

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

**LAKOTT TERÜLETEK DÍSZFÁINAK EGÉSZSÉGI ÉS
STATIKAI VIZSGÁLATAI**

Készült a Nyugat-magyarországi Egyetem
Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskolája
E1 Erdei ökoszisztémák ökológiája és diverzitása programja keretében.

Kelemen Géza

Témavezető: Dr. Varga Szabolcs

Sorszám: 342.

Sopron, 2014

LAKOTT TERÜLETEK DÍSZFÁINAK EGÉSZSÉGI ÉS STATIKAI VIZSGÁLATAI

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében
 a Nyugat-magyarországi Egyetem Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok
 Doktori Iskolája
 E1 Erdei ökoszisztémák ökológiája és diverzitása programja keretében.

Írta:
 Kelemen Géza

Témavezető: Dr. Varga Szabolcs

Elfogadásra javaslom (igen / nem)

(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton % -ot ért el,

Sopron/Mosonmagyaróvár

.....
 a 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/Mosonmagyaróvár,

.....
 a Bírálóbizottság elnöke

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

.....
 Az EDT elnöke

Tartalomjegyzék

Kivonat	4
Abstract	5
1. Bevezetés.....	6
2. Célkitűzések	8
3. Szakirodalmi összefoglalás	10
3.1. A fák stabilitásának csökkenése	11
3.1.1. A farontó gombák hatása a fa stabilitására.....	10
A korhadás típusai	11
A fák védekezési mechanizmusa a gombákkal szemben, a CODIT-modell bemutatása	12
A farontó gombák által okozott károk mértékének ismertetése	15
3.1.2. A szél hatása a fák stabilitására	16
A szél tulajdonságai a fák szempontjából	16
Kritikus szélesség számítása a döntésre, illetve a törzstörésre	20
A GALES-modell	20
A HWIND-modell	21
A FOREOLE-modell	23
3.1.3. A gyökérszet szerepe	24
3.1.4. A fák törzsének szerepe a stabilitásukban.....	25
3.2. Állékonyságra vonatkozó favizsgálatok	26
3.2.1. Favizsgálati mutatók, indexek.....	26
3.2.2. Favizsgálat fúrásvizsgálattal	27
3.2.3. Favizsgálat húzásvizsgálattal	28
3.2.4. A favizsgálatok fő irányainak szemléletbeli különbségei	31
3.2.5. A tomográf alkalmazása a favizsgálatban	32
3.2.6. Favizsgálat elektromos potenciál méréssel	33
4. Anyag és módszer	34
4.1. Anyag	34
4.1.1. A vizsgálatba vont fafajok	34
4.1.2. A Kisasszony-vágási (Sajtoskál) cser	40
4.1.3. Húzásvizsgálatok helyszínei	40
4.1.4. Kidőlt, megdőlt fák vizsgálatai	40
4.1.5. A vizsgált fák élőhelye, termőhelyi viszonyai	42
4.1.6. A vizsgálatok helyszínei (szoliter fák helyének tipizálása)	44
4.2. A favizsgálatok módszere.....	45
4.2.1. Szemrevételezéses favizsgálatok	45
4.2.2. A felvett adatok köre	45

4.2.3. A törzs törésének lehetőségét jelző indexek	47
4.2.4. A tuskóval együtt történő dőlés lehetőségét jelző indexek	49
4.2.5. A hangtomográf vizsgálatok menete	50
4.2.6. A statikai favizsgálatok	51
A húzásvizsgálat	51
A kidőlt fák vizsgálata és az ebből levonható következtetések	53
4.2.7. A vizsgálatok kiértékelésének statisztikai módszerei	56
5. Eredmények.....	57
5.1. A hangtomográf vizsgálatok.....	57
5.1.1. Módszertani tapasztalatok.....	57
5.1.2. A Kisasszony-vágási (Sajtoskál) cser	60
A térbeli tomogram típusai	62
5.1.3. A mért adatokból számítható mutatók értékei	64
A vizsgált fák külső méreteiből számítható mutatók.....	64
Üreg, korhadás kiterjedésének mérése esetén alkalmazható indexek.....	72
A gyökérszet méreteire alkalmazható indexek.....	76
5.2. Húzásvizsgálatok	78
5.3. Statikai vizsgálatok kidőlés előrejelzése céljából.....	81
5.3.1. A vizsgált fák adatainak felvételezése	81
5.3.2. A szél erőhatása.....	86
5.3.3. A fa súlyából eredő erők	89
5.3.4. A gyökérszet súlyából eredő erők.....	89
5.3.5. A forgatónyomatékok egyensúlya.....	95
5.3.6. A dőléshez mért adatokból számítható mutatók értékei.....	96
5.3.7. A kiválasztott fák értékelése.....	98
5.3.8. A gyökérszetre vonatkozó további tapasztalatok.....	101
5.3.9. A terpsz és a kiemelkedő gyökérszóna, illetve a törzs különleges vastagodásainak szerepe a fák stabilitásában.....	103

6. Következtetések.....	107
6.1. A vizuális favizsgálatok, valamint a hangtomográf vizsgálatok tapasztalatai	107
6.1.1. Módszertani észrevételek, a tomográfos munkavégzés kapcsán.....	107
6.1.2. A több síkban, több időszakban végzett tomográf vizsgálatok tapasztalatai	107
6.1.3. A mért adatokból számítható mutatók.....	109
A magasság, átmérő, koronaméret alapján számítható mutatók.....	109
A korhadt rész vagy üreg jelenléte esetén értelmezhető indexek	110
A gyökérszet méreteinek mutatói	111
6.2. A húzásvizsgálatok tapasztalatai	112
6.3. A statikai vizsgálatok tapasztalatai a kidőlés veszélyességnek vonatkozásában....	113
6.3.1 A fák adataiból levonható következtetések	113
6.3.2. A szélterő hatások számításának tapasztalatai.....	114
6.3.3. Következtetések a fa súlyából eredő erők vonatkozásában.....	115
6.3.4. Következtetések a gyökérszet súlyából eredő erők vonatkozásában	115
6.3.5. Következtetések a forgatónyomatékok egyensúlyára vonatkozóan	116
6.3.6. A dőlésszámítás adataiból levonható következtetések.....	116
6.3.7. A kiválasztott fákra vonatkozó mérési eredményekből levonható következtetések.....	117
6.3.8. A gyökérszetre vonatkozó további tapasztalatokból levonható következtetések.....	118
6.3.9. A terpeszek, kiemelkedő gyökerek és más megvastagodások szerepe a fák állékonyságában.....	118
7. Az eredmények gyakorlati hasznosítási lehetőségei. Javaslatok	120
8. Összefoglalás.....	121
9. Tézisek	124
Köszönetnyilvánítás	127
Irodalomjegyzék.....	128
Mellékletek.....	136
Függelék	
I. A dinamikus favizsgálatok	
II. A tomogramon alapuló statikai vizsgálatok	
A tomogramon alapuló statikai vizsgálatok módszere	
A tomogramon alapuló statikai vizsgálatok eredményei	
A tomogramon alapuló statikai vizsgálatok tapasztalatai	

Kivonat

Jelen dolgozat a településeken illetve azon kívül, de közlekedéssel érintett, szoliter fák egészségi-stabilitási kérdésivel foglalkozik. Részletesen tárgyalja a kidőlésük vagy kitörésük okait, folyamatát és az állékonyságuk megismerésének vizuális és műszeres mérési és számítási módjait.

A szoliter fák vizsgálatára az elmúlt öt évben került sor, a termőhelyükön: utcákon, tereken, parkokban, kertekben, vagy mezőgazdasági utak mentén. Mindegyik fa vizsgálata megtörtént szemrevételezéses eljárással, emellett sokuknál hangtomográfus vizsgálatra is sor került. Számos fát statikai vizsgálat is érintett, továbbá néhány egyed adatfelvételére kidőlt állapotában került sor. A statikai vizsgálat és a kidőlt fák vizsgálata jelentős mennyiségű számítást is tartalmazott, a fa állékonyságának megismerése céljából.

A fák felvett adatai és állékonyságuk közötti kapcsolatok elemzése során több összefüggés is adódott, bár csupán közepes szorossággal. A magasság / átmérő viszonyszám értéke a stabil helyzetű fák esetében legfeljebb $\frac{1}{2}$. Koronafelület is fontos jellemző, amely esetében az állékony fánál a négyzetméterben mért mérőszáma nem nagyobb a mellmagassági átmérő centiméterben mért mérőszámánál. A kidőléssel szemben legnagyobb szereppel bíró gyökértányér átmérője pedig a stabil helyzetet a famagasság ötödének elérésével biztosítja. Az üreges, vagy korhadással érintett fáknál fontos jellemző a még megmaradt egészséges faanyag szélessége, másképpen maradék falvastagság, amelynek ép koronájú fánál legalább $\frac{1}{3}$ értéknek kell lennie.

A tomográfus vizsgálatok a károsított fákban négy alapvető korhadás illetve üreg formát mutattak ki, amelyek kúp, fordított kúp, hordó vagy henger alak lehetnek.

A kidőlt fák adatainak elemzéséből leszűrte tapasztalatok alapján a dolgozat egy, a szerző által kimunkált eljárást is bemutat. A számítás alapjait a szokásos favizsgálati adatfelvételek szolgáltatják, amelyen belül a két legfontosabb információ a szélesség nagysága és a hatékony gyökérzet kiterjedése. A számítások a terhelések és az ellenálló erők számbavételén keresztül a hajlítónyomaték és az ellenállási nyomaték értékeit hasonlítják össze.

Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a fák többnyire tányérgyökérzet alakú gyökérszónát kifordítva dőlnek ki, függetlenül a fafajtól. A kidőléssel, vagy töréssel szemben a fák mechanikai úton is védekeznek, ennek jegyében figyelemre méltó megerősítéseket tudnak fejleszteni ágaik, törzsük, gyökérzetük megerősítése érdekében.

Abstract

The study of health and resistance of trees in urban areas identified correlations between tree dimensions and stability. However, this correlation is moderate as many factors beside tree size contribute to tree resistance. This paper contains several indices that were developed for an on-site assessment of tree stability. The instrumental tests and visual inspections conducted in this study enriched the knowledge of bio-mechanical behavior of solitary trees.

The most important issue regarding trees in populated areas is assessing the risk of tree fall or exploring the causes and course of tree fall. This paper introduces data collection protocols that can be performed by simple means and offers computational algorithms to assess tree stability. In addition, this work demonstrates techniques that can be used during a visual inspection to identify clues that signal potential changes to the equilibrium position of trees.

Claudio Abbado világhírű olasz karmester: „A fák olyanok mint a zene: reményt és távlatot adnak az emberiségnek.”

1. Bevezetés

A városok és más lakott területek fáival kapcsolatban két jellegzetes nézőpontot tapasztalunk: az egyik a fákat mint természeti elemeket kedveli és tiszteli, emiatt a gondozásuk szükségességét elismeri, míg a másik hozzáállást képviselőknél csak negatív hatások jutnak eszébe, mint például a lehullott lomb eltakarítása. Jelen munka többnyire az első irányzattal ért egyet, de nem hanyagolható el a fákra ellenséggé tekintők táborára, és jellegzetes reakcióik sem.

Mindebből az is világossá válik, hogy a fák kérdése a technikai-biológiai megközelítésen túl erőteljes pszichológiai és szociológiai vonatkozásokat is megkíván. Ne felejtjük el azonban az ökonómiai szempontokat sem.

A hatékony favizsgálatok nem nélkülözhetik a gazdaságossági megfontolásokat, hiszen egyes fagondozó intézkedések különösen költségesek, amelyekre pénzt áldozni csak akkor éri meg, ha az ápolandó fának különlegesen magas az értéke. Gondoljunk csak a hazánkban fellelhető „ezeréves” fákra, vagy például Rákóczi fájára, Rúzsza Sándor fájára, Mátyás király fájára, Kont-fára, ezekre a nevezetes történelmi eseményeket megőrkítő, s emiatt különleges figyelemmel övezett, egyben haldoklásukban is nagy áldozatokkal is fenntartott faóriásokra, majd a belőlük kialakult mementókra (pl. Zsennyei-tölgy, Árpád-fa). A tisztelet, az erőfeszítések az egyedi-eszmei értéküknek köszönhetőek, a választott kezelések is ezzel arányosak. Egy-egy ilyen famatuzsálem vonatkozásában nyílik meg igazán a favizsgálati módszerek és a favédelem gazdag tárháza.

Ez nem újkeletű hozzáállás, a régebbi korok emberei is sokra tartották a méretes fákat. A Bibliában találunk erre utalásokat, de egyes animista vallások is nagy becsben tartanak bizonyos fákat (Krisna-fa). Talán ez a tisztelet örökítődik át korunk emberébe is, amikor különösebb racionalitás nélkül is nagy figyelmet szentel a környezetében található szoliter, vagy kisebb csoportokban álló fáknak.

A fák a köztudat szerint hosszú ideig élnek, és a tőlük elvárt pozitív hatásokat is inkább idősebb korokban fejtik ki. Azonban az egészségi állapotuk sajnos ekkor kezd megrendülni, ami nagyobb odafigyelést kíván. Ekkor válik szükségessé a nagyobb figyelem annak megállapítása, hogy milyen intézkedéssel lehet meghosszabbítani az életüket, vagy mikor kell megválni tőlük.

Ismert, hogy a fák állékonyságát, stabilitását alapvetően biotikus tényezők (mindenekelőtt lebontó szervezetek) tevékenysége, valamint abiotikus tényezők (mint a szél kidöntő-törő erőhatása) befolyásolja (Igmándy, 1991). Különösen érzékeny a kérdéskör az emberek által intenzíven használt lakott területeken, ahol egyrészt növény-egészségügyi, másrészt mechanikai problémákra kell választ keresni. A társadalmi, szociális, pszichológiai kérdésekről csak érintőlegesen esik szó, mivel külön kutatásokat igényelnek. Ráadásul a favizsgálatokat az esztétikai szempontokon kívül a fa-ember konfrontációk is befolyásolják,

mivel a fák a lakossággal sokszor valamilyen összeütközésbe kerülnek, ahol leggyakrabban a fa jár rosszul, hiszen kárt, balesetet okozhatnak az emberi életben, vagy javakban.

A faápolás-favizsgálatok kérdésköre nem önmagáért való szakma; része a hazai szaknyelvben még nem meghonosodott, külföldön is ugyancsak fiatal tudományágnak, az „urban forestry” terminus technicus-szal jellemzett tevékenységnek.

Művelői az „arborist” vagy más megközelítésben „urban forester” szakma képviselői. Magyarítani talán az „arborista”, faápoló, vagy „városerdész” kifejezéssel lehetne, de érezzük, hogy nem teljesen ugyanazt takarják.

Ez a szakág több más tudomány határmezsgyéjén helyezkedik el, szükséges hozzá kertészeti, parktervezői és erdészeti tudomány, de –ahogy az előbbieken már szó volt róla- technokrata megközelítésen felül humán, mi több, spirituális ismeretek sem ártanak.

A favizsgálatok önmagukban gyakran technikai eszközök alkalmazásával zajlanak, azonban a biológiai, a növény-egészségügyi és a növényvédelmi alapok nélkülözhetetlenek.

A szakterület nagyjai (mint pl. Shigo és Bartlett) is elsősorban a biológiai ismereteikkel tűntek ki, és a mai napig szinte utolérhetetlent alkottak. Újabban, a technika fejlődésével számos segédeszközt vehetünk már igénybe, amelyekhez már komoly műszaki-technikai ismeretek társulnak. Ezeket a módszereket Wessolly, Mattheck, Sinn és Divós kutatók neve fémjelzi.

A jelenleg alkalmazott favizsgálati eljárások a szükséges beavatkozások mikéntjét és idejét gyakran tág intervallumban prognosztizálják, emiatt a fák kezelésére vonatkozó beavatkozások kérdésében esetenként nagyvonalúak. Így a favizsgálatok eredményei további pontosításra szorulnak. A dolgozat a jelenleg ismert favizsgálati módszereket áttekinti, közülük a szélesebb körben alkalmazottakat részletesen tárgyalja. A rendelkezésre álló módszerek alkalmazását és értelmezését követően a favizsgálati eljárások hatékonyabbá tételére, illetve bővítésére tesz javaslatokat, újabb vizsgálati eljárások és lehetőségek bemutatásával.

2. Célkitűzések

A szoliter fákkal foglalkozó kutatások több éve hazánkban is elkezdődtek és dinamikusan haladnak, lépést tartva a külföldi ez irányú kutatásokkal. Ugyanakkor több kérdés is felmerült, amelyek megválaszolására a kutatási munka kezdetekor a szerző a lakott területen álló fák vonatkozásában az alábbi célkitűzéseket tette:

Fontos kiindulási pont a rendelkezésre álló nemzetközi és a hazai és szakirodalom áttekintése a kutatási téma megalapozása és a témához kapcsolódó pontok feltárása céljából. Ezen belül különösen a következő súlyponti kérdések merültek fel:

- a farontó kórokozók és károsítók, mindenekelőtt a taplógombák szerepe és hatásai a faállékonyság terén;
- a fák egyensúlyi helyzetében katasztrófát okozó erőhatások, főleg a szél hatásainak megismerése,
- a fák mechanikai adottságai az állékonysági kérdések kapcsán,
- a fák egyensúlyi helyzetei,
- a fák törzsének és gyökérzetének viselkedése erőhatás fellépésekor,
- a favizsgálati technikai lehetőségek, eszközök megismerése.

A szakirodalom megismerését követően a lehetőségek szerinti módszerekkel szükséges többféle favizsgálat elvégzése, mindenekelőtt a bizonyos szempontból gondot okozó illetve idős fák mechanikai viselkedésének, illetve közvetlen környezetük adottságainak felvételezésével.

Az így lezajlott mérések és a megfigyelések adatainak birtokában, az eredmények elemzésével a fákra vonatkozó statikai ismeretanyag is bővül. Az adatok értelmezésével a faállékonyság meghatározásának módszerei pontosíthatók, ezáltal a faápolói döntések kockázatai csökkenthetők, egyben költség-hatékonyabban végezhetőek.

A fakidülés okainak és folyamatának feltárásával lehetségessé válnak gazdaságosabb, és egyszerűbb eljárások, továbbá gyorsabb faállékonysági módszerek, mutatók kimunkálása illetve kifejlesztése is.

A kutatási célkitűzések meghatározását követően a szerző az alábbi **hipotéziseket** fogalmazta meg:

1. A hangtomográfós mérések véletlen mérési hibáinak a fatörzs alakjától függően több forrása van.
2. A fatörzsben a korhadás többféle alakú és fejlődési irányú lehet.
3. A fák törzsében keletkező korhadás vagy üreg falának vastagsága egy bizonyos méret alatt már nem elegendő az állékonyság fenntartásához.
4. A lakott területen magányosan álló fák állékonysága az erdei fáknál alkalmazott karcsúsági mutatóval is jellemezhető.
5. A mellmagassági átmérő és a korona méretének arányai statikai szempontból összefüggnek.
6. Kialakítható olyan számítási protokoll, amely egyszerű mérőeszközökkel mérhető paraméterekre alapozva, költséghatékonyan megadja a fák stabilitását.
7. A különböző fafajok kidőléskor kiforduló gyökérzetének alakja hasonló.
8. A különösen idősebb korban és nagyobb méretű fák törzsén, gyökérnyakán, valamint gyökerein kialakuló feltűnő vastagodásoknak mechanikai okai vannak.

3. Szakirodalmi összefoglalás

A következő részekben válogatás olvasható a fa állékonyságát, stabilitását tárgyaló bőséges erdővédelmi szakirodalomból. Mivel a hazai szakirodalom a kutatási témakör marginális részét érinti, többnyire az angol, és kisebb részben német nyelvű tudományos publikációkat kell elvonultatni. Az egyéb nyelven megjelent szakmunkák jobbára az angol eredetűek.

3.1. A fák stabilitásának csökkenése

A fák stabilitását különféle, biotikus károsítóknak is nevezett fogyasztó szervezetek veszélyeztetik (Schwarze és mtsai, 1999). A lombfogyasztók, a terméskárosítók jelentősége ebből a szempontból kisebb, mert ugyan komoly károkat okoznak a kárláncolatok részeként, azonban a fa stabilitását csak közvetve csökkentik. Nem így a fatestben élő gombák (elsősorban nagygombák) és a xilofág rovarok.

A fákkal szemben a legnagyobb súllyal a lebontó szervezetek, a gombák lépnek fel, közülük is a taplógombák okoznak a fák statikai helyzetében olyan elváltozásokat, amelyek következtében súlyos, az emberi életben és vagyonban károk is keletkezhetnek (Sinn, 2000a).

3.1.1. A farontó gombák hatása a fa stabilitására

A farontó gombák a természetes anyag- és energia körforgás nélkülözhetetlen részei. A természetben feladatuk a cellulóz és a lignin tökéletes lebontása, a talaj szervesanyag tartalmának visszapótlása. Ilyen értelemben nélkülözhetetlen a szerepük.

Parkokban, utcákon, játszótereken, közintézmények udvarán, kertekben, vagy különösen épületeken belül azonban nemkívánatosak. Itt a faanyagok korhasztásával komoly problémákat okozhatnak, mivel azok állékonyságát erőteljesen csökkentik.

A farontó gombák többnyire szaprofita szervezetek, de néhány közülük élő fát is tud parazitálni. A gombák spórái különböző sebzéseken, ághelyeken jutnak be a fatestbe (fertőzési kapu), de egy-két gombafaj az érintkező gyökereken keresztül fertőzi meg a fát (Horváth és Borhidi, 2002).

Kevesen közülük szigorú fajspecifisták, nagyobb részük azonban sok potenciális gazdanövénnyel rendelkezik. A sebzéseken kívül a legyengült fa is áldozatul eshet a gombáknak.

(E munkában nem foglal helyet az óriási szakirodalommal rendelkező, beépített faanyagon károsító gombafajok bemutatása, emellett nem lesz szó a fülledésről és az álgesztképződésről sem.)

A korhadás típusai

A fa bonyolult kémiai felépítésű anyag. Szerkezete, összetétele biológiailag és mechanikailag rendkívül stabil, amelyet a gombákon kívül más életforma csak tökéletlenül képes bontani (Klöhn, 2004). A fák sejtjeinek alapvető kémiai alkotórészei a cellulóz és a lignin. A cellulóz húzó- és hajlítoszilárdságot, míg a lignin nyomószilárdságot biztosít a fának. Hiányuk ennek megfelelően törést, illetve roskadást okoz (Molnár és mtsai, 2007).

A farontó gombák enzimatikus tevékenységük során a celluláz és lignináz enzimeikkel a faanyagban található cellulózt vagy/és lignint bontják. Ezzel ún. korhasztási tevékenységet fejtenek ki. A korhadás megjelenési formája szerint alapvetően három fajtáját különböztetik meg:

- a barnakorhadást,
- a fehérkorhadást és
- a lágykorhadást.

Barnakorhadás (szinonim megnevezései: vöröskorhadás, romboló korhadás, reves korhadás, köbös korhadás)

A barnakorhadás során a gombahifa a faszövetbe hatol, és lebontja a cellulózt, valamint a hemicellulózt. A faanyag barnára színeződik, mivel a visszamaradó, hosszanti és keresztirányban, kockásan-hasábosan repedező, illetve később barna porrá szétomló anyag a barna színű lignin. A barnakorhadásnál a rugalmas cellulózt veszti el a fa, ezért szilárdságvesztését „merev törésnek” is nevezik (Schwarze és mtsai, 1999), ugyanis a cellulóz hiánya miatt a húzó- és hajlítoszilárdság nagymértékben csökken, amely könnyen töréshez vezethet. Általánosságban ez a veszélyesebb, mert –mint később szó esik róla- a faanyagban a húzószilárdsága kiemelkedő.

Érdekesség, hogy vöröskorhadás megjelöléssel német nyelvterületen tipikusan a gyökérrontó tapló (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.) korhasztását jelölik, ez azonban valójában fehérkorhadás, de vörösre színeződő faanyaggal (Györfi, 1941).

Fehérkorhadás (szinonim elnevezései: korróziós korhadás, maró korhadás)

A fehérkorhadás során a lebontó szervezetek a lignint és a cellulózt is lebontják. E két faépítő alapanyag lebontása történhet egyidőben; ekkor a folyamatot szimultán fehérkorhadásnak nevezik. Amennyiben először a lignin lebontása történik meg, majd a cellulózt időben később bontja le egy adott gombafaj, akkor szelektív fehérkorhadásnak nevezik a folyamatot. A visszamaradó rész világos színű, szálas, morzsolható szerkezetű. A városi fákra különösen veszélyes, például a *Ganoderma nemzetség* fajtái (Schwarze és Baum, 2000; Sinn, 2000a) is fehérkorhadást okoznak. Különösen a szelektív fehérkorhadásnál, a szilárdító lignin hiánya miatt úgynevezett „szívós törés” alakulhat ki (Schwarze és mtsai, 1999).

A fehérkorhadás egyik válfaja az úgynevezett „lyukas” vagy „szítás korhadás”, amikor a cellulóz és a lignin egyidőben, de pontszerűen bomlik le.

A fatest szilárdsági tényezői a barnakorhadásnál tapasztalhatókhöz képest kevésbé csökkennek, sőt a szelektív korhadásnál a hajlító szilárdság a kezdeti stádiumban kissé emelkedik (Schwarze és mtsai, 1999).

Nemritkán előfordul a kétféle korhadás egymás mellett, egyidőben is.

Lágykorhadás (szinonim elnevezése: móderkorhadás)

A cellulózbontás miatt gyakran a barnakorhadáshoz sorolt korhadás típus. Feltétele a nedvesen maradó közeg, például talajjal érintkező faanyag, karók, oszlopok (Gyarmati, 1970). Többnyire csak a fa háncsi és szíjácsi része korhad, a barnakorhadásnál finomabb repedésekkel. A cellulózt a gombák a másodlagos sejtfalból bontják le. Elsősorban a tömlősgombák és a konídiumos gombák (*Fungi imperfecti*) közé tartozó gombák okozzák. A cellulóz elvesztése miatt a húzószilárdság gyorsan csökken (Lonsdale, 1999). Az újabb ismeretek szerint a *Basidiomycetes* körébe tartozó gombák is okozhatnak lágykorhadást, és élő fákon is előfordul ez a kártípus (Schwarze és mtsai, 1999).

Veszélyes korhadásforma, mivel a talajban levő farészek nem láthatók (pl. oszlopoknál) és a károsított fák váratlanul roskadhatnak össze.

Fontos ismételni, hogy a gombák a fa mely részét támadják meg. Egyes fajok a gyökérzetben, mások a gyökérfőben, illetve a tőben, míg ismét mások a törzsben, ágakban fejlődnek ki. A besorolás határai átjárhatók: egyes gyökérvárosító gombák előfordulhatnak a fa más részében is, és a törzsben károsítók is élhetnek a gyökérzetben is. Függetlenül a károsítás helye a fafajától is (Schwarze és mtsai, 1999).

A fák védekezési mechanizmusa a gombákkal szemben, a CODIT-modell bemutatása

Az ép, egészséges fa kérge sok behatástól, így a gomba támadástól is meg tudja védeni a fatestet. A kéreg a fának a kórokozókval szemben legellenállóbb része. Szinte kizárólag mechanikai sérüléseken keresztül tudnak a növénypatogén szervezetek a fa szíjácsába, gesztjébe jutni (Dujesiefken és Liese, 2012). Sérülés esetén a fa –többek között- szuberin (para) berakódással védekezik (Trockenbrodt és Liese, 1993).

Egy legyengült, stresszhatással sújtott vagy sérült fa esetén azonban gyakran nem áll meg a kéregnél a kórokozó behatolása. Ekkor a parakéreg elhelyezkedő kambium védekező reakciói lépnek működésbe. Ez erőteljes és gyors kalluszképződésben nyilvánul meg. Az élő, vegetációs időszakban szinte órákon belül reagál a fa a behatolásra, és megindulnak a seb gyógyító folyamatok. Egyes vizsgálatok szerint bizonyos fafajok vegetációs időn kívül is képesek a sebkallusz képzésére (Stobbe és mtsai, 2003).

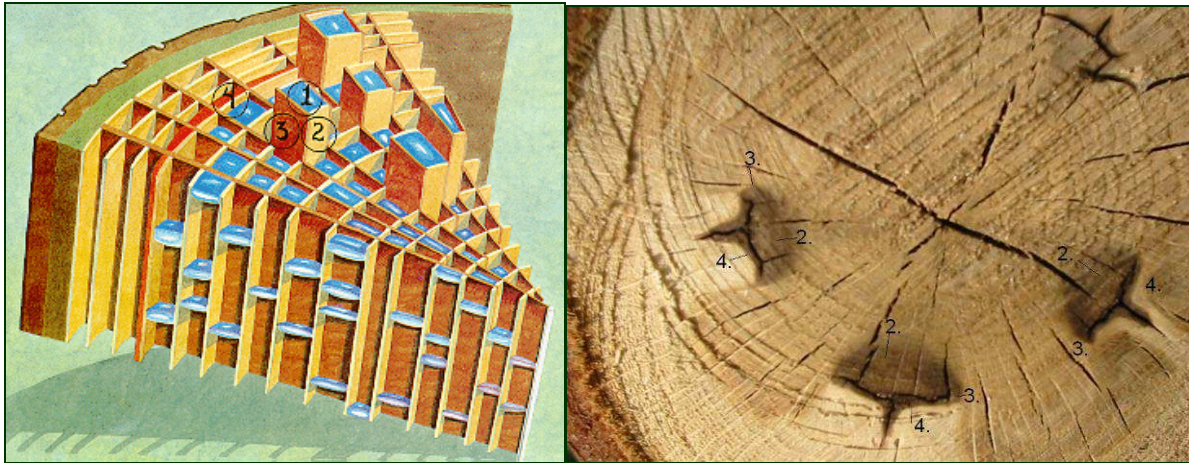
A nagyobb sebeket a sebkallusz már nem képes befedni, ezért ilyenkor a kambiumon átjutott gomba az élő szíjácsban már komoly ellenállásba ütközik.

Az úgynevezett Codit-modell (CODIT=Compartmentalisation Of Decay In Trees=A korhadás elszigetelése a fában) részletesen leírja a fatest aktív védekezésének mechanizmusát

(Shigo, 1979). (Újabban az angol „D”-t a damage, azaz a károsodás kifejezéssel váltják fel (Dujesiefken és Liese, 2012)).

A modell a fatestben kialakuló egyes védekezési zónák megnevezésével tagolja a folyamat leírását, amelyekkel az egészséges farész a korhadó zónától több fokozatban elszigetelődik, egymást követő akadályokat képezve a behatoló gomba előtt.

Nem szerencsés módon, a szaknyelvben terjed a „kompartimentálás, kompartimentált” kifejezés. Helyesebb és tömörebb lenne az „elhatárolt” kifejezés.



1. ábra A CODIT-modell
(Forrás: Shigo, 1979)

2. ábra¹ A CODIT modell feltehetően fagyás-
károkból származó sérüléseken.

A modell felállítását megelőzően, a fák sebreakcióit a fa védekezési mechanizmusára vonatkozó ismeretek hiányában, tulajdonképpen az emberi orvostudományban megismert sebgyógyulási folyamatokkal állították párhuzamba, még a kezelési eljárásokra is kiterjesztve. Ennek megfelelően a korhadt farészeket kivájták és „plombálták” (Dujesiefken és Liese, 2012).

A CODIT-modell ezzel szemben leírja a fa saját választát, aktív védekezését a gombatámadásra. Eszerint négy, úgynevezett védőfal áll egy gombák terjedésének útjába (Shigo, 1979). A modellt az 1. és 2. ábrák illusztrálják.

1. védőfal (transzverzális fal):

Megakadályozza a gomba tengelyirányú terjedését (felfelé és lefelé egyaránt) a szállító edénnyalábok eltömésével. A lombos fáknál többnyire tilliszekkel, amelyek viaszzerű „dugók”, vagy szemcsés, illetve kristályos tömítőanyagokkal történik (Szabó, 2003, Molnár és mtsai, 2007). A fenyők a tracheidák udvaros gödörkeit zárják el, amelynek során a gödörke pórusára rátapad a tórusz. A folyamat gyorsan lejátsszódik, miáltal a képződő 1. számú védőfal meggátolja a korhadás függőleges, azaz szállítórendszer irányú, ezért leggyorsabb terjedését. Ide sorolható az erős nedvképződés is, amely tulajdonképpen a kórokozót (vagy a károsítót) elszigeteli vagy „megfojtja”, esetleg szinte kitolja a fából (gyanta-, mézga-,

¹ A forrás-megjelöléssel ellátott ábrák kivételével az értekezés minden ábráját a szerző készítette.

nedvképződés). Azonban a gomba is ki tudja a fa ilyen védekezését kerülni, amikor nem a sejten belül, hanem a sejtfalban és a sejtfalak között halad tovább, stratégiát váltva: nem fehér vagy vöröskorhadást, hanem móderkorhadást okozva (Schwarze és Baum, 2000).

2. védőfal (tangenciális fal):

Megakadályozza a korhadás sugárirányú, azaz befelé haladó terjedését. A fa itt is a gombának ellenálló anyagokat épít be, amelyek a gombahifák előrehaladását gátolják.

3. védőfal (radiális fal):

Gátolja a betegség hűrirányú, azaz a paláستtal párhuzamos terjedését. A feladatot a bélsugarak végzik.

Az első három védőzóna a fán belül tulajdonképpen korábban is létező részekből alakul ki, a fa által oda csoportosított többlet-anyagok csak megerősítik azokat. Az 1. védőfal a leggyengébb közülük, hiszen a fa saját fejlődése érdekében teljes egészében nem zárhatja el szállítórendszerét. A 2. védőfal már erősebb gát, amely tulajdonképpen az évgyűrűhatár. A bélsugarak 3. védőzónaként már kifejezetten erős védőzónát képeznek, mivel képesek a kórokozók számára mérgező vegyületeket is kialakítani.

Az egyes védőfalak többnyire más színűek, mint a környező, egészséges faanyag. Azonban nem mindig egyszerű elkülöníteni a gomba okozta elszíneződést a fa reakciójaként képződött színváltozástól.

Egyes nézetek szerint az elszíneződést az előbbieken túl a (mindenelőtt tömlős-) gombák által kiválasztott fenolok oxidatív tulajdonságai is okozzák (Boddy és Rayner, 1983).

4. védőfal:

A szakirodalomban egységesen „Barrierezone“-nak, „zárózonának” nevezik. Ez a védőfal a kambium sérülése révén képződik. Ez a legfontosabb védekezési zóna, mivel a sebzés után képződő új évgyűrűket ez védi meg a betegségtől. A védőfal meglehetősen keskeny, a fa mechanikai szilárdításában emiatt nem is vesz részt, ám a legerősebb védőhatással bír. Szinte teljesen áthatolhatatlan a gombák és más kórokozókkal szemben. Míg a reakciózónának is nevezett 1-3. zónák a fákban a kórokozók elleni reakcióként alakulnak ki, addig a zárózonaként is jellemzett 4. védőzóna a fák kambiuma által képzett réteg, amely az új, a sebet befedő évgyűrűket védi a bezáródó kórokozótól. Mindig a kambiumot is megsebző, fapalást felől érkező sérülés hatására keletkezik. Megismerhető az új évgyűrű alatt lévő határozott, sötét színű, vékony vonaláról (Schwarze és Baum, 2000).

Amennyiben ezek a védőzónák hiányoznak vagy gyengén működnek, a fertőzési kapun keresztül a kórokozó legyezőszerűen terjed a faanyagban. Ez különösen a mélyebb, már a gesztig hatoló sebzések esetén fordul elő, hiszen a geszt holt (vagy életjelenségeket nem mutató) faanyag, aktív védekező képessége alacsonyabb, ám tartóssága nagyobb (Molnár és mtsai, 2007) a berakódott gyanta, lignin, szuberin stb. miatt. A gesztben a 4. védőzóna nem alakul ki, hiszen az az aktív, élő faanyag, azaz a szíjács képessége

Előfordul, hogy a kórokozó a kambium sérülése nélkül, nagyobb ágcsonkokon jut be a fa mélyebben lévő részeibe. A gyökereken, esetleg tuskón (tuskósarjak által) keresztül egyenesen a gesztbe juthat a kórokozó, ám a gyökerek Watson (2008) vizsgálatai szerint a törzsnél nagyobb ellenállást tudnak kifejteni kórokozók támadásával szemben.

A fentiek miatt törekedni kell a sérüléseket elkerülésére, vagy legalább a minél kisebb sebfelület keletkezésére (pl. a metszés során). Sajnos a még gyakran alkalmazott hagyományos fasebészeti többnyire eltávolítja a fa által létrehozott, elszíneződött védőzónát, ami azonban a fa számára életbevágóan fontos. Az egészséges, megfelelő kondíciójú fa védelmi rendszere működik hatékonyan, azaz a termőhelynek megfelelő fafajmegválasztás (Varga, 2001), illetve a fák kímélete (Smith, 2006) csökkenti legjobban a kórokozók esélyeit.

Schwarze és mtsai (1999) szerint a CODIT-modell gyenge pontja, hogy a frissen létrejött seb esetén a fa nem elsősorban a gomba, hanem a levegő fatestbe jutása ellen kezdi el a seb lezárását, megakadályozva az embólia kialakulását (Schwarze és Baum, 2000). Dujesiefken és mtsai (2012) ezt a jelenséget fakultatív gesztnek, vagy álgesztnek nevezi, és a fa passzív védekezéseként írják le. Másrészt véleményük szerint a gombatámadások zöme nem törzssebzéseken keresztül valósul meg, hanem ágcsonkok gyakori megléte esetén a bélien, illetve az életjelenséget már nem mutató geszten keresztül hatol be a fatestbe.

A fenti ellentmondások miatt Dujesiefken és mtsai (2012) némileg átfogalmazta a CODIT-modellt, és a kórokozó támadását, illetve a fa választását egységbe foglalva CODIT-elnnek nevezte el. A sebzés egyes fázisai a következők:

1. A levegő behatolása a sebbe, illetve a szállító edénnyalábokba

Ennek következményeként a seb közelében elhalnak a szövetek. Erre válaszul a fa kérge sebperidermát, a kambium sebkalluszt, illetve a fatest zárózónát képez.

2. A kórokozó a fertőzési kapun keresztül behatol, elér a sebperidermáig, illetve a fatestben a zárózónáig, további kalluszképződést kiváltva (Gencsi, 1980).

3. A kórokozó terjedése a fában, különösen idősebb fában az eddigi zárózónát áttörve. Az élő fatest újabb zárózónát képez, és a kalluszrétegek (Überwallungswülste) összenőnek.

4. A kórokozó körbezárása

A fokozott kalluszképzéssel a fa bezárja a kórokozót és az általa károsított részt (Molnár és mtsai, 2007). A seb bezáródik, a kórokozó nem kap levegőt, a kórokozó elpusztul. Ez azonban csak kisebb sebfelületek, fertőzési kapuk esetében lehetséges (pl. fagyléc, rovarrágás, kisebb közlekedési károk).

A farontó gombák által okozott károk mértékének ismertetése

A farontó gombák a fatestben a fa ellenállásával találkozhatnak. A fa azonban nem mindig tudja az egyes zónákat kiépíteni, mert vagy túl nagy felületen támad a kórokozó, vagy/és agresszív faj(ok) lépnek fel. A támadás előbb-utóbb valamelyik korhadás-típust eredményezi. A korhadás a fa stabilitását csökkenti, ez azonban gyakran lassú, több évig, évtizedig tartó

folyamat. A gyakran lassú folyamat ellenére a korhadás a fa stabilitására nézve a természetben előforduló legnagyobb veszély (Gaffrey és Kniemeyer, 2002).

A farontó gombák károsításának külső tünetei, a fa erre adott válasza, továbbá a törzsön belüli feltérképezésének szakirodalmi vonatkozásai az Anyag és módszer fejezetben foglalnak helyet. Bizonyos egyszerű eszközök bemutatására e munka nem tér ki. Egyik ilyen eszköz a növedékfúró, amellyel a külső évgűrűk szerkezete vizsgálható, vagy az egyszerű kalapács (Dujesiefken és mtsai, 2004), amellyel a gyakorlott szakember a fára ütve következtethet a belső részek állapotára.

3.1.2. A szél hatása a fák stabilitására

A gombák tevékenységén túl a fák stabilitásának elvesztése legnagyobbbrészt a szél hatásaként lép fel (Brudi és van Wassenauer, 2001). A szélhez, különösen az uralkodó szélirányhoz és a nagyobb szelekhez a fák növekedésük során igyekeznek igazodni, gyökereiket (Balder, 1998), törzsüket, ágrendszerüket ennek megfelelően fejlesztve (Wood, 1995; Telewski, 1995; Mattheck és Breloer, 1995; Nicoll és mtsai, 2008). Ez a tigmomorfozenézisnek nevezett jelenség. Azonban gyökérzetük ellenére a ritkán előforduló rendkívüli erejű szeleknek, valamint a szokatlan irányú erős szélnek, de legfőképpen a korhadás során átalakuló, meggyengülő stabilitási helyzetnek esetenként a fa már kevésbé tud ellenállni (Nicoll és Ray, 1996).

A szél tulajdonságai a fák szempontjából

Magyarországon a leggyakoribb, uralkodó szélirány az északi-északnyugati. Ettől helyenként a domborzat függvényében kisebb eltérések lehetnek. A szél erősségének mérése a nemzetközi szabvány szerint a talajfelszíntől 10 méter magasságban történik, ahol a környező épületek, növényzet nem befolyásolja azt. Ez a hivatalos meteorológiai mérések esetében alapkövetelmény (Országos Meteorológiai Szolgálat, www.met.hu). A szélerősség fokozatainak standardizált csoportosítását Francis Beaufort dolgozta ki 1806-ban a tengeri szél erősségének műszeres mérés nélküli megfigyelése nyomán, amelyet később többen is kiegészítettek és pontosítottak a szélnek a szárazföldi emberi környezet tárgyaira, így a fákra gyakorolt hatásainak leírásával. A szél fákra gyakorolt hatása kiemelt szerepet játszik a Beaufort-skála egyes fokozatának leírásában (1. táblázat).

1. táblázat A Beaufort-skála. Forrás: Web1².

Beaufort-fokozat	Szélesség	Leírás	Hatása a szárazföldön
	m/s <i>km/ó</i>		
0	0-0,2 0	Szélcsend	A füst egyenesen száll felfelé.
1	0,3-1,5 3	Gyenge szél	A felszálló füst gyengén ingadozik, a szél alig érezhető.
2	1,6-3,3 9	Gyenge szél	A fák levelei zizegnek, az arcon érezhető a légmozgás.
3	3,4-5,4 15	Mérsékelt szél	A szél a fák leveleit, vékony hajtásait mozgatja.
4	5,5-7,9 25	Mérsékelt szél	A szél a fák gallyait, kisebb ágait állandóan mozgatja.
5	8,0-10,7 35	Élénk szél	A nagyobb faágak is mozognak, a levegő mozgása jól hallható.
6	10,8-13,8 45	Erős szél	Már a legvastagabb ágakat is mozgatja; a villanyvezetékek zúgnak. I. f. balatoni viharjelzés.
7	13,9-17,1 56	Igen erős szél	A kisebb fák törzsei erősen hajladoznak, vékonyabb gallyak letörnek. Nehéz a gyaloglás.
8	17,2-20,7 69	Viharos szél	A szél a fákról ágakat tör le, a nagyobb fák törzsei is erősen hajladoznak. II. f. balatoni viharjelzés.
9	20,8-24,4 81	Vihar	A vihar a gyengébb fákat kidönti, a vastagabb ágakat letöri. A tetőcserepek lesodródhatnak.
10	24,5-28,4 95	Erős vihar	A vihar gyökerestül forgatja ki a fákat, az épületekben jelentős károk keletkeznek.
11	28,5-32,6 111	Orkánszerű vihar	Súlyos anyagi károk, a téglapépítésű házak is megsérülnek.
12	32,7-40,8 120-	Orkán	A szél épületeket, tetőket rombol, súlyos pusztítást végez.

A szélerősség-fokozat és az adott fokozathoz tartozó szélesség középértéke között a következő képlet teremt kapcsolatot:

$$v = 0,836 \times B^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

Láthatjuk, hogy a fákra veszélyes szélerősség a 7. fokozatnál kezdődik. A meghatározások egészséges fákra vonatkoznak, bár ezt sehol sem hangsúlyozzák.

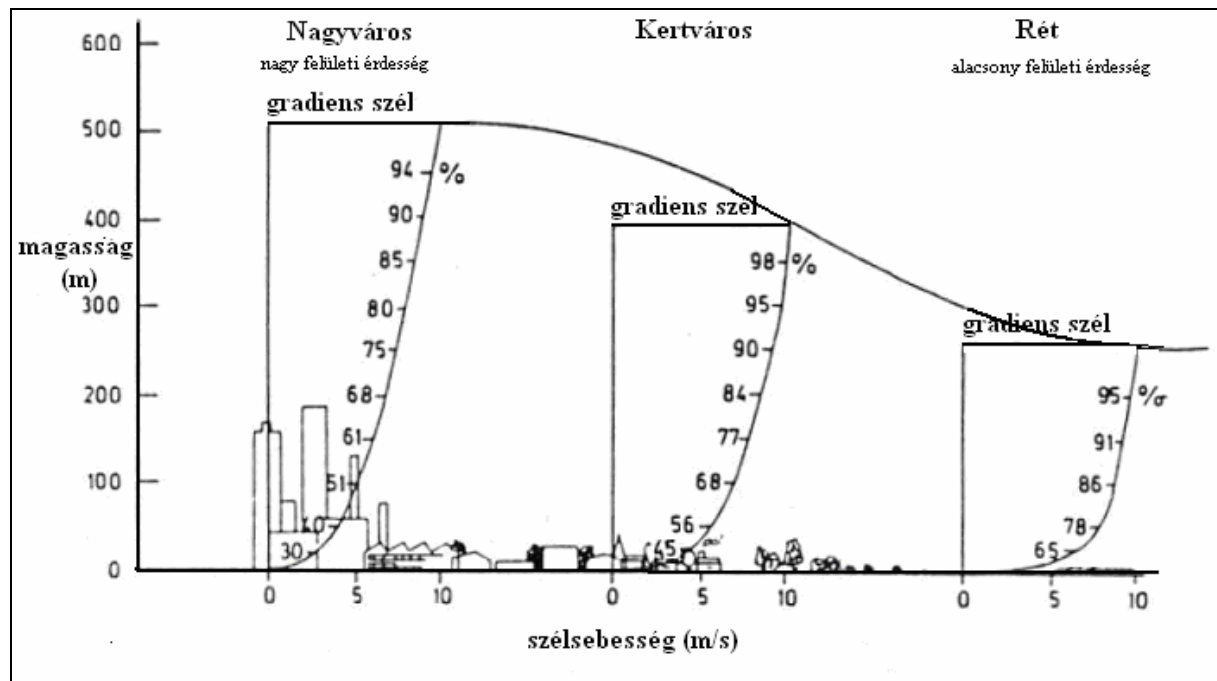
Az 1. táblázatban tanulmányozható skála, különösen a nagy pontosságú szélmérő eszközök (anemométerek) korában idejét múltnak tűnhet, de favizsgálatok területén német nyelvterületen még alkalmazzák (Wessolly és Erb, 1998; Sinn, 2003).

A közvetlen környezet a szél irányát módosítja, így a domborzat, vagy az ennek megfelelő városi környezet az épületekkel a szelet eltereli, szélcsatornákat (utcakanyon) képez (4. ábra), vagy akár a fákra káros örvényeket alakít ki (Gromke és Ruck, 2008) (5. ábra). Ez kisebb szélerőnél is veszélyes, mert a csavaró szilárdság a faanyagok

² A „Web” megjelölésű forrásmunkák hivatkozásai az Irodalomjegyzék végén találhatóak.

legalacsonyabb szilárdsági értéke (Molnár és mtsai, 2007). Emiatt a hivatalos meteorológiai adatok a városokban nagy bizonytalansággal terheltek. Ráadásul 10 méter magasságban mért adatokról van szó, tehát már figyelembe kell venni az úgynevezett Prandtl-réteg szabályait (Roedel, 2000), mely szerint a szélsébség a magassággal közel logaritmikusan nő (3. ábra), így már a magasabb fák esetében is számottevő lehet a szélsébségek különbsége egy fa alsó részén és a csúcsi részén. Ezt az EUROCODE szélterő számítási standard figyelembe veszi (EN 1991-1-4, 2005).

A Prandtl-határréteg 50-100 méter vastagságú, melyen belül a levegő áramlása nem lamináris, hanem turbulens, a súrlódás, más néven felületi érdesség miatt. Sík felület esetében (mint pl. hó vagy jég) az érdesség alacsony, ám a kertvárosi parkos zöldfelületnek már magas, sőt az erdőnek vagy magasházás beépítettségű belvárosoknak kiemelten magas a felületi érdesség értéke, továbbá itt a turbulencia intenzitása is nagy (Britter és Hunt, 1979). A turbulens áramlásban helyenként a nagy nyomás, illetve ennek ellentétéként a szívóerő is felléphet, ezek a fákra is erőteljesen hatnak.



3. ábra Logaritmikus szélprofil (Beckröge (1999), Davenport (1961) nyomán)

A 3. ábrán látható, hogy míg a nagyvárosban a szélsébség a talajszinttől távolodva lassabban változik (nő), addig a sík, sima felületen jóval hamarabb eléri a zavarásoktól mentes sebességértéket (azaz a gradiens szél sebességét).

A szélsébség és a felület kölcsönhatásával Davenport (1961) foglalkozott. A szélsébség fentiek szerinti változása az ún. Hellmann-képlet (2) szerint:

$$u(z) = u(g) \times \left(\frac{h(z)}{h(g)} \right)^\alpha \quad (2)$$

ahol:

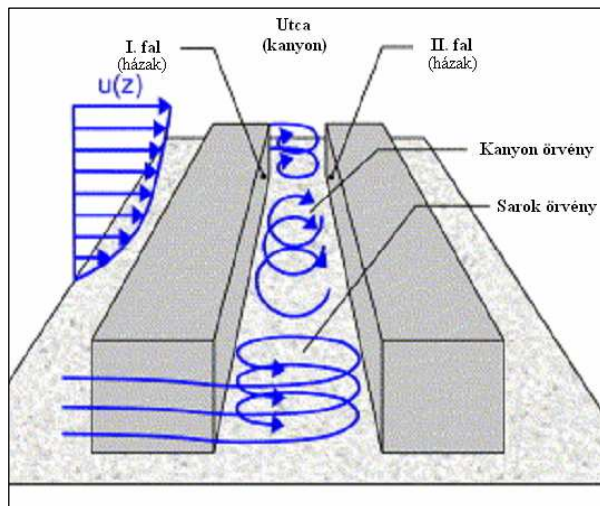
$u(z)$ a felületi érdesség által befolyásolt, z magasságban mért tényleges szélsebesség,

$u(g)$ a felület által már nem befolyásolt (gradiens) szél sebessége,

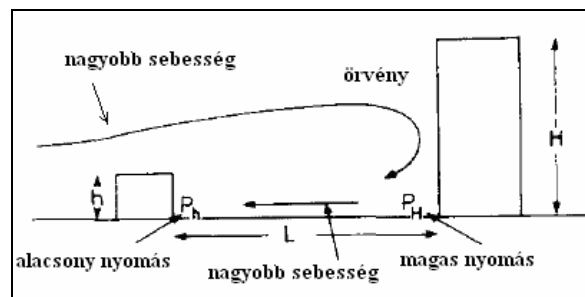
$h(z)$ a mérés magassága,

$h(g)$ a gradiens szél magassága,

α a felületi érdességtől függő tényező (Davenport, 1961).

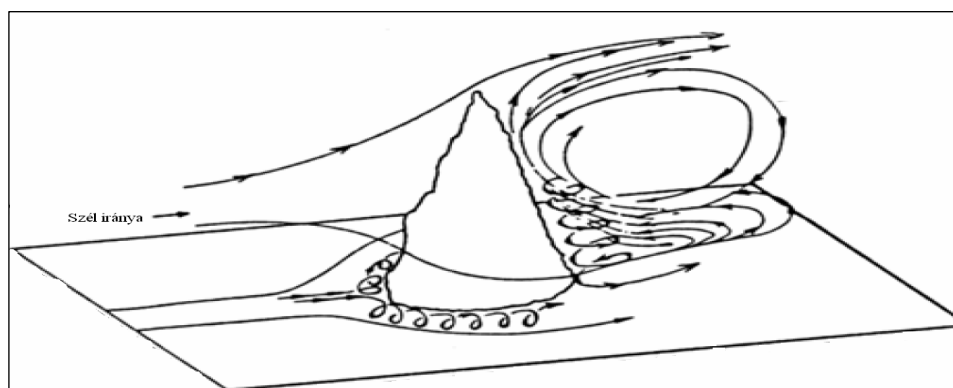


4. ábra Kanyon örvény és sarok örvény kifejlődése (Gromke és Ruck, 2007).



5. ábra Kanyon örvény kifejlődése, Britter és Hunt (1979), valamint Finnegan és Brunet nyomán (1995).

A 4., az 5. és a 6. ábrán megfigyelhető az utcában (a kanyonokhoz hasonlóan) kialakuló szél-örvények forgási iránya. Alapvetően kétféle örvénytípus tud kialakulni a szél hatására: a függőleges tengelyű sarok-örvény, amely a fellépő csavaró hatások miatt a közelében lévő fákra veszélyesebb, valamint a vízszintes tengelyű kanyon-örvény, amely a fa helyzetétől függően neki, vagy éppen eltolja az ott álló fát az épületek utcafrontjától, hajlító erőt kifejtve a fára (Gromke és Ruck, 2007). Az előbbi örvény típusok mindegyike kifejlődhet magányosan álló fák széliránnyal ellentétes oldalán (6. ábra, Ruck és Schmitt, 1986).



6. ábra Egyedül állófa lee oldalán képződő örvények (Ruck és Schmitt, 1986)

A szél hatása a fákra nézve akkor végzetes, ha ágak törnek le, a törzs törik el, vagy éppen gyökerestől fordul ki a fa. Niklas (2006) szerint az első két esetben a hajlítófeszültség túlhaladja a törzsben a hajlítószilárdságot, a harmadik esetben a nyírófeszültség megnő a talajgyökér felületen.

Az utóbbi két évtizedben a szél és a fák kölcsönhatását, pontosabban a széldöntés kockázatát alapvetően a kritikus szélesebesség paramétereinek meghatározásával vagy a fa széllel szembeni mechanikai tulajdonságainak, viselkedésének számításával közelítik a kutatók (Gardiner és mtsai, 2008). A modelleket inkább az erdőben előforduló szélkárok miatt fejlesztik, ám jól alkalmazhatók az egyes fák széllel szembeni viselkedésének megismerésére, hiszen épített környezetben is vannak a szél útjában olyan akadályok, amelyek hatásait tekintve megfeleltethetőek az erdő szélre gyakorolt hatásainak.

Kritikus szélesebesség számítása a döntésre, illetve a törzstörésre

A kárt okozó (mechanikus) szélre kifejlesztett modell a széldöntés valószínűségét két lépésben adja meg. Először a lombkoronára hatással lévő "kritikus szélesebesség" számítható, amely vagy törzstörést vagy döntést okoz. (az angol critical wind speed rövidítése: CWS).

Második lépésként szükség van a helyi széljárás megismerésére (meteorológiai adatok), illetve milyen valószínűséggel fordul elő a kritikus szélesebesség az adott helyszínen. A kárt okozó szelek hatásainak alapvetően három megközelítése (szélmodell) ismert. Az egyes modelleket megalkotóik elsősorban erdőre dolgozták ki, ám egyes részeik alkalmazhatók szoliter fákra is, a tényezők helyes megválasztásával.

A GALES-modell

A GALES-moddal a fadőléshez, illetve a törzstöréshez szükséges szélesebességet számítják ki. Ezt befolyásolja a fák egymástól vagy más objektumoktól való távolsága, a talaj típusa, a természetés ismérvei, a talaj vízgazdálkodása vagy a környezet vízelvezetése és természetesen a fafajok.

A **törzstörés** során a szél okozta feszültség a törzs külső edénnyalábjában meghaladja a húzó szilárdságtértékét. Ennek eredményeként, a törzstörést okozó, a lombkoronára ható, illetve közvetlenül a korona feletti kritikus szélesebesség a következőképpen számítható ki (Gardiner és mtsai, 2000, Ruel, 2009):

$$v_{\text{krit.törés}} = \frac{1}{k \times D} \times \left[\frac{\pi \times \text{MOR} \times d_{1,3}^3}{32 \times \rho \times G \times (z - 1,3)} \right]^{\frac{1}{2}} \times \left[\frac{f_{\text{göcs}}}{f_{\text{eszél}} \times f_{\text{krit.széleb}}} \right]^{\frac{1}{2}} \times \ln \left(\frac{h - z}{z_0} \right) \quad (3)$$

ahol:

k a Kármán-együttható, mely dimenzió nélküli érték, egységesen 0,4,

z (m) a viszonyítási síktól való távolság,

z₀ (m) érdességi magasság: az a magasság, ahol a szélesebessége elméletileg nullává válik,

D (m) az átlagos távolság a fák között,

G a tapasztalati szélökési tényező,
 $d_{1,3}$ (m) az átmérő mellmagasságban,
 h (m) a fa magassága,
 ρ (kg/m³) a levegő sűrűsége,
 MOR: a szilárdság értéke (Modulus of rupture),
 $f_{göcs}$, $f_{eszél}$, $f_{krit.szélseb}$ tapasztalati tényezők.

A tapasztalati tényezők módosítják a kritikus szélesebesség értékét. A göcsök csökkentik a faanyag szilárdsági tényezőit (Ruel, 2009), csakúgy, mint a környezet, hiszen a szélső fák kitettsége nagyobb a többi fához képest egy adott helyen (Gardiner és mtsai, 2000). Az esetek többségében azonban a göcsök, illetve a vizsgált objektum szélétől való távolság, illetve a kritikus szélesebesség faktora elhanyagolható, azaz 1,0 értéket vesz fel (Byrne, 2013.)

A **széldöntéshez szükséges sebességet** az alábbiak szerint lehet kiszámítani (Gardiner és mtsai, 2000):

$$v_{krit.dönt} = \frac{1}{k \times D} \left[\frac{C_{reg} \times SW}{\rho \times G \times z} \right]^{\frac{1}{2}} \times \left[\frac{1}{f_{eszél} \times f_{krit.szélseb}} \right]^{\frac{1}{2}} \times \ln \left(\frac{h-z}{z_0} \right) \quad (4)$$

ahol:

C_{reg} regressziós állandó, amely függ a talaj és a gyökérzet mélységétől, továbbá a fatörzs tömegétől (SW (kg)) (a további tényezők jelölései megegyeznek az előbbiekkal).

A HWIND-modell

Alapvetően nem közvetlenül a sebességet, hanem a szélerőt számítja ki. Az eredmény több erőhatás eredője, úgy mint a szél (vízszintesen számítva), továbbá a fa tömegéből adódó erőhatás, szükség esetén a hó vagy a közjóléti berendezések tömege is hozzáadva.

A teljes átlagos szél által okozott erőhatás (F_1) lesz, amely adott (Mayhead, 1973; Peltola és Kellomäki, 1993) magasságban (z) értendő, általánosságban közegellenállás erőhatása a szélllel szemben.

$$F_1(z) = \frac{1}{2} C_d \times \rho \times u(z)^2 \times A(z) \quad (5)$$

ahol:

u az átlagos szélesebesség (m/s),

A (m²) a felület (törzsfelület, koronafelület),

C_d a légellenállási együttható.

Az egyenlet szerint a szélprofil logaritmikus. Segítségével kiszámítható az a szélesebesség, amelynél egy fa még ellenáll a törésnek (amennyiben a törzs faanyagának törési modulusa ismert) (Gardiner és mtsai, 2000).

Egy fa akkor fog kidőlni, ha a szél keltette hajlító nyomaték meghaladja az ennek ellenálló gyökér-talaj (földlabda³) rendszerben keletkező nyomatékot.

Peltola és Kellomäki (1993) feltételezik, hogy nem fagyott talaj esetén a gyökerek rögzítő hatása és a gyökér-talaj lemez tömege arányaiban állandó. Ebből kifolyólag a kidőléssel szembeni ellenállás kiszámítható a földlabda tömegének ismeretéből. Ezt megerősítik Peltola és mtsai (2000) által elvégzett húzási kísérletek (lásd később). Így a gyökérzet által kifejtett ellenállási nyomaték a következőkből adódik:

$$M_{\text{krit}} = \frac{F_r \times n}{f_{\text{RW}}} \quad (6)$$

ahol:

M_{krit} : a kritikus hajlítónyomaték (gyökérzet (ellenállási) nyomatéka) (Nm),

F_r : gyökérlabda súlya (kg),

n : gyökérzet átlagos mélysége (m),

f_{RW} : arányszám, amely megmutatja, hogy a fa tömegéből (más megközelítésben súlyából) és a gyökérlabda tömegéből (súlyából) eredő (ellenállási) nyomatéknak mekkora részét adja a gyökérlabda tömege (20-30% között, Gardiner és mtsai, 2000).

Némileg módosította és egyszerűsítette ezt Wessolly és Erb (1998) a szélterhelés kiszámításának modelljében, az ismert közegellenállás erőhatásából:

$$F = C_w \times \frac{\rho}{2} \times A \times u^2 \quad (7)$$

ahol:

C_w a korona közegellenállás (levegő) tényezője (Widerstand-ból),

ρ a levegő sűrűsége,

A a szélnek ellenálló felület (korona és a törzs, mint vitorlafelületek),

u a szélsébség.

A HWIND-modell Wessolly-féle módosítása tükröződik az EN 1991-1-4 (2005) (a fák esetében ezt használók körében EUROCODE névvel illetett) szélmodellben is, amely módosító tényezőkkel finomítja a szélerősség kiszámítását. E munkában szélerő számítás ezzel a modellel történt, ezért részletes ismertetése az Eredmények részben található meg.

Az erőhatás a (lég)áramlás test előtti lassulásából (azaz a nyomásnövekedésből), továbbá a fa lee oldalán keletkező örvényléséből (azaz nyomáscsökkenésből) adódik, vagyis a Bernoulli törvény is érvényesül. A közegellenállás fáknál a fafaj és a szélsébség függvénye is (Mayhead, 1973; Sinn, 2003; Ruck, 2005). (A szél és a fák esetében a közegellenállás

³ A munkában a gyökérszóna, gyökértányér, gyökérlemez, gyökérlabda, gyökérzet szinonimként értelmezendők. A gyökérszóna kiterjedése e munka szellemében nem a növényélettani aspektusokból, hanem a *statikailag hatékony* kiterjedésben értelmezendő, és a munka a továbbiakban ezeket érti a fenti szinonimák feltüntetésekor.

súrlódási vagy felületi ellenállás tényezője a levegő rendkívül alacsony viszkozitása miatt elhanyagolható.)

A turbulens széllelkésekre Zuranski (1972) a képletet az f_b faktórral módosította, amely nyílt terepen 1, belvárosban 1,4 értéket vehet fel. Az EUROCODE szintén számol a turbulencia hatásával.

A fát töből kifordító forgatónyomaték az erőkarral történő szorzást követően adódik:

$$M = C_w \times \frac{\rho}{2} \times (\sum A(hz) \times u(z)^2 \times h(z)) \quad (8)$$

ahol:

$A(hz)$ az egyes támadási felület-rész,

$u(z)$ az adott támadási felület-részhez tartozó szélesség,

$h(z)$ a mért szélesség mérési magassága egyes támadási felület-részek súlypontjában (Wessolly és Erb, 1998, Peltola, 2006).

A képlet módosítandó a széllelkések által keltett rezgések és a sajátfrekvencia egybeeséséből adódó tényezővel, amely 1-1,4 lehet, ezáltal a dinamikai aspektust is figyelembe vehető. Itt kell megjegyezni, hogy a pálmafák esetén, azok teljesen más belső struktúrája miatt nem alkalmazhatók az itt leírt mechanikai megfontolások (Sterken, 2006).

A (8) képletben könnyen számítható illetve adatbázisokból kinyerhető értékek szerepelnek. A képletet a fa statikai vizsgálatok során előszeretettel használják. A fa súlypontjának magasságával, mint erőkarral szorozva a kidőléshez szükséges forgatónyomaték adódik.

A FOREOLE-modell

A harmadik, kevésbé elterjedt eljárás az előzőeket egészíti ki a szélterhelést követően kihajló fa esetében a fa tömegéből adódó forgatónyomaték növekvő hatásával, vagy más értelmezésben a fa dőlésszögéből fakadó erőkomponensek figyelembe vételével, amelyeket még az esetleges hó, vagy más csapadék is növelhet. Ancelin és mtsai (2004) tapasztalatai szerint egy adott fát kidöntő erőhatás forgatónyomatékának 83 %-a a szélterhelésből, 17 %-a azonban a törzs és a korona tömegéből származik, emiatt a teljes forgatónyomaték mintegy 20 %-kal magasabb a szélterhelésből számítottnál. Ezt erősítik meg Gaffrey és Kniemeyer (2002) is.

Xi és mtsai (2008) vizsgálatai szerint a szél típusa is befolyásoló: míg a viszonylag állandó sebességű szelet a fák jobban viselik, addig a kisebb sebességű, ám nagyobb lökésekkel érkező szeleket nehezebben, hiszen a nagyfokú szélnyírás (azaz a hirtelen változó irányú és sebességű szél, Web2) ellen a fák a rugalmasságukkal kevésbé tudnak védekezni.

3.1.3. A gyökérzet szerepe

Az előző alfejezetekben tárgyaltak szerint a fák kidőlését, vagy törését külső erőhatás, a természetben többnyire a szél erőhatása okozza. Az erőhatással szemben a fák a stabilitásukkal állnak ellent, mindenekelőtt a gyökérzeükkel, illetve a saját tömegükkel.

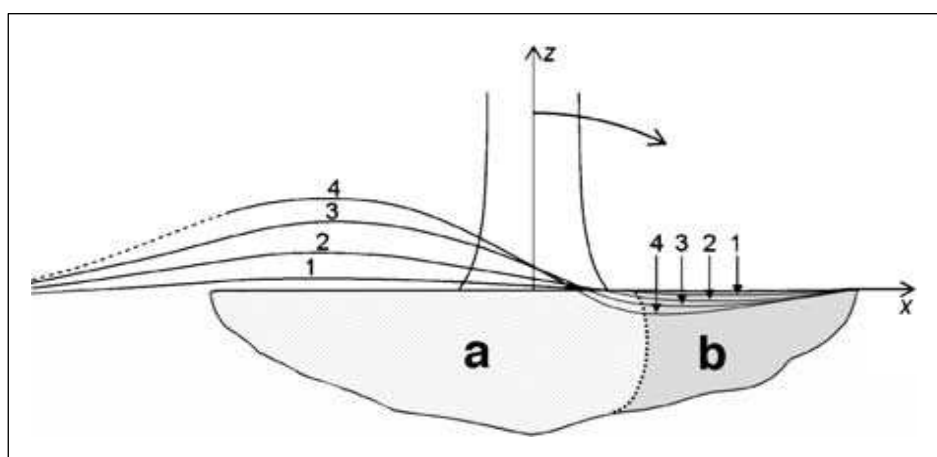
A fa egyik végén befogott (függőleges) tartónak fogható fel, amely a gyökérzetén keresztül tart ellen a szél kifordító erőhatásának (Niklas és Spatz, 2006).

Coutts (1983) véleménye szerint a gyökerek rögzítő hatását, azaz a fák által még elviselt forgatónyomatékokat négy tényező befolyásolja: a gyökér-talaj rendszer tömege (31%), a szél felőli gyökerek szakítószilárdsága (54%), a gyökerek hajlítással szembeni ellenállása a széllal ellentétes oldalon (8%) és a talaj kohéziója a csúszólapon, illetve a nyírószilárdság a széleken (7%). Ezt megerősíti Blackwell és mtsai (1990) és Dupuy és mtsai (2007). England és mtsai (2000) kiegészíti még ötödikként a talaj nyírószilárdságával.

A statikai számításokhoz szükséges méretek a gyökértányér kiterjedése, vastagsága, a törzs mérete (tömege), a gyökértányér (föld) tömege. A gyakorlatban a gyökértányér vastagsága állandónak tekintett, azaz henger (Sinn, 2012; Achim és Nicoll, 2009), ám Lundström és mtsai (2007a) szerint ívelt felületű kúposnak, vagyis valóban tányér alakúnak kell leírni. Utóbbi számításának azonban nagy a felvételezendő adatigénye, ezért a gyakorlatban nem alkalmazzák.

A gyökérzóna vastagsága a fafajtól és a talajtól függ (glejes talajban, valamint meredek hegyoldalon, illetve a talajban található létesítmények felett alacsony, mivel a gyökerek nem tudnak mélyre hatolni (Waisel és mtsai, 2002).

Lundström és mtsai (2007b) leírja, hogy a fa gyökérzetének kifordulása nem a teljes tányérral történik, hanem annak széllal ellentétes oldalán egy része a talaj magas nyomószilárdsága miatt helyben marad (a 7. ábrán „b”-vel jelölt rész). Itt még részbeni talajszint süllyedés is prognosztizálható.



7. ábra A gyökértányér fokozatos kifordulása (Lundström és mtsai, 2007b.)

A 7. ábrán az 1-4. számok jelölik a gyökérzóna luv oldali megemelkedésének, és ennek megfelelő lee oldali süllyedésének fokozatait. Az a betűvel jelölt rész megemelkedik, míg a b betűvel jelölt rész gyakran helyben marad.

Mattheck és Breloer (1993) a szél hatására kiforduló gyökérzet viselkedését 3 fő típusba sorolta: tányérgyökérzet, szívgyökérzet és karógyökérzet szerinti dőlés. A kifordulás-kidőlés menete mindegyiknél más: a lapos tányérgyökérzet szél felőli széle lemezként felemelkedik, a szívgyökérzet mint gömbcsukló elfordul, míg a karógyökérzet tulajdonképpen föld alatti törzstörésként megy tönkre (példák ezekre a 11. ábra illetve a 45. ábra). Mattheck és Breloer (1993) arról is említést tesz, hogy idős korban szinte minden fafajnak tányérgyökérzethez hasonló alakra módosul a gyökérzete.

A gyökerek növekedésének akadályozottsága esetén a gyökértányér kiterjedése egyik oldalon csökken. Achim és Nicoll (2009) szerint bizonyos mellmagassági átmérő (36 cm) alatt nincs ennek jelentősége.

A szél felőli oldalon jóval hosszabbak a gyökerek, mint a szélmentett (és nyomott) oldalon. Emellett a szomszédos fák gyökerei átfedik egymást. (Coutts, 1983; Sinn, 2012), emiatt a fenti modellel erdőben óvatosan kell számolni. Danjon és mtsai (2005) erdőben gyökérösszenövésekről is beszámol. A gyökérelágazások is akadályozzák a fák kidőlését (Mattheck, 2007).

3.1.4. A fák törzsének szerepe a stabilitásukban

Egy fatörzs azonban nem mindig dől, azaz fordul ki gyökerestől, hanem gyakran törik, egy adott törzsmagasságban. A külső erőhatáson felül a fa külső morfológiai tulajdonságai és belső (anyagtulajdonságok, ideértve az egészségi állapotot is) jellemzői is meghatározzák, befolyásolják, hogy törzstörés, vagy törzs-dőlés következik-e be.

A szél hajlító hatása a törzsben a szél felőli oldalon nyúlást okoz, azaz a farostok megnyúlnak, s a szélllel ellentétes oldalon összenyomódnak (itt van jelentősége a cellulózmolekulák felépítéséből adódó hatalmas húzó- és nyomószilárdságnak).

Az erőhatás a fa egyik oldalán húzott, az ellentétes oldalán nyomott övet alakít ki. A két öv közötti semleges vonal a terhelés növelésével a húzott oldal felé tolódik el, ezért a húzófeszültség a fatest szélső rostjaiban, azaz a fapalástban rohamosan nő. A fa legtöbbször a húzott övben törik el, a farostok ott szakadnak el.

A faanyag rugalmassága magas, emiatt a nagymértékű erőhatás okozta alakváltozás az erőhatás abbamaradása után megszűnik, a fa visszanyeri eredeti alakját. Ezt a képességet idegen szóval elasztikusságnak is nevezik. Az elasztikus tartományban, a rugalmassági határ eléréséig a fa még nem törik el, azaz nem szakadnak el a magas húzószilárdságú farostok. Ebben a tartományban pontos eszközzel (1/1000 mm mérési pontosság) mérhető a nyúlás. Az eredményből következtetni lehet a törzstörés eléréséhez szükséges erő, így a szélerő hatására is. Korhadt, vagy üreges fáknál a csökkent keresztmetszet miatt ugyanakkora erőhatásra nagyobb nyúlás mérhető, azonban ugyanakkora húzószilárdsági értéknél ez végzetesebb a fára nézve.

3.2. Állékonyságra vonatkozó favizsgálatok

3.2.1. Favizsgálati mutatók, indexek

E munka a vizsgálatok végzése során a hazai adatokra adaptálva különböző, előzményeiket tekintve a szakirodalomban részben fellelhető mutatókat is használ, amelyek az Anyag és módszer fejezetben lesznek részletezve. A mutatókat a fa egyes (megmért, vagy számított) adataiból képezhetjük, a páros összehasonlítás, másnéven nemlineáris regresszió eszközeivel. Egyik ilyen közismert, erdőben álló fák esetében gyakran használt mutató a magasság-átmérő viszonya. Mattheck és Breloer (1993) ezen túl a magasság:átmérő viszonzszámot, másnéven karcsúsági mutatót a mellmagassági átmérő függvényében alkalmazta, ahol a $h/d_{1,3} = 40$ értéket meghaladó arány esetében már számolni kell a fa törésének megnövekedett veszélyével. Ugyancsak ők alkalmazták a magasság:átmérő viszonzszám függvényében ábrázolt koronaarány:mellmagassági átmérő arányt is.

Ghani és mtsai (2009) pontosabban nem megnevezett szignifikanciájú kapcsolatról szintén beszámol a magasság és átmérő viszonylatában, a fa dőlésének előrejelzéséhez.

A korhadással sújtott fa stabilitásának megítélésére több praktikus megközelítés ismert. Egyik ilyen az ún. Wagener-képlet (Matheny és Clark, 1994), ahol a százalékos stabilitás-vesztéséget a beteg farész átmérőjének harmadik hatványa és a teljes átmérő harmadik hatványának hányadosa adja. Coder (1989) ezen továbblépve már a negyedik hatványt vezeti be az előbbi mutatóra.

A Wagener-képlet, mint mérnöki szabály továbbgondolt és módosított változata a Bartlett⁴-képlet, amely rövid többlet-számítás eredményeként határozza meg a stabilitás-vesztés arányát (Smiley és Fraedrich, 1992), ahol bevezetik az előző jelölések mellett a már nyitott üreg legnagyobb szélességű nyílásának arányát a törzskerülethez mérve (az arányt R betűvel jelölik).

Mivel nem minden korhadás kapcsolódik a fa palástján keletkező nyíláshoz, Kane és mtsai (2001) használhatóbbnak tartja a Bartlett-képlethez képest az ún. Mattheck-képletet. A fában előforduló üregek (odvak) Mattheck és Breloer (1993), Mattheck és mtsai (1995) megfigyelései és mérései szerint, az üreget körülvevő fa rész, mint tulajdonképpeni cső falvastagsága (t) és a fa körlap (vagy tuskó) sugarának (R) hányadosa. Ha ez 30 % alá csökken, az veszélyes a fa állékonyságára nézve.

Wessolly (1995) ezzel nem ért egyet, szerinte mindenekelőtt a korona méretétől (vitorlafelülete miatt) függ a fa állékonysága, nem a fenti 0,3-es hányadostól. Szerinte akár ennél vékonyabb is lehet a szíjácsból fennmaradó, egészséges rész. Mattheck szerint a 30 %-nál vékonyabb fa-rész „becsuklik”, azaz a „Brazier-elhajlást” követi (Sterken, 2005; Mattheck, 2006), Ennos és van Casteren (2010) szerint ez fafajfüggő, a kisebb átmérőjű lágylombos fák inkább hajlanak, mint a sűrűbb szövetű keménylombosok, amelyek az „Euler-kihajlást” követően törnek. Sinn (2000b) említi, hogy akár 1/30 is lehet az arány, amennyiben

⁴ A neves amerikai arborista cég névadó-alapítójáról.

erősen csonkolt fáról, ezáltal kicsi koronafelületről van szó. Végül Bond (2006) kimondja, hogy két hasonló szélterheléssel érintett fa közül az alacsonyabb t/R aránnyal rendelkezőt éri először kár, bár a fa egyéb mechanikai tulajdonságai nagyobb szerepet játszanak a károsodás folyamatában. Ám az előbbi fordítottja is fennáll: két hasonló t/R arányú fa közül az törik ki először, amelyiket a nagyobb terhelés éri. Sander (2006) hozzáteszi, hogy figyelemmel kell lenni a t/R hányados mérési hibákból eredő nagy szórására.

A gyökértányér átmérőjét vizsgálva Mattheck és Breloer (1993) összefüggést keresett a mellmagassági átmérő és gyökérlabda sugara között. A gyökértányér sugárral képzett mutatót használja Wessolly és Erb (1998), továbbá bemutatja Achim és Nicoll (2009) is.

Az élő fa a stabilitásában keletkező hiányosságokat igyekszik kiküszöbölni, ez az úgynevezett „állandó feszültség axiómája”⁵. Eszerint a fa fejlődése során (Mattheck, 2006; Sinn, 2000c; Niklas és Spatz, 2012) különböző erőhatásoknak van kitéve, amelyhez hosszú élete során alkalmazkodnia kell, ezért a lehető legjobban ki akarja egyenlíteni a káros hatások következményeit. Emiatt az elsődleges vastagodás és növekedés mellett másodlagos (járulékos) növekedésre is képes, ilyen pl. az egyoldalú megvastagodás, vagy a húzott és a nyomott fa különbségei is, de a járulékos gyökerek fejlődése is megemlíthető.

Tapasztalatok szerint, a rugalmassági modulust leszámítva, az anyagtulajdonságok (mint pl. a sűrűség, Poisson-tényező) csak korlátozott szerepet játszanak a fa dinamikai tulajdonságai terén. Ezzel szemben a kis morfológiai eltérések képesek szélsőséges reakció okozására, így akár rezonanciakatasztrófát okozhatnak a sajátfrekvenciához közeli, szél keltette rezgések (lásd később). Ezen a téren a nagy magasság-átmérő arányú fák sokkal veszélyeztetettebbek a törzstörésre nézve, mint a gyökerestől való kifordulásra. A dinamikai tulajdonságokat tehát –hasonlóan a statikai adottságokhoz– legnagyobb részben a fa alaki tulajdonságai (magasság, átmérő, koronafelület, gyökérszél mérete, stb.), ezt követően a (szél)terhelés, ezen túl kisebb részben egyes anyagtulajdonságok befolyásolják (Sellier és Fourcaud, 2009; Wessolly és Erb, 1998; Peltola és Kellomäki, 1993).

3.2.2. Favizsgálat fúrásvizsgálattal

Széles körben elterjedt vizsgálat a fúrással szembeni ellenállás mérése⁶. Az eljárást Frank Rinn fejlesztette ki az 1980-as években (Rinn, 1989). A módszer alkalmazása során egy speciális fúrógéppel megfúrják a fát, és a keletkező ellenerő mértékére következtetnek az állandó előtolású fúrógép áramfelvételének ingadozásából.

A furat keletkezése tulajdonképpen megfelel egy diagramnak, amelynek y tengelye a fúrási ellenállást, míg a fúrófej megtett útvonala az x tengely. Így a magas fúrási ellenállásra utal a diagram vonalának nagyfokú kitérése, míg üregben futó fúrófej gyakorlatilag a nulla nívón halad. (Mattheck és mtsai, 1997). Az eljárás alkalmas többek között az évgyűrűszélesség (növedék), valamint a faanyag sűrűségének megállapítására, illetve a fában található üregek, járatok, gombák által részben már lebontott faanyag kimutatására, ezáltal a

⁵ Axiom konstanter Spannung, Axiom of uniform stress

⁶ Bohrwiderstandsmessung, Resistographie, drilling resistance

statikai-állékonysági tulajdonságok megismerésére szolgál (Niemz és mtsai, 2002; Isik és Li, 2002; Pamplona és mtsai, 2007). Az eredmény értelmezése magas szintű faanatómiai ismereteket kíván (Siegert, 2012).

Az eljárással megállapítható többek között a fában található üregek kiterjedése, illetve az üregek falvastagsága (maradék falvastagság). Egy másik segédeszköz, a „fraktométer” is használható az előbbi mellett: növedékfúró magját belehelyezve adatot nyújt a vizsgált fa húzó-, vagy nyomószilárdságára (Sinn és Sinn, 1997). Jelen munkához nem volt szükség a használatukra, nem kis részben a fa egészségét veszélyeztető eljárásuk miatt.

3.2.3. Favizsgálat húzásvizsgálattal

A szél okozta terhelések számíthatók, jellemezhetők a fák mérhető paramétereinek (magasság, átmérő, tömeg, korona kiterjedése, súlypont, stb.) elemzésével, azonban bizonyos, a statikai tulajdonságok megismeréséhez szükséges minden értékeket általában nem tudunk megmérni. Ilyen adat például a föld alatt elhelyezkedő gyökérszövet egészségi állapota, mérete, valamint a gyökérlabda mérete és tulajdonságai.

Ezek megismerésére egy szellemes módszer vált ismertté, a fa-húzási vizsgálatok⁷. Ennek során a szél hatását mérhető erőhatással (csörlővel és erőmérővel) helyettesíti, majd rögzítik a mesterséges erőhatás által okozott kisebb változásokat (Wessolly és Erb (1998). A módszert „Statikailag integrált vizsgálatnak (SIA⁸)”, vagy „Statikailag integrált fa-bírálatnak (SIB)” nevezik).

A módszer a változások kétféle kimenetelét méri:

1. a gyökérlabda elmozdulását, amikor szél felőli oldalon megemelkedik, míg a szélmentett oldalon süllyed (7. ábra), illetve
2. a fatörzs hajlását, ahol a szél felőli oldalon nyúlik, a szélmentett oldalon összenyomódik a fatest. Középen a semleges zóna foglal helyet.

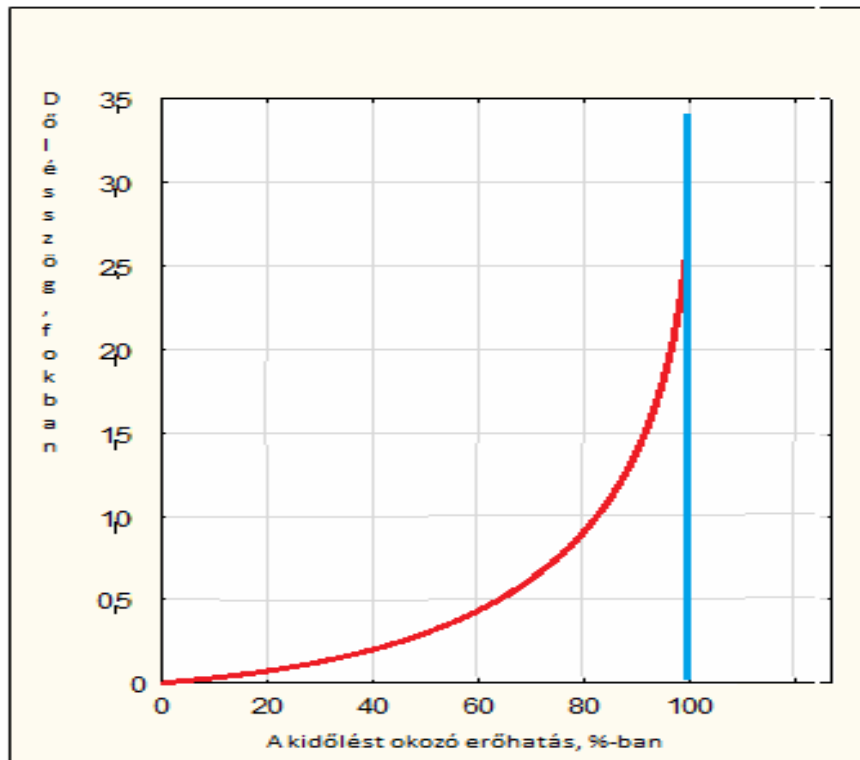
Az első esetben az erőhatás a fa hajlításával egyidejűleg a fa tövét is hajlítja, és a gyökérlabdát is megemeli. Ilyenkor szükséges mérni a törzs kihajlását fokokban (századfok pontossággal mérhető), amelyből következtetéseket vonhatók le a fa stabilitására vonatkozóan. Ezt az eljárást dőlésmérésnek, illetve állékonyságmérésnek⁹ is nevezik (Sinn, 2003).

Wessolly és Erb (1998) szerint a kidőlés minden fafajnál hasonló menetet ír le, és a 8. ábra szerinti görbével szemléltethető.

⁷ Zugversuch, pulling-test

⁸ Statisch Integrierte Abschätzung, Statisch Integrierte Baumbeurteilung

⁹ Neigungsmessung, Standsicherheitsmessung



8. ábra Húzási görbe, Wessolly és Erb (1998) nyomán

Jelenleg a húzásvizsgálat hajlásmérés az egyetlen, a széllel szembeni gyökérellenállás megismerésére alkalmas eljárás.

A második eljárással a törzs elasztikus tulajdonságait ismerhetjük meg. Ilyenkor a törzs szélső farostjainak megnyúlását kell mérni (század-, vagy ezredmilliméterben). A farostok, illetve a fatest megnyúlása vagy összenyomódási mértéke információt nyújt az adott fatörzs rugalmasságára, elasztikusságára, ezáltal az egészségi állapotára illetve az állékonyosságára nézve is, mivel egy üreges fa ilyen adottságai gyengébbek. Ezt az eljárást törési biztonság-mérésnek, rugalmassági mérésnek, vagy nyúlásmérésnek¹⁰ nevezik (Sinn, 2003).

Aszámítási háttére Sinn (2003) nyomán a következő:

A hajlítónyomaték (M_h) és az ellenállási nyomaték (M_w) a maximális feszültség (σ_{\max}), képletben:

$$\frac{M_h}{M_w} = \sigma_{\max} \quad (9)$$

A Hooke-törvény kimondja, hogy egy rugalmas test alakváltozása arányos azzal az erővel, mely az alakváltozást okozza. Másképpen a mechanikai (húzó, nyomó) feszültség (σ) a fajlagos nyúlással (ε) arányos, és az arányossági tényező a rugalmassági modulus vagy Young-modulus (E):

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (10)$$

¹⁰ Bruchsicherheitsmessung, Elastomethode, Dehnungsmessung, Inclinomethod

A (10) képletből a fajlagos nyúlás mérhető, a rugalmassági modulus fajtára jellemző, táblázatokból nyerhető, csakúgy, mint egyes szilárdsági értékek. A hajlítónyomaték szintén számítható.

A fajlagos nyúlás:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (11)$$

ahol:

L_0 a még terheletlen fa (azaz a nyúlásmérő érzékelői közötti (beállított) távolság,

L az erőhatás kifejtését követő megnyúlt hossz,

ΔL a hossz változása

Az eredményből a vizsgált fa stabilitására vonatkozó információhoz jutunk, mivel a legkisebb faanyagzilárdság (nyomófeszültség, R) / maximális feszültség arány megadja a törési biztonságot.

$$\frac{R}{\sigma} = \text{törésbiztonság (\%)} \quad (\text{Sinn, 2003}) \quad (12).$$

Az eljárás a megnyúlás mérésének pontatlansága, illetve a fa keresztmetszetének nagy általánosítása, és nem utolsósorban az eszközigenyessége miatt az értekezés lehetőségein túlmutat.

Más számítási úton is el lehet jutni a törési biztonsági értékek meghatározásához (Wood, 1995; Ennos és van Casteren 2010; Niklas és Spatz, 2012). Eszerint ott fog eltörni a fa, vagy legalábbis ott a legnagyobb erre a veszély, ahol a másodrendű nyomaték a legkisebb értéket veszi fel. Ennek számítása az Anyag és módszer fejezetben részletesebben bemutatásra kerül.

Az egyes szilárdsági tényezőket táblázatokban megtalálhatók (Stuttgarter Festigkeitskatalog: Wessolly és Erb, 1998; Sinn, 2003; Babos és mtsai, 1979). Azonban óvatosan kell bánni az eredményekkel; mint minden mérés, ezeknek az értékeknek is van egy bizonyos szórása (Sander, 2006).

A számítások során kirajzolódik, hogyan viselkedik a vizsgált fa a növekvő szélterhelésre. Az adatok extrapolálásával megadható, hogy a fa dőlése illetve törése mekkora szélereősnél következik be, vagy a tetszés szerint megcélzott (nagy) szélereőség hatására milyen biztonsággal marad állva a fa.

Itt szükséges megemlíteni, hogy a fenti, statikus favizsgálatokon túl a technika ugrásszerű fejlődésével nagy léptékben terjednek a dinamikus favizsgálatok módszerei is. Ez külön kutatásokat érdemel, ezért jelen munka nem tárgyalja. A dinamikus favizsgálatok egyes alapjairól rövid áttekintés olvasható a Függelékben található, **I. A dinamikus favizsgálatok** cím alatt.)

3.2.4. A favizsgálatok fő irányainak szemléletbeli különbségei

Mattheck és Breloer (1993) szerint a húzásvizsgálat nem ad kielégítő eredményt a szilárdsági tényezőkről, csupán csak az adott faanyag merevségére. Érvként felhozzák, hogy a C_w tényező fáról fára nagy változatosságot mutat, valamint a szélerővel is változik (Wessolly és Erb, 1998). Szerintük a szélerővel kapcsolatban álló felület mérése is nehézkes és pontatlan, ráadásul beépített környezetben a szélerő rendkívül bizonytalan. Ezt állítja Shigo, (1994) is. Spatz és Brüchert (2000) hozzáteszi, hogy a szélterhelés (a korona)felületen megoszló terhelés, tehát a törzs egy pontján rögzített acélkötél nem tökéletesen helyettesíti a szél- és további (pl. hó) terhelést.

Itt kell megemlíteni azt a tudománypolitikai érdekességet, hogy az arborista körökben „módszertani vita”¹¹ néven elhíresült szakmai összetűzések miatt a 2000-es évektől két tábor alakult ki (Siegert, 2012).

Egyik oldalon az iskolateremtő Claus Mattheck által kidolgozott eljárás követői (Visual Tree Assessment, VTA-Methode) állnak, a másik fél a szintén irányzat-alapító Lothar Wessolly módszereinek (Zugversuch, Elasto- und Inclinomethode, SIA) alkalmazói.

Mattheck szerint a fa állékonysági vizsgálatokat mindenekelőtt mérnöki-mechanikai ismeretekkel felvértezve kell végezni, ahol a szemrevételezés, a fa teljes feltérképezése, konkrét ismertetőjegyeinek megismerése a legfontosabb, amelynek során a fára ható erők és az azok nyomán keletkező feszültségek leírása szükséges. Ezt a szemrevételezést segítik a különböző rendelkezésre álló eszközök, mint pl. a rezisztográfok, vagy a hangtomográfok.

A másik irányzat (Wessolly és Erb, 1998; Sinn, 2003) szerint a fa statikai-állékonysági megismerése jól kidolgozott a húzó vizsgálatok során alkalmazott nyúlásmérések, illetve kihajlásmérések eredményeként megállapítható a fa állékonysága, (szél) erőhatással szembeni ellenálló képessége.

Mattheck szerint a költséges húzásvizsgálatok helyett a fát tüzetesen meg kell szemlélni, így a fa „testbeszédét” olvasva lehet a belső hibáit megismerni.¹²

A két irányzat mintegy 5-6 évvel ezelőttig késhegyre menő vitákat folytatott egymással, nívós tudományos folyóiratokon át a napi sajtón keresztül is. Azóta előtérbe került azon szakemberek véleménye, akik mindkettő előnyeire helyezik a hangsúlyt. Egyik jelentős eredmény Reinartz és Schlag (1997) munkájában jelenik meg, amely az integrált favizsgálat¹³ mellett tör lándzsát.

Itt is meg kell említeni, hogy ezen a téren jelentős kutatás-fejlesztési tevékenység folyik a Nyugat-magyarországi Egyetem Soproni Campusán Prof. Dr. Divós Ferenc vezetésével, számtalan gyakorlati eredménnyel (Divós és Mészáros, 1994; Divós és Szalai, 2003; Divós és mtsai, 2008; Divós és mtsai, 2009; Wang és mtsai, 2004).

¹¹ Methodenstreit

¹² Die Zeit, német napilap, 2007. nov. 15. Hamburg

¹³ Integrierte Baumanalyse (IBA)

3.2.5. A tomográf alkalmazása a favizgálatban

A fák belső, nem látható, ám a stabilitásuk szempontjából oly fontos részeinek sérülésmentes (roncsolásmentes) vizsgálatának kidolgozása fontos lépés volt a favizsgálati módszerek fejlődése terén. Megalkották a hangtomográfia elvén működő impulzuskalapácsokat, valamint kifejlesztették a ma gyakorta használt hangtomográfok három legismertebb márkáját: az Arbotom, a Picus és a Fakopp mérőműszereket (Siegert, 2012). A gyakoribb, kereskedelemben hozzáférhető eszközök nagyobb része a hallható frekvenciájú tartományban dolgozik, ezért akusztikus tomográfoknak¹⁴ nevezik, a 20 000 Hz környékén és az ennél magasabb frekvenciájú hangokat kiadó eszközöket ultrahangos tomográfoknak hívják (Bucur, 1999).

A hangtomográfok működés elve Mattheck és Breloer (1993) azon ötletén alapszik, hogy a beteg fában a hang terjedési sebessége látszólag „lelassul”. A korhadás előrehaladtával (a vörös- vagy fehérkorhadással) egyre lazább lesz a leépülő faanyag. Amennyiben már üreg is keletkezik, ott a hanghullámok a jobb hangvezető képességű, még élő faanyagban terjednek, „kikerülve” a beteg részt, ami hosszabb megtett utat, ezért több időt jelent. Azaz nem a sebesség lesz kisebb, hanem mivel a kisebb sűrűségű (porózusabb, levegősebb) faanyagban halad a hang, a megtett út és ezáltal a megtételéhez szükséges idő lesz egyre hosszabb. Azt az időintervallumot kell mérni, amely alatt a hanghullám egyik pontból az ismert távolságú másikig jut. Ebből kiszámítható a relatív hangsebesség. Mivel az egészséges faanyag hanghullám vezető képessége számos fafajra vonatkozóan ismert, a vizsgálati értékekből következtetni lehet a fa belsejének állapotára, az esetleges korhadásokra, üregekre, odvak jelenlétére.

Nagyjából az előbbiekkal egy időben Dr. Mészáros Károly is felismerte, hogy az elsődleges faipari termékek (fűrészáru) vizsgálatánál alkalmazott eljárás, a hanghullámok fában való terjedési sebességének mérése adaptálható az élő, álló fák vizsgálatára is, amelynek során a fa belső részeiben elhelyezkedő, gyakran nem látható betegségekről fontos információk nyerhetők (Divós és Mészáros, 1996).

A relatív sebességcsökkenés tehát:

$$RVC = 100 \times \frac{V_{\text{referencia}} - V_{\text{mért}}}{V_{\text{referencia}}} \quad (13)$$

Fontos tény, hogy húr irányban más a hang terjedési sebessége fában, mint sugár irányban. A tomográfok szoftverei azonban a törzs (érzékelők) alakjának megfelelően alkalmazzák a különböző referenciaértékeket (Bucur, 2006; Lin és mtsai, 2008; Johnstone és mtsai, 2010). A fában terjedő hang sebessége a következő (Johnstone és mtsai, 2010; Bucur, 1999):

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (14)$$

ahol:

¹⁴ Sonic tomograph, acoustic tomograph, Schalltomograph

E: a faanyag rugalmassági modulusa,
 ρ : a faanyag sűrűsége.

Az ultrahangos tomográf működési elve, a magas frekvenciát nem tekintve ugyanolyan, mint az akusztikus tomográfé.

A hangtomográfok mért adatainak nagy szórására hívja fel a figyelmet Sander (2006), valamint Johnstone és mtsai (2010).

A tomográfok által előállított végeredményt a gyakorlatban tomogramnak nevezik. A tomogram a stabilitásvizsgálatokon túl alkalmas a fa nem látható belsejének megismerésére, amely többek között különböző kártevők vagy kórokozók fejlődésének, előrehaladási sebességének megismeréséhez is szükséges. Segítséget ad a sebkezelések, fasebészet¹⁵ alapadataihoz. Alkalmazása napjainkban a fakataszterek készítésének elengedhetetlen részévé vált.

Szaller (2013) vizsgálatai szerint a gombák vízszintes és függőleges irányú terjedése is nyomom követhető a hangtomográf segítségével.

Favizsgálói gyakorlatban is ismert a humán egészségügyben ismert computer-tomográf, a Röntgen-sugárzást alkalmazó műszer. Ennek hatalmas eszközigénye van, amely terepen nem, vagy nehézkesen használható, azonban laboratóriumi körülmények között nem példa nélküli (Biró, 2004; Johnstone és mtsai, 2010).

3.2.6. Favizsgálat elektromos potenciál méréssel

A fák egészségi állapotának magállapításához további hasznos információkat nyújt a fatörzs elektromos potenciáljának mérése (Koppán és mtsai, 2000). Az esetleges áramlási zavarok megfigyelésére alkalmas módszer segítséget adhat a fatörzs, korona vagy a gyökérzet fiziológiai állapotának megismeréséhez, sérüléseik, elhalásuk diagnosztizálásához (Lonsdale, 1999). A gombák okozta elváltozások mérésére is alkalmas, éppen ilyen célra fejlesztette ki Shigo is az ún. Shigometer-t, bár még az eredmények nagyfokú bizonytalansága miatt egyelőre nem terjedt el széles körben (Wilson, 1983; Nicolotti és Miglietta, 1998; Veperdi, 2008; Johnstone és mtsai, 2010).

¹⁵ Német nyelvű irodalomban Baumchirurgie, angol nyelvterületen tree surgery.

4. Anyag és módszer

A fák egészségi vizsgálatára 2008. július 1-től 2014. április 30-ig, különböző helyszíneken került sor, általánosságban többnyire lakott területeken. A fák környezete miatt intenzív emberi hatásokkal érintettek, amelyek lehetnek a talaj, a közlekedés, az épített környezet mikroklimatikus befolyásai, parkfenntartási intézkedések hatásai. Esetenként erdős, vagy mezőgazdasági területen is történtek vizsgálatok, azonban ilyenkor is kimutatható volt a házak között tapasztalható, e munkának tárgyát jelentő emberi vonatkozások prioritása, a környező ökoszisztémák többi alkotóelemének elhanyagolható befolyása mellett.

Ilyen értelemben a lakott terület például a házak közötti tereket, utcákat, de a parkokat, kerteket, falvakat, utak széléit is jelentette, ahová a fákat nem gazdasági hasznosítás céljából ültetik. A levegőszennyezést most nem számítva, valamilyen emberi eredetű károsítással sújtott fákat nagyon könnyű találni.

A vizsgált fák kiválasztása az elhelyezkedésük jellege miatt nem a sablonos mintavétel módszereit követte.

Alapvetően kétféle vizsgálatot ismer a szakma:

1. vizuális favizsgálatok¹⁶, benne a hangtomográfós favizsgálatokkal, továbbá
2. statikai favizsgálatok¹⁷.

A kétféle vizsgálat között számos átfedés van.

4.1. Anyag

4.1.1. A vizsgálatba vont fajok

Lakott területeken előfordulnak őshonos, illetve idegen származású fajok is. Utóbbiak többnyire a díszítőértékük miatt kerültek hazánkba, de igényeikre, kezelésükre nézve kevés tapasztalattal rendelkezünk. A növényegészségi célú favizsgálatokhoz szükséges információk róluk azonban rendkívül nehezen beszerezhetők.

A 2. táblázat mutatja be a szemrevételezéssel illetve a műszeres favizsgálatokkal érintett fajokokat, röviden felsorolva az állékonysági szempontból legfontosabb tulajdonságaikat, nem törekedve a teljességre (a tudományos név szerinti sorrendben). A munkában ezt követően fák csak a magyar nevükkel szerepelnek.

A fák kiválasztása véletlenszerűen történt, részben külső megbízásokra, részben az egyes vizsgált fák kockázatosnak ítélt helyszíne miatt. A fák 90 %-a Nyugat- Magyarországon, ezen belül 2/3-a Szombathely és környékén található, részben utcákon, tereken, továbbá kertekben, parkokban, illetve kis számban külterületi, de épített és intenzív használat alatt befolyásolt környezetben.

¹⁶ Ebben a részben a Visual Tree Assessment (VTA) nemzetközi protokoll szerint következnek az elemzések, amely a szemrevételezés szóval félreértésre adhat okot. A VTA-eljárásban a fa külső és belső paramétereinek mérése és az eredmények értékelése foglal helyet.

¹⁷ Ebben a részben a Static Integrated Assessment (SIA) nemzetközi protokoll szerint következnek az elemzések, amely mindenekelőtt a húzásvizsgálaton nyugszik.

2. táblázat A vizsgálatokkal érintett fajok

Fafaj	Tudományos név	Favizsgálati szempontok szerinti tulajdonságok
vadgesztenye	<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	Lakott területek egyik leggyakoribb fája. Utcákon, parkokban sorfaként is gyakran ültetik, elviseli kevés rendelkezésre álló területet. Nem bírja a pangóvizet. 20-22 m magasabbra nem nő, de átmérőben a 0,8-1,2 m-t is eléri. Gesztje és gyökerei nem tartósak, de szinte törzse teljesen kiüregesedve is állékony.
korai juhar	<i>Acer platanoides</i> L.	Lakott területek egyik leggyakoribb fája. Utcákon, parkokban sorfaként is gyakran ültetik, de a kevés helyet nem szereti. 20-25 m magasra is megnő. A burkolt utcákon, tereken levelei nyár elejére megpörkölődnek. Törzse a vékony kéreg miatt sérülékeny.
gömbjuhar	<i>Acer platanoides</i> 'Globosum'	Utcafásításban kedvelt a gömb alakúra metszhető koronája miatt. 30-40 éves korban a metszések miatt a koronaalap korhadásnak indul. Kis termetű (4-5 m) faként nevelik. Kérgé vékony. A fűnyírástól a törész sérülései miatt a palástból kiemelkedő sebkallusz képzésre hajlamos.
ezüstjuhar	<i>Acer saccharinum</i> L.	Utak kísérőfásításában, de parkokban is kedvelt fafaj. Terebélyes koronáját a fehér fagyöngy (<i>Viscum album</i> L.) gyakran megtámadja, és erős fertőzés esetén a fát el is pusztíthatja. Ettől eltekintve stabilitási kérdésekben nem szokott probléma lenni vele.
bálványfa	<i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle	Ültetni ritkán szokták, de önvetényülten a legrosszabb körülmények között is (pl. résnövényként) gyökeret ver és terebélyes, 20,22 m magas fává növekszik. Nagyon jól bírja a mostoha városi körülményeket is.
mézgás éger	<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn	Patakparton, vagy közutak mentén nedves helyeken találkozhatunk vele. A mozgó vizet keresi. Ilyen helyeken jól érzi magát. 50 éves korára gyakran támadják tőkorhasztó taplók. Erdőn kívül 20-24 m magasra nő meg.
bibirceses nyír	<i>Betula pendula</i> Roth.	Nem hosszú életű fa, de 30-40 éves korára a koronája kigyérül, ezért még komolyabb állékonyosság-problémák megjelenése előtt eltávolítják. Nem kedveli a pangóvizet és a levegőtlen termőhelyet. Utcafásításban nem érzi jól magát, ám parkokban, kertekben inkább, itt 20-24 m magasra is megnőhet.
gyertyán	<i>Carpinus betulus</i> L.	Utcafásításként nem válik be, de parkokban a Nyugat-Dunántúlon jól megél, itt legfeljebb 20 m magasra nő. Nagyon széles koronája, és páraigénye miatt ritkán ültetik.
szelíd-gesztenye	<i>Castanea sativa</i> Mill.	Gyümölcse miatt kedvelt kerti fa Nyugat-Magyarországon. Állékonyosága, méretei a kocsányos tölgyéhez hasonlíthatók, de a legfontosabb kórokozója, a <i>Cryphonectria parasitica</i> (Murr.) Barr. a fa vagy részeinek elhalásával stabilitási problémákat is okoz.

2. táblázat A vizsgálatokkal érintett fajok (folyt.)

Fafaj	Tudományos név	Favizsgálati szempontok szerinti tulajdonságok
nyugati ostorfa	<i>Celtis occidentalis</i> L.	Egyik legjobb várostűrő fafaj, amelyet leggyakrabban utcafásításként, térfásításként ültetnek. Jól bírja a levegőtlen talajt és a körbeaszfaltozott élőhelyet is. Jól tűri a metszést, bár ilyenkor nagy kiterjedésű golyvákat képez a törzsén. Közepes méreteket ér el.
török mogyoró	<i>Corylus colurna</i> L.	Parkfaként, de kertekben gyakran előforduló, kistermetű (15-18 m) fa. Állékonysági problémája ritkán adódik.
magas kőris	<i>Fraxinus excelsior</i> L.	Parkfaként gyakran találkozhatunk vele, és itt is hatalmas méreteket (25 m magasság, 0,8-1 m átmérő) tud elérni. Jól viseli a nagy kiterjedésű korhadásokat is. Lakott területen gyakori kórokozója az almafa-rozsdástapló <i>Inonotus hispidus</i> (Bull.) P. Karst.)
virágos kőris	<i>Fraxinus ornus</i> L.	Száraz, sekély termőrétegű termőhelyeken kívül nem ajánlott ültetni. Kis termetű fa, de stabilitási kérdésekben ritkán találkozhatunk vele.
gledícsia	<i>Gelditsia triacanthos</i> L.	Parkban, kertekben fordul elő, közepes-nagy termetű fa. 20 m-nél magasabbra nem nő, statikai problémái nem szoktak felmerülni.
közönséges dió	<i>Juglans regia</i> L.	Régebben utcafásításként kedvelt fa volt, mára inkább csak kertekben találkozunk vele. 25 m magasságot is elér. Kérge még idős korban is sérülékeny, de állékonyságát gyak igen nagy kiterjedésű korhadásra veszti el.
ernyős magnólia	<i>Magnolia tripetala</i> L.	Alacsony termetű fa, inkább kertekben, parkokban található. Törzssérüléseket jól viseli, állékonysági kérdések nem fordulnak elő vele kapcsolatban.
fehér eper	<i>Morus alba</i> L.	Lakott területen ritka, azonban idősebb útkísérő fásítások, mezei fasorok gyakori faja. Fejesfa üzemmódban hatalmas üregeket is elvisel a törzsében. A koronaalapja a gyakori metszés következtében fellépő korhadás miatt lehasadhat. Metszés nélkül nagy termetű fává fejlődik.
meggy	<i>Padus</i> sp.	Kertben előforduló kis termetű fa, a <i>Prunus</i> és <i>Padus</i> -félék gyakori kórokozója, a <i>Daedaleopsis confragosa</i> var. <i>tricolor</i> (Bull.) Bondartsev & Singer eleinte az ágain komoly károkat okoz, ezért azok gyakran lehasadnak. Sekélyen gyökerezik, de állékonysága a kisebb méret miatt jó.
kínai császárfafa	<i>Paulownia tomentosa</i> (Thunb.) Steud.	Terebélyes, magas fává fejlődik, ám kevés tapasztalatunk van róla. Utcafásítás csak mutatóban akad belőle, de egy-egy méretes egyed található parkokban.

2. táblázat A vizsgálatokkal érintett fajok (folyt.)

Fafaj	Tudományos név	Favizsgálati szempontok szerinti tulajdonságok
lucfenyő	<i>Picea abies</i> Karst.	Lakott területeken kedvelt örökzöld, különösen a Nyugat-Dunántúlon. Parkokban, kertekben gyakori. Akár 25-26 m magasra is megnő a lakott területen. Tipikus tányérgyökérzetű fa. Szoliterként kevésbé dőlésveszélyes, mint az erdőben. Méreteit a legkönnyebb meghatározni a sudaras termete, lapos gyökérzete miatt.
ezüst fenyő	<i>Picea pungens</i> Engelm.	A luchoz sok téren hasonló tulajdonságokkal jellemezhető, de lakott területen annál rövidebb életű fa. Előfordul utcafásításban, parkokban, kertekben.
fekete fenyő	<i>Pinus nigra</i> A.	Lakott területeken nem nő magasra (15-20 m), és ritkán is ültetik. Utcafásításként nem érzi jól magát, de parkokban előfordul. Állékonysági problémákra nem hajlamos.
erdei fenyő	<i>Pinus sylvestris</i> L.	Magas termetű (20-25m) fa a belterületeken is, és parkokban, kertekben gyakori. A humidabb klímát kedveli. Állékonysági problémákra nem hajlamos.
juharlevelű platán	<i>Platanus × hispanica</i> Münchh.	Hatalmas termetűre nő meg, jó a várostűrő képessége. Nagy termete miatt azonban gyakran hullatja kisebb-nagyobb ágait, ezért ezzel veszélyt okoz. A sebzéseket jól tűri. Széles gyökérrendszert fejleszt, statikailag ágait, törzsét jól meg tudja erősíteni, ezért állékonysági kérdések ritkán merülnek fel.
szürke nyár	<i>Populus × canescens</i> (Aiton) Sm.	Inkább falvakban található, és ott is többnyire parkokban. Nagy termetű fa. Kórokozója a nyártapló <i>Phellinus tremulae</i> (Bondartsev) Bondartsev & Borisov és a tűztapló <i>P. igniarius</i> (L.) Quél. Jó stabilitású fa, a gyakori kórokozók tevékenysége ellenére is.
jegenyenyár	<i>Populus nigra</i> 'Italica'	Legmagasabb fa lehet a lakott területen is, 35 m fölé is képes nőni. Korán korhadni kezd, xylofág rovarok is kedvelik, de keskeny koronája és hatalmas pillérszerű palánkgyökerei miatt nem szoktak stabilitási kérdésekben problémái felmerülni. Tipikus szoliter fa. Városokban ritkábban fordul elő, de földutak gyakori kísézője, vagy határjelzőként is alkalmazták. Napjainkban kevésbé divatos, gyakran más jegenyetermetű fajtával helyettesítik. A magyar táj jellegzetes eleme.
korai nyár	<i>Populus x euramericana</i> 'Marilandica'	Terebélyes, de ritka koronája miatt kevésbé ültetik utcafásításnak vagy kertekbe és parkokba. Útkíséző fásításként azonban gyakori. Nagy a térigénye. Idős korában gyakran nehezen előrejelezhetően dől vagy törik. Rövid életű fa.

2. táblázat A vizsgálatokkal érintett fafajok (folyt.)

Fafaj	Tudományos név	Favizsgálati szempontok szerinti tulajdonságok
madárcseresznye	<i>Prunus avium</i> L.	Kis-közepes termetű, nem hosszú életű fa. Kertekben gyakori, de a 'Kanzan' díszváltozata kedvelt az utcafásításokban. Jellegzetes kinövései miatt törzse ritkán hengeres. Gyakori kórokozója, a <i>Daedaleopsis confragosa</i> var. <i>tricolor</i> (Bull.) Bondartsev & Singer, amely korhasztásával jelentősen ronthatja az állékonyt.
csertölgy	<i>Quercus cerris</i> L.	Városokban ritkán találkozunk vele, de parkokban előfordul. Nagy termetű fa, azonban sérülésre hamar elkezd korhadni. Gyakori kórokozója a kétalakú csertapló (<i>Inonotus nidus-pici</i> Pilát), amely súlyos károkat okoz a stabilitásában.
kocsánytalan tölgy	<i>Quercus petraea</i> (Mattuschka) Liebl.	Lakott területen a parkokban, de leginkább a zártkertekben fordul elő. Nagy termetű és hosszú életű fa, de statikai problémái ritkán fordulnak elő.
molyhos tölgy	<i>Quercus pubescens</i> Willd.	Lakott területen a parkokban, de leginkább a zártkertekben fordul elő. Közepes termetű és hosszú életű fa, de statikai problémái ritkán fordulnak elő. Nagyon lassú növekedésű, ezért nem ültetik, de Balaton-felvidéki zártkertekben nem ritka.
kocsányos tölgy	<i>Quercus robur</i> L.	Belterületeken ritkán található, de legelőkön szoliter faként előfordul. Rendkívül hosszú életű, és kifejezetten stabil fa, nagy üreggel is sokáig állékony marad. Kidőlése vagy törése csak nagyon idős korban számíthatunk, de ez is jól előrejelezhető.
piramistölgy	<i>Quercus robur</i> 'Fastigiata'	Keskeny, kúpos koronája miatt kedvelt utcai sorfa, bár a hatalmas termetével egy idő múlva a közeli házak tetőzetében, vagy gyökerei emelő hatásával építmények alapjaiban is problémát okoz. Hosszú életű, de több gombafaj gyakran támadja (többek között a vastagapló <i>Phellinus robustus</i> (Karst.) Bourdot & Galzin; labirintustapló <i>Daedalea quercina</i> (L.) Pers.)
fehér akác	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	Közepes termetű. Lakott területen 2 m magasságot elérő fa. Hosszú, pányvaszerű gyökerei nagy stabilitást kölcsönöznek neki. Kórokozókkal szemben igen ellenálló a fája. Stabilitási kérdések nem merülnek fel vele kapcsolatban. Utcafásításként előfordul, ezen kívül kertekben, de inkább spontán úton jelenik meg.
szomorúfűz	<i>Salix alba</i> x <i>S. babylonica</i>	A <i>S. alba</i> L. alapfajjal együtt a parkok, kertek kedvelt, nagy méreteket is elérő fája, bár egyes vátozatai kimondottan alacsonyak. Többetvízhatást igényli. Gyakran törnek le nagy ágai, törzse korán odvasodik, de így is hosszú ideig él.

2. táblázat A vizsgálatokkal érintett fajok (folyt.)

Fafaj	Tudományos név	Favizsgálati szempontok szerinti tulajdonságok
japánakác	<i>Sophora japonica</i> L.	Hatalmas méreteket elérő fa, amelynek magassága 25 m, átmérője 1 m is lehet. Jól bírja a körbebetonozást és a metszést is, de kezeletlen sebeknél hamar üregesedik. Jellegzetes kártevője a <i>Neonectria galligena</i> (Bres.) Rossman & Samuels, amely golyvaszerű kinövést okoz.
házi berkenye	<i>Sorbus domestica</i> L.	Ritkán szem elé kerülő fa, jóformán csak kertekben fordul elő. Közepes termetű fafaj, széles koronával. Stabilitási problémája nem fordul elő.
tiszafa	<i>Taxus baccata</i> L.	Városokban inkább a parkokban található alacsony fa. Statikai problémái nem szoktak előfordulni.
kislevelű hárs	<i>Tilia cordata</i> Mill.	Egyik legkedveltebb fafaj a lakott területeken a sűrű lombozata, illatos virágzata, vszonylag gyors növekedése, hosszú élete, jó metszhetősége miatt. Gyakran csonkolják, ilyen helyeken be szokott korhadni, de ezt is jól tűri. A tőkorhasztó gombák viszont a gyökerét is támadva gyorsan kidőlését okozhatják. Gyakori kórokozója lakott területeken a Lakkostapló fajok (<i>Ganoderma adspersum</i> (Schulzer) Donk, <i>G. applanatum</i> (Pers.) Pat.), amely tősrüléseken hamar behatol. Ültetik utcákra, terekre, de kertekbe, parkokba is.
japán gyertyánszil	<i>Zelkova serrata</i> (Thunb.) Makino	Kevés tapasztalat és kevés adat áll rendelkezésre e közepes termetű fafajról. A metszést jól tűri.

Csak szemrevételezéses favizsgálat érintette a fenti 40 fafaj 459 egyedét, amelyek helyszínét és az egyedszámokat a I. számú melléklet mutatja be. Számos, nem parametrizálható megfigyelés, tapasztalat is része a kutatás eredményeinek, amelyek a munkában szerepet kapnak.

Ezen felül további 27 fafaj 71 egyedének teljes, állékonyság-számítási célú adatfelvétele is megtörtént, amelyek felvett adatait és az elvégzett számításokat a II. számú melléklet tartalmazza. Az előbbi 71 fán 197 tomográf vizsgálat történt, sokuknál többszintben illetve ugyanott több időpontban is. A tomográfos vizsgálatok kapcsán kijelenthető, hogy a tomogramokra vonatkozó tapasztalatok 197-szeres ismétlésből lettek leszűrve.

Olyan fákról is lesz szó, amelyeken nagyon kevés a mérhető adat (pl. a hédervári Árpád-tölgy a 27-29. ábrákon), vagy éppen csak képen tanulmányozató (Siskin megörökítette erdei fenyő az 51. ábrán).

4.1.2. A Kisasszony-vágási (Sajtoskál) cser

A vizsgált fafajok közül kiemelve, ebben a fejezetben egy konkrét fa példáján látható a hangtomográfus vizsgálatok többféle válfaja, úgy, mint az egy szintben végzett vizsgálat, a több szintben végzett tomografálás, azaz térbeli tomogram¹⁸ előállítása, a több időpontban végzett mérések ugyanazon pontokon, továbbá a statikai tomogram¹⁹ és értelmezése.

Erdős területen álló, azonban legtöbb jellemzője miatt szoliternek, továbbá az egészségi állapotában erőteljes emberi hatások kimutathatósága miatt e munka céljainak eléréséhez megfelelőnek minősíthető fa hangtomográfus vizsgálatára is sor került.

A fán 2009. szeptember 16. óta hét alkalommal történt hangtomográfus vizsgálat, eleinte 4 szintben, 2013-ban az előbbi szintek felett további két síkban. A mérési síkok a talajszinttől 30, 70, 129, 165, 215 és 260 cm magasságban fekszenek. Az érzékelők mindig ugyanott, festéssel megjelölt ponton helyezkedtek el, biztosítva a más időpontban végzett méréssel való összehasonlíthatóságot.

A törzs tövi részén minden alkalommal jelen volt a derestapló (*Ganoderma* sp.) termőteste.

4.1.3. A húzásvizsgálatok helyszínei

A nagy eszköz- és a munkaerő (létszám-) igény miatt csak néhány húzásvizsgálat elvégzésére nyílt lehetőség. A statikai vizsgálatok közül a húzásvizsgálatok a következő helyszíneken és fafajokon történtek:

- Vassurány

A templom kertjében a kezelő részéről bizonytalan helyzetűnek ítélt lucfenyő sor vizsgálatára került sor (33. ábra). A lucok fasorként helyezkedtek el, ahol minden második fa közbeszorult helyzetű volt.

- NYME Botanikus Kert

A húzásvizsgálati módszer megismerésére elvégzett kísérlet, ernyős magnólia fán történt húzásvizsgálat. A fa a Botanikus Kert egy sűrűbben beültetett részén, szinte erdőállományban található.

- Perenye, kert

Az előzőhöz hasonló kísérlet elvégzése, a fa kidöntéséig fokozott erőhatással, fehér akácon (34-35. ábra).

4.1.4. Kidőlt, megdőlt fák vizsgálatai

A kidőlt városi fák vizsgálatára tervezett kísérletet nem lehet beállítani. Ráadásul többnyire nem is vizsgálhatók közvetlenül a kidőlésüket követően eredeti állapotukban, mivel az esetek többségében a kárfelszámolás szükségessége miatt gyorsan elmozdítják azokat a

¹⁸ Térbeli tomogram: az egyes tomogramok egymás fölé állítva, az egyes sarokpontok egymásnak megfelelően.

¹⁹ Statikai tomogram: a tomográf által kirajzolt kép, berajzolva a szilárdsági görbe.

helyükről. Néhány fát azonban sikerült így megvizsgálni, ezek közül nyolc kiválasztott példány kidőlésének (vagy annak lehetőségének) elemzése részletezve szerepel a következőkben.

- A nyugat-magyarországi **Szombathely** belvárosában, egy zöldfelületi aszfaltozott sétaút mellett kidőlt egy vadgesztenyefa. Sajnálatos módon emberi életben is kárt tett. A fát a baleset után több évvel történt meg a fa vizsgálata, közvetett módon, mivel a fa ágai, törzse és tuskója már megsemmisült, azonban kiváló fényképanyag állt rendelkezésre. A fényképekből és a helyszín vizsgálatából számíthatók voltak a fa méretei, illetve látható volt a törzs és a gyökérzet betegségei, károsodása (47 ábra).

- **Budapest kertvárosi részén**, az úttest és a járda közötti keskeny virágágyásban álló korai nyár fát a szél kidöntötte. A fa egy parkoló autóban komoly károkat okozott. Az előbbihez hasonlóan, csak jóval később nyílt lehetőség a vizsgálatra, amikor a fának már részei sem voltak megtalálhatók, de fényképek szintén készültek (45. ábra).

- A nyugat-magyarországi **Kőszegen** a Jurisics Várban az erős szél kidöntött egy kislevelű hársat. A fa kárt okozott a csaknem 300 éves Szűz Mária szoborban (11. ábra). A fa adatainak felvételére már másnap lehetőség nyílt.

A számítások itt is kétszer történtek meg, egyik esetben a zavartalanul fejlődő gyökérzetre, második esetben a tényleges, nagyméretű kövekkel és egy eddig ismeretlen barokk kori csatorna által, a növekedésében gátolt, torzult gyökérzetre (11. ábra és 46. ábra) vonatkozóan.

- **Szombathely** belvárosában egy magas épületekkel csaknem körbezárt udvaron a parkoló autókra dőlt egy kisebb méretű bálványfa. Sajnos csak később volt lehetőség megvizsgálni, de a meglévő fényképek alapján lehetett számításokat végezni. A fa a kidőlése idejére már kiszáradt, a hajszálgyökérzete emiatt már elkorhadt.

- A **Fertődi Kastély** parkjában lehetőség nyílt egy megdőlt lucfenyő vizsgálatára. A fa eddig szabad állásban, kaszált réten fejlődött. A fát a 2010. májusi szélvihar megmozdította, de az nem dőlt ki. Kárt egyelőre nem okozott (10. ábra).

- **Szombathely** belvárosában építkezés miatt erőgéppel (traktor) kifordítottak egy korai juhar (*Acer platanoides* L.) fát (23. ábra).

- **Szombathely** egyik hivatalának belső udvarán egy természetes japán akác (*Sophora japonica* L.) példány áll. A fa épületektől körülvetten fejlődik, szélhatástól többé-kevésbé védetten. Az udvarban parkoló autók és a környező épületek tető-héjazata és esőcsatornáinak védelme érdekében már visszavágták, ezen felül ismeretlen eredetű sebzések is történtek. A gyökérzet az aszfaltot több helyen megmozdította. A fa közvetlen közelében csatornák, közművek futnak. Kárt egyelőre nem okozott, nem dőlt meg (42-43. ábrák), de erőteljes gyökérmozgás érzékelhető. A környező épületek tetőgerince a fa magasságával egy szintben van.

- Egy érdekes „kísérletként”, a realista, szinte fényképszerű festményeiről ismert **Siskin** egyik festménye is megvizsgálható fa-statikai szemmel. A kép jellegzetes kelet-európai síksági fás területet ábrázol, szoliternek mondható erdei fenyőkkel. A kép előterében látható fa és környezete a hazai viszonyokhoz képest szokatlan habitussal bír, emiatt látszólag dőlésveszélyes, de az alkotó realista művészetét ismerve elfogadhatjuk valóságúnak (51. ábra).

4.1.5. A vizsgált fák élőhelye, termőhelyi viszonyai

A következő fejezetrész a vizsgálatba vont fák termőhelyi viszonyait a helyszín termőhelytípus-változat beosztása alapján mutatja be.

Klíma

Az erdészeti klímabeosztás szerinti faállománytípussal jellemzett klíma minden vizsgált fa esetében gyertyános-kocsánytalan tölgyes, illetve cseres-kocsánytalan tölgyesnek bizonyult. Ahol erdei környezetben, nagyobb parkban vagy falusi-kertvárosi környezetben áll a kérdéses fa, ott ez helytálló, azonban városi helyszín esetén mikroklimatikus behatások miatt a klíma hőmérsékleti tényezője megváltoztatja a klímajellemző júliusi 14 órás páratartalmat, és emiatt legalább egy kategóriával alacsonyabbra lép az adott környezet. Így a gyertyános-tölgyes klíma meghatározása módosítandó cseres-kocsánytalan tölgyessé. Különösen magas hőmérséklet és ezzel párosulva alacsony páratartalom²⁰ alakul ki az aszfaltozott illetve a kővel burkolt területek fölött (McPherson és Muchnick, 2005). Ez mindenképp a szombathelyi belvárosi fákat érinti.

Hidrológiai viszonyok

Többlet talajvízhatás számos termőhelyen előfordul (Badacsonytomaj, Szombathely Puskin park, Pelikán park, Szombathely egyik hivatalának udvara, Gyöngyös utca), azonban egyik helyszínen sem gyakorol káros hatást a fa életére.

Az előnyös hatás az azt kedvelő/elviselő fafajok adottságai miatt nem feltűnő: a badacsonytomaji szomorúfűz egyenesen igényli a vizet, míg a kocsányos tölgyek vagy a magas kőris szintén kedveli. A többlet vízhatást nem tűrő faegyedeket vagy fafajokat feltehetően vagy nem is ültettek, vagy fiatal korban ki kellett vágni ezeket a nem megfelelő állapotuk miatt.

Városi környezetben gyakran előfordul a pangóvíz, amelyet a fák többsége nem tűr.

Talajtípus

Általában valamilyen barna erdőtalaj fordul elő, azonban mindenképp városban, vagy esetenként kertés környezetben is gyakori a másodlagos, vagy mesterséges talajtípus, helyenként a csonka talaj. Gyakori a feltöltés, ahol sokszor mérgező hatású szemét is előfordul. Az ilyen talajok szerkezete többnyire lazább, mint a termett talajoké.

²⁰ Urban heat island, UHI

A városi környezetben jellemző szózás káros hatásai a fák vegetációs periódusában jelentkeznek, széléről induló, lepörkölődő levelek képében, amely a fák vitalitását csökkenti. Az ilyen fák sérülékenyebbek, mert a fatestben normális szélességű korai pászta mellett a késői pászta sokkal keskenyebb lesz.

Termőréteg mélysége

Általában kielégítő, legalább középmező a vizsgált esetekben. Azonban előfordul, hogy a felső szint egésze vagy egy része hiányzik, ezek a csonka talajok. Esetenként feltöltés tapasztalható.

Fizikai talajféleség

Változatos, többnyire homokos vályog, vályog fizikai talajféleség található a vizsgált fák környezetében. Az agyagfrakció magasabb jelenléte nem jellemző, éppen a szándékos vagy véletlen talajjavítások, módosítások eredményeként. Nem ritka a talaj tömörödöttsége.

Egyéb tényezők

A lakott területeken lévő fák növekedését, életét, csakúgy, mint a termőhelyüket, leginkább a fenti kategóriákba be nem sorolható, jellegzetes negatív emberi befolyások is meghatározzák. Ezek mindennapos ember-fa interakciók, ahol többnyire a fák egészségi állapota és integritása csorbul.

A kölcsönhatások egy része fizikai, amikor az ember vagy egy emberi használati tárgy okoz mechanikai sérülést a fában. A teljesség igénye nélkül, a leggyakoribb, mindenki által ismert jelenségek a következők:

Valamilyen használati tárggyal (gépjármű, kertészeti gépek (pl. fűnyíró)) megsértik a kérget vagy akár a fatestet is, fertőzési kaput nyitva a kórokozóknak és károsítóknak, ezáltal korhadási folyamatok indulnak és így állékonysági kérdések is felmerülnek.

Esetenként szándékosan okozott sebzések is előfordulnak, amelyek hatásaikban az előzőekkel egyeznek. Ilyenek „tevékenységek” a meggondolatlan vagy szakszerűtlen faápolások, vagy a vandalizmus, vagy éppen hirdetések szegelése, provizórikus szerelvények (villanydrót, tábla, egyéb rögzítendők ácskapoccsal, fúrással, stb.) rögzítése. Különösen a föld alatti vezetékek fektetésekor fordul elő gyökerek sebzése, átvágása, vagy a gyökérzet egy részének levágása.

Külön fejezetet érdemelnének a fák szándékos, ám inkognitóban végzett kiirtásának páratlan és találékony módozatai, amelyeket etikai megfontolásokból nem tárgyalok.

A fák korlátokba ütköző természetes növekedése miatt is akadnak egészségi állapotromlást okozó sérülések. A fa két legnagyobb kiterjedésű részeinek, jelesül a korona és a gyökérzet fejlődését, sokszor építmények, vagy közművek, épületalapok korlátozzák. Gyakori eset, hogy az ültetés során nincsenek tekintettel a fa magasabb életkorával együtt járó nagyobb térigényére. A vizsgálatokba vont fák mindegyikénél előfordult valamilyen káros mechanikai behatás.

További, szintén tipikusan emberi környezetre jellemző a kémiai hatások széles skálája, amelyek egyfajta „vegyszer-támadásként” hatnak a fákra. Az eredmény mindig a fa védekező rendszerének sérülése, amely előbb utóbb stabilitási problémákat okoz.

A kémiai jellegű hatások leggyakrabban a téli útsózás, a gépjárművek kibocsátott anyagainak feldúsulása, vagy a különböző, talajban található mérgező anyagok. Utóbbiak mesterséges úton kerülhetnek a gyökerek közelébe, amikor elássák őket, esetleg közművekből szivárognak. Ide sorolható a levegőtlené váló talajban keletkező gyökérmérge, a glej is, amely a nagy kiterjedésű aszfaltburkolatok következménye lehet, csakúgy, mint a csökkenő természetes vízmozgás és levegőzöttség visszaesése.

Szinte természetes eredetű vegyi behatásnak sorolható be a városias kutyatartás következménye, a fák tövére kerülő kutyavizelet. A foszfor és a feldúsuló nitrátok felborítják a növény számára szükséges tápanyag-egyensúlyt. Emellett vékonyabb kérgű fák tövén, így például városainkban előszeretettel ültetett nyogati ostorfán, vagy a kertés övezetekben gyakori közönséges dión égésszerű kéreg elhalás alakul ki, amely szintén kórokozók fellépését vonja maga után (Balder, 1998).

Összességében egyetérthetünk Chmelař-ral (1978), hogy a városi környezet erősen igénybe veszi a fákat.

4.1.6. A vizsgálatok helyszínei (szoliter fák helyének tipizálása)

Utcafásítás

A környezet erős gépjárműforgalommal jellemezhető. Az utcafásítás fái az úttest és a járda aszfaltsávja közötti területen kapnak helyet, amely meglehetősen beszűkíti a gyökérszóna kiterjedését. Ezen felül a köztereken álló fákat gyakran körbebetonozzák, vagy térköves burkolattal veszik körbe. Nem ritka eset, hogy a gyökérszóna normális fejlődését különböző tárgyak (pl. csatorna, házak alapozása) gátolják.

Fontos szempont az épített környezet és a fa erőteljes kölcsönhatása, amely gyakran vezet a tulajdonos és más személyek konfrontációjához.

Ezek a fákat mindenhol többé-kevésbé gondozza a kezelő.

Közpark

A természeteshez közelebb álló környezet, ahol többnyire megfelelő a termőhely. Azonban intenzív kertészeti munka hasznos és káros hatásai egyaránt érvényesülnek.

Több helyen a parkszerű kezelés előnyei érvényesülnek, amelyek a tágasabb hálózatban, és többnyire a nyelésben nyilvánulnak meg.

Erdős terület

Természeteshez legközelebb álló környezet, ahol az erdészeti gazdasági célú kezelés miatt a korhadás, és ezáltal az állékonyági problémák ritkábban fordulnak elő. A talajélet kevésbé bolygatott és zavart, és a mechanikai hatások kisebb szerepet játszanak a fa életében.

Erdősnek mondott környezetben csak olyan faegyed került a vizsgálatokba, ahol az erdőt alkotó szomszédos fák gyökérszónája és koronája nem nyúlik egymásba, azaz a kérdéses fa tisztáson, utak kereszteződésében, tájékoztatói és tájékoztatási célokat teljesítve áll.

Kert

A park és az utcafásítás egyfajta keveréke, amely mindkettő jegyeit magán viseli. A tulajdonos egyértelműen azonosítható, amely a gondozási feladatok és a felelősség kérdésében döntő szerepet játszhat.

Mezőgazdasági jellegű terület

Az ilyen helyen található szoliter fák a környezet alacsony felületi érdekessége miatt ugyan jobban ki vannak téve a szélnyomásnak, mivel azonban ez a hatás növekedésük folytán folyamatosan éri őket, a gyökérzet és részben a korona fejlődése ehhez alkalmazkodott. Káros hatás a mezőgazdasági erőgépek vagy vegyszerezés hatásai lehetnek.

Ilyen környezetben olyan fa került a vizsgálatokba, ahol a kérdéses egyed táblák sarkán, utak kereszteződésében, tájékozdási és tájékoztatási célokat teljesítve áll.

4.2. A favizsgálatok módszere**4.2.1. Szemrevételezéses favizsgálatok**

Szemrevételezéses favizsgálat történt 459 + 71 esetben, amelyek során a fa faja, környezetében elfoglalt helye, a környezetének adottságai, súlypontjának meghatározása, jellegzetes kinövései, gyökérzetének látható adottságai, terpeszek, ormok, vagy a szabályos alaktól való más eltérései kerültek rögzítésre. A fákról fényképek is készültek. A fenti információk nehezen vagy nem parametrizálhatók, ezért azokról szöveges fejegyzések vannak, amelyek alapján azonban több, a dolgozatban szereplő megállapítás is született.

A szemrevételezés a heyszíni vizsgálatok legelső mozzanata.

4.2.2. A felvett adatok köre

Mind a tomográfus, mint a statikai favizsgálatok elvégzése a szemrevételezéses eljárás szokásos szabályainak megfelelően történtek, azaz rögzítettem a kérdéses fák mérhető paramétereit, továbbá a szemrevételezéssel megállapítható jellemzőit, mint pl. a gyökérzet, a törzs, a korona, az ágak állapota, beteg, korhadt belső részek, vagy üregek, kinövések, repedések jelenlétét, kiterjedését stb. Ezek egy tulajdonképpeni fa törzslap leíró részei.

A szemmel vizsgálható jellemzők egyes részei már utalnak az egészségi állapotra, stabilitásra. Ezek a következők, ahol mérőeszköz szükséges, ott a mérés módszerei is szerepelnek (3. táblázat).

3. táblázat A felvett adatok köre

sor-szám	felvett adat	eszköz
1.	famagasság	Bitterlich-féle tükrös relaszóp
2.	mellmagassági átmérő, érzékelők távolsága	átlaloval, vagy mérőszalag
3.	koronaátmérő	mérőszalag
4.	koronahossz	Bitterlich-féle tükrös relaszóp
5.	ferdeség	mérőszalaggal, számológéppel
6.	súlypont	Bitterlich-féle tükrös relaszóp
7.	koronaalak	
8.	korona alja, vagy törzshossz	Bitterlich-féle tükrös relaszóp
9.	korona és lombozat egészségi állapota	ICP Forests Manual
10.	korona áttörtsége	
11.	fafaj, kor, eredet	
12.	törzs egészségi állapota, sérülések, odúk, terpeszek	ICP Forests
13.	gyökértányér (gyökérlabda) átmérője, mélysége	mérőszalag
14.	gyökér egészségi állapota	
15.	talajadottságok, termőhely, talajhibák	
16.	környezet (természeti, és épített)	
17.	környező épületek elhelyezkedése, szélcsatorna hatás, örvények, uralkodó szélirány megállapítása	

Az előbbi paraméterek sorát látva megállapítható, hogy a fenti információk tulajdonképpen a fakataszter alapját képezik. A mérhető felvételi adatok táblázatba foglalva a II. számú mellékletben tanulmányozhatók.

A felvételek vizuálisan becsülhető részei 5% -os pontossággal, a nemzetközi ICP Forests Manual (2010) szerint kerültek rögzítésre. A mérhető részek hossz-mértékegységben kerültek meghatározásra.

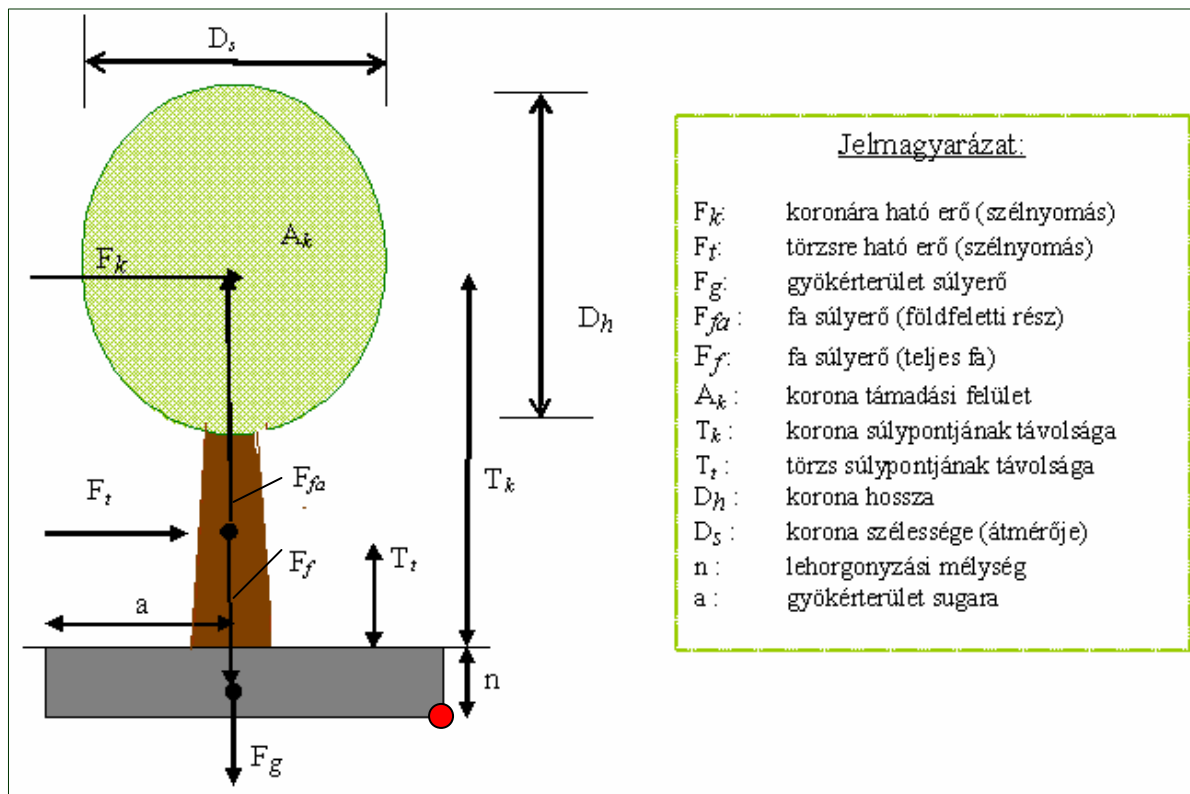
A statikai vizsgálatokhoz szükséges még az átlagos szélesebesség és a Beaufort-szélskála (1. táblázat) szerinti 7-8-9. fokozatú szelek gyakoriságának ismeretére is (a meteorológiai adatok a meteorológiai szolgálattól, vagy időjárás-figyelő közösségek portáljairól nyerhetők). A kidőlt fák vizsgálatához be kell szerezni a kidőlés időpontjában mért maximális szélesebesség és a szellökések valamint a szél irányának adatait, esetleg a dőlést megelőző napok csapadékmennyiségét.

Használni kell még a következő adatokat: a fafajra jellemző élőnedves sűrűséget (kg/m^3)²¹, a táblázatokból²² kinyerhető fa térfogatát (m^3) is, valamint a talaj sűrűségét (kg/m^3), a gyökerekkel együtt. A gyökértérfogat szintén fatérfogat-számítási táblázatból megkapható. A számítások során használnunk kell a korona és a törzs légellenállás tényezőjét is.

²¹ Babos és mtsai (1979), Molnár és Bariska (2002), Zanne és mtsai (2009), Zeidler (2012).

²² Közkeletű megnevezéssel „fatömeg”, amely Magyarországon a következő kiadvány segítségével megismerhető, illetve számítható: Sopp, L. és Kolozs, L. (2000): Fatömegszámítási táblázatok. Harmadik, átdolgozott kiadás. Állami Erdészeti Szolgálat, Budapest.

A statikai vizsgálatok során felhasználandó adatok körét a 9. ábra mutatja be.



9. ábra A fára ható erők sémája

A mérések, illetve szemrevételezéses eljárás eredményeként, a manuális méréseket követően több mérnöki mutató készült, amelyek információt nyújtanak a fa szilárdságának csökkenésére. Talán nem szükséges a mutatók hasznosságát általánosságban méltatni, hiszen evidencia, hogy egy adott megmért érték önmagában nem mond semmit a keresett információról, ha azt nem viszonyítjuk valamihez. Többségük arányszámok, a vizsgált fa különböző jellemzőinek hányadosa. Dimenzió nélkül értendők, még ha a tényezőknek van értelmezhető mértékegysége is. Mint minden mutató, összehasonlításra, viszonyításra alkalmasak.

Egy részük a törzs (itt a talaj feletti rész értendő) stabilitására vonatkozik, más mutatók a tuskóval történő kidőlés eshetőségére nyújtanak információt. Több mutatót a mellmagassági átmérő, mint változó függvényében érdemes ábrázolni.

4.2.3. A törzs törésének lehetőségét jelző indexek

A magasság-átmérő viszonyszám

A dőlésveszély jelzésére is alkalmas mutató az erdőnevelésben is sűrűn használt, sokat eláruló, talán legfontosabb viszonyszám, amelyet ebben a munkában a felvett fák esetében is érdemes értelmezni:

$$\frac{H}{d_{1,3}} \quad (15)$$

A karcsúsági mutatónak is nevezhető hányados számítható azonos dimenzióval (pl. méter), de eltérővel is lehet (méter-centiméter), az eredmény értelmezésénél nincs jelentősége.

Ugyanezt az adatot az átmérő függvényében alkalmazva szintén szemléletes ábrát nyerhető:

$$\frac{H}{d_{1,3}} \Big/ d_{1,3} \quad (16)$$

A koronaarány

A szerző által alkalmazott mutató a koronaarány ábrázolása a mellmagassági átmérő függvényében. A koronaarányt ez esetben a famagasság arányában értelmezett koronahossz adja:

$$\frac{K}{d_{1,3}} \quad (17)$$

Az ábrázoláskor a szélső helyzetű pontok kiértékelésére is sor kerül.

Az előbbihez hasonlóan a szerző által javasolt, mellmagassági átmérő arányában értelmezett koronaátmérő:

$$\frac{D_s}{d_{1,3}} \quad (18)$$

Mattheck és Breloer (1993) szerkesztette a következő, már kissé körülményes mutatót, amelyet a szerző a vizsgálatba vont fák esetén speciálisan a hazai viszonyokra értelmezett:

$$\frac{K}{d_{1,3}} \Big/ \frac{H}{d_{1,3}} \quad (19)$$

A vizsgált fák egy másik jellemzőjét mutatja be a mellmagassági átmérő függvényében ábrázolt koronafelület (vitorlafelület) összefüggése:

$$\frac{A}{d_{1,3}} \quad (20)$$

A korhadási arány

A tomográfus eljárás során, a helyszíni méréseknél a beteg, korhadt részt tartalmazó, vagy már üreges fánál a kapott információkból előállítható többek között a korhadási arány (százalék), amelyet a jelen munka a mérési síkban fekvő keresztmetszetben a korhadt vagy üreges rész arányaként mutat be.

Szintén képezhető a maradék falvastagság viszonya a fa körlapjának sugarához (Mattheck és Breloer, 1993):

$$\frac{t}{R} = \frac{R-r}{R} \quad (\text{Mattheck-képlet}) \quad (21)$$

ahol R a fa adott keresztmetszeti körlapjának sugara, r a beteg rész sugara, míg t a kettő különbözete, azaz a beteg rész, illetve üreg falának **maradék falvastagsága**. Utóbbi információt a szerző a mért átmérő kapcsolatában is vizsgálta.

A kutatásba vont fák esetében szemléletes képet mutat a maradék falvastagság aránya a korhadási arány viszonylatában is. Ennek a mutatónak egyik előzménye a Wagener (1963) által –elsősorban fenyők esetén, később lombos fáknál is- javasolt összefüggés, amely az üreg átmérő (d) harmadik hatványa és a fa átmérő (D) harmadik hatványának hányadosa. Megalkotója a harmadik hatvánnyal feltehetően azért élt, hogy a különbségeket a jobb érzékelhetőség kedvéért széthúzza:

$$\frac{d^3}{D^3} \quad (\text{Wagener-képlet}) \quad (22)$$

Coder (1989) továbbfejleszti a Wagener-képletet, párhuzamba állítva az inercia számítás során használt negyedik hatvánnyal (lásd később)²³:

$$\frac{d^4}{D^4} \quad (\text{Coder-képlet}) \quad (23)$$

Smiley és Fraedrich (1992) további tényező bevonásával pontosít, amikor az előző jelölések mellett bevezeti a már külvilág felé nyitott üreg legnagyobb szélességű nyílásának arányát a törzskerülethez mérve (R):

$$\frac{d^3 + R \times (D^3 - d^3) \times 100}{D^3} \quad (\text{Bartlett-képlet}) \quad (24)$$

Később Kane és mtsai (2001) a fentieket rendre Mattheck-, Wagener-, Coder- és Bartlett-képletnek nevezi el. Megjegyzi továbbá, hogy a Mattheck-képlet más irányból közelíti meg a fa stabilitásának kérdését. A szerző szintén vizsgálja és a kutatásba vont 71 darab fa esetében hazai viszonyokra vonatkoztatva mutatja be a fenti, korhadás mértékének megítélésére vonatkozó mutatókat. A Bartlett-képletet ezen belül a tényleges, a fapalást kerületén mért adatokkal, továbbá egységesen 10 %-nyi üregnyílással egyértelműsített adatokkal is bemutatja jelen munka.

További praktikus mutató a Pestal (1963) által –némileg más, ám kvázi húzás-vizsgálattal ekvivalens célra- az egészséges fa szél általi terhelhetőségére javasolt index:

$$F_{\max} = \frac{d_{1,3}^2}{3} \quad (25)$$

4.2.4. A tuskóval együtt történő dőlés lehetőségét jelző indexek

A famagasság és a gyökérlabda átmérője között a szerző képzett összefüggést, amelynek megjelenítése szintén tanulságos, a következő képlet értelmében ábrázolható:

$$\frac{2a}{H} \quad (26)$$

Mattheck és Breloer (1993) mellmagassági átmérő függvényében ábrázolt gyökértányér-sugár ábráját e munkában a szerző gyökértányér átmérőre módosította, amely algoritmus. összefüggést keres a gyökérlabda (-tányér) átmérője (jelöljük „ $2a$ ”-val, amely egyben a

²³ Felmerülhet a kérdés, hogy a második hatvánnyal miért nem képzett valamelyik faápoló egy hangzatos mutatót. Nos, a keresett mutató létezik: az üreg keresztmetszeti területe összehasonlítva a körlappal, a $\pi/4$ konstanssal egyszerűsítve, megadja a hiányolt értéket: a korhadási százalékot.

statikai vizsgálatok során a fa súlyából származó erőhatás forgatónyomatéka erőkarjának kétszerese) és a mellmagassági átmérő között, a vizsgálatba vont fák esetében:

$$\frac{2a}{d_{1,3}} \quad (27)$$

A fenti mutatók számítása jelen munkában is helyet kapott (lásd az Eredmények című fejezetben).

4.2.5. A hangtomográfus vizsgálatok menete

A hangtomográf műszereknek van elérhető kezelési útmutatója, azonban a szerző által javasolt bizonyos módszertani részekkel e munka szempontjából ki kell egészíteni.

A hangtomográfus vizsgálatok kétféle eljárással történtek:

1. két érzékelős FAKOPP²⁴-műszerrel,
2. tíz²⁵ érzékelős FAKOPP 3D-műszerrel (közbeszédben ezt nevezik tomográfoknak).

A hangtomográf a hanghullámok fatesten történő áthaladásának idejét méri nagy pontossággal, általában mikroszekundum egységben, azaz a másodperc milliommód részében.

Itt kettéválik a két és a több érzékelős eszköz használata.

A két érzékelős műszer

Az érzékelőket egymással szemben, a fatörzs ellentétes oldalain kell beütni. A kibocsátott jelet közvetlenül a „microsecond timer” egység méri, és mikroszekundumban kijelzi. Az eredményből a távolság (célszerűen: átmérő) ismeretében számítható a relatív hangsebesség csökkenés (lásd Szakirodalmi összefoglalásban).

Az eredmények százalékban, esetleg századrészben láthatók.. A referenciaértékek a szakirodalomban fajokként rendelkezésre állnak.

A korhadás területe a műszer leírása szerint számítható, feltételezve, hogy a hangsebesség csökkenése arányos a korhadás kiterjedésével. Így a korhadás területe a fa körlap területének a referenciaérték és a mért sebesség aránya szerinti módosításával képezhető. A korhadás vagy üreg kiterjedése (átmérője) pedig visszszámítható a korhadás területéből, kör keresztmetszetet feltételezve.

A tíz érzékelős műszer

Az érzékelőket a fa palástja mentén egyenlő távolságokba javasolt beverni, ám lehetőség van szabálytalan keresztmetszetnek megfelelő rögzítésre is. Mivel egy jeladással kilenc másik szenzor fogja az impulzust, a két csatornás eszközhöz képest nagyságrendekkel több mérés történik, így lényegesen nagyobb a pontosság.

²⁴ A FAKOPP műszercsalád a FAKOPP Bt. Terméke.

²⁵ A tízcsatornás eszköz alkalmas nyolc csatornával való működésre is. Egyes hangtomográf típusok 12, 16, sőt akár 32 csatornás kiképzésűek is lehetnek.

Alkalmos számítógép-programmal az egyes síkban mért tomogramok²⁶ térben egymás fölé állíthatók, és így térbeli modell alakítható ki. Kézenfekvő a követelmény, hogy az egymás feletti sokszöget formáló tomogramok töréspontjai -azaz az érzékelők- egymásnak megfeleltethetők legyenek. Ez az elvárás a következő síkbeli mérés során az ugyanazon sorszámú szenzor függőlegesen, vagy a fapalást alkotójának vonalában történő beütésével biztosítandó. Jelen munkában a fentiek a vizsgált fák viszonylatában alkalmaztam, és a tapasztalatok beépültek az eredményekbe.

4.2.6. A statikai favizsgálatok

A húzásvizsgálat

Azt tudjuk, hogy a szél által kifejtett erő forgatónyomatékával (bending moment) szemben a fa a gyökértányérjával és a föld feletti részeinek tömegével fejt ki ellenhatást (Niklas és Spatz 2006). Amíg ezek egyensúlyban vannak (vagy a szél kisebb nyomatékot képez, mint amennyit a gyökérzet és a fa súlya kifejt), addig a fa állva marad (Peltola és mtsai 2000). Figyelembe kell venni a statikai számításoknál alkalmazott biztonsági faktort is. Fáknál – egyéb tényezőkre tekintettel- megengedhető a legalább 1,5-szeres biztonsági tényező is, de általánosságban kétszeres érték választandó (Sinn 2003).

A húzásvizsgálatok elvégzése csörlő segítségével történt. A munkavégzés menete a következő volt:

A kiválasztott fa esetében meg kellett határozni a csörlő kötélzetének rögzítésére alkalmas két végpontot. Egyik a fa földfeletti részeinek súlypontjához minél közelebb, de még alatta volt, a másik ellenpontként a kihorgonyzást szolgálta. A vizsgálatokban konkrétan legalkalmasabbnak egy másik fa tuskója bizonyult. A fa esetében a felszereléshez létra kellett, a sodronykötélhez pedig a kéregsérülések megelőzése érdekében hevedereket kellett alkalmazni²⁷.

A kihorgonyzási pont leggyakrabban egy közeli fa tövi része, egy tuskó, vagy építmény (Pestal (1963) élőfahorgonynak nevezi). Szükség esetén több fémcövek leverésével, vagy éppen „holtemberrel” is biztosítható a kihorgonyzás (Pestal (1963) talajhorgonynak is nevezi), azonban ezek a lehetőségek kerülendőek a bizonytalanságuk, vagy munkaigényük miatt²⁸.

A kihorgonyzáshoz szükséges élőfa minimális faátmérőjének megválasztásához a következő tapasztalati képlet ajánlott (a fa terhelhetőségét tonnában, mellmagassági átmérőt dm-ben kell figyelembe venni (Pestal, 1963)):

$$F_{\max} = \frac{d_{1,3}^2}{3} \quad (28)$$

²⁶ A mérés eredményeként a szoftver a képernyőn megjeleníti a fa vizsgált keresztmetszetét, különböző színekkel jelezve az egészsége és a beteg részeket, az üregeket. Ezt a képet tomogramnak nevezi a szaknyelv.

²⁷ A gyakorlatban néhányan famászó felszerelést alkalmaznak.

²⁸ Kötélpályáknál alkalmazzák.

A húzásvizsgálathoz többféle csörlő is beszerezhető, amelyek közötti választáshoz mindenekelőtt a vizsgálandó fa várható kritikus (a környéken mértékadó legnagyobb, dőlést okozó) szélterhelésének, illetve a fa tömegének ismerete szükséges. Mivel a húzásvizsgálatra érdemes fák koronamérete, mellmagassági átmérője miatt többnyire 3-4 tonna (30-40 kN) alatti szélterhelés keletkezik, ennél nagyobb kapacitású felszerelésre ritkán lehet szükség. Az ekkora terhelés még előállítható emberi erővel kezelhető, kézi csörlővel is. A beállítható drótkötél hossz függ a fára történő felerősítés magasságától, illetve a kihorgonyzás távolságától. A húzásvizsgálat elvégzése során rögtön észrevehető, hogy a kihorgonyzás és a drótkötél hossza adta lehetőségeken belül a talajhoz képest minél laposabb szögben emelkedő kötélzöveget kell választani.

Mérendő még a kötélterő, azaz a csörlő által kifejtett, a kötéltől közvetített húzóerő. Erre a célra a gyakorlat (10 N pontosságú) behajlósos erőmérőt alkalmaz, ahogy esetünkben is történt. Rugós erőmérő a rugó torzulása miatt nem időtálló (Pestal, 1963).

Ügyelni kellett arra is, hogy a csörlő a drótkötél megfeszülésekor történő felemelkedését követően is még kezelhető legyen.

Az erőhatás növekedésére –akárcsak a szélterő növekedésére– a fa kihajlással válaszol, ezért fa nyugalmi helyzetéből történő kitérésének mérésére 0,01 fokos felbontású dőlésmérőt²⁹ került a fa tövére³⁰. Érdemes bluetooth kapcsolattal dolgozó műszert használni, de a vezetékes kapcsolat sokszor üzembiztosabb.

Miután a kihajlást mérő műszer a fa tövi részére került, a csörlő által generált erő a folyamatos munkavégzéssel, és a fa dőlésének folyamatos nyomon követése mellett 0,2-0,25 fok dőlésig hajlította ki a fát. Ennél tovább nem javasolt, de nem is szükséges elmozdítani a törzset, mivel a szoftver az eddig nyert adatokat képes extrapolálni. Szemléletesebb, ha az elmozdulás menetét grafikonon ábrázoljuk (mint a perenyei fa húzásvizsgálati adataival készült 35. ábra), ahol a mérés befejezése után az erőhatástól függő kihajlás függvényében szerkesztett görbe vonalát tovább vezetjük egészen addig, amíg a merevedés hirtelen el nem kezd növekedni, sőt szélső esetben a függőleges érintőjéhez közeledni (8. ábra). A görbéről itt leolvasható erőhatás lesz a modellezett, fát kidöntő szél ereje, amelyből a koronafelület, a légellenállás tényezője (C_w), a korona súlypontja és a húzókötélt rögzítési magassága illetve a kihorgonyzás tőtől való távolsága ismeretében számítható a várhatóan dőlést okozó (kritikus) szélsősebesség.

Wessolly és Erb (1998) szerint a kidőlés minden fafajnál hasonló menetet ír le, és a 8. ábra szerinti görbével, továbbá a 34. ábra szerinti görbe visszahajlást megelőző szakaszával szemléltethető. A görbe a következő formulával írható le (amit jelen vizsgálatokban is alkalmazásra került, Wessolly és Erb (1998) nyomán Divós, 2014):

$$\alpha = \frac{1}{3} \tan\left(\frac{p}{73,85}\right) + 0,00005p^2 - 0,0009p \quad (29)$$

ahol:

²⁹ Inclinator

³⁰ Mindkét mérőműszer a kereskedelemben kapható, de a húzásmérő felszerelés egyben is beszerezhető.

α a fa tövének dőlése fokban

p aktuális erőhatás (%), a kidöntéshez szükséges erőhatás %-ában.

Ahogy azt már korábban láttuk, a szélesebbég a talajhoz közelebbi szintben alacsonyabb, de felfelé haladva rohamosan növekedni kezd (gradiens szél), amely azonban a magyarországi szoliter fák magasságának megfelelő távolságban még ugyan kevés, de értékelhető változást okoz (3. ábra).

A kritikus szélró és a súlypont ismeretében a szél által generált, a vizsgált fa kidöntéséhez szükséges forgatónyomatékokat a következő összefüggés eredményezte:

$$M = F \times H_r \times \frac{L}{\sqrt{H_r^2 + L^2}} \quad (30)$$

ahol:

F a kritikus szélró,

H_r a köté rögzítési magassága a fán,

L a vízszintes vetületének hossza

A következő lépésben hasonló számítás szerint történt egy tetszőleges, ritkán bekövetkező szélrónek (pontosabban szélökések sebességének) meghatározása. Ennek a kifordító erőhatásnak a gyökérzetnek ellent kell állnia, azaz ekkora teherbírást kell elviselnie, hogy elkerülje a kidőlést. Ez a szélró hazai viszonylatban 120 km/óra érték, de ettől saját megfontolásból (lásd Kidőlt fák vizsgálata) el lehet térni. Ezzel a szélesebbéggel is megtörtént a forgatónyomaték kiszámítása.

A kétféle érték hányadosa adta a biztonsági tényezőt, azaz a stabilitást (százalékban is kifejezhető). A számítások képletei, illetve a biztonsági tényező értelmezése a következőkben kerül bemutatásra.

A drótkötél vagy sodronykötél méretezése, továbbá szerelésének szabályai nem ebben a munkában foglalnak helyet.

A kidőlt fák vizsgálata és az ebből levonható következtetések

A favizsgálatok egy különleges része a kidőlt fák vizsgálata. Ilyenkor már tény, hogy az állékonyság elégtelen volt, azonban az anyagi vagy emberi egészségben keletkezett károk miatt az okokat ki kell deríteni, ezért rekonstruálni kell a kidőlés folyamatát. Ezért az ilyen vizsgálatok már nem csupán biológiai és mechanikai kérdések, hanem jogi, sőt gyakran ökonómiai problémákat is felvetnek, amelyek már a mérnöki értelmezés terepei.

A fentiekre válaszokat ad a kidőlés okainak és folyamatának rekonstruálása, amelyre a szerző egy számítási protokollt dolgozott ki. Az így összeállított számítási módszer, illetve a kidőlés okainak feltárásából származó tapasztalatok alkalmasak a még álló fák kidőlési veszélyességének vizsgálatára, illetve a korhadási folyamatok menetének ismeretében a lehetséges kidőlés előrejelzésére, azaz a fakataszterek előrejelzéssel foglalkozó fejezetének kibővítésére. A protokoll megalkotásában a Szakirodalmi összefoglalásban szereplő ismeretek

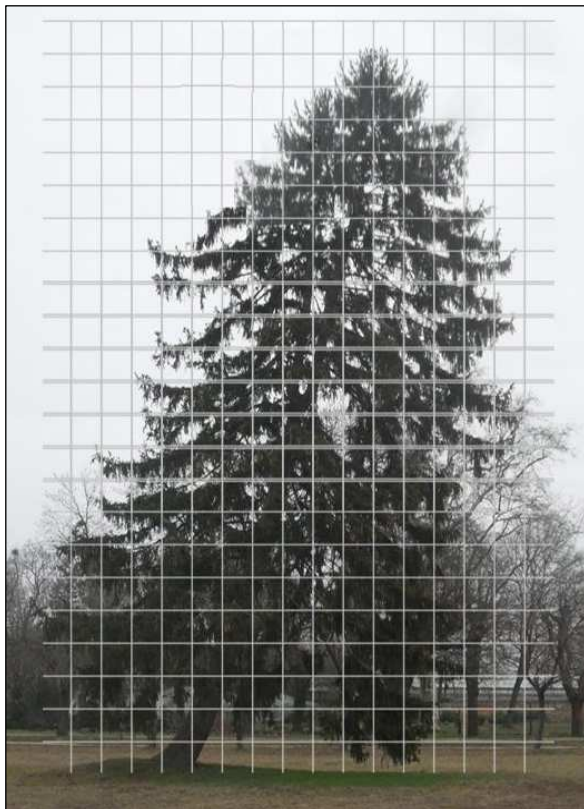
szolgáltatták az alapokat, különösen a gyökérzetre, a koronafelületre vonatkozó ismeretek, továbbá a kidőlésre vonatkozó szélmodellek nyújtotta megközelítési módok.

Maga a számítási metódus a HWIND szélmodellen alapul, a Wessolly és Erb (1998) által javasolt egyszerűsítésekkel. A FOREOLE az erőtani számítások bevezetéséhez szolgáltatta az alapot a nem függőleges helyzetű fáknál. A GALES szélmodell több tényezője (pl. érdességmagasság, örvények hatása) az EUROCODE számításban jelenik meg, amelyet a fára ható tényleges szélsébség meghatározására alkalmaz jelen tanulmány.

A számításokat a következők szerint kell elvégezni (a számítás menetét részleteiben az Eredmények fejezetben található (6. táblázat), illetve az egyes fák felvett illetve számított adatait a Mellékletben foglalnak helyet).

Kiszámítandó a faanyag és a lombzat súlyából származó erőhatás. Ez a fa térfogatából és az élőnedves sűrűségéből számítható, melyhez többféle adatbázis is a rendelkezésre áll.

Ezt követi a fára mint „vitorlafelületre” ható szél támadási felületének számítása, amely a koronahosszból, a koronaátmérőből, törzsátmérőből és törzsmagasságból számítandó, vagy a 10. ábra szerint mérendő (a közismert négyzettrácsos módszer). Figyelembe kell venni a 10. ábrán tapasztalható áttörtséget.



10. ábra Koronafelület egyik mérési módja



11. ábra Kőszeg, kidőlt kislevelű hárs

A következő lépés a szélnyomásból eredő erő (torlónyomás) számítása. A fa szélnek kitett felületére mint „vitorlafelületre” ható erő a következők szerint alakul (Peltola 2006; Deák és mtsai, 2006; illetve a HWIND szélmodell Gardiner és mtsai, 2000 alapján):

$$F = C_w \times \frac{\rho}{2} \times A \times u^2 \quad (31)$$

ahol:

C_w a korona közegellenállás (levegő) tényezője,

ρ a levegő sűrűsége (kg/m^3),

A a szélnek ellenálló felület (a korona és a törzs, mint vitorlafelület) (m^2),

u a szélsébség (m/s).

A szélsébség megfelelő értékének alkalmazása esetében figyelembe kell venni az érdességi hosszt, a beépítettségi tényezőt, a turbulencia tényezőt, a szélirány szórását, a domborzati tényezőt, a felszíni tényezőt, az örvénylési intenzitás magasság szerinti változását. Mindezt az EN 1991-1-4 (2005) számú Európai Norma tárgyalja³¹.

Ezt követően a gyökérlabda (gyökértányér) térfogatát, majd a tömegét kell számítani. Kőszegen a Jurisics téren a vizsgált kidölt kislevelű hárs 11. ábrán szemléletesen látható példája érzékelteti a gyökértányér mérendő átmérőjét és vastagságát, ami megadja a térfogatát. A gyökérlabda tömegéből származtatható a súlyból fakadó erő, amely a koronára és a törzsre ható szélnyomásnak mint erőhatásnak ellenáll:

$$F_g = V_g (\text{m}^3) \times \text{talajsűrűség} (\text{kg/m}^3) \times g (\text{m/s}^2) \quad (32)$$

Az erőkar a koronafelület esetében a korona súlypontjának távolsága a gyökérlabda alsó peremétől, a törzsnél a törzs súlypontja, szintén a gyökérlabda alsó szélétől mérve.

A két, egymással szemben dolgozó erőhatás az alábbiak szerint, a forgatónyomatékon keresztül összehasonlítható (Peltola 2006). A forgatónyomaték forgástengelye a szélllel ellentétes oldalon a gyökérlabda mint henger alsó pereme (a 9. számú ábrán piros színnel jelölve). A két nyomaték aránya a fa állékonyságának biztonsági tényezője.

$$\text{Állékonyság} = \frac{\text{gyökérszet ellennyomatéka}}{\text{szélnyomás nyomatéka}} = \frac{M_g}{M_s} \quad (33)$$

Az állékonyságnak (vagy biztonsági tényező) 1,0 felett kell lennie, hiszen ekkor magasabb a gyökérszet által kifejtett forgatónyomaték (statikus földnyomás), mint a kifordítására irányuló erőhatás, azaz a szélerő forgatónyomatéka. Azonban javasolt az 1,5-2,0 értéket választani.

(Statikai vizsgálatot fák esetében a hangtomográf eredményeire alapozva is lehet végezni, amely különösen törzstörések előrejelzésére alkalmas, a mérést a kritikus keresztmetszetben elvégezve. Erről bővebb információk a Függelékben található, **II. A tomogramon alapuló statikai vizsgálatok** cím alatt.)

³¹ "MSZ EN 1991-1-4:2005. Eurocode 1: A tartószerkezeteket érő hatások. 1-4. rész: Általános hatások. Szélhatás" megnevezéssel a Magyar Szabvány része, azonban egyelőre nem áll rendelkezésre magyar fordítás, ezért az angol eredetit alkalmazom.

4.2.7. A vizsgálatok kiértékelésének statisztikai módszerei

A kutatás során néhány jellemző paramétert (a fa mért vagy számított adatait) kettesével összerendelve, a közöttük fennálló kapcsolatot modellezésével mutatók készültek. A mutatók alapján kialakított ábrák a STATISTICA /Version 11/ program állította elő, a nemlineáris regresszió eszközkészletével, mivel várhatóan nemlineáris a keresett összefüggés.

A függvények többnyire logaritmikus függvények:

$$y = a \times \log(x) + b \quad (34)$$

alakot vesznek fel. Előfordul még másodfokú egyenlet, vagy exponenciális függvény, sőt még lineáris függvény is. A szoftver segítségével vizsgálható még a kapcsolat szorosságát jellemző 5%-os szignifikanciaszint, továbbá a determinációs együttható vagy determináltsági koefficiens (R^2). A determináltsági koefficiens kifejezi ki, hogy az egyik változó változásait előreláthatóan milyen mértékben befolyásolják a másik változó változásai, azaz mennyire lehet az egyikből a másikat előrejelezni.

Szintén ugyanezzel a programmal vizsgálható az egyes fák felvett ismérvei közötti páronkénti kapcsolat összefüggésének szorossága, nem normális eloszlásnál, sztochasztikus kapcsolatot feltételezve. Ez a Spearman-féle rangkorrelációs együtthatónak nevezett mutató a következő képlet szerint számolandó:

$$\rho = 1 - \frac{6 \times \sum d^2}{n^3 - n} \quad (35)$$

ahol:

n a minta elemszáma,

d a két ismérv rangjának (sorrendbeli helyezésének) eltérése

$$-1 \leq \rho \leq 1$$

5. Eredmények

5.1. A hangtomográf vizsgálatok

A hangtomográf a favizsgálatok elterjedt, kedvelt eszköze, szerte a világon megtalálható, gyakran hivatkoznak rá használóik. Az alkalmazása során nyert eredmények többnyire egyértelműek, jól kommunikálhatóak, azonban a gyakorlat által parkfenntartási célokból nagy volumenben alkalmazva a korlátai is nagyobb mértékben előtérbe kerülhetnek (lásd később, a gyorsabb munkavégzésnél használt szabályos keresztmetszet választásáról, a 8 csatornáról, és a gyakran egyetlen vizsgált keresztmetszetről leírtakat).

A gyakorlat általában két változatban 2 illetve 10 csatornás változatban használja, de esetenként 8, 12, vagy 16 csatornás tomográfal is találkozhatunk. A többlet érzékelők pontosítják az eredményt, ugyanakkor lényegesen növelik az eszköz használatára fordítandó időt.

5.1.1. Módszertani tapasztalatok

Jelen munka keretében elvégzett kísérletek során, a két illetve a tíz csatornás mérőműszerek Használati útmutatóikban *leírtakhoz képest* a szerző az alábbi megfigyeléseket, eltéréseket rögzíti.

Eltérések a kétféle mérőműszer alkalmazása során:

Két érzékelős műszer alkalmazása

A két érzékelős eszköz előnye a nagyon gyors munkavégzés, és a terepi feltételeknek megfelelő, kevésbé érzékeny kialakítás. Használata ajánlott a szemrevételezéssel problémamentesnek tűnő fák ellenőrzésére, mivel a nem látható belső részokről jelzésértékű információt ad, amelynek ismeretében eldönthető a nagy munka- és időigényű tízcsatornás műszer alkalmazásának szükségessége.

A mérés kijelzett eredményéhez némi háttérszámítás végzése szükséges, hogy a korhadás keresett mértékét megállapítsuk.

További hátrányul róható fel, hogy nem ad pontos képet a kívülről nem látható, a fa belsejében lévő betegség elhelyezkedéséről, kiterjedéséről, alakjáról. Nem központos és kívülről nem látható korhadásnál előfordulhat, hogy helytelen értéket mér, ilyenkor ugyanis a nem a korhadás legnagyobb kiterjedése irányában indul a hang a túloldali érzékelő között.

Használatával nem mellesleg a laikusoknak kevésbé szemléletesen bemutatható eredmény nyerhető. A műszer által produkált eredmény jelentős mérnöki munkával, továbbá nagyfokú bizonytalansággal interpretálható.

Az eredményt viszont pontosítható a több irányból történő alkalmazással. Másodszorra érdemes az első mérés irányára merőlegesen beütni az érzékelőket a fába. Nyilvánvaló, hogy a több irányból történő mérés egyre csökkenti a gyors munkavégzésből származó előnyöket, de még mindig gyorsabb, mint a sok (tíz) csatornás kivitel. A mérést nemcsak a

törzsmérő(k) végpontjaiban lehet elvégezni, hanem bárhol, akár egy ormon is, azonban ezt az eredmény kiértékelése során figyelembe kell venni.

Tíz érzékelős műszer alkalmazása

A tíz csatornás eszközzel való tevékenység a munkafolyamat terén az előbbiek egyfajta „fordítottja”: a mérés felszerelése illetve a másik mérési helyre való átállás sok időt vesz igénybe, másrészt az összeállított rendszer sérülékeny, mozgatása terepi helyszínen fokozott gondosságot igényel.

Az előző fejezetben említett térbeli kép előállítására érdekében különösen fontos ugyanazon sorszámú szenzornak a következő mérési síkba történő átállása során az előző beütéshez képest függőlegesen, vagy a fapalást alkotójának vonalában történő beütése. Ha ettől eltérünk, akkor hibás vagy nem értelmezhető térbeli kép jelenik meg.

Szintén nem áll össze a térbeli kiterjedés helyes képe, ha túl nagy távolság van a két mérési sík között, és nem szabályos (kúp vagy henger) alakú az üreg vagy beteg farész, vagy éppen több különböző pontból kiindult korhadással van dolgunk.

A mérési eredményt azonban –szemben a két csatornás tomográfal- a személyi számítógép azonnal produkálja, amely rögtön, helyben bemutatható. Ennek különösen szakértői munkák során, vagy városi környezetben, a lakosság kritikus figyelmé kíséretében van jelentősége, és nem elhanyagolandó a PR értéke sem.

Az Anyag és módszer fejezetben bemutatott inercia számítást csak a tíz csatornás tomográfal érdemes elvégezni, bár a két csatornásnál is van erre lehetőség, annak alacsony megbízhatósága tudatában.

Van lehetőség nyolc csatorna, és szabályos kör keresztmetszet választásával elvégezni a mérést. Nagy mennyiségű fa vizsgálatánál felmerülhet ez a lehetőség, kutatásra és alapos munkavégzésre azonban kevésbé alkalmas, hiszen a fa tényleges alakja, és a kevesebb érzékelő együttesen kisebb megbízhatóságot eredményez.

E munkához felvett fák tomogramjai mindig tíz csatorna és szabálytalan (nem kör vagy ellipszis) keresztmetszet kiválasztásával, azaz minden esetben a konkrét fa adottságainak figyelembe vételével készültek, amelyre a mérések megkezdését megelőző vizuális vizsgálat során nyílt mód.

Egyezések a két illetve a tíz csatornás mérőműszer használata során

Mindkét típusú tomográf alkalmazásakor kézenfekvő, hogy a mérési sík helyét a kritikus keresztmetszetben kell megállapítani. Ám ennek meghatározásához már komoly szakmai ismeretek szükségesek.

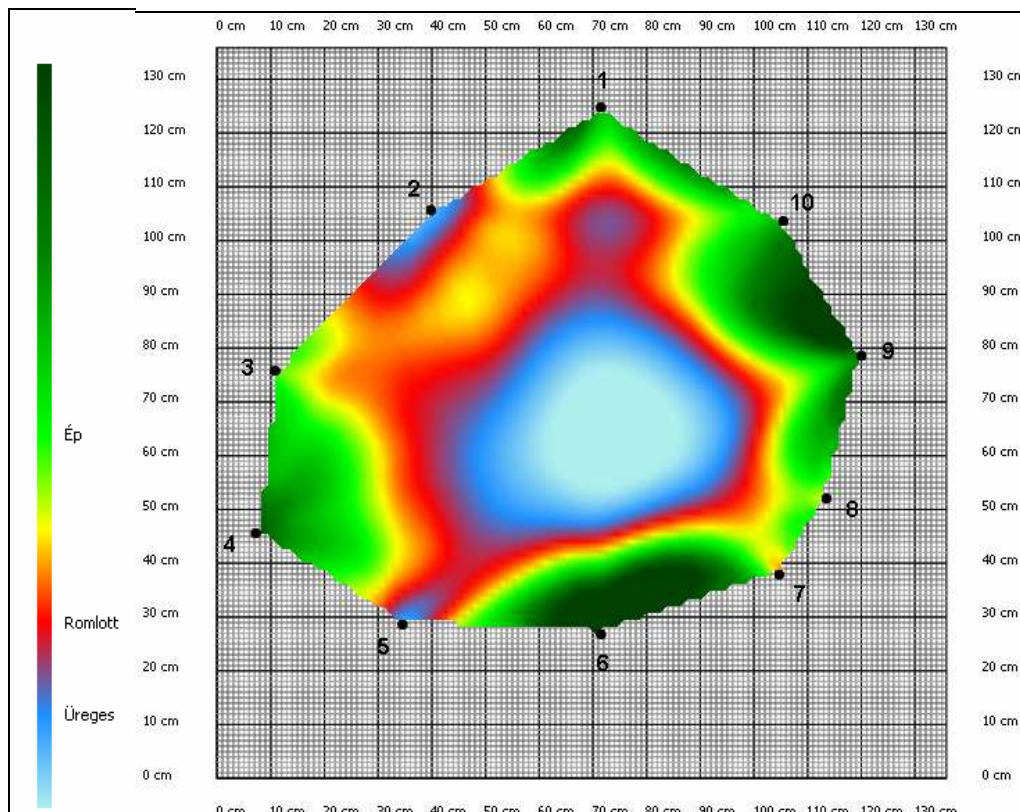
Gyakran előfordul, hogy több gyenge pontot is felfedezünk a vizsgált fán, továbbá olyan eset is lehetséges, hogy nem lehet, vagy nehéz meghatározni a kritikus keresztmetszetet. Ilyenkor természetesen több mérési síkban kell elvégezni a vizsgálatot.

A tomográfot konvencionálisan mindig a törzs tengelyvonalára merőlegesen használják, de van mód ettől eltérni. Különösen elgondolkodtató ez annak fényében, hogy a törzstörések gyakran a tengelyvonallal szöget bezáróan történnek. A fa tengelyével nem

derékszöget bezáró mérési sík esetén azonban a referencia sebességértékek is átdolgozandók, mivel az anizotróp faanyag rostirányában (illetve ahhoz közelítve) más sebességgel terjed a hanghullám³². A gyökérnyak vagy ezalatti keresztmetszet vizsgálatára nem alkalmas, továbbá a törzs magasabb részeinek, vagy az ágaknak tomografálása is nehézségekbe ütközik a szükséges többlet-felszerelések miatt.

A hangtomográfus mérések eredményének 20 cm átmérő alatt erősen csökken a megbízhatósága. Ilyenkor ugyanis az érzékelők már túl közel vannak egymáshoz, a távolságuk mérésének hibája is arányaiban magasabb, a koppantásnál előfordul, hogy a közeli szomszédos szenzor is mér („árnyékmérés”), továbbá a referencia adatoknál figyelembe kell venni, hogy a kisebb átmérő többnyire fiatal fára utal, ahol a magasabb víztartalmú szíjács aránya viszonylag magasabb a geszthez képest a бүтүн.

A mérendő fán jelenlévő kinövések, mindenekelőtt a terpesz, a fagyléc, golyvák, tumor (Butin és mtsai, 2003) és az orom nagy mértékben torzítják az eredményt, ezért azokat ki kell kerülni az érzékelő máshová történő behajtásával. Emiatt az érzékelők gyakran csak szabálytalan eloszlásban helyezhetők el, de a szoftver a számítások elvégzése során ezt figyelembe veszi. Az üregeken belüli járulékos gyökerek nehezen szűrhetők ki (12. ábra). A stabilitásban a terpeszek jelentős szerepet játszanak.



12. ábra Szokatlan tomogram, az üregeken belüli járulékos gyökérzet miatt. (Kislevelű hárs, Fertőd-Lés)

³² Meg kell említeni, hogy létezik rostirányú hangterjedést mérő eszköz, amely a fa vitalitását hivatott megismerni, azonban élő fa vizsgálatára egyelőre nem használatos.

A rovarjáratok befolyása is elgondolkodtató, de nem túl jelentős. Még a legnagyobb keresztmetszetű (akár 4-5 // cm széles) járatot rágó, többnyire tölgyekben élő nagy hőscincér (*Cerambyx cerdo* L. „fajcsoport”)³³ vagy a nyárakban a nagy nyárfacincér (*Saperda carcharias* L.) a darázsszitkár (*Sesia apiformis* Clerck) és a diófacincér (*Megopis scabricornis* Scopoli), vagy a fenyőkben az ácsincér (*Ergates faber* L.) járatok is elég keskenyek ahhoz, hogy az érzékelő csúcsi része helyett annak oldalán kilépve a hang terjedésének mért sebessége a mérési határon belül maradjon. Speciális esetben azonban elképzelhető, hogy valamelyik érzékelő ilyenkor helytelen értéket mutat, de ez a kivételesnek minősíthető eset.

A fatestben zárványként elhelyezkedő betüremkedett kéreg, vagy a fa által benőtt kő azonban jelentősen módosítja az eredményt. A városi fákban különösen gyakori kisebb méretű repeszek, lövedékek, szögek, drótok éppen a kis kiterjedésük miatt azonban nem zavaróak.

Sikertelen, vagy félrevezető lesz az adott mérés, ha üregbe ér a szenzor hegye, vagy annyira korhadt részbe hajtottuk be, hogy nem tud mérni. A hibás, lecsúszott ütés, vagy idegen anyag (fűszál, egyéb idegen test) közbekerülése szintén rossz eredményt ad, mert más, többnyire alacsonyabb frekvenciájú hang keletkezik.

A szenzor hegyének a fatestbe be kell érnie, mert a parakéreg a levegős szerkezete miatt téves eredményeket okozhat, továbbá nem áll stabilan az érzékelő.

5.1.2. A Kisasszony-vágási (Sajtoskál) cser

Az elvégzett hangtomográfós vizsgálatok tapasztalatait a szerző egy konkrét fa esetében mutatja be. A síkbeli, szokványos tomogramról annak egyszerűsége és ismertsége miatt külön nem esik szó, illetve a bemutatott mintafa eredményei között, külön ismertetés nélkül szerepel. Egyik különleges esetről már volt szó, a 12. ábra kapcsán, a térbeli tomogram típusainak bemutatása pedig e fejezet végén található.

A hangtomográfós vizsgálat eredményei mindegyik vizsgálati időpontra rendelkezésre állnak, itt csak az első és az utolsó jelenik meg. Az alábbi eredmények születtek (4. táblázat):

4. táblázat A sajtoskáli cser jellemző adatai

a vizsgálat időpontja	2009.09.16.	2013.07.03.
korona vitorlafelület (m ²)	85	85
magasság (m)	21	21
súlypont távolsága (m)	10	10
dőlésszög (°)	90	90
szélsebesség (m/s)	28	28
korona alakú tényező	0,25	0,25
szilárdság (MPa)	24	24
szélterhelés (N)	10624	10624

Megállapítható, hogy a fa fontosabb méretei a két szélső időpont között nem változtak. Mivel a fa a növekedése tetőpontján van, vastagsági és magassági növekedést nem mutat.

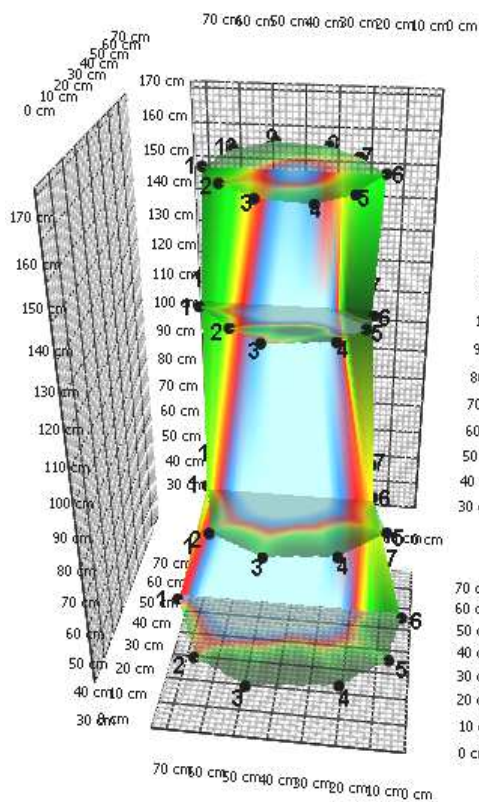
³³ Ezek hazánkban: *Cerambyx cerdo* L., *C. miles* Bonelli, *C. carinatus* Küster, *C. welensii* Küster

Az eredmények elemzése során a következőket lehet megállapítani (5. táblázat):
A szoftver által számított, egyes szintekre jellemző biztonsági tényezők a mérési pontosságon belül maradtak. Egyedül a legalsó, a tőben levő szint biztonsági tényezője mutatott érzékelhető növekedést (lásd később, az állandó feszültségről szóló részben).

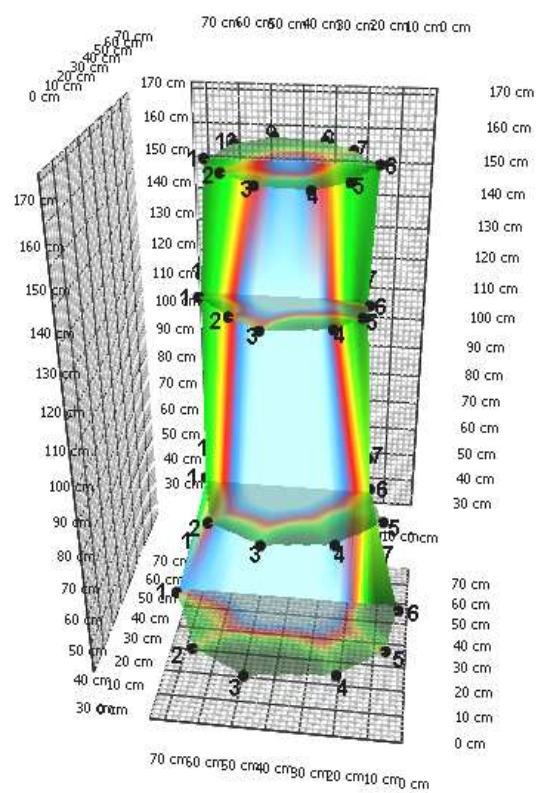
5. táblázat Biztonsági tényezők szintenként

Dátum	Magasság	Korhadt terület	Biztonsági faktor	Dátum	Korhadt terület	Biztonsági faktor
2009.09.16.	165 cm	36 %	295 %	2013.07.03.	35 %	321 %
2009.09.16.	129 cm	45 %	267 %	2013.07.03.	54 %	232 %
2009.09.16.	70 cm	58 %	343 %	2013.07.03.	60 %	339 %
2009.09.16.	30 cm	62 %	426 %	2013.07.03.	59 %	486 %

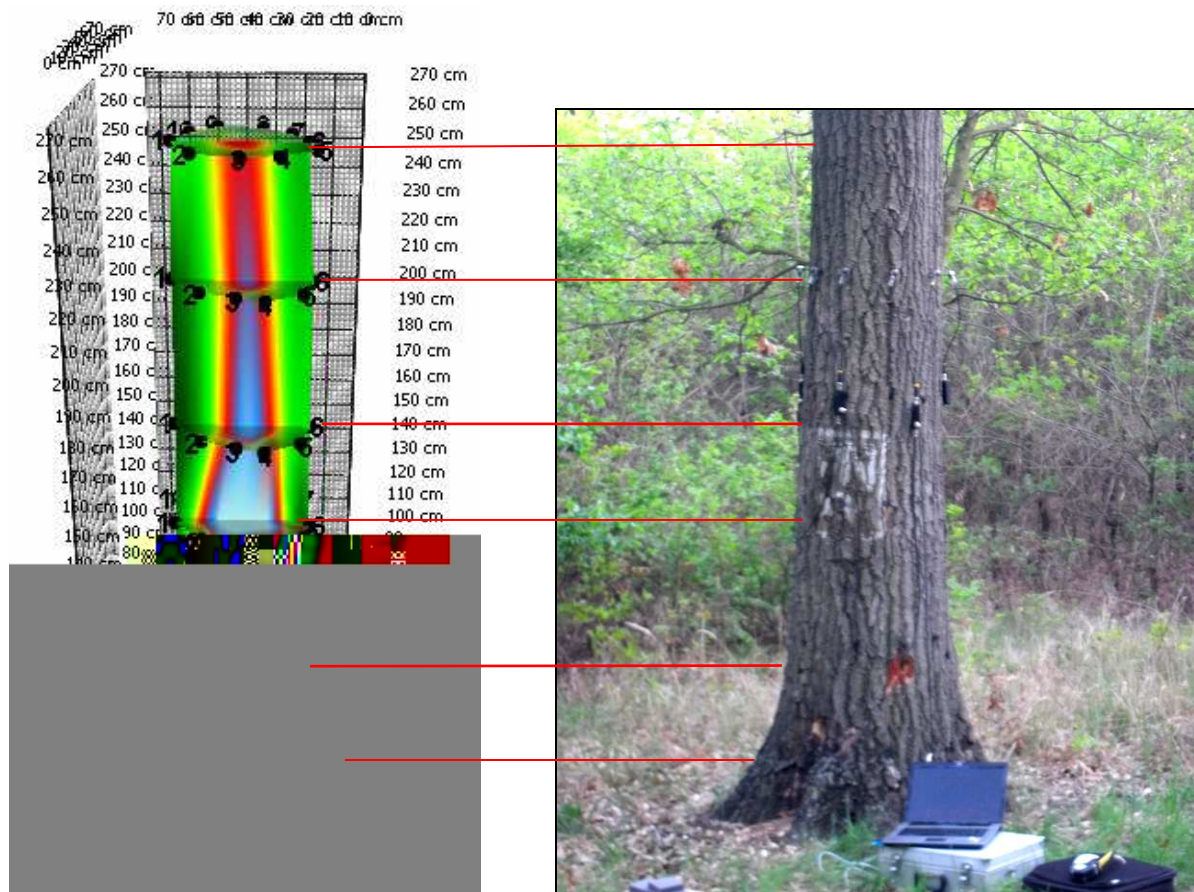
A fa két különböző időpontú térbeli tomogramján (13.a. és 13.b. ábra) sem látható jelentős változás. A térbeli tomogram álló helyzetű kúpos alakú korhadást mutat, azaz a gomba a talajszint közelében támadta meg a törzset. A 13.c. ábrán látható, hogy felfelé a bél mentén halad, ahol a fának a CODIT-elv szerint kevés lehetősége van védekezni. A 2 méter magasságban a beteg rész sugárirányú kiterjedése erőteljesen csökken, mivel a kórokozó nem tudott még nagyobb teret nyerni.



13.a. ábra Térbeli tomogram 2009. 09. 16-án



13.b. ábra Ugyanaz 2013. 07. 03-án



13.c. ábra Térbeli (teljes) tomogram
2013. 07. 03-án

13.d. ábra A törzs fényképe 2013. 07. 03-án

A statikai számításokra alapozva kijelenthető, hogy a meglehetősen magas korhadási arány ellenére a fa minden vizsgált síkban stabil.

A vizsgálat-sorozat elvégzésével kapcsolatban megfigyelésre méltó, hogy az érzékel tuskéjét ugyanoda nehéz behajtani, mert a fa az abszolút „kirúgja”. Egy másik, érzékelvel kapcsolatos megfigyelt élettani jelenség az azonos nedvképződés, illetve a „könnyezés”. Az érzékel ugyanazon lyukba történő behajtásakor a nedvdúsabb szövet „szortyog”, illetve az érzékel kihúzásakor nedvfolyás tapasztalható.

A kisebb sebzések kezelésére fasebkrántyot lehetne alkalmazni, ám az ilyen kezeléssel kivitelezési gondok adódnak. Azonban a mikroseb esetén, továbbá a fa védekező képességében lehet bízni (lásd CODIT a Szakirodalmi összefoglalás fejezetben). A részletes, itt nem ismertetett adatok a II. Mellékletben találhatóak.

A térbeli tomogram típusai

A térbeli tomogramok egyik legfontosabb felhasználási lehetősége a törzsön belüli károsodás fejlődésének térbeli és időbeli vizsgálata. A 14. ábrán a szerző által a Szombathely, Gyöngyös utcai kislevelhársfa soron (a sorszám az a helyszínen keletkezett) megvizsgált fákról leírt jellegzetes típusok láthatók. A térbeli tomogramokon látható károsodás alakjából következtetéseket lehet levonni (Kelen, 2010).

A 14. ábrán balról jobbra haladva a következők figyelhetők meg:

1. Kúp alakú károsodás(4. fa)

A korhadás széles tövi részén a fapaláston deléstelem teste található. A korhadás 1,7 méter magasságig hatol. A fa tövére sz közlekedésből származó régi, nem begyógyult sebek láthatók.

2. Hordó alakú károsodás(5. fa)

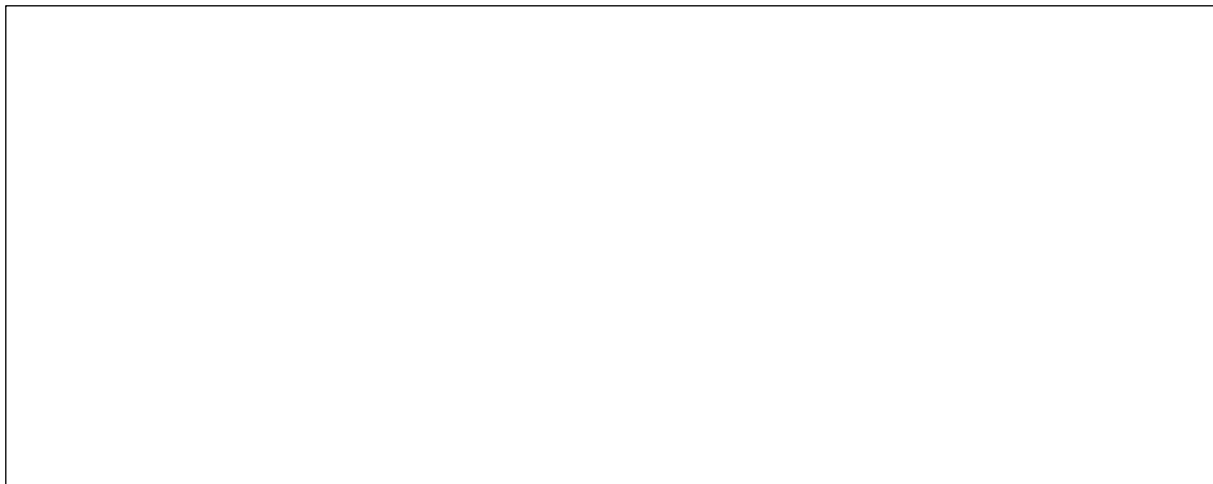
A fatörzs közepén, egy pontból kiinduló, kisebb méretű korhadás látható. Itt egy 15 évvel ezelőtti, már begyógyult sérülés nyoma fedezhető fel, amely a fatestben valószínűleg a fa által elhatárolt károsodásként jelenik meg. A károsodás a törzs adott keresztmetszetében egyaránt lefelé és felfelé egyaránt keskenyedik.

3. Fordított kúp alakú károsodás(7. fa)

2,5 méter magasságban elhelyezkedő kezelt ágcsontból kiinduló, lefelé keskenyedő korhadás látható a törzs belsejében. Az ábrán a korhadás alsó részén kissé kiszélesedik.

4. Henger alakú károsodás(9. fa)

Az elzűhöz hasonlóan mintegy 2,5 méter magasan található, kezelt ágcsontból indult ki a korhadás, de a lejjebb található keresztmetszetekben is már kezdően kiszélesedett.



14. ábra A térbeli tomogramokon látható károsodások típusai (balról jobbra): kúp, hordó alakú, fordított kúp, henger alakú. (Szathely, Gyöngyös utcai kislevelűársak, 4., 5., 7. és 9. sorszámú egyedek)

A fentiek összefoglalásaként következik, hogy önállóan a tomogram jóformán „csak” egy mérésorozat eredménye, amely a korhadás mértékének megismerésének egyik kiinduló adata. További elemzésekhez már más adatokat, illetve azokból képzett indexeket kell felhasználni.

5.1.3. A mért adatokból számítható mutatók

Egy vizsgált fa mért adatai többségükben alkalmazási viszonyszámok képzésére, amelyek segítségével egy átlagos, stabilnak élt tudjuk hasonlítani a vizsgált fát. Ahol világos a tendencia, ott elfogadható az eredmény, ott további elemzésekre is szükség lehet egy-egy favizsgálat során. Jelen munkánk egyik célként fogalmazta meg, hogy lehetőleg egyszeren és jól (és nem utolsó sorban, gazdaságosan) értelmezhető adatok kerüljenek felhasználásra. Az adatfelvételek során ilyen elemzés is történt.

Az Anyag és módszer fejezetben bemutattam a mérési módszereket és az ezekből számítható mutatókat. A mutatók fordítottja (képlet: reciprokuk, koordináta-rendszerben a tengelyek felcserélése) is gyakran értelmezhető.

A vizsgált fák külső méreteiből számítható mutatók

A leggyakrabban alkalmazott érték a magasság és átmérő viszonya. Ezen belül a nemlineáris regresszióval (és a későbbiekben is így történt) szemléletes módon ábrázolható a magasság változása az átmérő függvényében, amely az egyes fák növekedésére, ezáltal az egészségi állapotára vonatkozóan sokat elárul (15. ábra). E munka keretében ez az összevetés 71 darab felmért fa adataira adaptálva készült el, összehasonlításként bemutatva ugyanezen mutatót egy állomány adataiból képezve.

Az a korábbiakból kiderült, hogy –szemben az erdő álló fákkal- városi fáknál fiatal életkorban különösebben nem kell aggódnunk az egészségromlásából adódó balesetveszély miatt. Középkorú és idősebb életkorban azonban már annál inkább, hiszen a fák ebben az időszakban fejtik ki a kívánt hatásaikat. Emiatt a fiatal kori növekedésmenetet itt nem kell szót ejteni. E munka szempontjából a későbbi kori növekedés fontosabb.

Az előbbiek figyelembe vételével, a 15. ábrát tanulmányozva következtetni lehet megállapítani. A tendencia (a függvény képe) viszonylag jól kirajzolódik. A görbén a kezdeti, meredekebb szakaszt (amely tehát még a fiatalabb koroké) kisebb meredekséggel követi, amely előre haladva a későbbiekben aztán laposabbá válik.

Az ábrán még az is érzékelhető, hogy nem egyetlen trendvonal, hanem inkább „trend tartomány” bontakozik ki az adatokból.

A 15. ábra alapján megállapítható, hogy a fák magasság és átmérője egymás viszonylatában a fenti logaritmikus egyenlethez közelítőleg törekvésű növekedésmenetre törekvensz. Az ettől eltérő eseteket egyesével érdemes vizsgálni, de különösen a trendvonalat felülre elhagyó eseteket érdemes vizsgálni, mert ott a növekedésmenettel az egészségi állapottal probléma van (nem fiziológiai egészséget értve ezalatt).

15. ábra A magasság és a mellmagassági átmérőszonya a vizsgálatba vont fáknál (piros vonal, $p=0,05$ mellett $p=0,009$ a kapcsolat szorossága $r=0,51$, azaz nem túlságosan erős)

Közismert, hogy az erdőben álló fáknál milyen a magasság és az átmérőszonya, mivel az erdőnevelési modell táblák tartalmazzák ezeket az értékeket. Azt is tudjuk, hogy egyes fafajok, s fatermési osztályok³⁴, és még több egyéb tényező befolyásolja a famagasság és az átmérő értékének változását, de a tendencia minden fában hasonló.

Az erdőben álló fák esetében jóformán csak a fiatalabb korokba kerülésre találunk példát, illetve adatokat az erdőnevelési modell táblákban (16. ábra). Az azonban biztos, hogy az erdőben álló fa ugyanazt a famagasságot kisebb átmérővel éri el, vagy fordítva, az erdőben ugyanazon átmérőnél nagyobb famagasság tartozik.

Az összehasonlítást több faj, többféle fatermési osztályával meg lehet tenni, azonban célszerű egy közepes fatermési osztályt (legyen ez a IV. osztály, ha beigazolódik a választás helyessége), továbbá a városi viszonylatban is gyakran forduló, nem extrém hosszú biológiai életkorú és viszonylag jó várostalépítési képességű magas kristály választani. A 16. ábra 9 darab fa modell táblabeli adatából készült, figyelembe véve azt, hogy ezek a fák egy-egy korszak átlagfái.

A 15. ábra adatai azt is mutatják, hogy a mintában vizsgált területen 24-25 méter magasságot meghaladó fa nagyon kevés van, míg az átmérőnek az érték 70-75 cm.

³⁴ A fatermési osztályt esetenként leegyszerűsítve a fa rendelkezésére álló területi adottságok minőségének kategóriájára, ahol egyezményesen a leggyengébb, a legjobban az I. fatermési osztály.

16. ábra A magasság és a mellmagassági átmérő viszonya magas kőris fatermesztési célú erdőben, IV. fatermési osztály (Kovács, 1980). ($p=0,05$ mellett $p=0,001_H$, a kapcsolat szorossága $R^2=0,98$, azaz erős³⁵)

A famagasság tekintetében ismereteink szerint fafajaink többsége ilyen paramétereket közepes termőhelyen szokott elérni, de nem kevés ennél magasabb faállomány is van. A városi fák esetében azonban úgy tűnik, inkább alacsonyabbak az erdei társaiknál. Ilyen vonatkozásban a városi fák növekedésének vizsgálatakor leginkább az erdei termőhelyek IV. fatermési osztálya állítható párhuzamba. A városi „termőhelyek” jellemzésére helytálló az Anyag és módszer fejezetben bemutatott termőhelyi tényezők minősítése.

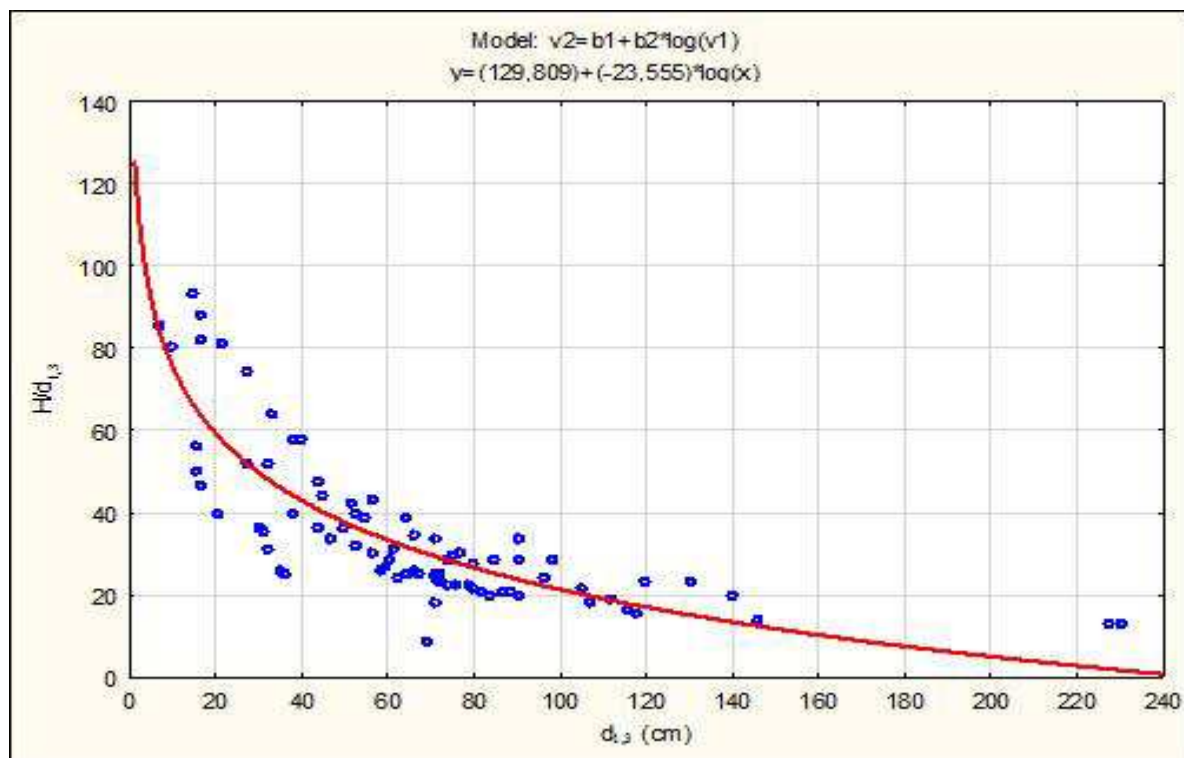
Átmérő tekintetében ezzel szemben fordított a helyzet: a közepes termőhelyű erdők értékeinél (azaz legfeljebb 50 cm-ig terjedően) nem kevés magasabb adatot is találunk.

Külön érdekes a nagy szórás miatt az átlagostól jelentősen elért értékek kérdése. Ezeket egyesével kell elemezni.

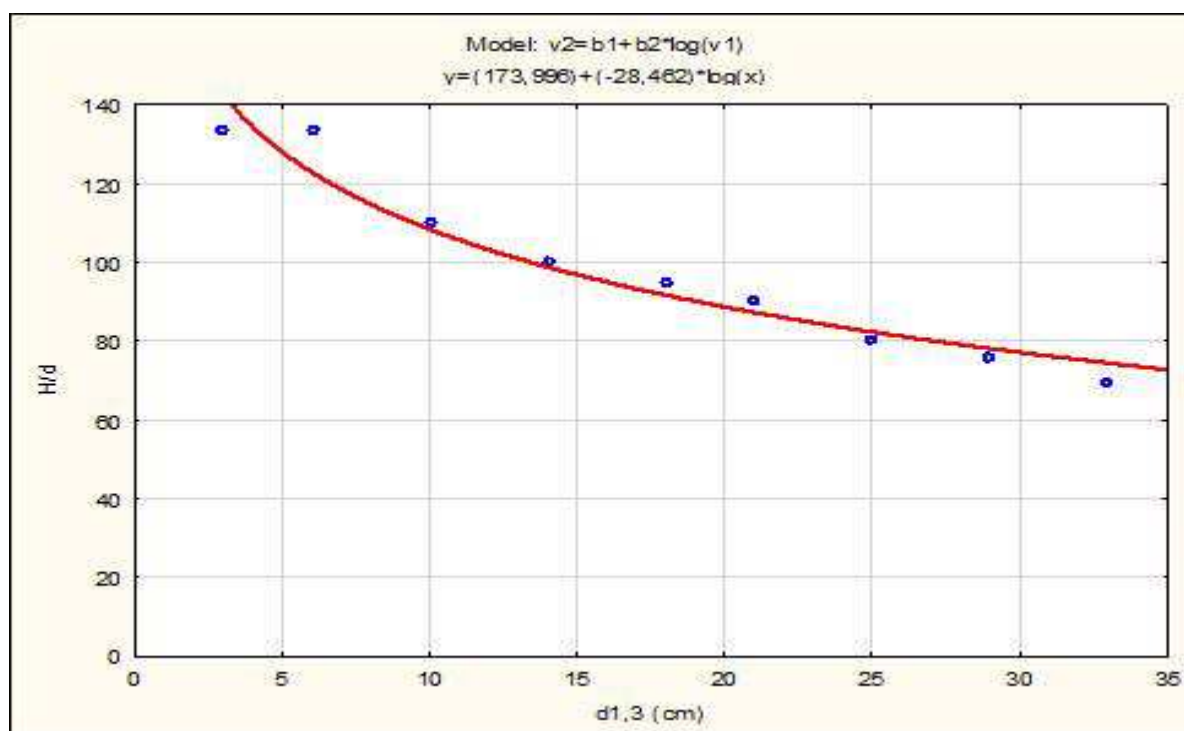
A 15. ábrán az a nyilvánvaló tény is látszik, hogy az egyre nagyobb átmérők esetén már ritkulnak az adatok, hiszen a természetes életkor utolsó részében nagyon kevés vizsgálható fa áll rendelkezésre.

Még szemléletesebb a magasság és az átmérő hányadosát (magasság-átmérő viszonzszámot) képezni ($H/d_{1,3}$) ugyanazon 71 darab vizsgált fa esetében. Ha ezt az átmérő függvényében szemléljük, további következtetések is levonhatók (17-18. ábra).

³⁵ A modelltáblában már kisimított adatok szerepelnek.



17. ábra A magasság-átmérő viszonyozása a mellmagassági átmérő függvényében a vizsgálatba vont fáknál ($p=0,05$ mellett $p=0,00_H$, a kapcsolat szorossága $R^2=0,71$, azaz közepes-jó)



18. ábra A magasság-átmérő viszonyozása a mellmagassági átmérő függvényében IV. fatermési osztályú magas kőrisnél (Kovács, 1980). ($p=0,05$ mellett $p=0,00_H$, a kapcsolat szorossága $R^2=0,94$, azaz erős³⁶)

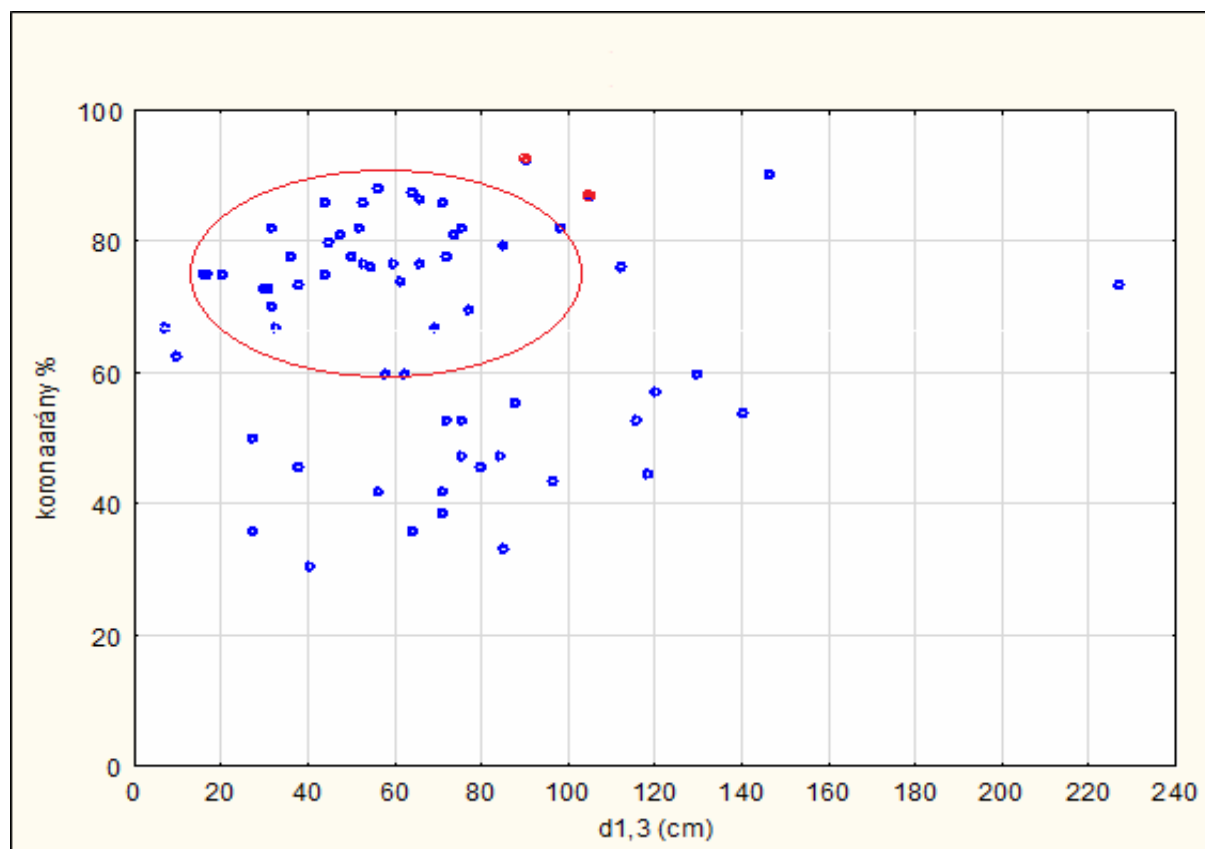
³⁶ Az erdőszeti modell táblában már kisimított adatok szerepelnek.

A tendencia is jól látható. A görbe alatti terület stabilitási szempontból kielégítő, a görbe feletti mezőbe eső értékeknél azonban további szempontokat is figyelembe kell vennünk az állékonyság eldöntéséhez. Az is világosan látszik, hogy a magasabb átmérőhöz alacsonyabb karcsúsági értékek tartoznak, de ez összecseng azzal a megállapítással, hogy az átmérő gyarapodásával a magasság növekedése nem tart lépést, sőt előbb megáll.

Látható, hogy a szoliter fáknál az adatok mérvadó részének karcsúsági indexe a 20 és 60 közé esik. Az erdő esetén, az előbbi 9 darab modelltáblabeli magas kőrís példájánál maradvá (18. ábra), ugyanez a mutató 25-30 cm között csökken a 80-ra, amikor egy városban álló fánál már csak 50-es értéket, azaz feleannyit regisztrálhatunk.

A mechanikai számítások fontos kiinduló értékei a korona különböző paraméterei. Önmagukban –mint az eddigi adatok is- nem jellemzik a kérdéses fa állapotát, ezért érdemes a könnyen megfogható mellmagassági átmérőt viszonyítási alapnak venni.

A fáknak egyik fontos, szembetűnő ismertetője a korona aránya, azaz annak ismerete, hogy a famagasságnak mekkora része a koronahossz. Az átmérő függvényében a vizsgálatba vont 71 darab fa adataiból képzett 19. ábra alapján nem található összefüggés, azonban igazolódik az előfeltevés, hogy a vizsgálatba vont fák koronaaránya magas.

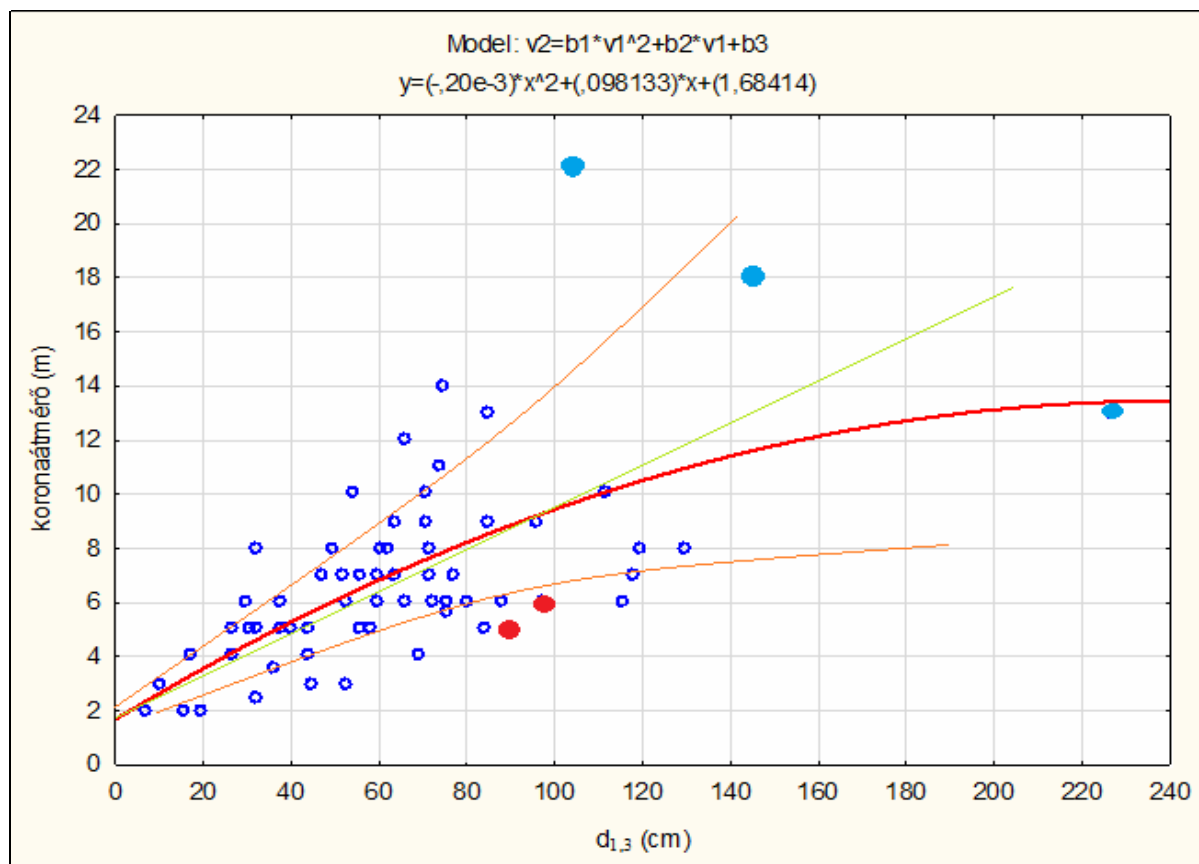


19. ábra Koronaarány az átmérő változásával

A 19. ábrán körvonalazódik (pirossal jelölve) egy halmaz, amelyben a teljes minta viszonylag nagy hányada helyet foglal. Bár nagy az adatok szórása, a városi fák 30-35% koronaarányal rendelkeznek, jellemzően 70-80%-kal. Meg kell jegyezni, hogy bizonyára számtalan példát lehet mutatni az ennél alacsonyabb koronahányadú, lakott területen

előforduló fákra, azonban ezekre az Anyag és módszer fejezetben szereplő tipizálás szerint jobbra parkos környezetben, azaz több közeli szomszédal bíró fák esetében találunk példákat.

A magas koronaarány értelemszerűen nagy koronafelületet is determinál, amelynek jelentőségére a statikai fejezetrészekben található magyarázat. Mindenképpen említést kell itt tenni az utóbbi időben újra felfedezett, a 2014-es év „Év fafaja” verseny ezüstérmeséről, a jegenyenyárról, amelynek habitusa kivételes (és részben emiatt állékonyságát tekintve ugyancsak sikeres) a többi fafaj között: majdnem földig ágasan viszonylag kicsi, átlag alatti koronafelülettel bír. Ezek a fák a 19. ábrán és a 20. ábrán pirossal vastagítva megjelölt, a 90 és 98 cm-es átmérőhöz tartozó értékek (Gencsapáti, Nemescsó)



20. ábra Koronaátmérő és a mellmagassági átmérő viszonya (Wessolly és Erb, 1998 nyomán) ($p > 0,05$, $R^2 = 0,40$; alacsony szorosságú a kapcsolat).

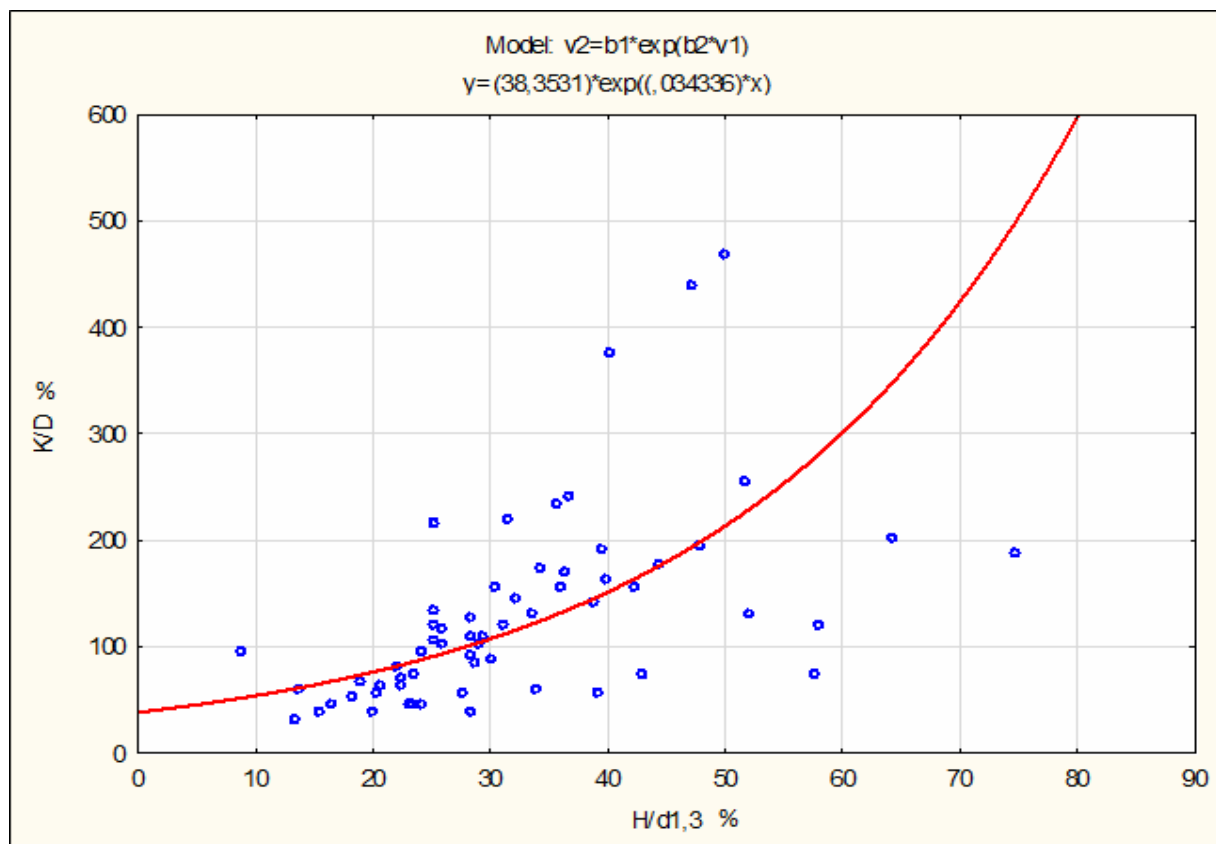
A fa koronájának méretei közül az átlagos koronaátmérő változását is érdemes megtekinteni. A tendencia egyértelműnek látszik, a kapcsolat azonban nem szoros ($p = 0,05$ előzetes feltételezésével $p = 0,12$ adódott, a kapcsolat szorossága $R^2 = 0,40$, azaz nem erős). Ezért inkább egy „kapcsolati mező” ábrázolható, amelyen kívül (különösen felfelé) eső fák adottságai problémásak lehetnek.

A 20. ábrán kék színnel kiemelt fák adottságai rendkívüliek (Göbösmajor kocsányos tölgy, Szombathely-Hivatal japánakác, Barcs kocsányos tölgy); ha csupán az előbbi gondolatmenetet adaptálnánk, akkor veszélyes állapotúnak kellene ítélni őket. Ám egyéb

tulajdonságaik miatt stabilnak bizonyulnak. Amennyiben a mellmagassági átmérő – koronaátmérő kapcsolatát nem egyetlen trendvonalal, hanem a 20. ábrán szélesedő sávval jellemezzük, úgy a stabilitás dilemmája megoldódik. A grafikon érdemi részén a függvény futása egyenessel helyettesíthető.

A koronavetület átmérő függvényében történt ábrázolása szinte egybevág a 20. ábra képével, emiatt az itt nem szerepel (Wessolly és Erb, 1998).

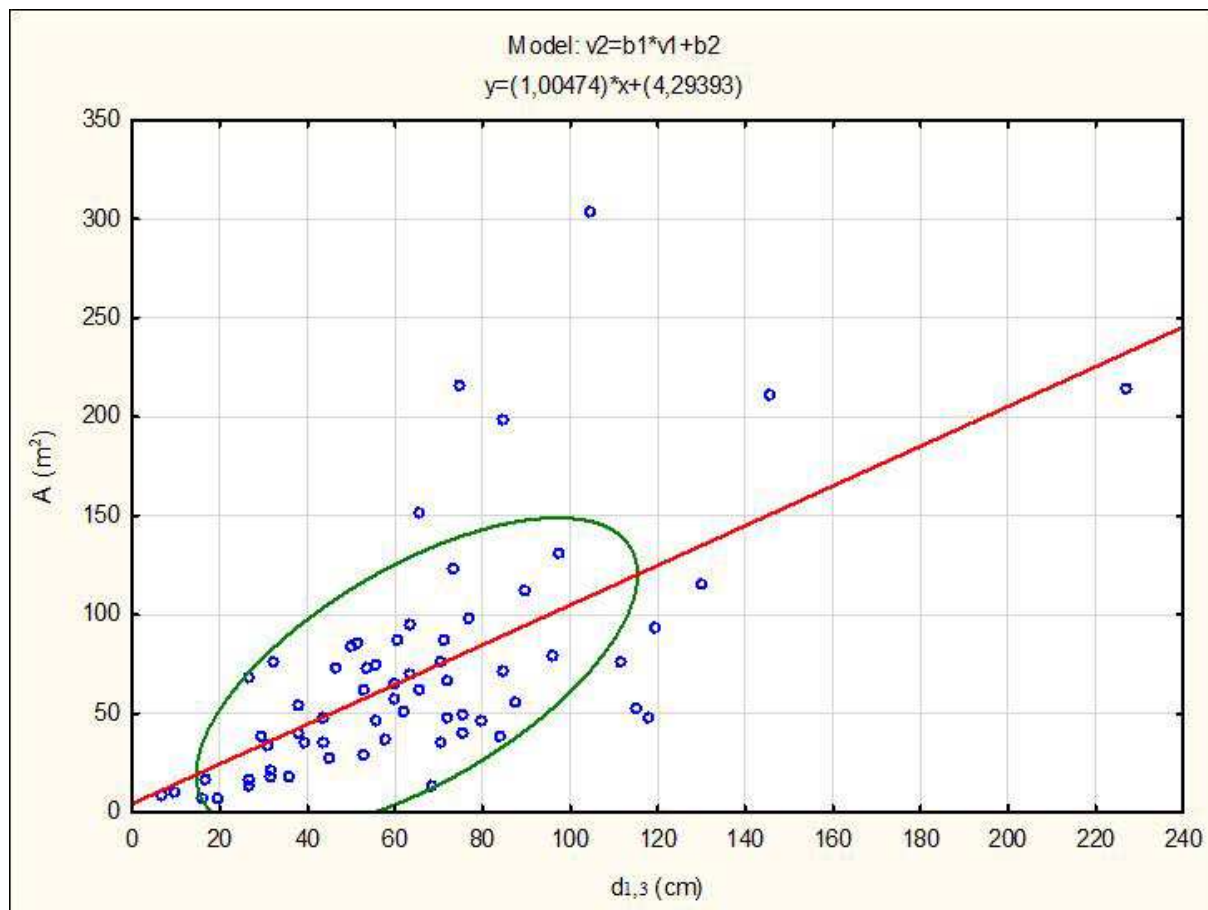
Szintén szemléletes lefutást mutat ugyanazon, vizsgálatba vont fákról, a karcsúsági mutató függvényében ábrázolt koronaarány:mellmagassági átmérő aránya. Leolvasható a grafikonról a fák növekedésének azon elve, miszerint magasabb fához nagy mellmagassági átmérő, továbbá hosszabb korona tartozzon (21. ábra).



21. ábra A karcsúsági mutató kapcsolata a koronaarány-mellmagassági átmérő arányának viszonylatában. ($p < 0,05$, $R^2 = 0,61$; közepes)

Az ábrázolhatóság végett ki kellett ejteni néhány terebélyes koronájú, de vékony és alacsony fát, amelyek jellemzően 8 méter magassággal és 10 cm törzsátmérővel rendelkeznek. Az összefüggésben a néhány nagyobb magasság-átmérő viszonyszámmal, továbbá a nagyobb koronaarány-átmérő viszonyszámmal bíró fák torzítják a függvény képét.

A korona jellemző adatai közül szinte a legfontosabb a korona szélnek kitett felülete (szakzsargonban „vitorlafelületnek” nevezik). A már bevált mellmagassági átmérőt alapul véve a 22. ábra mutatja be ennek változását a kísérletbe vont fák esetében.



22. ábra A korona szélnek kitett felülete és a mellmagassági átmérő kapcsolata. ($p > 0,05$, $R^2 = 0,41$; alacsony-közepes)

Ahogy várható, a nagyobb mellmagassági átmérőkhöz nagyobb vitorlafelület társul, és csaknem egyenes arányban. A diagrammező felső széleinél a már említett három különleges méretű fa található. Kézenfekvő, hogy a viszonylag nagy koronafelülethez tartozó alacsony átmérőérték veszélyforrás lehet a fa állékonysága szempontjából.

Ehhez kapcsolódik, hogy a fák állékonyságának javítására kevés lehetőség nyílik. Az ágak hevederes, acél-kereszttrudas megerősítésének, vagy éppen alátámasztási lehetőségeik ismertetésére itt nem kerül sor. A vitorlafelület csökkentésének technikáira sem tér ki e munka, azonban azt meg kell említeni, hogy a koronafelület csökkentése a stabilitás szempontjából régóta bevett gyakorlat. Az utcai sorfáknál elsősorban esztétikai okokból gyakori a visszametszés, amelynek eredménye a sűrűbb, kompaktabb korona. A tömörebb korona nagyobb légellenállást von maga után, amely a korona alakító tényező növekedésében (is) megnyilvánul. Egyúttal azonban sokkal kisebb lesz a koronafelület és a lefelé mozduló súlypont is. A vizsgált mintafák közül erre kiváló példa látható a 23. ábrán.



23. ábra Szombathely, Juhász Gy. utca, erőgéppel kidöntött korai juhar.

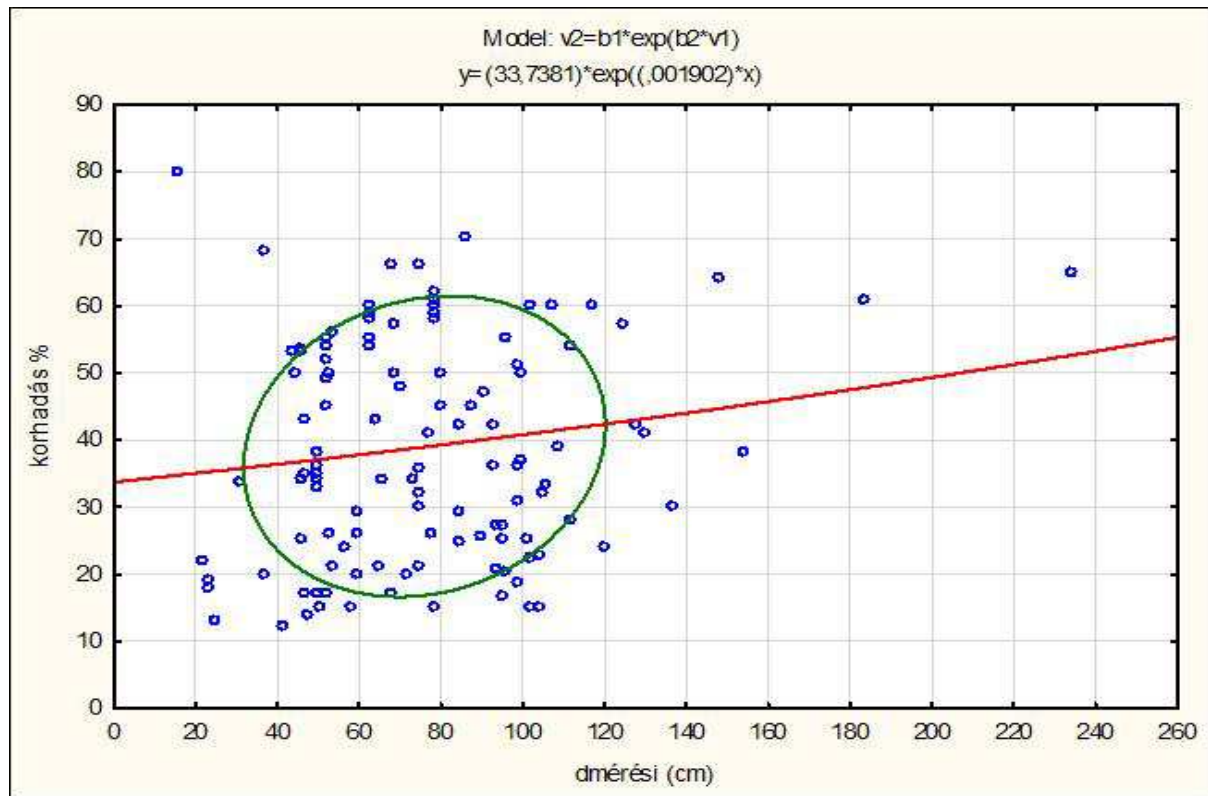
Üreg, korhadás kiterjedésének mérése esetén alkalmazható indexek

Jelen munkában elvégzett mérések és megfigyelések eredményeként, a vizsgált fákra vonatkozóan a következők állapíthatók meg.

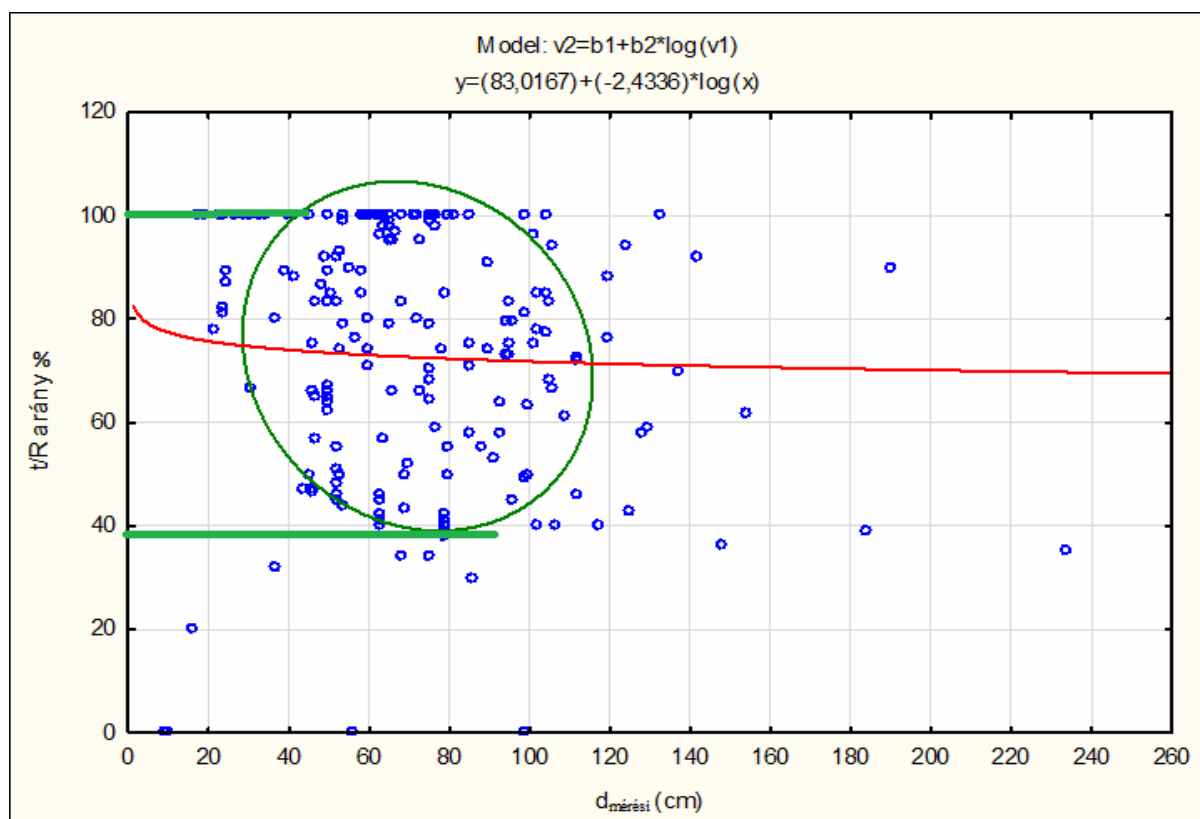
Amennyiben tomográfal a fatesten belüli korhadás mérhető, akkor az üreg méretét valamihez viszonyítani kell, hiszen önmagában nem hordoz információt. Legpraktikusabb vizsgálni a korhadt vagy üreges rész arányát a fa átmérőjéhez (avagy kiterjedését a fa körlapjához) képest. Kézenfekvő a tomográf mérés síkjának megfelelő faátmérőt alapul venni. A 24. ábra mutatja ennek egyik eredményét, 197 elvégzett tomográfos vizsgálatra alapozva, a jelentéktelen korhadással bíró, vagy egészséges fák adatait értelemszerűen kiejtve.

Az adatok statisztikai értékelése nem megbízható, emiatt összefüggést nem érdemes keresni. A pirossal jelölt trendvonal inkább választóvonalnak felel meg: a felette elhelyezkedő értékeknél a fa egyéb adottságait is figyelembe kell venni, míg a függvény alatti rész megnyugtató biztonságot jelent.

A 24. ábráról kitűnik, hogy érdemi korhadt részek a 40-110 cm közötti átmérőkben, 20-60 % arány között fordulnak elő. A 40 cm-nél kisebb vastagságú fák, fa részek korhadása kevésbé jellemző, hiszen még a várható élettartamuk első szakaszában találhatóak, míg a 110 cm feletti fák egyrészt alacsony példányszámban fordulnak elő, másrészt a sebzési lehetőségek intenzívebb szakaszán, a fiatalabb kori vékonyabb kérgű intervallumot már túlhaladták. A 70 %-nál magasabb korhadási aránnyal bíró fák feltehetőleg már korábban eltűntek. Hasonló megfontolások alapján, ugyanazon alapadatokat felhasználva vizsgálni lehet az üreg átmérőjén felüli fa rész, azaz a maradék falvastagság viszonyát az ugyanott mért faátmérőhöz (25. ábra).



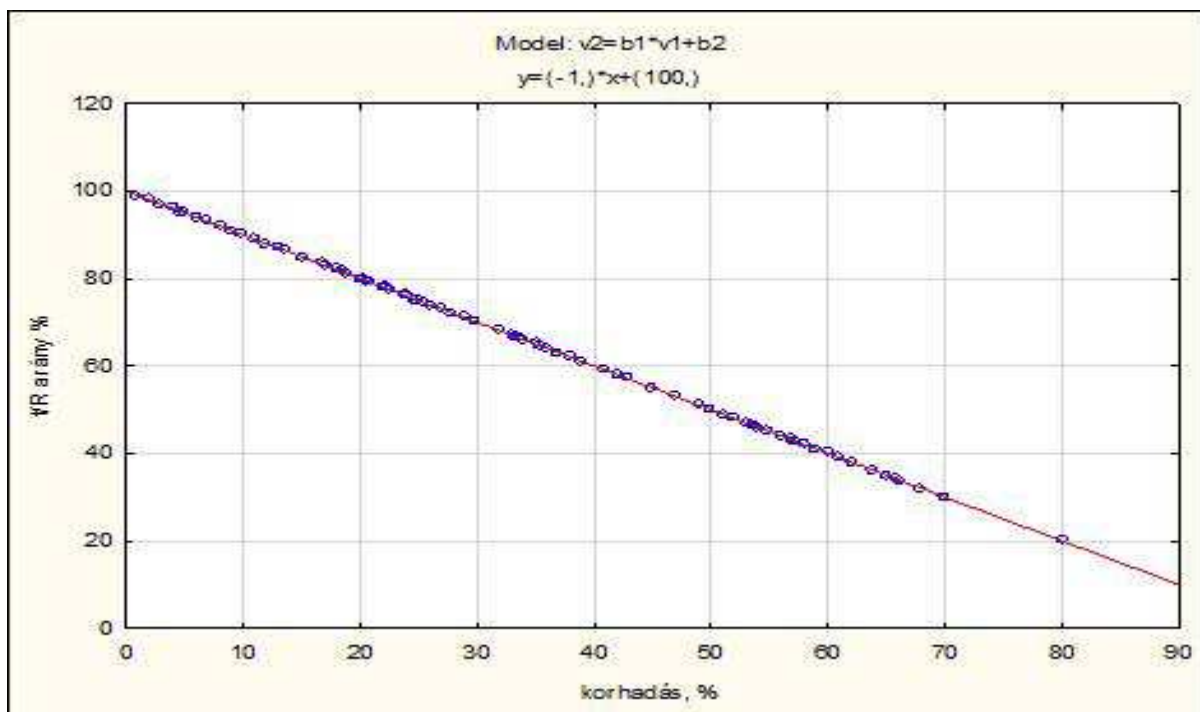
24. ábra A mért keresztmetszetben a korhadás aránya a körlaphoz, a mellmagassági átmérő függvényében. ($p=0,05$ értéket nem sikerült tartani, a kapcsolat szorossága nagyon alacsony.)



25. ábra A mért keresztmetszetben az üregen felül visszamaradt fa-rész falvastagságának aránya (t/R) az ugyanott mért faátmérőhöz. ($p=0,05$ értéket nem sikerült tartani, a kapcsolat szorossága nagyon alacsony)

Az eredmény természetesen hasonló lesz, azaz egyértelműen itt sem fedezhető fel markáns összefüggés, azonban az előzőhöz hasonlóan kijelenthető, hogy 100-110 cm feletti átmérőjű fa nagyon kevés akad. A vizsgálatok szempontjaiból fakadóan 20-25 cm alatti átmérőjű, üreges fa szintén nem került a mintába. Észre kell azonban azt is venni, hogy 30-35%-nyi falvastagsággal nem rendelkező üreges fák jellemzően nem kerültek a vizsgálatokba. Ez kirajzolja a Mattheck-féle, az előbbieken már bemutatott 30 %-os maradék falvastagsági arányt, amely alatt nagyfokú törésveszélyt jósolnak (Mattheck és Breloer, 1993; Mattheck és mtsai, 1995; Mattheck, 2006). Az is evidens, hogy a 100% az üregmentes, azaz egészséges fákat mutatja.

Mindezen megfontolások az ábrán zöld vonallal elválasztott tartományt képeznek. Magát a t/R összefüggés képét a korhadás rész, mint független változó függvényében ábrázolva – nem megfelelő módon- egyenest kapunk (26. ábra). (Fontossága miatt külön ábrán foglal helyet.)

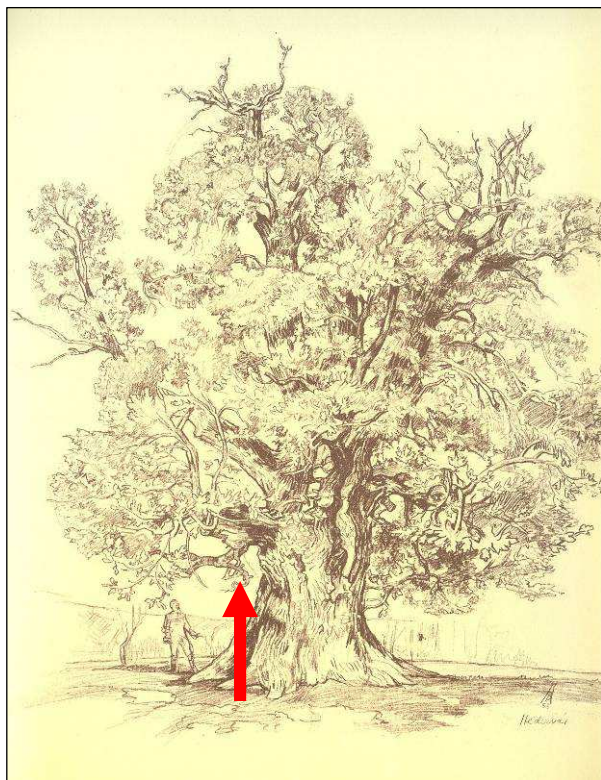


26. ábra A maradék falvastagság aránya a korhadás rész függvényében.

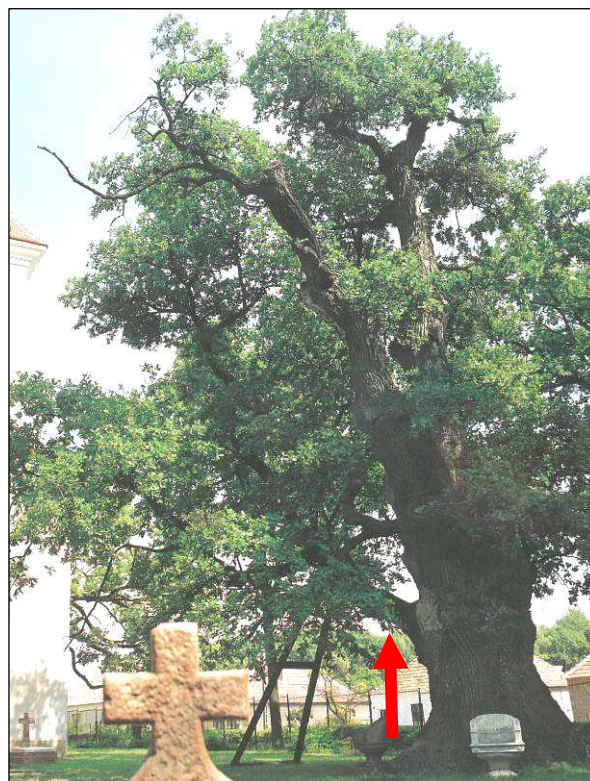
Az is látható, hogy t/R 30%-os értékénél alacsonyabb paraméterekkel bíró fa alig akadt a vizsgálatokban. Ennek oka az, hogy az ilyen fák már kidőltek, vagy azokat biztonsági okokból eltávolították. (A jobb szélén látható 80%-os korhadás, 20% maradék falvastagsággal, egy kidőlt, ám bokros részen fennakadt fához tartozik. Az ezt megelőző, 70% korhadással és 30% maradék falvastagsággal rendelkező magas kőrist a vizsgálatot követően gyorsan kivágta a kezelő.)

A Szakirodalmi összefoglalásban olvasható a maradék falvastagságról, mint egyszerűen mérhető, gyorsan számítható értékről, egyfajta stabilitási határról szóló, napjainkban immár tudománytörténeti vita. Logikusnak tűnik az ellenérv, hogy számoljunk más úton is, a fa szilárdsági tényezőit, a környezeti adottságokat is figyelembe véve. Azonban az előbbi két megközelítésben is láttuk, hogy helytálló a t/R 30%-os határértéke. Az ellenzők

tekintélyes tábora különleges, természeti emlék-számba menő famatuzsálemeket hoz példának, amelyeknek erősen csonkolt koronája, netán alátámasztott törzse valóban a 30%-nál alacsonyabb értéket eredményez a számításban. (Eklatáns példa erre az 1968-ban készült rajzon (27. ábra), majd az 1990-es évek legvégén készült 28. ábrán, továbbá a 10 év elteltével, 2009-ben készült 29. ábrán látható hédervári Árpád-tölgy is). Minden bizonnyal ezek a szabályt erősítő kivételek.



27. ábra Hédervár, Árpád-tölgy, 1968.
(Forrás: Balogh, 1968)



28. ábra Hédervár, Árpád-tölgy, 1998-99.
(Forrás: Kapocsy, 2000)

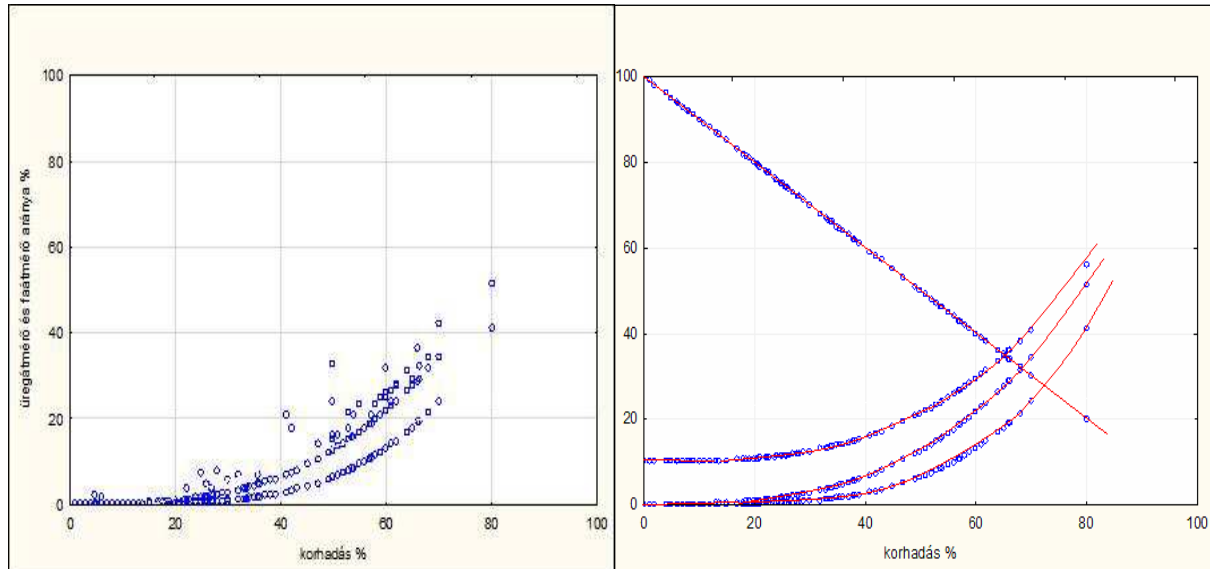
Mindegyik ábrán piros nyíl mutatja a 2009-re megmaradt egyetlen élő, de már 1998-99-ben is alátámasztásra szoruló ágat.



29. ábra Hédervár, Árpád-tölgy, 2009.

Szintén egyszerű, ám a korhadt rész és az átmérő eltéréseit jobban kihangsúlyozó értékek nyerhetők az Anyag és módszer fejezetben bemutatott Wagener-képlettel, illetve a vele rokon Bartlett- és Coder-képletekkel (30. ábra).

Az összefüggések a következőképpen ábrázolhatók Kane és mtsai (2001) nyomán (30. ábra):



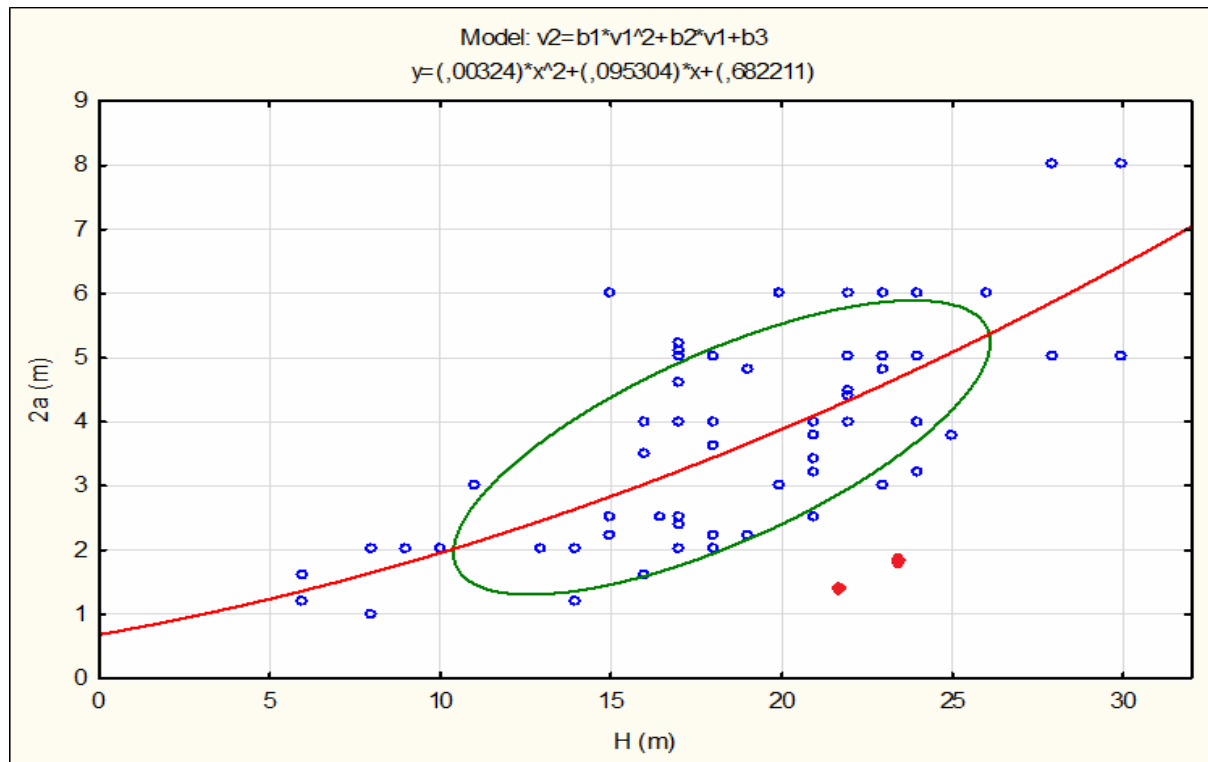
30. ábra A Mattheck-, a Wagener-, a Bartlett- és a Coder-képletek összehasonlítása

A 30. ábrán a vizsgálatba vont fáknek a Wagener-, a Bartlett- és a Coder-képletekkel kapott értékei tanulmányozhatók. A legalacsonyabban futó a Coder képlet a negyedik hatvány miatt, míg a mező felső részén látható szórt értékek a Bartlett-képlet különböző üregnyílások miatt szóródó értékei láthatók. Ezek az értékek a közvetlenül mellette futó Wagener-képlet pontjaival üreg nyílása hiányában egybeesnek, más esetben, nagyobb nyílás esetén nagymértékben el is térhetnek. A 30. ábra jobboldali részén a Bartlett-képlet egységesen 10% üregnyílással értendő, a szemléletesség céljából.

Az előbbi, a 30. ábrán megfigyelt 30%-os visszamaradó falvastagság értéket el nem ért fák hiánya természetesen itt is látszik (a 70% korhadási értékek felett).

A gyökérzet méreteire alkalmazható indexek

A fák legfőbb részei közül a gyökérzet viszonzyszámai is elemezhetők. A gyökérzet adatai esetünkben a kiterjedése (átmérője), továbbá a mélysége, és ezekből származtatható térfogata. Mivel a mélység nehezebben megfogható adat, a térfogatra amúgy is nagyobb befolyást gyakorló gyökértányér átmérőjét célszerű alapnak venni.



31. ábra A gyökértányér átmérője és a fmagasság kapcsolata. ($p > 0,05$, $R^2 = 0,44$; alacsony-közepes).

A 31. ábra mutatja, hogy 8 méternél nagyobb átmérőjű gyökértányérral rendelkező fa nem volt a mintában. A 8 méteres érték a tapasztalatok szerint meglehetősen nagy, közép-európai viszonylatban ennél nagyobb kiterjedéssel nem kell számolnunk. A jellemzően legfeljebb 20-25 méter magas fákat ekkora gyökérzet a szokásos környezeti adottságok között kiegyensúlyozza. A fenti mutatót Mattheck és Breloer (1993) fordítva használta, azaz a gyökértányér átmérőjének függvényében keresett összefüggést a magassággal.

A függvény képe –az egyenletéből is láthatóan- csaknem lineáris.

Aggodalomra a görbe alatt elhelyezkedő adatokhoz tartozó fák helyzete ad okot, ezért itt további statikai vizsgálatok szükségesek a favizsgálat menetében.

Ebben a mutatóban is felfedezhető, hogy -mint már korábban is- nem vonalat, hanem inkább szélesebb adathalmazt, azaz értelmezési mezőt kell megállapítani, amelyen belül elhelyezkedő fákat biztonságosnak ítélni.

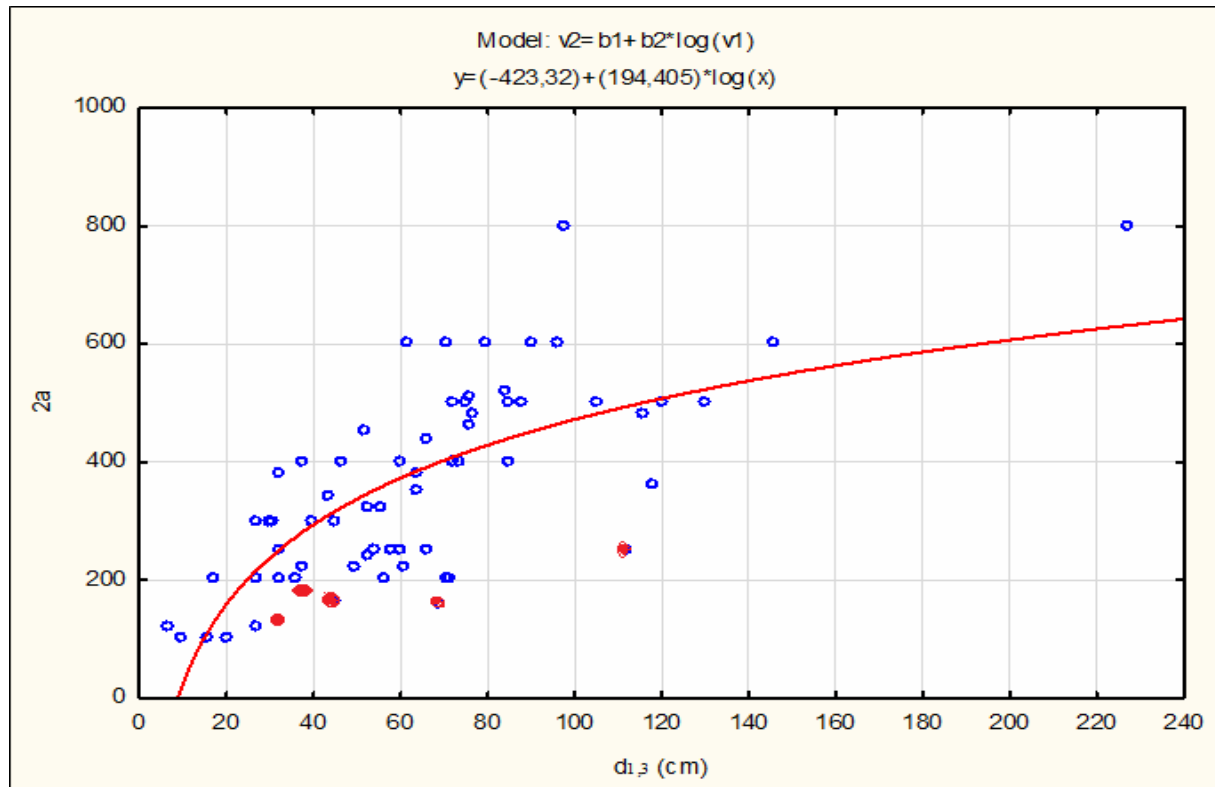
A 31. ábrán piros színnel megjelölt két fa kidőlt, mivel nem volt elegendő gyökérlabda-tömegük a föld feletti rész megtartásához. E két értéket kihagyva a kapcsolat szorossága 10%-ot javulna.

A gyökértányért a fa mellmagassági átmérőjéhez is érdemes viszonyítani. Az eredmény logaritmikus függvény, amely kezdeti nagyobb meredekségű növekedést követően laposodik. A nagy méreteik miatt kitűnő fák itt is messze az átlag felett vannak.

A 32. ábrán a görbe alatt jelölt pontok egy része kidőlt fákat jelez. Az átmérők szerint emelkedő sorrendben az első kettő és az utolsó kidőlt fák adat-párosai, míg a fennmaradó

kettő álló fát jelöl, de egyikük erősen csonkolt koronájú, a másik elnyomott, így visszaszáradt a csúcsa.

Az egyértelmű, hogy nagyobb átmérőjű fának nagyobb a gyökérzete, azonban önmagában szintén elégtelen a fa állékonyágának megítélésére. A görbe alatti területre került fák további vizsgálatokat igényelnek.



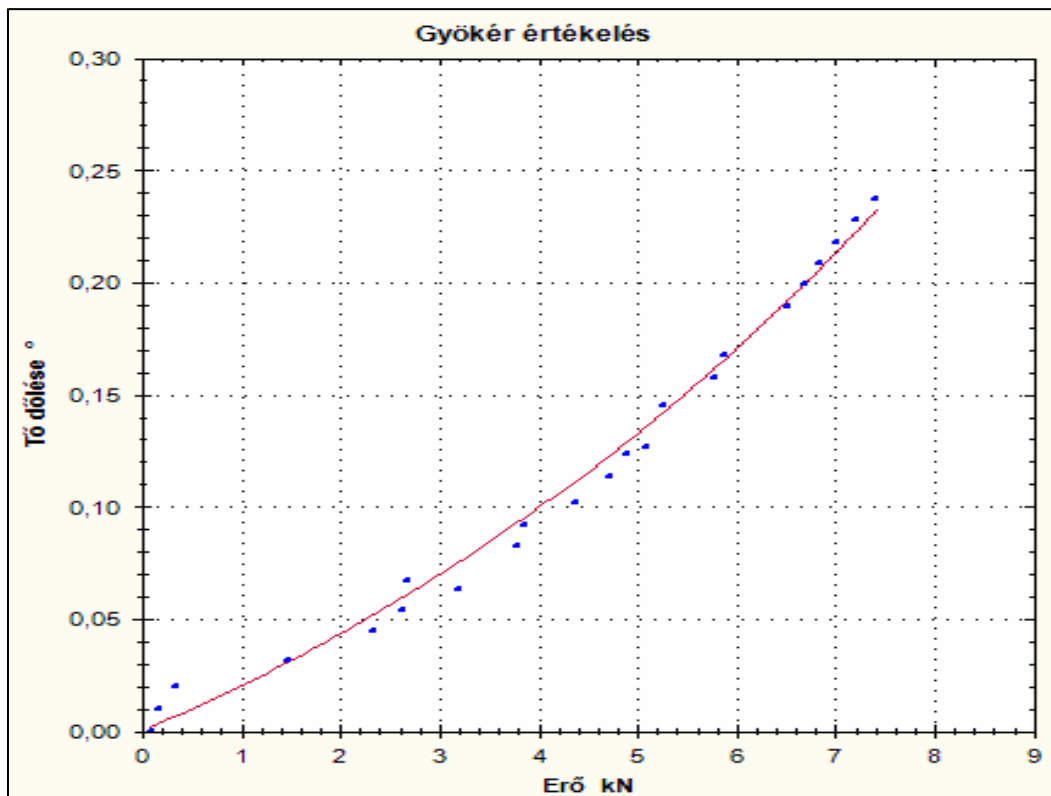
32. ábra A gyökértányér átmérője és a mellmagassági átmérő kapcsolata (Mattheck és Breloer (1993), továbbá Achim és Nicoll (2009) nyomán a vizsgált fák esetében) ($p < 0,05$, $R^2 = 0,51$; azaz közepes szorosságú)

5.2. Húzásvizsgálatok

E munka keretében néhány tetszőlegesen kiválasztott fán húzásvizsgálat is történt, amely leírása az Anyag és módszer fejezetben részletesen szerepel. Mivel azonban a vizsgálatnak nagy az eszközigénye, csak kisebb számú húzási teszt elvégzésére nyílt lehetőség.

A tapasztalatok alapján elmondható, hogy ez az eljárás valóban a legalkalmasabb módszer a gyökérzóna kiismerésére.

Fontos hangsúlyozni, hogy $0,2-0,25^\circ$ fölé a dőlésben nem szabad menni, mert maradandó károsodást okozhat a gyökérzetben (33. ábra, v.ö.: 10. és 34. ábrákkal).



33. ábra Lucfenyő húzásvizsgálat eredménye, Vassurány

Az elvégzett húzási vizsgálat elvégzését követően a számítások az 5. táblázatban látható biztonsági faktorokat eredményezték.

5. táblázat Biztonsági faktorok.

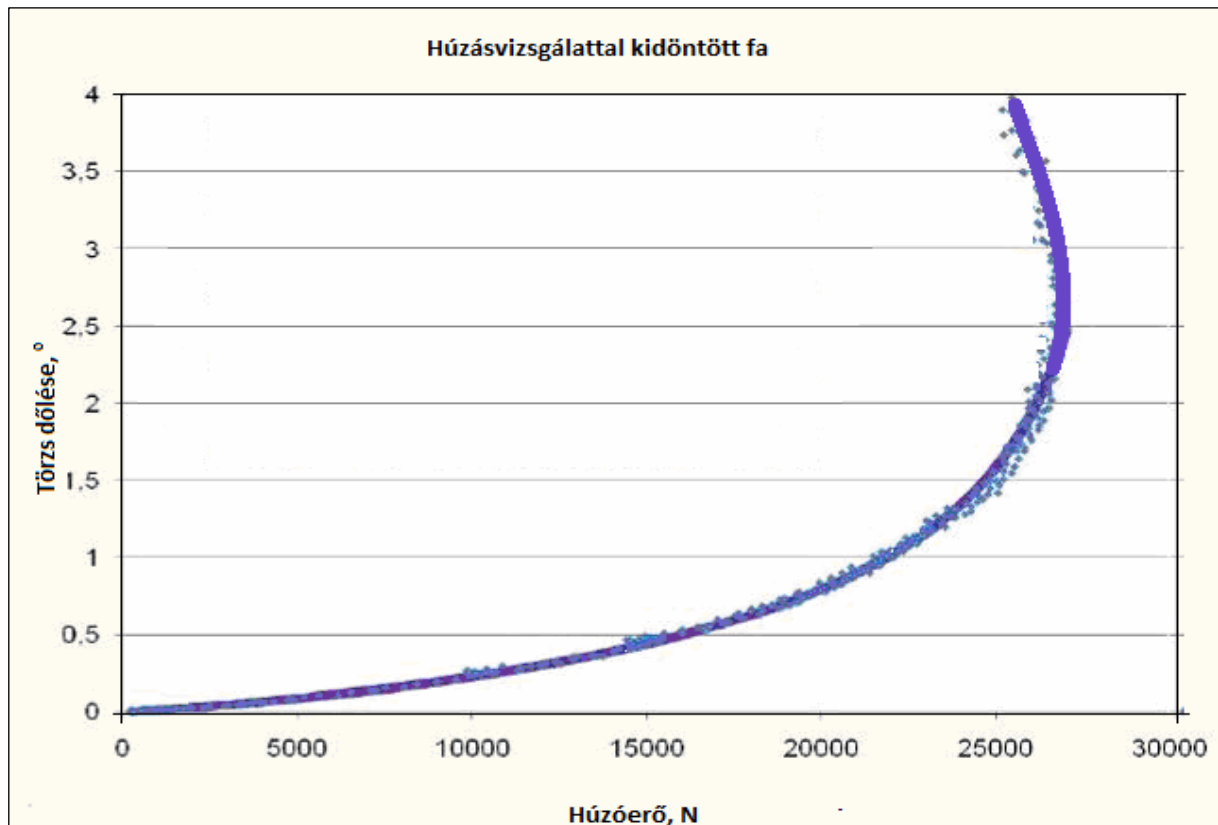
A fa	120 km/óra függőlegesen állandó szélsébség esetén
Vassurány, lucfenyő	3,04
Vassurány, lucfenyő	0,97
Vassurány, lucfenyő	1,13
Vassurány, lucfenyő	1,11
Vassurány, lucfenyő	1,01
NYME Botanikus Kert, magnólia	1,51
Perenye, fehér akác	1,90
NYME Botanikus Kert, kanadai nyár	4,10

Az 5. táblázat alapján megállapítható, hogy az első lucfenyő és az utolsó nyárfa stabilitása megnyugtató, a többi adat azonban lényegesen gyengébb. Amennyiben a környezet nagyfokú érdességmagasságát feltételezzük, úgy a módosított $-a$ magasság függvényében lefelé csökkenő, azaz változó szélsébség³⁷ esetére számított- biztonsági faktor már kedvezőbb képet mutatna. Az elvárt biztonsági tényező, csakúgy, mint más stabilitási vizsgálatnál, 1,5; illetve 150%, természetesen szintén a mérnöki munka tere. A koronafelület csökkentésével emelhető a fák biztonsága, azonban a fenyőknél, az idős nyárnál és a

³⁷ Lásd 3. fejezet, Szakirodalmi összefoglalás 3. ábra.

magnóliánál a visszavágás élettani okokból nem járható út. A vizsgált fák környezetében előforduló szélerősség, továbbá a koronafelület, a súlypont ismeretének –csakúgy, mint más statikai vizsgálatnál- megbízhatóságára ugyanazok vonatkoznak, ezért a bemutatásukat itt nem szükséges ismételni.

A húzásvizsgálat alkalmazása egyelőre hibalehetőségeket, illetve balesetveszélyt hordoz magában, továbbá legalább két személy munkája szükséges az elvégzéséhez. Az is nyilvánvaló, hogy az eljárás statikus terhelést modellez.



34. ábra Húzásvizsgálattal kidöntött fehér akác dőlése. Perenye, kert, 2010 június

A perenyei fehér akác húzásvizsgálata során a dőlésszög emelése a kidöntésig történt. A 34. ábrán látható, hogy a vizsgált fán 1° felett a dőlés nagy meredekségűre váltott, $2,5^\circ$ értéknél a fa megdőlt, és innen kezdve már egyre kisebb erő kifejtésére volt szükség a teljes kidöntésig (34-35. ábra). A fa $0,4-0,5^\circ$ alatt még visszatért volna eredeti helyzetébe, e dőlésszög felett már nem. A fa kidőlése azonban az esetlegesen ezután is megmaradó erőhatások függvénye, melyek bekövetkezése szél esetében nem jósolható meg előre. Ezért lehet találkozni szél által megdőlt, azonban nem teljesen kidőlt, és életben maradt fákkal (Lásd fertői lucfenyő, 10. ábra és 39. ábra)



35. ábra Húzásvizsgálattal kidöntött fehér akác gyökérzónája. Perenye, kert, 2010 júniusa.

5.3. Statikai vizsgálatok kidőlés előrejelzése céljából

5.3.1. A vizsgált fák adatainak felvételezése

A vizsgálandó fa megismerését, továbbá a fa jellemző paramétereinek mérését követően lehet a részletes erőtani-egyensúlyi számításokat elvégezni, jelen munka szerzője által összeállított, korábban nagy vonalakban vázoltak szerint. A részletes számítási menetet a 6. táblázat vezeti le, a helyi szélesség számítása a 8. táblázatban található. A számítási eljárás eredménye a fa vizsgálati időpontbeli állékonysága.

Jó, ha előre tudjuk, hogy a számítások eredményét óvatosan kell kezelni, mert több tényező is erősen csökkenti a megbízhatóságot.

Az Anyag és módszer fejezetben szerepeltek a mérőeszközök (mérőszalag, átlaló, relaszóp, stb.), amelyek abszolút hibáinak magyarázata nem ennek a munkának feladata.

A statikai számítás adatigénye, továbbá a számítás menete a 6. táblázatban levezetett számítási példában tanulmányozható. Az egyes tényezők tartalma, illetve a számítások a 6. táblázat sorrendjében kerülnek ismertetésre. Az egyértelmű paramétereikről nem esik szó. A táblázatban a mért adatok mellett a különböző segédtáblázatokból nyerhető adatok is megtalálhatók. Két fánál a számításoknak az előbb említettek szerint két útja is volt, mivel a talajban akadályozó tényezők jelentkeztek. Az első megismerésre alkalmával mindkét fánál úgy tűnt, hogy a kidőlésnek mechanikai oka nem lehetett volna. A módosított gyökérkiterjedéssel számítva azonban bebizonyosodott, hogy statikai oka is volt a fa kidőlésének (3. ábra).

A vizsgált fák egyikét, amely a környéken előforduló legnagyobb széllal szemben is megnyugtató stabilitást mutatott volna, nem a szél döntötte ki, hanem egy erőgép.

Az adatok közül az átmérővel együtt a legfontosabb a famagasság. Ennek mérési lehetőségei, továbbá a korona alja illetve teteje hosszmeréseinek hibalehetőségei ismertek. Itt csak a szakma által előszeretettel alkalmazott lézeres távolság, illetve magasságmérés szubjektív hibáira kell emlékeztetni.

6. táblázat A statikai számítások menete egy fa példáján

<i>Szombathely Gyöngyösparti sétány</i>	<i>fafaj</i>	<i>Aesculus hippocastanum L.</i>
<i>adat</i>	<i>dimenzió</i>	<i>érték</i>
Magasság (h)	m	19
Átmérő /1,3/ (D _{1,3})	cm	80
Átmérő /trunk/ (D _t)	cm	100
Törzshossz (T)	m	6
Élőnedves sűrűség (ρ _t)	kg/m ³	560
Fa térfogata (V _t)	m ³	7,12
Nehézségi gyorsulás (g)	m/s ²	9,81
Korona hossz (D ₁)	m	13
Korona szélesség (D ₂)	m	7
Lombozat nehézségi erő (F _f)	N	400
Korona alaki tényező (C _c)	-	0,28
Törzs alaki tényező (C _s)	-	0,7
Levegő sűrűség (ρ _a)	kg/m ³	1,2471
Szellökések sebessége (v _{b,0} , meteorológiától)	m/s	20
kritikus szélesebesség	m/s	15
Szellökések a helyszínen (v _m) (EUROCODE)	m/s	11,7
Talaj sűrűség (ρ _s)	kg/m ³	1600
Talaj sűrűség gyökerekkel (ρ _{sr})	kg/m ³	1270
Lehorgonyzási mélység (n)	m	1
Törési /forgás/ pont távolsága a tőtől (a)	m	0,9
Korona súlypont magasság (l)	m	12
Törzs ferdesége, dőlésszöge (α)	°	90
Korona vitorlafelület (A _c)	m ²	71
Törzs felület szél felől (A _s)	m ²	5
<i>A fa gravitációs ereje (nehézségi erő)</i>		
$F_t = V_t \times \rho_t \times g + F_f$	N	39 514
<i>Nehézségi erő fatörzsre merőleges komponense</i>		
$F_{t\perp} = F_t \times \cos\alpha$	N	0
<i>Nehézségi erő fatörzsirányú komponense</i>		
$F_{t\parallel} = F_t \times \sin\alpha$	N	39 514
Torlónyomás, turbulenciával (q _p)	N/m ²	290
<i>A szellökések ereje a koronán</i>		
$F_c = C_c \times A_c \times q_p$	N	5 798

6. táblázat A statikai számítások menete egy fa példáján (folyt.)

<i>A szélterhelés ereje a törzsön</i>		
$F_s = C_s \times A_s \times q_p$	N	943
<i>Szél erő koronára merőleges komponense</i>		
$F_{c\perp} = F_c \times \sin\alpha$	N	5 798
<i>Szél erő törzsre merőleges komponense</i>		
$F_{s\perp} = F_s \times \sin\alpha$		943
<i>Szél erő korona irányú komponense</i>		
$F_{c\parallel} = F_c \times \cos\alpha$	N	0
<i>Szél erő törzsirányú komponense</i>		
$F_{s\parallel} = F_s \times \cos\alpha$	N	0
<i>A fa nehézségi erő forgatónyomatéka (M_t)</i>	Nm	35 563
<i>Szél erőkar koronán</i>	m	13
<i>Szél erőkar törzsön</i>	m	4
<i>Szél forgatónyomatéka</i>		
$M = F_{c\perp} \times (l+n) + F_{s\perp} \times (l+n) / \tan\alpha$	Nm	79 149
<i>Gyökértányér térfogata (V_r)</i>	m ³	2,54
<i>Gyökértányér nehézségi erő (F_r)</i>		
$F_r = V_r \times \rho_s \times g$	N	31 704
<i>Gyökérzet forgatónyomatéka ($M_r = F_r \times a$)</i>	Nm	28 533
<i>A fa forgatónyomatéka</i>		
$M_r + M_t$	Nm	64 096
Állékonyság	%	81,0

Az elvégzett vizsgálatokból leszűrhető tapasztalatok szerint az átmérő mérése során a szoliter fák gyakran rendkívüli vastagságbeli dimenziói miatt az átmérő megállapításának nehézségeit kell említeni. Kellő gyakorlat hiányában komoly személyfüggő, többnyire szisztematikus hibák eshetnek meg, amelyek hatványozottan jelentkeznek a fa tövi részén, a terpeszek, gyökerek szabálytalan kifutásai miatt.

Nehézséget okozott a szükséges élőnedves sűrűség helyes értékének alkalmazása, ugyanis a táblázatok, adatbázisok (Babos és mtsai, 1979; Molnár és Bariska, 2002; Zanne és mtsai, 2009; illetve a világhálón számtalan honlapon) adatai értelmezhetetlenül széles intervallumot tüntetnek fel a keresett értékre. Például a frissen döntött gyertyán térfogatsúlya a fenti hivatkozásokban 660 – 970 - 1200 kg/m³.

A külföldi, mérvadó szakirodalomban (Zanne és mtsai, 2009) többnyire a légszáraz faanyag sűrűség-értékét tartalmazza, míg a még álló, többnyire élő fák esetében a sokkal nagyobb súlyú élőnedves faanyag jellemzőjére van szükség.

Nincs megbízható ismeretünk a gyökérzet faanyagának térfogatára és sűrűségére, az előbbi ismértve Sopp és Kolozs (2000) a földfeletti famennyiség arányában ad meg hozzávetőleges határértékeket, míg utóbbira Gencsi (1980) csupán irányt mutat.

Kérdéses a közismert fatömegszámítási táblázatokból (Sopp és Kolozs, 2000) megkapható fatérfogat adata is. Egyéb adat hiányában feltételezhető, hogy az említett mű nem csak erdőben álló fákra adja meg a térfogatot, hanem alkalmas a magányosan álló fák volumenének megállapítására is. Ráadásul lakott területen számtalan, nem erdei fafaj és –fajta is megtalálható, amelyek fatérfogatának meghatározására a Sopp és Kolozs (2000) idézett műve csupán ajánlásokat tartalmaz.

A szél támadási felületének, azaz a vitorlafelületnek megállapításához a fa koronájának szél felőli geometriai sziluettjét, illetve ennek közbezárt területét viszonylag egyszerű volt megállapítani, azonban az áttörtség, azaz a hézagosság számítása már hosszadalmasabb feladat volt. Az Anyag és módszer fejezetben bemutatott négyzetrácsos eljárás (10. ábra) jó eredményt ad, ezen felül digitális úton is kiértékelhető, megfelelően készített fényképekről.

A 36. ábra és a 7. táblázat igazolja, hogy közel azonos méretek (magasság, mellmagassági átmérő, fafaj, kor, termőhely, károsításoktól mentesség, elegendő növényter) esetén a korona áttörtsége erősen eltérő széllel szembeni támadási felületet jelenthet.



36. ábra A vitorlafelület kiterjedésének kivételével minden további ismertető jegyükben egyező fák, Szombathely, Zanati út, lucfenyők, 2014. március.

7. táblázat A 36. ábrán látható lucok koronáinak eltérései

A kérdéses fák	korona szélessége (m)	korona hossza (m)	támadási felület (m ²)	módosított támadási felület (m ²)
Bal oldali fa	8	12	48	18
Jobb oldali fa	4	12	23	20

Az látható, hogy a baloldali luc alpi („fésűs luc”) habitusú, míg a jobboldali luc kárpáti („lapos luc”) habitusú (Gencsi és Vancsura, 1992). A hó kevésbé tud az alpi típusú fán fennmaradni, emellett a későbbiekben tárgyalt C_w tényezője is kisebbre választandó.

Bár nem e munka tárgya, azonban valószínűsíthető, hogy a baloldali lucfenyő állékonysága kissé kedvezőbb a dinamikus favizsgálatok szempontjából.

Ezt követően a szél erejének, avagy a fa közegellenállásának erőhatása számítandó. A képlet az Anyag és módszer fejezetben ismertetésre került, itt csak a közegellenállás tényezőjének tárgyalására kerül sor.

A közegellenállás tényezőjének mérésére favizsgálatok esetén nincs mód, ezért azt meg kell választani. Wessolly és Erb (1998) közli néhány fafajra a Beaufort-skála 11-12-es kategóriájának megfelelő, azaz 103 km/óra feletti szélsébség esetén az alkalmazandó C_w értéket. Sinn (2001) arról is tájékoztat, hogy a tényező milyen mértékben csökken a szélsébség növekedésével. Cullen (2005) metaanalízisében szintén a szélsébség növekedésével a közegellenállási tényező csökkenését vezeti le. Emiatt a számításokban Sinn (2001) és Wessolly és Erb (1998) által javasoltak figyelembe vételével, de a vizsgált 71 fa, illetve a saját tapasztalatok alapján módosítva szerepelnek, így a törzsre 0,7, míg a lombkoronára általában 0,2-0,35 értéket vesz fel a C_w tényező (jelen munkában ezek jelölése rendre C_c és C_s .) Természetesen ez lombos állapotban, továbbá a Beaufort-skála szerinti 8. kategóriánál kisebb, azaz 103 km/óra alatti szélsébség viszonylatában értendő. Ennél alacsonyabb értéket a vizsgált fák közül a lomb nélküli (kiszáradt) fáknál, illetve az átlagostól eltérő alakú fáknál kellett alkalmazni (lásd mellékletben).

Mivel a koronafelület a vegetációs időszakban a legnagyobb, ekkor kell a stabilitást vizsgálni. A vizsgált fák esetében is előfordult a szoliter fákon gyakran megtalálható kúszó-támaszkodó vagy éppen parazita életmódot folytató növényfajok jelenléte. Ezek tömege a fa tömegéhez képest ugyan elhanyagolható, ám annál nagyobb többlet-koronafelületet jelentenek.

Városi környezetben saját megfigyelések szerint előfordulnak a szokásos erdei környezetben fára felfutó növények, mint az erdei iszalag (*Clematis vitalba*), közönséges borostyán (*Hedera helix*) ligeti szőlő (*Vitis silvestris*), szeder (*Rubus*) -fajok és egyéb elvadult *Vitis*-fajok, továbbá a vadszőlő fajok (*Parthenocissus inserta*, *P. quinquefolia*, *P. tricuspidata*). Az erdei iszalag és a vadszőlők a fák koronáját is képesek befedni, ezért hó vagy zúzmara megjelenése esetén komoly, számításba veendő többlet terhet is okoznak. A borostyán a fa törzsén és ágain okoz vitorlafelület-növekedést.

Tipikusan emberi jelenléthez (lakott terület, major, tanya, kastélyparkok, stb.) kapcsolódnak a trombitafolyondár (*Campsis radicans*), a lila akác (*Wisteria sinensis*), a tatáriszalag (*Reynoutria aubertii*), amelyek robusztus növekedésükkel és zöldtömegükkel beszámíthatók az állékonyság számításába.

Erdei környezetben kevésbé, a vizsgált fák esetében inkább előfordulnak az élősködő növények közé sorolt lombhullató sárga fagyöngy (*Loranthus europaeus*) és az örökzöld fehér fagyöngy (*Viscum album*) (Gencsi és Vancsura, 1992). Növényélettani hatásaikon túl előfordulásuk esetén a mechanikai számításokból, a támadófelület növelése miatt nem

hagyhatók ki. Egyes fákon (nemesnyárok, ezüstjuhar) évek alatt szinte újabb koronát képeznek (Baltazár és mtsai, 2013).

Az áttörtség (ezáltal a koronafelület) a lombos fákön évszakosan változik. Konkrét időpontra vonatkozó számításnál a téli lombtalan állapot a koronafelület meghatározásánál figyelembe veendő, azonban biztonsági számításoknál a nagyobb koronafelületű, statikailag kedvezőtlenebb, nyári lombos állapotot kell alapul venni.



37. ábra A kép közepén ezüstfenyő áll.



38. ábra A képen ezüstjuhar látható, fehér fagyönggyel

A 37. ábra közepén látható fa ezüstfenyő, amely azonban a trombitafolyondár és a lila akác versenyében alul maradt. A fa vizsgálata esetén a C_w tényező emelendő, a vitorlafelület is nagyobb lett.

Ugyancsak „többször-koronafelületet” eredményez a nagy mennyiségű fehér fagyöngy (*Viscum album*), amely 35%-kal nagyobb koronafelületet képez ugyanazon a fán. A 37. ábra és a 38. ábrán látható tömör felület, illetve merev ágú fagyöngy miatt a C_w értéket növelni szükséges. A fenti megfontolásokból következik, hogy a vizsgált fák koronáinak közegellenállási tényezője jelen számításokban módosítva kerültek az eljárásba. A módosítások minden egyes esetben a korona alakjára, habitusára figyelemmel történtek.

5.3.2. A szél erőhatása

A szélesebbség nagysága adott időpillanatban, vagy éves/napi megoszlásban az Anyag és módszer fejezetben ismertettek szerint megszerezhető különböző meteorológiai szervezetektől. Azonban szerzői megfontolások alapján, az így megismert értékről tudni kell,

hogy a szélességet nyílt területen, szabványosan, 10 méter magasságban kihelyezett anemométer méri. Ez az adott körülmények ismeretében átszámítandó a fa környezetére. A számítást a szerző a már említett nemzetközi szabvány alapján végezte.. Az érdességi hosszról és a turbulencia tulajdonságairól a Szakirodalmi összefoglalásban esett szó.

Kérdésként felmerülhet a fától gyakran távoli helyszínen mért hivatalos(nak tekinthető) adat helyszínre adaptálásának helytállósága.

A szélesség meteorológiai adata ismeretében a megadott összefüggésekkel kiszámítandó a szél fára gyakorolt torlónyomása, azaz a felületegységre eső erőhatás (8. táblázat). A konkrét vitorlafelület és a közegellenállási tényező ismeretében kapjuk meg a fára ható tényleges erőhatást.

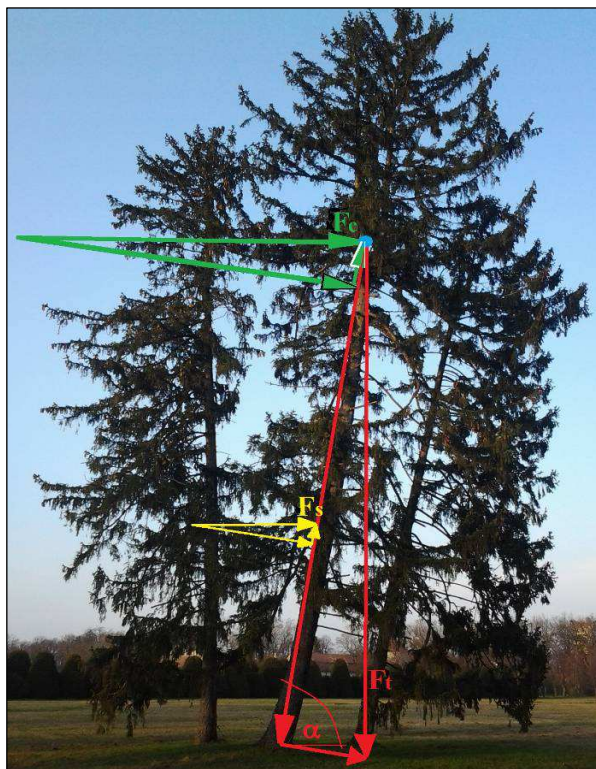
A szél erőhatásának számításához szükséges a levegő sűrűsége (ρ_a), amelynek értékéről tudjuk, hogy hőmérséklet- és légnyomásfüggő (utóbbi a tengerszint feletti magassággal változik). Nagysága Web6 alapján Magyarországon 10 C° hőmérsékleten átlagosan 1,2471 kg/m³. Konkrét időpontra számított stabilitásnál figyelembe veendő az akkori levegőhőmérsékletéhez tartozó adat. A szél torlónyomásának kiszámítását az EN 1991-1-4 (2005) alapján a 8. táblázat vezeti le.

8. táblázat Példa a szél torlónyomásának kiszámítására az EN 1991-1-4 (2005) számú Európai Norma (EUROCODE) útmutatása alapján, a szerző összeállításában

jele	megnevezése (dimenzióval)	képlete (vagy magyarázat)	értelmezési tartomány	eredmény
z_0	érdességi hossz (m)			1
$z_{0,II}$	érdességi hossz a II. helyszínekategóriában (m)			0,05
z	famagasság (m)			20
k_r	beépítettségi tényező	$k_r = 0,19 \times (z_0/z_{0,II})^{0,07}$		0,23
k_l	turbulencia tényező			1,00
C_{dir}	iránytól függő tényező	(szélirány szórása)		0,85
C_{season}	évszak tényező			1,00
C_0	domborzati tényező	sík vidék, lejtés kisebb, mint 3 fok		1,00
C_r	felszíni tényező	$C_r = k_r \times \ln(z/z_0)$	ha $z_{min} \leq z \leq z_{max}$	0,70
$v_{b,0}$	szélesség / szellőkés (m/s) kiindulási értéke	(meteorológia mérése)		25
v_b	szélesség / szellőkés (m/s) módosított értéke	$v_b = C_{dir} \times C_{season} \times v_{b,0}$		21,25
v_m	szélesség / szellőkés (m/s), helyszínre átszámított	$v_b = C_r \times C_0 \times v_b$		14,90
ρ	levegő sűrűsége (kg/m ³)			1,2471
$I_v(z)$	örvénylési intenzitás magasság szerinti változása	$I_v(z) = k_l / (C_0 \times \ln(z/z_0))$, ha	ha $z_{min} \leq z \leq z_{max}$	0,33
$q_m(z)$	torlónyomás a helyszínen (1 m ³ térfogatú levegő mozgási energiája, (N/m ²))			
		$q_m = 1/2 \times \rho \times v_m^2$		139,08
$q_p(z)$	torlónyomás csúcserő (N/m ²), amelyet az átlagos szélesség és a rövid idejű szellőkés (turbulencia) okoznak			
		$q_p = (1+7I_v) \times q_m$		464,05

A fára ható szél erőhatásának meghatározása során nem mellőzhető a fa egészségi állapotára nézve hátrányos, nem függőleges helyzet, különösen, ha a dőlés irányával megegyező irányú szél támadja. Habár a fák alapvetően függőlegesen nőnek, számtalan külső ok megváltoztathatja a dőlés 90° -os szögét, ami eleve bizonytalanságot okoz a fa helyzetére nézve. Ezért a fa állékonyságát mindig erre a legkedvezőtlenebb helyzetre kell kiszámítani. Ilyenkor a megdőlés szöge (α) és a megfelelő szögfüggvények segítségével fel kell bontani a szélerőt és a fa súlyából származó erőt törzsirányú, illetve erre függőleges síkban merőleges irányú komponensre. A felbontást követően megállapítható, hogy a fa tengelyére merőleges komponens hajlítja a fát (forgat), míg az erre merőleges tengelyirányú erőkomponens „emeli” a fát, azaz csökkenti a fa súlyából származó, lefelé ható súlyerőt. Külön számítandó a szél koronára ható ereje (F_c), illetve a törzsre ható ereje (F_s , 6. táblázat), természetesen az előbbieken vázolt erőkomponensek, illetve a megfelelő vitorlafelület, és C_w tényezők figyelembe vételével (6. táblázat).

Előfordulhat olyan eset is, amikor a szél csavaró igénybevételt is kelt, azaz a dőlt helyzetű fát nem a dőlésiránynak megfelelő irányból támadja. Azonban így kisebb, kifordítást vagy törést indukáló erőhatás keletkezik a fára nézve. Ennek szélsőséges esete, amikor a szélirány ellentétes a fa dőlési irányával. Ilyenkor a dőlt helyzetből eredő erőhatás a szélérő ellenében dolgozik, így a stabilitás javul. A támadáspont értelemszerűen a korona súlypontja, illetve a törzs súlypontja lesz. Amennyiben a súlypont nem a törzsre esik, akkor is ezt kell figyelembe venni. A súlypont helyének megállapítása szoftveresen is lehetséges, az esetek többségében azonban „szemre” kell megállapítani, mivel az ágak tömegének becslésére egyelőre nincs pontos eljárás (39. ábra).



39. ábra Megdőlt helyzetű fa statikai modellje, Fertődi Kastélypark, lucfenyő, 2013.

5.3.3. A fa súlyából eredő erők

A szél hatásainak megismerését követően a fa saját maga generálta erőhatások számítandók. A szél (és esetleges más többlet terhek) által keltett kifordító erőhatásnak a fa a saját súlyával, de még inkább a gyökérzetén keresztül tud ellenérőt kifejteni.

A dőlt helyzetű fánál a vizsgált fák esetében a szerző számolta a fa súlyából eredő erőt (Ft), a fa dőlésszögének megfelelően módosítva. Itt a támadáspont a gyökértányér mint henger, széllel ellentétes oldali alsó éle, és értelemszerűen az erőkar a henger súlypontja (39. ábra és 10. ábra).

A fa súlya az előbbiek szerint az élőnedves tömeg és a térfogat ismeretében adódik. Hozzáadandó a lombtömeg súlyából származó, a faanyag súlyához képest csekély lombtömeg is. Az ebből származó lombozati nehézségi erő megállapítása a szerző tapasztalati eredményein nyugszik, mivel erre vonatkozóan kevés szakirodalmi forrás, kutatási adat áll rendelkezésre. A koronaméret egyértelműen befolyásolja az eredményt.

5.3.4. A gyökérzet súlyából eredő erők

A fa másik, egyértelműen legjelentősebb „ellensúlya” a széllel szemben a gyökérzete, illetve annak tömege és kiterjedése.

Előbb azonban ki kell még térni a talajok térfogatsúlyára. Tudjuk, hogy a talajban az agyagfrakciótól a durva homokig, kavicsig emelkedik az egyes frakciók egységnyi térfogatának tömege, amely természetes levegő és víztartalommal, az előbbi sorrendnek megfelelően 1500-2000 kg/m³ térfogatsúlyt ér el. A gyökerekkel átszőtt talaj a gyökerek térfogatsúlya miatt ennél könnyebb. A pontos érték megismerésére megfelelő mérőeszköz használatával van mód (pl. Veér-henger).

Gyakran felmerül a kérdés, hogy mi a helyzet a fa gyökérszónájában a talajrészecske és a gyökérzet, valamint a talajrészecskék egymás közötti kohéziójával, a talaj nyírószilárdságával, továbbá ennek változásával a nedvességtartalom függvényében.

Mértékadó, üzemszerűen alkalmazható tanulmány még nem készült. Az ezzel foglalkozó szakmunkák (Balder, 1998) elméleti megközelítésben tárgyalják és vezetik le a keresett ismerveket, azonban a gyökérfelület nagysága, továbbá a talaj és a gyökérfelület közötti kohézió mérése egyelőre nem sikerült senkinek. Ennos (1993) logikusan levezeti a gyökerek által kifejtett erő (ellenérő) nagyságát a gyökerek húzószilárdsága, száma és a gyökérlabda felületén a gyökerek keresztmetszetének felülete szorzataként, továbbá megállapítja a gyökerek kihúzással szembeni ellenállásának mértékét a gyökérfelület és a talaj nyírószilárdságának szorzataként. Azonban azt is leírja, hogy mindez csupán elméleti megközelítés, az alapadatok ismeretének hiányában egyelőre nem használható az okfejtés.

Fourcaud és mtsai (2007) hatalmas változatosságról ír a talajkohézió és a talajgyökérzet kohéziója terén. Megállapítja, hogy laza, alacsony kohéziójú talajban a gyökerek kiterjedtebben tudnak fejlődni, ezáltal a stabilitásuk nem csökken jelentős mértékben. Emiatt

vagy egyszerűsítve feltételezzük (Sinn, 2003), hogy a hatékony gyökérszóna egy több-kevésbé meghatározható térfogatú test, vagy húzási vizsgálattal ennek megállapítását kikerüljük.

A hatékony gyökérszóna kiterjedése kidőléskor megmutatkozik, azonban szerző megfigyelései szerint a fa „ki nem dőlésekor” több apróbb jel (pl. 39. ábra) alapján kell meghatározni. Az eredmény bizonytalansággal terhelt.

A húzási vizsgálat ezzel szemben biztos, de hátránya az idő-, költség- és eszközigenyessége. A vizsgálat elvégzésének idején nem lehet tudni a talaj nedvességtartalmát, illetve változásának mértékét többlet víz megjelenésekor (ezalatt a talajt átáztató mennyiségű csapadék, illetve az erdészeti értelemben vett többlet vízhatás egyaránt értendő). Egy még nem publikált kísérlet során jelentős mennyiségű, mintegy 300 mm esőnek megfelelő vizet öntöztek a vizsgált fa gyökérszónájára. A húzási vizsgálat emiatt azonban csupán 1/4 –nyi húzási erőigény-csökkenést mért ki (Divós és Kovács, 2014).

Végső esetben a szerző tapasztalatai alapján a sejtett gyökérszóna szélessége táján kis mélységű termőhely- (illetve gyökérszóna-) feltárás is szükséges lehet (pl. a 40. ábrán mutatkozik ennek helye). Segít ebben az úgynevezett Coder-féle gyökértányér modell³⁸ (Coder, 2010) is, ahol a mellmagassági átmérő 3,6-szeres távolsága adja a hatékony gyökértányér szélességet (egyéb korlátokat nem számítva).



40. ábra Jegenyenyár hatékony gyökérszónája, Gencsapáti

³⁸ Coder Root Plate Model, i.m.

Magányos fáknál gyakori a szél „rángató” hatására bekövetkező gyökérszet mozgás, amelynek a talajfelszínen látható nyomai vannak. Szélsőséges esetben megemelkedett gyökértányérral is találkozhatunk, ahol a gyökérszóna kiterjedésének megmérése is egyszerű (41. ábra).



41. ábra Megdőlt lucfenyő, megemelkedett gyökértányérral, Fertőd (v.ö.: 7. és 10. ábrával)

A 41. ábrán bemutatott fa stabilitása veszélyes, mivel lecsökkent 110%-ra. A nagy koronafelület és a sekélygyökérszet, továbbá a sekély-középmély termőrétteg vastagság, illetve a már megdőlt helyzet nem megbízhatóvá teszi a fa helyzetét.

Hasonló mozgásokat figyelhetők meg a 43. ábrán. Azonban nem elsősorban a szél hatásának tudhatók be a felszín kitüremkedései és süllyedései, hanem a szerző megfigyelése szerint a gyökérszet számára beszűkült tér miatt a gyökerek kiemelkednek, másutt viszont visszahúzódnak. A gyökérszet kiterjedését a helyszínen futó közművek korlátozzák.

Megfigyelhető továbbá a gyökérszet és a fa kiemelkedése a térszintből (v.ö.: 35. ábrával), továbbá a markáns terpeszképződés is, ami idősebb korban ugyan jellemző a fákra, de az itteni mértéke is említésre méltó.

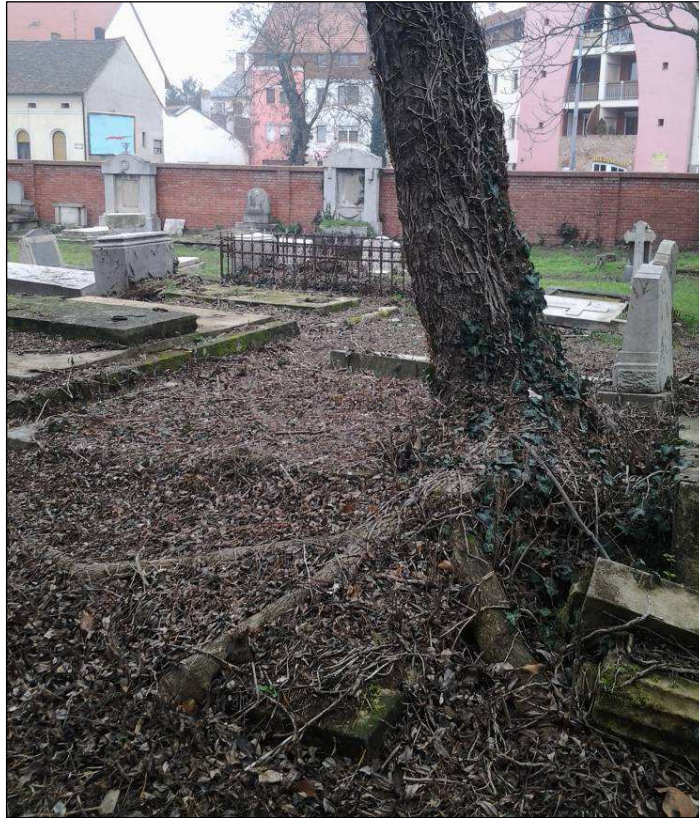


42. ábra Szombathely, Hivatal (2013) udvarán japán akác felülnézet, jelölve a hatékony gyökérszóna kiterjedése.



43. ábra Szombathely, Hivatal udvarán japán akác oldalnézet. Látható a gyökérmozgások eredménye.

A horizontális irányú kiterjedés mellett a gyökérlabda mélységének adatára is szükség van. Ennek meghatározása a legnehezebb az élő, álló fa esetében. Itt kell segítségül hívni az egyes talajtípusokról szóló ismereteket, azon belül a termőréteg mélységének és az alapkőzet mélységének adatait, továbbá az egyes fafajok gyökérképzésének ismereteit. Figyelni kell a környezetre, a gyökérszóna kiterjedését akadályozó tárgyakra, stb. A talajfelszínen futó vastag gyökerek a vizsgált fák esetében gyakran talajhibára (pl. 43. ábra), magas talajvízre utalnak, amelyek a gyökérszóna mélységi kiterjedését korlátozzák (Danjon és mtsai, 2005). Így a Szombathelyi Hivatal udvarában álló fa gyökereinek szabad kiterjedését közművek korlátozták, továbbá az aszfaltozás és a sérült csatornákból kijutó víz levegőtlen talajállapotokat okoztak.



44. ábra Mélységi kiterjedésében gátolt gyökérzet.
Szent Márton temető, Szombathely, magas kőris

A gyökérszóna térfogatának meghatározásánál gyakori eset, hogy a vizsgálatot végző személy elvágott, csonkolt gyökereket talál, vagy a rendelkezésre álló hely szűkösége miatt a gyökérzet eleve nem tudott kifejlődni. Ezek az esetek különös figyelmet érdemelnek, hiszen a sebzési felület keletkezésén túl a stabilitás azonnal romlik.

Ilyen eset történt a Budapest Dorozsmai utcai közműfektetés következtében a mintegy negyednyi kiterjedéssel megcsonkított gyökérzetű korai nyár esetében, amely rövid időn belül kidőlt (45. ábra).

Számtalanszor előfordul, hogy a kórokozók a gyökérzet egyes részeinek elhalását okozzák, emiatt a fák stabilitás romlik. Egyik leggyakoribb kórokozó lakott területen a *Ganoderma adspersum*, a vastagkergű tapló, amely különösen hársféléken és vadgesztenyén fehérkorhasztóként károsít. Ilyen eset történt Szombathelyen, a Gyöngyös parti sétányon is, ahol egy vadgesztenyefa feltűnően kicsi gyökérzettel kidőlt (47. ábra).



45. ábra Kidőlt korai nyár, Budapest XIV. Dorozsmai u. Láthatók az elvágott gyökerek.



46. ábra Kőszeg, Jurisics tér, kidőlt kislevelű hárs. Láthatók az 5 cm átmérőnél elszakadt gyökerek



47. ábra Szombathely, Gyöngyös part, kidőlt vadgesztenye. A gyökerek *Ganoderma adspersum* kártétele miatt elkorhadtak.

Itt kell megemlíteni a kiszáradt, de még álló fák esetét. A kezelő ugyan mindig igyekszik ezeket eltüntetni, de néha lehet velük találkozni. A kiszáradt fák nehezen vizsgálhatók, mert a tomogramjuk is nehezen értelmezhető, gyakorta nem mutatnak odvasodást. Ha mégis van üreg, akkor annak fejlődésére az elhalt fa miatt nincs információnk.

Az elhalt fáknak lombja nincs, emiatt a széllel szembeni támadási felületet csupán az ágak (a vékony gallyak gyors elvesztésével csak a vázágak) adják. A talajban azonban továbbra is érvényesülnek környezeti hatások, ez a fa ellenálló képességének gyors elvesztése miatt végzetes a gyökerekre nézve, ugyanis rendkívül gyorsan elkorhadnak.

5.3.5. A forgatónyomatékok egyensúlya

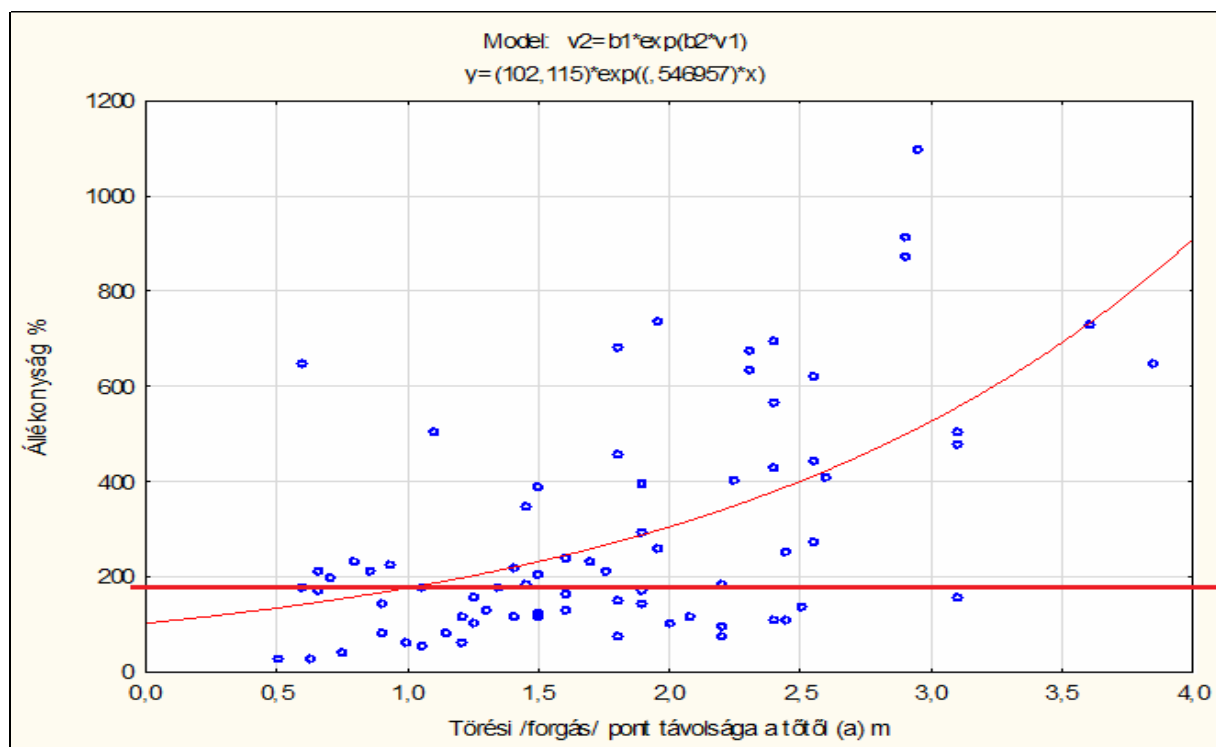
A fával kapcsolatban fellépő erők eredőinek számítása az eltérő támadáspontok miatt a fellépő nyomatékok segítségével lehetséges. Az egyes erők erőkarját az erő támadáspontjának (célszerűen: a fa vagy részeinek súlypontjának) a forgásponttól mért távolsága adja. A forgáspont általában a gyökértányér széllel ellentétes alsó széle, az erőkar így a gyökértányér sugara. Ferde helyzetű fáknál ügyelni kell a fa súlypontjának a fa tengelye irányában mért távolsága és a függőlegesen mérendő erőkar-hossz közötti különbségre.

A fa tömegének forgatónyomatéka, továbbá a gyökérlabdájának forgatónyomatéka együttesen állnak ellen a szél okozta forgatónyomatéknak. A két ellentétes irányultságú forgatónyomaték egymáshoz viszonyított aránya adja a fa állékonyságát, százalékos értékben kifejezve (6. táblázat). Ezt veszi alapul a szerző által kidolgozott számítási eljárás.

Amennyiben a fa és gyökérzetének forgatónyomatéka magasabb, mint a szél keltette forgatónyomaték, azaz az arányuk 100% feletti, akkor a fa állva marad. Azonban az előbbieken láttuk, hogy a számítási módszerek az alapadatok pontatlansága miatt hibával terheltek, ezért a 100 százalékos stabilitással nem lehetünk elégedettek. A gyakorlati alkalmazók a 150%-os értéket már elfogadhatónak tartják, de egyes szerzők a szükséges biztonságot 200%-ban határozzák meg. Ez már a mérnöki megfontolások terepe (Sinn, 2003).

5.3.6. A dőléshez mért adatokból számítható mutatók értékei

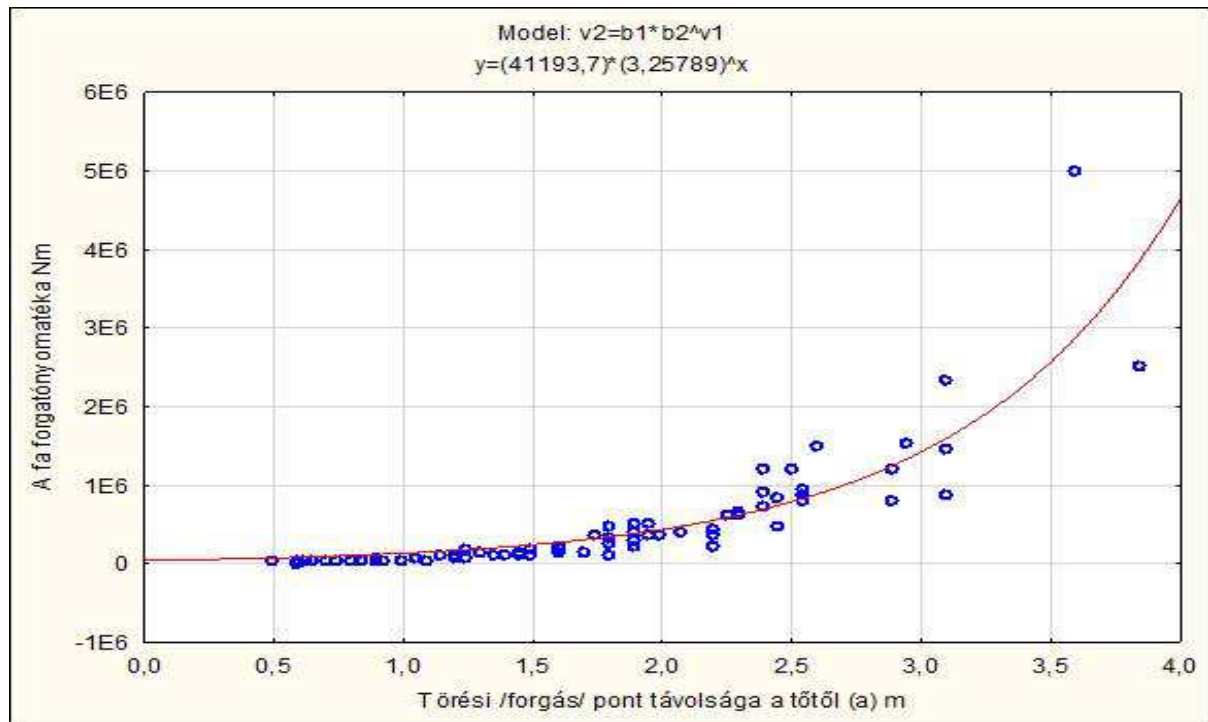
Hasonlóan a törzstörésre vonatkozó mutatókhoz, a gyökérzet által kifejtett hatással kapcsolatos indexeket is segítségül hívhatjuk a fák helyzetének megítéléséhez. Ahogyan a törzssel kapcsolatos mutatókban az átmérő, jelen esetben a gyökértányér sugara az egyik legfontosabb jellemző. A vizsgálatba vont 71 darab fa adataiból készített 48., 50. és 54. ábrák –többek között- ezt igazolják.



48. ábra A gyökértányér sugara és az állékonyság összefüggése

Az állékonyság trendje enyhén emelkedő exponenciális függvényt mutat, ám azt is láthatjuk, hogy az összefüggés nem szoros ($R^2=0,34$). Az ábrázolt adatok azt mutatják, hogy a szükséges 150(200)%-os állékonyságot számos fa nem éri el. A szükséges biztonságot elérők azonban már nem rendeződnek jellemző trendvonalba, és ezeknek nagy a változatossága.

A 48. ábrához hasonló futású az 49. ábra, ahol azonban feltűnik a 2 méteres gyökértányér sugár felett a forgatónyomaték exponenciális megemelkedése. A kapcsolat szorossága jónak mondható, ($R^2=77$), míg a $p < 0,05$.

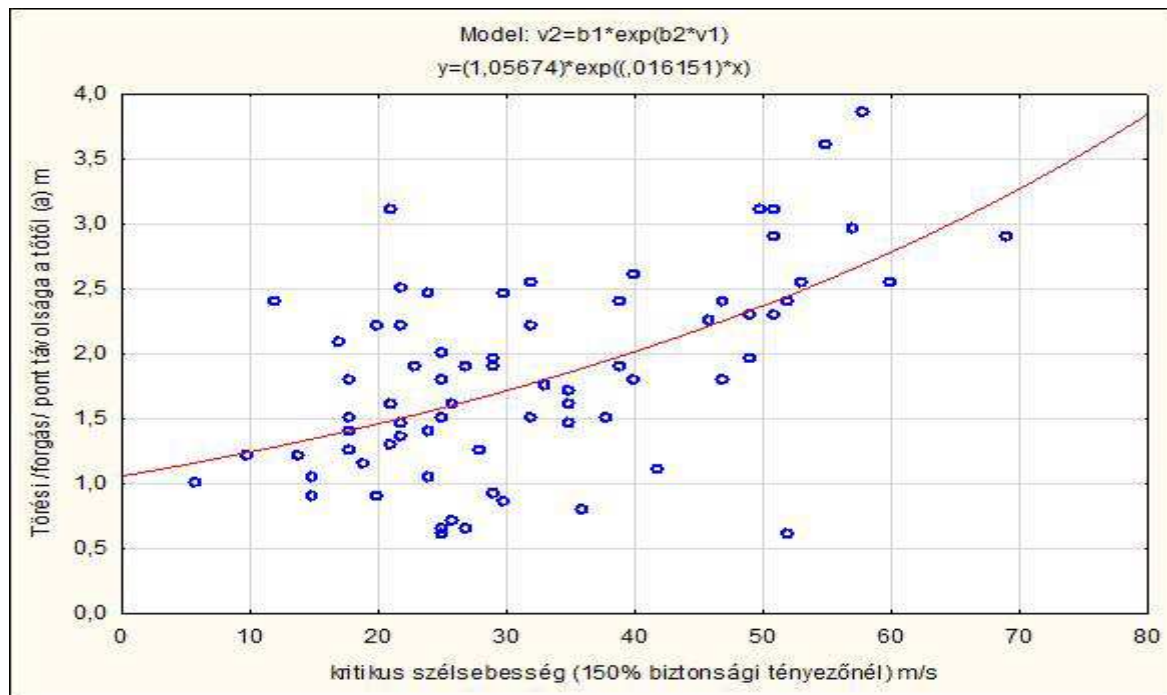


49. ábra A hatékony gyökérszóna kiterjedése és a forgatónyomaték összefüggése

Szintén érdekes összefüggést lehet felfedezni az 50. ábrán láthatóan, a gyökérszóna kiterjedése és a kritikus szélesség³⁹ között. A kapcsolat nem szoros ($R^2=33$), míg a $p<0,05$. A kapcsolat szorossága feltűnik az ábrán is: egységes görbével nem lehet ábrázolni az adathalmazt, azonban az emelkedő trend érzékelhető, továbbá az adatok mezőbe történő sűrűsödése is.

Az előbbieken túl még több páros összehasonlítás végezhető, azonban jelentős új adatot nem hordoznak. Annyit azonban érdemes megjegyezni, hogy legtöbbjük exponenciális függvény képét mutatja.

³⁹ Kritikus szélesség, amely az adott, vizsgált fát kidönti.



50. ábra A gyökérszóna kiterjedése és a kritikus (dőlést okozó) szélesebbesség összefüggése

5.3.7. A kiválasztott fák statikai értékelése

Az Anyag és módszer fejezetben bemutatott nyolc kiválasztott faegyed stabilitásának vagy lehetséges kidőlésének vizsgálati eredményei a következők (részletes adatok a Mellékletben található):

1. Szombathelyen, a Gyöngyös parti sétányon álló vadgesztenye esetén a vizsgálatok és a rendelkezésre álló archív fényképek alapján megállapítható, hogy a gyökerek mennyiségének szemmel látható csökkenése ellenére a fa lombozata még hiánytalan volt (50. ábra). Állékonysága a bemutatott számítási módszer szerint 85%-os.

2. Budapesten a XIV. kerületi Dorozsmai utcai közműfektetés következtében a gyökérzet hatékony térfogata mintegy negyedével csökkent, így a stabilitás is érzékeny veszteséget szenvedett (45. ábra).

A számítások kétféle adatsorral folytak, első esetben a modellezett teljes gyökérzetre, második esetben a törzshöz közeli közműárok kialakítása során csonkított gyökérzetre. Érdekes módon, a meg nem rövidített gyökérzettel is csupán 97% volt a stabilitási arány. A közműárokkal megbolygatott gyökérrendszer a számítások szerint csak 78% állékonysággal bírt.

3. Kőszegen a Jurisics téri kislevelű hárs állékonysági számításai a fent bemutatott, a szerző által összeállított számítási eljárással két lépcsőben történtek: először egy modellezett, zavartalan fejlődésű faegyedre, másodsor a tényleges, korlátozott gyökérzetre vonatkozóan. Az első esetben a fa állékonysága 155% volt, a második (valós) esetben 80%-nak adódott (46. ábra).

4. Szombathelyen a belvárosi toronyházak között álló, két bálványfa egyike elszáradt, majd kidőlt (a másikat egyéb okokból később vágták ki). A fát magát nem volt lehetőség megvizsgálni, azonban a gyökértányér szélességi kiterjedése, a tőátmérő, fényképekről a magasság, továbbá a fafaj megismerhető volt. Az így rendelkezésre álló adatokból az előbbiekben bemutatott számításokat el lehetett végezni. A biztonsági kalkuláció 47%-os stabilitást mutatott.

5. A Fertődi Kastélyparkban álló, megdőlt helyzetű lucfenyő esetében a hatékony gyökérszóna méretét egyszerűen fel lehetett felvenni. Mivel egy réten más fáktól távol áll, a többi méretét is egyszerű volt felvenni. A fa (39. ábra) stabilitása veszélyes, mivel lecsökkent 112%-ra, ennek ellenére még ma is áll.

6. A szombathelyi Juhász Gy. utcában egykor állt gömbjuhart építkezés során kidöntötték, így a gyökérszete is jól tanulmányozható volt, méretei könnyen felvehetőek voltak (23. ábra). A koronát többször metszették. A fa állékonysági számítása rendkívüli eredményt hozott, ami csaknem 780 %-ra rúgó értéket jelentett.

7. Szombathely egyik hivatalának belső udvarán egy nagy termetű japán akác állékonyság-számítását megelőzően, a nagy koronaméret miatt az alatta történő közlekedés biztonságára nézve kérdések merültek fel. A vizsgálat során ráadásul fény derült arra is, hogy a gyökérszete kiterjedésében korlátozott volt. A gyökérszete jóval a talajszint fölé emelkedett, helyenként viszont már lesüllyedt, ami a környező aszfaltréteget egyenetlenné tette, akadályozva a közlekedést. A fenti eljárással kalkulált 166%-os biztonság stabilnak minősíthető.



51. ábra Siskin: Fenyves a Káma folyónál, 1877⁴⁰

⁴⁰ Siskin: Fenyves a Káma folyónál (Богатый лог (Пихтовый лес на реке Каме), 1877). Иван Иванович Шишкин. Издательство Академии Художеств СССР. 1964 Москва kiadásából.

8. Az 51. ábrán művészi eszközökkel, de élethűen bemutatva szokatlan alakú, rövid koronájú, karcsú erdefenyőt láthatunk, szabad állásban. A precíz ábrázolás lehetőséget nyújt a favizsgálati számítások elvégzésére, bár a szakirodalom eddig nem szólt festmények, vagy akár fényképek alapján történt favizsgálatról. A festményről így a szükséges méreteket, továbbá a hatékony gyökérszélvonal kiterjedését is meg lehet állapítani, mivel a művész a talajsuvadás ábrázolásával a gyökérszélvonalat is feltárta a szemlélő számára.

A famagasság és a mellmagassági átmérő, továbbá a korona adatai fotogrammetriai arányosítással kerültek megállapításra.

Több, bár óvatos feltételezéssel élve, a fára vonatkozó, a szerző által kidolgozott állékonysági számítás 242%-ot eredményezett.

A fenti esettanulmányok rávilágítanak arra, hogy mely adottságok gyakorolnak legnagyobb hatást a fák statikai-egészségi állapotára, melyek pontos meghatározásával jutunk a legközelebb az állékonyság megismeréséhez.

A szerző által kidolgozott számítások formuláiból következik, hogy ez a tényező elsősorban a hatékony gyökértányér vízszintes irányú kiterjedése, azaz a gyökértányér sugara, amelynek 10%-nyi változása 22-25% állékonyság változást okoz.

A második, a fák állékonyságát meghatározó paraméter a szélesség, amelynek 10%-os eltérése 15-18%-os eltérést okoz, de ellenkező irányban. Kicsi gyökérszélvonal-átmérőnél ez az érték lemegy 1:1-re.

További érdemben befolyásoló adat a fa koronafelületének mérete, amelynek egységnyi változása a stabilitás tekintetében szintén egységnyi (ellenkező irányú) változást okoz.

Az egyes fák felvett ismérvei közötti páronkénti kapcsolat (nemlineáris regresszió) összefüggésének szorosságát a Spearman-féle rangkorrelációs együtthatóval (9. táblázat) vizsgálta, a következők eredményekkel:

9. táblázat A fa stabilitására ható fontosabb tényezők Spearman-féle rangkorrelációs együtthatói

	Magasság	Átmérő $d_{1,3}$	Fa térfogata	Szellőkések sebessége	Törési /forgás/ pont távolsága a tőtől	Korona vitorlafelület	Gyökértányér térfogata	Állékonyság %
Magasság	1,00							
Átmérő $d_{1,3}$	0,60	1,00						
Fa térfogata	0,65	0,96	1,00					
Szellőkések sebessége	0,17	0,14	0,10	1,00				
Törési /forgás/ pont távolsága a tőtől	0,69	0,72	0,74	0,32	1,00			
Korona vitorlafelület	0,70	0,70	0,71	0,11	0,68	1,00		
Gyökértányér térfogata	0,69	0,75	0,77	0,26	0,97	0,69	1,00	
Állékonyság %	-0,02	0,24	0,23	0,16	0,49	-0,07	0,51	1,00

Látható, hogy az állékonyságot, mint végeredményt tekintve, a leginkább befolyásoló tényező a hatékony gyökérszóna vízszintes irányú kiterjedése, amelyet dőléskor forgáspontként értelmezhető szakasz végpontja, azaz az erőkar befolyásolja. (A gyökértányér térfogata kissé magasabb értéket jelent, azonban tudjuk, hogy azt nagyon szoros mértékben szintén a gyökérszóna peremének tőtől való távolsága befolyásolja.) A fenti gondolatmenetből adódik, hogy az egyetlen, a fától teljesen független tényező a szélerősség, emiatt a vizsgált paraméterekkel nem találjuk értelmezhető kapcsolatát.

5.3.8. A gyökérszóra vonatkozó további tapasztalatok

A fenti esettanulmányok arra is példával szolgálnak, hogy a gyökérszóna horizontális irányú terjedése mennyire fontos a fák számára.

Ezzel kapcsolatos Mattheck és Breloer (1993) bővebb magyarázat nélküli megjegyzése is, miszerint idős korban szinte minden fafajnak tányérgyökérszóra hasonló alakúra módosul a gyökérszóra. Pagony (1996) is beszámol hasonló jelenségről erdei és fekete fenyő esetében, gyenge termőhelyeken. Az okokra a fenti statikai adatok (is) irányt mutatnak, továbbá a szerző tapasztalatai alapján a következőket lehet megállapítani:

A szerző megfigyelései szerint a korosodó fák számára az egyre növekvő kiterjedésű koronájuk miatt szükségük van egyre nagyobb gyökérszóra. A gyökereknek a mélyebb talajrétegek felé lehatolása azonban akadályokba ütközik, mivel a termőréteg mélysége véges, a talajvíz, az alapkőzet, a mérgező anyagok stb. erősen gátolják a gyökerek vertikális terjeszkedését. Bár a horizontális terjeszkedés is gyakran akadályokba ütközik, azonban mégis nagyobb az esély a vízszintes bővülésre⁴¹. Erre szép példa a Kőszegen a Jurisics téri kislevelű hárs, amelynek gyökérszóra lefelé nem, oldalirányban annál inkább terjedt, a fafajtól elvárt szívgyökérszóra helyett jól fejlett tányérgyökérszóra (11. ábra, 46. ábra).

Az erdészeti kánonban kifejezetten karógyökérszóra leírt kocsányos tölgy idős korára a szerző megfigyelései szerint szintén gyakran elveszíti karógyökérszóra, s addigra már tekintélyes méretű tányérgyökérszóra rendelkezik. Kiterjedt (tányér)gyökérszóra és hatalmas tömegüknek köszönhetően a kocsányos tölgy matuzsálemek legendás stabilitásra tesznek szert.

Az 52. ábra egy ilyen kocsányos tölgy tuskót mutat, amelynek terpeszei között látható lyukak a szerző mérései szerint egy kb. 1 méter szélességű és fél méter mélységű üregbe nyílnak, amely a karógyökérszóra helyén foglal helyet. Az 53. ábrán a kidőlt kocsányos tölgy is tányérgyökérszóra tesz tanúbizonyságot.

Az „átalakult” gyökérszóra más példákat is láthatunk a lakott területek fájánál, különösen a természetes körülmények között szívgyökérszóra nevelő (nemes) nyáráknál. Csúcsrügyes, hosszú dugvány és a gödörfúrós ültetési mód hatására karószerű gyökere (valójában a szár megvastagodott folytatása a földben) képződik az ilyen fának. Az ilyen esetekben a dugvány talpi részén, illetve a föld alatt lévő legfelső nódusból tör elő a

⁴¹ Közkeletű népi tapasztalat, hogy „a gyökerek a korona csurgójáig érnek el”.

gyökerek nagy része. Ez fordult elő a budapesti Dorozsmai úton álló fánál is (45. ábra), ahol a szerző megfigyelése szerint a felső „gyökér-emelet” gyökereinek egy részét elvágva, az előbbieken részletezett karógyökér tört el.



52. ábra Kidőlt magányos kocsányos tölgy, Barcs



53. ábra Kidőlt magányos kocsányos tölgy, Sárvár-Bajti

Coutts (1983) és Mattheck (2007) is említi, hogy a szívgyökérzet a legstabilabb gyökérzet forma, ilyen gyökérzettel rendelkező fa kidőlésére nagyon ritkán kerül sor. A kidőlés elméleti megközelítés szerint a gyökérlabda ívelt felületen -mint egy gömbcsukló forgása- következik be. Hozzá kell tenni, hogy amennyiben mégis előfordul a szívgyökérzetű fa kidőlése, akkor ott a gyökérzet károsodását, azaz a hatékony gyökérzóna nagymérvű csökkenését kell feltételezni. Ilyen esetre a vizsgált fák között is akad példa (47. ábra)

A fentiek szerint, a szerző elméleti megfontolásai alapján és a vizsgált egyedek kidőlésének tapasztalataiból megállapítható, hogy idős korban a hatékony gyökérszóna *tányérgyökérszóna formához közelít*. A gyökerével kiforduló fák többnyire tányérgyökérszónával fordulnak ki.

A szívgyökérszónával történő kidőlés a vizsgálatok szerint jóformán csak valamely károsodás miatt erősen redukálódott, elkorhadt gyökérszóna esetén fordul elő. Ép szívgyökérszóna esetén nem csupán a kiterjedt gyökérszóna gátolja a kidőlést, hanem többletként, a gyökérszóna szélel ellentétes részén a talaj magas nyomószilárdsága is kevesebb elmozdulást tesz lehetővé, így szívgyökérszóna forgására vonatkozó megközelítés bizonytalan.

A tányérgyökérszónával kiforduló fa gyökérszónája a szerző tapasztalatai szerint egy viszonylag vékony, merev koronggal emelkedik ki az eredeti szintjéből, a korong szélel ellentétes oldalán a forgáspontként helyben maradó rész körül fordulva. A gyökérszóna peremén túlnyúló gyökerek inkább elszakadnak, mivel az elágazások miatt a gyökérszónáról fák esetében nem beszélhetünk (Mattheck 2007). A megemelkedő gyökérszóna peremén tehát a gyökerek elnyíródnak. A talaj könnyen elszakad, hiszen a talaj húzószilárdsága nagyon alacsony, szemben a nyomószilárdságával.

5.3.9. A terpesz és a kiemelkedő gyökérszóna, illetve a törzs különleges vastagodásainak szerepe a fák stabilitásában

Közismert, hogy korosodó fáknál egyre nagyobbak a terpeszek. Valószínűsíthető, hogy mechanikai okok miatt alakul így a fa tövének keresztmetszete.

Az is ismert, hogy az ilyen szélesedő terpeszekben az évgyűrűk meglehetősen szélesek, még a törzsrészen amúgy nagyon keskeny évgyűrűket fejlesztő idős korban is.

Kisebb-nagyobb terpesz a korrallal a legtöbb fafajunknál kifejlődik, de erdőben sűrű, zárt állásban nevelve a terpeszség mértéke csökkenthető (Molnár, 2006.). A zárt állásban tartott erdők esetében jóval kisebb hajlító erőhatások lépnek fel, mint a magányosan álló fáknál.

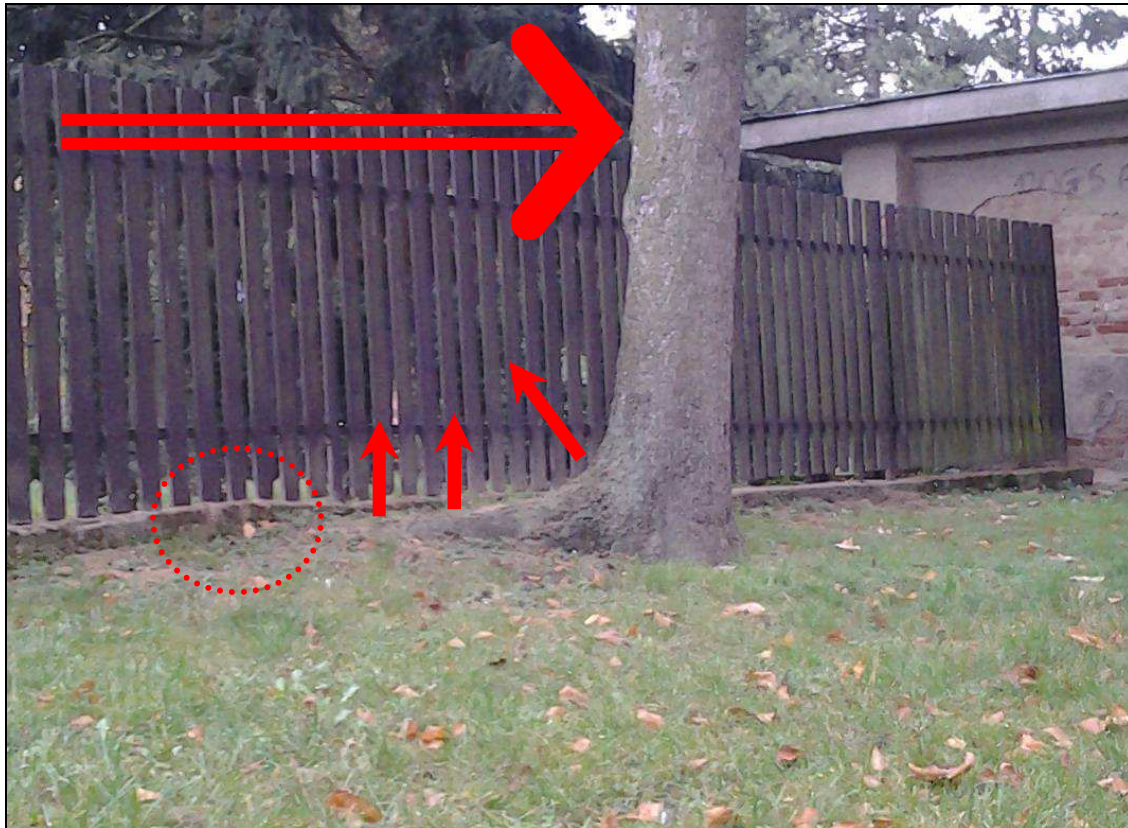
Az 54. ábrán a szerző által szerkesztett erőhatás-vektorok mutatják, milyen húzófeszültségek lépnek fel a fa tövi részén. Az eredő erőhatás láthatóan a terpeszek vastagodását vonja maga után. Az is egyértelmű, hogy az idős, nagy koronájú, nagy súlyú fákra ható forgatónyomaték exponenciálisan növekszik, emiatt hirtelen nagyobb terpeszekre lesz a fának szüksége.

Másként közelítve, tudjuk, hogy az éles szögeket, így a függőlegesen álló fa tövében a derékszöget a keresztmetszetben mutatkozó feszültségek hirtelen megnövekedése miatt a fa igyekszik elkerülni, ezért annak csökkentésére törekszik.

A terpeszek nagyobb része a fák tövében egyenletesen, közel egyforma méretűre fejlődik. Alakjuk klotoidra emlékeztet (54-56. ábra), azaz a függőleges irányban hosszabban nyúlik el, mint a talajszintnél, vízszintes irányban.

Ugyanez a jelenség figyelhető meg az ágak hajlatában is, „ághajlatként”, mint a tőterpesz egyfajta pandantja.

Azonban nem ritkán folyamatosan az egyik irányból éri nagyobb igénybevétel a fát (vagy az uralkodó szélirány, vagy a szélcsatornaszerű beépítettség miatt), ezért ott a terpesz vízszintes irányú kiterjedése a nagyobb (54. ábra).



54. ábra A gyakori szélterhelés hatására kialakult gyökér-módosulás, húzó igénybevételre. Lucfenyő a szombathelyi Puskin parkban, 2013. október.

Hasonló a helyzet a gyökerekkel is: a fa életkorával azok is vastagodnak és hosszabbodnak. A vizsgált fákon szemrevételezéssel végzett megfigyelések szerint a felszín közeli részek vastagodása nagyon gyakran felfelé, a talajfelszín irányába történik, sőt, sokszor azon felül is, kiemelkedő gyökerek formájában.

Erre a szerző tapasztalatai alapján a következő elméleti magyarázat adható:

1. A gyökerek –mint láttuk- a fa súlyával, továbbá a külső terhelésekből származó erővel tartanak egyensúlyt. A növekvő súlyból és a növekvő vitorlafelületből fakadó nagyobb terhelés a gyökerekben nagyobb húzó- és hajlítófeszültség formájában jelentkezik. Ehhez keresztmetszeti gyarapodás szükséges, amely a talajban valamilyen irányban növekvő kiterjedést jelent. Mattheck (2006) szerint ez általában függőleges irányba következik be, "I"-tartó vagy "T"-tartóhoz hasonló keresztmetszeti megjelenéssel, azok mechanikailag előnyös tulajdonságaival egyetemben.
2. A fentiek mellett az idős korú fák gyökérzete egyre inkább a tányérgyökérzet formájára kezd alakulni, azaz horizontális irányba fejlődik.

Ennek egyik következménye a felszínhez közel, vagy a felszíni erős vázgyökerek megjelenése (az eróziótól tekintünk el). (Gyökérfeltárássra a rendkívüli költségek, az idő- és eszközigény, az engedélyek beszerzésének körülményessége miatt nem nyílt lehetőség.)

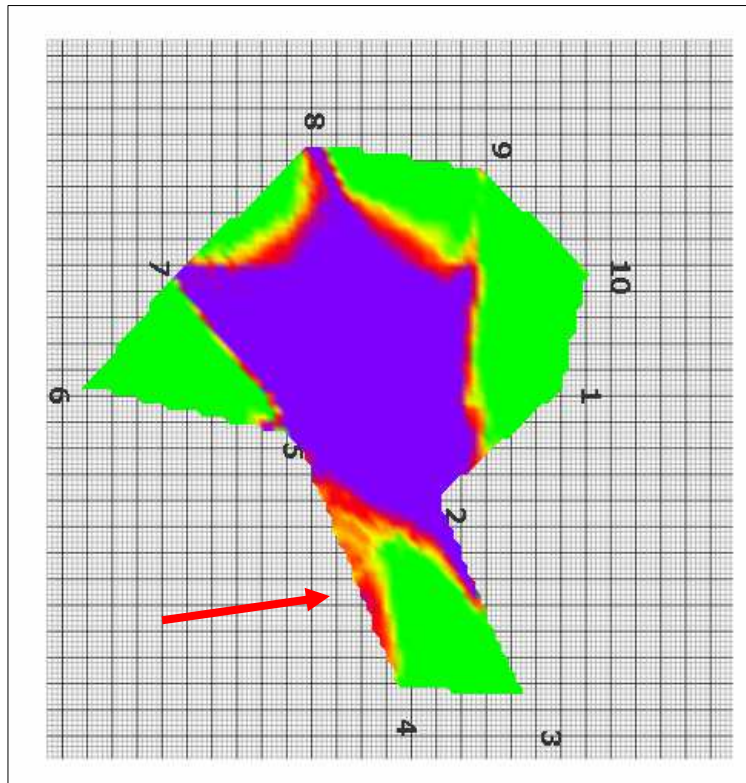


55. ábra Már szinte palánkgyökérzetet idéző gyökérterpeszek. Juharlevelű platán, Szombathely Puskin-park, 2013 október.



56. ábra Palánkgyökérzet jegenye nyáron, Gencsapáti.

A vastagodó gyökerek, és főleg a terpeszek a szerző tapasztalatai szerint a fa mechanikai reakciói a külső erőhatásokra. Akkor keletkeznek, amikor a fának többlet-erősítésre van szüksége. Hasonló a szerepe a törzsön keletkező feltűnő bordáknak, amelyek gyakran valamilyen törzsön belüli korhadás miatt keletkeznek. Ilyenre látunk példát a Gencsapátiban álló, vizsgálatba vont jegenye nyáron (56. és 57. ábrák ugyanazon fáról készültek). A tomográf szenzorai -a 3-4. sorszámútól eltekintve- a terpeszek által közrezárt, terpeszek nélküli fapalástba lettek beütve.



57. ábra Az 56. ábrán látható jegenye nyár tomogramja.

A lefelé induló kiszögellés az 56. ábrán látható erőteljes palánkgyökér.

A 57. ábra egyértelműen mutatja, hogy a tekintélyes korhadt rész található a fatestben, egyúttal látjuk a fa többletnövekedésének hatását is a terpesz képében.

6. Következtetések

6.1. A vizuális favizsgálatok valamint a hangtomográf vizsgálatok tapasztalatai

6.1.1. Módszertani észrevételek a tomográfos munkavégzés kapcsán

A szemrevételezések, különböző eszközökkel történő mérések, továbbá a hangtomográf alkalmazása során sajnos még számos hibalehetőség adódhat. Ezek jó részét nem lehet kikerülni, csupán az eredmények értelmezésénél van mód figyelembe venni. Ez azért is fontos, mert hazánkban örvendetes módon rohamosan gyarapodik a favizsgálattal foglalkozó vállalkozások, szakemberek köre, illetve a tomográfok használata. Különösen a hangtomográfos technika adhat egyazon fára eltérő eredményeket, az alkalmazó szakember döntéseinek függvényében. A mérés nem az ugyanott megítélt kritikus keresztmetszetben történő elvégzése, a kinövések eltérő módon való figyelembe vétele, a szabálytalan keresztmetszetben máshová beültetett érzékelők, a referenciasebesség helytelen megválasztása mind számottevő eltérések forrása lehet.

A fák üregében fejlődő járulékos gyökerek, továbbá a zárványként betüremkedett, közbezárt kéregrészek, bekorhadt, ám már nem terjedő ággöcsök, más üregek jelentősen eltérítik az eredményt, és helytelen döntést vonnak maguk után.

A fa növekedéséből adódó, illetve statikai okokból létrejött repedések, továbbá rovarjáratok is megzavarják a mérés eredményeket.

Ezeket a hibaforrásokat az eredmények értelmezése során, alapos szemrevételezés mellett csökkenteni lehet.

Ugyanúgy pontatlan kiértékelésre vezetnek a fa törzsén található kinövések, dudorok, de félrevezethetnek a fagylécek, ormok, terpeszek is. Az előbbieket olyan egészséges részt mutatnak a tomogramon, amely a fa stabilitásában az elhelyezkedésük miatt nem játszanak szerepet, míg az utóbbiak általában nem vagy nem megfelelően mutatkoznak a keresztmetszet képén, holott jelentős részt vállalnak a törzs szilárdításában.

Az ormos, illetve a terpeszes fa tomográffal történő vizsgálata nehézkes, mivel a konkáv keresztmetszet a hanghullámok terjedésében akadályokat képez. Emiatt a terpeszek és az ormok szögletében kell elvégezni a tomografálást, de külön kell vizsgálni a keresztmetszetből kiemelkedő részek állapotát és hatását.

6.1.2. A több síkban, több időszakban végzett tomográf vizsgálatok tapasztalatai

A tomográf egy időpontban és egyetlen keresztmetszetben történő alkalmazásán túl lehetőség van ugyanazon faegyeden a több szintben elvégzett vizsgálatokra is. Ebben az esetben térbeli kép az eredmény a fa belsejében található üreg vagy korhadt rész elhelyezkedéséről, alakjáról. Esetenként arról is képet kapunk, hogy a korhadás honnan indul, vagy éppen merrefelé tart. Az ilyenre különösen valamilyen külső törzssérülés, vagy éppen ághely megléte esetén van mód.

Törzssérülésből kiindulva a többszintes tomográf-mérés eredményeként a korhadás képe hordó alakú, azaz közepén szélesebb, mint az alsó és felső végén. Az alak nem mindig szimmetrikus.

Az ágcsonkából kiinduló betegség a tomogramon másként fog jelentkezni, mint a törzssérülésnél kapott ábra. Mivel az ághelyek jobbra magasabban helyezkednek el, és a korhadás mérésére lehetőség a törzs tőhöz közeli részein adódó, az ágcsonkából induló korhadás a tomogramon fordított kúphoz hasonló képet rajzol ki. Felvetődik a kérdés, hogy az ágcsonkából felfelé is indul-e korhadás. A válaszhoz a Szakirodalmi összefoglalás fejezetben bemutatott, CODIT rövidítéssel illetett jelenséget kell segítségül hívni (Shigo, 1979, Dujesiefken és Liese, 2012). Azt tudjuk, hogy a farontó gombák stratégiája a fa belső részébe történő gyors bejutás, mert számukra ott nyílik több lehetőség tevékenységük legsikeresebb kifejtésére. A fa ezzel szemben hatékonyan tud védekezni, különösen a szíjácsi illetve a háncsi részekben. (a CODIT a parakérget nem is említi a fa védekezési rendszerében.)

Mivel az ághelyek többnyire a fa tengelyéhez illetve a bélhez képest lefelé mutató csúcsú szögben helyezkednek el, a környező (ághoz tartozó) szövetek irányultsága is ezzel egyező. Azt is a CODIT-ból tudjuk, hogy a leghatékonyabb védekezést a 2. és 3. védőzóna végzi. Így a korhadás az ág rostjainak irányát követve a fa legbelső részeit az ághely alatt éri el, így a fordított kúp alak kiindulása biztosított. A korhadás haladásának irányát a térbeli tomogramon a csúcs(ok) mutatják.

Egyes farontó gombák évente több métert is képesek terjedni, megfelelő körülmények között. Azt nem szokták hangsúlyozni, hogy ez a fatestben a belső részeken, a rostok irányában (lásd CODIT-elt) történhet így, nem pedig sugár- vagy húrirányban, és bizonyos, nem a termőhelyüknek megfelelő helyen élő fák esetében.

Az is ismert (többek között Mattheck és Breloer, 1993, Schwarze és Baum, 2000, Szaller, 2013), hogy a farontó gombák teret nyerve módszeresen haladnak előre.

A Sajtuskáli cserként bemutatott fán a fenti, logikus és konszenzusos ismeretekre ellenpélda bukkant fel: a több szintes, 4 évet felölelő vizsgálat-sorozat nem mutatott ebben az időszakban előrehaladást a korhadás síkbeli, vagy függőleges növekedése terén. Az időjárási adatok tekintetében ez alatt az időszak alatt volt kimagaslóan csapadékos-párás időszak (2010. év), illetve ennek ellentéte is (2012. év), amely befolyásolhatta volna a fa védekezőképességét, illetve a kórokozó kondícióját is. Egyrészt a már említett CODIT-elt adhat magyarázatot a bizonytalan részeredményekre. A fa védekező rendszere hatékonyan megállította a betegség terjedését. De valószínűleg inkább csak időlegesen, az okokra a jelen vizsgálatok során nem nyílt lehetőség. Arra azonban ráirányítja a figyelmet, hogy egyetlen vizsgálat eredményeként egy még stabilnak ítélt fára vonatkoztatva is óvatosan kell az előrejelzéseket megtenni. A valószínűleg tekintélyes méretű üreg felnyitása bővebb válaszokkal szolgálhatna, azonban ez jelenleg nem járható út.

Ugyanezen a fán elvégzett több mérés-sorozat felhívja a figyelmet a mérési hibákra is, ugyanis az egyazon síkban elvégzett mérések tomogramjai nem teljesen egybevágók.

Itt kell megemlíteni a hangtomográf szenzorának tüskéje által okozott mikroseb kérdését. Legtöbb bemutatón elhangzik a kérdés, hogy nem okoz-e ez olyan sebzést a fán, amely egy egyre jobban terjedő betegség kiindulópontja lehet. Dujesiefken és Liese (2012) szerint a szenzor hegye a faanyagban eleinte barnulást okoz, később gombafertőzésnek kínál fertőzési kaput.

Az előbbieket alapján azonban, illetve szintén a CODIT elv ismeretében rögzíthető, hogy olyan kis kiterjedésű sebről (néhány mm széles és legfeljebb 1 cm mély), van szó, amely a fa legaktívabb védekező képességű részén, a kambiumban és a szíjácsban keletkezik, és amelyet az élő fa könnyen kihever. Az említett Sajtoskáli cseren az első reakciók megfigyelhetők voltak: a fa bőséges nedvfolyással válaszolt a tüske kihúzásakor, szinte kimossa a sebet. Az ismételt visszahelyezési kísérlet a farostok gyors összezáródása miatt nehézkes volt. Ennek oka, hogy a sebforradás során más rostirányú heg (kallusz) képződik, amelybe a szenzor nem, vagy nem jól tud behatolni.

Mindegyik jelenség a fatest reakciója az idegen tárgy behatolására, amelynek során a sebet a szállítóedényeiben mozgó folyadékkal egyrészt kimossa, másrészt a veszélyes (levegő)embólia képződését igyekszik meggátolni. A kalluszképződés lassabb folyamat, az előbbieket követi.

A Dujesiefken és Liese (2012) által említett (és munkájukban fényképes ábrával alátámasztott) barnulás már a fa védekezésének, és/vagy a légembóliának, vagy az oxidáció következménye, nem pedig a megbetegedésének tünetei.

6.1.3. A mért adatokból számítható mutatók

A magasság, átmérő, koronaméret alapján számítható mutatók

A legismertebb paraméterek, a magasság és az átmérő viszonyának elemzése során az alábbi következtetések vonhatók le.

A magasság ugyanazon fafaj és életkor esetén általánosságban a lakott területen álló fáknál elmarad az erdőállományban található társaiknál. Ebből egyrészt a gyengébb termőhelyre, másrészt a fény iránti magassági versengés hiányára lehet következtetni. A harmadik feltehető ok a statikai egyensúly elve alapján értelmezendő, amely szerint általánosságban a magányosan álló fák, kitéve a szél erőhatásainak, a súlypontjukat igyekeznek alacsonyabban tartani, a tőhöz közeli részeken a vastagsági növekedést erősíteni.

Ezt erősíti a legismertebbnek mondható, a magasság és az átmérő viszonyszámát tükröző mutató, vagy karcsúsági mutató. Míg erdei fáknál ez 1/1, addig szoliter fáknál $\frac{1}{2}$, vagy másként megfogalmazva 100%, illetve 50%. Fontos tudnivaló, hogy ez durva átlag, mivel a mutató életkorral, illetve vastagsági növekedéssel változik (az erdőállomány és a szoliter fa viszonylatában nagyjából párhuzamosan), és a magyarországi termőhelyi adottságokat figyelembe véve.

Mattheck (2007) 40%-ban rögzítette a tárgyalt értéket. Ez csak látszólagos eltérés, mivel munkájában felsorolt példák alapján a jelen vizsgálatokba vont fáknál nagyobb átmérőjű fákra következtethetünk Mattheck (2007) tanulmányában..

Amennyiben ez a szerző által megfigyelt 50%-os arány emelkedik, úgy az állékonyság romlik.

A magassági és az átmérő méretek elemzését a szintén nagy jelentőséggel bíró korona-adatok jellemzése követi. Szoliter fának magas a koronahányada, mivel a kisebb oldalárnyékolás miatt jobban ki tudják használni a teret. Ez azonban jóval nagyobb támadási felületet is ad a szélnek, igaz, egyúttal alacsonyabba kerülő súlyponttal. Nagy általánosságban, e munka keretében elvégzett mérések az mutatják, hogy a fa centiméterben mért mellmagassági átmérője értékének megfelel a szélnek kitett koronafelület négyzetméterben mért értéke. Az ettől jelentősen, különösen a nagyobb korona irányába eltérő értéknél további más szempontokat is vizsgálni kell. Ezt az összefüggést Wessolly és Erb (1998) is kimutatta $R^2=81$ szorossággal, azonban a jelen munkában vizsgált fák adatai $R^2=40$ szorosságot adtak, azaz közel sem mutattak olyan szoros kapcsolatot.

Hasonló összefüggést mutat a mellmagassági átmérő és az ennek tízszerese koronaátmérőben.

Több más mutató képzésére is van mód, azonban a legfontosabb következtetések a fentiekből vonhatók le. Általánosságban megállapítható, hogy egységes, egyértelmű, szoros kapcsolattal bíró összefüggéseket nem találhatók. Tendencia, irányok gyakran felfedezhetők, de sokszor be kell érni egy valószínűségi mezővel, amelytől a jelentős távolságra kieső értékekkel bíró fák helyzete vet fel többnyire kérdéseket. Fordítva is valószínű: amennyiben konkrét fának képzett mutatói az Eredményekben bemutatott intervallumok közepére esnek, azokkal kapcsolatban kevesebb probléma várható, azok az átlagos értékek.

A korhadt rész vagy üreg jelenléte esetén értelmezhető indexek

A tomográfus vizsgálat nem csupán a beteg rész helyét szemlélteti, hanem alkalmas annak terjedelmét is bemutatni. A favizsgáló számára ez jó lehetőség a korhadás által nem érintett fa részek vizsgálatára, hiszen ennek birtokában lehet eldönteni az egyik legfontosabb kérdést, miszerint a fa törésveszélyes-e vagy sem.

A Szakirodalmi összefoglalásban vázolt, favizsgáló körökben kialakult vita egyik kicsúcsosodása a maradék falvastagság kérdése. A korhadt vagy üreges fa belső falvastagsága kérdésében Mattheck (2006, valamint további munkái) a fatörzs sugarának legalább 1/3-nyi részére kiterjedő egészséges fa-részt tart elfogadhatónak, amellyel még biztosított a fa állékonysága, azaz nem törik el.

Az ezt támadó Wessolly és Erb (1998), továbbá Sinn (2003) kimondja, hogy adott körülmények között ennél kevesebb is lehet a vitatott értéke. Részletesen nem elemzik, melyek ezek a körülmények, azonban említést tesznek visszavágott fákról.

Az elvégzett mérések egyértelműen igazolják, hogy az 1/3-nyi érték helytálló. Azonban a másik tábor véleménye sem mond ellent, csak ki kell bővíteni a visszavágott koronák meghatározását. Más szóval, léteznek olyan fa-matuzsálemek, amelyeknek nem csupán névleges koronával, hanem névleges falvastagsággal is rendelkeznek (Hédervári tölgy), vagy éppen sokszorosan visszametszett fejesfák (utóbbiakkal városban ritkábban

találkozhatunk, de például útkísérő fásításként erőteljesen visszametszett fehér eperfák (*Morus alba*) között gyakori az ilyen különleges faegyed).

Azt azonban rögzíteni kell, hogy ez a bizonyos 1/3 arány a fa keresztmetszetéhez képest centrálisan kell elhelyezkednie, hiszen kiterjedt részen 30-35%-ot el nem érő falvastagság minősíthető csak kevésnek. Az 1/3-os falvastagság tehát átlagos érték, szinte ökölszabályként vehető.

Az érték magyarázatához már fel kell eleveníteni az fa keresztmetszetének inercianyomatékáról tárgyaltakat. A cső keresztmetszet (és a korhadt belsejű vagy még inkább az üreges fák ilyennek tekintendők) inercianyomatéka csökken az üreg átmérőjének növekedésével. A negyedik hatvány sajátossága, hogy az alap növekedésével egy idő múltán értéke hirtelen „megugrik”. Ez a hirtelen növekedés esetünkben akkor következik be, amikor az üreg vagy korhadás átmérője a fa külső átmérőjének körülbelül 60-70%-át eléri. Ebben az esetben a fa keresztmetszetre számított inercianyomatéka hirtelen csökken, amely az egészséges fa-részben ébredő (hajlító) feszültség szintén hirtelen növekedését okozza.

Az nyilvánvaló, hogy egy konkrét fa esetében a terhelések (szél, saját súly) változatlansága esetén áll fenn az előbbi levezetés. Amennyiben csökken a terhelés (pl. visszavágás által), akkor a csökkenő inercianyomaték mellett sem növekszik jelentősen az egészséges részekre jutó feszültség.

Az úgynevezett 1/3-os szabálynál árnyaltabb képet ad a Wagener-, a Coder- és a Bartlett-képletek alkalmazása: a korhadás mértéke és a faátmérő arányszáma ugyan kisebb mértékben, de észrevehetően elkezd emelkedni már 40-50% korhadási aránynál. Adott fa esetében, mérlegelve más körülményeket, előrejelzésként értékelhető. Az egyes görbék feletti rész kedvezőtlennek minősíthető a konkrét faegyed egészségi állapota, ezáltal az állékonysága terén.

Az iménti mutatók között a nagy eltérés miatt kitűnnek a középmezőnyben helyet foglaló 40-70%-os korhadási arányú fák. Az eltérés különösen a Bartlett-képlet alkalmazása esetén szembeszökő, hiszen ott még az üreg szabadba nyílásának megléte és mérete is ront a fa megítélésén. Ceteris paribus, a Coder-képlet ajánlható, ám tudvalévő, hogy nincs két egyforma fa. A gyakorlati alkalmazások során a fenti elméleti megközelítésű összefüggések biztonsági tényezőkkel módosítandók, amely a különbségeket erőteljesen marginalizálja. A Bartlett-képlet üreg nyílással történő alkalmazása mindenképpen figyelemre méltó (v.ö.: Szakirodalmi összefoglalás fejezet Brazier-kihajlást említő része).

A gyökérzet méreteinek mutatói

Mivel a fa állékonyságát a gyökérzet biztosítja a legnagyobb mértékben, ki kell térni az elemzésére is. Mint később látni fogjuk, a gyökérzetet statikai szempontból leginkább a vízszintes irányú kiterjedése jellemzi. A gyökérzet kiterjedése több tényező függvénye, a fafaj tulajdonságain felül az életkora, a termőhelyi adottságok, és nem utolsósorban a rendelkezésre álló tér, sőt a gyökérzónában történt emberi beavatkozások is befolyásolják.

A fa-gyökérzet kiterjedése, fejlődése az építmények, utak közelében többnyire korlátokba ütközik. A hatékony gyökérzóna kiterjedését célszerűnek látszik hozzárendelni többek között a famagassághoz. A statikai értékelések során láttuk, hogy mind a gyökértányér sugara (fele átmérője), mind a famagasság igen fontos adat, hiszen a fára ható erők erőkarjaiként szolgálnak. Ezért is javasolt az összevetésük, de nem sikerült szoros összefüggést felfedezni köztük. Azonban grafikusán szemlélve egy adott famagassághoz szükséges gyökértányér átmérőt, egy kapcsolati mező bontakozik ki, sőt némi tendencia is felfedezhető. Az adatok szórására magyarázat, hogy valószínűleg (több) más tényezőtől is függ a gyökértányér átmérője, amelyek csökkentik a most tárgyalt kapcsolat szignifikanciát.

A megvizsgált fák adataiból következően megállapítható, hogy a gyökértányér átmérőjének legfeljebb ötszörös értéke lehet a famagasság, vagy megfordítva, a famagasság legkevesebb ötödét érje el a gyökértányér átmérője, a kellő biztonság eléréséhez.

A fenti mutatót Mattheck és Breloer (1993) is vizsgálta, ám ők a fordítottját, azaz a famagasságot tették függővé, a gyökértányér kiterjedésétől.

Ha a szintén jól megfogható mellmagassági átmérőt vesszük alapul a gyökérzet vízszintes kiterjedésének értelmezésekor, akkor a „szokásos” növekedési függvényt rögzíthetjük, azaz a kezdeti meredekebb növekedésmentet ellaposodó, azaz alacsonyabb meredekségű rész követ. A szabad állású fák gyökértányérjának szélesedése mintegy 50 cm mellmagassági átmérőig tart, innen kezdve –ahogyan azt láttuk az előbbieken, az átmérő függvényében történő magassági növekedésnél- a fák magassági növekedése, így a szélnek kitett koronafelület növekedése is lelassul, azaz a továbbiakban nincs szükség lényegesen nagyobb gyökérrendszerre.

Az említett Mattheck és Breloer (1993), illetve Achim és Nicoll (2009) szintén vizsgálták ezt az összefüggést, ám mindkettőjüknek jóval nagyobb átmérőjű fák méreteinek felvételére nyílt lehetőség, amelyből közel egyenes, emelkedő függvényképet nyertek.

6.2. A húzásvizsgálatok tapasztalatai

A húzásvizsgálatok elvégzése során növekvő erőhatás hatására történt megdőlés vizsgált összefüggésének szignifikanciája magas, tehát a kidöntő erőre vonatkozóan megbízható eredményt nyerhetünk vele.

A fa adatai, a húzási erő is ismert, azonban a ra környezetében az átlagosan legmagasabb szélere megválasztása több számítást igényel (zárt beépítés, vagy örvényképződésre alkalmas hely, esetleg szélcsatorna, stb.). Ezt figyelembe véve a biztonsági tényező megállapítása (és az ezt követően szükséges gyakorlati lépések megtétele) már bizonytalanabbá válik.

Az alacsony stabilitást felmutató faegyedek kivágását még további szempontok figyelembe vételével kell megtervezni. A vassurányi lucfenyők példája mutatja, hogy egy fasoron belül, vagy parkos területen laza hálózatban álló fák közül néhányat kiemelve jelentősen (és károsan) változhat a környezet képe, továbbá a szélviszonyok, így a visszamaradó fák egyensúlyi helyzete is. Ilyenkor a meghagyott fák stabilitása hirtelen romolhat. Emiatt fák együttesénél (fasor, park) több scenáriót is vizsgálni kell.

A húzásvizsgálat szakirodalombeli maximálisan megengedhető értéke a $0,25^\circ$ (Wessolly és Erb, 1998). Ezt a határt átlépve a fa dőlési menetében még a dőlést megelőzően van egy szakasz a $0,4-0,6^\circ$ dőlésszög között, amikor még továbbra is nagy erőt kellett kifejteni a dőlésszög növelésére. Ebben a szakaszban, az anyagok tönkremenetelének analógiájára a folyamat még visszafordítható, azaz a fa visszatérne az eredeti állapotába. A dőlésszög további növekedésével elérünk egy olyan állapotot, amikor a fa ugyan még nem dőlt ki, de már nem is tud visszaállni eredeti állapotába.

Az elvégzett kidöntési kísérlet során láttuk, hogy 1° felett már nem volt szükség jelentős erőhatás kifejtésére, azaz a fa itt már szinte „magától” haladt a kidőlés felé. A kifejezés nyilván úgy pontos, hogy a fa a megdőléssel működésbe lépett a saját súlyból származó forgatónyomaték is, amely a dőlés folyamatában egyre nagyobb erőkarra tesz szert (lásd a statikai vizsgálatoknál az szél- és a súlyerő felbontásánál az erőkomponensekre. Ez már az a dőlési szakasz, amikor külső erőhatásra (csörlő, vagy szél) nincs is szükség, a folyamat visszafordíthatatlanul halad tovább.

Felmerülhet az a kérdés, hogy miért vannak akkor mégis olyan fák, amelyek jóval nagyobb szögben dőltek meg, mint a fent vázolt modellszerű esetben leírt dőlés?

Jelen munkában is szerepel ilyen fa, a fertődi lucfenyő (10. és a 39. ábra). A kérdéses fa a szél hatására a nem visszafordítható szakaszba lépett, de az erőhatás nem folytatódott, ezért ebben a helyzetben maradt. A gyökerek nem teljes köre szakadt el, ezért bizonyos gyökerei szinte kipányvázák a fát. További pontos szögméréses vizsgálatra van szükség annak megállapítására, hogy a saját súlyból származó állandó forgatónyomaték okoz-e lassú („kúszásos”) dőlést, vagy a dőléssel ellentétes oldalon a gyökérszövet folyamatosan erősödik, a húzó igénybevétel hatására. Ennél a fánál maradva, láttuk, hogy az állékonysági számítás eredménye szerint a fa instabil.

Találkozhatunk még ennél is nagyobb szögben megdőlt, de nem veszélyes helyzetű fákkal, azonban az ilyenek nem a dőlési folyamat hatására, hanem növekedésük folytán váltak ferdévé, a gyökérszövetük is ehhez a helyzethez alakult, ezért nem jelentenek kidőlési veszélyt környezetük számára.

6.3. A statikai vizsgálatok tapasztalatai a kidőlés veszélyességnek vonatkozásában

6.3.1 A fák adataiból levonható következtetések

A szerző által kidolgozott eljárás a költséges és időigényes húzásvizsgálatot hivatott kiváltani. Ehhez nagyjából ugyanazt az adathalmazt kell felvételezni, mint húzásvizsgálatnál, többlemunkát a hatékony gyökérszóna méretének megállapítása jelent. A fa mérhető paramétereinek meghatározása nem szokott gondot okozni, azonban a megválasztandó értékek annál inkább.

Az egyik ilyen adat a faanyag élőnedves sűrűsége. Mivel az adatbázisok nagy intervallummal adják meg ezen értékeket, a biztonságra törekvő magasabb érték akár a megadott felső határ is választható. Ekkor jelentős túlbecslés lesz az eredmény.

A pontos(abb) értéket gyakorlattal, szakmai ismeretekkel, esetről-esetre, a fa élőhelyét alaposan elemezve meg lehet határozni, de általános szabályt nem lehet kimondani.

Hasonló bizonytalanság tapasztalható a fa térfogatának megállapítása során is. Az erdészeti ismeretekkel rendelkezők a közkeletű néven „Sopp-tábláknak” nevezett fatömegszámítási táblázatokat használják (Sopp és Kolozs, 2000), de előfordul az egyszerű hengerként számított fatérfogat-számítás alkalmazása is, ahol a mellmagassági átmérő és a famagasság adja a henger jellemző adatait, feltételezve, hogy a fatörzs kúphoz hasonlító alakjához⁴² hozzászámítva az ágak térfogatát, hengert kapunk. A fatérfogat megállapításához a nagyobb referencia-adatmennyiség és a hosszabb előzményei miatt Sopp és Kolozs (2000) munkája ajánlható.

Külön kell szólni a korona alaki tényezőjéről, más néven a közegellenállási tényezőjéről. A Stuttgarter Festigkeitskatalog (Wessolly és Erb, 1998) több fafajra megadja a C_w számításokban alkalmazandó értékét. A konkrét fák értékelésekor azonban érdemes figyelemmel lenni a korona alakjára, ágrendszerére, esetleg visszametszett, részben száradt vagy egyéb torz kialakulására, amely a közegellenállási tényező mindenképpen rugalmasabb megállapítását kívánja.

A korona méreteknél bemutatott lucok (36. ábra), illetve egy erőteljesen visszavágott hárs példáján belátható, hogy számottevő különbségek érzékelhetők ugyanazon fafajú, korú, hasonló méretű stb. fák esetében. Ezért helyesebb, hogy a megnevezett adatbázisban szereplő értékeket középértéknek vesszük, és bár óvatosan, de a konkrét feladat végzése során módosítjuk. Például, alapesetben a luc C_w értéke a fenti adatbázis szerint 0,2. A 36. ábrán látható baloldali példányra 0,17 javasolható, a jobboldali 0,2 értéke mellett. Amennyiben felfutó növényzet is található a fán, akkor az említett adatbázisban szereplő értékeknél magasabb számot kell használni, a koronafelület növelésével egyidejűleg.

6.3.2. A szélró hatások számításának tapasztalatai

A szélró számítására a legrészletesebb, szabványszinten ajánlott eljárás az EUROCODE idézett protokollja. Jelen munkában is előfordult azonban olyan eset, amikor a környezet módosító-befolyásoló tényezőit nem sikerült teljes egészében számszerűsíteni. Ilyen pl. a zárt udvarok kérdése, ahol szinte teljes szélárnyék fordul elő. Ilyenkor egy átlagos beépített környezetben álló fa stabilitásával szemben akár nagyfokú korhadással is fenntartható az adott faegyed. Erre példa a korábbiakban bemutatott, hatalmas kiterjedésű koronával rendelkező, hivatali udvaron álló japán akác is, amelynek gyökérszónája kiterjedésében erősen korlátolt (42-43. ábrák).

Az EUROCODE szintén adós marad a Szakirodalmi áttekintésben bemutatott kanyon örvény, és sarok örvény kezelésével a fára ható szélró terén. Mivel ezek nem tipizálhatók, egyedileg kell figyelembe venni hatásukat.

⁴² Neiloid, konoid, paraboloid

A Szakirodalmi áttekintésben több szélmodell részletei is olvashatók. Közülük a HWIND-modell alkalmazása vált be széles körben, az EUROCODE is ennek platformjáról indult ki, ám a GALES modellben szereplő tényezők egy részét is számba veszi.

A FOREOLE-modellből az erőkomponensek figyelembe vétele került át a számítási eljárásokba, míg a GALES-szélmodellből a módosító tényezők pl. a környezet korlátozottsága, valamint a fa szilárdsági értékei kerültek a stabilitási számításokba, az EUROCODE szélsebesség-számításon keresztül. Önmagában a FOREOLE és a GALES modell alkalmazása egyaránt körülményes, a megválasztható, de nem kellően definiált módosító tényezők miatt, azonban bizonyos elemeit (amelyek később az EUROCOE normában megjelentek) érdemes figyelembe venni.

6.3.3. Következtetések a fa súlyából eredő erők vonatkozásában

A fák földfelszín feletti részeinek súlyáról az előbb szó esett. Konklúzióként el kell mondani, hogy a fák térfogatsúlyának körültekintő megválasztása, illetve a térfogatának megállapítása a szakmában nem kiforrott, az alapadatok bizonytalansága miatt. Javasolható az adatbázisokban megadott intervallumon belül a helyi növekedésment, illetve a termőhelyi adottságok figyelembe vételével a keresett értéke megállapítása, de több szakember a biztonságra törekedve a magasabb, vagy éppen alacsonyabb értéket választja.

6.3.4. Következtetések a gyökérsúlyából eredő erők vonatkozásában

A föld alatti rész, így a gyökérlabda súlyát befolyásoló talajféleség jellemző adatainak megállapítása nem okoz nehézséget, mivel a talajok térfogatsúlya nem mozog nagy intervallumban. A gyökérsúly mint faanyag térfogatsúlya, a már említett ismeretek figyelembe vételével szintén kiszámítható. A gyökérsúly kiterjedésének meghatározása azonban kevésbé egyértelmű (lásd előbb). A bemutatott példák (Budapest Dorozsmai u., Kőszeg Jurisics tér, Szombathely) mindegyikénél a gyökerek növekedése korlátokba ütközött, emiatt a fák földfeletti méreteihez és a környezetükre jellemző szélterheléshez képest nem tudott megfelelő méretű gyökérsúly kifejlődni vagy éppen a már kifejlődött gyökérsúly csökkent emberi behatások vagy károsítások következményeként. Emiatt egyértelműnek tűnik, hogy a gyökérsúly fejlődésének lehetőségei, vagy esetlegesen valamilyen okból csökkent méretének megismerése a legfontosabb a szoliter fák állékonyságának elemzéséhez.

A közművek jelenléte, vagy a sekély talajréteg az esetek nagyobb részében nagymértékű állékonyságcsökkenéshez vezetnek. Különösen így van ez a később elhelyezett közművezetékek esetén, amikor óvatlanul elvágják a gyökerek egy részét, miáltal rögtön esik a biztonsági tényező értéke.

Gyakran felbukkan szakmai körökben a talajkohézió kérdése. Erre vonatkozóan azonban jelentős tanulmány eddig nem készült. Egy kísérlet zajlott ugyan nagy mennyiségű víz gyökérsúlyába juttatásáról, ám a hazai viszonylatban valószínűtlen csapadékmennyiség beöntözése (1 nap alatt 300 mm-nek megfelelő mennyiség) nyomán sem számol be Divós és

Kovács (2014) komolyabb stabilitás-vesztésről. Ezzel együtt azonban a víztartalom növekedésével a gyökérlabda tömege nőtt, ami a fa stabilitást javítja. Ebből arra lehet következtetni, hogy a talajkohézió alacsonyabb szerepet játszik a vártnál. Ez egybevágh a szerző megfigyeléseivel, amelyek szerint nincs jelentős hatása a talajkohéziónak, mivel a fák kidőlésük esetén nem csúszólap mentén mozognak (ahol valóban lenne szerepe a kohéziónak). A fák kidőlése többnyire megemelkedő gyökérrzettel történik, ahol nem a kohézió, hanem a talaj szakítószilárdsága lehet kérdés, ami jóval alacsonyabb a nyomószilárdságuknál.

A kidőlt fák gyökérrzetét megvizsgálva megállapítható, hogy **a hatékony gyökérrzóna** felületét a főgyökerek mintegy 5 cm-re csökkenő átmérőjű keresztmetszetei rajzolják ki, azaz a gyökerek a fa kidőlésekor 5 cm vastagságnál, vagy az alatt szakadnak el (11. ábra).

6.3.5. Következtetések a forgatónyomatékok egyensúlyára vonatkozóan

A fentiek alapján a gyökérrzetből és a fa súlyából származó erőhatás nyomatékának legalább egyenlőnek kell lennie a szél kifejtette nyomatékkal. Mivel az előbbiekben levezetett tényezőket nem mindig sikerül egzakt módon megfogalmazni, illetve kiszámítani, a gyakorlati alkalmazók kénytelenek elvárt biztonsági tényezővel egybevetni az eredményt. Ez többnyire a forgatónyomatékok arányának 150%-os értékében, ám gyakran 200%-os értékben rögzített.

6.3.6. A dőlésszámítás adataiból levonható következtetések

Mindenképpen végig kell gondolni, hogy a bemutatott statikai számítás menetében melyek azok a tényezők, amelyek legnagyobb befolyást gyakorolják az eredményre.

A számítási képletekbe helyettesítendő adatok egységnyi változtatásával is kaphatunk erre vonatkozó eredményt, de többféle statisztikai eszköz közül is lehet választani. A behelyettesítendő adatok változtatása alapján az állékonyságot leginkább a gyökérrzóna vízszintes irányú kiterjedése befolyásolja, amely az eredményt önmagában több mint egyötödnnyivel képes módosítani.

A másik fontos adat a szél erősség, amely az eredményt mintegy hatodával változtatja. Ezek nem túl nagy értékek, de arra engednek következtetni, hogy sok más adat van még befolyással a fa dőlésére. Az összefüggések emiatt nem szorosak.

Az egyes alapadatokat egymáshoz is viszonyíthatjuk, amelynek során fény derül arra, hogy az egyes adatok egymást is mennyire befolyásolják. Ezt a Spearman-féle rang-korreláció mutatja meg. Az egyértelmű összefüggéseket nem kell magyarázni, azonban a legérdekesebb nyilván itt is a végeredmény (az állékonyság) és a többi alapadat összevetése. Eszerint a várt gyökérrzóna adatok, így a gyökérrzóna térfogata és vízszintes kiterjedése befolyásolják legerősebben az állékonyságot. Azt is figyelembe kell venni, hogy igen erős e két tényező egymástól való függése is. Mivel a gyökérrzet térfogatát a korábbi levezetések alapján a

vízszintes irányú kiterjedés teszi meghatározhatóvá és alkalmazhatóvá, ennek az adatnak a megismerésére kell a legnagyobb hangsúlyt fektetni.

6.3.7. A kiválasztott fákra vonatkozó mérési eredményekből levonható következtetések

1. Szombathelyen, a Gyöngyös parti sétányon álló vadgesztenye fa kidőlésének egyértelmű oka a fa gyökérrendszerének feltűnően kicsi kiterjedése, amely ráadásul hiányos is volt, mivel részben elkorhadt. Ezért a hiánytalan lombkorona ellenére a stabilitása megromlott, és a fa – csak a korona állapotát szemlélve- látszólag teljes életerejében- kidőlt (47. ábra). A vékonyabb gyökérzet a koronát fenn tudta tartani, a szilárdságot azonban nem tudta biztosítani.

2. Budapesten a XIV. kerületi Dorozsmai utcai közműfektetés következtében lecsökkent kiterjedésű gyökérzet alacsony állékonysága az egyértelmű oka a kidőlésnek.

A 93%-os állékonyságú (modellezett) bolygatatlan gyökérszóna értéke is elgondolkodtató: a lehetséges mérési hibáktól eltekintve a favizsgáló kénytelen a viszonylag merev járdaszerkezet ellent tartó (és a számítás során nem figyelembe vett) hatását feltételezni. Ebből következően –ahogyan azt a következő mintafánál is látni fogjuk) a gyökérszónára nehezedő külső többletsúlyt a fa a fejlődése során „figyelembe veszi”, mint ahogyan a hiányát is. Azonban a többletsúly eltávolításával az állékonyság ugrásszerűen csökken. Emiatt kimondható, hogy ilyen többleteket nem szabad eltávolítani, vagy másfelől közelítve: az ilyen adottságok növelésére is törekedni kell. Egyik természetes lehetőség az egymást átfedő, összefonódó gyökérzet megteremtése, azaz a több fa együtt, csoportba történő ültetése.

3. Kőszegen a Jurisics téri kislevelű hárs esetén a szerző mérései és számításai alapján kimondható, hogy az elvártnál szintén kisebb kiterjedésű volt a fa gyökérzete, amelyre azonban csak a kidőlését követően derült fény: a fa alatt barokk-kori, ismeretlen, ám működő, terméskőlapokkal burkolt csatorna húzódott. A hatékony gyökérszóna az elvárható mértékűnek közel felére csökkent, mivel a gyökérzet nem tudott kellő mélységbe hatolni. A nem kielégítő gyökérszóna mélységből származó állékonysági problémát még felerősítette a fa környezetéből a térkövezet-átalakítási munkái miatt eltávolított bazalt kockakő-burkolat és a burkolat ágyazatának hiánya. Ennek következtében a fa állékonysága is csaknem felére csökkent s szomorú végeredményként a szél nagyon hamar kidöntötte a fát (11. ábra és 46. ábra).

4. Szombathely egyik zárt terén álló bálványfa állékonysága nagyon gyengének bizonyult, az egyértelműen az elégtelen gyökérszóna-kiterjedés miatt. Az elszáradás oka a tápanyag és vízszállítás leállása volt.

5. A Fertődi Kastélyparkban álló, megdőlt helyzetű lucfenyő nagy koronafelülete és a sekély gyökérzete, továbbá a sekély-középmély termőrétteg-vastagság, illetve a már megdőlt helyzet nem teszi megbízhatóvá a fa helyzetét. A fa kidőlése még nem történt meg, a valószínűsíthető pótlólagos gyökérfejlődés jóvoltából.

6. A szombathelyi Juhász Gy. utcában álló gömbjuhar magas állékonyságának oka mindenekelőtt a kicsi koronafelület és alacsonyan fekvő súlypont (rövid a szélerőhöz tartozó

erőkar). A fától koronametszés nélkül elvárható koronafelülettel az állékonyság 300 % körüli lenne. Az ilyen és ehhez hasonló habitusú fák kidőlésével nem kell számolni.

7. Szombathely egyik hivatali épületének belső udvarán található japán akác a rendkívüli kiterjedésű korona és a csökkent kiterjedésű gyökérszóna ellenére a magas épületek belső udvarán, szélvédett helyen élő fa esetében lehetővé teszi a megfelelő stabilitást. A legfontosabb itt a szélerő erőteljes csökkenése, azaz a szélárnyék. A fát körülvevő közeli épületek (szűk belső udvar) a frontális szélerő nagyfokú csökkenését okozzák, és az örvényképződés, illetve a tetők felett elhaladó szél okozta nyomáscsökkenés sem veszélyeztet a dőlést okozó hatásokkal. A számítások során a környékbeli uralkodó szélerő az előbbieket szerint csökkenthető volt.

8. A Siskin-festményen látható erdeifenyőre vonatkozó, a szerző által kidolgozott állékonysági számítás eredménye kiválónak nevezhető (242%). Ennek az eredménynek az oka elsősorban az erdeifenyő közép-európai habitusára vonatkozó ismereteinktől nagyban eltérő kicsi koronafelület.

6.3.8. A gyökérzetre vonatkozó további tapasztalatokból levonható következtetések

Az elméleti megfontolások nyomán és a vizsgált egyedek kidőlésének tapasztalataiból megállapítható, hogy idős korban a hatékony gyökérszóna tányérgyökérzet alakhoz közelít. A gyökérzetükkel kiforduló fák többnyire tányérgyökérzetűek. Kidőlés szívgyökérzettel jóformán csak a károsodás miatt erősen redukálódott, elkorhadt gyökérzettel fordul elő. Ép szívgyökérzet esetén nem csupán a kiterjedt gyökérzet gátolja a kidőlést, hanem többletként, a gyökérszóna széllel ellentétes részén a talaj magas nyomószilárdsága is kevesebb elmozdulást tesz lehetővé, így szívgyökérzet forgására vonatkozó megközelítés bizonytalan.

A tányérgyökérzettel kiforduló fák gyökérzete egy viszonylag vékony, merev koronggal emelkedik ki az eredeti szintjéből, a korong széllel ellentétes oldalán forgáspontként helyben maradó rész körül fordulva. A gyökértányérból kilógó gyökerek inkább elszakadnak, mivel az elágazások miatt a gyökérkihúzásról fák esetében nem beszélhetünk (Mattheck 2007). A megemelkedő gyökértányér peremén tehát a gyökerek elnyíródnak. A talaj könnyen elszakad, hiszen a talaj húzószilárdsága nagyon alacsony, szemben a nyomószilárdságával.

6.3.9. A terpeszek, kiemelkedő gyökerek és más megvastagodások szerepe a fák állékonyságában

A megvastagodások létrejöttének oka az egyes terpeszre ható nagyobb törzssirányú húzóerő vektorának eredő-vektort maga felé hajlító hatása. Az eredő vektor mintegy ferdén felfelé húzza a fa tövi részét, így oda nagyobb faanyag mennyiség épül be.

Amennyiben a tövön körben egyenletesen található terpesz, a vízszintes (gyökerek irányába mutató) erőkomponens egyenként rövidebb, így a terpesz is kisebb kiterjedésű ebben az irányban. Azonban nem ritkán folyamatosan az egyik irányból éri nagyobb igénybevétel a

fát (vagy az uralkodó szélirány vagy szélcsatorna-szerű beépítettség miatt), ezért ott a terpesz vízszintes irányú kiterjedése a nagyobb. A felszínen vagy ahhoz közel futó gyökereknél is hasonló a helyzet, a törzs húzó- ezáltal emelő erőhatása következtében. Emiatt gyakran találkozhatunk idősebb korban kiemelkedő gyökfővel, vagy a felszín fölé emelkedő gyökerekkel (a talajerózió hatását leszámítva).

A már ismertetett számítási képletekből látható, hogy ha a keresztmetszeti felület csökken a károsítások következtében, vagy a felületre ható erőhatás nő a növekedés következtében, akkor a felületet növelni kell az egyensúly fenntartásához. A jelenség magyarázata a szerző értelmezésében az állandó feszültségek tételében keresendő (lásd Az anyag és módszer fejezetben). A feszültség mint a felületegységre eső erőhatás mértéke, a külső erőhatásokkal tart egyensúlyt. A fák stratégiája, hogy ezt az egyensúlyt megtartsák.

Ennek levezetése a formulák alapján a következő (csak emlékeztetőül):

Egyszerű húzásra vagy nyomásra a

$\sigma_{\text{norm}} = \frac{F}{A}$ képlettel, míg hajlító igénybevétel esetén a keresztmetszetben ébredő húzó vagy nyomófeszültséggel a

$\sigma_{\text{max}} = \frac{M}{I_x} * y$ összefüggéssel számítható.

A favizsgáló mindezt megfordítva értelmezi: ahol ilyen többlet-növekedésekkel találkozunk, ott feltételezheti a rendellenes növekedés okozójaként a törzsben esetleg rejtőzködő hiányosságot (57. ábra).

7. Az eredmények gyakorlati hasznosítási lehetőségei.

Javaslatok

A doktori értekezésben bemutatott ismeretanyag számottevően bővítette illetve elmélyítette a fák tulajdonságairól szóló tudásbázist. A kimunkált információk felhasználhatók a fakataszterek vezetésénél, a zöldfelületi értékeléseknél és a leltárok készítésénél is, ám a dolgozatban szereplő tudásanyag mindenekelőtt a favizsgálatok végzéséhez és megbízhatóbb prognózisok kialakításához nyújt segítséget.

A dolgozat a fák vonatkozásában különösen az élet- és vagyoni biztonság terén feltett kérdésekre adandó válaszokat pontosítja és kínál újabb vizsgálati szempontokat. Ennek egyik speciális kapcsolódási pontja a kártérítési felelősség megállapítása, ahol az állékonyságszámítás során a fa-katasztrófa okai, lefolyása és részben következményei is rekonstruálhatók, akár még a balesetet okozó fa megléte nélkül is.

A munka felhasználható ezen túl a növényvédelmi, favédelmi intézkedések megtervezése és költségeinek becslése terén is.

Az információtechnológia fejlődésével megszülető hatékony mérőeszközök eredményeinek értelmezéséhez továbbra is szükség lesz a fákra vonatkozó műszaki-biológiai-ökológiai ismeretekre.

Természetesen a jelen eredményeket tovább kell fejleszteni, mert a szoliter és idős korú fákról még mindig keveset tudunk. Az élő faanyag anyagtulajdonságai terén különösen sok adatra van még szükség, így mindenekelőtt az egyes élő fák változatos térfogati és sűrűségi adatai, a különböző szilárdsági értékei, a talaj mechanikai tulajdonságai, valamint a gyökérszövet és a talaj mechanikai kölcsönhatásai kapcsán is, de ugyanígy kutatni kell a szél sebességének, turbulenciájának növekvő felületi érdességgel való változásait is.

Szakmánk adós még a hazai széldöntések tudományos igényű elemzéseivel és az ellene való megelőző védekezés módjainak kidolgozásával.

Nem ismerjük még kellően a fában lezajló korhadási folyamatok menetét, sebességét fafajonként vagy akár kórokozónként sem.

A rendelkezésre álló technikai eszközök, ezen belül az információtechnológia rohamosan fejlődnek, de a fákról szóló ismeretanyagot és a szakember szemét nem helyettesíthetik. Legfeljebb alapul szolgálnak a fákról szóló tudásbázis finomítására. A szingularitás itt is jelentkezni fog.

A dolgozatban a fákra ható –emberi szempontból káros- erőhatásokról is szó volt. Azonban fontos tudni, hogy a fák is hatnak a környezetükre, amelyek esetenként fontosabbak a fák megléténél és pozitív hatásaiknál. Ilyen hatás többek között a nagy termetű fák mozgásával a talajt lazító hatása, amely lejtős terepen akár suvadást okozhat.

8. Összefoglalás

A dolgozat a lakott területen álló fák növényvédelmi, azon belül mindenekelőtt stabilitási problémáival, azok leírásával, továbbá e kérdések megismerésének lehetőségeivel foglalkozott.

A „faápoló-diszciplína” nagyon fiatalnak számít hazánkban, magyar nyelven kevés az elérhető szakmai munka. Ezt tükrözi a Szakirodalmi összefoglalás is. A tudományág bizonyos töredékes részei favizsgálati szakvéleményekben azonban már felbukkantak. Ráadásul az fák öreg korára vonatkozó, a famatuzsálemek életéről, reakcióiról, „viselkedéséről” szóló rendszerezett információk is nagyon szegényesek, még az alapozó tudományok terén is.

Az bizonyosnak látszik, hogy a Közép-Európában előforduló fafajok jellegzetességei erdős környezetben alakultak ki és szilárdultak meg, ezért az ottani fejlődésüket kell szokványosnak tekintenünk. Ennek nem felelnek meg az erdőn kívüli, lakott területek, mivel az itt élő fáknek nem az a természetes közegük, az épített környezethez kevésbé alkalmazkodtak.

A munkában szereplő fák közös tulajdonsága, hogy nem gazdasági szempontok miatt ültették őket, hanem más, de mindenképpen emberközpontú célok teljesítésére. Ezért a tőlük remélt termék nem a faanyag, nem is a gyümölcs, hanem az esztétikai, a környezeti és az infrastrukturális értékek jelentősége. Emiatt fontos ezen értékek teljesítésének minél hosszabb ideig történő biztosítása. Másrészt elvárt, hogy emberi javakban ne okozzanak kárt.

A fentiek miatt intenzíven kell ezeket a fákat figyelni, amelyhez az eszközök, eljárások többé-kevésbé rendelkezésre állnak. Azonban –mivel fiatal tudományágról van szó– ezek a lehetőségek nem kellően kiforrottak, pontosításuk mindenképpen szükséges. Részleteiben sor került az egyes szemrevételezéses módszerek ismertetésére, a szükséges mérések bemutatására, továbbá a számításokkal nyerhető információk körére, illetve értelmezésére. Így az egyre szélesebb körben elterjedő hangtomográfokkal szerezhető adatok helyes értelmezésére, használatára is láttunk iránymutatást. Ebből látható, hogy nem csak egy síkban, szabályos keresztmérékében több síkban, több időpontban, a valós keresztmetszeti alakot jobban megközelítve is érdemes a vizsgálatokat elvégezni. Mindezt statikai elemzéssel kombinálva még többet megtudunk a vizsgált fáról. Láttuk, hogy a lakott területen, vagy éppen emberi mechanikai hatásokkal érintett, idős fáknál nem ritkán jelentkező különböző elváltozások, károsodások nagy mértékben befolyásolják a fák stabilitását.

Az adatokból különböző mutatók, viszonyszámok segítségével egy elvárt, vagy adott körülmények között ideálisnak nevezhető fa adataihoz viszonyítva szintén képet kaphatunk arról, hogy milyen az aktuális fa helyzete. A mutatók vetítési alapja többnyire a mellmagassági átmérő, illetve a gyökérral kapcsolatos indexeknél a gyökérszél átmérője. Az egyik ilyen, erdőkből gyakran használt mutató a magasság:átmérő viszonyszám. Láttuk, hogy jelentősen eltér az erdőkből álló fák adataitól, azoknak csaknem fele.

A korona kiterjedésének, méretének adatait (aránya a teljes magassághoz képest, átmérője vagy felülete) szintén érdemes viszonyítani, azonban a korona alakja, mérete már nagy változatosságot mutat, emiatt az összefüggések nem szorosak.

Itt kell megemlíteni, hogy a képzett mutatók többnyire nem egy világosan követhető görbét, hanem inkább sávot, vagy sokszor „adatfelhőt” alkotnak.

A tomográfus vizsgálat lehetőséget ad a korhadás vagy üreg kiterjedésének, vagy a visszamaradó falvastagság és az átmérő aránya alakulásának ábrázolására, bár inkább csak adatmezőt kapunk, semmint egységes görbét. Az adatmező azonban szintén fontos információkat hordoz a kiterjedésére, határaitra vonatkozóan.

Az is igazolódott, hogy a szakmában nagy vitákat kiváltó 1/3-os falvastagságot jelentő szabály hogyan értelmezendő: mindkét vitázó fél álláspontja igaz lehet adott körülmények között. Ennek kapcsán egy másik, e munkában nem kihangsúlyozott árnyalatnyi szemléletbeli eltérés feltűnhetett: A tengerentúli és az európai, pontosabban német szemléletek különbözősége: az Újvilágban klasszikusnak számító Wagener, Coder, és mindenekelőtt Bartlett is megalkották a maguk mutatóit a fa belsejében helyet foglaló beteg részek értékelésére, amelyek azonban e kutatás szerint hazai körülmények között kevésbé váltják be a reményeket.

A gyökértányér átmérője is jellemző adat, amely az átmérővel, illetve a magassággal is összefüggésben értelmezhető. A kapcsolat itt szorosabb, mint az eddigi összehasonlításokban általában, ezért a famagasság és a gyökértányér átmérő között ötödrésznyi összefüggés bontakozik ki: legalább a famagasság 20%-a szükséges a gyökértányér átmérőnek lennie, a stabilitás érdekében.

A fák adatainak elemzése után az elvégzett húzásvizsgálatok tapasztalatainak beépítésével, illetve más, a szakirodalomban megtalálható tudnivalókra alapozva jelen munka a költséges és időigényes húzásvizsgálatot helyettesítő állékonyság-számítási eljárást mutat be. Alapadatként a favizsgálatok szokásos adatfelvételén túl a két legfontosabb információ, a szélesebesség nagysága és a hatékony gyökérzet kiterjedésének minél pontosabb megállapítása szükséges, amely több kisebb ismérv, jelesül a fent ismertetett mutatók, vagy az abból képzett értékek, a helyszín alapos vizsgálata és szakmai tapasztalatok segítségével állapítható meg, amelyekre részletesen kitér a munka.

A szélesebesség helyben kialakuló értéke az EUROCODE-számítással pontosítható, azonban figyelembe kell venni, hogy a meteorológiai adatszolgáltatóktól beszerezhető, vonatkozó nemzetközi szabvány szerint 10 méter magasan mért adat sem gradiens szélesebesség, amelyet ráadásul a helyi felszíni érdesség, továbbá a különböző örvényképződési lehetőségek is erőteljesen módosítanak. A szél fákra ható erejének számítására jelen munka több ismert szélmodell kritikus alkalmazásával kínál metódust. A szélérőn és a fa saját súlyából származó erőn felül a helyszínen további többletterheket is rögzíthet a favizsgáló, amelyek számottevően befolyásolják a stabilitást.

A választható paraméterek (faanyag sűrűsége, talaj sűrűsége, légellenállás tényező) szintén nagy körütekintést igényelnek, amire ez a dolgozat szintén iránymutatást ad.

A 6. táblázatban levezetett számítás végén, a fákra ható, kifordításra irányuló erőhatások és az ennek ellen tartó gyökérzet által generált erőhatások összevetését a forgatónyomatékokon keresztül kell megvizsgálni.

A korábban említettek szerint 71 fa statikai vizsgálata történt meg az előbbi eljárással. Minden egyes fa részletes szöveges kiértékelésére nincs mód, azonban néhány jellegzetes példányt érdemes volt kiválasztani az ismertetésre. Így történt meg nyolc konkrétan megnevezett fa állékonyságának elemzési eredményeinek bemutatása, a korlátozó-módosító tényezőkkel egyetemben. Az elvégzett vizsgálatokból a fentiekén túl további, mérhető paraméterekkel nem vagy nehézkesen jellemezhető következtetés is megfogalmazható. A vizsgálatba vont fák többsége tipikusan öreg, esetenként már a degradáció jeleit mutató faegyed volt, amelyeknél a szakma által eddig rögzített ismérvek már több-kevesebb módosítással fogadhatók csak el. Ilyen például a gyökérzet alakjára, kiterjedésére vonatkozó adatok (tányérgyökérzet felé alakuló gyökérzet), a terpeszek, fagylécek, pillérek, bordák szerepe, amelyek a fa válaszlai a stabilitásban jelentkező romlásra.

Összefoglalóan megállapítom:

1. A vizsgálatba vont fák legnagyobb része idősödő vagy éppen már öreg fa volt, sőt előfordult közülük szinte teljesen degradálódott példány is. A magas életkorú fák adatainak a dolgozatban történt elemzése széleskörű információkat, illetve iránymutató javaslatokat kínál a fák időskori tulajdonságainak megismerésére.
2. A favizsgálatok alapján rögzíthető, hogy a fák sok káros hatást elviselnek különösebb változások nélkül. Azonban (statikai szempontok szerinti) „tűrőképességüknek” van egy határa, amelyet túllépve a reakciók hirtelen és nagy léptékben jelentkeznek. Kutatásom ennek a szakszank minél szűkebb intervallumra történő behatárolásához ad eredményeket.
3. A további kutatásoknak is irányt ad ez a dolgozat, hiszen tapasztaltuk, hogy a képzett mutatók nem teljes pontossággal állapíthatók meg. Erre utal a fák vizsgált paraméterei közötti kapcsolatok feltűnően alacsony szorossága, illetve nagyfokú „széttartása”. Azt is megállapíthatjuk, hogy tendenciák, adatfelhők, valószínűségek megállapíthatók, de tudjuk, hogy egy rendkívül összetett biológiai rendszerről alkottunk egyfajta képet, ahol a részeredmények, tényezők nagy bizonytalanságai egymást erősítik.
4. A favizsgálatok nem terjedtek ki a hazánkban egzóta fafajok legnagyobb részére, az alapadatok (térfogat-megállapítás, élőnedves sűrűség, növekedési tulajdonságok ismerete) fogyatékosai miatt.
5. Az elvégzett vizsgálatok segítséget nyújtanak a gyakorlatnak a fák dőlésveszélyének pontosabb és hatékonyabb megállapítására, illetve az elvégzendő műveletek tervezésére.
6. A szemmel látható elváltozások, kinövések a hasznos keresztmetszet csökkenése miatti terhek viselésére képzi a fa.

9. Tézisek

1. Egyazon fára több eltérő hangtomográf-vizsgálati eredmény nyerhető, az alkalmazó szakember döntései függvényében

A tomográf mérések eredményeit több véletlen mérési hiba is torzíthatja jelentős mértékben. Leggyakoribb ilyen hibát az egészséges göcs, fagyléc, repedések (belső növekedési, mechanikai-repedések, elválások) ormok, palánkgyökerek, belső járulékos gyökerek, bordák, tumorok, oltási hegek és burjánzások, golyvák, terpeszek, elhatárolt korhadások, benőtt tárgyak okozzák, mivel eltérítik az eredményt, többnyire a nagyobb stabilitás felé.

Ezen túl a gyakorlatban gyakran nehéz észrevenni a kritikus keresztmetszetet, és máshol történik a mérés. Emellett a tomográf használata során lehetőség van a valóságos keresztmetszeti alak helyett kör keresztmetszetet, továbbá kevesebb érzékelőt alkalmazni, amelyek nagy mennyiségű munka elvégzésénél jelentősen csökkentik a ráfordított időigényt, ugyanakkor jelentős pontatlanság forrásai is.

2. A megmért térbeli tomogramok alapján a törzskorhadások négy alapvető megjelenési formája írható le.

Ezek a következők:

A gyökérnyakban legszélesebb, felfelé csúcsosodó kúp alakú korhadás vagy üreg. A korhadás a gyökfőből indult, a bél felé eljutva ott gyorsan tud felfelé haladni. Ez a korhadási forma a legveszélyesebb a fa állékonyságára nézve, mert a betegség már a gyökérzetet is nagy valószínűséggel károsítja.

A törzsön a gyökérnyak feletti sérülésből kiinduló korhadás típus, amikor lefelé, felfelé és a bél felé egyaránt terjed a betegség, így hordó vagy orsó alakú a korhadás megjelenési formája. A CODIT-elv alapján a szállító edénnyalábok irányában a kórokozó gyorsabban tud haladni, mint sugárirányban, ezért megnyúlt, de középen szélesebb a korhadás formája.

A lakott területeken gyakori korona visszametszések, vagy történelmi formaként a botolások a koronaalapon okoznak nagy kiterjedésű sebzést, ezzel elősegítve a kórokozó fatestbe jutását. Ilyenkor a korhadás a törzsben lefelé indul meg, de kisebb mértékben sugár irányban is terjed. A korhadás alakja így fordított kúp lesz. Veszélyessége az ágak lehasadásának nagyobb esélye miatt figyelemre méltó.

Amennyiben a korhadás a szállító edénnyalábok irányában már kellően kiterjedt, a sugárirányban is halad a kórokozó. Ilyenkor tulajdonképpen a gyakran hengerszerűen kiüregesedett fa keresztmetszeti alakja csövet képez, ahol az élő és jól védekezni képes szíjács alkotja a csőfalat. Leginkább a vadgesztenyén fordul elő ez a korhadási típus.

3. A korhadt vagy üreges törzs maradék falvastagságának a koronaalakítással nem érintett fáknál, állékonysági szempontból legalább $\frac{1}{3}$ értéket teljesítenie kell.

A tomográf mérések eredményeként az $\frac{1}{3}$ -os maradék falvastagsági aránnyal rendelkező törzs a szerző vizsgálatai szerint már törésveszélyesek. Ám ha a maradék falvastagság nem egyenletesen teszi ki az $\frac{1}{3}$ -os értéket, akkor az nem elég stabil.

Az erőteljesen visszametszett koronájú, de stabil fáknál előfordul az $\frac{1}{3}$ -nál kisebb érték.

4. A famagasság, a mellmagassági átmérő és ezek egymáshoz való viszonya a szoliter fák esetében az állékonyság veszélyeztetése nélkül legfeljebb $\frac{1}{2}$ értéket felvehet.

Az elvégzett mérések alapján a lakott területen álló fák magassága elmarad az erdőállományban található társaikénál, változatlan további feltételek mellett.

A szoliter fák esetén a famagasság és a mellmagassági átmérő viszonzsáma, a karcsúsági index $\frac{1}{2}$ értéknél alacsonyabb értéke biztosítja a törzstöréssel szembeni stabilitást.

5. A fák mellmagassági átmérői és a koronaméretei arányára statikai szempontból a következő összefüggések érvényesek:

Amennyi a centiméterben mért mellmagassági átmérő, legfeljebb annyi négyzetméter koronafelület nem okoz még stabilitási problémákat a fáknak.

A mellmagassági átmérő és az ennek legfeljebb tízszeres koronaátmérője biztosítja a törzstöréssel szembeni stabilitást.

6. A szerző kidolgozott egy olyan állékonyság-számítási eljárást, amely a költséges és időigényes húzásvizsgálatot hivatott helyettesíteni.

Az eljárás lényege –hasonlóan más faállékonysági számításokhoz- a terhelések és az ellenálló erők számbavétele, ezen keresztül a hajlítónyomaték és az ellenállási nyomaték értékeinek összevetése. A különbség az egyes tényezők értelmezésében, és számítási módjaiban van (pl. EUROCODE szélszámítás, koronafelület megállapítása, módosított légellenállási tényezők, gyökérszóna kiterjedése). A fakidőlések okainak és menetének feltárására különösen alkalmas ez az eljárás.

A számítások elvégzése során az alapadatok között a következő összefüggések bontakoztak ki:

-A gyökértányér sugarának 10%-os változása az állékonyságban 22-25% ugyanolyan irányú eltérést jelent. Emellett a fa koronafelületének 10 %-os módosulása 10 %-os, de ellenkező irányú stabilitás-változást okoz.

-A Spearman-féle rangkorreláció kimutatta, hogy az állékonyságot leginkább a hatékony gyökérszóna vízszintes irányú kiterjedése befolyásolja. Ehhez kapcsolódóan az egyik legfontosabb, egyben a legnehezebben megállapítható adat a hatékony gyökérszóna vízszintes

irányú kiterjedése, amelynek meghatározásához a következők támpontokat kell figyelembe venni:

-A kidőlt fák gyökérzetét megvizsgálva megállapítható, hogy fa kidőlésekor az 5 cm-es vagy annál vékonyabbak szakadnak el. Emellett a felszínmozgások gyakran jelzik a hatékony gyökérzet határait, a közeli közművek, épületalapok, kerítések pedig határt szabnak a gyökérzetet fejlődésének.

Az állékonyság becsléséhez segíthet az az összefüggés, amely szerint a famagasság legkevesebb ötödét érje el a gyökértányér átmérője, a kellő biztonság eléréséhez.

7. A tövestől kiforduló fák többsége a tányérgyökérzethez hasonló alakú gyökérszónával dől ki.

A vizsgált egyedek kidőlésének tapasztalataiból megállapítható, hogy idős korban a hatékony gyökérszóna tányérgyökérzet alakhoz hasonlít. A szívgyökérzettel történő kidőlés (kifordulás) jóformán csak a károsodás miatt erősen csökkent méretű gyökérzettel fordul elő. Jól fejlett szívgyökérzet esetén nem csupán a kiterjedt gyökérzet gátolja a kidőlést, hanem a gyökérszóna széllel ellentétes részén a talaj magas nyomószilárdsága is sokkal kisebb elmozdulást tesz lehetővé. A karógyökérzetű fák gyökérestől történő kidőlése átmenet a törzstörés felé, mivel a törzs folytatásaként lefelé hatoló karógyökér ilyen esetben eltörik.

8. A talajfelszín fölé emelkedő gyökerek, kialakuló terpeszek, bordák a fák mechanikai reakciói a külső erőhatások okozta feszültség növekedésre.

A növekvő súlyból és a növekvő vitorlafelületből fakadó nagyobb terhelés a gyökerekben nagyobb húzó- és hajlítófeszültség formájában jelentkezik. Ugyanakkor a fákban a feszültség növekedését nem csak a nagyobb súly és nagyobb koronafelület okozhatja, hanem a korhadások miatti keresztmetszeti felület csökkenéséből fakadó gyengülő szilárdság. Mivel a fák ezt igyekeznek kompenzálni, mindkettő jelenség feltűnő, a talajfelszíntől vagy a fapalástból kiemelkedő vastagodást eredményez, akár a talajfelszín fölé emelkedő gyökerek, akár a megnövekedő terpeszek vagy a bordák képében.

Köszönetnyilvánítás

Megköszönöm Prof. Dr. Varga Szabolcsnak a segítséget, Prof. Dr. Divós Ferencnek az inspirálást, a Családomnak a lehetőséget, Gulyás Gyula Barátomnak meg a Barátságot.

Irodalomjegyzék

- Achim, A. és Nicoll, B., C. (2009): Modelling the anchorage of shallow-rooted trees. *Forestry*, Vol. 82, No. 3, Oxford University Press, Oxford.
- Ancelin, P.; Courbaud, B. és Fourcaud, T. (2004): Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands. *Forest Ecology and Management*, Vol. 203, pp. 101-121.
- Babos, K., Filló, Z. és Somkuti, E. (1979): *Haszonfák*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- Baker, C. J. (1997): Measurements of the natural frequencies of trees. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 48, No. 310, pp. 1125-1132.
- Balder, H. (1998): *Die Wurzeln der Stadtbäume*. Parey Verlag, Berlin.
- Balogh, A. (1968): *Magyarország nevezetes fái*. Mezőgazdasági Könyvkiadó Vállalat, Budapest.
- Baltazár, T., Pejchal, M. és Varga, I. (2013): Výskum metód potlačovania imela bieleho (*Viscum album* L.): Mechanické odstránenie, aplikácia hebicídov alebo použitie mykopesticídu? In: Hrubík, P. és Gáperová, S. (szerk.) (2013): *Dreviny vo verejnej zeleni. Zborník z konferencie s medzinárodnou účasťou*. 2013. június 18-19. Nyitra, Ústav ekológie lesa SAV Zvolen, Szlovákia, ISBN 978-80-89408-16-0
- Beckröge, W. (1999): Windfeld. In: Helbig, A., Baumüller, J., Kerschgens, M. J. (szerk.)(1999): *Stadtklima und Luftreinhaltung*. Springer Verlag, Berlin.
- Bíró, B. (2004): *A bükk álgesztesedés vizsgálata a Somogyi Erdészeti és Faipari Rt. erdőállományaiban*. Doktori értekezés, NYME Sopron.
- Blackwell, P.G., Rennolls, K. és Coutts, M.P. (1990): A Root Anchorage Model for Shallowly Rooted Sitka Spruce. *Forestry*, Vol. 63, No. 1., Oxford University Press, Oxford
- Boddy, L. és Rayner, A. D. M. (1983): Origins of decay in living deciduous trees: the role of moisture content and a re-appraisal of the expanded concept of the tree decay. *The New Phytologist*, 94, pp. 623-641.
- Bond, J. (2006): Foundations of tree risk analysis: Use of the t/R ratio to evaluate trunk failure potential. *Arborist News*, December, ISA. pp. 31-34.
- Britter, R. E. és Hunt, J. C. R. (1979): Velocity measurements and order of magnitude estimates of the flow between two buildings in a simulated atmospheric boundary layer. *Journal of Industrial Aerodynamics*, Vol. 4. pp. 165-182. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam

- Brudi, E. és van Wassenaeer, P. (2001): Trees and Statics: Nondestructive Failure Analysis. In: Smiley, E. T. és Coder, K. D. (szerk.) (2001): Tree Structure and Mechanics Conference Proceedings: How trees stand up and fall down. Savannah, International Society of Arboriculture
- Bucur, V. (1999): Acoustics as a Tool for the Nondestructive Testing of Wood. In: Proceeding of International Symposium on NDT Contribution to the Infrastructure Safety Systems, Torres, Brazil.
- Butin, H., Nienhaus, F, és Böhmer, B. (2003): Farbatlas Gehölzkrankheiten. Ziersträucher und Parkbäume. Eugen Ulmer GmbH & Co. Stuttgart
- Byrne, K. (szóbeli közlés, 2013): A GALEs szélmodell faktorainak értéke. Vancouver.
- Chmelař, J. (1978): Városi zöldfelületek fás növényeinek ökológiája. In: Terpó, A. (szerk.) (1978): A fák és a város. A települések zöldfelületeinek létesítése, fenntartása és biológiai kérdései. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.
- Coder, K. D. (1989): Should you or shouldn't you fill tree hollows? Grounds Maintenance 24(9): pp. 68-70, 98-100. In: Kane, B. Ryan, D. és Bloniarz, D. V. (2001): Comparing formulae that assess strength loss due to decay in trees. Journal of Arboriculture, 27 (2). March, pp. 78-87.
- Coder, K. D. (2010): Root strength and tree anchorage. Warnell School Outreach Monograph WSFNR 10–19. 88 pp
- Coutts, M. P. (1983): Root architecture and tree stability. Plant and Soil 71, Haag, pp. 171-188.
- Cullen, S. (2005): Trees and wind: A practical consideration of the drag equation velocity exponent for urban tree risk management. Journal of Arboriculture 31(3), pp. 101-113.
- Danjon, F., Fourcaud, T. és Bert, D. (2005): Root architecture and wind-firmness of mature *Pinus pinaster*. New phytologist, 168. Pp. 387-400.
- Davenport, A. G. (1961): The Spectrum and Horizontal Gustiness Near the Ground in High Winds. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 87, pp. 194-211.
- Deák, Gy., Erdélyi, T., Fernezelyi, S., Kollár, L. és Visnovitz, Gy. (2006): Terhek és hatások. Tervezés az Eurocode alapján. Business Media Kft, Budaörs, pp. 49-52., 91-92.
- Dettel, A., Brudi, E. és Bischoff, F. (2010): Messverfahren und Bewertungsmethoden zur Verkehrssicherheit. AFZ-DerWald, Vol. 8., pp. 34-35.
- Divós, F., Bejő, L. és Tóth, Á. (2009): Instrument supported tree evaluation in Hungary. In: 16th International Symposium on the Nondestructive Testing and Evaluation of Wood. Beijing, pp. 71-77.

- Divós, F. és Mészáros, K. (1994): Root Decay Detection by Stress Wave Technique. In: Proceedings of the First European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood. Sopron, 531 p.
- Divós, F. és Mészáros, K. (1996): Új roncsolásmentes fa vizsgáló módszer. In: Varga, F. (szerk.) (1996): Erdészeti és Faipari Tudományos Közlemények, 1994-1995. év, Vol. 40-41. Erdészeti és Faipari Egyetem, Sopron, pp. 179-184.
- Divós, F. és Szalai, L. (2003): Tree evaluation by acoustic tomography. Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Berkeley. Washington, pp. 251-256.
- Divós, F., Divós, P. és Divós, Gy. (2008): Acoustic Techniques from Seedling to Wooden Structures. In: Proceedings of the 15th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium (NDT). (anonymous), pp. 3-12.
- Divós, F. és Kovács, G. (szóbeli közlés, 2014): Húzásvizsgálat a fa gyökérszónájának vízzel történő elárasztásával. Sopron.
- Divós, F. (szóbeli közlés, 2014): Húzásvizsgálatok során alkalmazott függvény, Wessolly és Erb (1998) nyomán. Sopron
- Dujesiefken, D. (szerk.) (2004): Kommunale Baumkontrolle zur Verkehrssicherheit. Fachamt für Stadtgrün und Erholung, Hamburg.
- Dujesiefken, D. és Liese, W. (2012): Das CODIT-Prinzip. 2. Auflage. Haymarket Media GmbH & Co. KG. Braunschweig.
- Dupuy, X., Fourcaud, T. és Lac, P. (2007): A generic 3D finite element model of Tree anchorage integrating soil mechanics and real root system architecture. American Journal of Botany 94(9), pp. 1506–1514.
- England, A.H., Baker, C. J. és Saunderson, S. E. T. (2000): A dynamic analysis of windthrow of trees. Forestry, 73(3), pp. 225-237.
- Ennos, A. R. (1993): The scaling of root anchorage. Journal of theoretical biology. Vol. 161, pp. 61-75.
- Ennos, A. R. és van Casteren, A. (2010): Transverse stresses and modes of failure in tree branches and other beams. Proceedings of The Royal Society. Vol. 277, pp. 1253–1258.
- Finnegan, J. J. és Brunet, Y. (1995): Turbulent airflow in forests on flat and hilly terrain. . In: Coutts, M. P. és Grace, J. (szerk.) (1995): Wind and trees. Cambridge University Press. pp. 3-40.
- Fourcaud, T., Ji, J.-N., Zhang, Z.-Q. és Stokes, A. (2007): Understanding the Impact of Root Morphology on Overturning Mechanisms: A Modelling Approach. 2008 May; 101(8): pp. 1267–1280.

- Gaffrey, D. és Kniemeyer, O. (2002): The elasto-mechanical behaviour of Douglas fir, its sensitivity to tree-specific properties, wind and snow loads, and implications for stability – a simulation study. *Journal of Forest Science*, 47.(2), pp. 49-69.
- Gardiner, B. (1995): The interactions of wind and tree movement in forest canopies. In: Coutts, M. P. és Grace, J. (szerk.)(1995): *Wind and trees*. Cambridge University Press. pp. 41-59.
- Gardiner, B., Peltola, H és Kellomäki, S. (2000): Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecological Modelling*, Vol. 129. pp. 1–23.
- Gardiner, B., Byrne, K., Hale, S., Kamimura, K., Mitchell, S. J., Peltola, H. és Ruel, J-C. (2008): A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests. *Forestry*, Vol. 81, No. 3., Oxford University Press, Oxford
- Ghani, M. A., Stokes, A. és Fourcaud, T (2009).: The effect of root architecture and root loss through trenching on the anchorage of tropical urban trees (*Eugenia grandis* Wight). *Trees*. Vol. 23., pp. 197-209. Springer Verlag, Berlin
- Gencsi, L. (1980) *Erdészeti Növénytan I. Növényszervezetten, növényélettan*. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest. pp. 191-197.
- Gencsi, L. és Vancsura, R. (1992): *Dendrológia*. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Gromke, C. és Ruck, B. (2007) Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon - experimental investigation of the flow and concentration field. *Atmospheric Environment*, Elsevier, Vol. 41, pp. 3387 - 3302.
- Gromke, C. és Ruck, B. (2008): Aerodynamic modelling of trees for small-scale wind tunnel studies. *Forestry*, Vol. 81, No. 3., Oxford University Press, Oxford
- Gyarmati, B. (1970): *A faanyagok lágy-korhasztó gombái*. Mikológiai Közlemények, 3. Budapest.
- Gyórfi, J. (1941): *A Fomes annosus* Fries. Károsítása a soproni botanikus kertben. *Erdészeti Kísérletek*, Sopron
- Hortobágyi, T. (szerk.) (1968): *Növényhatározó I. Baktériumok- mohák*. Negyedik, átdolgozott kiadás. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Horváth, F. és Borhidi, A. (szerk.) (2002): *A hazai erdőrezervátum kutatás célja, stratégiája és módszerei*. TermészetBÚVÁR Alapítvány Kiadó, Budapest.
- Igmándy, Z. (1991): *A magyar erdők taplógombái*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Isik, F. és Li, B. (2002): Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 33: pp. 2426–2435. NRC Research Press.

- James, K. R., Haritos, N. és Ades, P. K. (2006): Mechanical stability of trees under dynamic loads. *American Journal of Botany* 93(10): pp. 1522–1530.
- Johnstone, D., Moore, G., Tausz, M. és Nicolas, M. (2010): The Measurement of Wood Decay in Landscape Trees. *Arboriculture & Urban Forestry* 36(3): pp. 121–127.
- Kane, B. Ryan, D. és Bloniarz, D. V. (2001): Comparing formulae that assess strength loss due to decay in trees. *Journal of Arboriculture*, 27 (2). March, pp. 78-87.
- Kapocsy, Gy. (2000): A magyarság nevezetes fáí. Helikon Kiadó, Budapest.
- Kelemen, G. (2010): Tree risk assessments in three dimension. Oral presentation. In: Ristić, R, Medarević, M. és Popović, Z. (2010): First Serbian Forestry Congress, Congress proceedings. University of Belgrade, Faculty of Forestry, Belgrade. ISBN 976-86-7299-071-3. pp. 1653-1659.
- Koppán, A., Szarka, L. és Wesztergom, V. (2000): Élő fa életfolyamatainak tükröződése a törzsön mért elektromos potenciálkülönbségekben. *Soproni Egyetem Tudományos Közleményei*, Vol. 46. pp. 17-23.
- Kovács, F. (1980): Kőrisek erdőnevelési modellje. In: Váradi, G. (1984) (szerk): *Fatermesztési műszaki irányelvek. IV. Erdőnevelés. Mezőgazdasági és Élelmezésügyi Minisztérium Információs Központja*, Budapest, pp. 90-91.
- Lin, C.-J., Kao, Y.-C., Lin, T.-T., Tsai, M.-J., Wang, S.-Y., Lin, L.-D., Wang, Y.-N. és Chan, M.-H. (2008): Application of an ultrasonic tomographic technique for detecting defects in standing trees. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Elsevier.
- Lonsdale, D. (1999): Principles of tree hazard assessment and management. Forestry Commission, London.
- Lundström, T., Jonas, T., Stöckli, V. és Ammann, W. (2007a): Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, root–soil plate geometry and root growth orientation. *Tree Physiology*, 27. pp. 1217-1227. Heron Publishing, Victoria.
- Lundström, T., Jonsson, M. J., Kalberer, M. (2007b): The root–soil system of Norway spruce subjected to turning moment: resistance as a function of rotation, *Plant and Soil*, Vol. 300, Issue 1-2., pp. 35-49.
- Matheny, N. P. és Clark, J. R. (1994): *A Photographic Guide to the Evaluation of Hazard Trees in Urban Areas*. International Society of Arboriculture, Savoy, Illinois.
- Mattheck, C. (2006): *Design in der Natur*. Rombach Verlag, Freiburg, 4. Auflage.
- Mattheck, C. (2007): *Aktualisierte Feldanleitung für Baumkontrollen mit Visual Tree Assessment*. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH., Karlsruhe.

- Mattheck, C. Bethge, K. és Albrecht, W. (1995): Failure modes of trees and related failure criteria. In: Coutts, M. P. és Grace, J. (szerk.)(1995): Wind and trees. Cambridge University Press. Pp. 195-203.
- Mattheck, C. és Breloer, H. (1993): Handbuch der Schadenskunde von Bäumen. Rombach Verlag. Freiburg im Breisgau.
- Mattheck, C. és Breloer, H. (1994): Field guide for Visual Tree Assessment (VTA). Arboricultural Journal, Vol. 18. pp. 1-23. AB Academic Publishers.
- Mattheck, C., és Breloer, H. (1995): The body language of trees. A Handbook for Failure Analysis HMSO, London
- Mattheck, C., Breloer, H. és Albrecht, W. (1994): How to read the result of resistograph M. Arboricultural Journal, Vol. 21. pp. 331-346. AB Academic Publishers.
- Mayhead, G. J. (1973): Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. Agricultural meteorology, Vol. 71., pp. 123-130. Elsevier.
- McPherson, E. G. és Muchnick, J. (2005): Effect of street tree shade on asphalt concrete pavement performance. Journal of Arboriculture 31(6), November, pp. 303-310.
- Milne, R. (1991): Dynamics of swaying of *Picea sitchensis*. Tree Physiology. Vol. 9, pp.383-399. Heron Publishing-Victoria, Canada.
- Molnár, S. (szerk) (2006): Fahibák, fakárosítások. NYME ERFARET, Sopron,
- Molnár, S. (2004): Faanyagismeret. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest.
- Molnár, S. és Bariska, M. (2002): Magyarország ipari fái. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest.
- Molnár, S., Peszlen, I. és Paukó, A. (2007): Faanatómia. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest.
- Moore, J. R. és Maguire, D. A. (2003): Natural sway frequencies and damping ratios of trees: concepts, review and synthesis of previous studies. Trees. Vol. 18. pp. 195–203. Springer Verlag, Berlin
- Nicoll, B. C., Gardiner, B. A. és Peace, A. J. (2008): Improvements in anchorage provided by the acclimation of forest trees to wind stress. Forestry, Vol. 81. No. 3., Oxford University Press, Oxford.
- Nicoll, B. C. és Ray, D. (1996): Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions. Tree Physiology 16. Heron Publishing, Victoria, pp.891-898.
- Nicolotti, G. és Miglietta, P. (1998): Using High-Technology Instruments to Assess Defects in Trees., Journal of Arboriculture 24(6), November.pp. 297-302.
- Niemz, P. Bues, C-T. és Herrmann, S. (2002): Die Eignung von Schallgeschwindigkeit und Bohrwiderstand zur Beurteilung von simulierten Defekten in Fichtenholz. Schweizerische. Zeitschrift für Forstwesen 153. Vol. 6: pp. 201–209.

- Niklas, K. J. (2006): Maximum plant height and the biophysical factors that limit it. *Tree Physiology*, 27. Heron Publishing, Victoria, pp. 433–440.
- Niklas, K. J. és Spatz, H-C. (2012): *Plant physics*. The University of Chicago Press, Chicago.
- Niklas, K. J. és Spatz, H-C. (2006): Allometric theory and the mechanical stability of large trees: proof and conjecture. *American Journal of Botany* 93(6), pp. 824–828.
- Pagony, H. (1996): Ismét a gyökérrontó taplóról és a hatékony védekezés lehetőségéről. *Erdészeti Lapok*, CXXXI. Évf. 6. pp.: 184-185.
- Pamplona, M., Kocher, M., Snethlage, R., és Snethlage, R. és Barros, L, A. (2007): Drilling resistance: overview and outlook. *Z. dt. Ges. Geowiss.*, 158/3, p. 665–676.
- Peltola, H. és Kellomäki, S. (1993): A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand edge. *Silva Fennica*, Vol. 27., No.: 2. pp. 99-111.
- Peltola, H. (2006): Mechanical stability of trees under static loads. *American Journal of Botany*, Vol. 93(10): pp. 1501–1511.
- Peltola, H., Kellomäki, S., Hassinen, A. és Granander, M. (2000): Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management*, Vol. 135., pp. 143-153.
- Peltola, H., Gardiner, B. és Nicoll, B. (2013): Mechanics of wind damage. In: Gardiner, B., Schuck, A., Schelhaas, M-J., Orazio, C., Blennow, K. és Nicoll, B. (szerk.) (2013): *Living with storm damage to forests*. European Forest Institute, Joensuu.
- Pestal, E. (1963): Áthelyezhető kötélpályák és kötélदारuk. *Mezőgazdasági Kiadó*, Budapest, pp. 342-358.
- Reinartz, H. és Schlag, M. (1997): *Integrierte Baumkontrolle (IBA)*. Stadt und Grün, 46. évf. 10. szám, Patzer Verlag, Berlin-Hannover.
- Rinn, F. (1989): Eine neue Bohrmethode zur Holzuntersuchung. *Holz-Zentralblatt* 115, (34): pp. 529-530.
- Roedel, W (2000): *Die Physik unserer Umwelt. Die Atmosphäre*, Springer Verlag, Berlin.
- Roloff, A. (szerk.) (2008): *Baumpflege*. Eugen Ulmer KG. Verlag, Stuttgart
- Ruck, B. (2005): Über die Aerodynamik der Bäume. In: Egbers, C., Jehring, L., von Larchner, T., Ruck, B., Leder, A. és Dopheide, D. (2005): *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*. Proceedings der 18. GALA-Fachtagung, Brandenburgische Technische Universität Cottbus
- Ruck, B. és Schmitt, F. (1986): Das Strömungsfeld der Einzelbaumumströmung, Abschätzung von De-positionswahrscheinlichkeiten für Feinsttröpfchen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Parey Verlag, Hamburg-Berlin.105/3, pp. 178-196.

- Ruel, J. C. (2009): Modelling stem resistance to breakage. In: Tree Stability: Models Standardisation and Integration Workshop - UMR AMAP, Montpellier, 21-23 October 2009.
- Sander, C. (2006): Patient Baum. AFZ-DerWald, Vol. 20., pp. 1104-1108.
- Schwarze, F. és Baum, S. (2000): Prognose der Fäuledynamik im lebenden Baum. Stadt und Grün, 49. évf. 10. szám, Patzer Verlag, Berlin-Hannover, pp. 687-693.
- Schwarze, F., Engels, J. és Mattheck, C. (1999): Holzzersetzende Pilze an Bäumen. Rombach Verlag, Freiburg im Breisgau.
- Sellier, D. és Fourcaud, T. (2009): Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds. American Journal of Botany 96(5). St. Louis. pp. 885–896.
- Sellier, D., Brunet, Y. és Fourcaud, T. (2008): A numerical model of tree aerodynamic response to a turbulent airflow. Forestry, Vol. 81, No. 3, pp. 279-297. Oxford University Press, Oxford.
- Shigo, A. L. (1979): Tree decay. Agriculture Information, Bulletin Number 419., 4/1979, Department of Agriculture, Forest Service.
- Shigo, A. L. (1994): Moderne Baumpflege. Bernhard Thalacker Verlag, Braunschweig.
- Siegert, B. (2008): Klopfen/Bohren/Zerren - Technische Untersuchungen an Bäumen. Előadás, Niederösterreichischer Baumtag, Baden bei Wien.
- Siegert, B. (2012): Die Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen im Praxistest. AFZ-DerWald, Vol. 4. pp. 32-34.
- Sinn, G. és Sinn, T. (1997): Bruchsicherheit von Bäumen verschieden beurteilt. Stadt und Grün, 47. évf. 7. szám, Patzer Verlag, Berlin-Hannover.
- Sinn, T. (2000a): Biostatistische Baumkontrolle: Fachgerecht, schnell und sicher. 1. Teil. Stadt und Grün, 49. évf. 7. szám, Patzer Verlag, Berlin-Hannover, pp. 477-484.
- Sinn, T. (2000b): Biostatistische Baumkontrolle: Fachgerecht, schnell und sicher. Teil 2. Stadt und Grün, 49. évf. 9. szám, Patzer Verlag, Berlin-Hannover, pp. 625-633.
- Sinn, T. (2000c): Biostatistische Baumkontrolle: Fachgerecht, schnell und sicher. Teil 3. Stadt und Grün, 49. évf. 10. szám, Patzer Verlag, Berlin-Hannover, pp. 702-707.
- Sinn, G. (2003): Baumstatik. Thalacker Medien, Braunschweig.
- Sinn, G. (szóbeli közlés, 2012): A gyökérszet térbeli alakja.
- Smiley, T. és Fraedrich, B. R. (1992): Determining strength loss from decay. Journal of Arboriculture, 18 (4), July pp. 201-204.

- Smith, K. T. (2006): *Compartmentalization today*. Arboricultural Journal, Vol. 29. AB Academic Publishers, Gloucestershire.
- Sopp, L. és Kolozs, L. (2000): *Fatömegszámítási táblázatok*. Harmadik, átdolgozott kiadás. Állami Erdészeti Szolgálat, Budapest.
- Spatz, H-C. és Brüchert, F. (2000): *Basic biomechanics of self-supporting plants: wind loads and gravitational loads on a Norway spruce tree*. Forest Ecology and Management Vol. 135. pp. 33-44.
- Spatz, H-C., Brüchert, F, és Pfisterer, J. (2007): *Multiple resonance damping or how do trees escape dangerously large oscillations?* American Journal of Botany, October 2007 94:1603-1611; doi:10.3732/ajb.94.10.1603
- Sterken, P. (2005): *A Guide For Tree-Stability Analysis*. Peter Sterken, saját kiadás, Blankenberge
- Sterken, P. (2006): *Modelización de la estabilidad del arbolado y las palmeras*. Foresta, Asociación y Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Forestales. No. 38: Pp. 59-67.
- Stobbe, H., Dujesiefken, D., Schmitt, U. és Eckstein, D. (2003): *Wundbehandlung von frischen Anfahrschäden an Bäumen*. Stadt und Grün, 52. évf. 1. szám, Patzer Verlag, Berlin Hannover, pp. 39-43.
- Szabó, I. (2003): *Erdei fák betegségei*. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest
- Szaller, V. (2013): *Determination of trees damage caused by decaying fungi using acoustic tomograph Fakopp 3D*. In: Hrubík, P. és Gáperová, S. (szerk.) (2013): *Dreviny vo verejnej zeleni. Zborník z konferencie s medzinárodnou účasťou*. 2013. június 18-19. Nitra, Ústav ekológie lesa SAV Zvolen, Szlovákia, ISBN 978-80-89408-16-0
- Telewski, F. W. (1995): *Wind-induced physiological and developmental responses in trees*. In: Coutts, M. P. és GRACE, J. (szerk.) *Wind and Trees*. Cambridge, Cambridge University Press. 241–263.
- Trockenbrodt, M. és Liese, W. (1991): *Untersuchungen zur Wundreaktion in der Rinde von Populus tremula L. und Platanus x acerifolia*. Angewandte Botanik, Hamburg, 65: pp. 279–287.
- Varga, F. (2001): *Erdővédelemtan*. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó Ház, Budapest.
- Veperdi, I. (2008): *Faállományok kondíciójának (relatív vitalitásának) meghatározása elektromos ellenállás mérésével*. Poszter, OEE Vándorgyűlés, Debrecen.
- Wagener, W. W. (1963): *Judging Hazard from Native Trees in California Recreational Areas: -a Guide for Professional Foresters*. U. S. Forest Service Research Paper PSW-P1. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, California, Forest Service - U. S. Department of Agriculture

- Waisel, Y., Eshel, A. és Kafkafi, U. (szerk.) (2002): *Plant Roots. The hidden half*. Marcel Dekker. New York
- Wang, X., Divós, F., Pilon, C., Brashaw, B.K., Ross, R.J. és Pellerin, R.F. (2004): *Assessment of Decay in Standing Timber Using Stress Wave Timing Nondestructive Evaluation Tools*, USA Forest Products Lab, FPL-GTR-147.
- Watson, G. (2008): *Discoloration and decay in severed tree roots*. *Arboriculture & Urban Forestry*, 34(4). International Society of Arboriculture, Champaign, pp. 260–264.
- Wessolly, L. (1995): *Bruchdiagnose von Bäumen - Teil 1: Messung mittels Zugversuch*. *Stadt und Grün*, 44. évf. 6. szám, Patzer Verlag, Berlin, pp. 416-422.
- Wessolly, L. (2000): *Vorspannung - Der unverzichtbare Turbo für junge Bäume*. *Stadt und Grün*, 49. évf. 7. szám, Patzer Verlag, Berlin-Hannover, pp. 474-476.
- Wessolly, L. és Erb, M. (1998): *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*. Patzer Verlag, Berlin
- Wilson, P. J. (1983): *The Shigometer technique in practice*. *Arboricultural Journal*, Vol. 7. pp. 81-85.
- Wood, C. J. (1995): *Understanding wind forces on trees*. In: Coutts, M. P. és Grace, J. (szerk.) (1995): *Wind and trees*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 133-164.
- Xi, W., Peet, R. K., DeCoster, J. K. és Urban, D. L. (2008): *Tree damage risk factors associated with large, infrequent wind disturbances of Carolina forests*. *Forestry*, Vol. 81, No. 3., Oxford University Press, Oxford
- Zanne, A.E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D.A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S.L., Miller, R.B., Swenson, N.G., Wiemann, M.C. és Chave, J. (2009): *Global wood density database*. *Dryad*.
- Zeidler, A. (2012): *Variation of wood density in Turkish hazel (Corylus colurna L.) grown in the Czech Republic*. *Journal of Forest Science*, Vol. 58. No. 4., Czech Academy of Agricultural Sciences, Praha, pp. 145-151.
- Zuranski, J. A. (1972): *Windbelastung von Bauwerken und Konstruktionen*. Rudolf Müller Verlag, Köln
- EN 1991-1-4 (2005): *European Standard: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions*. European Committee for Standardization, Brussels.
- ICP Forests Manual (2010): *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. United Nations Economic Commission for Europe, Convention on Long Range Transboundary Air Pollution. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests.

Web1: <http://hu.wikipedia.org/wiki/Beaufort-skála>

Web2: <http://hu.wikipedia.org/wiki/Szélnyírás>

Web3: <http://hu.wikipedia.org/wiki/Rezonancia>,

Web5: <http://hu.wikipedia.org/wiki/Sajátfrekvencia>

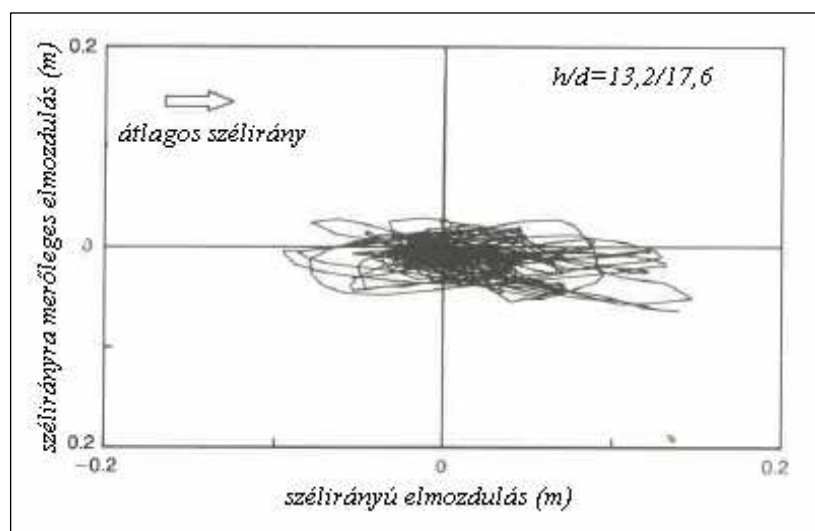
Web6: <http://hu.wikipedia.org/wiki/Levegő>

Mellékletek

Függelék

I. A dinamikus favizsgálatok

Az utóbbi időben több kutató (Peltola és mtsai, 2013) arra a következtetésre jutott, hogy a statikus szélterhelés felőli megközelítés nem teljesen helytálló, hiszen a fa élő, dinamikus rendszer, amely az egyes terhelések hatására változtat bizonyos adottságain. Ilyen mindenekelőtt a fa alakja, amely a szélterhelés növekedésével változik, sőt a negatív hatásokat mozgásával (58. ábra) próbálja kiegyenlíteni (Sellier és mtsai, 2008), azaz képes csillapítani a káros rezgéseket. Egyik ilyen „eszköze” a lombkorona ellenállási tényezőjének (C_w) változása eltérő erősségű szél hatására (Wessolly és Erb, 1998). A másik maga a fa ágrendszere, amelynek eltávolításával (erőteljes nyeséssel) a természetes frekvencia magasabb lesz (Moore és Maguire, 2003).



58. ábra A fa szél által keltett mozgásának ábrázolása felülnézetben, két dimenzióban. Forrás: Gardiner (1995)

A természetes frekvencia az a frekvencia, amellyel egy tárgy általában rezonál. Egy anyag merevsége és természetes frekvenciája között kapcsolat van. Általában véve, minél merevebb egy anyag, annál nagyobb a természetes frekvenciája. A fa természetes frekvenciája (rezgése) pontos műszerezettséggel mérhető. Egy ilyen irányú kísérlet lézer interferométerrel történt (Baker, 1997), ahol egyértelműen bebizonyosodott, hogy egy egészséges fának alacsonyabb a természetes frekvenciája, mint betegnek, sőt ugyanazon fa esetében lombtalan állapotban is más, magasabb frekvencia mérhető.

Megállapították, hogy több fa (facsoport, erdő) kapcsolatában az egyes fák frekvenciája alacsonyabb, mint a szoliterkéé és különösen a magasabb termetű, illetve a kevesebb ággal rendelkező, vagy a lomb nélküli fáké. De fordítva is megfogalmazható: a fa mint rendszer rezgését csillapítják az ágak, a lombzat, és a gyökérzet-talaj kölcsönhatás. Ezek egymáshoz viszonyított aránya Milne (1991) szerint 50-40-10%. Más szempontból nézve, a fa a hajlékony, rugalmas ágrendszerével, különösen a kisebb ágak és gallyak

struktúrájával, továbbá a lombozatával a legkevésbé sem merev rendszer, így a legalacsonyabb a természetes frekvenciája.

Azt a jelenséget, amikor a gerjesztett rendszer amplitúdója maximális, **rezonanciának** nevezik. Ha az amplitúdó túl nagy, az a rezonanciakatasztrófának nevezett jelenség, ilyenkor a rendszer tönkre is mehet. Ez létrejöhet egyes tereptárgyaknál, amikor a szél által keltett leváló örvények a rendszer sajátfrekvenciáján okoznak folyamatos gerjesztést, és a kitérések egyre nagyobbak lesznek (Web4, Web5).

A fa igyekszik csökkenteni a frekvenciáját, és a koronája felépítésével, rugalmasságával elhangolja saját magát. Az elhangolás folyamat felfogható túlélési stratégiának, amely révén a fa csökkenteni igyekszik a szél általi erő káros hatásait a törzsre és a gyökérzetre nézve, és így nagyobb lehet a stabilitása (James és mtsai, 2006). James és mtsai (2006) tovább megy: egyenesen azt állítja, hogy az elhangolás miatt kisebb ágakat közepes szélnél, nagyobbakat azonban erős szélnél is ledob magáról, így biztosítva a fennmaradó részek továbbélését. Azonban önmagában a dinamikus erőhatás a fa tövi részére vetítve 20 %-kal magasabb terheléshez vezet, mint a hasonló nagyságrendű statikus terhelés (Sellier és Fourcaud, 2009).

Spatz és mtsai (2007) megemlíti, hogy a fa a statikus számítások szerint nagyobb dinamikus szélhatásnak is ellenáll, mivel nagyon jól tudja azt csillapítani (Spatz és mtsai, 2007). Moore és Maguire (2003) megállapítja, hogy a teljes fa frekvenciája viszonylag megbízhatóan számítható a famagasság és az átmérő segítségével:

$$T = b_0 \times \frac{H^2}{d_{1,3}} \quad (36),$$

$$\text{vagy} \quad f = b_1 \times \frac{d_{1,3}}{H^2} \quad (37)$$

ahol:

H: famagasság,

$d_{1,3}$: mellmagassági átmérő,

b_0 és b_1 : fafajfüggő állandók.

Ugyanazon fafajon belül a frekvencia változatossága két okra vezethető vissza: a korona tömegére és terjedelmére, valamint a rugalmassági modulus és a faanyag sűrűségének eltéréseire. A belső csillapítás mérettől függetlenül a fákra nézve 0,5 körüli érték. A külső csillapító tényezők a szomszédos fák összeérő, egybenőtt koronái, valamint a falevelek aerodinamikai tulajdonságai.

A dinamikus favizsgálatok e munka kereteibe már nem férnek bele, azonban hangsúlyozni kell, hogy a (statikus) favizsgálatok több kérdéses momentumára feltehetően a fa dinamikus viselkedése adhat magyarázatot.

A dinamikus favizsgálat tulajdonképpen felfogható a több irányú húzásvizsgálatok sorozatának, amelynek során a fa kitéréseit megfelelő eszközzel regisztrálva leírható a szél keltette mozgás.

II. A tomogramon alapuló statikai vizsgálatok

A tomogramon alapuló statikai vizsgálatok módszere

A tomogram tanulmányozása során kézenfekvő további statikai számítások elvégzése, hiszen ismertté válik a tényleges keresztmetszet, amelyre alapozva szilárdságtani, végső soron biztonsági számításokat is végezhetünk. Erre az alkalmazott szoftver lehetőséget kínál, azonban az eredmény értelmezéséhez elengedhetetlen a számítási háttér ismerete. Természetesen a fa keresztmetszetének tényleges alakját kell alkalmazni, nem pedig tomográf szoftverének használata során a választható, gyorsabb és kényelmesebb munkavégzést lehetővé tevő szabályos fa-keresztmetszetet.

A vizsgálatba vont fák esetében a szerző az alábbiak szerint végezte a keresztmetszeti statikai értékelést.

A keresztmetszet ismeretében számítható az adott mérési síkban a különböző terhelések (szél, illetve a fa súlya) hatására fellépő inercianyomaték, azaz másodrendű nyomaték. Mint ismert, a keresztmetszet alakja miatt az inerciának több különböző számítási módja ismert, itt csak a jellemző fa-keresztmetszetek inercianyomatéka kerül bemutatásra. Az egészséges, körhöz közelítő keresztmetszetű fa inerciája az átmérő (sugár) függvénye:

$$I = \frac{\pi \times r^4}{4} \quad (38)$$

Az ellipszishez hasonló keresztmetszetű fa inerciája az egymásra merőleges átmérők felével (a és b) jellemezhető:

$$I = \frac{\pi}{4} \times a \times b^3 \quad (39)$$

Az üreges, körgyűrűhöz hasonló keresztmetszetű fa inerciája a faátmérő sugarával (r_2) és az üreg átmérőjével (vagy az ennek megfelelő sugárral) jellemezhető (r_1):

$$I = \frac{\pi}{4} (r_2^4 - r_1^4) \quad (40)$$

A fentiek szerint az adott keresztmetszetben fellépő legnagyobb inerciát kell a következők szerint meghatározni, figyelembe véve az a tényt, hogy fák esetében csak az egyik tengely körül ébred hajlítónyomaték:

A fa középpontján keresztül egyenes (az inercia tengelye) fektetendő, ez lesz az x tengely. Ezután a következő képlet adja az inercianyomatékot:

$$I_x = \int_A y^2 \times dA \quad (41)$$

ahol:

I_x a keresztmetszet másodrendű nyomatéka (inercianyomaték) az x tengely körül

dA az elemi terület

y az elemi terület távolsága az x tengelytől, azaz a fa keresztmetszetének sugara

Szükség van a forgató (hajlító) nyomatékra is, amely a következők szerint számítandó (v.ö.: kidőlés lehetőségének számításánál a szélerő és súlyerő komponenseinek számításával):

Az erőhatást –mint korábban láttuk- többnyire a szél okozza, illetve esetenként a fa saját súlya képezi. Napjainkban a terjedő kalandparkok fára szerelt állomásai is többlet terhet okoznak, csakúgy, mint az erdészeti gyakorlatban abiotikus kártételnek ismert, fára rakódó csapadék (hó, ónos eső, zúzmara), amelyek adott esetben szintén számításba veendőek.

$$M = F_{sz} \times l + \frac{G \times l}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (42)$$

ahol:

l a korona súlypont magassága

α a fa hajlásszöge

G a fa súlya,

F_{sz} a fára ható szélerő

Ezt követően a fapalást pontjainak tengelyre merőleges távolságai közül a legnagyobbat kiválasztva, a következő képlettel kiszámítjuk a külső hatások által a fában ébredő maximális feszültséget.

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{I_x} \times y \quad (43)$$

A fa súlyából és a szélerő fatörzs irányú komponenséből, továbbá a kérdéses hatékony keresztmetszeti területből kapjuk a fa nyomófeszültségét:

$$\sigma_{ny} = \frac{F}{A} \quad (44) \text{ és ebből:}$$

$$\sigma_{ny} = \frac{G \times \sin \alpha - F_{sz} \times \cos \alpha}{A} \quad (45)$$

ahol:

A a tomogramból nyerhető egészséges (teherbíró) keresztmetszeti felület.

(A fa súlya a térfogat és az élőnedves sűrűség szorzata.)

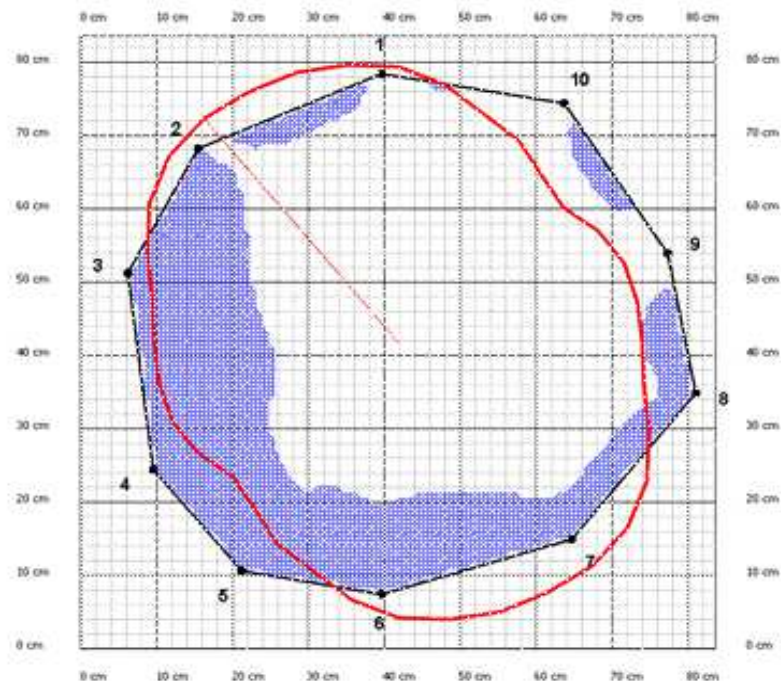
A fa keresztmetszeti nyomatékából számított maximális feszültséget növelni kell a fa súlyából és a szélerőből származó nyomófeszültséggel (mivel az adott keresztmetszetben ezek hatnak).

A két feszültség összegét a faanyag saját nyomó szilárdságának⁴³ ellensúlyoznia kell. Amennyiben a faanyag szilárdsága kisebb, mint a fellépő erők hatására keletkező szilárdság, a fa eltörik az adott keresztmetszetben. A faanyag szilárdsága és a fentiek szerint számított szilárdság hányadosa adja a biztonsági faktort.

$$\text{Biztonság. \%} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{ny}}{\sigma_{fa}} \times 100 \quad (46)$$

⁴³ Az egyes faanyagok szilárdsági értékei ismertek, nyilvános segédtablázatok tartalmazzák, többek között Molnár (2004), Molnár és Bariska (2002), Babos és mtsai (1979).

Ugyanezt a szoftver grafikusan is ábrázolja (59. ábra)



59. ábra A sajtoskáli cser mintafa talajtól 30 cm-re mért tomogramja és ugyanabban a síkban mért feszültsége. 2009. 07.10.

Az ábrán világoskék színnel jelölt rész a fa törzsének ábrán látható keresztmetszetében jelzi a mechanikailag még szilárd fa-részeket. A középső, nem színezett rész az üreg, vagy a szilárdságát már többé-kevésbé elvesztett rész. A piros vonal által határolt rész a fára ható külső erők által generált, számított feszültség a fa nyomószilárdságával együtt. A piros kontúrvonal azt mutatja meg, hogy egyes irányokban mekkora a szilárdsága (stabilitása) a törzsnek, az adott keresztmetszetben. Ahol a keresztmetszetben belül van, ott kielégítő az állékonyság, sőt, tartalékokkal is rendelkezik, ellenben ahol már kívül, ott nem. Minél inkább túlér a törzs keresztmetszetén, annál kevésbé biztonságos.

A Fakopp-tomográf szoftvere a megfelelő adatok bevitelét követően elvégzi helyettünk a hosszadalmas szilárdsági, biztonságossági számításokat. Eredményként a statikai tomogram kapható, amely kontúrvonallal jelzi a fa szilárdságának megoszlását az adott keresztmetszetben. A törzs alacsonyabb szilárdságát a kontúrvonalnak a fa középpontjától való távolságával jelzi, hosszával arányosan.

Ez a szabálytalan görbe vonal tulajdonképpen egy olyan modellezett, ugyanolyan fafajú faegyed keresztmetszetét jelöli, amelynek ugyanakkora térfogata, vitorlafelülete, korhadási aránya, mint a kérdéses fáé, csupán a keresztmetszeti alakja tér el („stabil fa”).

A legkisebb szilárdsággal jellemzett irányt sugár irányú piros egyenes mutatja.

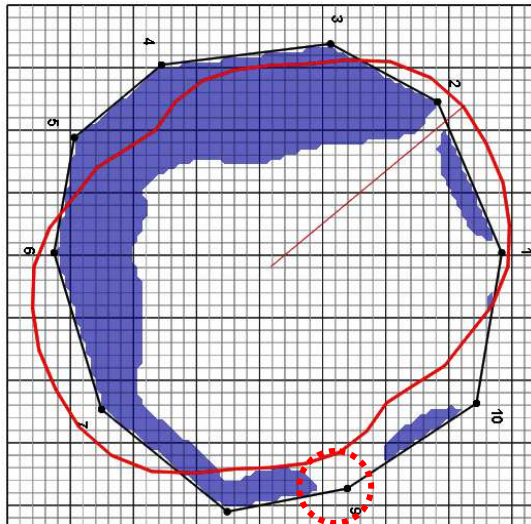
A vizsgálatba vont fák esetében több, a fenti módszertani leírásnak megfelelően (az eltérésekkel és az értelmezéssel együtt) jelen munkában is helyet kaptak.

Az eljárás a visual tree assessment (VTA) részeként alkalmazható.

A tomogramon alapuló statikai vizsgálatok eredményei

A törzs törésére vonatkozó statikai számításokat (a bemutatott indexeket is figyelembe véve) érdemes a statikai tomogramra alapozni. A keresztmetszeti terület ismeretében, továbbá a szélerő, koronafelület, légellenállás tényezője (alaki tényező), a súlypont távolsága, illetve a keresztmetszet középpontján áthaladó egyenestől a keresztmetszeten belül mért legnagyobb merőleges távolság birtokában a már ismert módon számítható az adott síkhoz tartozó inercianyomaték, valamint az ébredő feszültség.

A törzstörés eshetőségét, mint ahogyan az Anyag és módszer fejezetben is láttuk, a kalkulált feszültségek közül a legmagasabb ébredő feszültség (hozzáadva az adott fa nyomószilárdságát) és a vizsgált fafaj szilárdságának hányadosa adja. Az eredmény interpretálása (hasonlóan a többi biztonsági tényező értelmezéséhez) mérnöki feladat, de az 1,5, azaz 150%-os biztonság általában megfelelőnek ítélt.



60. ábra Statikai tomogram. taplóval, megerősödött terpeszekkel.



61. ábra A Fakopp berendezéssel vizsgált cser, A tomogramja a 63. ábrán tanulmányozható.

Az előbbiekre példa a 60-61. ábrákon látható cser a törésre nézve még kellő megbízhatósággal bír. Ebben jelentős szerepe van a vastagodó terpeszeknek, amelyek a statikai tomogramon is látszanak. A korhadást okozó gomba termőtestére a 60-61. ábrán jelölés hívja fel a figyelmet.

A tomogramon alapuló statikai vizsgálatok tapasztalatai

Rendszerezve az eddig ismertetett, szilárdságra vonatkozó magyarázatokat- a következőkre kell figyelni:

1. A fafajok nyomó- és további szilárdsági értékére az adatbázisok (Babos és mtsai, 1979; Molnár és Bariska, 2002; Zanne és mtsai 2009) kínálta információk értelmezhetetlenül nagy intervallumot tüntetnek fel. A már korábbi példa nyomán: a gyertyán nyomószilárdsága: 5400 – 8200 - 9900 N/cm². Feltűnő, hogy a felső értéknek itt is csaknem fele az alsó!
 2. Nyilvánvaló, hogy egyazon fán több szintben számított szilárdsági érték közül a legalacsonyabbat kell a legveszélyesebbnek ítélni, ám az elvárt biztonsági százalékot el nem érőkre egyaránt figyelni kell.
 3. A számításba vont többi tényező megbízhatóságáról szóló elemzés az 5.3.1. A fa adatai című részben foglal helyet.
 4. A szoftver által rajzolt statikai tomogram nagy segítség az értelmezésben (60-61. ábrák), ahogy az Az elvégzett vizsgálatok anyaga és módszerei fejezetben részletesen szerepelt.
 5. A beteg vagy üreges törzs mechanikai szempontból gyenge pontjaira a tomogram ráirányítja a figyelmet. A tomogramon piros egyenessel bejelölt legkisebb szilárdságú irány (60. ábra), azaz a legvalószínűbb dőlési irány értelmezésével kritikusan kell bánni, mivel a szoftver a mért adatok alapján számolt leggyengébb szilárdsággal rendelkező irányt veszi alapul. A mért, illetve bevitt adatok kisebb eltérése is jelentősen elfordíthatja ezt a berajzolt egyenest.
- A változatos keresztmetszeti felület, illetve a keresztmetszet feletti törzsrész kiegyensúlyozottságának pontatlan meghatározása, továbbá a tomogram esetleges bizonytalanságai miatt a szoftver által feltüntetett törésre veszélyes irányt azonban nem szabad egyetlen és kizárólagos iránynak tekinteni, hanem inkább jelzésnek kell értelmezni. Különösen azért sem, mert a terpeszek növekedésének, azaz a fa mechanikai védekezésének módjait a tomográffal nehézkes számításba venni.
6. Arról a statikai tomogram nem ad információt, hogy melyek a *további leggyengébb irányok*.