

**Az élő fák stabilitása - mérnöki
megközelítés**
Élő fák, mint teherhordó faszerkezetek



**Magyar Mérnöki Kamara
Kiadványsorozata 20.**

**Az élő fák stabilitása - mérnöki megközelítés
Élő fák, mint teherhordó faszerkezetek**



**MMK FAP azonosító:
FAP-2018/022-EFAT**

Budapest, 2018. október

A sorozat szerkesztője:
NAGY GYULA
a Magyar Mérnöki Kamara elnöke

Készült a Magyar Mérnöki Kamara Erdőmérnöki, Faipari és Agrárműszaki Tagozatának gondozásában, a 2018. évi Feladat Alapú Pályázatok pénzügyi keretéből.

A kiadvány a Magyar Mérnöki Kamara tulajdona. Másolása, teljes terjedelmében való közzététele csak a Kamara engedélyével lehetséges. Minden jog fenntartva.

Szerző:
Dr. Divós Ferenc
egyetemi tanár

Lektorálta:
Dr. Németh László

Kiadó:
Magyar Mérnöki Kamara
1094 Budapest, Angyal u. 1-3.
info@mmk.hu, www.mmk.hu

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés.....	6
2. Élő fa, mint teherhordó faszerkezet – terhek számítása.....	7
2.1. Szélteher számítása	8
3. Biztonsági tényező – gyökérzet stabilitásának vizsgálata húzással	11
3.1. Húzóvizsgálat, $M_{kritikus}$ meghatározása	11
3.2. Műszerek bemutatása.....	15
3.2.1. Dőlésmérő részei	15
3.2.2. Erőmérő részei	16
3.3. Húzóvizsgálat a törzs stabilitásának vizsgálatára	17
3.4. Mechanikai feszültségek számítása a fa törzsében, A törzs törésre vonatkozó biztonsági faktor meghatározása.	20
4. Akusztikus tomográfia, a fatörzs belső vizsgálata.....	23
4.1. Hang terjedése az élő fában.....	23
4.2. Hangsebesség mérése élő fában, akusztikus tomográfia.....	26
5. Dinamikus gyökérvizsgálat.....	31
6. Dinamikus törzs vizsgálat.....	35
7. Impedancia tomográfia.....	37
8. Összefoglaló.....	39
9. Irodalomjegyzék.....	41

1. Bevezetés

Az élő fák stabilitása fontos kérdés. A viharokban kidőlt, illetve kitört fák okozta károk, személyi sérülések, sajnálatos halálesetek felhívják a figyelmet a fák stabilitásának fontosságára. Hagyományosan a városi fák vizsgálata és biztonságuk megítélése erdész, illetve kertész, legújabban a faápoló szakember feladata. A Szent István Egyetemen 2 éve indult a faápoló szakmérnök képzés. Ennek a képzésnek a keretében fák stabilitásának mérnöki megítélése is terítékre került.

A növények és élő fák vizsgálata a talajtan, biológia, a növénytan és a dendrológia, a rovar és gomba károsítók ismerete nélkül nem lehetséges. Vizuális jelek alapján nagyon sok információ áll rendelkezésre a fák állapotáról, esetleges betegségeiről. Ezek lehetnek alaki deformitások, melyek benőtt sebeket, fagyrepedést, korhadást rejthetnek. A gomba termőtest és nyílt odú, felszínre kifutó repedés megjelenése közvetlenül is jelzi az elváltozásokat. A száradó ágak, különösen a csúcsszáradás a vízháztartás vagy gyökérzet problémáit jelzik. Esetenként még a gyökérzet állapotáról is találunk jelzéseket, ha az járda vagy útburkolat javításai a közmű fektetés vagy karbantartás jeleit hordozzák. A favizsgálat minden esetben a vizuális vizsgálattal kezdődik. Ennek részletei a faápoló szakirodalomban (Szaller 2017) megtalálhatóak.

2. Élő fa, mint teherhordó faszerkezet – terhek számítása

A fákat érő alapvető terhelések az önsúly és a szélteher. Ezek közül a szélteher a jelentősebb. Egyéb terhelésekkel, mint hóteher, kalandparkok kötélrendszere okozta terhelésekkel itt nem foglalkozunk.

Az önsúly meghatározásához Dr. Veperdi Gábor, Erdőbecslés tan címmű oktatási segédanyaga ad segítséget. A pontos fatérfogat meghatározását nehezíti, hogy a fák alakja, térfogata eltérő, ha zárt állományban, erdőben nő, vagy kihasználhatja a teret a növekedésre, mint pl. a parki fák esetében. Van egy egyszerű módszer a fa tömegének meghatározására. Ha vesszük a fa átmérőjét 1,3m magasságban $D_{1.3}$ és megmérjük a fa magasságát (H), akkor a fa tömegét a következő képlettel becsülhetjük:

$$m_{fa} = \rho H D_{1.3}^2 \pi / 4 \quad (1)$$

Ezzel a fa tömegét a mellmagasságú átmérőjű, fa magasságú henger tömegével becsüljük. Ezzel jellemzően 5-15 %-kal fölül becsüljük a fa tömegét, amiben a lomb is benne foglaltatik. Ha figyelembe vesszük, hogy a szélteher 10-20-szor nagyobb az önsúlyból származó tehernek, akkor a teherszámításnál fellépő relatív hiba a fenti egyszerűsítés miatt 1% alatt lesz, ami elfogadható. A fa sűrűségét (ρ) a fafajra jellemző élő nedves fa sűrűségével kell figyelembe venni. Ezek az adatok az „engineering tool box”-ban megtalálhatók: https://www.engineeringtoolbox.com/weight-wood-d_821.html. Az 1. táblázat ezt felhasználva készült és 64 fa faj adatait tartalmazza. Megjegyezzük, hogy a kertészeti gyakorlatban az 1m magassági átmérőt használják, ami eltérő lehet.

1. táblázat
Néhány fafaj élő nedves sűrűsége

Fafaj	Élő nedves sűrűség (kg/m ³)	Fafaj	Élő nedves sűrűség (kg/m ³)
Akác	929	Ciprus	817
Vörösfenyő	753	Cukor juhar	945
Ash, Oregon	737	Csavarttűs fenyő	625
Bur tölgy	993	Cseresznye	721
Bükk, amerikai	865	Dió, fekete	929
Cédrus, alaskai	577	Douglas fenyő	609
Cédrus, fehér	449	Égerfa	721
Cédrus, keleti	592	Eperfa	945
Cédrus, vörös	423	Fehér cédrus	384
Celtis	817	Fehér kőris	769

Fafaj	Élő nedves sűrűség (kg/m ³)
Fehér szil	881
Fekete dió	913
Fekete juhar	865
Fekete kőris	833
Fenyő, balzsam	721
Fenyő, cukor	833
Fűzfa	865
Gesztenye	881
Gleditsia	929
Gyertyánfa	960
Hárs	673
Hegyi juhar	1009
Hemlock fenyő, keleti	801
Hemlock fenyő, nyugati	657
Hickory, pekándió	993
Hikori-fa	1026
Juhar, cukor	897
Juhar, ezüst	721
Juhar, negylevelű	753
Juhar, vörös	801
Luc, Engelman	625
Luc, kanadai	545

Fafaj	Élő nedves sűrűség (kg/m ³)
Luc, Sitka	529
Lucfenyő	737
Lucfenyő fenyő	673
Magnolia	750
Mamutfenyő	801
Nyár, sárga	609
nyárfa	929
Nyárfa, fehér	756
Nyárfa, jegenye	737
Nyír, brit	913
Nyír, papír	801
Osszás narancs	1026
Pekándió	993
Ponderosa fenyő	721
Rezgő nyárfa	689
Som	858
Szil, amerikai	856
Tölgy, fehér	1009
Tölgy, vörös	977
Vörös szil	785
Vörösfenyő	769
Zöld kőris	849

2.1. Szélteher számítása

A szélteher számítást Lajos Tamás: Az Áramlástan Alapjai c. jegyzet 14. fejezete alapján a következő képlettel végezzük:

$$F_{\text{szél}} = (\rho_{\text{levegő}} / 2) v_{\text{szél}}^2 A_{\text{korona}} c \quad (2)$$

ahol:

$F_{\text{szél}}$ szélterő (N)

$\rho_{\text{levegő}}$ levegő sűrűsége (kg/m³)

$v_{\text{szél}}$ szélesebesség (m/s)

A_{korona} korona felülete a szélirányból (m²)

c ellenállás tényező (-) lásd a 2. táblázatot

A szélsébség az adott területre jellemző legnagyobb szélleőkés sebességét jelenti 10 m magasságban. Ez Magyarországon 120 km/óra vagy 33 m/s. Hegytetőn, szélcsatornában álló fa esetén ennél magasabb értéket kell használni.

Az Eurocode 1-4 szerinti szélteher számítás 24 m-nél alacsonyabb fa esetében alacsonyabb szélert eredményez városi környezetben, mint a fenti egyszerű számítás. A 24m-nél magasabb fa esetén megfordul a helyzet.

3. Biztonsági tényező – gyökérzet stabilitásának vizsgálata húzással

Egy fa állapotának megítélése összetett feladat, de az eredmény közérthető és gyakorlatias kell, hogy legyen: nem igényel beavatkozást, vagy beavatkozást igényel. Ezt szolgálja a biztonsági faktor.

Gyökér stabilitás megítélésekor a biztonsági faktor (SF) a kritikus, vagyis a kifordításhoz szükséges forgatónyomaték (M_{kritikus}) és a terhelések okozta forgatónyomaték ($M_{\text{terhelés}}$) hányadosa:

$$SF = M_{\text{kritikus}} / M_{\text{terhelés}} \quad (3)$$

Ha a biztonsági tényező 1-nél kisebb, akkor a fa kifordulhat, nem biztonságos, beavatkozást igényel.

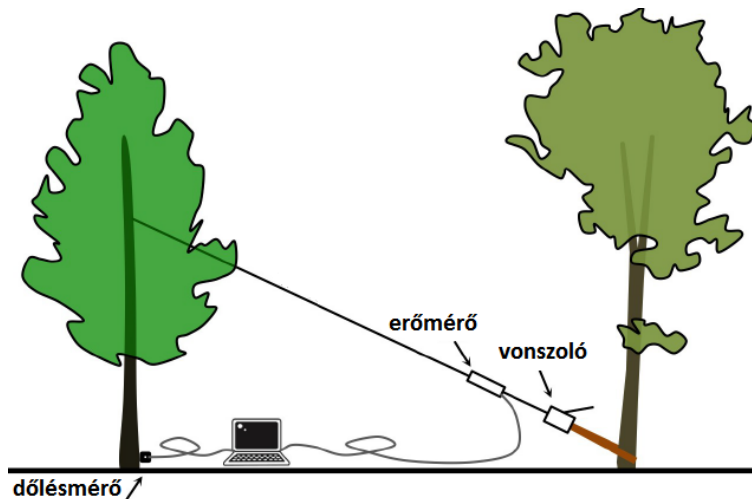
Ha a biztonsági tényező 1 és 1.5 közötti, akkor ugyan valamennyi tartalékkal rendelkezik a fa, de a számítás bizonytalanságai miatt a kellő biztonsági tartalék még hiányzik, beavatkozás szintén javasolt.

Ha a biztonsági tényező 1.5 feletti, akkor a fa biztonságos, beavatkozást nem igényel.

3.1. Húzóvizsgálat, M_{kritikus} meghatározása

Hogyan vizsgáljuk a gyökér stabilitást húzással? A mérési összeállítás az 1. ábrán látható.

- A vizsgált fa koronájában, lehetőleg a fa súlypontjába sodronykötelet erősítünk.
- A kötel másik végét kikötjük, általában egy másik fa tövéhez vagy teherautóhoz.
- Digitális erőmérőt szerelünk a sodronykötélre.
- Digitális dőlésmérőt szerelünk a vizsgálandó fa tövére.
- Vonszóval megfeszítjük a kötelet, így szimulálva a szél hatását.
- A mérés közben másodpercenként 2 alkalommal regisztráljuk az adatokat.
- Megmérjük a kötel megkötésének magasságát (H), és a kötel vízszintes hosszát (L).



1. ábra

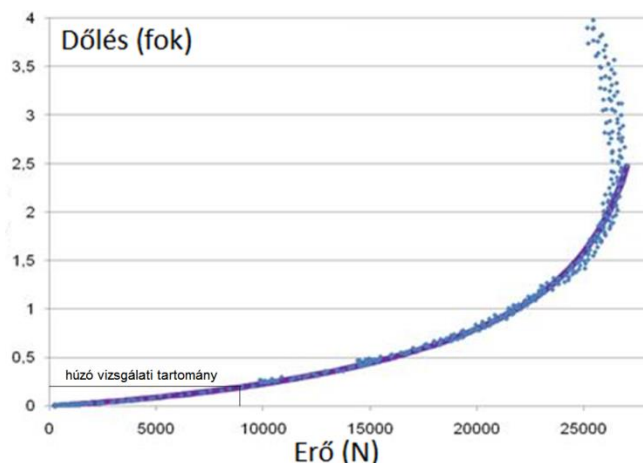
A húzóvizsgálathoz alkalmazott mérési elrendezés.

Az értékelés menete:

A német tapasztalatok alapján (Wessolly and Erb 1998) az erő és dőlés valamennyi fa esetén azonos görbe mentén történik, ha a döntéshez szükséges erőt relatív skálán ábrázoljuk. Ennek az univerzális kidöntési görbének a képlete a következő:

$$\varphi_{calc} = \frac{1}{3} \tan\left(\frac{100}{73.85} \frac{F}{F_{max}}\right) + \frac{1}{2} \left(\frac{F}{F_{max}}\right)^2 - \frac{1}{10} \left(\frac{F}{F_{max}}\right) \quad (4)$$

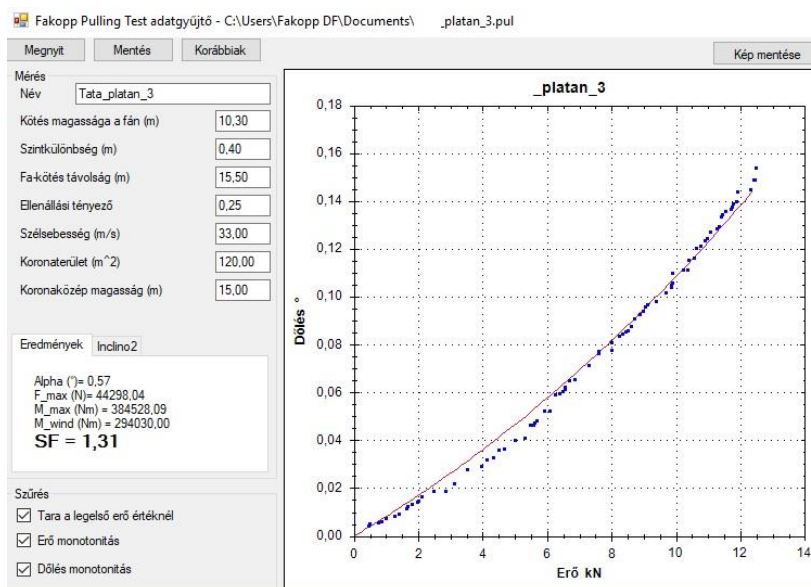
Ahol a φ_{calc} a számított dőlés, F a mért erő, F_{max} a gyökérzet kifordításához szükséges erő, vagyis a kritikus erő. (φ_{calc} értékét fokban kapjuk, de a tangens függvényt radiánban kell értelmezni). Egy döntési kísérlet adatait látjuk a 2. ábrán. A kék pontok a mért adatokat jelzik egy tölgyfa kidöntése során. A folytonos görbe a fent bemutatott dőlési görbe. A görbe illeszkedése kielégítő. A fa tövének 2 (2,5) fokos dőlése után az erő már nem növekszik. A húzó vizsgálat során biztonságos mértékben vesszük igénybe a fát, a dőlési görbe elejét regisztráljuk – jellemzően 0,2 fokig döntjük a fát. A mért pontokra az univerzális dőlési görbét illesztjük és extrapolálunk 2 fokig. Az illesztésnél a $\varphi_{calc} - \varphi_{mért}$ különbség abszolút értékeinek minimalizálása a cél. A 3. ábra egy húzóvizsgálat adatait mutatja.



2. ábra

*Fa döntési kísérlet. A mért pontok (kék) és az általános dőlési görbe (lila).
A fa kifordításához 27,8 kN erő volt szükséges.*

A mérés egyik fő szempontja, hogy ne okozzunk kárt a gyökérzetben, ezért a húzás maximum addig folytatható, amíg a törzs töben mért dőlése nem haladja meg a 0,2 fokot. Így a húzó vizsgálat biztonsággal roncsolásmentes, hasonlatos ahhoz a terheléshez, amit a fa egy viharban átél.



3. ábra

Egy tényleges húzó vizsgálat diagramja.

2. táblázat

Néhány fafaj mechanikai tulajdonsága az oszlopok sorrendjében: rugalmassági modulusa, szilárdsága, rugalmasságának határa (RH) és az ellenállás tényező (c).

Stuttgart table of wood strength (Wessolly and Erb 1998).

Species	Modulus of elasticity (N/mm ²)	Comparable strength in longitude (N/mm ²)	Elastic limit (%)	Proposed Aerodynamic drag factor (c _w)
<i>Abies alba</i>	9500	15	0.16	0.20
<i>Acer pseudoplatanus</i>	8500	25	0.29	0.25
<i>Acer negundo</i>	5600	20	0.36	0.25
<i>Acer campestre</i>	6000	25.5	0.43	0.25
<i>Acer saccharinum</i>	6000	20	0.33	0.25
<i>Acer saccharum</i>	5450	20	0.37	0.25
<i>Aesculus hippocastanum</i>	5250	14	0.26	0.35
<i>Ailanthus altissima</i>	6400	16	0.25	0.15
<i>Betula pendula</i>	7050	22	0.31	0.12
<i>Chamaecyparis lawsonia</i>	7350	20	0.27	0.20
<i>Cedrus deodora</i>	7650	15	0.20	0.20
<i>Fagus sylvatica</i>	8500	22.5	0.26	0.25–0.30
<i>Alnus glutinosa</i>	8000	20	0.25	0.25
<i>Fraxinus excelsior</i>	6250	26	0.42	0.20
<i>Picea abies</i>	9000	21	0.23	0.20
<i>Picea omorika</i>	9000	16	0.18	0.20
<i>Carpinus betulus</i>	8800	16	0.18	0.25
<i>Castanea sativa</i>	6000	25	0.42	0.25
<i>Cercis siliquastrum</i>	0	15	—	0.20
<i>Larix decidua</i>	5035	17	0.32	0.15
<i>Liriodendron tulipifera</i>	5000	17	0.34	0.25
<i>Pinus pinaster</i>	8500	18	0.21	0.20
<i>Pinus sylvestris</i>	5800	17	0.29	0.15
<i>Platanus</i> × hybrid	6250	27	0.43	0.25
<i>Populus</i> × <i>canescens</i>	6050	20	0.33	0.2–0.25
<i>Populus nigra</i> ‘Italica’	6800	16	0.24	0.30
<i>Populus nigra</i>	6520	20	0.31	0.2
<i>Populus alba</i>	6400	20	0.31	0.2
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	1000	20	0.20	0.20
<i>Pyrus communis</i>	5800	17	0.29	0.30
<i>Quercus robur</i>	6900	28	0.41	0.25
<i>Quercus rubra</i>	7200	20	0.28	0.25
<i>Robinia pseudoacacia</i>	7050	20	0.28	0.15
<i>Robinia monophyla</i>	5200	20	0.38	0.15–0.20
<i>Salix alba</i>	7750	16	0.21	0.20
<i>Salix alba</i> ‘Tristis’	7000	16	0.23	0.20
<i>Sequoiadendron giganteum</i>	4550	18	0.40	0.20
<i>Sophora japonica</i>	6450	20	0.31	0.15
<i>Sorbus aria</i>	6000	16	0.27	0.25
<i>Tilia</i> × <i>hollandica</i>	4500	17	0.38	0.25
<i>Tilia euchlora</i>	7000	17.5	0.25	0.25
<i>Tilia tomentosa</i>	8350	20	0.24	0.25–0.30
<i>Tilia platyphyllos</i>	8000	20	0.25	0.25
<i>Tilia cordata</i>	8300	20	0.24	0.25
<i>Ulmus glabra</i>	5700	20	0.35	0.25

A mérés és értékelés sok bizonytalanságot tartalmaz. A relatív hiba elérheti az 50%-ot is.

Ezek közül legnagyobb hibaforrás a szélterhelés meghatározása. Az adott területre vonatkoztatva kell a szélesebséget kiválasztani, megbecsülni, hogy mely értéknél nem várható nagyobb szélesebség a következő 10-20 évben 10m-es magasságban.

Ezügyben az OMSZ adatai lehetnek mérvadók. Jellemzően 120 km/óra vagy 33 m/s sebességgel számolunk. A szélnek különösen kitett fák – hegytetőn, szélcsatornában álló fa – esetében ennél nagyobb értéket kell alkalmazni.

A biztonsági faktor a két forgatónyomaték, az $M_{kritikus}$ és az $M_{terhelés}$ hányadosa. $M_{kritikus}$ számításánál az erőkar a húzáshoz használt kötélt kötés magassága. Figyelembe kell venni, hogy a kötélt mekkora szöget zár be az erőkarral, ugyanis a húzó erő vízszintes komponense hajlítja (forgatja) a fát, a függőleges komponense pedig a talajba nyomja be a fát. A terhelésből származó forgatónyomaték esetén az erőkar a korona súlyponti magassága és a szélerő szorzata. Jó okunk van feltételezni, hogy a szélerő vízszintesen hat a fára. Ha a fa dől, akkor az önsúlyból származó forgatónyomatékot is figyelembe kell venni.

3.2. Műszerek bemutatása

3.2.1. Dőlésmérő részei

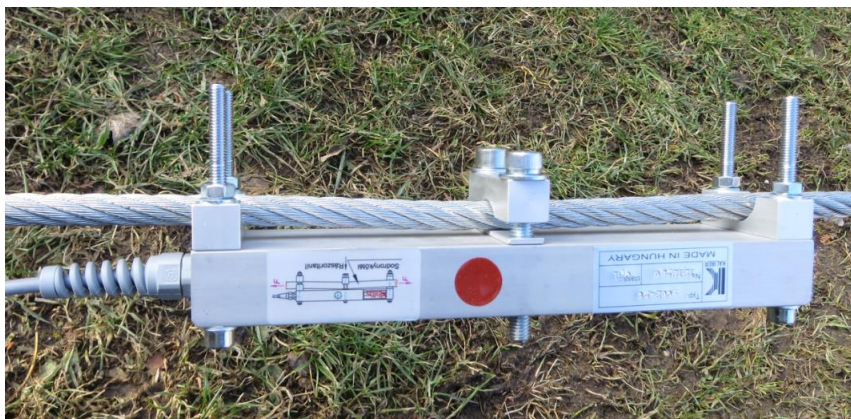
- Érzékelő ház, érzékenység: 0,001 fok. A dőlésmérőt mindig a fa tövébe kell felszerelni!!!
- Gömbfejes rögzítő készülék
- Elemtartó és Bluetooth egység
- X-Y libella, lásd a 4. ábrát.



4. ábra
Dőlésmérő használat közben

3.2.2. Erőmérő részei

- 5T kapacitású erő érzékelő, 5. ábra.
- Rinstrum kijelző, 6. ábra.
- Bluetooth egység
- 6-os imbuszkulcs



5. ábra
5t kapacitású erő érzékelő, Kaliber gyártmány.



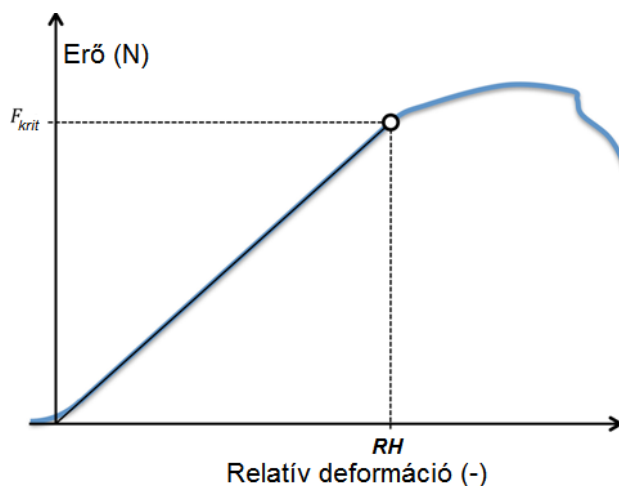
6. ábra
*Az erőmérő kijelzője USB-soros kábelén csatlakozik a számítógéphez.
Alternatív kapcsolódási lehetőség: Bluetooth.*

3.3. Húzóvizsgálat a törzs stabilitásának vizsgálatára

Húzó vizsgálattal nemcsak a gyökér stabilitását, hanem a törzs stabilitását is meg lehet ítélni. A két módszer között sok az egyezés, kötelet kötünk a fa koronájába, meghúzzuk, mérjük az erőt, számítjuk a szélterhelésből származó forgatónyomatékokat. A biztonsági tényező (SF) képlete is azonos:

$$SF = M_{\text{kritikus}} / M_{\text{terhelés}} \quad (5)$$

a kritikus és a terhelésből származó forgatónyomaték hányadosa. Az eltérés a kritikus forgatónyomaték meghatározásában van. A koncepció a következő: a szélterhelés és az önsúly hatására a fatörzs anyaga rugalmasan deformálódik. Ez mindaddig következmények nélküli, amíg a deformáció a rugalmasság határát el nem éri. Ezt meghaladva a faanyagban maradandó deformáció, tönkremenetel kezdődik, ami ismétlődések hatására a törzs töréséhez vezethet. Ez a jelenség a legtöbb anyag esetén, így a faanyag esetén is lehetőséget biztosít a kritikus terhelő erő meghatározására. Ezt mutatja be a 7. ábra. Az erő – deformáció összefüggés a rugalmasság határáig lineáris.



7. ábra

Az erő – deformáció összefüggés a rugalmasság határáig (RH) lineáris.



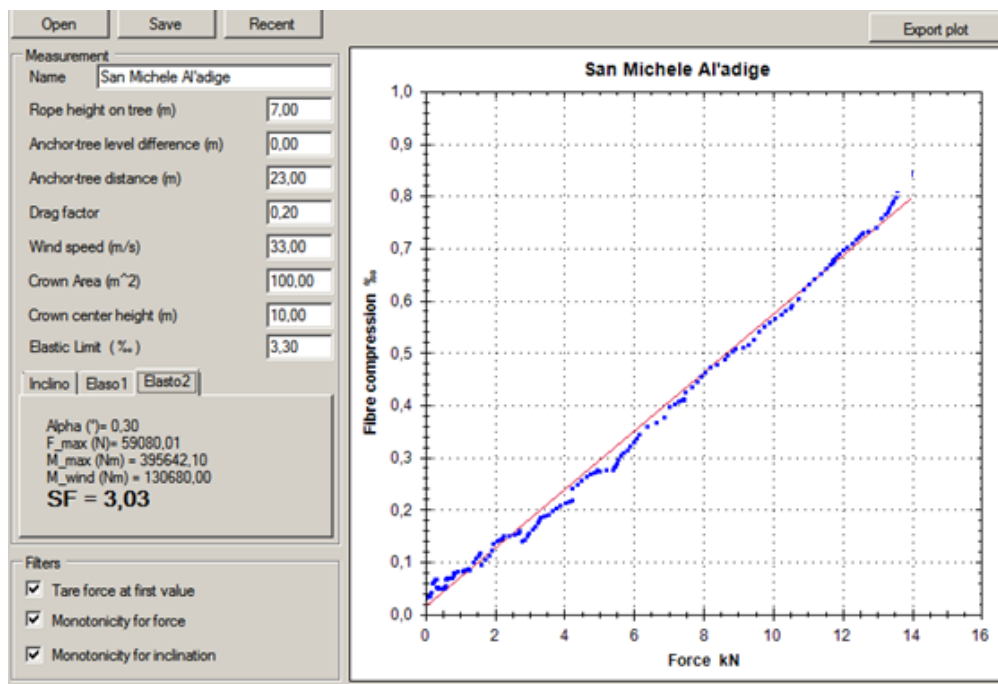
8. ábra Elmozdulás mérő.

A vizsgálat első lépésében vizuális jelek alapján meghatározzuk a vélhetően leggyengébb részét a törzsnek. Az így megtalált magasságban elmozdulás mérőt helyezünk a fatörzsre két facsavar segítségével. Az elmozdulás mérő mikron pontossággal méri a két L (pl. 235 mm) távolságban levő facsavar egymáshoz viszonyított elmozdulását (ΔL). A relatív deformáció, $\varepsilon = \Delta L / L$. Ha a mért relatív deformáció függvényében ábrázoljuk a mért erőt. Egyenest fogunk kapni. Értelemszerűen az elmozdulás mérőt a fatörzs és a húzó kötélt által meghatározott síkban kell elhelyezni, akár a nyomott, akár a húzott övben.

A rugalmasság határa fafaj függő, értéke 1,6 és 4 ezrelék között van. Néhány fafaj esetében a 2. táblázat ad eligazítást. Az elmozdulás mérőnek kicsi deformációt is pontosan kell mérnie, ezért követelmény a μm -es felbontás. Egy ilyen eszközt mutat a 8. ábra. A terepi munka megkönnyítésére egy segédeszközt használunk.

A 2-es facsavarral a mérőeszközt rögzítjük, a 6-os facsavar a tapogató csúcs támaszpontját rögzíti a fához. A 3-as hüvely lehúzott állapotban az 5-ös villákat lezárja. Ezzel lehetővé teszi az eszköz gyors felhelyezését. A mérés előtt a 3-as hüvelyt felfelé húzva a támaszpont szabad mozgása lehetővé válik. A hüvelyt a 4-es szárnyas csavarral rögzíthetjük. Az elmozdulás mérő csak akkor működik pontosan, ha a rögzítése tökéletes.

Egy elvégzett húzó vizsgálatot mutat a 9. ábra. A mért pontokra (kék) kielégítően illeszkedik a piros egyenes. Az egyenest a rugalmasság határáig meghosszabbítva (extrapolálva) kapjuk meg a kritikus erőt. A 10. ábra egy húzó vizsgálatot mutat be.



9. ábra

A törzs stabilitás vizsgálatára elvégzett húzó vizsgálat eredménye.



10. ábra

Húzóvizsgálatra előkészített, felszerezett vadgesztenye.

A húzóvizsgálatot ugyan több mint 20 éve ismeri és használja a faápoló szakma, elsősorban a gyökérzet vizsgálatára használják. Ennek ellenére több kifogás és nehézség terheli a vizsgálatot. Ezek a következők:

- A biztonsági faktor egyedül álló fára vonatkozik. Valójában a környező fák és épületek jelentősen befolyásolhatják a tényleges szél terhelést. Ha a fa szélcsatornában helyezkedik el, a biztonsági faktor a valósághoz képest magasabbnak mutatkozik, ha pedig épületekkel körbevett fát vizsgálunk, akkor indokolatlanul kapunk alacsonyabb biztonsági faktort. Röviden a fa környezetének hatását nem veszi figyelembe a húzó vizsgálat
- Statikus terhelést alkalmazunk, de a széllökések dinamikusan terhelik a fákat. A kétféle terhelést nem illik összekeverni.
- Gyökérzet vizsgálatokor a húzó kötélen nem lehet vízszintes, mivel egy másik fa tövéhez kötjük ki. Ennek az a következménye, hogy a kötélerő függőleges komponensével a fát a talajba bele nyomjuk. Ezáltal a talaj-gyökérzet rendszer nyíró szilárdsága jó eséllyel megnő, ami meghamisítja a vizsgálatot. Ez a hatás hosszú kötélen alkalmazásával csökkenthető.

A fenti hiányosságok ellenére a módszer él és virul. Továbbfejlesztésén dolgoznak. Egyik fejlesztési irány a fafaj függő dőlési görbe alkalmazása.

Néhány érdekes tapasztalat:

- 1.) A talaj nedvességtartalmának hatását hajlamosak vagyunk túlértékelni. A talaj mesterséges nedvesítésének hatását több helyen - Sopron, Göttingen és Brno - vizsgálták. Meglepetésre mindenhol 20% alatti volt a biztonsági faktor csökkenés a talaj áztatása után.
- 2.) Húzási irány is fontos. Ha egy egészséges gyökérzetű fát húzunk, az uralkodó széliránynak megfelelő húzás kb. 20%-kal magasabb biztonsági faktort eredményez, mintha az uralkodó szélirányra merőlegesen húztunk volna. Ennek oka az, hogy az uralkodó szélirányban több gyökeret növeszt a fa, mint rá merőlegesen.
Ha a gyökérzetet egy vonalas közmű fektetése során megsértették, akkor a vonalra merőlegesen várhatjuk az alacsonyabb biztonsági faktor.

3.4. Mechanikai feszültségek számítása a fa törzsében, A törzs törésre vonatkozó biztonsági faktor meghatározása.

Tekintsünk egy modell fát. Az egyszerűség kedvéért legyen a fa egyenes állású, a gyökérzet merev befogást biztosít. Ismerjük a következő paramétereket:

- D: a törzs átmérője a tőben
- d: koncentrikusan elhelyezkedő üreg a tő környezetében.
- H_{fa} : a fa magassága
- H_{kk} : a fa korona közép magassága
- v: szélesebbesség
- ρ_{fa} : faanyag élő nedves sűrűsége
- ρ_{lev} : levegő sűrűsége
- c: fa aerodinamikai ellenállás tényezője, lásd a 2. táblázatot
- A_{korona} : korona felülete a szélirányból
- σ_{nysz} : nyomó szilárdság
- σ_{nyf} : nyomó feszültség
- g: 9,81 m/s²

A fa törzse mindaddig biztonságban van, amíg a mechanikai feszültségek a faanyag szilárdságát el nem érik. Ennek alapján a törzs törésére vonatkozó biztonsági faktort (SF) tudunk származtatni a következő módon:

$$SF = \sigma_{nysz} / \sigma_{nyf}$$

A nyomószilárdság fafaj függő, megtalálható a 2. táblázatban. A nyomó feszültség az önsúlyból és a hajlításból számolható a következő formulával.

$$\sigma_{nyf} = \frac{g \rho_{fa} H_{fa}}{(1-d^2/D^2)} + \frac{F_{sz} H_{kk} D/2}{\pi/64 (D^4 - d^4)} \quad (6)$$

ahol az első tag az önsúlyból származó nyomó feszültséget adja azzal az egyszerűsítéssel, hogy a fa teljes tömegét a D átmérőjű, H_{fa} magasságú ρ_{fa} sűrűségű henger tömegével számoljuk. Tapasztalatok alapján ezzel felülről becsüljük a fa tömegét. A 10-20%-os túlbecslés azért megengedhető, mert a nyomófeszültség túlnyomó részben (akár 90-95%) a szélterheléstől származik. A tőben levő korhadás okozta önsúly csökkenést elhanyagoltuk. A második tag a szélterhelésből származó – a neutrális száltól való legnagyobb távolságban (D/2) ébredő nyomó feszültséget adja. A szélerő (F_{sz}) értékét a következő formulával számolhatjuk:

$$F_{sz} = \frac{\rho_{lev}}{2} v^2 A_{korona} c \quad (7)$$

A javasolt szélesebbesség értéke 120km/ó a legtöbb esetben, hegytetőn, széljárta területen ennél nagyobb érték indokolt. Ha a nyomó feszültség meghatározó tagjában elhanyagoljuk a korhadást (d=0), akkor a nyomó feszültség az átmérő köbével fordítottan arányos. A biztonsági faktor az átmérő köbével lesz arányos. Ha 14%-kal növekszik az átmérő a biztonsági faktor közel 50%-kal fog növekedni. Ezért

tapasztaljuk, hogy a korhadó tövű lucfenyő szoknyásodik – vastagítja önmagát, hogy a stabilitása a korhadás ellenére fennmaradjon.

Ha a törzs elkezd korhadni, csővé alakul, akkor a stabilitás eleinte alig csökken. Ha a korhadás átmérője a törzs átmérőjének felét eléri, a stabilitás vesztes, a biztonsági faktor csökkenés 6% mindössze. Ha a korhadás átmérője a törzs átmérőjének háromnegyedét eléri, a stabilitás vesztes, a biztonsági faktor csökkenés 32%. Ez a számítás csak ép csőre vonatkozik. Ha a gombakárosítás miatt, vagy fagyrepedés, esetleges mechanikai sérülés miatt a cső megsérül, felhasad, a fenti megközelítés érvényét veszíti, jelentős stabilitás csökkenést eredményez.

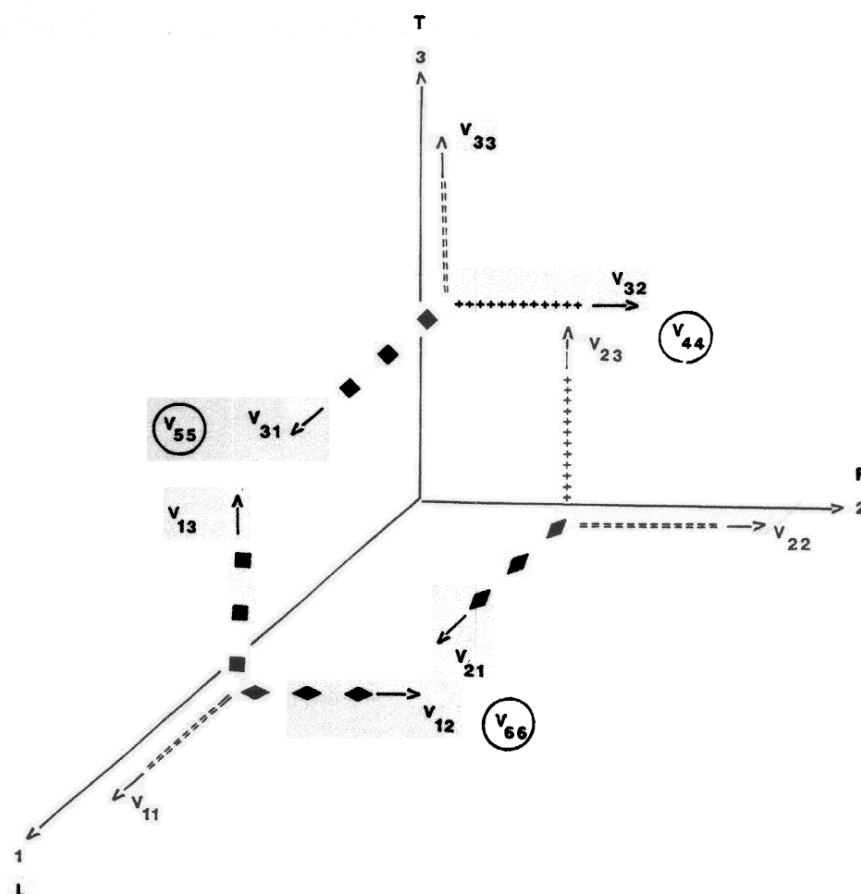
A bemutatott példa jól nevelt fára vonatkozik: egyenes állású, kör alakú törzs keresztmetszet, a korhadás szintén kör alakú és centrális elhelyezkedésű. A valóság ennél színesebb és összetettebb. A fák a szélirányba dőlnek, a törzs mérete, alakja, a belső korhadás nem szabályos. Ennek a helyzetnek a kezelésére az akusztikus tomográfia bevett gyakorlatnak számít.

4. Akusztikus tomográfia, a fatörzs belső vizsgálata

Hangsebesség mérésével a fa törzsében levő üregek és korhadások mérete és elhelyezkedése megtalálható. Már több mint 10 éve létezik és használják is a gyakorlatban azt a technikát, mely a fába beszúrt kettő darab érzékelő között méri a hang terjedési sebességét. A sebesség csökkenése jelzi a két érzékelő által kijelölt vonalon a korhadás jelenlétét. Az érzékelő szám növelésével lehetőség kínálkozik a vizsgált síkban a korhadás helyének és nagyságának meghatározására.

4.1. Hang terjedése az élő fában

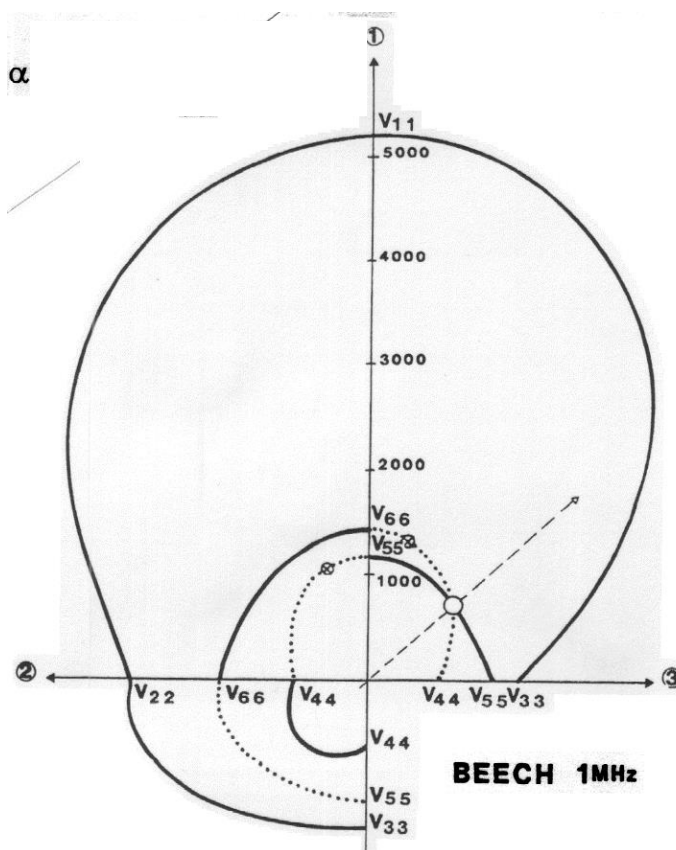
A faanyagban longitudinális és transzverzális hullámok terjednek. A terjedési sebesség függ az anatómiai iránytól, 11. ábra. Az anatómiai irányokat a következő módon jelöljük: rostirány (L), radiális irány (R), mely a bétől a kéreg felé mutat és merőleges a rostokra, valamint a tangenciális irány (T) mely érinti az évgyűrűket és merőleges a rostokra. Az egyszerűség kedvéért az L, R és T irányokat 1, 2 és 3 irányoknak is jelöljük.



11. ábra

Longitudinális (V_{11} , V_{22} és V_{33}) és transzverzális (V_{12} , V_{13} és V_{21} , V_{23} , V_{31} és V_{32}) hullámok a faanyagban. Az L, R és T irányok a rost, radiális és tangenciális irányok. (Bucur 1995)

A hang hullámfront közel ellipszoid felület. A 12. ábrán együtt látjuk a longitudinális és transzverzális hullámfrontok adott síkokra vetített görbéit. A görbe origótól való távolsága arányos a hangsebességgel. A leggyorsabban a longitudinális hullámok terjednek. Rostirányban meghaladja az 5000m/s-ot, radiális és tangenciális irányban megközelíti a 2000 m/s-ot. A hangsebesség adatok függenek a fafajtól és a nedvesség tartalomtól is. Akácban a longitudinális hullámok radiális sebessége megközelíti a 2000 m/s-ot, míg feketenyár esetében alig nagyobb 1000 m/s-nál. A nedvességtartalom függés a rosttelítettség alatt jelentős. Szerencsére élő fák esetében a nedvességtartalom mindig a rosttelítettség feletti, ahol a hangsebesség nedvességtartalom függését elhanyagolhatjuk. A hőmérséklet függés nem jelentős, de ugrásszerű a változás fagyás környékén. Ezért az akusztikus vizsgálatok végzését nem javasoljuk +3 (+5) fok alatt.



12. ábra
Longitudinális és transzverzális hullámok sebessége
az anatómia irány függvényében bükkfa esetén (Bucur 1995)

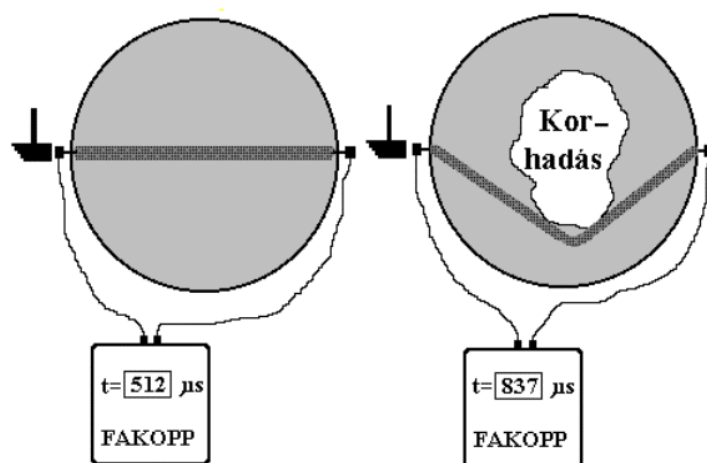
A hangsebesség adatok függenek a fafajtól és a nedvességtartalomtól is. Néhány jellemző radiális és rostirányú hangsebességet tartalmaz az 3. táblázat.

3. táblázat
Néhány fafaj jellemző hangsebesség adata.

Fafaj	Radiális hangsebesség [m/s]	Rostirányú hangsebesség [m/s]
Nyárfa	1240	4200
Lucfenyő	1470	5200
Feketefenyő	1480	5100
Vörösfenyő	1490	5100
Tölgy	1620	4600
Bükk	1670	4900
Hárs	1690	4400
Juhar	1690	4800
Akác	1950	4700

A rostirányú hangsebesség a tűlevelű fákban nagyobb, mint a lombhullató fákban. A nedvesség tartalomtól való függés elsősorban a 0-30%-os tartományban meghatározó. A rosttelítettség (30%) felett a cellulóz rostok állapota már nem változik és a hangsebesség lényegében független a nedvességtartalomtól. Mivel élő fák esetében mindig rosttelítettséget meghaladó nedvességtartalomról van szó, ezért a nedvességtartalomtól való függés nem zavarja az élő fák vizsgálatát.

A hang terjedését üreg vagy korhadás jelentősen befolyásolja (Betthge, Matteck, 1993). A korhadást gombák okozzák és két fő csoportja van: barna és fehér korhasztó gomba. A barna korhasztó gomba a fehér cellulózt bontja, ami felelős a hang továbbításában. A bontás végeztével a barna színű lignin marad vissza. (A faanyag két fő alkotó része a lignin és a cellulóz.) A fehér korhasztó gomba a lignint bontja le a fában. A barna korhasztott faanyag jó közelítéssel üreggel helyettesíthető. A fehér korhasztó gomba akusztikus detektálása nehéz, mert csak kismértékben változtatja meg a faanyag akusztikai tulajdonságait. Előrehaladott bontás azonban kimutatható.

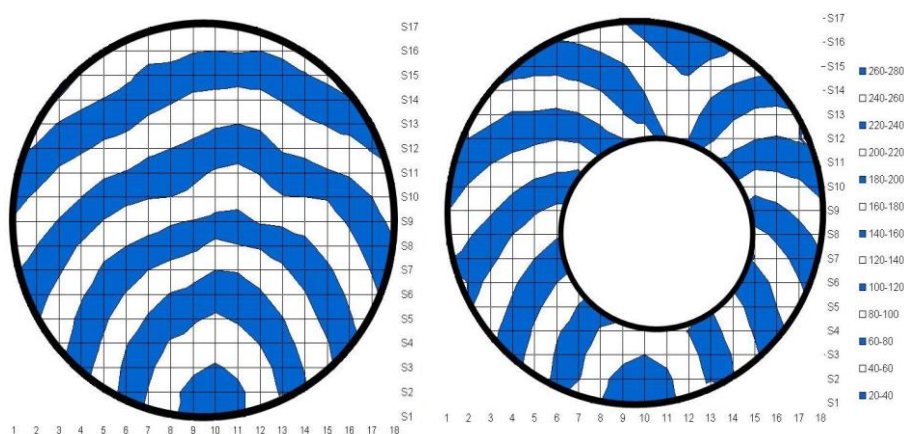


13. ábra

A hang terjedési ideje egészséges és korhadt fában rostirányra merőlegesen.

A hang elképzelt útját a szürke vonal jelzi.

A hang természetesen nem a 13. ábrán felrajzolt vonal mentén terjed, hanem a hullámfront végighalad a faanyagban. Ha a koppintással keltett hang frontját 36 cm átmérőjű tölgyfában az RT síkban (merőlegesen a rostokra) 20 μ s-os lépésekben feltérképezzük, akkor a 14. ábrához hasonló képet kapunk. Ha ugyanebbe a fakorongba 12 cm átmérőjű lyukat fúrunk, a hang hullámfrontja megváltozik. Ez a két hang hullámfront látható a 14. ábrán. A hang a korong aljáról indul és a túloldalra késve érkezik meg.



14. ábra

A hang hullámfrontja a rostokra merőlegesen 20 μ s-os lépésekben egészséges és üreges fában.

Az akusztikus favizsgálat megbízható fizikai alapon nyugszik.

4.2. Hangsebesség mérése élő fában, akusztikus tomográfia

Két gyorsulásérzékelőt szúrunk a vizsgált fára. A gyorsulás érzékelő tűskével van ellátva azért, hogy a hangot a kérgen átvezesse. A hang keltését a gyorsulásérzékelőre mért kalapácsütéssel keltjük. A megütött érzékelő jele elindít egy számlálót, mely az

1MHz-es oszcillátor impulzusait számolja. Amikor a hang megérkezik a fa túloldalára, akkor annak jele megállítja a számlálót és így előáll a terjedési idő μs -os felbontásban. Mivel a legelőször megérkező jel állítja meg a számlálót, a leggyorsabban terjedő longitudinális hullám terjedési idejét mérjük. Az említett elven működik a Fakopp mikroszekundumos óra. Használat közben látható a berendezés a 15. ábrán.



15. ábra

Hang terjedési idejének mérése a gyakorlatban és a használt gyorsulásérzékelő közelről.

Az értékelés alapja a mért hangsebesség. A hangsebesség kiszámításához még meg kell mérni az érzékelők közti távolságot átlalóval (óriás tolómérő). Az értékelése a relatív hangsebesség csökkenés alapján történik, viszonyítási alap az egészséges fa hangsebessége. A 10%-os csökkenést meghaladó hangsebesség csökkenés esetében joggal feltételezhetjük, hogy az érzékelők által kijelölt útvonalban hiba (üreg vagy korhadás) található (Divós, Mészáros 1994).

Ha kíváncsiak vagyunk a korhadás helyére és nagyságára is, akkor nem elegendő csupán egyetlen vonal mentén mérni a hangsebességet, hanem több pont között kell elvégezni a mérést.

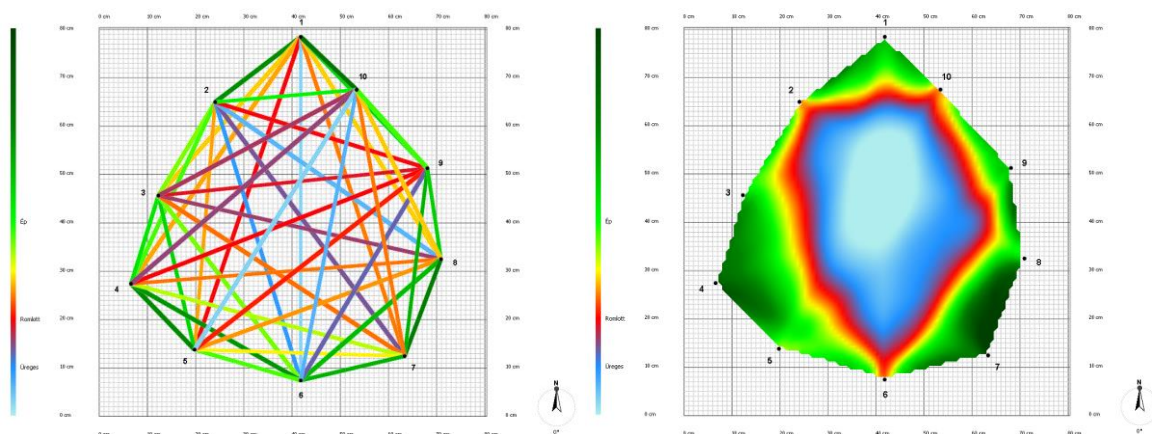
Az érzékelők számának növelésével egyre jobban, egyre érzékenyebben fedjük le a vizsgált keresztmetszetet. Ha az érzékelők száma n , akkor $n(n-1)/2$ útvonalon tudjuk meghatározni a hangsebességet. Az érzékelők számának növelésével lehetőség kínálkozik a felbontás növelésére. A gyakorlatban a 10 és 12 érzékelős akusztikus favizsgáló készülékek terjedtek el. Ritkán, kutatási céllal használnak nagyobb csatornaszámot. Az egyik érzékelőt megkoppintva az összes többi érzékelő megméri a hang beérkezési idejét. Az érzékelők közti távolság adatokat szintén átlalóval határozzuk meg, háromszögeléses módszerrel, n érzékelőhöz $2n-3$ úthosszt kell mérni. A 16. ábrán egy bükkfán látható az ArborSonic 16 csatornás akusztikus tomográf. A 17.

ábrán 2D-s eredmények láthatók, egy beteg lucfenyő vizsgálatának eredményei. A mért vonalsebességeket látjuk a bal oldalon. A színek jelzik a mért hangsebesség nagyságát. Zöld jelöli az egészséges sebességet. A jobb oldalon pedig az inverziós eljárás (filtered back projection) segítségével visszaállított hangsebesség eloszlás térképet látjuk. A színek itt is hangsebességet jelölnek. Az alacsony hangsebességű területek jelölik a korhadt vagy üreges területeket. Gyűrűs elválás a fában szintén üregként jelentkezik. Ha több szinten végzünk 2D-s vizsgálatokat azokat egybe fűzve 3D-s állapot felmérések is készíthetők. Erre mutat egy példát a 18. ábra egy (csaknem) egészséges és egy beteg lucfenyő esetében (Buza Ágnes).



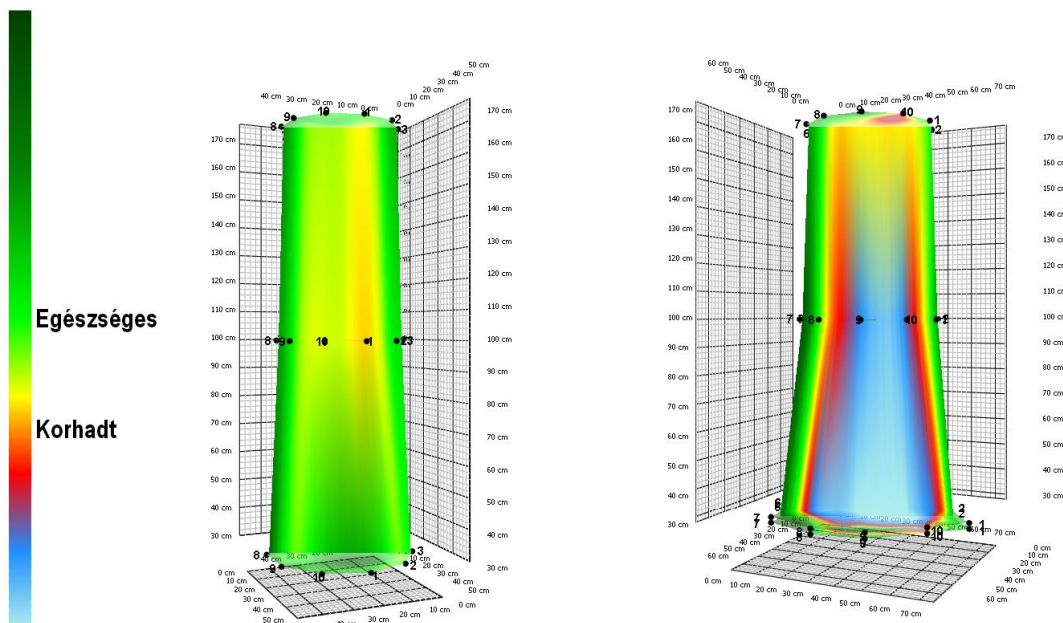
16. ábra

Akusztikus tomográf 16 csatornás elrendezésben bükkfa vizsgálatra közben.



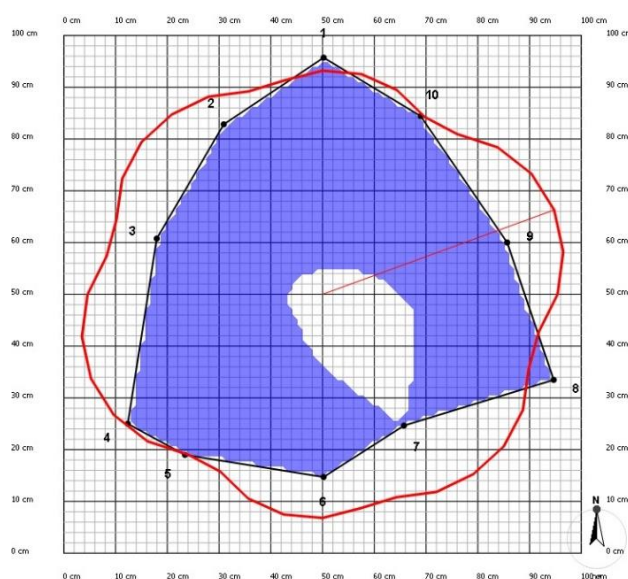
17. ábra

Akusztikus tomográfia „mérési vonalai” (balra) és az adatokból számolt kép (jobbra)



18. ábra
A 2D-s képekből készíthető 3D-s modellek

Az akusztikus tomográfia jelentősége elsősorban abban áll, hogy a feltárt belső állapot ismeretében statikai vizsgálatra nyílik lehetőség. A valós geometriai alak, a dőlés és a belső állapot figyelembevételével. Mivel nem tudjuk, hogy melyik irányból érkező szélre készülünk, ezért 5 fokos lépésekben valamennyi irányban kiszámoljuk a nyomófeszültséget. A 19. ábrán a nyomófeszültség nagyságát a piros vonal origótól mért távolsága jelzi. Az akusztikus tomogramot leegyszerűsítve tudjuk a számításokhoz felhasználni. A teherhordó részek kékkel láthatók, a korhadt, vagy üreges részek fehérek. A biztonsági faktor számításánál mindig a legkedvezőtlenebb szélirányt vesszük figyelembe.



19. ábra
A nyomófeszültség szélirány függése a vizsgált magasságban.

A feszültség számításához szükséges a korona terület és a korona közép magasságának meghatározása. Ez a fáról készült fotó segítségével lehetséges. A fotó kalibrálása a fa magasságával lehetséges. A 20 ábrán a kalibráló egyenes kék, a dőlésszöget mérő vonal sárga.



20. ábra
A korona adatait fotó segítségével lehet biztosítani.

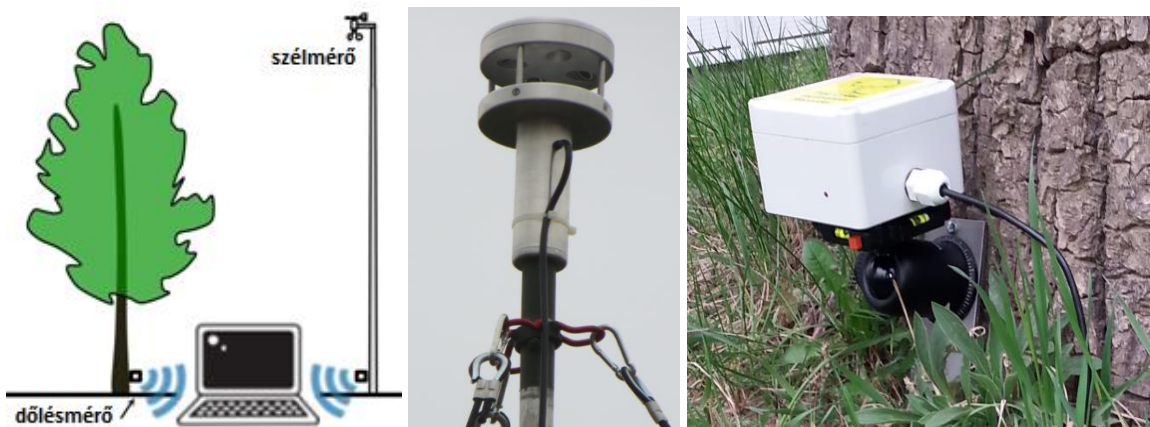
5. Dinamikus gyökérvizsgálat

A húzás vizsgálat az egyetlen régóta elfogadott módja a gyökér stabilitás vizsgálatának. A húzás vizsgálat - bár elfogadott - mind megbízhatóság tekintetében, mind a használat egyszerűségét illetően számos hátránnyal rendelkezik. A legjelentősebb kifogások a húzás során a fát a talaj felé is nyomó erőhatás, illetve a húzás statikus jellege.

Új (2016) koncepciónk, a húzóvizsgálathoz több tekintetben hasonló dinamikus gyökérstabilitás-vizsgálat. A húzó készülék helyett a szélre bízuk a terhelést. Ennek következtében a vizsgálat csak szeles időben végezhető el, de a terhelés valóságos dinamikus terhelés. Egyszerre több fa is vizsgálható. Egy időben annyi fát vizsgálhatunk, ahány dőlésmérővel rendelkezünk. Ez jelentősen megnöveli a vizsgálat „termelékenységét”. Az értékelés hasonló a húzó vizsgálat értékeléséhez. A fa tövének dőlését mérjük és ábrázoljuk a szélnyomás (p_{sz}) függvényében. A képletben a ρ_{lev} a levegő sűrűsége, v pedig a szélesebesség.

$$p_{sz} = \frac{\rho_{lev}}{2} v^2 \quad (8)$$

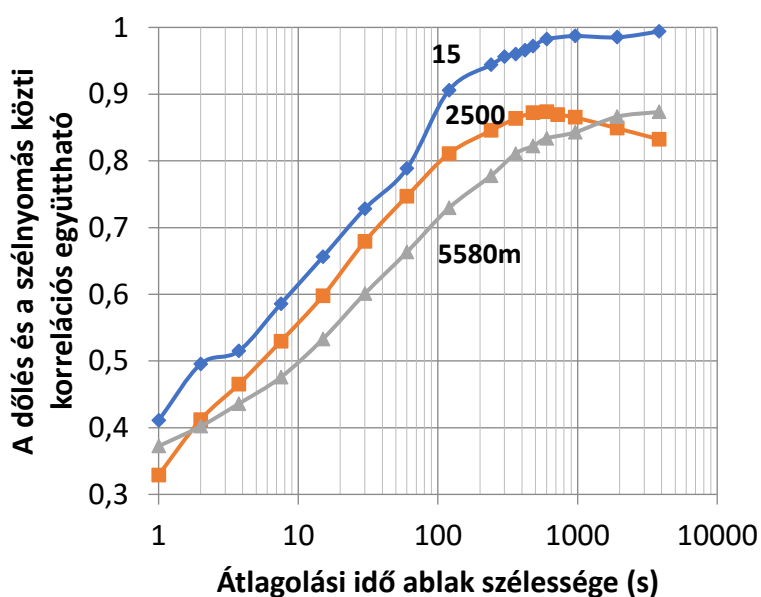
Determinisztikus gondolkodásunk szerint a szél hatására a fa reagál, nagyobb széllelökés nagyobb dőlést eredményez. Meglepő módon ez nem így van. Ugyanis a fa a széllelökés okozta erőhatást igyekszik időben elkenni/elosztani úgy, hogy az ágainak mozgásával a széllelökés hatását csillapítani tudja – lényegében egyensúlyozik a szélben. A szél – fa – gyökér rendszer együttműködése egy bonyolult rendszer. Dinamikus, mert a szél erő az időben változik, az anyagok – a fa és a talaj – nemlineáris tulajdonságokkal rendelkezik. Ezzel egy bonyolult, nemlineáris dinamikus rendszerként tudjuk a fák viselkedését a szélben leírni. Éppen ezek a determinisztikus káosznak a feltételei. El kell fogadni, hogy a determinisztikus gondolkodásnak határai vannak, a fák viselkedése a szélben nem – vagy csak nagy nehézségek árán írható le determinisztikusan. A káosz törvényeit kell figyelembe venni. Egy alapvető törvény szerint a kaotikus rendszer statisztikus paraméterekkel írható le. Nem a pillanatnyi dőlést és szélesebességet ábrázoljuk, hanem egy megválasztott idő ablakban – jellemzően 5 perc – a dőlés és a szél statisztikailag értelmezett értékeit használjuk. A 21. ábrán látjuk a dinamikus gyökérvizsgálat elrendezését és a használatos eszközöket.



21. ábra

A dinamikus gyökérvizsgálat elrendezését és a használatos eszközök: dőlés mérő és szél mérő.

Vizsgáltuk a statisztikai értékeléshez használatos „átlagolási” idő ablak szélessége és az elérhető korreláció összefüggését. Ezek az adatok láthatók a 22. ábrán. Az 1 másodperchez tartozó korrelációs együttható 0,3 -0,4. Ez R^2 -ben kifejezve 0,09 és 0,16 – rendkívül gyenge, lényegében a kísérleti adatok is megerősítették, hogy nincsen közvetlen összefüggés a szélnyomás és a fa törvének dőlése között. Ha szélesítjük az idő ablakot, a korreláció növekszik, a 0,9-es értéket is meghaladhatja. Ez gyönyörű bizonyítéka a determinisztikus káosznak.



22. ábra

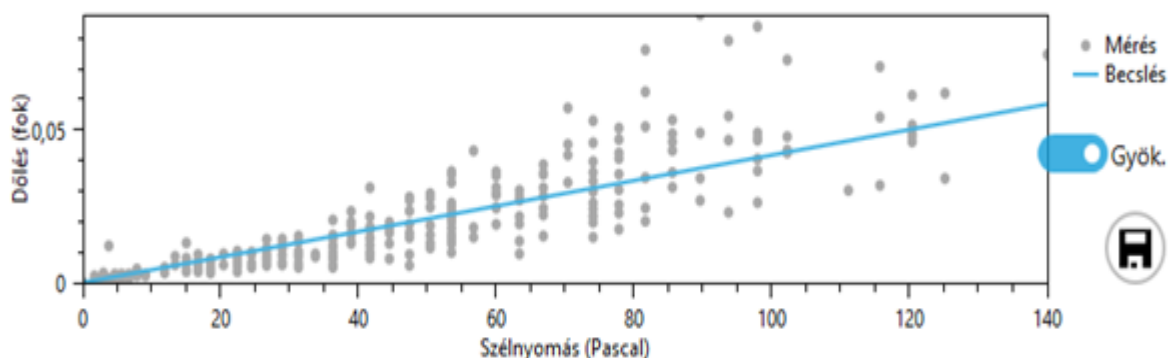
A dőlés és a szélnyomás közti korreláció és a statisztikai időablak szélessége közti összefüggés

Vizsgáltuk a fa és a szél mérő közötti távolság hatását a korrelációra. Minél közelebb van a szél mérő a fához, annál nagyobb lesz a korreláció. Meglepő módon még 5 km távolság esetén is tapasztalható volt értékelhető korreláció.

A biztonsági faktor (SF) a kritikus forgatónyomaték (M_{krit}) és a számításba vett legnagyobb szélesség által létrehozott forgatónyomaték ($M_{szél}$) hányadosa.

$$SF = \frac{M_{krit}}{M_{szél}} = \frac{A_{korona} p_{krit} c h_{kk}}{A_{korona} p_{szél} c h_{kk}} = \frac{p_{krit}}{p_{szél}} \quad (9)$$

A kritikus szélnyomást (p_{krit}) a dőlés-szélnyomás mérési pontokra illesztett tangens függvény segítségével határozzuk meg. Ahol a tangens függvény a végtelenbe tart, az lesz a kritikus szélnyomás értéke. A_{korona} a korona területe, c az ellenállási tényező, h_{kk} a korona középpontjának magassága. A 23. ábrán a mérési pontok és az illesztett görbe látszik. A korrelációs együttható 0,91!



23. ábra

A „átlagolt” dőlés és a szélnyomás közti összefüggés nyárfa esetében.

A 9-es számú egyenlet mutatja be a módszer szépségét. A biztonsági faktor meghatározásakor a A_{korona} a korona területe, c az ellenállási tényező és a h_{kk} a korona középpontjának magassága egyszerűen kiesik. Hiszen a kritikus szélnyomás és a méretezési szélnyomás esetében ugyanazon fa adatait kell felhasználni. A méretezési szélnyomás 120 km/ó szélesség esetén 667 Pa-nak felel meg.

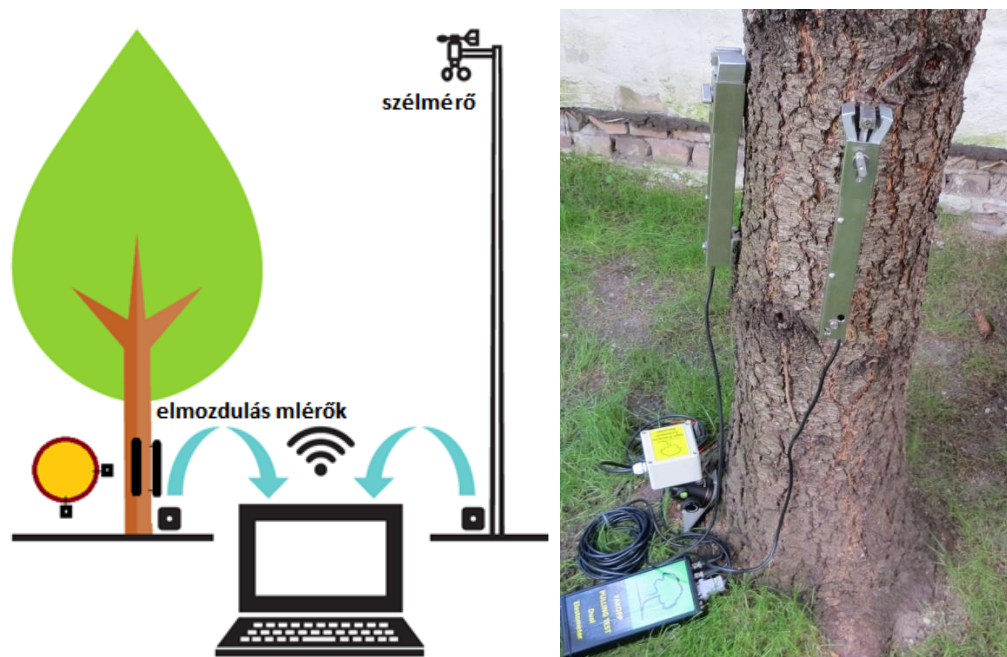
A dinamikusan meghatározott biztonsági tényező az adott viszonyokra vonatkozik.

- Ha az uralkodó szélirányban történtek meg a mérések, akkor a biztonsági faktor az uralkodó szélirányra merőlegesen akár 20%-kal alacsonyabb lehet.
- Ha száraz talaj esetén történt meg a dinamikus gyökérvizsgálat, a felázott talaj esetén 15%-kal alacsonyabb lehet a biztonsági faktor.
- Ha a dinamikus vizsgálat után a fa közeléből fákat vagy épületet távolítanak el, a biztonsági faktor le fog csökkenni.
- Ha a vizsgált fa koronáját lecsökkentik, akkor a biztonsági faktor meg fog nőni.
- A lobbullató fákat nyáron vizsgáltuk, akkor télen a biztonsági faktor egy KICSIT megnövekszik.

Meggyőződésem, hogy a dinamikus favizsgálat idővel a meghatározó vizsgálatok közé fog tartozni. A vizsgálat feltétele, hogy a legnagyobb széllekés sebessége érje el a 25 km/ó sebességet.

6. Dinamikus törzs vizsgálat

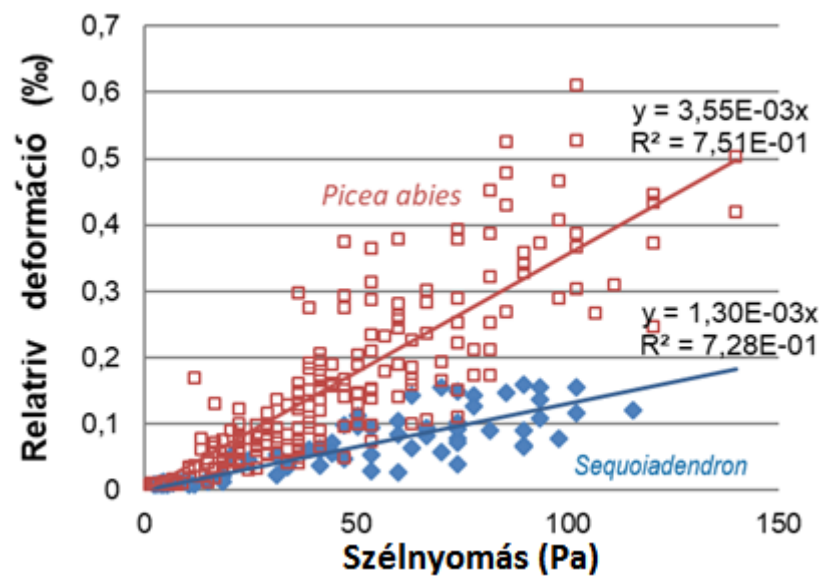
Ahogy a gyökérvizsgálatot sikeresen dinamikussá lehetett alakítani, hasonló módon a törzs vizsgálatot is dinamikussá alakíthatjuk. Ez esetben a törzsre a bétől számítva 90°-os elrendezésben két elmozdulás mérőt helyezünk fel és mérjük a szélességet. Az elrendezés és a felhasznált eszközök a 24-es ábrán láthatók. Azért használunk egy szintben 2 elmozdulás mérőt, mert nem ismerjük a szélirányt. A két elmozdulás mérő segítségével – Pitagorasz tétel segítségével kapjuk meg a törzs deformációját. A kritikus szélnyomás meghatározásához a rugalmasság határát ismerni kell (2. táblázat).



24. ábra

A dinamikus törzs vizsgálat elrendezése és a használatos eszközök.

A dinamikus törzs vizsgálat valóban új, 2017 szeptember hónapban ismertettük először Madisonban (USA, WI) a Nemzetközi Roncsolásmentes Faanyagvizsgálati Konferencián.



25. ábra

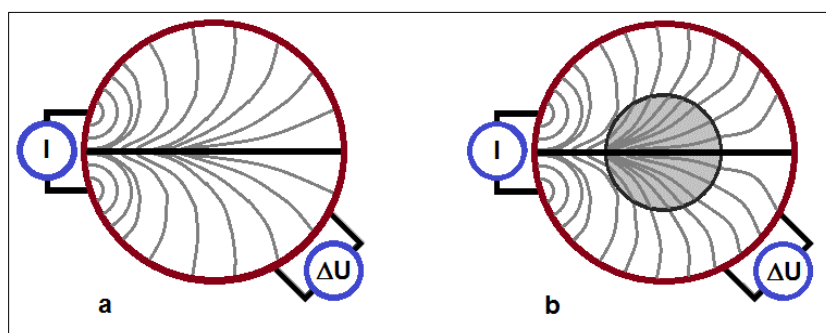
*Lucfenyő és mamutfenyő törzsének dinamikus vizsgálata.
A kapcsolódó biztonsági faktorok: 0,97 és 4,61*

7. Impedancia tomográfia

Az élő fán alkalmazott impedancia tomográfia is a belső szerkezetről, annak elváltozásáról ad információt. 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 talaj víztartalma túl bizonytalaná teheti 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 kifelé 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 21. ábrán.



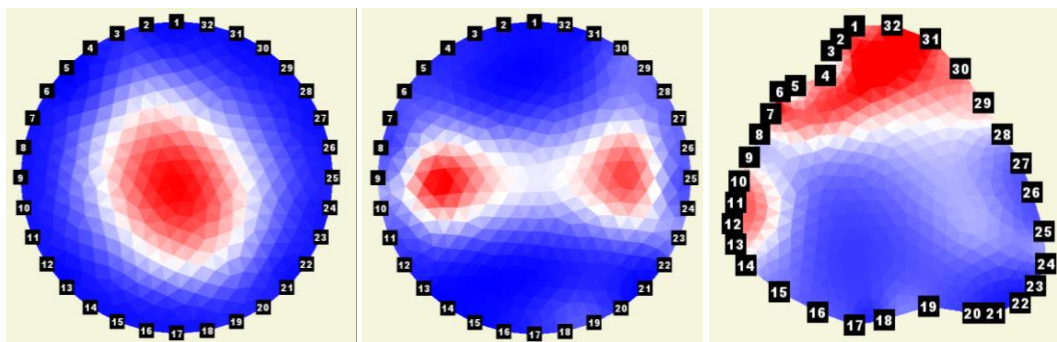
21. ábra

Az elektromos mező modellje

homogén ellenállású anyagban (balra), és inhomogén ellenállású anyagban (jobbra)

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.



22. ábra

*Egészséges fenyő (balra) beteg (középen) és egészséges bükk (jobbra)
fák impedancia tomográfiás képei*

Az impedancia tomográfia kimutathat egy kezdődő gombafertőzést, a nedvességtartalom évszakos változását, vagy akár az álgeszteket is, a fa egészségességéről ad általános információt. Néhány vizsgálati eredményt mutat a 22. ábra.

8. Összefoglaló

Zavarba ejtően sokféle műszeres favizsgálati technika áll rendelkezésre a fák stabilitásával foglalkozóknak. Zárásként ebben szeretnénk egy kis segítséget nyújtani.

Gyökér vizsgálata:

- **Húzó vizsgálat**, lassú, 1-2 óra/fa, elfogadott, szélben nem használható, sok elágazással bíró „bokorszerű” fa esetén nem végezhető. Egyedül álló fa esetére ad biztonsági faktort. A vizsgálat statikus, míg a szél terhelése dinamikus. Szeles időben nem használható.
- **Dinamikus** vizsgálat, sok dőlésmérő esetén nagyon gyors, viszonylag új módszer, csak szél esetén használható. A vizsgálat követelménye, hogy a legnagyobb széllelőés sebessége érje el a 25 km/ó sebességet.

Törzs vizsgálata

- **Húzó vizsgálat**, lassú, 1-2 óra/fa, elfogadott, szélben nem használható, sok elágazással „bokorszerű” fa esetén nem végezhető. Egyedül álló fa esetére ad biztonsági faktort. A vizsgálat statikus, míg a szél terhelése dinamikus. Szeles időben nem használható.
- **2 érzékelős akusztikus** vizsgálat. Gyors, de csak a nagy üregek kimutatására alkalmas
- **Akusztikus tomográfia**, elterjedten alkalmazott, képet alkot a vizsgált fatörzs belső állapotáról. Biztonsági faktort határoz meg. Az eredmény a színes képnek köszönhetően jól kommunikálható.
- **Dinamikus** vizsgálat, sok elmozdulás mérő esetén nagyon gyors, új ígéretes módszer, kevés tapasztalat áll mögötte, csak szél esetén használható. A vizsgálat követelménye, hogy a legnagyobb széllelőés sebessége érje el a 25 km/ó sebességet.
- **Impedancia tomográfia** kiegészítő vizsgálat, az aktív gombatevékenység helyeit teszi láthatóvá, biztonsági faktort nem szolgáltat.

Egy éve még úgy tűnt, hogy a műszeres fa vizsgálatok eszköztára tovább már nem bővül. Ma már elképzelhető egy olyan fa felügyeleti rendszer, amikor a fa folyamatosan fel van műszerezve, és akár percenként rádiós kapcsolattal információt küld egy felügyeleti központnak az állapotáról.

Remélem, hogy ezen tanulmány segíti a fákkal kapcsolatos közös gondolkodást mérnökök, faápolók, kertészek és erdészek között.



9. Irodalomjegyzék

- [1] Bejo L., Divos F., Fathi S., 2017: Dynamic Root Stability Assessment — Basics and Practical Examples Proceedings 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, Madison, Wisconsin USA pp 270-276, https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr249.pdf
- [2] Bucur, V. 1995: Acoustics of wood. CRC Press, Boca Raton, USA
- [3] Búza Ágnes Kinga, doktori értekezés: Élő fák stabilitása – az ágak és a gyökérzet vizsgálata, Nyugat-magyarországi Egyetem, (2016)
- [4] Divos F, Major B., 2017: Dynamic Tree Trunk Stability Evaluation, Proceedings 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, Madison, Wisconsin USA pp 161-166 https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr249.pdf
- [5] Divos, F. and Mészáros, K., 1994: Root decay detection by stress wave technique. In Proc. of the first European Symposium on Nondestructive Testing, Sopron, Hungary, 524
- [6] Engineering toolbox: https://www.engineeringtoolbox.com/weight-wood-d_821.html
- [7] Eurocode 1-4 : Actions on structures – Wind actions
- [8] Kenneth R. James, et al.: Tree Biomechanics Literature Review: Dynamics, Arboriculture & Urban Forestry 2014. 40(1):1–15-v
- [9] Lajos Tamás, Az áramlástan alapjai, 14. fejezet, Az áramlásba helyezett testekre ható erő, Magyar Elektromos Könyvtár, <http://mek.oszk.hu/00500/00584/00584.pdf>
- [10] Mattheck, C.G. and Bethge, K.A, 1993: Detection of decay in trees with the Metriguard Stresswave timer. In Journal of Arboriculture 16(6): 374-378
- [11] Szallai Vilmos, Faápolás, saját kiadás, 2017
- [12] Veperdi Gábor, Erdőbecslés, oktatási segédanyag, Soproni Egyetem, 2008 http://www.nyme.hu/fileadmin/dokumentumok/emk/moi/TantKovetelm/Erd_becslestan_2008.pdf
- [13] Wessolly, L., and M. Erb 1998. Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. Patzer Verlag, Berlin

A sorozat keretében eddig megjelent kiadványok

2017.

1.	NÉMETH András, MILÁVE CZ Richárd	Iparban használatos vízminőségek
2.	DR. SZILÁGYI Zsombor, DR. SZUNYOG István	Mérések a gáziparban
3.	DR. BARNA Lajos, EÖRDÖGHNÉ DR. MIKLÓS Mária, DR. SZÁNTHÓ Zoltán, DR. BALLA József	A biztonságos ivóvízellátás megteremtésének tervezési eszközei
4.	BORBÁS Lajos Dr.	Felépítés elvű (additív) gyártástechnológiák a gépészetben
5.	BERENCSI Miklós, BERE CZKY Ákos, HORVÁTH László, KOVÁCS Gergely, MIHÁLFFY Krisztina	Kerékpárosbarát közlekedéstervezés
6.	TÜDŐS Tibor, DR. VARJÚ György, DR. PETRI Kornél, GÁBOR András	A csillagpontkezelés legújabb külföldi és hazai eredményei (Útmutató és tervezési segédlet)
7.	DR. GARBAI László, DR. JASPER Andor, VÁRADI András	Fűtési és használati melegvíz-igények kockázati elvű méretezése példákkal
8.	KÁDI Ottó, DOHÁNY Máté, JÓZSA Bálint, LÁSZLÓ Csaba Tibor, JAKKEL Ottó	A közúti vasutak (villamos) tervezésével kapcsolatos kézikönyv

2018.

9.	BLAZSOVSZKY László	A gázfogyasztó készülékek égéstermék elvezetésével kapcsolatos szabályozások hiányosságai és ellentmondásai
10.	CSORDÁS Szilveszter, FORGÁCS Lajos Dr., PÓLYA Endre ifj., RÉV Zoltán, UDVARDY Péter	Orvostechnológiai továbbképzés ismeretanyaga
11.	NÁDASDY Tamás, EGYHÁZY Zita, KOVÁCS Ákos Sándor, SZECSŐ Dániel Géza	A közúti biztonsági audit (KBA) jelentések elkészítésének alkalmazási segédlete – A közúti infrastruktúra közlekedésbiztonsági kezeléséről szóló jogszabályhoz és utügyi műszaki előíráshoz kapcsolódó értelmezési, kidolgozási és elfogadtatási javaslatrendszer
12.	DR. SZILÁGYI Zsombor, HORÁNSZKY Beáta	Földgáz kereskedelem (mérnöki segédlet)
13.	DR. SZILÁGYI Zsombor	Az energiahordozók jövője – kőolaj, földgáz, megújulók
14.	S. VÍGH Judit, DOHÁNY Máté	Magános közlekedők baleseti súlyosságának csökkentése mobil applikáció segítségével
15.	DR. BALIKÓ Sándor, DR. CSÚRÖK Tibor, NOVÁK Dániel, ORBÁN Tibor, DR. ZSEBIK Albin	Ötletlapok I. – Energiahatékonyság növelő ötletek egyszerű energetikai és gazdasági számításai
16.	DARABOS Zoltán, KOLTAI Henrik, SZABÓ Tamás, SZÁSZ Béla, VAJDA Sándor	Felvonók felújítása és átalakítása – Műszaki segédlet
17.	TÜDŐS Tibor, KRUPPA Attila	Alapozásföldelők új tervezési elvei és kivitelezési módszerei – Tervezési segédlet és kivitelezési útmutató
18.	FENYVESI Zsolt	Tűzvédelmi tervek tartalmi szabályainak átdolgozása

19. GÁBORI László Dr., BEINSCHRÓTH
József Dr., NÓGRÁDI Gábor, RÁTKAY
Tamás
- Nagyméretű informatikai beruházásoknál
(fejlesztéseknél) ajánlott szoftveroldali
tervdokumentációk tartalmi elemeinek meghatározása (I.
– II. kötet)