

AKUSZTIKUS TOMOGRÁFIA ÉLŐ FÁK VIZSGÁLATÁRA

DIVÓS PÉTER – DIVÓS FERENC*

A hangsebesség mérése kitűnő lehetőséget biztosít az élő fák rejtett hibáinak (üregek, korhadás) felderítésére. A cikkben bemutatott akusztikus tomográfia e módszer továbbfejlesztett változata, mely több érzékelő felhasználásával lehetőséget biztosít nem csak a hiba jelenlétének felderítésére, de annak pontos méretének és helyének meghatározására is. Ismertetésre kerülnek a módszer elméleti alapjai, a mérési eljárás, valamint az értékelés lehetőségei. A három ismertetett értékelési módszer közül a szűrt visszavetítés bizonyult a legeredményesebbnek. Ezzel az eljárással jó felbontású, pontos sebességtérkép készíthető, melynek segítségével a méréshatár fölötti méretű fahiba vagy üreg helye és mérete leolvasható. A gyakorlati mérések igazolták a módszer pontosságát.

Kulcsszavak:Roncsolásmentes faanyagvizsgálat, Hang terjedés, Akusztikus tomográfia

ACOUSTIC TOMOGRAPHY FOR LIVING TREE TESTING

Sound propagation velocity measurements have excellent potential for detecting hidden defects (cavities, brown rot) in trees. Acoustic tomography is an improved method that uses several detectors to assess not only the presence, but the exact size and location of the defects. The article describes the theoretical background and methodology of acoustic tomography, as well as the result analysis techniques. Of the three methods described in the paper, filtered backprojection proved to be most successful. This technique provides a high-resolution, accurate velocity map, that shows the exact size, shape and location of each defect or cavity whose size is above the measurement threshold. The accuracy of the method has been confirmed by practical trials.

Key words: Nondestructive testing of wood, Sound propagation, Acoustic tomography

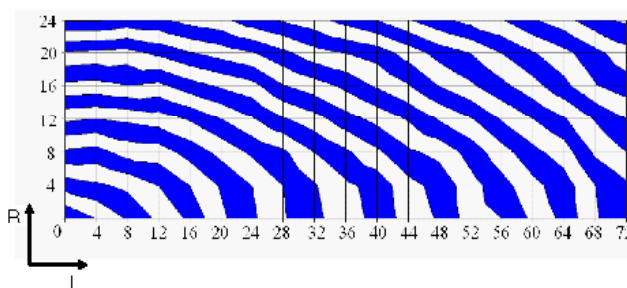
Bevezetés

Az idős fák környezetünket alapvetően meghatározzák; esztétikusak, megkötik a port és oxigént termelnek. Egy faszor, vagy park fáinak megítélésakor fontos a fa állapotának pontos ismerete. Városokban, utak mentén levő idős fák széles-viharos időben veszélyeztetik a környezetüket, különösen azok, melyek állékonyasága korhadás következtében meggyengül. A korhadás és annak mértéke legtöbbször kívülről nem látható. A fák sorsagyakran heves viták tárgya. A környezetükért aggódó lakosok és környezetvédő egyesületek ragaszkodnak a fákhoz, de anyagi felelősséget a fák okozta károkért nem tudnak vállalni. A fatörzs belső állapotának ismerete alapvetően befolyásolja a fa megítélését.

Hangsebesség méréseivel a fa törzsében levő üregek, korhadások mérete és elhelyezkedése meghatározható. Már 10 éve létezik és használják is a gyakorlatban azt a technikát, mely a fába beszűrt kettő darab érzékelő között méri a hangnak a terjedési sebességét. A sebesség csökkenése jelzi a két érzékelő által kijelölt vonalon a korhadás jelenlétét. Az érzékelők számának növelésével lehetőség kínálkozik a vizsgált síkban a korhadás helyének és nagyságának meghatározására is. A következőkben bemutatjuk a berendezés működését, és ismertetjük a kiértékelésre használt módszert.

Hanghullám terjedése fában

A faanyagban haladó hanghullámok terjedési sebessége függ az anatómiai iránytól, ezért a hullámfront közel ellipszoid felületnek tekinthető. Az **1. ábrán** a longitudinális rezgés kísérletileg meghatározott hullámfrontját látjuk az L-R síkban. Leggyorsabban a longitudinális hullámok terjednek; sebességük rostirányban meghaladja az 5000 m/s-ot, radiális és tangenciális irányban pedig megközelíti a 2000 m/s-ot. A hangsebesség adatok függnek a fafajtól és a nedvességtartalomtól is, különösen a rosttelítettségi pont alatt. (Bucur, 1995)



1. ábra: Longitudinális hullám frontja egy 24x72 cm-es fenyő deszkában. A bal alsó sarokból induló hullámfront alakját 10 μ s-os lépésekben ábrázoltuk.

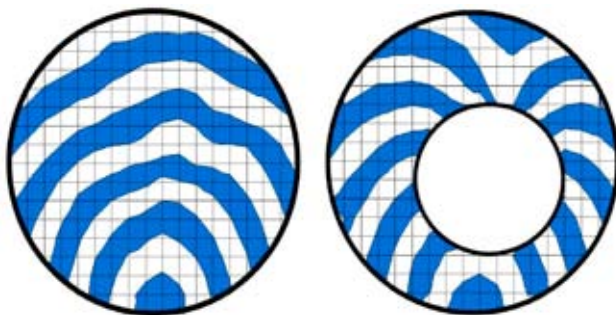
*Divós Péter II. éves mérnök-fizikus hallgató, BME. - Dr. Divós Ferenc egyetemi docens, NYME

1. táblázat: Néhány fajaj jellemző hangsebesség adata

Fajaj	Radiális hangsebesség [m/s]	Rostirányú hangsebesség [m/s]
Nyárfa	1240	4200
Lucfenyő	1470	5200
Feketefenyő	1480	5100
Vörösfenyő	1490	5100
Tölgy	1620	4600
Bükk	1670	4900
Hárs	1690	4400
Juhar	1690	4800
Akác	1850	4700



2. ábra: A hang terjedési ideje egészséges és korhadt fában, rostirányra mérőlegesen. A hang egy lehetséges útját a szürke vonal jelzi



3. ábra: A hullámfront terjedése egy 32 cm átmérőjű ép (a) és üreges (b) tölgyfa korongban. A hanghullám a korong alsó széléről indul. A hullámfrontot 20 µs-os időközönként ábrázoltuk.

Néhány fafajra jellemző radiális és rostirányú hangsebességet tartalmaz az **1. táblázat**. A rostirányú hangsebesség a túlevelű fákban nagyobb, mint a lombosokban.

A nedvességtartalomtól való függés elsősorban a 0-30%-os tartományban meghatározó. Rosttelítettség felett a cellulóz rostok állapota már nem változik, és a hangsebesség lényegében független a nedvességtartalomtól. Mivel élő fák esetében a nedvességtartalom mindig meghaladja a rosttelítettségi határt, ezért a nedvességtartalom nem befolyásolja az élő fák vizsgálatát.

A hang terjedését üregek jelenléte vagy korhadás

jelentősen befolyásolja (Bethge-Matteck, 1993). A korhadást okozó gombákat két fő csoportba sorolhatjuk: barna és fehér korhasztó gombák. A barna korhasztó gomba a fehér cellulózt bontja, ami felelős a hang továbbításáért is. A barna korhasztott faanyag jó közelítéssel üreggel helyettesíthető. A fehér korhasztó gomba a lignint bontja le a fában. Az ilyen fahiba akusztikus detektálása nehéz, mert csak kismértékben változtatja meg a faanyag akusztikai tulajdonságait.

Amikor egy korhadt élő fát két érzékelő segítségével vizsgálunk, a hang áthaladási idejének növekedését rendszerint az úthossz növekedésével magyarázzuk (**2. ábra**). A hang természetesen nem csak egy vonal mentén terjed, hanem hullámfront formájában halad végig a faanyagban. Ennek a hullámfrontnak a terjedését szemlélteti a **3. ábra** egy 32 cm átmérőjű ép (a) illetve 12 cm átmérőjű üreget tartalmazó (b) tölgy fakorongban.

Hangsebesség mérése élő fában

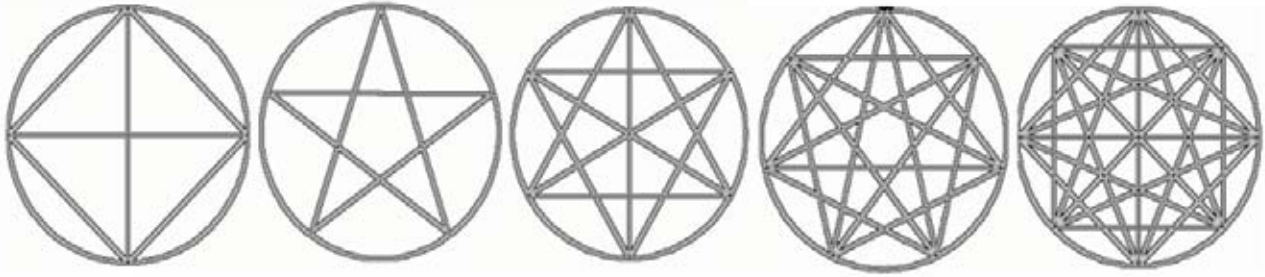
A hangsebesség mérése két pont között

A hangsebesség méréséhez két gyorsulásérzékelőt szúrunk a vizsgált fába. A gyorsulásérzékelő tűskével van ellátva azért, hogy a hangot a kérgen átvezesse. A hangot a gyorsulásérzékelőre mért kalapácsütéssel keltjük. A megütött érzékelő jele elindít egy számlálót, mely az 1MHz-es oszcillátor impulzusait számolja. Amikor a hang megérkezik a fa túoldalára, akkor annak jele megállítja a számlálót és így előáll a terjedési idő µs-os felbontásban. Mivel a legelőször megérkező jel állítja meg a számlálót, a leggyorsabban terjedő longitudinális hullám terjedési idejét mérjük. Az említett elven működik a NyME Roncsolásmentes Faanyagvizsgáló Laboratóriumában kifejlesztett Fakopp mikroszekundumos óra.

Az értékelés alapja a mért hangsebesség, melynek kiszámításához meg kell mérni az érzékelők közti távolságot átlalóval. Az értékelés a relatív hangsebesség csökkenés alapján történik; viszonyítási alap az egészséges fa hangsebessége. 10 %-ot meghaladó csökkenés esetében joggal feltételezhetjük, hogy az érzékelők közötti vonalban hiba (üreg vagy korhadás) található (Divós és Mészáros 1994).

A hangsebesség mérése több érzékelővel

Ha kíváncsiak vagyunk a korhadás helyére és nagyságára is, akkor nem elegendő csupán egyetlen vonal mentén mérni a hangsebességet, hanem több pont között kell elvégezni a mérést. A **4. ábrán** a 4, 5, 6, 7 illetve 8 érzékelős összeállítás esetén a mérhető „útvonalak” láthatók. A szomszédos érzékelők közötti vonalak csak a négy érzékelős változatban szerepelnek.



4. ábra: Több érzékelős elrendezésben vizsgálható „útvonalak”

Az érzékelők számának növelésével egyre jobban, egyre érzékenyebben fedjük le a vizsgált keresztmetszetet. Ha az érzékelők száma N , akkor $N(N-1)/2$ útvonalon tudjuk meghatározni a hangsebességet. A 4. ábrán felrajzolt vonalak különböző anatómiai irányokat tükröznek. Ha N érzékelőt használunk, akkor $N/2$ egészrésze számú különböző anatómiai irányban jutunk hangsebesség adathoz a rostokra merőleges RT síkban. Ez azért fontos, mert a hangsebesség függ az anatómiai iránytól, radiális irányban 10-30%-kal nagyobb, mint tangenciális irányban. Az értékelés során ezt figyelembe kell venni. Ez úgy történik, hogy a radiális irány kivételével mindegyik sebességet egy korrekciós tényezővel megszorozzuk azért, hogy a mérés helyén a radiálissal egyenértékű sebességet kapjunk.

További mérés technikai érdekesség, hogy az érzékelő túske és a hozzá érkező hullámfront felülete által bezárt szög befolyásolja a detektált jel amplitúdóját, nevezetesen, ha a túske α szöget zár be a hullámfronttal, akkor $\sin(\alpha)$ tényezővel változik a jel nagysága. A jel nagysága sajnos kismértékben befolyásolja a mért terjedési időt is. Csökkenő amplitúdó kismértékben csökkenő sebességet eredményez. Ezt a jelenséget szintén figyelembe kell venni a korrekciónál. Az anatómiai irány és a mérés technikai hiba együttes hatását egy 6 csatornás elrendezés esetében a 2. táblázatban szereplő korrekciós tényezők segítségével lehet figyelembe venni. Ezekkel megszorozva a mért adatokat egységesen a radiálissal egyenértékű hangsebességet kapunk. Ez a korrekciós tényező fajfaj és anatómiai irányfüggő. A táblázatban a radiális iránynak 0° , a tangenciálisnak 90° felel meg.

Az érzékelők számának növelésével lehetőség kínálkozik a felbontás növelésére. A felbontás csak egy bizonyos – jelenleg vizsgált – határig növelhető, de az érzékelők számát minden bizonnyal nem éri meg végtelenségig növelni, mert egy idő után nem jutunk többlet információhoz.

A többcsatornás mérésre a korábban ismertetett elv alapján elkészült egy műszer, mely maximálisan 32

érzékelőt képes fogadni. Két-két érzékelőhöz tartozik egy erősítő doboz. Az erősítő dobozok RS232-es soros vonalon küldik a mért adatokat az adatgyűjtő és értékelő számítógéphez. Az egyik érzékelőt megkoppintva az összes többi megméri a hang beérkezési idejét. Az érzékelők közti távolság-adatokat szintén átlalóval határozzuk meg, háromszögeléses módszerrel. N érzékelőhöz $2N-3$ úthosszat kell mérni. Az 5. ábrán egy platánfa vizsgálata látható egy 8 csatornás mérési elrendezésben. Ezt a berendezést hívjuk akusztikus tomográfának. Megfelelő kiértékelést alkalmazva létrehozhatjuk az érzékelők által kijelölt sík radiális hangsebesség térképét.

2. táblázat: Korrekciós tényezők az anatómiai irány és fajfaj függvényében

Fajfaj	Radiális iránnyal bezárt szög	0	30	60
	Anatómiai irány	radiális	-	közel tangenciális
Tölgy		1	1,09	1,21
Bükk		1	1,05	1,1
Hárs		1	1,19	1,31
Vadgesztenye		1	1,18	1,33
Lucfenyő		1	1,17	1,30

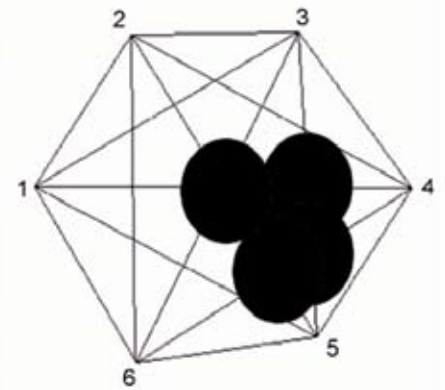


5. ábra: Akusztikus tomográf 8 csatornás elrendezésben platánfa vizsgálata közben

4. Kiértékelési módszerek

Három különböző algoritmust használtunk a kiértékeléshez, a korhadás vagy üreg helyének és nagyságának megjelenítéséhez: a relatív vonalsebesség csökkenésén alapuló eljárást, valamint az angol szaknyelvben cella alapú backprojection és filtered backprojection néven ismert módszereket. A magyar nyelvű szakirodalomban nem találtuk meg e kifejezések megfelelőit, ezért azokat a továbbiakban visszavetítésnek illetve szűrt visszavetítésnek fogjuk nevezni. Mindhárom algoritmus feltételezi, hogy

- a hullám a fában egyenes vonalban terjed, azaz a tomográfiai probléma lineáris
- a hangsebesség a fában a hullám terjedési irányától független, ami a mért értékek korrekciója után teljesül is.



6. ábra: A relatív vonalsebesség csökkenésén alapuló eljárással kimutatott üreg.

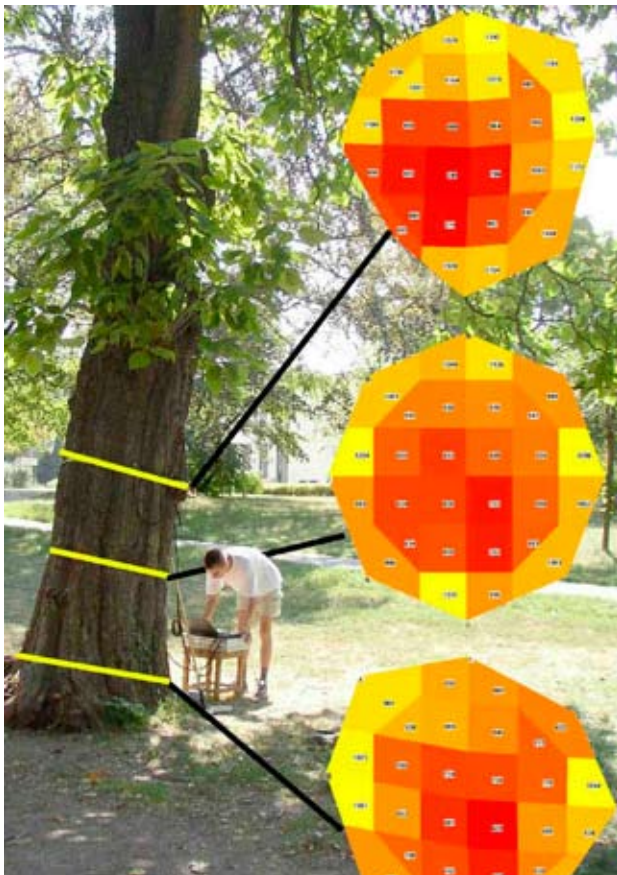
Relatív vonalsebesség csökkenésén alapuló eljárás

Meglehetősen egyszerű értékelési módszer, mely csak tájékoztató jellegű eredményt ad. Az eljárás a diszkrét tomográfia körébe tartozik, mivel a visszaállított kép értékkészlete diszkrét, ebben az esetben bináris.

A módszer lényege az, hogy ha valamelyik vonalon a sebesség egy referenciaszint alá esik, akkor ezt a vonalat hibásnak jelöljük. A képet úgy alkotjuk, hogy két egymást metsző hibás vonal metszéspontjában egy fekete foltot helyezünk el, ez jelöli a hibát (6. ábra). A referenciasebességet a szomszédos érzékelők között mért vonalsebességek átlagából kapjuk, feltételezve, hogy a fa a kéreghez közeli részen egészséges. Ha valamely részen mégsem lenne egészséges, akkor ez általában kívülről is jól látható (pl. fagyrepedés, üreg, stb.), így azok az adatok a felhasználó utasítására kimaradnak a referencia sebesség számításából. Ezzel a módszerrel azonban csak a nagyobb hibák találhatók meg, a kisebb hibák rejtve maradnak, továbbá nem jelenít meg sebességtérképet, csak fekete foltokkal jelöli a hibás részeket. Az első változat egy PSION REVO marokszámítógépen futott 2002-ben. A program, melynek előnye a gyors futás volt, ma már nincsen használatban.

Cella alapú visszavetítés

A módszer elméleti alapjait Berryman írta le (Berryman, 1990). Lényege, hogy a vizsgált keresztmetszetet cellákra osztjuk (7. ábra). Minden cellára kiátlagoljuk a rajta keresztül menő vonalak sebességének reciprokát, melyet lassúságnak nevezünk. Így kapjuk meg a cella lassúságát és reciprok képzéssel a hangsebességet.



7. ábra: Szivarfán (*Catalpa bignonioides*) több magasságban cella alapú visszavetítéssel elkészített kép.

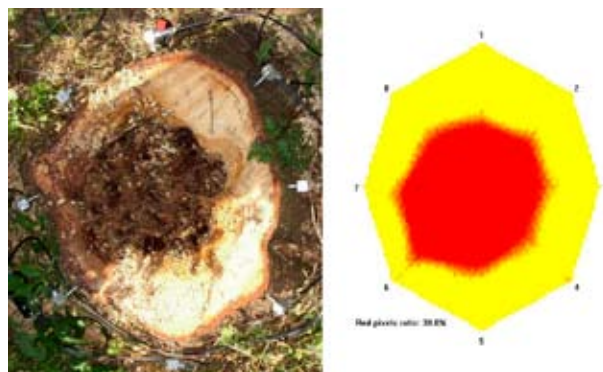
A felbontás egyik korlátja az, hogy minden cellán keresztül kell mennie legalább egy, de inkább kettő vonalnak, így a cellák száma egy határon túl nem növelhető. Az értékelő program bemenete egy fájl, ami tartalmazza az érzékelők C_i pozícióit, és a mért T_{ij} időadatokat, ahol i és j 1-től N -ig, az érzékelők számáig fut. Az előző programhoz képest nagy előrelépés, hogy ez a változat már sebességtérképet jelenít meg. Ezzel az eljárással kisebb hibákat is meg lehet találni, viszont a hiba kontúrja a gyenge felbontás miatt pontatlanul jelenik meg. Ez a visszavetítési módszer hátránya.

Szűrt visszavetítés

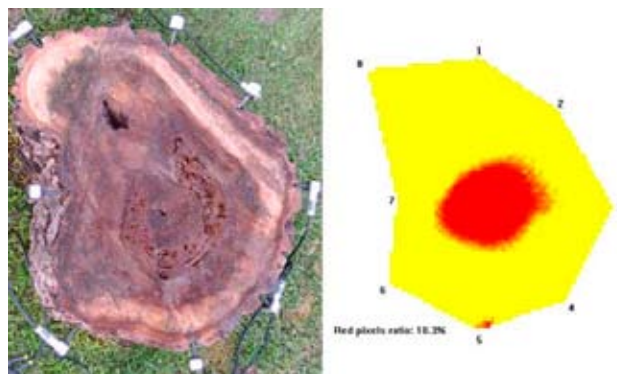
A módszer elméleti háttérét Deans (1983) adta meg. Ezt a módszert alkalmazzák a kórházi tomográfok képalkotásánál is. A szűrés a Fourier transzformáció alapul. Az algoritmus ismertetésére hely hiányában nem kerül sor. Az eredményül kapott képen a keresztmetszet hangsebesség-eloszlása jelenik meg.

A programban a piros és sárga színekhez hozzárendelhető két sebességérték. A piroshoz rendeltnél alacsonyabb sebességű pontokat pirossal, a sárgához rendelt sebességnél magasabb sebességűeket sárgával, az ezek közöttiek pedig lineárisan piros és sárga közötti színátmenettel jelöli a program. A hibahelyek így piros színnel jelentkeznek. A program – a korhadt felület arányának becslésére – kiszámítja a piros felület arányát a teljes felülethez viszonyítva.

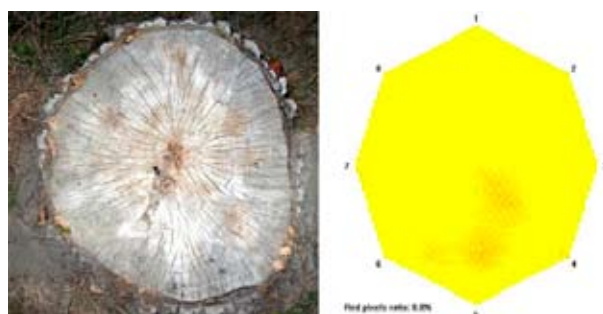
Ez a módszer újabb előrelépés az előzőhöz képest, a felbontás tovább finomodott. Hátránya, hogy a kép sohasem lesz tökéletes, mivel a Fermat-elvet figyelmen kívül hagyja. A Fermat-elv ugyanis kimondja hogy a hullám két pont között nem a legrövidebb úton halad, hanem azon, amelyen a leggyorsabban ér célhoz. Ezért az útvonal görbülhet is. Ezért van az, hogy a fában lévő üreg helyére 8-900 m/s hangsebességet származtat az algoritmus, a tényleges 340 m/s helyett. A szűrt visszavetítési módszer egyik legfontosabb előnye, hogy a felbontás határa már nem az értékelési módszerben van, hanem fizikai korlátoktól függ, nevezetesen egyrészt az érzékelők számától, másrészt, pedig attól a törvényszerűségtől, hogy a hullámhossz felénél kisebb hibákat gyakorlatilag nem lehet kimutatni. A kalapáccsal keltett hullám hossza 10 cm nagyságrendű. Alternatív módszerként használhatnánk ultrahangot is, melynek hullámhossza pár milliméter, azonban az ilyen nagyfrekvenciás hullámok fában erősen csillapodnak. Ezért a legkisebb kimutatható hiba mérete 5-10 cm körül van.



8. ábra: Lucfenyő vágási képe és a tomográfus vizsgálat eredménye



9. ábra: Diófa vágási képe és a tomográfus vizsgálat eredménye. A felső, kisméretű üreg nem volt kimutatható



10. ábra: Egészséges nyárfa vágási képe és a tomográfus vizsgálat eredménye

Az eljárás szemmel látható előnye, hogy a kép részletgazdagabb, mint a cella alapú eljárásnál, és sokkal kisebb hibák is kimutathatók. Ezt az eljárást a gyakorlatban jó eredménnyel alkalmazzák. Erről tanúskodnak a 8-10. ábrák is.

Összefoglalás

A hangsebesség mérésén alapuló akusztikus vizsgálat kitűnő módszer a rejtett korhadás felderítése élő fákban. A hangsebesség csökkenése jelzi a korhadás vagy üreg jelenlétét. A többcsatornás akusztikai tomográfias vizsgálat nem csupán a hiba jelenlétét, de annak helyét és méretét is képes kimutatni bizonyos határok között.

Háromféle algoritmus alapján értékelő programot mutattunk be a hangsebesség adatok elemzésére. Ezek a következő elveken működnek:

- az egyes vonalak direkt értékelése relatív hangsebesség változás alapján,
- a sebességek meghatározása véges számú cellában visszavetítés algoritmussal,
- lineáris szűrt visszavetítés algoritmus

Az egyes értékelési metódusok előrelépést jelentettek, a sebességtérkép megjelenítésében, illetve a felbontás növekedésében. A kifejlesztett módszert már a gyakorlatban is megbízhatóan alkalmazzák.

Irodalomjegyzék

1. Berryman, J. G. 1990. **Lecture notes on Nonlinear Inversion and Tomography**, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA
 2. Bucur, V. 1995 **Acoustics of wood**. CRC Press, Boca Raton, FL, USA
 3. Deans, S. R 1983. **The Radon Transform and Some of Its Applications**, Wiley and Sons, NY.
 4. Dívós F., Mészáros K. 1994. **Root decay detection by stress wave technique**. In: Proc. 1st European Symposium on Nondestructive Testing, Sopron.
 5. Mattheck, C.G., Bethge K.A. 1993. **Detection of decay in trees with the Metriguard Stresswave timer**. Journal of Arboriculture 16(6):374-378.
-