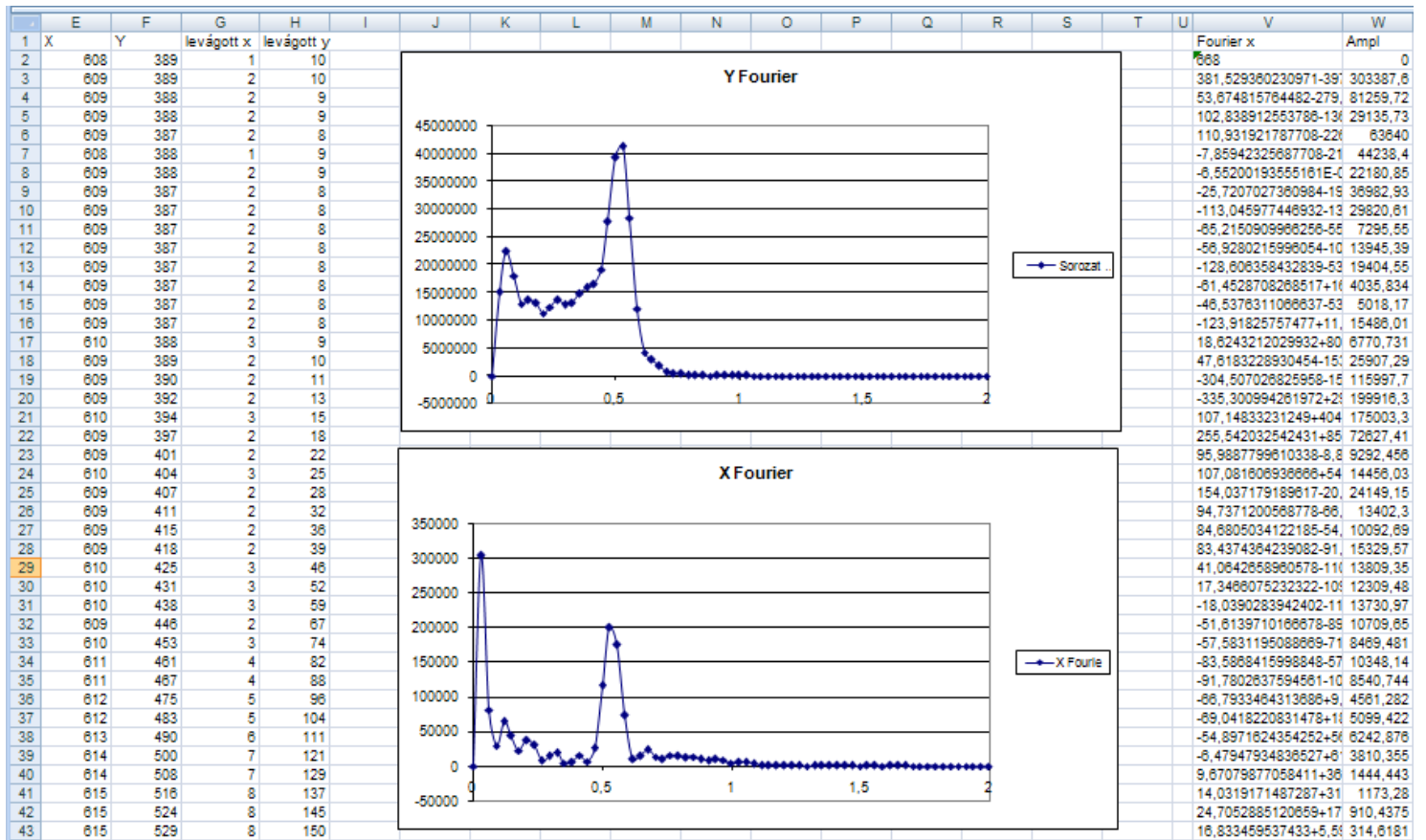
X	Y	612	475	607	348
608	389	612	483	608	340
609	389	613	490	608	331
609	388	614	500	608	324
609	388	614	508	608	318
609	387	615	516	608	313
608	388	615	524	609	308
609	388	615	529	610	305
609	387	616	536	611	302
609	387	617	540	611	301
609	387	617	544	611	301
609	387	617	547	612	302
609	387	617	549	611	304
609	387	617	551	612	307
609	387	617	551	611	311
609	387	617	547	611	315
610	388	616	540	612	319
609	389	614	530	611	325
609	390	614	521	612	330
609	392	611	511	612	338
610	394	610	502	611	345
609	397	609	493	611	353
609	401	609	486	611	362
610	404	609	478	610	370
609	407	607	469	610	378
609	411	607	459	610	387
609	415	607	448	610	395
609	418	606	437	610	402
610	425	606	426	611	410
610	431	606	415	610	417
610	438	606	403	610	424
609	446	607	392	610	429
610	453	606	380	609	434
611	461	607	369	609	437
611	467	606	359	609	440



I.II. Az MVI\_0086 1.csv fájlból készített Microsoft Excel, MVI\_0081 1.xls fájl egy részlete.



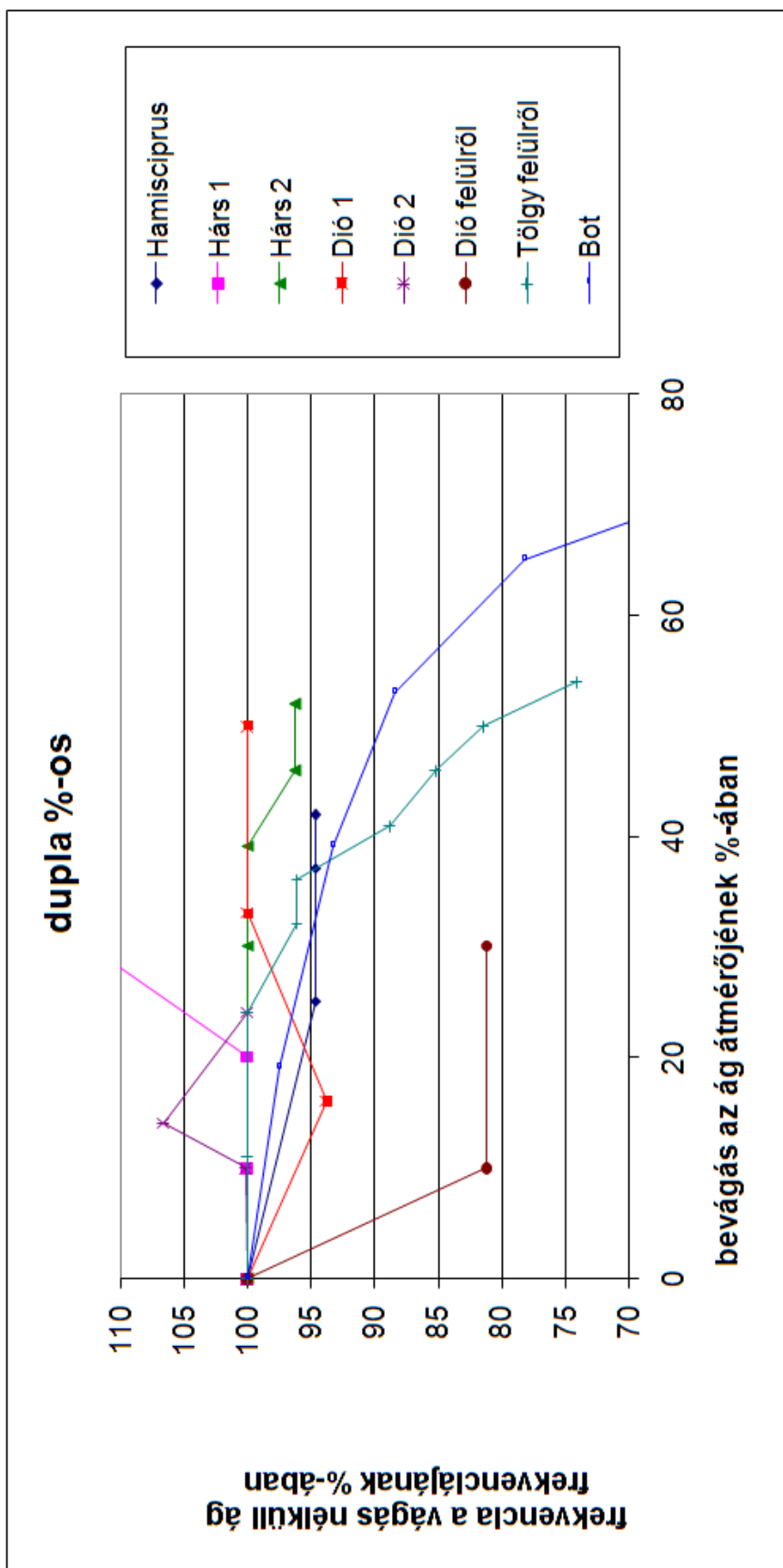
I.III. MVI\_0086 1.csv fájlból származó adatok Fourier transzformálásának részlete.



#### I. IV. A bevágott ágak mért sajátfrekvenciái

bevágás az eredeti átmérő %	sajátfrekvencia (Hz)	bevágás az eredeti átmérő %	sajátfrekvencia (Hz)
<b>Hamisciprus alulról vágva</b>		<b>Dió felülről vágva</b>	
0	0,557	0	0,938
25	0,527	10	0,762
37	0,527	30	0,762
42	0,527	<b>Tölgy felülről vágva</b>	
<b>Hárs 1 alulról vágva</b>		0	1,583
0	0,352	11	1,583
10	0,352	24	1,583
20	0,352	32	1,523
40	0,439	36	1,523
<b>Hárs 2 alulról vágva</b>		41	1,406
0	0,791	46	1,348
30	0,791	50	1,289
39	0,791	54	1,172
46	0,762	<b>Homogén rúd vágása</b>	
52	0,762	0	9,668
<b>Dió 1 alulról vágva</b>		19	9,434
0	0,938	39	9,023
16	0,879	53	8,555
33	0,938	65	7,559
50	0,938	72	5,918
<b>Dió 2 alulról vágva</b>		77	4,043
0	0,439		
10	0,440		
14	0,469		
24	0,439		

I. V. A vágások eredményei grafikonként



## II. Az ellenőrző mérések eredményei

### II.I. Az akusztikus mérés eredményei

#### II.I.I. Ág vágása közben



bevágás mélysége (mm)	a hang áthaladási ideje (mikrosec)	sajátfrekvencia (Hz)
0,00	39,60	0,791
8,50	39,40	0,791
11,00	39,50	0,791
13,00	39,80	0,762
14,50	40,10	0,762
15,50	40,50	1,230

Az akusztikus érzékelők távolsága végig 100 mm volt.

## II.I.II. Homogén rúd vágása közben



bevágás mélysége (mm)	a hang áthaladási ideje (mikrosec)	sajátfrekvencia (Hz)
0,00	32,00	9,668
4,00	32,10	9,434
8,00	32,20	9,023
11,00	33,10	8,555
13,50	32,20	7,559
15,00	32,30	5,918
16,00	32,40	4,043

Az akusztikus érzékelők távolsága végig 105 mm volt.

## II. II. Az ultrahangos ellenőrző mérések eredményei

Egész ág darabok mérési eredményei:

hossz (cm)	"fent" mért idő (mikrosec)	"lent" mért idő (mikrosec)
68	190	225
64	222	238
44	143	153
19,5	63	72

Szétvágott ág eredményei, az egyes darabok hossza 10 cm volt.

sorszám	idő (mikrosec)
1	39,2
2	56,0
3	34,1
4	46,4
5	40,0
6	54,0
7	42,9
8	túl vékony
9	43,2

56,0	39,2	34,1
46,4	43,2	40,0
54,0	42,9	vékony

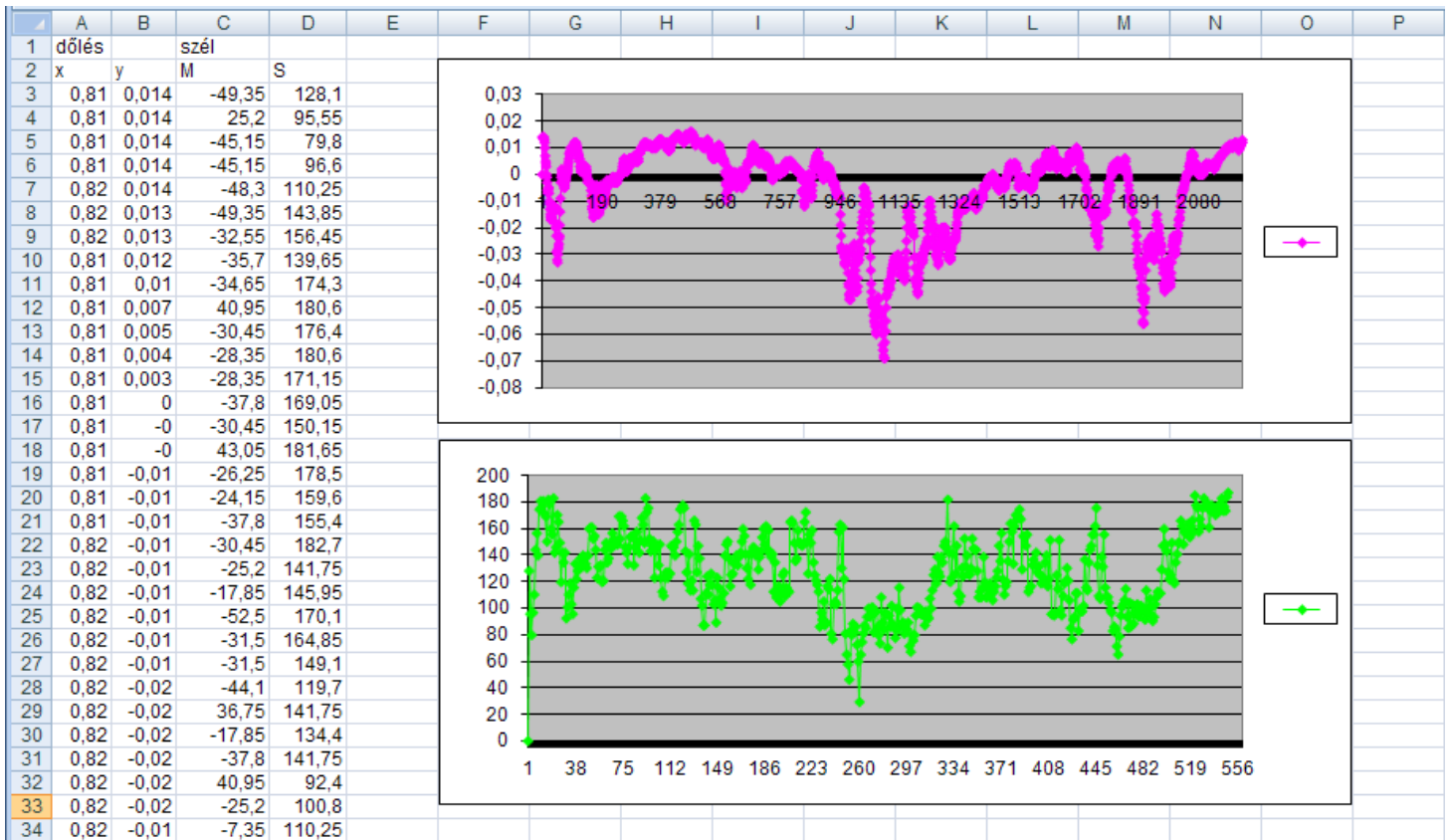


### *III. A húzóvizsgálatok, a lézer mozgásainak és a szélmérés eredményeiből néhány*

III.I. A FaMoc program által létrehozott .dat file egy részlete. A különböző adatokat pontosvesszők választják el

Idő;Master (korrigált);Slave (korrigált);MS nagyság;MS  
szög;X;Y;Főtengely;Kistengely;Szög (ellipszis);M3;M4;S3;S4  
13:48:47.112;-  
38,85;163,8;168,34417869353251;283,342833698423;519,375;263,852844;304,824463;184,  
864044;287,107666;3313;2876;3563;3159  
13:48:47.536;-  
54,6;169,05;177,64870531473062;287,89948983735752;502,226563;280,506927;279,13192  
7;197,2155;292,496948;3317;2895;3571;3162  
13:48:47.910;-  
50,400000000000006;131,25;140,59417662193553;291,00678943077185;490,903748;280,3  
938;289,8539;213,216629;294,2371;3320;2894;3550;3177  
13:48:48.322;-  
55,650000000000006;100,80000000000001;115,14148904717189;298,90235703620181;506  
,4936;248,381439;344,713257;214,413055;292,12915;3314;2893;3537;3193  
13:48:48.734;49,35;148,05;156,05840252930952;251,565051177078;510,092957;249,97566  
2;335,54657;195,046371;291,636353;3325;2804;3545;3156  
13:48:49.144;-  
69,3;153,3;168,23608411990574;294,32557523912612;511,77536;281,508057;283,021454;2  
04,976944;291,657867;3303;2895;3551;3157  
13:48:49.533;-  
46,2;153,3;160,11036818394993;286,7712238186304;508,0352;302,756622;280,625916;188  
,3108;271,090851;3301;2871;3555;3161  
13:48:49.912;-  
59,85;127,05000000000001;140,44117985833074;295,22392339736081;515,4412;282,3651;  
291,96756;185,133926;286,338654;3308;2891;3544;3175  
13:48:50.327;-  
52,5;159,6;168,01312448734473;288,20848447058086;518,3729;289,0312;277,8182;187,92  
64;285,211945;3316;2892;3559;3159  
13:48:50.737;-  
53,550000000000004;148,05;157,4369873949575;289,88516511385546;509,274628;306,55  
7343;261,3093;168,8869;270,7182;3317;2894;3557;3168  
13:48:51.108;-  
46,2;153,3;160,11036818394993;286,7712238186304;501,863953;322,42215;258,656616;16  
0,431183;256,6163;3311;2881;3555;3161

### III.II. Szél és dőlés adatok a széladatok korrekciója és időillesztés nélkül



### III.III. A húzóvizsgálatok eredményei

