

Kánnár Antal

**AZ AKUSZTIKUS EMISSZIÓS KÍSÉRLETI  
TECHNIKA ALKALMAZHATÓSÁGÁNAK  
VIZSGÁLATA A FAANYAG MECHANIKAI  
TULAJDONSÁGAINAK  
MEGÍTÉLÉSÉRE**

Doktori (PhD) értekezés

Témavezető:  
Dr. Szalai József c.Sc.  
egyetemi tanár

Nyugat-Magyarországi Egyetem  
Faipari Mérnöki Kar  
Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola

2004

**AZ AKUSZTIKUS EMISSZIÓS KÍSÉRLETI TECHNIKA  
ALKALMAZHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATA A FAANYAG MECHANIKAI  
TULAJDONSÁGAINAK MEGÍTÉLÉSÉRE**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében  
\*a Nyugat-Magyarországi Egyetem  
Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskolája  
.....programjához tartozóan\*.

Írta:  
**Kánnár Antal**

\*\*Készült a Nyugat-Magyarországi Egyetem Cziráki József Faanyagtudomány és  
Technológiák Doktori Iskola

**Fa- és Fatechnológiai tudományok** programja keretében

Témavezető: **Dr. Szalai József**

Elfogadásra javasolom (igen / nem)

(aláírás)\*\*

A jelölt a doktori szigorlaton % -ot ért el,

Sopron,

.....  
a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javasolom (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,

.....  
a Bírálóbizottság elnöke

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

.....  
Az EDT elnöke

Megjegyzés: a \* közötti részt az egyéni felkészülők, a \*\* közötti részt a szervezett képzésben résztvevők használják.

## Tartalomjegyzék

### Bevezetés

<b>I. Az akusztikus emissziós anyagvizsgálati módszer és alkalmazási területeinek bemutatása</b>	5
I.1. Az akusztikus emissziós faanyagkutatások szakirodalmának áttekintése	8
I.2. A kutatásokban használt akusztikus emissziós mérőrendszer és mérési metodika bemutatása	16
<b>II. Hullámterjedés szilárd testben</b>	19
II.1. A hullámterjedés sebességének változása különböző befolyásoló faktorok mellett	23
<b>III. A nedvességtartalom és a fafaj hatása az akusztikus csillapításra</b>	27
<b>IV. Az akusztikus emissziós mérések frekvenciatartományának meghatározása faanyag esetén</b>	31
IV.1. A nedvességtartalom hatásának vizsgálata a faanyag akusztikus emissziós frekvenciatartományára	32
IV.2. Az egyes fafajok akusztikus emissziós frekvenciatartományának meghatározása	35
IV.3. Az alakváltozási sebesség hatása a faanyag akusztikus emissziós frekvenciájára	37
IV.4. Az igénybevétel hatása a faanyag akusztikus emissziós frekvenciájára	39
<b>V. Az akusztikus emissziós jellemzők függése különböző befolyásoló tényezőktől</b>	41
V.1. A nedvességtartalom befolyásának vizsgálata a faanyag akusztikus emissziós tulajdonságaira	42
V.2. A különböző fafajok akusztikus emissziós jellegzetességei	51
V.3. Az alakváltozási sebesség hatása a faanyag akusztikus emissziós tulajdonságaira	59
V.4. Az igénybevétel hatása a faanyag akusztikus emissziós tulajdonságaira	64
<b>VI. A terhelési előtörténet hatása a faanyag akusztikus emissziós tulajdonságaira: Kaiser effektus vizsgálatok erdeifenyő akusztikus eseményeivel kapcsolatban</b>	71
<b>VII. A faanyag tönkremeneteli folyamatai makro- és mikro- szinten</b>	80
VII.1. A faanyag mikro-szerkezete	80
VII.2. A faanyag makro- szintű tönkremenetele	84
VII.3. Tönkremeneteli módok	85
VII.3.1 Rostokkal párhuzamos húzás	85
VII.3.2. Rostokkal párhuzamos nyomás	86
VII.3.3. Nyírási tönkremenetel	87

VII.4.	Összefoglalás	88
VII.5.	A faanyag mikro-szintű tönkremenetele	88
VII.5.1.	Rostokkal párhuzamos húzás	90
VII.5.2.	Rostokkal párhuzamos nyomás	91
VII.5.3.	Nyírási tönkremenetel	92
VII.6.	Összefoglalás	93
VII.7.	A faanyag mikro-tönkremeneteli folyamatainak összefüggései a vizsgált lucfenyő faanyag nedvességtartalmával	94
VII.8.	A mikro-tönkremeneteli folyamatok jellegzetességei a kutatásokban használt különböző fafajok esetén	99
<b>VIII.</b>	<b>A tönkremeneteli folyamatok és az akusztikus emisszió keletkezési helyeinek összefüggései</b>	<b>105</b>
<b>IX.</b>	<b>A faanyag akusztikus aktivitásának kezdete és az alakváltozási, feszültségi jellemzők kapcsolata</b>	<b>108</b>
<b>X.</b>	<b>Az akusztikus emissziós események mennyisége és a szilárdság kapcsolata</b>	<b>111</b>
<b>XI.</b>	<b>Tézisek</b>	<b>113</b>
<b>XII.</b>	<b>Publikációk</b>	<b>117</b>
<b>XIII.</b>	<b>Felhasznált irodalom</b>	<b>119</b>
<b>XIV.</b>	<b>Mellékletek</b>	<b>126</b>
I. melléklet	A mérési körülmények szemléltetése képekben	126
II. melléklet	A mérések során kapott események időbeni lefutásának és frekvencia spektrumának szemléltetése	127
III. melléklet	Az akusztikus emisszió bemutatása különböző nedvességtartalom, alakváltozási sebesség, igénybevétel és fafaj esetén	131
IV. melléklet	Az AE események mintaszámának megválasztása a kiértékeléshez akác fafaj esetén	144
V/A. melléklet	Kaiser effektus vizsgálat eredményei erdeifenyő mintákon az előterhelést tehermentesítés után azonnal, 15 napra, 1 hónapra, 2 hónapra valamint áztatást és klimatizálást követő, törésig menő terhelés esetén	146
V/B. melléklet	Az előterhelést 1 hónapra ill. áztatás és klimatizálást követő töréssel kapcsolatos Kaiser effektus vizsgálatok energia sűrűség függvényei az előterhelési szint alatt	155
VI. melléklet	Rostokkal párhuzamosan húzott faanyag tönkremenetelének elektron-mikroszkópos képei	159
VII. melléklet	Rostokkal párhuzamos nyomás hatására bekövetkezett tönkremenetek elektronmikroszkópos felvételei	162
VIII. melléklet	Nyírásnak kitett faanyag tönkremenetelének elektronmikroszkópos felvételei	164
IX. melléklet	Saját elektronmikroszkópos felvételek a faanyag törési természetének bemutatásához	166
X. melléklet	Példák a tönkremeneteli folyamatok helyének szemléltetésére nyár, bükk és akác fafaj esetén	169

## Bevezetés

A faanyag használata az emberiség történetének kezdetétől napjainkig a mindennapi élet szerves része. Bár a felhasználás módjai nagyon szerteágazóak, egyre nagyobb figyelem irányul a teherviselő faszerkezetekre, ezen belül a mérnöki faszerkezetekre, melyek a hagyományostól eltérő formájú, új szerkezetű épületek kialakítását teszik lehetővé, korunk követelményeinek megfelelően. Az egyre növekvő igények és új szerkezeti megoldások keresése növekvő igényt támasztanak a faanyagtudomány irányába is pontosabb és tervezhetőbb anyagismereti modellek felállítására, melyek a szerkezetek kialakításának biztonságát és gazdaságosságát egyaránt növelik. Ezen igényből fakadóan az elmúlt hét esztendőben a faanyagtudomány anyagismereti oldalát elmélyítendő, egy a fakutatás területén új módszer, az akusztikus emissziós analízis lehetőségeit kutattam, a faanyag fizikai-mechanikai tulajdonságainak meghatározásával kapcsolatban. A módszer lényege, hogy a terhelés alatt álló faszerkezet belső tönkremenetelei során képződő rugalmas hullámokat detektálja, így értékes információkat ad a faanyag tönkremeneteli folyamatainak kutatásához. Az akusztikus emissziós technika az 1950-es évektől képző kutatások, majd a '70-es évektől ipari alkalmazások tárgyát. Magyarországon 1976-ban kezdtek el foglalkozni a módszer lehetőségeinek vizsgálatával, majd hazai bevezetésének lehetőségeivel a Központi Fizikai Kutatóintézetben (KFKI). A bevezetés apropója a paksi atomerőmű reaktortartályainak, fokozottan igénybevett részeinek ellenőrzése, üzem közben és nyomáspróbák során. Ők fejlesztettek ki egy DEPHECTOPHONE műszer együttest, melyet egészen napjainkig alkalmaznak az atomerőműben. A saját vizsgálataimat magam is ezen műszer idő közben továbbfejlesztett változatával végeztem el. A módszert tehát elsősorban fém szerkezetek vizsgálatára fejlesztették ki, de később számos más területen - így szálerősítésű műanyagokra, ásványok vizsgálatára - is sikeresen alkalmazták. Faanyagkutatás területén is számos próbálkozás történt szerte a világon a fakutatás egyes részterületein, de átfogó munka ismereteim szerint még nem készült a faanyag akusztikus emissziós tulajdonságainak feltárására. Munkám célja éppen ezért ezen alapkutatás elvégzése volt, melyben igyekeztem tisztázni a legalapvetőbb befolyásoló tényezők - mint nedvességtartalom, fafaj stb.- hatását a faanyag mechanikai és tönkremeneteli sajátosságaira. Az elkészült munka három fő részre tagolható, az első részben a nemzetközi kutatások eredményeit és a mérőrendszer ismerveit tekintem át, a második nagyobb egység a faanyag akusztikus emissziós tulajdonságait tárgyalja különböző befolyásoló faktorok mellett, míg a harmadik részben az akusztikus emissziós vizsgálatok során kapott eredményeket elektronmikroszkópos vizsgálatok eredményeivel vettem össze, a tönkremeneteli folyamatok jobb megértése érdekében. Remélem, hogy kutatásaimmal és eredményeimmel a teherviselő faanyag viselkedésének alaposabb megértését, így pontosabb tönkremeneteli modell megalkotását sikerült megalapoznom a gyakorlat számára.

## I. Az akusztikus emissziós anyagvizsgálati módszer és alkalmazási területei

Az akusztikus emisszió (továbbiakban AE) jelenségén a szilárd testben tárolt energia felszabadulása közben keletkező rugalmas hullámokat értjük. Az AE tehát nem más mint anyaghang, "beszéd". Minden anyag más-más nyelven "beszél". Nekünk ezt a "nyelvet" kell megértenünk, feldolgoznunk az anyaggal kapcsolatos vizsgálatok során.

A fakutatásban Magyarországon eddig még nem alkalmazták a módszert, így kutatásunk alaputatás jellegű. A témában egyetlen magyar nyelvű könyv áll rendelkezésre:

Akusztikus emissziós anyag- és szerkezetvizsgálatok címmel. Szerkesztette Dr. Pellionisz Péter (GTE. Bp. 1992.). A könyv ismerteti az AE mint mérési módszert, egyéb vizsgálatoktól való eltérését. Betekintést nyújt a módszer mérés technikai alapjaiba, a jelek érzékelésétől a jelfeldolgozásig. Megjelöli azokat a külföldi szabványokat és ajánlásokat melyek a témával kapcsolatosak és amelyek alapján méréseket el lehet végezni. A könyv második fele az ipar azon szakterületeit mutatja be, ahol sikeresen alkalmazták. A szakkönyv összefoglaló műnek tekinthető az AE témában. Felöleli annak hazai alkalmazását és az alkalmazás eddig elért eredményeit. A módszer bemutatásánál egyrészt ezen műre valamint Nondestructive Testing Handbook 5. Acoustic emission testing szakkönyvre támaszkodom. Ezen szakirodalmi alapművek elsősorban fémvizsgálatokkal kapcsolatos ismereteket tartalmaznak, de természetesen ezen ismeretek döntő többsége faanyag AE vizsgálataira is érvényes.

A keletkező AE hullámok tartománya a  $10^5$ - $10^6$  Hz fémekben.

Az AE forrásait négy csoportba sorolhatjuk:

- diszlokációs mozgások
- fázisátalakulások
- súrlódások
- repedés-kialakulás és növekedés

Ha az AE-t roncsolásmentes vizsgálatra akarjuk alkalmazni elsősorban a makroszkopikus forrásokat vizsgáljuk. Ezen jelenségek csoportjai:

- képlékeny zóna növekedés repedésterjedés nélkül
- repedés növekedés
- törés
- fáradás
- korrózió
- feszültség-korrózió (kémiai degradálódás)

Meg kell még említeni azokat a jelenségeket melyek a AE tartományba eső zavaró jeleket képeznek:

- súrlódás, dörzsölés (pl. felfekvési felületeken)
- elektromos kisülés

- szivárgás
- elszabadult tárgyak felütődése
- turbulens áramlási jelenségek

Az egyes anyagok akusztikus aktivitása különböző. Az anyagok következő tulajdonságai növelik az AE aktivitást:

- nagy szilárdság
- nagy feszültségkoncentráció
- alacsony hőmérséklet
- anizotrópia
- inhomogenitás
- rideg törés

Az AE aktivitást hátráltató jelenségek az előbbiekkal ellentétes tulajdonságok.

Az anyagban keletkező AE jelenségeknek alapvetően két típusát különböztetjük meg:

- folyamatos
- kitöréses

A két jel típus elsősorban a kitörések számában különbözik. Folyamatos jelnél a kitörések olyan gyakoriak, hogy gyakorlatilag egy folytonos jelet kapunk.

A különböző anyagok vizsgálata során egy érdekes jelenséget figyeltek meg. Sok anyag a terhelése során nem válik akusztikusan aktívvá mindaddig, míg a terhelés által okozott feszültség csúcserőke el nem éri azon maximális értéket, melyet az anyag már elszenvedett. Az anyag "emlékszik" előző csúcsterhelési szintjére. A jelenséget Kaiser effektusnak nevezzük (Kaiser 1953).

Az AE forrásai azon anyaghibák melyek terhelés hatására növekednek. A módszer az adott terhelési szinten aktív anyaghibákat tárja fel, hiszen akusztikusan csak ezek aktívak. Egyetlen mérés során az egész szerkezet feltárható, így gyors szűrővizsgálatnak tekinthető. Az egyéb roncsolás mentes vizsgálatoktól két dologban tér el:

- a megfigyelt jel magából az anyagból származik, nem külső forrásból
- az AE dinamikus ellenőrzés, mely a szerkezetre ható aktív igénybevételekhez kapcsolódik

Az AE előnyei a következőkben foglalhatók össze:

- az adott terhelési szinten aktív hibahelyek válaszát mutatja ki
- a hagyományos műszerek által hozzáférhetetlen hibákat is felderíti, a teljes szerkezet hibáiról feltárja egyetlen mérés során
- üzem közben is elvégezhető az egyes mérés pl. tartályok esetében
- a méréssel egyidejűleg lehetőség van az azonnali kiértékelésre, ha szükséges beavatkozásra
- olcsó és gyors szűrővizsgálatnak tekinthető, csak akkor szükséges egyéb vizsgálat ha AE hibát jelez.

## Az AE alkalmazási területei

Az elméleti bevezető után most rátérek az AE alkalmazási területeinek ismertetésére.

Az AE mintegy három évtizede képző kutatások tárgyát azóta a következő területeken alkalmazták sikeresen:

- mechanikai tulajdonságok vizsgálata
- törésmechanikai vizsgálatok
- tartályok , csővezetékek integrált vizsgálata
  - gyártásközi ellenőrzés
  - üzembevételi ellenőrzés
  - üzemi ellenőrzés ( folyamatos, periodikus )
- repedéskeletkezés, terjedési vizsgálat
- repedésmentesség vizsgálata
- nagy, összetett szerkezetek vizsgálata
- hegesztési munkafolyamatok felügyelete
- szivárgás detektálás és behatárolás
- forgácsoló, vágószerszámok felügyelete
- elektromos kisülések korai kimutatása
- geofizikai alkalmazások
- **faanyag szárítás ellenőrzésében való alkalmazás**
- **vizsgálatok a faanyag különböző mechanikai igénybevételeivel kapcsolatban**
- **forgácslapok szilárdságának vizsgálata**
- **fogazott kötések tönkremenetelének vizsgálata**
- **repedések felhalmozódásának vizsgálata, ciklikusan változó nedvességtartalom mellett**

A felsoroltakon kívül fontos alkalmazási terület az atom-energiaipar, ahol különösen fontos a keletkező anyaghibák azonnali észlelése. Ezenkívül ezen berendezéseknél az emberi tartózkodás ideje korlátozott, így jól alkalmazhatók az AE folyamatos és időszakos ellenőrzési módszerei egyaránt.

Az elektronikai iparban a különböző mikroelektronikai egységek, alkatrészek repedésmentességét, az integrált áramkörök mikro-hegesztéseinek minőségét ellenőrzik ilyen módon .



## **I.1. Az akusztikus emissziós faanyag kutatások szakirodalmának áttekintése**

Az AE főbb jellegzetességeinek bemutatása után tekintsük át a faanyagra eddig elvégzett szakirodalmi kutatások eredményeit. A faanyagkutatásban elsősorban külföldön foglalkoztak eddig AE vizsgálatokkal.

Porter (1972) az ékfogazás tönkremenetelét vizsgálta AE-val.

A kötés szilárdságának becslésének pontossága erősen függött a terhelés mértékétől. Minél közelebb volt a terhelés a törőszilárdsághoz annál pontosabban lehetett meghatározni.

Ansell (1979) Erdeifenyő AE aktivitását vizsgálta különböző rostlefutási szögek mellett. Megállapította, hogy a korai pászta már kis terhelési szint mellett jelentősen emittál, míg a késői pászta csak magasabb terhelési értékek mellett válik akusztikusan aktívvá. A legaktívabb állapot a terhelés irányával párhuzamos rostlefutás mellett adódott. Növekvő rostlefutási szög mellett egyre inkább nyírás jellegű a tönkremenetel és ez lényegesen kisebb akusztikus eseményt adott a vizsgálatok során.

Hansel (1980) az AE faanyagkutatásban való alkalmazhatóságát vizsgálta.

Fő megállapításai a következők voltak:

A faanyag is az akusztikusan aktív anyagok közé tartozik. A keletkező jelek tartománya 50 kHz-1,5 MHz tartományba esik. Ezek már elég magas frekvenciaértékek ahhoz, hogy a mechanikai terhelő-berendezésen keletkező alacsony szintű jelek elkülöníthetők, de nem olyan magasak, hogy túl nagy csillapítás következne be a jelforrás és az érzékelő között.

Az emissziót keltő terhelés messze a törőterhelés alatt van, így a törésig egy eseményben gazdag folyamat játszódik le.

A fára a kitöréses típusú jelek a jellemzőek, melyek formája függ a fát ért kezeléstől (pl. gőzölés) ill. a próbatesttől.

Az emisszió során felszabaduló energia különböző hullámcsomagokra oszlik. A faanyag belsejében longitudinális és transzverzális módon terjed még az anyag felületein Rayleigh és Lamb hullámok formájában. A felvett jel tehát komplex, mivel minden hullámfajtának saját sebessége és csillapítási tényezője van.

Méréseket forgácslapon és erdeifenyőn végeztek, rövid idejű hajlító vizsgálatokkal.

Forgácslapoknál már 10-20% hajlítószilárdsági értéknél események keletkeztek, mely a szerkezet nyilvánvaló befolyására utalt. Már itt irreverzibilis folyamatok játszódtak le, de ezek nem vezettek számottevő szilárdságcsökkenéshez.

Tömörfánál 40-50% terhelésnél lépett fel az emisszió, amit a sejtfalakban létrejött mikroszkopikusan fellelhető repedéseknek köszönhető.

A jelentős különbséget a két eset közt a következőkben foglalták össze:

A két anyag szerkezetileg jelentősen eltér, a forgácslapban a ragasztó is részt vesz az emisszióban. A ragasztóanyagban a kötés során feszültségek maradnak vissza.

A forgács előkészítése során (aprítás, szárítás) szintén feszültségeket viszünk az anyagba. A faanyag tartós terhelés alatti viselkedését is vizsgálták a szerzők.

A fa kúszási görbéjének lefutása és a hangintenzitás görbe ugyanolyan lefutásúnak adódott, ami azt jelenti, hogy a mikro-repedések bizonyos mértékben a kúszási folyamatok részesei.

Az impulzusösszeg a terhelés mértékétől egyértelműen függ. A repedési folyamatok részaránya a kúszásban a terhelés növekedésével nő. A repedés részarányát a feltárt sejtközi átrendeződések is bizonyítják. Az átrendeződések létrejöhetnek a sejt falban, a ragasztásban és a határfelületeken forgács lap esetén. Ezen repedések elkülönítését az AE vizsgálat során nem sikerült megoldani. A kúszási folyamatban természetesen tiszta viszko-elasztikus folyamat is végbemegy. A kúszás tehát ez utóbbiból és repedési folyamatokból tevődik össze.

Ansell (1982) parana pine és duglasz fenyő fafajok AE vizsgálatairól számol be. Ezek szerint a kevés késői pászta tracheidát tartalmazó parana fenyő logaritmikus összegzett eseményszám és alakváltozás görbéje közel lineáris lefutást mutat egész a törés környezetében bekövetkező gyors eseményszám növekedésig, míg a jól elkülönülő korai és késői pásztájú duglasz fenyő esetén ezen görbe szabálytalan lefutású. Megállapította, hogy a törési munka kapcsolatban van az összegzett eseményszámmal, de ennek konkrét összefüggése nem egyértelmű a mérések alapján. A vizsgálatok értékét véleményem szerint csökkenteni, hogy az AE-t csak egyetlen érzékelővel detektálta, így a befogásoktól érkező események kiszűrésére nincs mód.

P. Nimz, (1983) az AE két fő alkalmazási irányvonalát mutatja be a fakutatásban:

I. Törési folyamatok tömörfában és fatermékekben

II. Repedéskeletkezés faszárításnál

Az I. ponttal kapcsolatban az eddigiekhez még a következők fűzhetők:

A repedéskeletkezés első fázisa már azelőtt kialakul, mielőtt a fát terhelés érné (szárítás közben). A külső terhelés hatása már csak a repedésnövekedés és a köztes elemek tönkremenetelének fázisain figyelhető meg. Debaise (1966.) impulzusarány méréssel megállapította, hogy a repedésnövekedés a terhelés módjától és irányától függ.

Fontos befolyásoló faktor a nedvességtartalom. Kiszárított forgács háromszor akkora impulzusarányal rendelkezik mint egy vízben áztatott.

A repedésnövekedés abbamarad, ha a repedésterjedés magasabb törési szilárdságú részhez ér.

II. A faszárítási folyamatok irányítására és ellenőrzésére a 80-as évektől alkalmazzák az AE-t az USA-ban. A szárítás közben a külső és belső rétegek közt kialakuló nedvesség tartalomkülönbség következményeként belső feszültségek ébrednek, ami repedéskeletkezéshez vezethet. A közben keletkező hangjelek az egyéb hanghullámoktól egyértelműen elválaszthatók. Mind a jel frekvenciája mind az impulzus-arány a fa száradásának fokával nő.

A szárítási rendszer a következőképpen működik: a szárítóban elhelyezett felvevő érzékeli a keletkező hangjeleket és erősítőn át ez a központi számítógépbe kerül. A nedvességtartalom ugyancsak bemeneti adatot képez. Ha az akusztikus jel szintje eléri a szárítási szisztéma szerint beállított értéket, akkor visszacsatolási folyamat révén optimalizálja a paramétereket.

Mivel az ellenőrzés a szárítási folyamat kezdetétől követi a folyamatokat, folytonos beavatkozással kialakítja az optimális szárítási folyamatot.

Vautrin Harris (1987) duglasz fenyő AE viselkedését vizsgálta hajlítás során. Törésmechanika és az AE vizsgálat segítségével megállapították a fa kritikus tönkremeneteli szintjét. Három tartományt határoztak meg az összegzett AE rezgésszám görbék alapján:

I tartomány: szignifikáns küszöbszint alatt van a jelek szintje

II. tartomány: Ennek határát ott vették fel, ahol az AE összegzett rezgésszám görbe meredeksége csökken az elmozdulás függvényében. A feszültség-alakváltozás görbe közel vízszintes szakaszán a próbatesten rostiránnyal  $45^\circ$ -t bezáróan nyírási síkok jelennek meg a nyomásra tönkrement zónákban, melyet elektron-mikroszkóppal vizsgáltak.

III. tartomány: egy erős növekedés figyelhető meg az AE görbén és a szilárdság hirtelen csökkenése következik be a nemlineáris mechanikai viselkedés miatt. A törés az erő nulla értékhez való visszaesésekor következik be. Az eközben létrejövő tönkremenetel mind nyomás mind húzás esetén nyírási jellegű.

Az utóbbi két szerző ugyanezt a technikát alkalmazta bükk és tölgy esetén is. Megállapították, hogy a görbék ujjlenyomatok, hasonlóan a puhafákhoz, egy hirtelen rezgésszám növekedéssel a tönkremeneteli terhelésnél. A szerzők állítása szerint a töréskor az összegzett eseményszám frekvenciája  $10^5$  Hz. A három fafajt összehasonlítva úgy látszik, hogy a duglasz fenyő minták nagyobb akusztikus aktivitást mutatnak mint a keményfák.

Hansel (1988) kísérleteket végzett a fa és fatermékek hangemissziót befolyásoló tulajdonságainak feltárása céljából.

Mint ismeretes a faanyag fizikai mechanikai tulajdonságai a

- szerkezettől (fafaj, sűrűség, rosthossz)
- vizsgálati és környezeti hatásoktól ( nedvesség tartalom, terhelési mód)
- a fa előkezelésétől függenek.

Ezen tényezők és az AE közti kapcsolatok feltárása volt a cél.

Az alapanyag befolyását vizsgálva erdeifenyőt, bükköt, tölgyet, forgácslapot és farostlemezt vettek alapul. A kísérletek azt mutatták, hogy a relatív gyakoriságot, azaz az időegységre eső hangesemény számát az anyag egyértelműen befolyásolta. A részecske felépítésű anyagoknál a feltárási fok növekedésével az eseményösszeg csökken. Az oka ennek a mechanikai és termikus feltárásban keresendő. Az AE tehát a faanyag "előtörténetétől" erősen befolyásolt. Mivel azonban a próbatest előkezelése az esetek csekély százalékában ismert a mért eredmények értékelése nehézkes.

A terhelési mód befolyásának vizsgálatát húzó-, nyomó- és hajlító- vizsgálatok összehasonlításával végezték.

Megállapították, hogy a terhelési mód egyértelműen kihat a hangemisszióra. Egy összehasonlítható terhelésfoknál a húzószilárdság a legmagasabb a nyomó a legalacsonyabb relatív eseményösszeget mutatta. Húzó- és hajlító terhelés esetén 80% terhelési szint felett nyomónál 90% felett jelentős mértékű impulzusösszeg növekedés következett be.

A nedvességtartalom befolyását víz alatt tárolt majd 0, 6 és 12% -ra szárított próbatestekkel végezték erdei fenyő, SND és MDF lapokon.

A vizsgálatokból kiderült, hogy a nedvességtartalom erős befolyással bír:

- az akusztikus aktivitás kezdetére
- az összes emittált hangimpulzus számára

- a relatív impulzus összegre

Ennek oka a fa fizikai mechanikai tulajdonságainak ismert nedvességtől való függése.

Nedves próbatesteknél csak magasabb terhelési szinten lépnek fel érzékelhető hangjelek a szárazabb próbatesthez képest.

Megállapították tehát, hogy az anyag szerkezeti felépítésének egyértelmű befolyása van a faanyag AE-s tulajdonságaira.

A nedvességtartalom szintén domináns befolyással bír és a terhelési mód is befolyásolja az emittált jeleket.

Hansel (1989) A forgácslapok hajlító igénybevétel hatására lejátszódó folyamatait vizsgálta akusztikus emisszióval.

A vizsgált anyagok laboratóriumban előállított és iparban képzett háromrétegű forgácslapok voltak.

A kiértékelésre a következő paramétereket és funkciókat használták:

- eseményarány, eseményösszeg

- amplitúdó gyakoriság

A kiértékeléssel keresett összefüggések a következők voltak:

- az esemény-arány és esemény összeg függvénye-e az egyes próbatestek terhelési fokának

- az amplitúdó eloszlást a terhelés függvényében leíró folytonossági összefüggés felállítása.

Ezt azonban a mérés technika nem tette lehetővé, így a vizsgálatokat adott terhelési fok mellett végezték el. Az amplitúdó gyakoriság időbeni változása tulajdonképpen lépésről lépésre lett meghatározva.

A kiértékelésnél minden kiinduló és céladatot normális eloszlásúnak tekintettek.

A kísérleti eredmények a következők voltak:

- állandó rétegvastagsági viszony (szélső réteg / középréteg) mellett az egyes amplitúdó tartományokba eső események száma a következő függvény szerint csökkennek:

$$I = a_0 \times A^{-a_1}$$

ahol  $a_0, a_1$ : regressziós konstansok

A: amplitúdó

I: kibocsátott hangjel

Ebből arra következtettek, hogy a törési folyamat nyilvánvalóan nagyszámú eseményből áll, melyek jellemzője, hogy az események közben csak relatív kis energiák alakulnak át.

- a fafaj aránya a forgácskeverékben azt mutatta, hogy növekvő puhafa arány mellett a hangjelek száma lineárisan csökkent. Ezt azzal magyarázták, hogy a növekvő puhafaarányal relatív több forgács kerül az egyes térfogati egységekbe, amely megváltoztatja az erőátadás folyamatát. Kevesebb törés jön létre a térfogati egységekben és így az eseményszám is kevesebb lesz.

- a nedvességtartalom különbségének aránya a szélső és középréteg közt azt mutatta, hogy növekvő nedvességarány mellett a kibocsátott jelek emelkednek egy maximális értékig, majd ennek átlépése után csökkennek. Az egyes amplitúdó értékek gyakorisága itt is a fent említett összefüggést mutatta. A jelenség magyarázatát a külső és középréteg sűrűségének befolyásolásában látják. Jellemzésére a következő mikro-mechanikai változások szolgálnak.

- sejtközi kötések jósága

- a sejtközi terek és a térfogategységben lévő faanyag mennyisége

Továbbiakban a törési folyamat kinetikáját vizsgálták. Azt kutatták, hogy a kibocsátott jelek száma az egyes amplitúdó tartományokban mitől hiperbolikus lefutású. A vizsgálathoz forgácslapok és MDF lapok amplitúdó eloszlásfüggvényei kerültek különböző terhelési fokok mellett összevetésre. Mindkét vizsgált anyag az első hangemissziót 25-40% terhelési fokon mutatta. Az első jelek az alacsonyabb amplitúdó osztályokba estek, a terhelés növekedésével egyre magasabb szintű jeleket érzekeltek. Az egyes amplitúdó osztályok jellemzően hiperbolikus lefutást mutattak. A tönkremenetel folyamatának kezdetén részecske közti törések játszódnak le, majd ezek elmozdulása. A farészek hajlítószilárdságának eléréséig csak ritkán következik be azok törése.

Összefoglalásként elmondhatjuk tehát, hogy a szerkezeti változások a törési és alakváltozási folyamat megváltozása révén egyértelműen kihatással van az anyag akusztikus emissziós viselkedésére. Ezáltal elméletileg lehetővé válik az egyes szerkezeti paraméterek tönkremenetelére gyakorolt hatásának megállapítása. A fa szerkezetének komplex felépítése miatt egyértelmű következtetéseket még nehéz levonni. A vizsgálatok azonban támpontot nyújtanak egy matematikailag megalapozott mikro-mechanikai modell megteremtéséhez.

Azt találták, hogy a teljes tönkremeneteli mechanizmus kis energia-felszabadulással járó események összességéből áll. A vizsgálatok azt a feltevést támasztják alá, hogy a sejtközi ragasztótörések és az azt követő elcsúszások az okozói a forgácslapok törési és alakváltozási folyamatainak.

Molinski (1994) repedéskeletkezést vizsgálata a fában ciklikus nedvességtartalom változás hatására AE-val. Azt tapasztalta, hogy már az első nedvesítési ciklus folyamán a faszerkezet részlegesen meghibásodik, ami a fa ellenálló képességét csökkenti a saját belső feszültségeivel szemben, amelyek a nedvesítés folyamán az anyag belsejében keletkeznek. A faanyag egyfajta kifáradást mutat. Ezek a repedések - hasonlóan a mechanikai terheléshez - eredményezik az AE aktivitás növekedését még akkor is, ha az éppen jelenlévő feszültség alacsonyabb mint a kezdeti.

A második és további szárítási ciklusban a fa belső struktúrájának meghibásodásai, amelyek az első ciklusban jöttek létre, a kialakult szárítási feszültségek relaxációjának valószínűségét megnövelik. Ez az oka a száradási alakváltozásra való hajlam növekedésének a szárított fa évgyűrűiben. A folyamat eredményekén új AE források keletkezésének valószínűsége kicsi.

A felvett AE jelek forrása a további szárítási ciklusokban már az első ciklusban létrejött repedések növekedése. Megállapításait a következőkben foglalhatjuk össze:

1. Az AE jelek legnagyobb száma az első szárítási és nedvesítési ciklusban keletkezik. A következő ciklusokban a fa AE aktivitása csökken.

2. Az AE összegzett rezgésszámának csökkenése az egymást követő szárítási folyamatokban sokkal gyorsabb mint nedvesítéskor. A vizsgált minták az AE aktivitás szignifikáns csökkenését mutatták a 3. szárítási ill. 5. nedvesítési ciklus után.

3. A nyírószilárdság változása a száradási feszültségek növekedésének következménye, mely mind szárításnál mind nedvesítésnél a nyírószilárdság arányos csökkenését mutatja a teljes AE összegzett rezgésszám függvényében a korábbi ciklusokhoz képest.

Poliszko (1994) a fa vízkötési energiája és a fa mechanikai szilárdsága közötti kapcsolat vizsgálata AE-val. Úgy találta, hogy lehetőség van az anyag hosszú idejű viselkedésének és a szerkezeti törésnek elméleti meghatározására, a rövid idejű vizsgálatokra támaszkodva.

A feszültségek leépülésének alapvető módja a teherviselő fában a repedéskeletkezés. Emiatt feltételezték, hogy az AE alkalmas a tönkremenetel ezen módjának ellenőrzésére.

Meg kell azonban jegyeznünk, hogy a fa vízkötési energiája a fa és környezete közt lévő vízpotenciállal van összefüggésben és így szilárdsággal csak közvetve a vízpotenciál nedvességtartalomtól való kapcsolata révén lehet kapcsolatban.

A mért adatok alapján a szerző szerint a hibahelyek keletkezésének és növekedésének vizsgálatára és a faszerkezet megbízhatóságának megítélésére használható. Az anyag tartós szilárdságának meghatározása azon az elven alapszik, hogy az anyagban mikro-repedések csoportjai vannak, mint állandóan jelenlévő hibák vagy ilyenek keletkeznek a hőmérsékletingadozás következtében. Azt találta, hogy a rövid idejű vizsgálatokban, ahol AE jelenségek figyelhetők meg, a tönkremenetel folyamán lehetővé válik, hogy az alakváltozási energia vagy a kritikus feszültség eloszlásának meghatározásával ellenőrizzük a repedésnövekedést.

Megállapították, hogy a fa mechanikai tulajdonságainak csökkenését 10 % nedvességtartalom felett a víz plaszticizáló hatása okozza, lecsökkentve a sejtközi, nagy molekulák közti kötési energiát. A stabilizálódás 0-10% között jelentkezik ezen tartományon belül a fa nem válik plasztikusabbá a nedvesség hatására. A molekuláris magyarázata ennek még nem áll rendelkezésre.

Az AE összegzett rezgésszámot és a vízkötési energia függvényét elemezve megállapították, hogy a víz kötési energiája 0 és 1.75 KJ/mol érték között változott a nedvességtartalom csökkenése során. Ez egyenes arányban változott az AE aktivitás növekedésével a repedő fában. Miután az energia elérte az 1.75 KJ/mol értéket az AE összegzett rezgésszám görbe állandó értéket vett fel. Leszögezték, hogy az adott feltételek mellett a higroszkopikus egyensúlyban 1.75 KJ/mol szabad kötési energia felel meg 11% nedvességtartalomnak. Ezt vízpotenciálra átszámítva közelítőleg egyezést mutat más szerzők (Sitkei 1994) által megadott vízpotenciál értékkel. Ez a vízfelvételi küszöbszint, melyben 1 mol szorpciósan kötött víz felel meg egy mol cellulóz monomer egységnek. A bemutatott vizsgálat azt mutatja, hogy a vízkötés a fa ridegségének csökkentésében játszik szerepet, plaszticizáló hatása megjelenik, amint egy polimer egység több részre esik szét, mint egy vízmolekula. A kutatás mostani állása szerint a molekulák természetével magyarázni a jelenséget bonyolult lenne. Feltehető, hogy a 11% nedvességtartalomnál nedvesebb fa ridegségének nedvességtől függő csökkenését a vizsgált anyag feszültség relaxációs arányának növekedése okozza.

Feltételezték, hogy a feszültség relaxációs idő csökkenése a növekvő nedvességtartalom mellett, eredményezheti az egyes feszültségek leépülését azok kritikus értéke alatt. Az igénybevétel kritikus értéke felelős a tönkremenetelt okozó repedés terjedéséért. Ez a példa mutatja, hogy a fában, amely egy viszko-elasztikus, különböző hibahelyeket és különböző kritikus feszültségű helyeket tartalmazó anyag, a tönkremeneteli függvény eloszlásának változásában lévő különbség megvizsgálható, mint a feszültség-relaxációs arányban bekövetkező változás eredménye. Egyes hibacsoportok, melyek alacsony nedvességtartalomnál elérik kritikus feszültségüket, magasabb nedvességtartalomnál képesek a kritikus feszültség alatt lévő csoporthoz tartozni, - a nedvesebb fa tönkremenetel nélkül létrehozható nagyobb deformálhatósága miatt - ami a rideg törési események alacsonyabb számához vezet

a mérések során. Megállapították, hogy a különböző nedvességtartalomnál mért adatok analízise az aktív rideg repedések teljes számát mutatja. Ezek 0-11% nedvességtartalom között függetlenek a nedvességtartalomtól és ennek növekedésekor a víz kötési energiájának lineáris függvényeként csökkennek.

Faszárítási folyamatok vizsgálatánál F. Wassipaul (1986) megállapította, hogy hirtelen száradást gyorsító klímaváltozás szignifikáns AE növekedést eredményez. Nem áll azonban mérőmódszer rendelkezésre arra vonatkozóan, hogy ennek kritikus mértékét - azaz a makroszkópikus repedések megjelenésének megfelelő aktivitást - megállapítsa.

Bernatowicz G. (1991) faszárítás vizsgálatánál azt figyelte meg, hogy gyors szárítás esetén nemcsak az események száma, hanem azok energiája is megnövekszik. Azt találta továbbá, hogy az események energiája alapján a mikro- és makrorepedések szétválaszthatók.

Krug (1995) azt találta, hogy a szárítási folyamatok során a fafaj egyértelmű befolyással van a kibocsátott AE jellemzőkre, így a szárítás folyamán fellépő feszültségek és nedvességtartalom csökkenés kapcsolata várhatóan további kísérletekkel feltárható.

Booker (1995) eukaliptusz szárítása során végzett AE kísérletek alapján megállapította, hogy az időegységre eső eseményarány maximuma szoros kapcsolatban van a felület pillanatnyi alakváltozási állapotával.

Forgácslapok AE-s hajlítoszilárdság vizsgálatánál Niemz (1997) azt találta, hogy a lap sűrűségének és a forgácslap gyanta tartalmának növekedésével növekszik az eseményösszeg. A jelenséget a szerző a térfogategységben lévő megnövekedett kötőszámmal magyarázza, melyek tönkremenetele nagyobb eseményösszeget eredményez.

Gombafertőzött erdeifenyő rostra merőleges nyomószilárdság vizsgálata során Raczkowski (1999) azt találta, hogy már kevesebb mint 1% tömegvesztés esetén jelentősen megnő az AE események összegzett rezgésszáma. A rezgésszámösszeget az enzimatiszus tönkremenetel szintjének meghatározására alkalmas mennyiségnek találta.

Reiterer (2000) bemetszett lombos és fenyő próbatestek hasító vizsgálata során mérte az AE-t. Azt tapasztalta, hogy karakterisztikus különbség van a két csoport AE és törési viselkedésében. A fenyők szívós jellegű töréssel törtek nagy akusztikus aktivitást mutatva, míg a lombos fák rideg módon viselkedtek és kis eseményszámot adtak a vizsgálatok.

Berg (2000) a hőmérséklet hatását vizsgálta lucfenyő nyomása során. Megállapította, hogy a hőmérséklet növekedésével rohamosan csökken a kapott események száma. Véleménye szerint a rosttal párhuzamos terhelési irány a legmegfelelőbb, hogy a nyomás során bekövetkező lényeges tönkremeneteli folyamatok kezdetét meghatározzuk. A vizsgálatok alapján kijelentette, hogy 120°C alatt kell a vizsgálatokat végezni, hogy még számottevő - így a kiértékeléshez elegendő - eseményt kapjunk.

Rice (2001) vízzáró fa bevonatokat vizsgált AE-vel. A bevonattal ellátott mintákat áztatták és közben mérték az AE aktivitásukat. Ha a bevonat áttersztette a vizet dagadási folyamatok kezdődtek, melyek belső feszültséget, ezek leépülésével AE eseményeket adtak. A módszer segítségével könnyen ki tudták választani a legjobb víztaszítású bevonatot.

Rice (2002) forgácslapok dagadási folyamatát vizsgálta áztatás során AE-vel. A vízfelvétel során kialakuló dagadás belső feszültségeket ébreszt és ezek növekedése a kémiai kötések tönkremeneteléhez vezet. A tönkremenetelek során felszabaduló energiát mérte AE-vel. Megállapította, hogy a ragasztótartalom növelésével csökken az AE aktivitás. A módszert alkalmasnak találta forgácslapok minősítésére.

Dill-Langer (2003) deszka méretű (2400x120x25mm) lucfenyő faanyag AE-s hibahely lokalizációjával foglalkozott húzás során. A mérések alapján a hossz mentén mintegy  $\pm 20$ mm, a szélesség mentén  $\pm 8$ mm pontosan tudta lokalizálni a tönkremeneteli események helyét. Megállapította, hogy a kidolgozott módszert alapját képezheti kész szerkezetek hibahely lokalizációs alkalmazásainak, terhelésspróba során.

A szakirodalom áttekintése után elmondhatjuk, hogy az akusztikus emissziós módszer alkalmas faanyag és faalapú anyagok vizsgálatára. A bemutatott vizsgálatok alapján kijelenthetjük, hogy a kapott akusztikus jelek száma és jellege a faanyag nedvességtartalmával, a terhelés módjával, fafajjal, a próba testet korábban ért hatásokkal szoros összefüggésben van. A kutatási irányok nagyon szerteágazóak, minden egyes kutató más-más mérőrendszerrel, érzékelőkkel dolgozott, így az elért eredmények nehezen általánosíthatók. Viszonylag kis számban találunk tömörfával foglalkozó cikket. Ennek oka részben a mérési módszer faanyagkutatás területén való újszerűségének köszönhető, részben a tömörfa vizsgálatok során fellépő anomáliák eredménye. Ilyen például ugyanazon vizsgálati körülmények között kapott, akusztikus aktivitásban mutatkozó jelentős különbség két azonos fafajú próbatest között. Ezeket tapasztalva kutatók inkább fátermékek vizsgálatának irányába mentek el. Ennek oka az, hogy a nagyobb feltártsági fokú fában lévő nagyszámú tönkremenetel jelenléte, valamint a ragasztó aktív részvétele az AE jelenségekben megbízhatóan nagyszámú eseményt ad a vizsgálati sorozatokban.

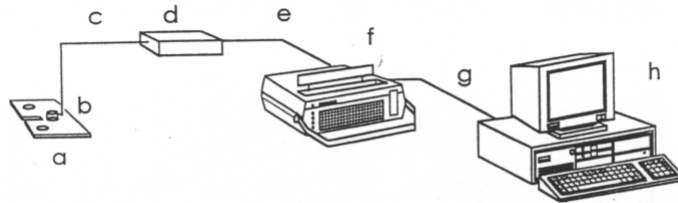
Összefoglalásképpen elmondhatjuk, hogy az eddig elvégzett kutatások elsősorban alkalmazott kutatási jellegűeknek tekinthetők, ugyanakkor az akusztikus emissziós módszer által mért jelek és a faanyag egyes mechanikai tulajdonságai közti pontos összefüggések megállapítása eddig még nem történt meg. Alapkutatások szükségesek tehát az összefüggések feltárásához. Munkámnak éppen ezért, a módszer gyakorlati alkalmazási lehetőségeit tudományosan előkészítő és megalapozó széleskörű alapkutatás a célja.



## I.2. A kutatásokban használt akusztikus emissziós mérőrendszer és mérési metodika bemutatása

Saját AE kutatásaimat 4 csatornás, két paraméter-bemenettel kiegészített DEFECTOPHONE nevű akusztikus emissziós mérőberendezéssel végeztem el. A műszer a KFKI Atomenergia Kutatóintézetben került kifejlesztésre. Ők a paksi atomerőmű nyomáspróba közbeni szilárdsági és meghibásodási vizsgálatait végzik vele.

A mérőműszerhez 2 db DECI 1000-H szélessávú piezoelektromos érzékelő csatlakozik 2db logaritmikus erősítőn keresztül. A mérőrendszer felépítését egycsatornás esetben az I.2.1. ábra szemlélteti. További tartozék egy univerzális paramétererősítő és a kiértékeléshez szükséges software.



I.2.1. ábra Akusztikus emissziós mérőrendszer (Czigány 1997)

- a. próbatest; b. piezoelektromos érzékelő; d. előerősítő  
f. DEFECTOPHONE AE mérőműszer; h. számítógép

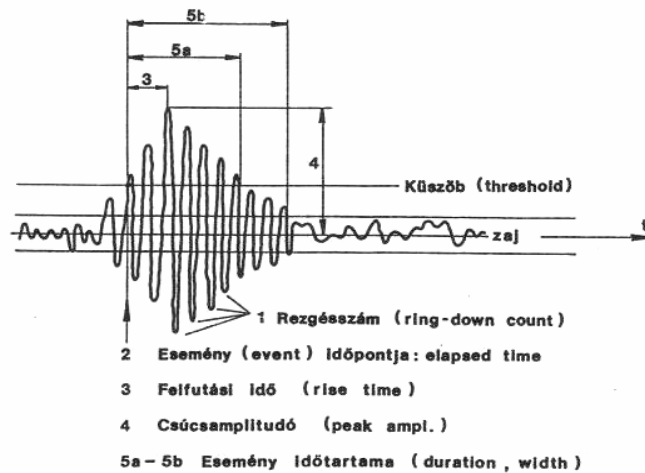
A méréseket részben az intézetünk anyagvizsgáló laboratóriumában, részben Svájcban a zürichi ETH Faanyagtudományi Intézetében végeztem el. Mindkét helyszínen rendelkezésünkre állt egy univerzális anyagvizsgáló berendezés a próbatestek húzó, nyomó és hajlító vizsgálatára. A mérések menete a következő volt:

Az anyagvizsgáló gépbe befogtuk az igénybevételnek megfelelően kialakított próbatestet, erre gumigyűrűk segítségével felerősítettük a két piezoelektromos érzékelőt. (I.2.5. ábra) A fa és az érzékelő közé a jó kontaktus érdekében, a felületi egyenetlenségek kiegyenlítése céljából szilikon zsírt alkalmaztunk csatolóanyagként. Az érzékelők a logaritmikus előerősítőkhöz csatlakoznak a mérőműszer bemeneti csatornáira. A mérőműszer közvetlen kapcsolatban áll a vezérlő számítógéppel, melyen a méréshez tartozó software fut. A mérőműszer paraméter-bemenetére csatlakozik az erő és az elmozdulás jelét továbbító kábel, mely az anyagvizsgáló berendezéssel van összekötve. A mérés megkezdése előtt a mérőműszeren számos paraméter beállítása szükséges, melyek részben a keletkező zavarjelek szűrését szolgálják, de kiszűrhetők velük a hasznos jelek bizonyos tartományai is. A beállított paraméterek közül a legfontosabb a mérési küszöbérték beállítása. Ez a mérés helyén mért zajszint alapján történik, annál 2 dB-el nagyobbra választott érték, előzetes mérések alapján. Esetünkben az összes vizsgálatnál 15 dB (22 $\mu$ V) esemény amplitúdónak megfelelő mérési küszöböt alkalmaztunk. A zajszint miatt szükséges küszöbszint alkalmazásával természetesen együtt jár, hogy a küszöb alatti tönkremeneteli folyamatok detektálásáról le kell mondanunk, mivel azok a zajtól nem elválaszthatók. A beállítások elvégzése után kezdődhet meg a mérés az anyagvizsgáló berendezés, a mérőműszer és a software indításával. A mért adatokat mind a mérőműszer memóriájában, mind a számítógéppel rögzítjük folyamatos mintavétellel.

A mérések kiértékelését a software segíti, mely lehetővé teszi a mért adatok további, több szempont szerinti szűrését és grafikus megjelenítését is.

A mért AE jellemzők a következők (I.2.2.ábra) :

- esemény hossz (5a-5b)
- felfutási idő, amíg az esemény eléri csúcs amplitúdóját (3)
- csúcs amplitúdó (4)
- rezgésszám (1)
- esemény észlelési ideje a mérés során (2)



I.2.2. ábra Egy mért akusztikus emissziós esemény fizikai jellemzői (Pellionisz 1992)

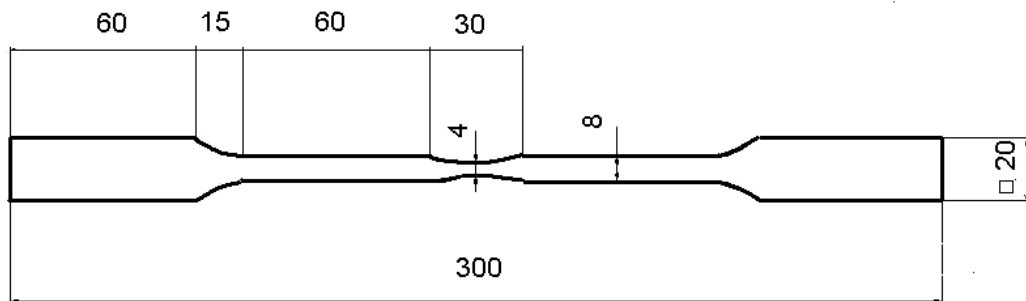
A mért fizikai paraméterek alapján a mérőrendszer számított jellemzőket is képez. Ezek a következők:

- eseményösszeg, a mérés során kapott események összege
- energia, az esemény feszültség hullám négyzetének idő szerinti integrálja az esemény időtartama alatt
- MARSE, adott esemény egyenirányított jelének burkológörbéje alatti terület

A mért és számolt jellemzők az idő és egymás függvényében is megjeleníthetők a kiértékelő szoftver segítségével. Képezhetők továbbá az egyes jellemzők sűrűség és eloszlásfüggvényei is. Az elvégzett húzó, nyomó és hajlító vizsgálatokhoz a következő próbatest méreteket választottuk:

- Nyomóvizsgálat esetén a statikus rövid idejű nyomószilárdság vizsgálathoz használt 20x20x50 mm méretű próbatest megfelelően bizonyult. A keresztmetszeti méret és a hossz aránya biztosítja, hogy a próbatest zömök rúdként - azaz kihajlás nélkül - menjen tönkre.
- Hajlító vizsgálatnál 20x20x300 mm méretű mintákat alakítottunk ki. A vizsgálatok során három pontos hajlítást alkalmaztunk.
- Húzóvizsgálatok elvégzéséhez speciálisan az AE vizsgálatokhoz alkalmas próbatestet alakítottunk ki. Erre azért volt szükség, hogy a befogás összetett igénybevételnek

kitett keresztmetszeteiből származó nagyszámú tönkremenetel eseményeit ki tudjuk zárni a húzási tönkremenetek eseményei közül. (I.2.3. ábra) A középső rész kigyengítésével elértem, hogy a próbatest a vizsgálatok 95%-ban ezen szakaszon ment tönkre. A mérőrendszer lehetőséget biztosít arra, hogy az alkalmazott két érzékelő megszólalási időkülönbsége alapján szűrjük a beérkező eseményeket. A hangterjedési sebesség ismeretében könnyen beállíthatjuk azon késési időt, mely alatt csak a próbatest középső - esetünkben 3cm-es - szakaszáról érkező eseményeket fogadjuk el. Ezen próbatest kialakítás és szűrési lehetőség segítségével elkerüljük az egyes szakirodalomban is publikált és említett kutatások hibáját, amikor ezen szétválasztást nem oldották meg. Azokban az esetekben, húzási és összetett igénybevételből származó eseményeket együttesen rögzítettek nagy eseményszámokat detektálva. Későbbiekben látni fogjuk, hogy a szétválasztás után az eseményszám lényegesen kisebb.



I.2.3. ábra A húzóvizsgálatokhoz kialakított próbatest méretei

Végül bemutatok két fényképet a mérőrendszerről, a detektorok felhelyezésének és vizsgálati körülmények szemléltetésének céljából. További felvételeket az I. melléklet tartalmaz.



I.2.4. ábra Az akusztikus emissziós mérőrendszer

I.2.5. ábra A piezoelektromos érzékelők rögzítése gumigyűrű segítségével

## II. Hullámterjedés szilárd testben

Az akusztikus emissziós jel az érzékelőnek a szilárd testben keletkező hanghullámok hatására adott válasza. Ezek a hullámok hasonlóak a levegőben vagy más folyadékokban terjedő hanghullámokhoz, bár azoknál bonyolultabbak, mert a szilárd test alkalmas a nyíróerők felvételére. Ez a fejezetrész a hanghullámok szilárd testben történő tovaterjedésének fizikai jelenségét írja le, hiszen ezen ismeretek lényegesek a mérési paraméterek helyes megválasztásához.

A hullámterjedés legegyszerűbb esete az, amikor a testnek nincs széle, azaz végtelen kontinuum. A végtelen kontinuumban a hanghullámoknak csupán két eltérő típusa létezhet. E hullámokat *dilatációs* (P) és *disztorziós* (S) (vagy *állandó térfogatú*) hullámoknak nevezzük. A dilatációs hullám (P) úgy terjed, hogy a szilárd testben elképzelt kicsiny kocka megváltoztatja a térfogatát, de sarokszögei megtartják a  $90^0$ -ot. A disztorziós hullám (S) viszont úgy halad, hogy a kocka sarokszögei megváltoznak, de térfogata állandó marad.

### Mozgásegyenletek

Az (1)-el megadott egyenletek a lineárisan rugalmas, homogén és izotróp testben terjedő elmozdulások mozgásegyenletei külső erő fellépésekor ((1) három egyenletet reprezentál  $i = 1, 2, 3$  miatt):

$$(\lambda + \mu)u_{k,ki} + \mu u_{i,jj} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i \quad , \quad 1$$

ahol

$u_i$  – a részecske elmozdulás vektora Descartes-féle koordinátarendszerben,

$\lambda, \mu$  - a test rugalmas tulajdonságait jellemző anyagparaméterek,

$\rho$  - a test sűrűsége,

$\rho f_i$  – a térfogati erő.

Ezeket az egyenleteket néha *a rugalmasságtan Navier-féle egyenleteinek* nevezik.

Ebben a fejezetben mindenütt az alsó indexben jelölt vessző parciális deriválást jelent, azaz  $u_{i,j} = \partial u_i / \partial x_j$ . A megismételt alsó index az összes értéken való szummázást jelöli (Einstein-féle konvenció), azaz:  $u_{i,kk} = u_{i,11} + u_{i,22} + u_{i,33}$ .

A  $\lambda$  és  $\mu$  nyagállandókat Lamé-féle konstansoknak nevezzük. A Lamé-konstansokat kifejezhetjük a jobban ismert  $E$  (Young-féle modulusz) és  $\nu$  (Poisson-tényező) rugalmas állandók függvényeként a következő egyenletekkel:

$$\lambda = \frac{Ev}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad \text{és} \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad . \quad 2$$

### A mozgásegyenletek általános megoldása

Megmutatható, hogy a mozgásegyenletek általános megoldása két, különböző típusú elmozdulás-függvény összegeként írható fel, a következőképpen:

$$u_i = u_i^d + u_i^e \quad . \quad 4$$

A két tag az alábbi egyenletek megoldásai:

$$u_i^d = \phi_{,i} \quad , \quad 5$$

$$(c_1)^2 \phi_{,ii} = \ddot{\phi}$$

és

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad .$$

$$u_i^e = \xi_{ijk} \Psi_{j,k} \quad , \quad 6$$

$$(c_2)^2 \Psi_{i,jj} = \ddot{\Psi}_i$$

és

$$c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad .$$

Az  $u_i^d$  elmozdulás olyan mozgást reprezentál, amelyben a testben felvett kis kocka megváltoztatja a térfogatát (dilatál), de nem fordul el. (6)  $u_i^e$  megoldásából következik, hogy a kocka nem változtatja meg a térfogatát, de torzul, azaz sarokszögei megváltoznak.

### Síkhullám megoldások

Az (5) és (6) egyenletek speciális esetben a következő alakba írhatók:

$$u_i^d = \alpha_i \Phi(\alpha_k x_k - c_1 t) \quad , \quad 7$$

$$u_i^e = \xi_{ijk} \alpha_k \Psi_j(\alpha_k x_k - c_2 t) \quad , \quad 8$$

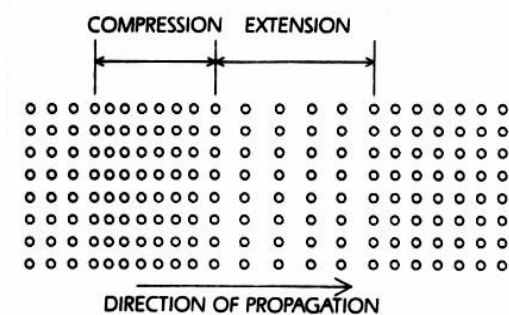
ahol

$\alpha_k x_k = 1$  ,  $\Phi$  és  $\Psi_i$  tetszőleges skalár- és vektorfüggvények (legalább kétszer deriválhatók).

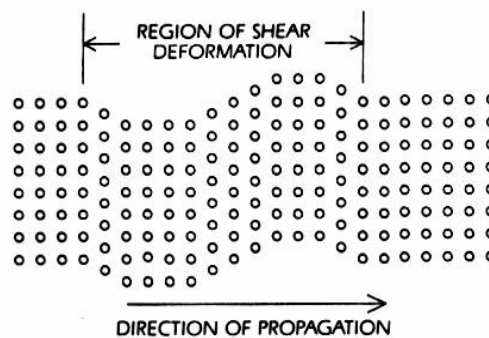
A  $\Phi()$  és  $\Psi_j()$  függvények argumentumai konstansok minden olyan síkon, ahol  $\alpha_k x_k$  konstans. Ennek következtében a (7) és (8) egyenleteknek az  $\alpha_k$  irányban,  $c_1$  vagy  $c_2$  sebességgel mozgó síkhullámokat kell reprezentálniuk. Megmutatható, hogy a (7) egyenlet esetében az  $u_i^d$  elmozdulás vektor párhuzamos az  $\alpha_i$  hullámterjedés irányával. Ezt *sík longitudinális hullámnak* hívják. Ez a dilatációs hullám egy speciális fajtája és terjedési sebessége  $c_1$ .

Az II.1. ábra egy olyan test részecskéinek mozgását illusztrálja, amelyben sík longitudinális hullám terjed tova. Mivel a sík longitudinális hullám a dilatációs hullám speciális típusa, ugyanez az ábra szemlélteti a dilatációs hullám mozgását, amennyiben a hullámfront görbülete kicsi vagy nulla. A köröcskék a test szomszédos részecskéit reprezentálják (egy szabályos kristályos szerkezet atomjait). A hullám balról jobbra halad. Amint a hullám éppen elhalad, a részecskék közelebb kerülnek egymáshoz (a hullámterjedés irányával párhuzamosan), majd távolodnak egymástól. A hullám elvonulása után a részecskék visszatérnek eredeti (normális) helyzetükbe.

**FIGURE 1. Particle motion for dilatational or longitudinal waves**



**FIGURE 2. Particle motion for distortional or transverse waves**



II.1. ábra Longitudinális hullám terjedése    II.2. ábra Transzverzális hullám terjedése  
(Forrás: Nondestructive testing handbook Vol. 5. 1987)

Annak következtében, hogy a hullámfront sík és a test, amelyben a hullám halad végtelen kiterjedésű, a részecskék a hullámterjedés irányára merőleges irányban nem mozdulnak el. Ugyanakkor a merőleges irányban feszültségek keletkeznek. Ezeket a feszültségeket a Poisson hatás eredményezi. Ha a test nem lenne végtelen, felléphetne kontrakció és ennek következtében a terjedési irányra merőleges irányú mozgás.

Az  $u_i^e$  elmozdulás vektorról kimutatható, hogy az  $\alpha_i$  hullámterjedés irányára merőleges. Az ilyen típusú hullámot ezért *sík transzverzális hullámnak* nevezik. A 2. ábrán a részecske mozgást mutatjuk be sík transzverzális hullám esetén. Itt a részecskék vertikális irányban mozognak, míg a hullám balról jobbra halad. A transzverzális hullámok magukba foglalják a test nyírási deformációit, ezért néha *nyírási hullámoknak* is nevezik őket.

### Felületi hullámok

Ha a test rendelkezik szabad felülettel, akkor a dilatációs és a disztorziós hullámokhoz hozzáadódva egy harmadik típusú hullám is keletkezhet. Ezt *felületi hullámnak* vagy *Rayleigh hullámnak* nevezzük. Ha a szabad felületet  $x_3 = 0$ -val definiáljuk és a testre  $x_3 \geq 0$  érvényes, akkor a következő elmozdulás mező elégíti ki az (1) egyenletet:

$$u_1 = k \left[ -\frac{1 - \frac{1}{2}\alpha^2}{\sqrt{1 - \frac{\alpha^2}{\kappa^2}}} e^{-qx_3} + \sqrt{1 - \alpha^2} e^{-sx_3} \right] e^{j(\omega t - kx_1)},$$

$$u_2 = 0,$$

$$u_3 = jk \left[ \left( 1 - \frac{1}{2}\alpha^2 \right) e^{-qx_3} - e^{-sx_3} \right] e^{j(\omega t - kx_1)},$$

ahol

$$q^2 = k^2 \left( 1 - \frac{\alpha^2}{\kappa^2} \right),$$

$$s^2 = k^2 (1 - \alpha^2),$$

$$k = \omega / c_r,$$

$$\alpha = c_r / c_2,$$

$$\kappa = c_1 / c_2.$$

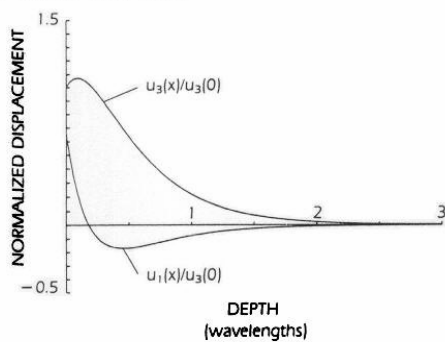
(19) két  $\omega$  szögsebességű,  $c_r$  sebességgel  $x_1$  irányba haladó egyszerű harmonikus hullámot reprezentálnak. A felületi hullám  $c_r$  terjedési sebességét az alábbi harmadfokú egyenlet egyik valós megoldása határozza meg:

$$\alpha^6 - 8\alpha^4 + (24 - 16\kappa^{-2})\alpha^2 + 16(\kappa^{-2} - 1) = 0.$$

Bár (20)-nak három megoldása van, de ezek közül csak egy valós, melynek értéke az egységénél kicsit kisebb. Esetünkben ennek a valós gyöknek az értéke 0,87-től ( $\nu = 0$  esetén) 0,95-ig ( $\nu = 0.4$  esetén) változik. Megmutatható, hogy (20) két komplex gyöke a szabad felületen keletkező térfogati hullámok speciális esetével van kapcsolatban. A (20) egyenlet alapján számított  $c_r$  értékét közelítőleg meghatározhatjuk a Bergman-formulával is:

$$\alpha = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu},$$

ahol  $\nu$  - az anyag Poisson-tényezője. Megmutatható, hogy a (19) egyenlet elliptikus részecske



mozgást jelent. (19) első és harmadik egyenletében a zárójelben lévő tagok mutatják, hogy a hullámok amplitúdója csökken a szabad felszíntől mért távolság növekedésével. A II.3. ábra  $u_1$  és  $u_3$  amplitúdóját mutatja a felülettől mért távolság függvényében ( $x_3/\lambda$ ). Jóllehet a számításokhoz  $\nu = 0,3$ -t használtunk, az elmozdulás-függvények formája nem változik jelentősen a Poisson-tényező függvényében 0,2 és 0,4 között.

II.3. ábra Felületi hullám elmozdulás amplitúdója a szabad felülettől mért távolság függvényében. (Forrás: Nondestructive testing handbook Vol. 5. 1987)

A felszínre merőleges  $u_3$  elmozdulások maximumai a felület alatt  $0,1\lambda$ -nál keletkeznek és a felületi elmozdulások a két hullámhossznál mélyebb rétegekben elhanyagolhatók.

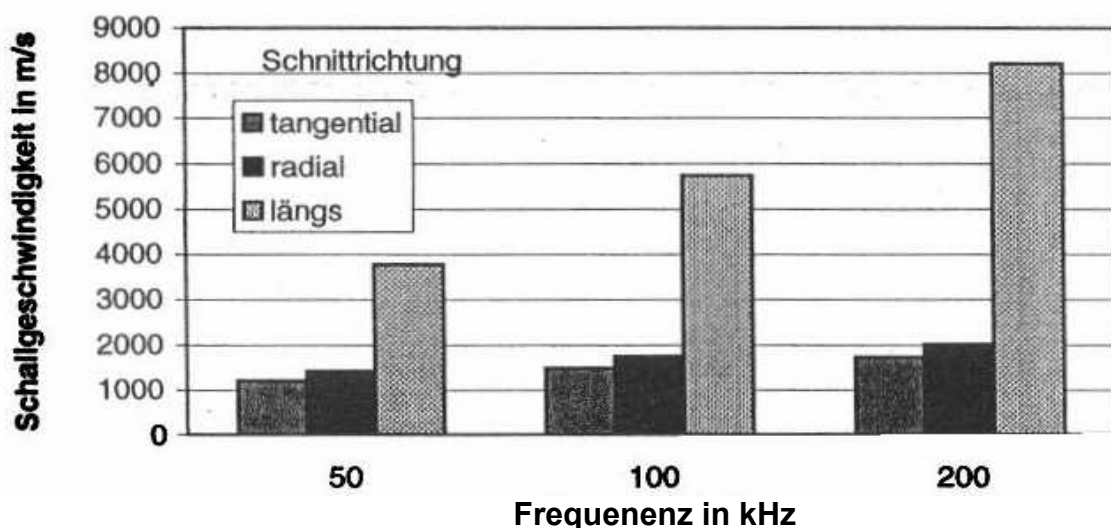
Felületi hullámok szabad felületeken, valamint tangenciális és normális irányban mereven összekapcsolt felületeken keletkezhetnek. A vegyes kerületi feltételekkel rendelkező (pl. normál irányban mereven összekapcsolt, de tangenciális irányban szabadon elmozduló) felületeken nem léphetnek fel felületi hullámok.

Az a tény, hogy a (19)-cel megadott hullám  $x_1$  irányban terjed, teljesen tetszőleges. Hasonló megoldás létezik a felületi hullám tovaterjedésére a felülettel párhuzamos minden irányban.

Jóllehet a felületi hullámok és a térfogati hullámok egymástól függetlenek egy szabad felülettel rendelkező szemi-infinity testben, összekapcsolódhatnak olyan testekben, amelyek metsződő felületekkel (sarkok) bírnak, vagy olyan kerületi feltételekkel, amelyek a sík helyzetétől függően változnak. A felületi és térfogati hullámok összekapcsolódását nem könnyű elkerülni a gyakorlatban előforduló véges geometriájú testekben.

### II.1. A hullámterjedés sebességének változása különböző befolyásoló faktorok mellett

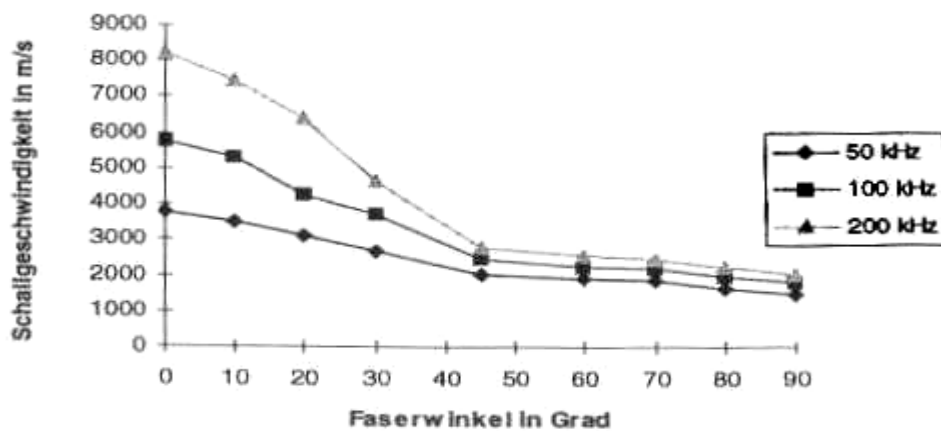
Az előző fejezetben röviden összefoglaltam a hullámterjedés ismérveit szilárd test esetén. Ezek szerint longitudinális, transzverzális és felületi hullámok formájában terjednek a vizsgálatainkban szereplő AE hullámok. Mivel az alkalmazott próbatestek is véges geometriájúak a mérések során egy esemény kapcsán egy hullámcsomagot kapunk, mely vegyesen tartalmazza mindhárom hullámterjedési típust. Méréseim során alkalmazott piezoelektromos érzékelők azonban elsősorban a transzverzális hullámok detektálására alkalmasak kialakításuknál és felhelyezésüknekél fogva, így a méréseknél a transzverzális terjedési mód detektálása a domináns. A próbatest tönkremenetele során kapott AE események és egyéb zajokból és befogásokból érkező jelek elkülönítése a jelek beérkezési időkülönbsége alapján lehetséges. Ezt korábban ismertettem. A szűréshez ismerni kell azonban a hangterjedési sebességet adott vizsgálati körülmények között. Ennek érdekében a következőkben tekintsük át a szakirodalom alapján a hangterjedési sebességet befolyásoló különböző faktorok hatását. Elsőként a terjedési sebesség frekvenciafüggését mutatom be Niemz (2000) alapján (II.4.ábra).



II.4. ábra Hangterjedési sebesség frekvenciafüggése lucfenyő esetén (Niemz 2000)



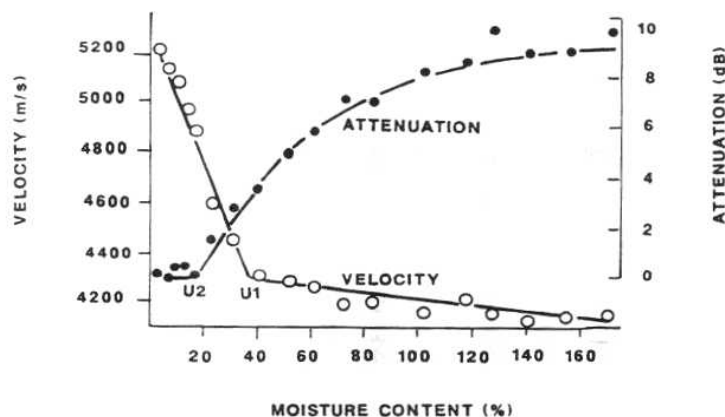
Az ábra alapján elmondhatjuk, hogy a frekvencia növekedésével nő a hangterjedési sebesség. 50-200 kHz tartományban mintegy kétszeresére nő. A három fő anatómiai irányban arányosan következik be ez a növekedés, azaz adott frekvencián az anatómiai irányokban mért sebességek aránya közel állandó, megjegyezve, hogy rostokkal párhuzamosan kissé nagyobb mértékű a növekedés. Megjegyzendő, hogy ellenőrző mérések a frekvencia ilyen jelentős mértékű befolyását nem támasztja alá, és ezen befolyás jelentős voltára más szakirodalomban sem találunk utalást. A diagram segítségével képet kapunk a három anatómiai irányban mért sebesség különbségéről is. Ezek szerint a hosszirány terjedési sebességét 1-nek véve alapul sugár irányban átlagosan 0.3, míg tangenciális irányban 0.25 a terjedési sebesség. Az elmondottakhoz csatoljuk a hangsebesség rostlefutási szögtől való függését. (Niemz 2000) (II.5.ábra)



II.5. ábra A rostlefutási szög befolyása a hangterjedési sebességre LR síkban (Niemz 2000)

Mint arra a három anatómiai irányban mért sebességkülönbség alapján is következtetni lehet, a rostlefutási szög erősen befolyásolja a terjedési sebességet. A rostiránnyal 45°-os szögben a rostirányban mért sebességhez képest 100 kHz-es jel esetén mintegy 50%-os sebesség csökkenéssel kell számolnunk, mely a rostlefutási szög további növekedésével már nem csökken jelentősen. Érdekes jelenség, hogy 45° felett mind a három vizsgált frekvencia esetén közel azonos a hangterjedési sebesség, míg ez alatt a frekvenciának az erős befolyásoló hatása érvényesül. Ennek magyarázata még nem áll rendelkezésre.

Ezek után nézzük meg a nedvességtartalom hangterjedési sebességre gyakorolt hatását Sakai (1990) kutatásai alapján. (II.6.ábra)



II.6. ábra A hangterjedési sebesség és a csillapítás nedvességtartalom függése metasequoia fafaj esetén (Forrás: Sakai 1990)

A függvényből leolvashatjuk, hogy a hangterjedési sebesség 0-30% között meredeken csökken, a csökkenés mértéke 20% az abszolút száraz - rosttelítettségi tartományban. Rosttelítettség felett a változás nem jelentős mértékű. Ugyanakkor a hullám amplitúdójának csillapítása 0-20% nedvességtartalom között nem jelentős, 20-100% nedvességtartalom között jelentősen növekszik, majd közel állandó marad. Ugyanezt a jelenséget mutatta ki Simpson (1998), aki szárítás kapcsán mérte különböző nedvességtartalmak mellett, a próbatetek ultrahanggal való átsugárzásához szükséges időt (II.7. ábra).

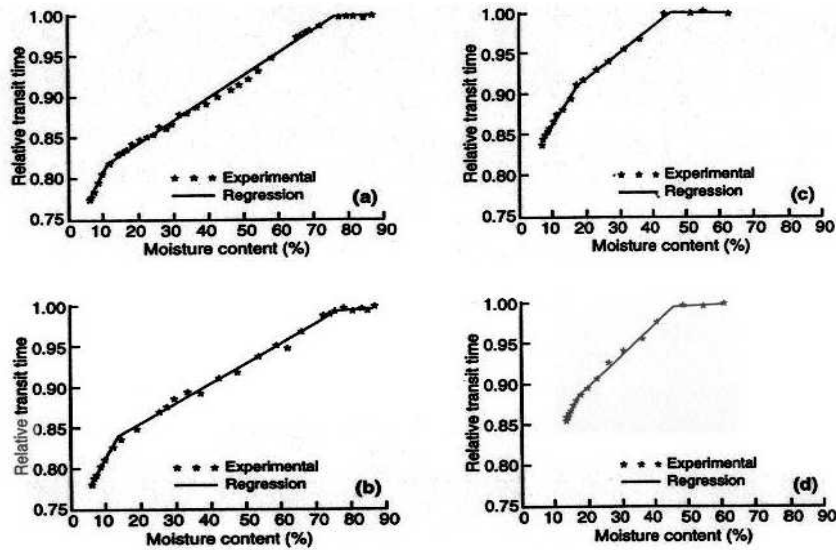
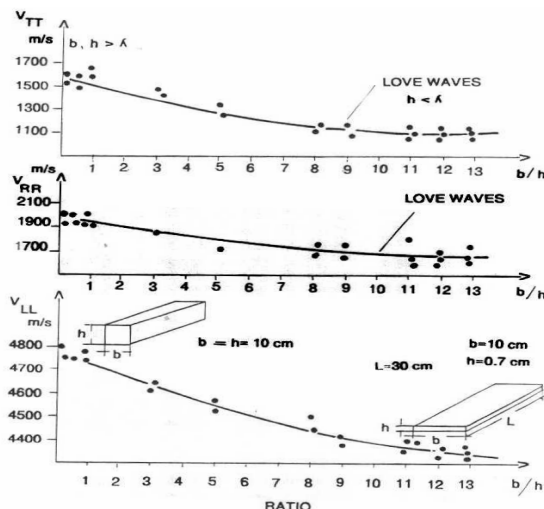


FIG. 5. Relationship between relative transit time and moisture content parallel to the grain for (a) red oak, Group 2; (b) red oak, Group 3; (c) hard maple (30% relative humidity), Group 4; and (d) hard maple (65% relative humidity), Group 5.

II.7. ábra Az ultrahanggal való átsugárzáshoz szükséges idő a nedvességtartalom függvényében rosttal párhuzamosan a., vörös tölgy 2. méretcsoport; b., vörös tölgy 3. méretcsoport c. hegyi juhar (30% relatív páratartalom mellett); d., hegyi juhar (65% relatív páratartalom mellett) (Simpson 1998)

A függvényekből kitűnik, hogy 5-20% között az átviteli idő kevesebb mint 10%-al növekszik. A teljes vizsgált nedvességi tartományban 5-90% között mintegy 20%-al nő az átviteli idő ennek megfelelően ennyivel csökken a hangterjedési sebesség.

A nedvességtartalom hatásának ismertetése után nézzük meg a próbatest mérhető hatását a hangterjedési sebességre vonatkozóan Bucur (1984) alapján (II.8. ábra).

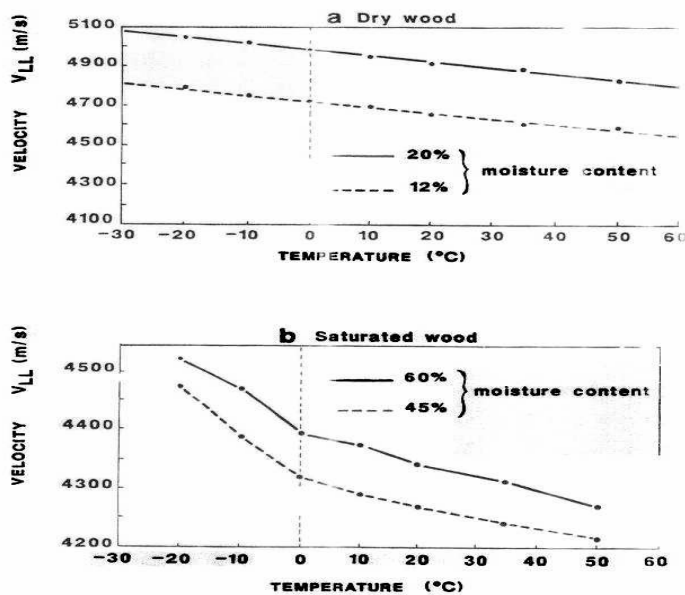


A függvények alapján elmondhatjuk, hogy a négyzetes keresztmetszethez képest a szélesség és vastagság 1:13 aránya esetén 10% hangterjedési sebesség csökkenéssel kell számolnunk lucfenyő esetén. Vizsgálataim során kialakított próbatest esetén ez az arány 1:5, így mintegy 5%-os sebességcsökkenés várható a négyzetes keresztmetszethez képest.

II.8. ábra A próbatest keresztmetszeti méretének hatása a hangterjedési sebességre lucfenyő esetén (Bucur 1984)

A mérhetőssal kapcsolatban megjegyzendő, hogy a hangterjedési sebesség csökkenése a fa inhomogenitásával van kapcsolatban a keresztmetszet oldalirányainak megváltozásakor.

Végül tekintsük át a hőmérséklet hangterjedési sebességre gyakorolt hatását Auge (1990)



kutatásai alapján. (II.9. ábra) A vizsgálatok alapján látható, hogy -30 - +50°C között 12% és 20% nedvességtartalmú fa esetén mintegy 10%-al csökken a hangterjedés sebessége, míg rosttelítettség felett ugyanezen tartományban csak 5% mértékű. A méréseim során megközelítőleg szoba-hőmérséklet volt a jellemző, ennek ingadozása mint a grafikonokból kitűnik nem okoz jelentős változást a hangterjedési sebességben, így a hőmérséklet hatásával nem kell számolnunk a vizsgálatok során.

II.9. ábra A hőmérséklet hangterjedési sebességre gyakorolt hatása rostirányban (Auge 1990)

**Összefoglalásképpen elmondhatjuk a következőket:**

- a hanghullám frekvenciája erősen befolyásolja a hangterjedési sebességet 50-200 kHz között a hangsebesség mintegy kétszeresére nő
- a rostlefutási szög rostokkal párhuzamostól való eltérése szintén csökkenti a hangsebességet 0-45° tartományban a csökkenés mértéke 100kHz-es jelet figyelembe véve mintegy 50%, ezen szögtartomány felett közel állandó marad.
- a nedvességtartalom növekedése csökkenti a terjedési sebességet. A csökkenés mértéke az abszolút száraz - rosttelítettségi tartományban mintegy 20%
- a próbatest keresztmetszeti méreteinek aránya a négyzetes keresztmetszethez képest 1:13 arány esetén mintegy 10% sebességcsökkenést eredményez
- a hőmérséklet hangterjedésre gyakorolt hatása csekély, ha figyelembe vesszük a saját vizsgálati körülményeinket, akkor hatása elhanyagolható.

**A szakirodalmi vizsgálatok áttekintése a következő mérés technikai megfontolásokhoz vezetett:**

- A vizsgálatok során viszonylag széles frekvenciaspektrum mérésére van szükség a faanyag mért AE frekvenciatartománya miatt ld. IV. fejezet. Az érzékelők távolságát (7 cm), a mért terjedési sebesség alapján a beállított elfogadott időkülönbséget (8µs) úgy kellett megválasztani, hogy a befogásoktól érkező nagyfrekvenciás, nagysebességű jelek is ki

legyenek zárva, ugyanakkor ne szűkítsük le túlzottan a vizsgált tartományt. A tartomány túlzott leszűkítése kevés AE eseményt detektálásához, továbbá az alacsony frekvenciájú ezért kisebb sebességű tönkremeneteli jeleket kizárásához vezet.

A megadott beállítási és elhelyezési értékek a leírt szempontok figyelembevételével mellett optimálisnak tekinthetők.

- a rostlefutási szög csillapító hatása vizsgálataimban nem okoz problémát mivel minden vizsgálat esetén a rostokkal párhuzamosan kimetszett próbatesteket használtam.

- a nedvességtartalom hatását a különböző nedvességtartalmú minták esetén azokon elvégzett terjedési sebesség méréssel figyelembe vettem

- a próbatest geometriájának hatását oly módon vettem figyelembe, hogy a sebességmérést mindig a kialakított próbatesten végeztem, így adott geometriának megfelelő sebességértéket kaptam és használtam fel.

Mindezek figyelembevételével mellett a szakirodalom nem ad választ az adott geometria és nedvességtartalom mellett a vizsgált anyagra jellemző akusztikus csillapításra, így ezen területen saját méréseket végeztem, melynek eredményeit a továbbiakban ismertetem.

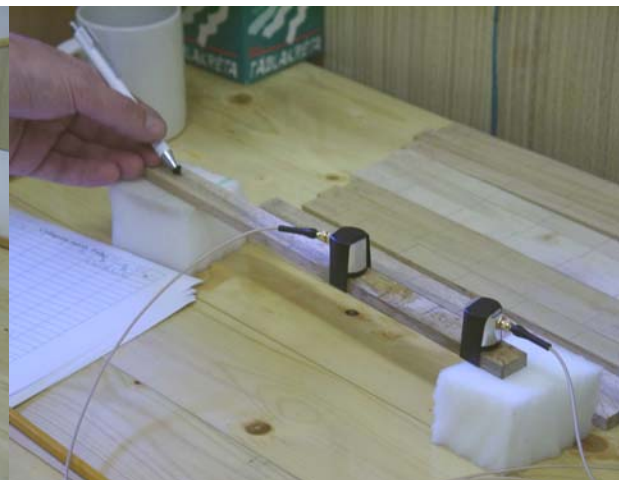
### III. A nedvességtartalom és a fafaj hatása az akusztikus csillapításra

Az akusztikus csillapítás mérésekre azért van szükség, hogy adott vizsgálati körülmények között képet kapjunk az AE jel sebességéről és csillapodásáról a távolság függvényében a vizsgált fafajok és nedvességtartalmi állapotok mellett. Ha a csillapítást ismerjük, úgy következtethetünk arra, hogy a tönkremenetel során kapott események a tönkremenetel forrásától az érzékelőig megtett úton mennyit változnak.

A csillapítási viszonyok feltérképezése érdekében három nedvességi osztályt állítottunk be - 0%, 9%, 25% abszolút száraz tömegre vonatkoztatott nedvességtartalommal - lucfenyő mintán, osztályonként három 8x20x300 mm-es próbatesttel. A próbatest keresztmetszeti mérete megegyezik a vizsgált húzó-próbatetek középső kigyengített szakaszának méretével (ld. I.2.3. ábra). A mérések során tehát a későbbi vizsgálatok geometriájának megfelelő csillapítási adatokat nyertünk. A mérések során az AE technikában használatos un., ceruzapróbát használtuk, amikor is egy 0,3 mm vastag 2H keménységű ceruzabél törése jelentette a tesztjelet, melynek csillapodását mértük különböző távolságokban (III.1,2. ábra).

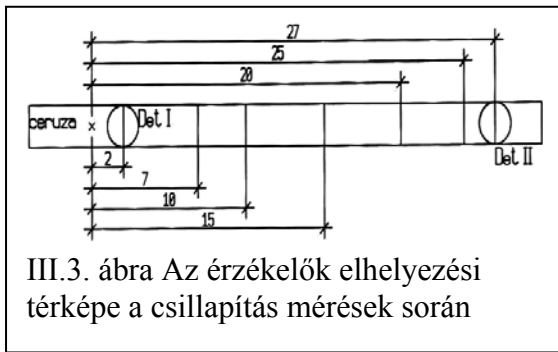


III.1. ábra Az AE mérőrendszer csillapítás mérése során



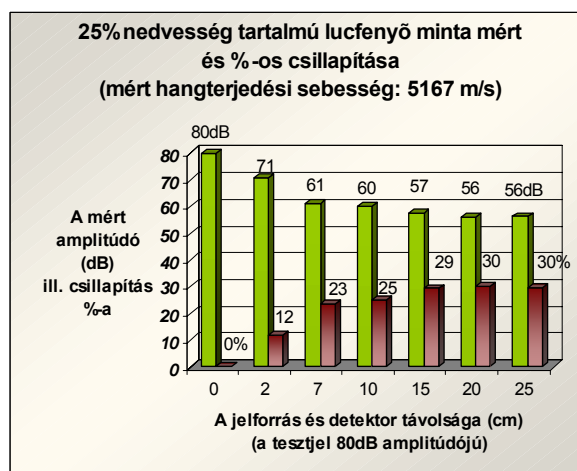
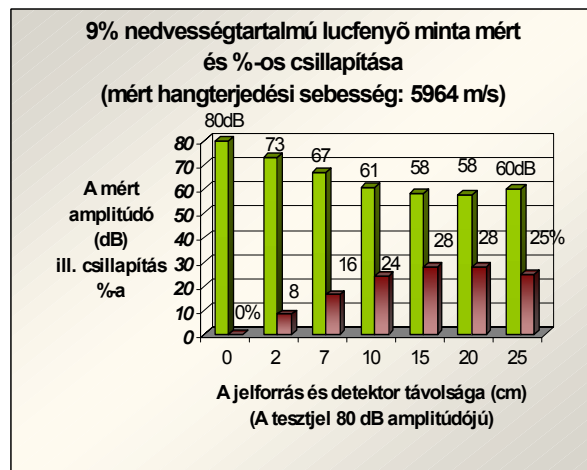
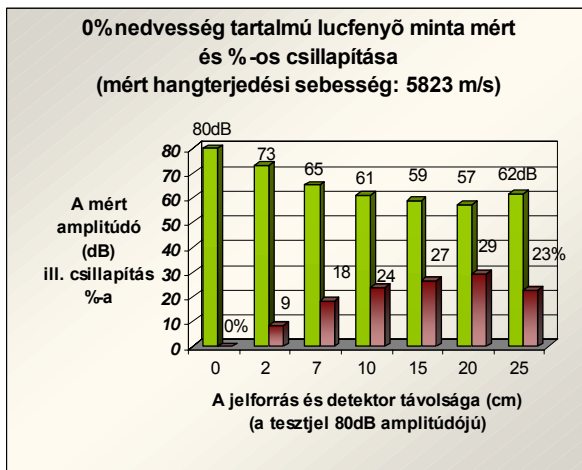
III.2. ábra Csillapítás mérés ceruzapróbával

A tesztljel esetünkben 80 dB amplitúdójú jelet adott az érzékelő felületén törve. Ezt tekintettük csillapítatlan bázis jelnek. A mérések során az I-es (Det I) érzékelő távolságát változtattuk a ceruzapróba helyéhez képest 2-25 cm - 2, 7, 10, 15, 20, 25 cm - tartományban és mértük a bázisjel amplitúdóját. (III.3. ábra) A 2 cm-es minimális távolságot az érzékelő mérete tette szükségessé. A vizsgálatok során minden egyes érzékelő helyzetben három-három ceruzapróbát végeztem mintánként, így minden egyes vizsgált távolságban kilenc mérési adat alapján határoztam meg a csillapodás mértékét. A III.2-3 ábrának megfelelően két érzékelőt



III.3. ábra Az érzékelők elhelyezési térképe a csillapítás mérések során

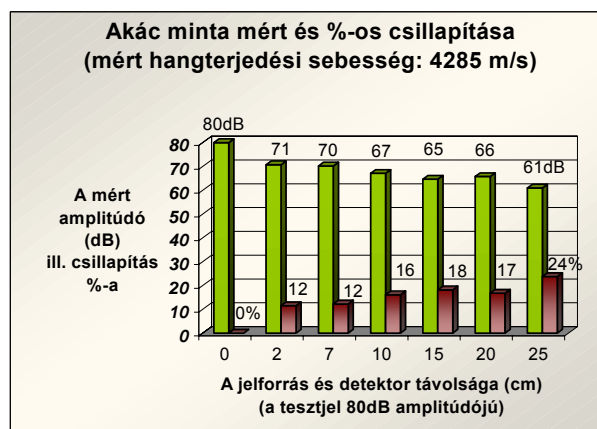
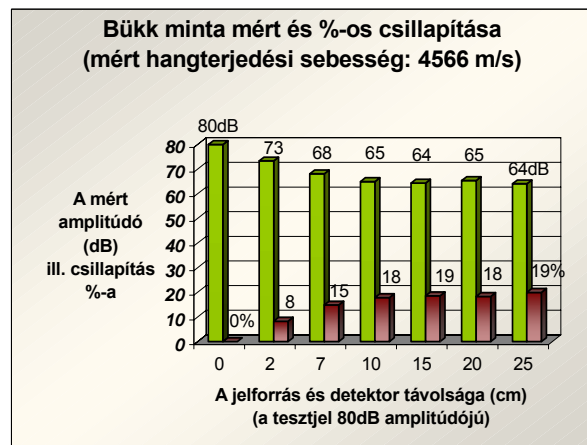
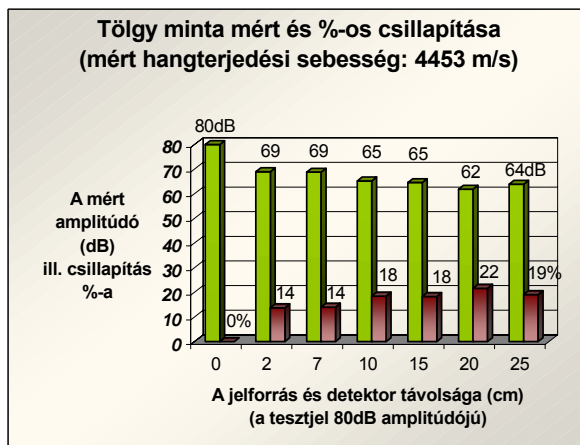
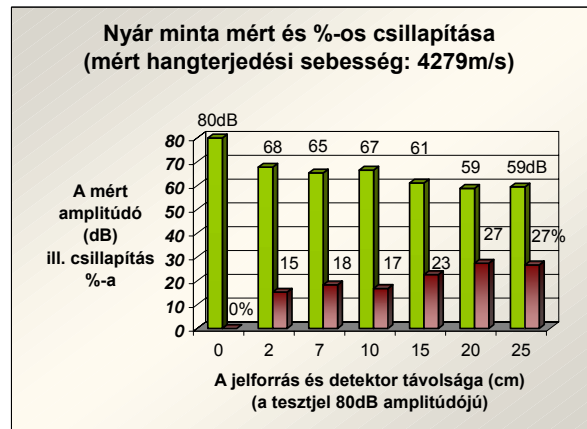
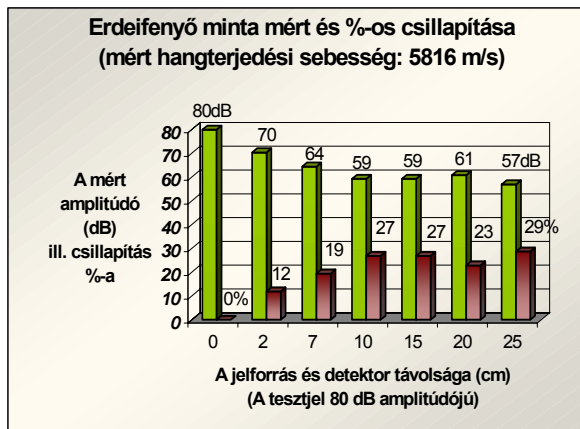
helyeztünk fel annak érdekében, hogy a hullámterjedési sebességet is meg tudjuk mérni. A ceruzához közelebb lévő érzékelő a tesztljel mért AE paramétereit rögzítette, míg a második a jel beérkezésének késési idejét az első érzékelőhöz képest. A két érzékelő távolságának ismeretében, így könnyen megkapjuk a terjedési sebességet, minden egyes mérési helyzetben. Ezek alapján tehát minden nedvességi osztályban mintegy ötven mérési adat alapján határoztuk meg a terjedési sebességet. A kapott eredményeket a következő grafikonok mutatják. A sebességmérési adatok varianciája  $U_n=0\%$ -nál  $V=5\%$ ,  $U_n=9\%$ -nál  $V=11\%$  míg



$U_n= 25\%$ -nál  $V=2\%$  volt. A grafikonokat vizsgálva elmondhatjuk, a nedvességtartalom növekedése az akusztikus csillapítás kismértékű növekedését vonja maga után a távotérben, ahol 23%-ról 30%-ra nőtt az amplitúdó csillapítása 0-25% nedvességtartományban. A közel térben ez a növekedés kisebb mértékű és 9% nedvességtartalom mellett kisebb csillapítást

mértünk 0 %-hoz képest. Általánosan elmondhatjuk, hogy a nedvességtartalom növekedése a csillapítás kismértékű növekedésével jár együtt a 0-25% nedvességtartalom esetén lucfenyő mintákon. A grafikonokon bemutatott 7 cm-es távolság azért figyelemreméltó, mert a később bemutatott húzóvizsgálatok során a detektorok távolsága 7 cm. Jelen mérések segítségével tehát a húzóvizsgálatok során kapott események csillapodási viszonyaira is következtethetünk. Terjedési sebességmérések alapján azt mondhatjuk, hogy a 0-9% nedvességtartalom mellett közel azonos terjedési sebességet mértünk, míg a rosttelítettség közelében a terjedési sebesség az abszolút száraz állapothoz képest mintegy 13%-al csökken.

A nedvességtartalom hatásának behatárolása után elvégeztük az AE mérésekbe bevont további öt hazai faj - erdeifenyő, nyár, tölgy bükk, akác - esetében is a csillapítás méréseket a fent leírtakkal megegyezően fajonként három-három mintával. A minták átlagos nedvességtartalma 9% volt. Az eredményeket a következő grafikonok mutatják.



A sebességmérési adatok varianciája erdeifenyőnél  $V=4\%$ , nyárnál  $V=10\%$ , tölgnél  $V=11\%$ , Bükknél  $V=1\%$  míg akác esetén  $V=3\%$  volt. A különböző fafajok csillapítási tulajdonságait vizsgálva az mondhatjuk, hogy azok jelentős különbségeket nem mutatnak. Nem különülnek tehát el a tűlevelűek, lágylombos és keménylombos fák az akusztikus csillapítás szempontjából. A vizsgált 2-25cm-es távolság-tartományban mért csillapítási értékek különbsége nem haladja meg az 5 %-ot.

A csillapítás mérések eredményeinek összefoglalásaképpen a következőket mondhatjuk:

- **A nedvességtartalom jelentős növekedése az akusztikus csillapítás kismértékű növekedését vonja maga után lucfenyő mintákon.**
- **A hangterjedési sebesség a rosttelítettségi nedvességtartalom mellett 13%-al csökken az abszolút száraz állapothoz képest.**
- **A mérések alapján elmondhatjuk, hogy az egyes fafajok és nedvességtartalmi osztályok sem befolyásolták jelentősen az akusztikus csillapítás értékét.**
- **A 2-25 cm-es tartományban az átlagos csillapítási érték 11-25% a nedvesség tartalom változását és a különböző fafajok esetén mért csillapítási értékeket együttvéve.**

**A később bemutatott AE vizsgálatok során a próbatest középső harmadán mintegy 3 cm-es tartományból érkező eseményeket fogadtuk el. Ezen vizsgálati tartományra vonatkozóan azt mondhatjuk a mérések alapján, hogy az elfogadott események mért amplitúdója átlagosan 8-15%-al kisebb a tönkremenetel helyén keletkező AE események amplitúdójánál.**

#### IV. Az AE mérések frekvenciatartományának meghatározása faanyag esetén

Az AE mérések során piezoelektromos érzékelőket használunk. Ennek két alapvető típusát különböztetjük meg: 1. rezonáns érzékelők; 2. szélessávú érzékelők

A rezonáns érzékelők a rezonanciájuknak megfelelő és annak egy szűkebb környezetében detektálnak jelet nagy érzékenységgel. A szélessávú érzékelők mint nevük is mutatja egy nagyobb frekvenciasávot képesek átfogni közel azonos érzékenységgel, érzékenységük azonban kisebb. A faanyaggal kapcsolatos AE kutatások során a legtöbb esetben a fémipari alkalmazások számára kifejlesztett érzékelőket alkalmazzák. Lényeges kérdés, hogy faanyag vizsgálatára ezek mennyire alkalmasak. A szakirodalomban nem találunk olyan munkákat, mely a faanyagra jellemző frekvencia-tartományokat, ezek különböző jellemzőktől való függését feltárnák. A kutatók inkább próbálgatással határozzák meg egy adott érzékelő alkalmasságát, miszerint az érzékelő akkor megfelelő, ha a mérések során nagy számú AE jelet detektálnak segítségével. Ehhez azonban számos érzékelő szükséges, mely nem kis költséggel jár, ha figyelembe vesszük, hogy egy érzékelő-pár ára mintegy fél millió forintot tesz ki. További hátránya a módszernek, hogy az érzékelési tartományon kívül eső jelek számáról, nagyságáról semmilyen információval nem rendelkezünk a mérések során. Ezen területen mutatkozó hiányosságok másik oka az lehet, hogy faanyagtudomány területén a módszer alkalmazása jelenleg nagyon úttörő jellegűnek tekinthető, így tudományos alaposágú megközelítések még nem alakultak ki említett problémák megoldására. Kutatásaim megalapozását éppen ezért ebben az irányban igyekeztem kiterjeszteni, hogy a frekvencia érzékelési tartományát tudományos igényességgel behatároljam. A szakirodalom tanulmányozása után elmondhatjuk, hogy az elvégzett kísérletekhez általában 100 kHz feletti érzékelési tartományú detektorokat alkalmaztak, ami a fémek AE-s frekvencia tartományának alsó határát jelenti. Nem áll rendelkezésre tehát információ az ultrahang-tartomány 20-100kHz közötti sávjában esetlegesen emittált AE események számáról, jellegéről. Ezen tartomány abból a gyakorlati tapasztalatból kiindulva lehet figyelemreméltó, miszerint a faanyag még tönkremenetele előtt kis roppanásokkal jelzi a benne ébredő feszültségek leépülését. Feltételezhető tehát, hogy a faanyag a hallható hangtartomány közvetlen közelében, az ultrahangtartomány kezdetén és a 100 kHz alatti frekvenciasávban is emittál. A faanyag mint ortogonálisan-anizotróp anyag esetén nem várhatjuk, hogy egy szűkebb emissziós tartományt határolhatunk be, hiszen szerkezeti és fizikai mechanikai tulajdonságok tekintetében is nagyon különböző részekből épül fel. A faanyagot továbbá szilárd farészek és sejtüregek halmazának tekinthetjük, ami azt eredményezi, hogy az esetleg keletkező nagy frekvenciájú és általában kis energiájú jelek erősebben csillapodnak, így azok érzékelése nehézségekbe ütközik vagy nem valósítható meg. Ezen állítást előzetes mérések igazolták is, amikor is 100 kHz feletti érzékelési tartományú detektorral végeztünk húzóvizsgálatokat. Sok esetben csak néhány eseményt rögzítettünk egy törési folyamat során, szemben az alacsonyabb frekvenciatartományú érzékelőkkel rögzített néhány száz, esetenként néhány ezer eseménnyel. Mindezek alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a faanyag AE vizsgálatához elengedhetetlenül szükség van egy átfogó frekvenciaanalízisre, mely feltárja a fára jellemző frekvenciatartományt, továbbá választ ad néhány lényeges befolyásoló faktor - mint nedvességtartalom, fafaj, terhelési sebesség, igénybevétel jellege - hatásának mibenlétére a faanyag AE-s frekvenciatartományának esetleges megváltozásában. Első lépésként behatároltam a frekvenciatartomány két szélső értékét. Az alsó küszöbnek a mérőrendszer által támogatott legalsó frekvenciát 20 kHz-t választottam, mely a hallható tartomány felső küszöbének (16 kHz) közvetlen közelében van. A felső küszöböt a nagyfrekvenciás vizsgálatok alapján 250 kHz-nek választottam. Az ennél nagyobb frekvenciájú jelek faanyag esetén olyan kis energiával rendelkeznek a detektorhoz érve, hogy a jelenlévő zajoktól való

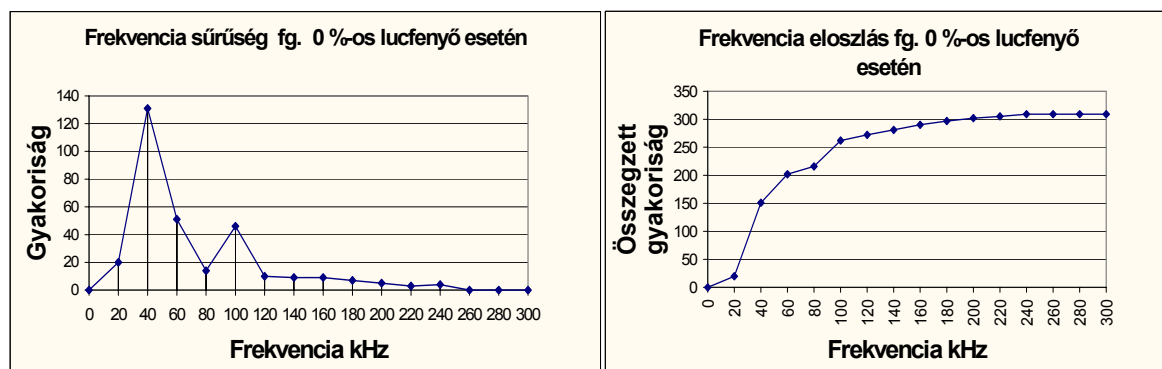


elkülönítésük biztonsággal nem végezhető el. Ennek alapján szereztünk be egy DECI SE1000-H érzékelő párt, mely a 20-250 kHz tartományt közel azonos érzékenységgel detektálja. Szélessávú érzékelőről van tehát szó, mely közel egyformán erősíti a beérkező jeleket a vizsgálati tartományban. A frekvenciaanalízist ezen érzékelő párral végeztem el. A következőkben tekintünk át a frekvenciatartomány meghatározásának eredményeit.

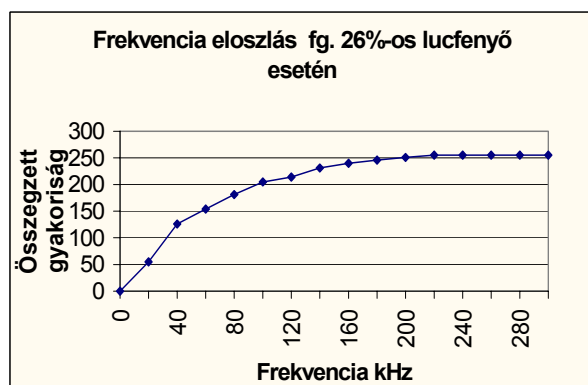
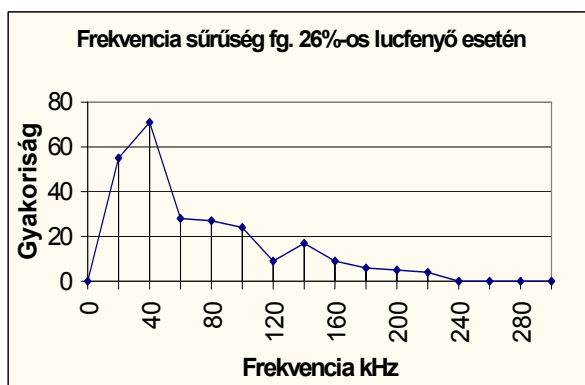
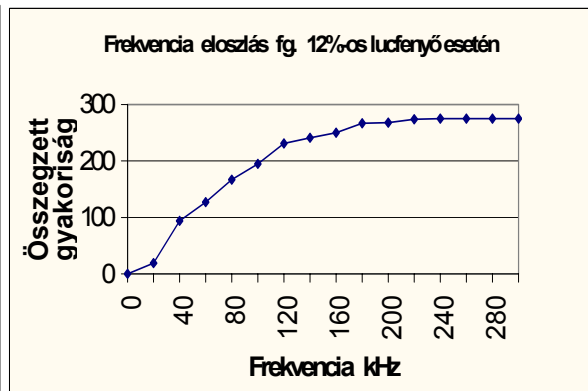
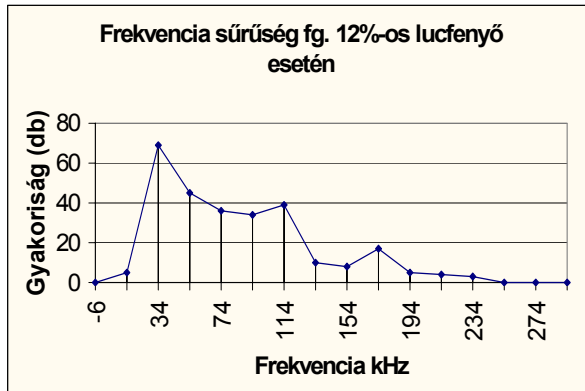
#### IV.1. A nedvességtartalom hatásának vizsgálata a faanyag AE-s frekvenciatartományára

Első lépésként a faanyag tulajdonságait alapvetően meghatározó nedvességtartalom hatását vizsgáltam. Vizsgálataimhoz 3 egymástól jelentősen különböző nedvességi osztályt állítottam be, osztályonként 25 db lucfenyő húzó-próbatestet. A nedvességtartalmi osztályok a következők voltak: 0%, 12 %, 26% abszolút száraz tömegre vonatkoztatott nedvességtartalom. A fafaj kiválasztásában a lucfenyő jelentős AE aktivitása, valamint geszt és szíjács részeinek közel azonos mechanikai tulajdonságai vezettek, melyek a próbatest kialakítás megkönnyítése és így a minták homogenitásának biztosítása szempontjából lényegesek. A méréseket a Zürichi Műszaki Egyetem Faanyagtudományi intézetében végeztem (ETH Zürich), ahol lehetőség volt a kiválasztott nedvességtartalmi osztályok beállítására. Vizsgálataimmal a két intézet közös, lucfenyő szilárdsági tulajdonságait meghatározó kutatásaiba kapcsolódtam be. A kiválasztott nedvességi osztályok a faanyag abszolút száraz és rosttelítettség közötti nedvességállapotának tartományát (átlagosan 0-30%) közel azonos részekre osztja, ugyanis lucfenyő esetén a 26%-os nedvességtartalom gyakorlatilag rosttelítettségnek tekinthető. Húzóvizsgálatokat végeztünk a mintákon, miközben a két felhelyezett érzékelővel és a hozzá kapcsolódó mérőrendszerrel vettük az AE eseményeket. A próbatest kialakítása a korábban leírtakkal megegyező volt. A kapott jelek időfüggvényeit egy SIGNALYSER nevű PC kártya segítségével nyertük az érzékelőkről. A mintavételi frekvencia a várt legnagyobb frekvencia ötszöröse, azaz 1250 kHz volt, ami 800 nano-secundum mintavételi időt jelent. Ezáltal a várt legnagyobb frekvenciájú események szinusz hullámait is legalább öt pont alapján veszi fel a mérőrendszer, ami kielégítő pontosságú. Egyidejűleg az események egyéb AE-s paramétereit is rögzítettük a DEPHECTOPHONE mérőrendszerrel.

Az időfüggvényekből a méréseket követően szoftveres úton Fourier transzformációt végeztünk, ezáltal az események frekvenciafüggvényeihez jutottunk (II. melléklet). Nedvességtartalmi osztályonként mintegy 300 frekvenciaadattól álló mintát képeztünk a frekvenciaanalízishez. A minta egy-egy eleme egyetlen akusztikus esemény frekvenciáját jelenti. Ez a mintaszám a faanyag egyéb szilárdsági vizsgálatainál is kielégítő eredményt szolgáltat a gyakorlat számára, így én is ezt vettem alapul. Az eredményeket a következő ábrák mutatják.



Megfigyelhető, hogy az egyes nedvességtartalmi osztályok nagy nedvességtartalom különbsége, mely a mechanikai tulajdonságokat lényegesen befolyásolja az AE-s események frekvenciájára nincs jelentős hatással. Mindhárom esetben az alacsony frekvencia



tartományban 20-50kHz között kapjuk a legnagyobb gyakoriságot és a 20-100 kHz tartományban van az események döntő többsége. Megfigyelhető az is, hogy a 12%-os nedvességtartalmi osztályban nagyobb részarányban jelentkeznek események a 100kHz feletti tartományban míg a másik két csoport közel azonos eloszlást mutat. Ez a különbség azonban nem jelentős a frekvencia-tartomány befolyásolásában. Az egyes nedvességtartalmi osztályokban detektált események frekvenciájának megoszlását a 20-250 kHz tartományban a IV.1. táblázatban foglaltam össze.

<b>IV.1. Az AE események frekvenciájának részaránya különböző nedvességtartalom mellett 20-250 kHz tartományban</b>					
<b>nedvesség tartalom</b>	<b>minta elemszáma</b>	<b>eseményszám 20-50 kHz</b>	<b>részarány 20-50 kHz</b>	<b>eseményszám 20-100 kHz</b>	<b>részarány 20-100 kHz</b>
<b>0%</b>	309	151	<b>48%</b>	232	<b>75%</b>
<b>12%</b>	275	94	<b>34%</b>	180	<b>65%</b>
<b>26%</b>	255	126	<b>49%</b>	188	<b>73%</b>

A vizsgálatok alapján elmondhatjuk, hogy lucfenyő esetében helyes feltételezéssel éltünk a frekvenciatartomány kezdeti behatárolásában, mely 20-250 kHz közé esik, ezen belül a lucfenyő 20-100 kHz tartományban a legaktívabb.

Az elemzések objektív tétele érdekében a reológiában használatos relaxációs időhöz hasonlóan vezessük be a karakterisztikus frekvenciát mint az anyagra jellemző értéket. A relaxációs függvények ugyanis a frekvenciavizsgálatoknál kapott összegzett gyakoriságfüggvényekhez hasonlóak, annyi különbséggel, hogy míg a relaxációs görbék nullához tartanak, addig az eloszlások a vizsgált események összegéhez vagy ezt normálva egyhez. A relaxációs idő azon időmennyiség, míg az állandó alakváltozás fenntartásához szükséges feszültség a nulla időpillanatban fellépő feszültség  $e^{-1}$  szeresére csökken. Ennek mintájára a karakterisztikus frekvencia azon frekvenciát jelöli esetünkben, mely  $(1 - e^{-1}) \cdot n$  gyakorisághoz tartozik, ahol n a minta elemszáma. Így az adott jellemző, esetünkben a

frekvencia eloszlásfüggvény meredekségét jellemző értéket kapunk, adott nedvességtartalom mellett. Az eloszlásfüggvényekből fenti összefüggés alapján meghatározott karakterisztikus frekvenciákat a következő táblázat mutatja a vizsgált nedvességtartalmak mellett.(IV.2.táblázat)

<b>IV.2.tábl. Karakterisztikus frekvencia értékek a vizsgált nedvességtartalmak mellett</b>		
	<b>a minta elemszáma db</b>	<b>karakterisztikus frekvencia kHz</b>
<b>nedvességtartalom</b>		
0 %	309	<b>57,2</b>
12 %	275	<b>85</b>
26 %	255	<b>65,1</b>

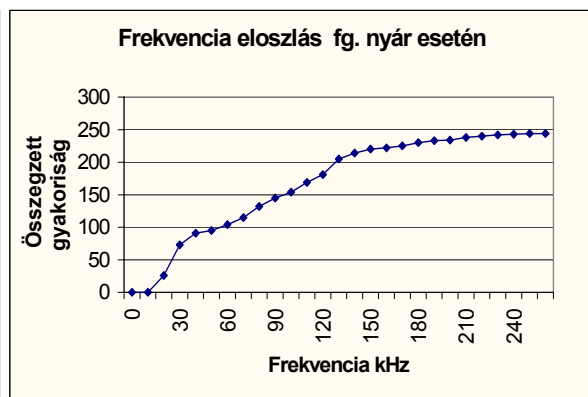
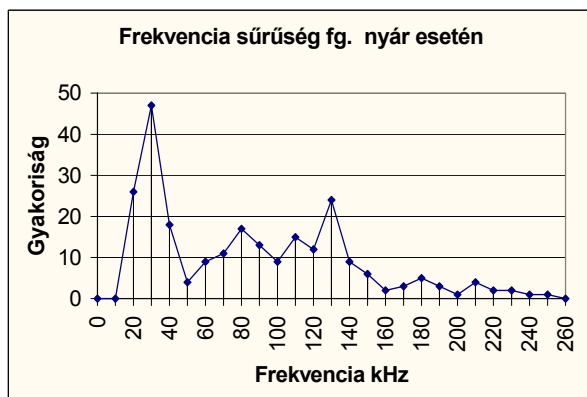
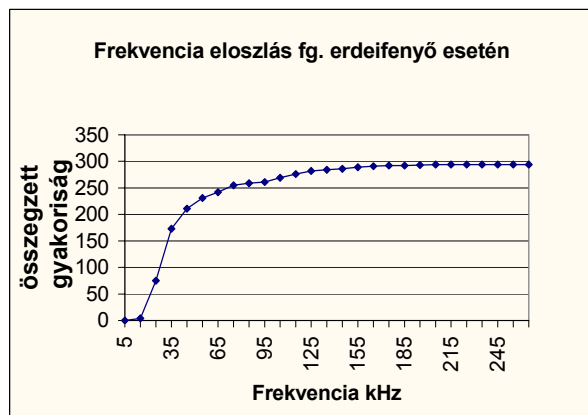
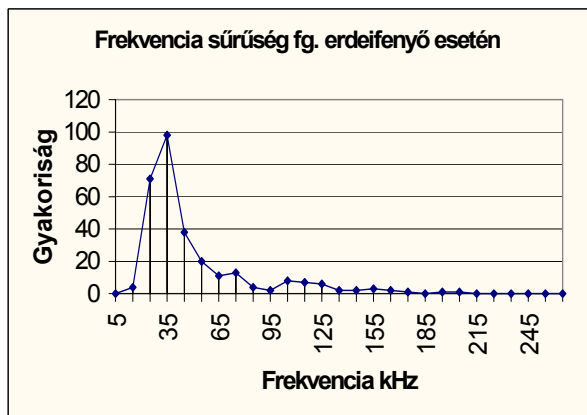
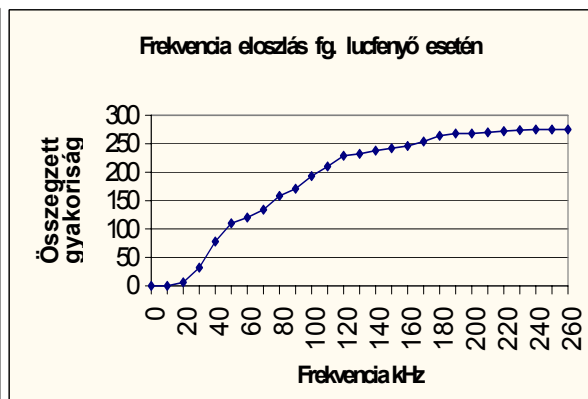
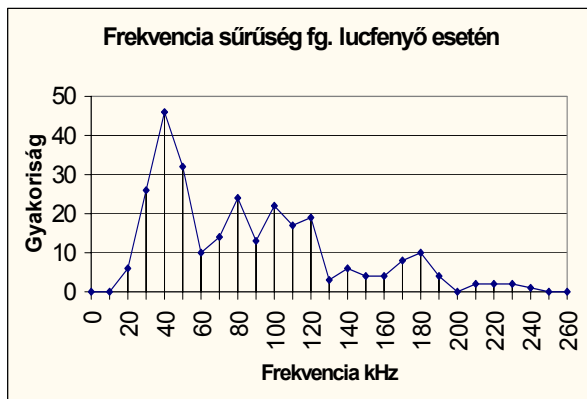
Kiegészítve vizsgálatainkat a karakterisztikus frekvenciával megállapíthatjuk, hogy lucfenyő esetén a karakterisztikus frekvencia 12% nedvességi osztályban jelentős mintegy 48%-os emelkedést mutat, abszolút száraz állapothoz képest, rosttelítettség mellett pedig 14 %-al mutat magasabb frekvenciát.

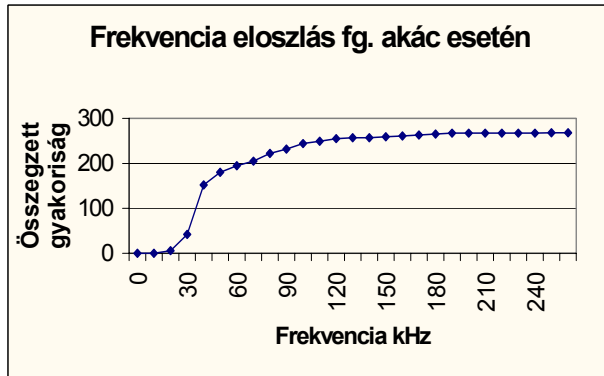
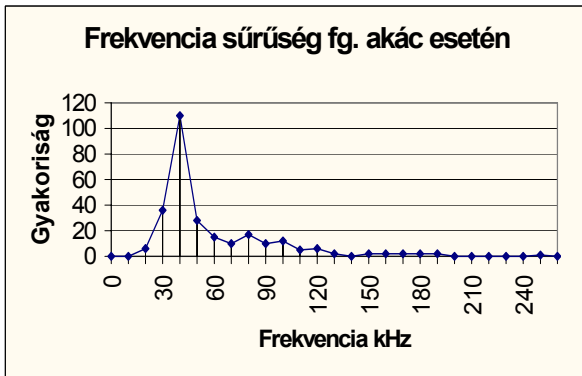
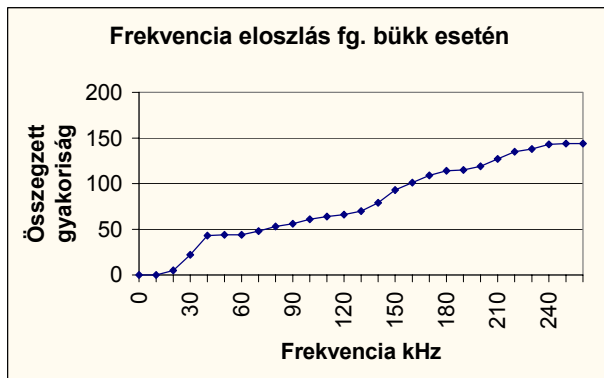
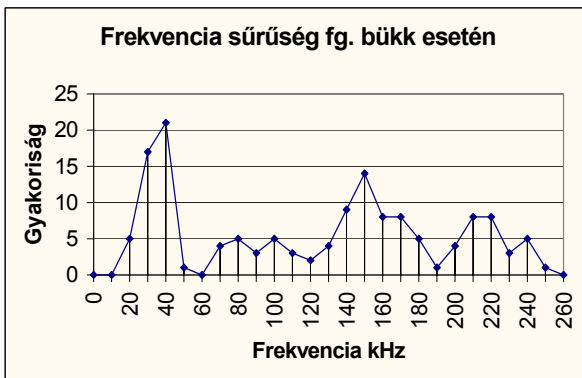
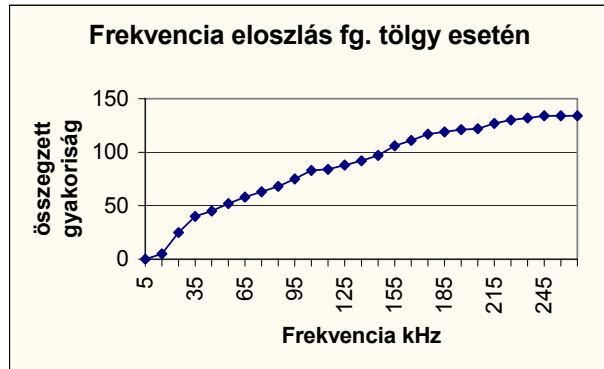
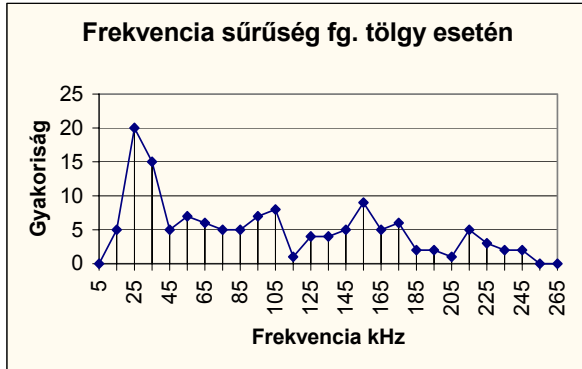
**Összefoglalásként elmondhatjuk, hogy a nedvességtartalom változása nincs jelentős hatással lucfenyő jellemző AE-s frekvenciatartományára az 20-100 kHz-re tehető, ugyanakkor a karakterisztikus frekvencia jelentősen, mintegy 50%-al megnő 12% nedvességtartományban, abszolút száraz állapothoz képest. Az abszolút száraz és rosttelítettség mellett jellemző frekvencia nem mutat jelentős különbséget.** Ez elég meglepő, ha figyelembe vesszük, hogy a faanyag mechanikai tulajdonságai nagymértékben függenek a nedvességtartalomtól. Joggal várhattuk volna tehát, hogy a frekvenciatartomány is eltolódik, hiszen az abszolút száraz és rosttelítettség közelében lévő faminták tönkremeneteli folyamataiban jelentős különbségek lehetnek. Mindezek alapján tehát kijelenthetjük, hogy a különböző nedvességtartalmú famintákhoz használhatjuk ugyanazon piezoelektromos érzékelőket anélkül, hogy jelek egy részének elvesztésével kellene számunk. Figyelembe kell vennünk azonban, hogy a kapott frekvencia eltolódást a detektorok érzékelési tartománya lefedje.

## IV.2. Az egyes fafajok AE frekvenciatartományának meghatározása

Vizsgálataim következő területe az egyes fafajok frekvenciatartományának meghatározása volt. Hat hazai fafaj frekvenciatartományát vizsgáltam fajonként 25 húzó-próbatesttel. Ezek a következők voltak: lucfenyő, erdeifenyő, nyár, tölgy, bükk, akác.

A vizsgálatokat a korábban leírtakkal azonos módon végeztem a minták nedvességtartalma átlagosan 11% volt, abszolút száraz tömegre vonatkoztatva. Megjegyzendő még, hogy a bükk és tölgy fajok esetén kis akusztikus aktivitást tapasztaltam, ennek következményeként kisebb elemszámú minta vizsgálatára volt mód ebben a két esetben. A kapott eredményeket a következő grafikonok szemléltetik.





A vizsgálatok alapján a következő megállapítások tehetők. Bár minden esetben az eloszlások módusza, azaz a legnagyobb gyakoriság a 20-50 kHz frekvencia tartományba esik az eloszlások között 3 csoportot különíthetünk el. Akác és erdeifenyő esetén az események döntő többsége mintegy 90% esik a 20-100kHz tartományba tehát ezen két fafaj emissziós tartományát ezen frekvenciatartományba tehetjük. (IV.2.táblázat) Nyár és lucfenyő esetében az emissziós tartomány szélesebb mintegy 20-200 kHz közé tehető. Tölgy és bükk esetében számottevő a magas frekvenciájú jelek részaránya, így csaknem a teljes mérési tartományt detektálnunk kell, az emissziós tartomány 20-240kHz-re tehető. A nedvességtartalom hatásvizsgálatához hasonlóan itt is bevezettem a karakterisztikus frekvenciát (34.oldal) az elemzések teljesebbé tételének érdekében.(IV.2.táblázat) Ezen jellemző alátámasztja eddigi eredményeinket, hiszen erdeifenyő és akác esetén 20-50 kHz tartományba esik a karakterisztikus frekvencia, míg nyár lucfenyő esetén 100 kHz közelében van, tölgy bükk esetén 100 kHz feletti tartomány érzékelése is szükségesnek mutatkozik a vizsgálatok során.

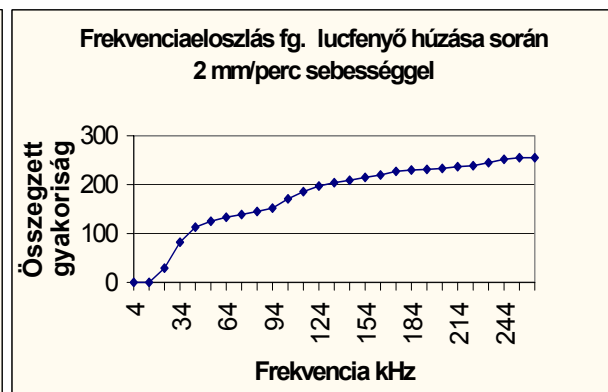
Ha általában a faanyag AE vizsgálatáról beszélünk akkor a mérések alapján a 20-250 kHz frekvenciatartományt kell megjelölnünk, mint szükséges érzékelési tartományt.

IV.2. táblázat A különböző fajok frekvencia eloszlásának részarányai a 20-250kHz frekvenciatartományban								
fafaj	minta elemszáma	elemszám 20-50 kHz	részarány 20-50 kHz	elemszám 20-100 kHz	részarány 20-100 kHz	elemszám 20-200 kHz	részarány 20-200 kHz	karakterisztikus frekvencia kHz
luc f.	275	94	34%	180	65%	268	97%	85
erdei f.	294	211	72%	261	89%	293	99%	38
nyár	244	93	38%	149	61%	233	95%	94
tölgy	135	45	33%	75	56%	121	90%	113
bükk	145	43	30%	61	42%	116	80%	150
akác	269	169	63%	236	88%	267	99%	50

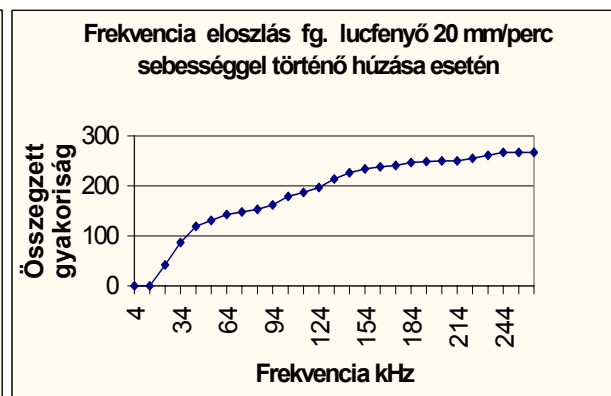
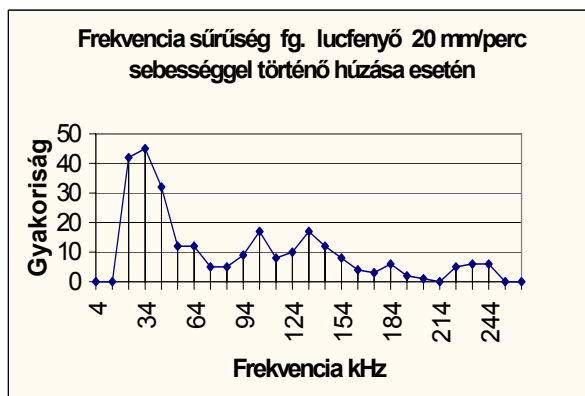
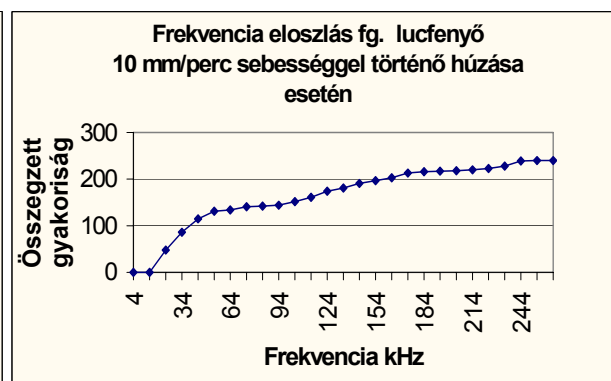
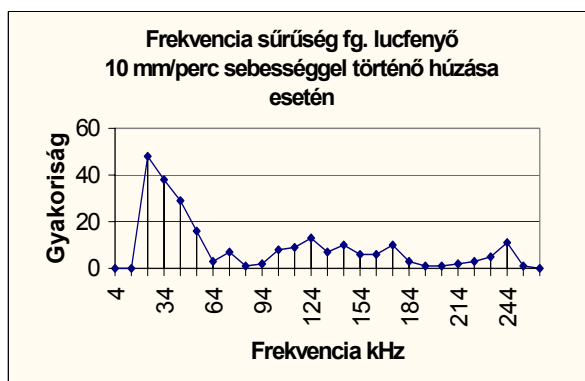
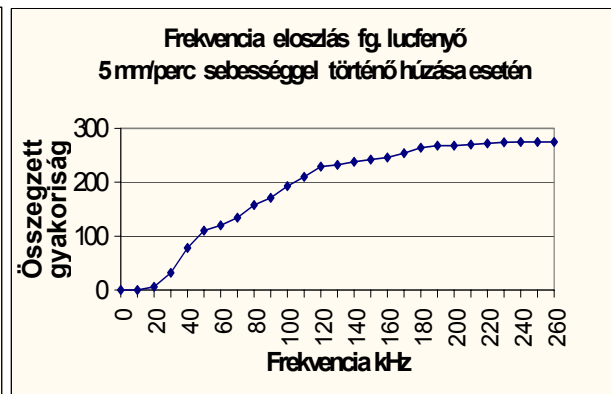
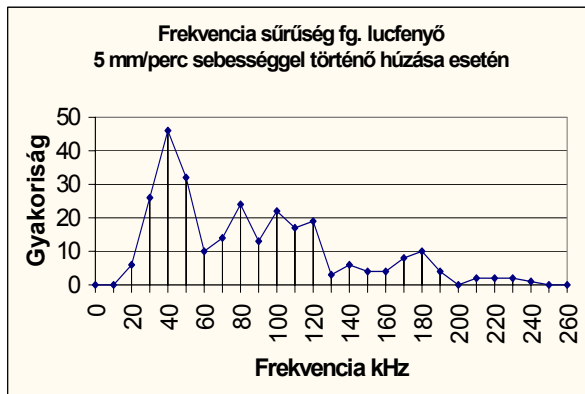
### IV.3. Az alakváltozási sebesség hatása a faanyag AE frekvenciájára

Vizsgálataim következő területe az alakváltozási sebesség hatására irányult. Ennek ismeretét egyrészt azért tartom fontosnak, hogy a szakirodalomban tárgyalt vizsgálatok összevethetőségét megállapítsam a saját vizsgálataimmal. Másrészt azért is lényeges ennek ismerete, hogy választ kapjunk a gyors alakváltozásra kényszerített faanyag AE frekvenciájának változására. Nagy alakváltozási sebességeknél ugyanis nincs elég ideje a farészeknek az alakváltozásra, így olyan helyen is törések keletkeznek, ahol kis sebességek esetén nem, továbbá nagyobb feszültségkoncentrációjú helyek jöhetnek létre. Mindezek alapján elképzelhető tehát, hogy az alakváltozási sebességtől függően más úton zajlik le a tönkremeneteli folyamat, mely a frekvenciára is hatással lehet. Az eddigiekben ismertetett méréseimhez a próbatest hossz méretét is figyelembe véve 5 mm/perc állandó traverzsebességet választottam. Ennek eredményeképpen a próbatestek általában 5 percen belül mentek tönkre és ezzel az anyagvizsgálatban használatos rövid idejű statikus vizsgálatokkal összevethető eredményt kaptam.

Az alakváltozási sebesség vizsgálatához négy alakváltozási sebességet választottam ezek a következők voltak: 2 mm/perc, 5 mm/perc, 10 mm/perc, 20 mm/perc. Minden csoportban 10 lucfenyő húzó próbatestet vizsgáltam a korábban leírtaknak megfelelően.



IV. Az AE mérések frekvenciatartományának meghatározása faanyag esetén \_\_\_\_\_



Elmondható a mérések alapján, hogy bár a különböző alakváltozási sebességek mellett az időegységre eső tönkremenetek száma növekvő sebesség mellett nagyobb az egyes események frekvenciája az alakváltozási sebességtől nem függ. **A különböző terhelési esetekben tehát ugyanazon (20-250kHz) frekvenciatartományban várhatjuk az akusztikus emissziós eseményeket.** Az eredményeket számszerűsítve a IV.3. táblázatban foglaltam össze.

<b>IV.3. táblázat A lucfenyő frekvencia eloszlásának részarányai a 20-250kHz frekvenciatartományban különböző alakváltozási sebességek mellett</b>								
sebesség mm/perc	minta elemszáma	elemszám 20-50 kHz	részarány 20-50 kHz	elemszám 20-100 kHz	részarány 20-100 kHz	elemszám 20-200 kHz	részarány 20-200 kHz	karakterisztikus frekvencia kHz
2	257	114	44%	154	60%	231	89%	98.7
5	275	94	34%	180	65%	268	97%	85
10	241	116	48%	148	61%	217	90%	98
20	267	122	45%	163	61%	249	93%	98.1

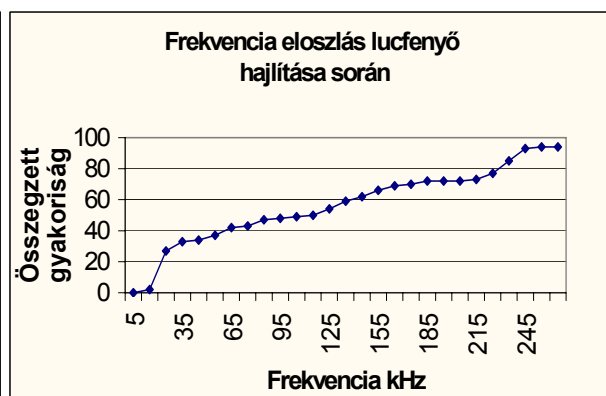
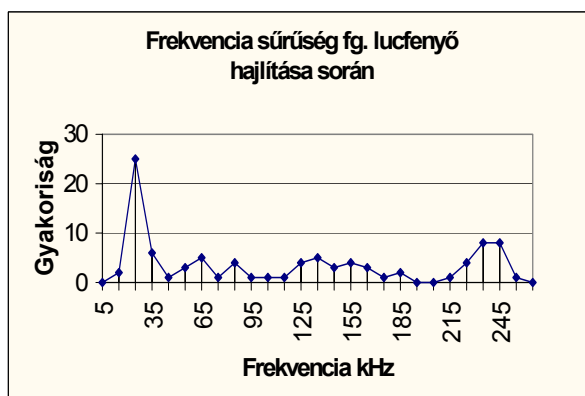
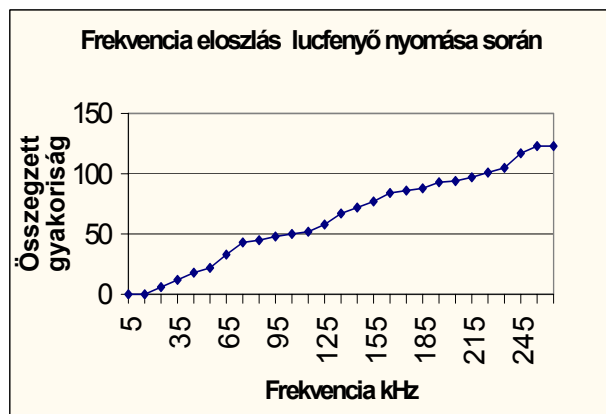
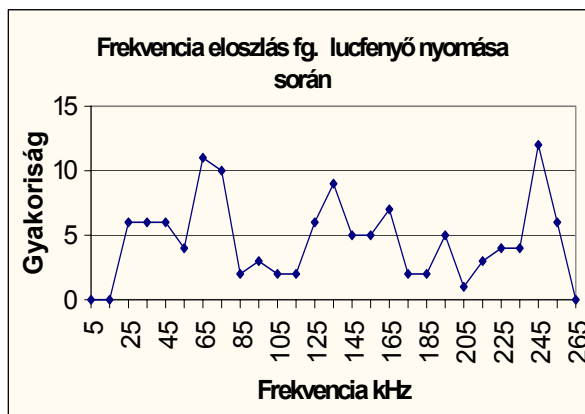
A részarányok különbsége az egyes esetekben nem haladja meg a 10%-pontot, kivételt képez az 5 mm/perc alakváltozási sebesség 20-50kHz tartomány ahol kissé alacsonyabb. A másik két tartományban azonban már egyezést mutat a többi sebességsztályban mért értékekkel.

A karakterisztikus frekvencia is alacsonyabb értéket mutat 5 mm/perc esetén, a másik három alakváltozási sebesség esetén azonban teljes egyezést mutat, így nincs okunk feltételezni ezen sebességtartomány egyfajta sajátos befolyását.

#### IV.4. Az igénybevétel hatása a faanyag AE frekvenciájára

Vizsgáljuk meg végül a különböző igénybevételek hatását. Az eddig leírt eredményeket húzóvizsgálatok során nyertük. A húzó-igénybevétel alkalmazását más kutatók (P.Niemz 1983) ill. saját tapasztalatokon alapuló tény tette indokolttá, miszerint a faanyag legnagyobb AE aktivitást húzó-igénybevétel során mutatja. Célszerű azonban tisztázni az alapvető jelenségeket más, esetünkben nyomó és hajlító-igénybevételre is, hiszen előfordulhat, hogy húzóvizsgálatot nem tudunk végezni valamilyen oknál fogva. Ezenkívül új információt nyerhetünk a fa törési természetének frekvenciával kapcsolatos összefüggéseiről. A méréseket az eddigiekhez hasonlóan tíz-tíz nyomó ill. hajlító próbatesten végeztem el.

A próbatestek keresztmetszeti mérete 20x20 mm volt. A hajlító próbatestek hossza 300 mm, míg a nyomó próbatestek hossz mérete 50 mm volt, minek eredményeképp zömök rúdként mentek tönkre. Hajlító vizsgálatoknál 3 pontos hajlítást alkalmaztunk 200 mm-es alátámasztási közszel. Nyomóvizsgálat esetén 2 mm/perc, míg hajlítás során 5 mm/perc állandó traverssebességet alkalmaztunk. A próbatestek átlagos nedvességtartalma 11% volt. Az eredményeket a következő grafikonok mutatják.



Mindkét igénybevétel fajtánál a várakozásoknak megfelelően kis eseményszámot kaptunk, így a frekvencia analízisbe csak kisebb számú mintát tudtunk bevonni. A grafikonok az



mutatják, hogy nyomás során nagyon jelentős mennyiségű nagyfrekvenciás tartományba eső eseményt kaptunk. A sűrűségfüggvény maximuma is az 50-100kHz-es tartományba tolódott az eddigiekben tapasztalt 20-50kHz-es tartományból. Elképzelhető oka lehet ennek, nyomás során az egyes farészek egymásba csúszásakor sok nagy frekvenciájú kis energiájú súrlódásos jelet kapunk.

A hajlító igénybevételt a nyomó és húzó-igénybevétel kombinációjának tekinthetjük, hiszen mindkét igénybevétel jelen van a próbatest semleges szálának ellentétes oldalán. A kapott eredmény szépen tükrözi ezt a jelenséget hiszen a húzó igénybevételhez képest nagyobb a magas frekvenciájú események részaránya, míg a sűrűség függvény maximuma a húzó-igénybevételnél kapott 20-50kHz tartományba esik. A karakterisztikus frekvencia megerősíti az igénybevétel AE frekvenciára gyakorolt hatását, miszerint nyomás során a karakterisztikus frekvencia csaknem kétszerese a húzásra jellemző értéknek. Az eredményeket a IV.4. táblázat számszerűen mutatja.

<b>IV.4. táblázat A lucfenyő frekvencia eloszlásának részarányai a 20-250kHz frekvenciatartományban különböző igénybevételek mellett</b>								
<b>igénybevétel típusa</b>	<b>minta elemszáma</b>	<b>elemszám 20-50 kHz</b>	<b>részarány 20-50 kHz</b>	<b>elemszám 20-100 kHz</b>	<b>részarány 20-100 kHz</b>	<b>elemszám 20-200 kHz</b>	<b>részarány 20-200 kHz</b>	<b>karakterisztikus frekvencia kHz</b>
<b>húzó</b>	275	94	<b>34%</b>	180	<b>65%</b>	268	<b>97%</b>	<b>85</b>
<b>nyomó</b>	123	18	<b>15%</b>	48	<b>39%</b>	93	<b>76%</b>	<b>155</b>
<b>hajlító</b>	94	34	<b>36%</b>	48	<b>51%</b>	72	<b>77%</b>	<b>135</b>

**Az igénybevétel típusa tehát befolyással van az AE frekvenciatartományára. Nyomó igénybevétel esetén tehát a 20-250kHz frekvenciatartomány egészében várhatunk emissziót. Hajlító igénybevétel esetén ugyanezen vizsgálati frekvenciatartománnyal kell dolgoznunk a jelenlévő nyomó igénybevétel miatt.**

#### IV.5. Összefoglalás

A faanyag AE frekvencia analízise alapján a következő megállapításokat tehetjük:

- **Ha általában a faanyag AE vizsgálatáról beszélünk akkor a 20-250 kHz frekvenciatartományt kell megjelölnünk, mint szükséges érzékelési tartományt.**
- **Kijelenthetjük továbbá, hogy a nedvességtartalom változása nincs jelentős hatással lucfenyő jellemző AE-s frekvenciatartományára az 20-100 kHz-re tehető, ugyanakkor a karakterisztikus frekvencia jelentősen, mintegy 50%-al megnő 12% nedvességtartományban, abszolút száraz állapothoz képest. Az abszolút száraz és rosttelítettség mellett jellemző frekvencia nem mutat jelentős különbséget. Mivel nagyságrendbeli különbséget nem tapasztaltunk, a különböző nedvességtartalmú famintákhoz használhatjuk ugyanazon piezoelektromos érzékelőket anélkül, hogy jelek egy részének elvesztésével kellene számunk. Figyelembe kell vennünk, hogy a kapott frekvencia eltolódást az érzékelők érzékelési tartomány lefedje.**
- **Az AE események frekvenciája az alakváltozási sebességtől nem függ.**
- **Az igénybevétel típusa hatással van a kapott események jellemző frekvenciatartományára. Húzás során az események legnagyobb gyakorisággal a 20-50kHz tartományba esnek, míg nyomás során jelentősen megnő a nagyfrekvenciás események száma a legnagyobb gyakoriság 50 - 250 kHz tartományban több közel azonos maximum értéket vesz fel. A hajlítás frekvenciaspektrumában jól tükröződik a húzó és nyomó igénybevétel együttes jelenléte.**

## V. Az akusztikus emissziós jellemzők függése a különböző befolyásoló tényezőktől

A IV. fejezetben behatároltuk az AE frekvenciatartományát faanyagra vonatkozóan és megnéztük a frekvencia tartomány alakulását a fa esetében fontos befolyásoló tényezők mellett. Ebben a fejezetben a Dephctophone AE-s mérőrendszerrel mérhető AE paraméterek alakulását vizsgáljuk a frekvenciatartomány meghatározásánál bemutatott faktorok mellett.

A mérőrendszer segítségével a következő AE-s paraméterek mérhetők ill. számolhatók:

Mért jellemzők: - amplitudó  
- oszcillációs szám  
- esemény felfutási idő  
- esemény hossz  
- terhelőerő  
- elmozdulás

Számított jellemzők: - eseményösszeg  
- esemény energiája  
- egyes jellemzők sűrűség és eloszlás függvényei

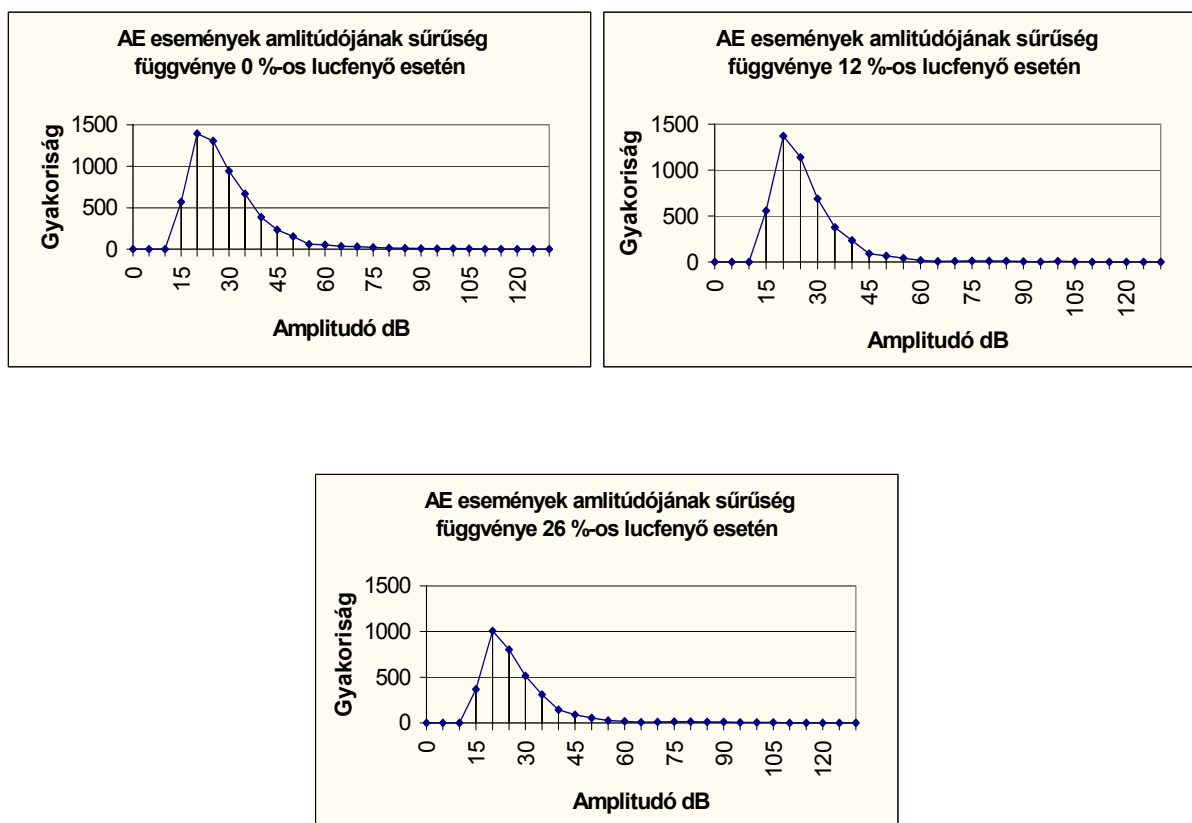
A vizsgálatok során mért terhelőerőt ill. elmozdulást a mérőrendszer külső paraméterként az anyagvizsgáló berendezésből fogadja. Egy-egy AE eseménynek a fent leírt jellemzőit mérjük ill. számoljuk tehát. Vizsgálataim célja az volt, hogy ezen jellemzők alakulását, változását mérjem változó vizsgálati feltételek mellett és ezek kiértékeléséből a faanyag AE-s viselkedését tárjam fel. Távlabbi célként ezen tulajdonságok és a faanyag fizikai, kémiai és mechanikai tulajdonságai közti összefüggések feltárását tűztem ki.

A vonatkozó szakirodalom áttekintése után (ld. I.1. fejezet) elmondhatjuk, hogy viszonylag kevés tömörfára vonatkozó vizsgálatot végeztek és eddig nem készült átfogó munka a faanyag AE-s feltárására. Ennek okát egyrészt az AE újszerűségében kereshetjük fakutatás területén. Mintegy 10 éve kezdtek el kutatók szélesebb körben faanyagot vizsgálni AE-vel. Másrészt a fa mint biológiai anyag fizikai, mechanikai tulajdonságainak nagy inhomogenitásban találhatjuk a választ arra, hogy miért halad lassan az AE módszerének faanyagra való alkalmazása. Próbamérések és kisebb sorozatok vizsgálata után ugyanis nem kapunk tiszta képet a faanyag AE-s jellegéről. Két azonos kialakítású fafajú próbatést között is nagyon jelentős AE-s aktivitási különbség lehet. Gyakran tapasztalhatjuk, hogy míg egyik több száz eseményt ad a törésig, addig a másik csak néhány tizedet a törés környezetében. Így több kutató is, aki a módszert kipróbálta, a leírt anomáliák miatt felhagyott a további vizsgálatokkal.

Az említett problémák ugyan nagyban nehezítik a munkát, de szélesebb körű vizsgálatokkal, nagyobb mérési sorozatok vizsgálatával értékes következtetésekre juthatunk a faanyag törési tulajdonságait illetően. A következőkben tekintsük át elsőként a nedvességtartalom befolyásoló hatását a faanyag AE-s tulajdonságaira vonatkozóan.

### V.1. A nedvességtartalom befolyásának vizsgálata a faanyag AE-s tulajdonságaira

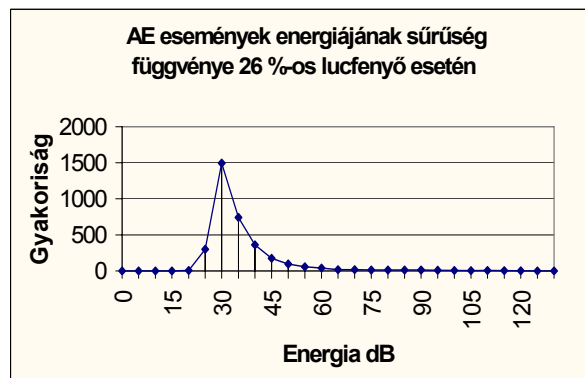
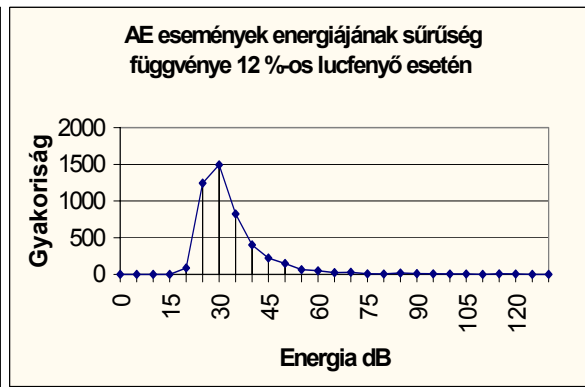
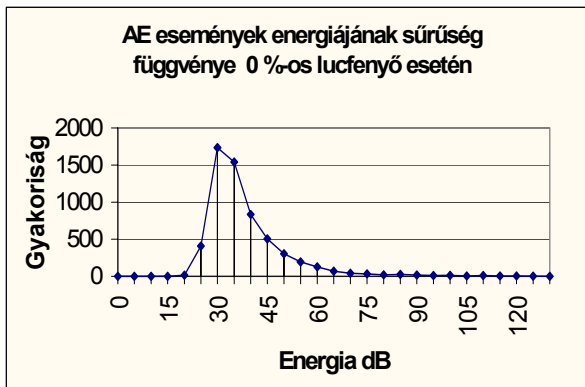
A nedvességtartalom a faanyag mechanikai tulajdonságainak egyik alapvető befolyásoló faktora. Ebben a fejezetben arra keressük a választ, hogyan befolyásolja a nedvességtartalom változása a faanyagban létrejött mikro-repedések és törések által keltett AE-s eseményeket a terhelési folyamat során. A méréseket három nedvességtartalmi osztályban végeztem, ezek 0%, 12%, 26%. A vizsgált fafaj lucfenyő volt, a mintaszám osztályonként 25 db. Húzó próbatesteket vizsgáltunk, melyek a korábban megadottal megegyező kialakításúak voltak (III. melléklet). A mérések során kapott eseményekből osztályonként egy-egy adathalmazt képeztem és az események mért ill. számított fizikai jellemzőinek gyakoriság és eloszlásfüggvényeit vizsgáltam. Az így kapott nagy elemszámú mintából (3000-6000db) kapott gyakoriság és eloszlás függvények reprezentatívnak tekinthetők az egyes AE-s tulajdonságokat illetően. Megjegyzendő, hogy faanyag szilárdsági tulajdonságainak meghatározásához 300 db-os elemszám már reprezentatívnak tekinthető (Szalai 1994). Tekintsük át elsőként az események amplitúdóinak gyakoriságfüggvényeit a három nedvességtartalmi osztály esetén.



Összehasonlítva a három nedvességi osztályban kapott gyakoriság függvényeket megállapítjuk, hogy azok csaknem azonosak. A legnagyobb gyakoriság mindhárom esetben a 20 dB középvértékű osztályba esik. Az amplitúdó gyakoriság értékei mindhárom esetben a 15-60 dB tartományban vannak. (A mért amplitúdó értékeket dB-ből Voltra a  $U_{amp}(V) = 0.4 \times 10^{(AMP (dB) - 100)/20}$  összefüggéssel számíthatjuk át. Ennek megfelelően 20 dB 40 $\mu$ V-nak, míg 60dB 4mV-nak felel meg.) Vessük össze a gyakoriságfüggvényeket az egyes osztályokban kapott eseményösszeggel, ami a minták elemszámának felel meg. 0%-os osztályban 5707db, 12%-os osztályban 4697 db, míg 26%-os osztályban 3180db eseményt detektáltunk. Ha megfigyeljük a sűrűségeket, akkor azt tapasztaljuk, hogy a jelentős

eseményszám csökkenés elsősorban a legnagyobb gyakoriságú amplitúdójú eseményeknél nagyobb amplitúdójú események gyakoriságának csökkenését jelenti a 0% és 12% nedvességi osztályt összevetve. További nedvességtartalom növekedés már érinti a legnagyobb gyakoriságú amplitúdót is és arányosan csökken a többi amplitúdó gyakorisága is. A függvények ismeretében a következőket mondhatjuk:

Annak ellenére, hogy egyéb mechanikai jellemzők pl. szilárdság jelentős mértékben változnak a nedvességtartalom változásával, a mikro-tönkrementelekből származó események legnagyobb gyakoriságú amplitúdója nem változik. Ezek szerint a törés természete amplitúdó szempontjából a 20 dB-nél nagyobb amplitúdó tartományba eső események számának csökkenésében jelentkezik a nedvességtartalom növekedése során. Ez részben a faanyag növekvő akusztikus csillapításának növekedésével, részben a kötött-víz-tartalom növekedésével változó alakváltozási tulajdonságokkal magyarázható. További következtetések levonása előtt tekintsük át a többi AE jellemző változását, annak megítélésére, hogy általános vagy kivételes tendenciáról van-e szó. A következőkben vizsgáljuk meg az események energiájának gyakoriság függvényeit.



Fenti ábrák az AE események energiájának gyakoriságfüggvényeit mutatják. Az események energiáját a jel burkológörbéje alatti területből szoftveres úton képezi a mérőrendszer. A három nedvességtartalmi osztályban kapott görbéket vizsgálva a következő megállapításokat tehetjük. A legnagyobb gyakoriságot mindhárom esetben a 30 dB osztályközepű tartományban kaptuk. (Az energia picoJoule-ba való átszámításához az  $E \text{ (pJ)} = 2.75 \times 10^{-6} \times 10^{(E(\text{dB})/10)}$  összefüggést használhatjuk. Ennek megfelelően 30 dB  $2.75 \times 10^{-3}$  pJ, míg 60 dB 2.75 pJ-nak felel meg.) A gyakoriság függvények jellege hasonló, de különbségeket találunk a második legnagyobb gyakoriságú osztályt illetően. 0% nedvesség-tartalomnál ez a 35 dB ( $8,69 \times 10^{-3}$  pJ) osztályközép értékű csoportban van, míg 12%-nál 25 dB-nél ( $8,69 \times 10^{-4}$  pJ). 26%-nál ugyancsak 35 dB-nél, de itt ezen gyakoriság előző kettő osztályánál lényegesen

kisebb. Ez azt jelenti, hogy a második legnagyobb gyakoriságú osztályban tízszeres energiaérték különbség van. Az amplitúdónál megadott eseményszámok nedvességtartalom növekedése során bekövetkező jelentős csökkenése egyrészt a nagyobb energiájú események számának csökkenésében jelentkeznek. Ugyanakkor 0%-os osztályhoz képest megháromszorozódik a 20 dB energiaosztályba tartozó eseményszám 12%-os osztályban.

További nedvességtartalom növekedés során csak a 20 dB-es osztály eseményszáma csökken jelentősen mintegy visszaesve a 0%-nál kapott értékhez. Az AE események energiája mindhárom esetben a 20-60 dB ( $2.75 \times 10^{-4}$  pJ - 2.75 pJ) tartományba esik.

A kapott változások magyarázatára a következő feltevésekkel élhetünk.

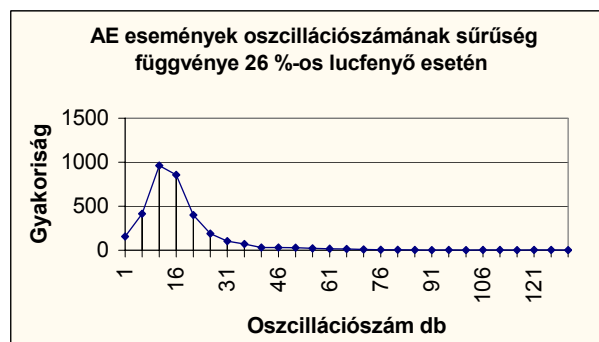
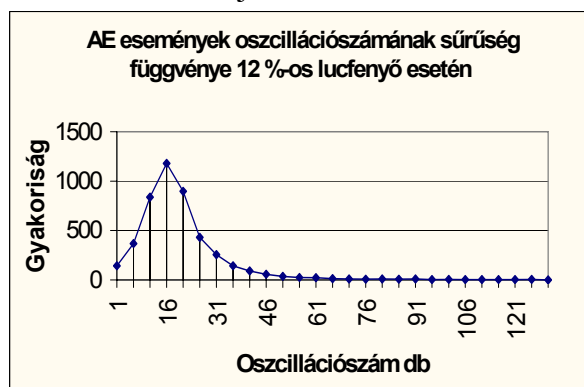
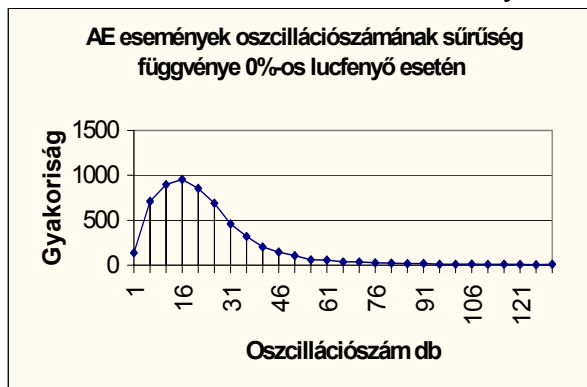
0% nedvességtartalom mellett a jelenlévő sok száradási repedés következtében jelentős mennyiségű, felületek egymáson való megcsúszásából származó súrlódásos eseményt várhatunk. Abszolút száraz fában ez összekapcsolódik a kis akusztikus csillapítással ennek következtében nagy számú, nagy energiájú eseményt kapunk.

12%-os osztályban a jelenlévő kötött víz a cellulóz-fonalmolekulák közé ill. cellulóz lignin közé épülve nagyobb elmozdulások létrejöttét engedi törések létrejötte nélkül. A nedvesebb anyagban a repedések száma is kevesebb, így kevesebb a súrlódásos jellegű események száma is. Az események mért energiaszintje a nedvesség hatására a kisebb értékek felé tolódik.

26% nedvességtartalomnál a rostok csaknem telítettek kötött vízzel. A terhelés során a vízmolekulák az egyes részek megcsúszásakor mint görgők viselkednek, így feltehetően nem keletkezik akusztikus emisszió vagy kis energiája miatt a küszöbszint alatt marad. Ennek megfelelően a kis energiájú súrlódásos jelek eltűnése okozza a 20 dB-es energiaosztályban a gyakoriság lecsökkenését.

A legnagyobb gyakoriságú osztály elemszáma mindhárom esetben közel azonos. Ez arra enged következtetni, hogy a rostok töréséből származó jelek jellege a nedvességtartalom változásával nem változik. A változást feltehetően a súrlódásos jellegű események számának változása és a változó akusztikus csillapítás együttes hatása okozza az eloszlásokban.

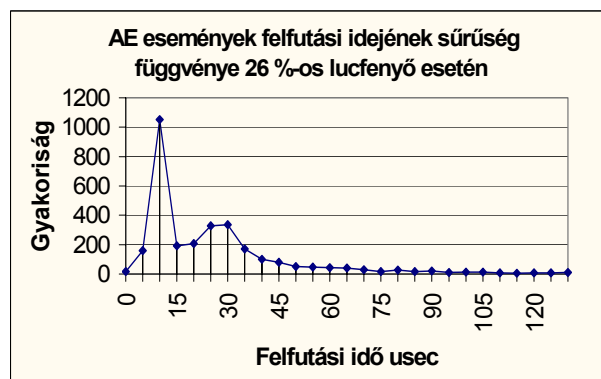
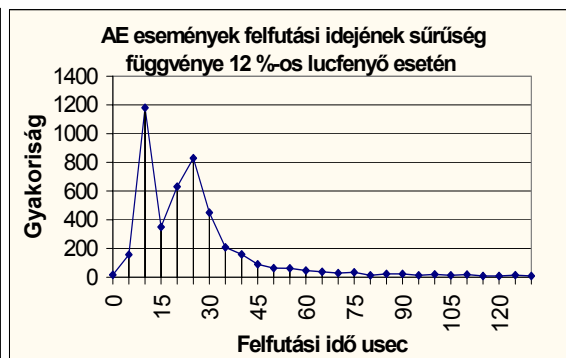
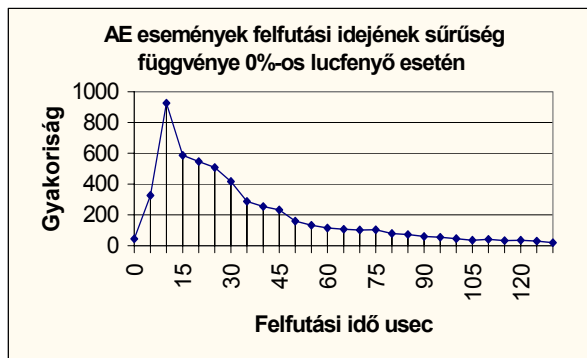
A továbbiakban tekintsük át az események oszcilláció számának jellemzőit.



A három gyakoriságfüggvényt vizsgálva a következő megállapításokat tehetjük az oszcilláció szám és nedvességtartalom kapcsolatára. 0% és 12% nedvességtartalomnál a legnagyobb gyakoriságot a 16 oszcilláció középértékű osztályban kapjuk míg 26%-nál a legnagyobb gyakoriság a 11 oszcilláció középértékű osztályba esik. 0% nedvességtartalomnál az oszcillációk gyakorisága szélesebb tartományt ölel fel, mely a nedvességtartalom növekedésével egyre szűkül, kiemelve a legnagyobb gyakoriságú osztályt. Az oszcilláció szám jellemző tartománya 1- 46 db mindhárom esetben. A nedvességtartalom növekedése a nagyobb oszcilláció számok mennyiségének csökkenését okozza. Ez nyilvánvalóan a faanyag nedvességtartalom növekedésével növekvő akusztikus csillapításával van összefüggésben. Ezt a jelenséget a hangsebesség csökkenése kapcsán is megfigyelhetjük. (ld.II.1. fejezet)

A nedvességtartalom növekedése tehát az AE események oszcilláció számának csökkenését vonja maga után oly módon, hogy a jellemző tartomány nem változik, de az alacsonyabb oszcilláció számú események részaránya megnő.

A nedvességtartalom befolyásának további jellegzetességeit az AE események időjellemzőinek vizsgálatával egészítjük ki. Elsőként az AE események felfutási idejének gyakoriságfüggvényeit elemezzük. A felfutási idő azon időmennyiség amely alatt a jel eléri a csúcs amplitúdóját. (ld. I.2. fejezet 2. ábra) A felfutási idő jellemző a mikro-tönkremenetel keletkezésének sebességére. Segítségével megítélhető, a szakadásokból és elcsúszásokból származó jelek aránya.



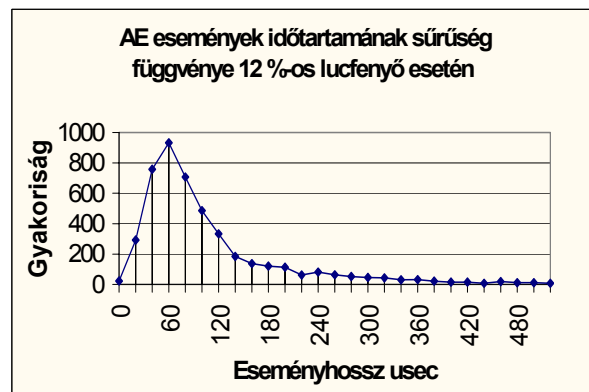
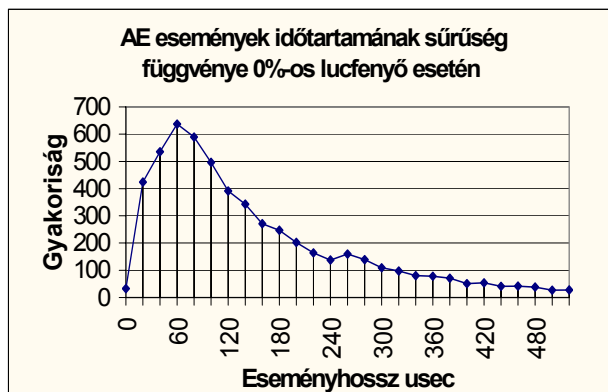
A három nedvességtartalmi osztályban hasonló jellegű, de az eddigiekhez képest nagyobb eltéréseket mutató gyakoriságfüggvényeket kaptunk. A feltehetően törésekből származó 10 µs felfutási idejű esemény fordul elő a legnagyobb számban mindhárom esetben. Különbség mutatkozik azonban a nagyobb felfutási idejű események eloszlásában. 0%-os osztályban kapunk a legnagyobb számban eseményeket a 0-100 µs tartományban. A jellemző felfutási

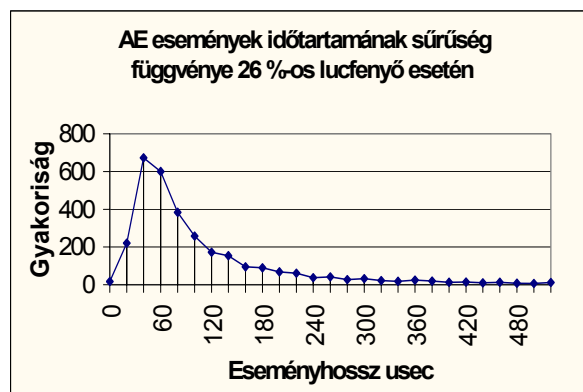
idő tartomány a 12%-os osztályban 0-60  $\mu$ s tartományra szűkül és ez nem változik meg a 26%-os osztályban sem. Különbőség van azonban e két utóbbi osztályban a kapott gyakoriságban. 26%-os tartományban közelítőleg fele annyi eseményt detektáltunk 20-50  $\mu$ s felfutási idővel. Nézzük meg, hogy a leírt jellegzetességek milyen kapcsolatban vannak a nedvességtartalmi osztályok mintaszámával. 0%-os osztályban 5707 db, 12%-os osztályban 4697 db, míg 26%-os osztályban 3180 db eseményt detektáltunk, ami megfelel a minták elemszámának. Azt tapasztaljuk tehát, hogy az elemszámban mutatkozó jelentős különbség nem jelentkezik a legnagyobb gyakoriságú osztályban. A kisebb elemszám a nagyobb felfutási idejű események számának csökkenésében mutatkozik meg. Ha elfogadjuk kiinduló feltételezésünket, miszerint a rövid felfutási idejű események az egyes fa részek törésével, míg a hosszabbak megcsúszásokkal, repedési felületek egymáson való súrlódásával kapcsolatosak, a következő megállapításokat tehetjük:

- a 0% nedvességtartalmi minta próbatestjei a szárítási folyamat miatt sok repedést tartalmaznak. Ezen próbatestek terhelése során a repedési felületek egymáson való elcsúszásából származó nagy számú jel okozza a felfutási idő eloszlásában a 15-60  $\mu$ s tartományban a nagyobb gyakoriságot. Ehhez járulhat még ezen nedvességi osztályban mérhető nagyobb hangsebesség és kisebb csillapítás is, így a keletkező kisebb amplitúdójú jelek is átléphetik a szűrési küszöböt az anyag kisebb csillapítása miatt. Növelve ezzel a nagyobb felfutási idejű események számát.
- a 12% nedvességtartalmi osztályban kapjuk a legnagyobb gyakoriság értéket a 10  $\mu$ s felfutási időtartományban. A feltételezhetően törésből származó események száma tehát kissé megnő. A nagyobb felfutási idejű események gyakoriság függvénye úgy változik meg, hogy a jellemző tartomány leszűkül 0-100  $\mu$ s-ról 0-60  $\mu$ s-ra. Ebben az abszolút száraz tartományhoz képest leszűkült tartományban megközelítőleg ugyanannyi esemény tartozik mint a 0%-os osztályban. A nedvességtartalom növekedése tehát a nagyobb felfutási idejű események eltűnését okozza.
- 26% nedvességtartalmi osztályban a jelek jellemző felfutási idő tartománya nem változik marad a 0-60  $\mu$ s. A nagyobb felfutási idejű események száma azonban mintegy felére esik vissza az előzőekkel közel azonos maximális gyakoriságot mutató 10  $\mu$ s-os osztály mellett. A nedvességtartalom további növekedése tehát a nagyobb felfutási idejű események eltűnését okozza a rosttelítettséget megközelítő nedvességtartalomnál.

Összefoglalásképpen elmondhatjuk, hogy a nedvességtartalom növekedésével csökken a megcsúszásokból, súrlódásokból származó jelek száma míg a feltételezhetően törésekből származó jelek száma nem változik jelentősen. A jelek felfutási idő függvényei tehát alátámasztják az energiagyakoriságnál levont következtetéseket.

Végül tekintsük át a jelek időbeni hosszának változását a nedvességtartalom függvényében.





Az AE események hosszának vizsgálata egyrészt a faanyagból származó események időtartamának behatárolása miatt lényeges, másrészt a felfutási időhöz hasonlóan következtetni lehet az események jellegére, továbbá az anyag akusztikus csillapításának változására. Az időben hosszabb események itt is sűrűdéses jellegű eseményekre utalhatnak, de ez nem kizárólagos hiszen egy nagy amplitúdójú törési esemény hossza is időben jelentős lehet. A vizsgált három nedvességi osztály gyakoriságfüggvényeit vizsgálva elmondhatjuk, hogy a legnagyobb gyakoriság a 0%, 12% nedvességi osztályban 60  $\mu$ s eseményhossznál adódott, míg 26% esetén 40  $\mu$ s-nál. Utóbbihoz megjegyzendő, hogy 60  $\mu$ s-hoz 26%-nál csak 60 eseménnyel kevesebb eseményt kapunk, azaz a legnagyobb gyakoriságú osztály a három esetben gyakorlatilag megegyezik. Különbséget tapasztalunk azonban a tartomány terjedelmét illetően. Míg 0% nedvességtartalom esetén a jellemző tartomány 0-480  $\mu$ s-ra tehető addig ez a magasabb nedvességi osztályokban 0-360  $\mu$ s-ra szűkül. A nedvességtartalom növekedése tehát a hosszabb események számának csökkenését okozza, azaz a jellemző eseményhossz tartomány leszűkülésével jár együtt.

A kapott eredmény egyrészt azt jelenti, hogy nagyobb nedvességtartalomnál a sűrűdéses jellegű események részaránya csökken az energiavizsgálatnál leírt okok miatt.

A csökkenésben azonban szerepet játszik a nagyobb nedvességtartalom mellett fellépő nagyobb akusztikus csillapítás is. Ez oly módon történik, hogy egy adott amplitúdójú esemény nagyobb nedvességtartalmú mintában gyorsabban csillapodik a küszöbszint alá, így a leírt eseményhossz rövidebbnek adódik.

A hosszabb események gyakoriság csökkenését harmadrészt a nagy amplitúdójú események számának csökkenése okozza a nedvességtartalom növekedésével.

Az elemzéseket a következőkben vessük össze az AE jellemzőkre is bevezethető karakterisztikus értékekkel, a frekvenciaanalízisnél már tárgyalt módon. Terjedelmi okoknál fogva ebben a fejezetben az eloszlásfüggvények bemutatásától eltekintettünk, ám az V.1 táblázatban bemutatott karakterisztikus értékeken keresztül képet kapunk azok meredekségének változásáról.

<b>V.1 táblázat Karakterisztikus mért és számolt AE paraméter értékek különböző nedvességtartalmú minták esetén</b>					
<b>vizsgált befolyásoló faktor</b>	<b>Amplitúdó dB</b>	<b>Energia dB</b>	<b>Oscilláció db</b>	<b>Felfutási idő <math>\mu</math>sec</b>	<b>Esemény-hossz <math>\mu</math>sec</b>
<b>nedvességtartalom</b>					
0 %	26	35	23	31	142
12 %	25	32	20	23	98
26 %	25	32	15	24	86



A karakterisztikus értékek vizsgálata alátámasztja az amplitúdó sűrűség-függvény esetén levont következtetést miszerint az események amplitúdója nem változik jellemzően a nedvességtartalom növekedésével. Az események energiájára vonatkozóan, jól mutatja a különbséget 0% nedvességtartalom mellett, ahol a karakterisztikus 35 dB ( $8.69 \times 10^{-3}$  pJ) energia mintegy kétszerese a másik két nedvességtartalom mellett kimutatott 32 dB ( $4.35 \times 10^{-3}$  pJ) eseményenergiának. Ennek oka feltehetően a fa 0%-nál mutatott kisebb akusztikus csillapításában valamint a létrejött nagyobb energiájú törésekben keresendő. Ez a jelleg mutatkozik meg aztán a nagyobb, karakterisztikus oszcilláció számban és az időjellemzőkben is.

**A nedvességtartalom hatását a faanyag AE-s viselkedésére a következőkben foglalhatjuk össze:**

- a nedvességtartalom növekedésével csökken a faanyag akusztikus aktivitása. Ha a 0%-hoz mint legaktívabb nedvességtartalmi osztályhoz tartozó eseményszámot tekintjük 100%-nak akkor 12% nedvességtartalom mellett az események száma 80 % míg 26%-nál 56 % a kapott AE eseményszám.
- az AE aktivitás csökkenése egyrészt a faanyag növekvő akusztikus csillapításával van kapcsolatban, melynek eredményeként a küszöbszint átlépéséhez szükséges energia növekszik a nedvességtartalom növekedésével. A mikro-tönkremenetelekből származó jeleknek csak kisebb hányada tudja átlépni a szűrési küszöböt. Másrészt részben megváltozik a faanyag AE viselkedése a növekvő nedvességtartalom mellett.
- A faanyag AE viselkedése, így AE aktivitása is a súrlódásos jellegű események részarányának változásában különbözik elsősorban növekvő nedvességtartalom mellett.
- Az események amplitúdó gyakoriságát vizsgálva megállapítottuk, hogy a nedvességtartalom növekedése elsősorban a 20dB-nél nagyobb amplitúdók gyakoriságának csökkenésében jelentkezik.
- Az eseményszámok nedvességtartalom növekedése során bekövetkező jelentős csökkenése egyrészt a nagyobb energiájú események számának csökkenésében jelentkezik. Másfelől a 0%-os osztályhoz képest megháromszorozódik a 20dB energiaosztályba tartozó eseményszám 12%-os osztályban. További nedvesség tartalomnövekedés során csak a 20dB-es osztály eseményszáma csökken jelentősen mintegy visszaesve a 0%-nál kapott értékhez. Az AE események energiája mindhárom esetben a 20-60 dB ( $2.75 \times 10^{-4}$  pJ - 2.75 pJ) tartományba esik.

A kapott változások magyarázatára a következő feltevésekkel élhetünk.

0% nedvességtartalom mellett a jelenlévő sok száradási repedés következtében jelentős mennyiségű felületek egymáson való megcsúszásából származó súrlódásos eseményt várhatunk. Abszolút száraz fában ez összekapcsolódik a kis akusztikus csillapítással, ennek következtében nagy számú nagy energiájú eseményt kapunk.

12%-os osztályban a jelenlévő kötött víz a cellulóz-fonalmolekulák és lignin közé épülve nagyobb elmozdulások létrejöttét engedi törések létrejötte nélkül. A nedvesebb anyagban a repedések száma is kevesebb, így kevesebb a súrlódásos jellegű események száma is.

A nedvességtartalom megnövekedése miatt az események mért energiaszintje a kisebb értékek felé tolódik.

26% nedvességtartalomnál a rostok csaknem telítettek kötött vízzel. A terhelés során ezek az egyes részek megcsúszásakor mint görgők viselkednek, így feltehetően nem keletkezik akusztikus emisszió vagy kis energiája miatt a küszöbszint alatt marad. Ennek megfelelően a kis energiájú súrlódásos jelek eltűnése okozza a 20 dB-es energiaosztályban a gyakoriság lecsökkenését.

A legnagyobb gyakoriságú osztály elemszáma mindhárom esetben közel azonos. Ez arra enged következtetni, hogy a faanyag törési természete nem változik alapvetően a nedvességtartalom növekedésével. Ez összecseng más kutatók megállapításával. (Szalai 2003) A változást feltehetően a súrlódásos jellegű események számának változása és a változó akusztikus csillapítás együttes hatása okozza az eloszlásokban.

**- Az események oszcilláció számának vizsgálata azt tapasztaltuk, hogy a jellemző tartomány kissé leszűkül a nedvességtartalom növekedésével és a kisebb oszcilláció számok felé tolódik el a gyakoriságfüggvény. Ezen jelleg valószínűleg a faanyag növekvő nedvességtartalommal növekvő akusztikus csillapításával van összefüggésben.**

**- Az események időfüggvényeinek vizsgálata a nagyobb felfutási és eseményhosszú jelek részarányának csökkenését mutatja növekvő nedvességtartalom mellett. Megállapítottuk, hogy ez egyrészt a nagyobb akusztikus csillapítás, másrészt a súrlódásos jellegű események számának csökkenésével, harmadrészt a nagy amplitúdójú jelek gyakoriságcsökkenésével magyarázható. Utaltunk rá, hogy a növekvő nedvességtartalom a fonalmolekulák és lignin közé beépülő kötött víz beépülésével jár együtt, mely megváltoztatja a faanyag alakváltozási viselkedését, nagyobb elmozdulások megsúszások létrejöttét elősegítve. Ezzel feltehetően a súrlódásos jelek számát csökkenti.**

**A karakterisztikus AE jellemzők vizsgálata alátámasztja a sűrűségfüggvények alapján levonható következtetéseket, az események karakterisztikus energiájában 0% nedvességtartalomnál mintegy kétszeres értéket mutat, mely a kisebb akusztikus csillapítás és a létrejött nagyobb energiájú törések együttes hatásaként áll elő.**

Eddigi elemzéseinket egészítsük ki az egyes mért és számolt AE jellemzők legnagyobb gyakoriságú osztályainak összetartozó értékvizsgálatával. Ez annak a megállapítására lesz alkalmas, hogy az egyes jellemzőkhöz tartozó leggyakoribb értékek összetartoznak-e.

A három beállított nedvességtartalom mellett, a legnagyobb amplitúdó gyakoriságú 20 dB-es osztályba tartozó események mért és számolt jellemzőit vizsgáltam. Ezen jellemzők értékeinek átlagát mutatja az V.2. táblázat.

<b>V.2. táblázat 20dB-es amplitúdó osztályba eső események AE jellemzői</b>				
	<b>energia (dB)</b>	<b>oszcilláció szám</b>	<b>felfutási idő <math>\mu</math>s</b>	<b>esemény hossz <math>\mu</math>s</b>
<b>0%</b>	29	13	31	88
<b>12%</b>	27	15	24	75
<b>26%</b>	29	11	29	81

A táblázat azt mutatja, hogy a legnagyobb gyakoriságú, 20 dB amplitúdóhoz mindhárom esetben gyakorlatilag ugyanazon energiaátlag tartozik, míg oszcillációs szám esetén csökkenést tapasztalunk a 26%-os tartományban. Ez megfelel az oszcilláció szám gyakoriság függvényénél kapott eredménynek, ahol is 26% nedvességtartalomnál a kapott legnagyobb gyakoriság a 11 oszcillációjú osztályban volt. Ez valószínűleg a nedvesebb fa nagyobb csillapításával van összefüggésben. Az egyes nedvességtartalmi osztályokban az AE jellemzők legnagyobb gyakoriságú értékei az amplitúdó, energia és oszcillációs szám tekintetében ezek szerint összetartoznak. **Ha megfigyeljük ez alapján a felfutási idő gyakoriság függvényeit, akkor azt mondhatjuk, hogy a nedvességtartalom növekedésével csökkenő eseményszám ezek szerint a 20 dB amplitúdójú események felfutási idejében különbözik alapvetően. Hiszen az V.2. táblázat alapján ezek felfutási ideje esik a 20-30 $\mu$ s**

**tartományba, ahol a legnagyobb változás következett be a felfutási idő gyakoriságban.** Ugyanakkor azt látjuk a sűrűségfüggvények alapján, hogy a legnagyobb felfutási idő gyakoriság mindhárom nedvességtartalom esetén  $10\mu\text{s}$  és ez nem csökken a jelentős eseményszám csökkenés ellenére sem. Nézzük meg, hogy a  $10\mu\text{s}$  felfutási idejű eseményekhez milyen mért és számolt akusztikus jellemzők tartoznak. Ennek érdekében kiválasztottam a minták  $10\mu\text{s}$ -os osztályba eső elemeit nedvességi osztályonként és ezek összetartozó értékeit vizsgáltam. A jellemzők átlagát képeztem az V.3. táblázatban.

<b>V.3. táblázat <math>10\mu\text{s}</math> felfutási idejű események AE jellemzői</b>				
	<b>amplitúdó (dB)</b>	<b>energia (dB)</b>	<b>oszcilláció szám</b>	<b>esemény hossz <math>\mu\text{s}</math></b>
<b>0%</b>	29	35	20	137
<b>12%</b>	24	30	18	85
<b>26%</b>	26	32	15	92

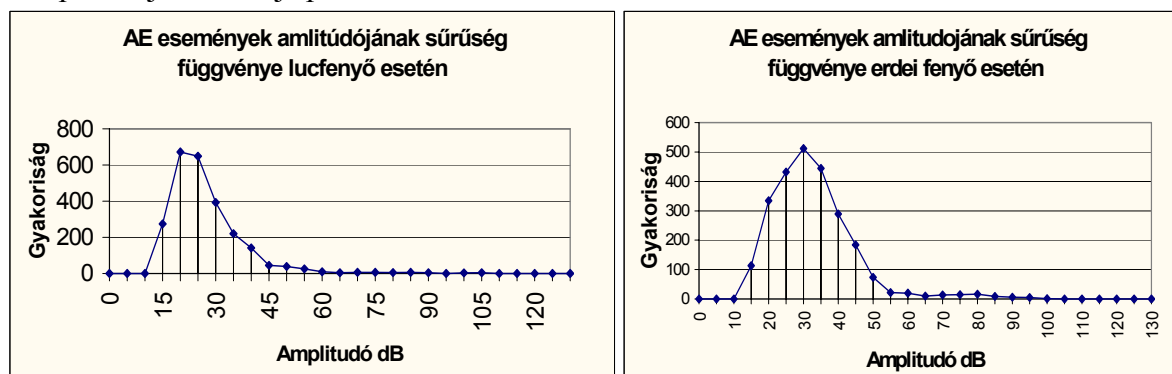
Adott felfutási idő alapján kiválasztva az eseményeket azt tapasztaljuk, hogy növekvő nedvességtartalom mellett az események amplitúdója, energiája csökken, majd rosttelítettségénél kis mértékben nő. Ez azt jelenti, hogy a nagyobb amplitúdójú, energiájú események keletkezésének sebessége nő, hiszen azonos felfutási idő alatt nagyobb energiájú esemény keletkezik. A nagyobb nedvességtartalom tehát nem jelent kisebb energiájú eseményeket, sőt növekvő energiájú eseményeket eredményez rövid felfutási idővel. Az eseményszám nedvességtartalommal való csökkenése tehát elsősorban a nagy felfutási idejű nagy amplitúdójú események csökkenésében jelentkezik. **A nagy amplitúdójú, kis felfutási idejű események száma - melyek feltételezhetően törésből származnak- nem változik.** Ezzel némileg új megközelítésből támasztottam alá az eloszlásoknál elmondottakat, miszerint a törésből származó jelek száma és a jelek jellemző tartománya nem változik jelentősen a nedvességtartalom változásával, ugyanakkor az energiaértékekben jelentős különbséget találunk a tartományon belül.

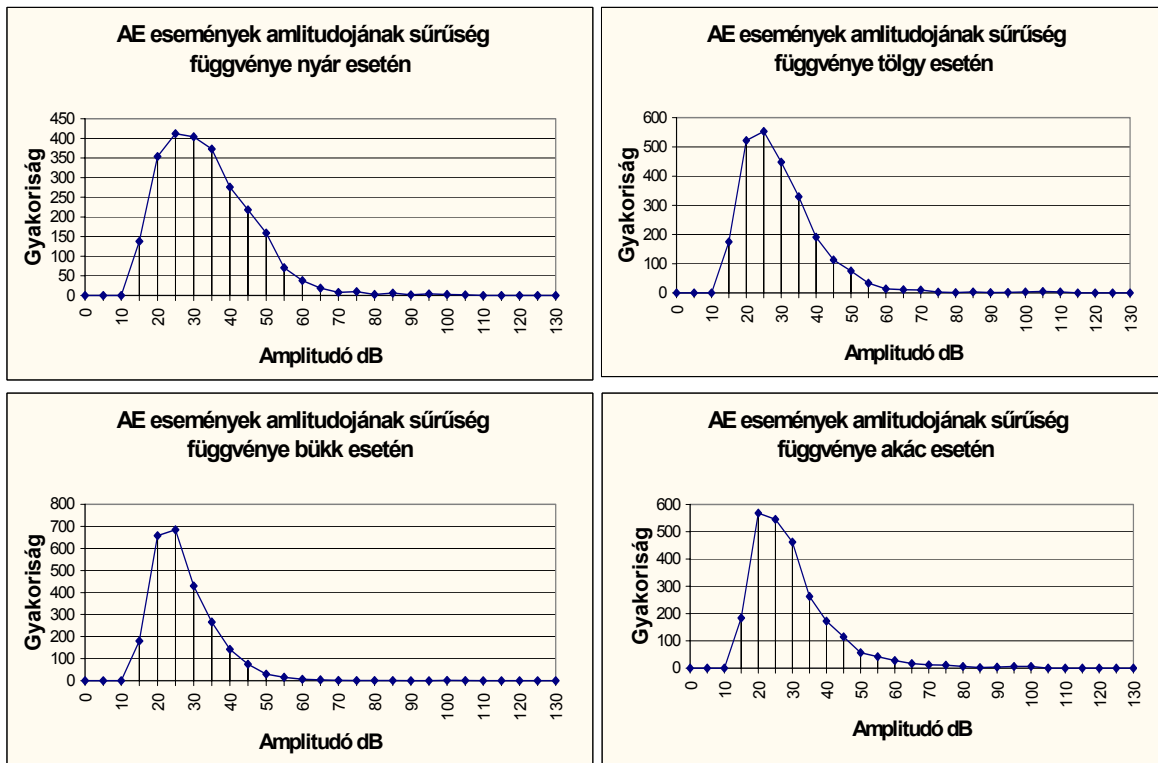
## V.2. A különböző fajok AE-s jellegzetességei

Az előző fejezetben a nedvességtartalmat mint a faanyag mechanikai tulajdonságainak egyik fő befolyásoló faktorát vizsgáltuk. Ebben a fejezetben arra keressük a választ, hogy az egyes fajok fizikai, mechanikai, kémiai tulajdonságaiban rejlő különbségek milyen módon jelentkeznek ezek AE-s vizsgálata során. A vizsgálatokhoz a hazánkban előforduló a faiparban leggyakrabban használt hat fafajt választottam. Ezek: lucfenyő, erdőfenyő, nyár, tölgy, bükk, akác. A vizsgálatokhoz a korábban bemutatott húzó próbatestek kerültek kialakításra, fafajonként 25 db. Az átlagos nedvességtartalom 11% volt. A nedvességtartalomnál leírt módon a húzóvizsgálatok során kapott eseményekből fafajonként egy-egy adathalmazt képeztem és ezek gyakoriság és eloszlásfüggvényeit elemeztem. A különböző fafajoknál kapott eseményszámban jelentős különbségek adódtak. (V.4. táblázat) Az egyes fafajok AE-s tulajdonságainak jobb összehasonlíthatósága érdekében a minták elemszámát a legkisebb akusztikus aktivitást mutató tölgy eseményösszege alapján 2500 db-ban maximáltam. Erre az adathalmaz kezelhetősége miatt is szükség volt mivel 10 000 db nagyságrendű minták kezelését a rendelkezésre álló szoftverek nehézkesen tudták ellátni. A minták reprezentatív jellegét ellenőriztem akác esetén. Az ellenőrzés során először képeztem a kapott összes eseményből a gyakoriságfüggvényeket, majd ugyanezt elvégeztem a mintából véletlenszerűen kiválasztott 2500 eseménnyel is. A vizsgálat azt mutatta, hogy a két esetben kapott minta mediánja, módusza várható értéke azonos. Ez azt jelenti, hogy a kisebb minta is már reprezentatívnek tekinthető, jól jellemzi az anyasokaságot. Ez alapján tehát elegendő a fafajonként kialakított 2500 elemű mintákkal foglalkoznunk (ld. IV. melléklet).

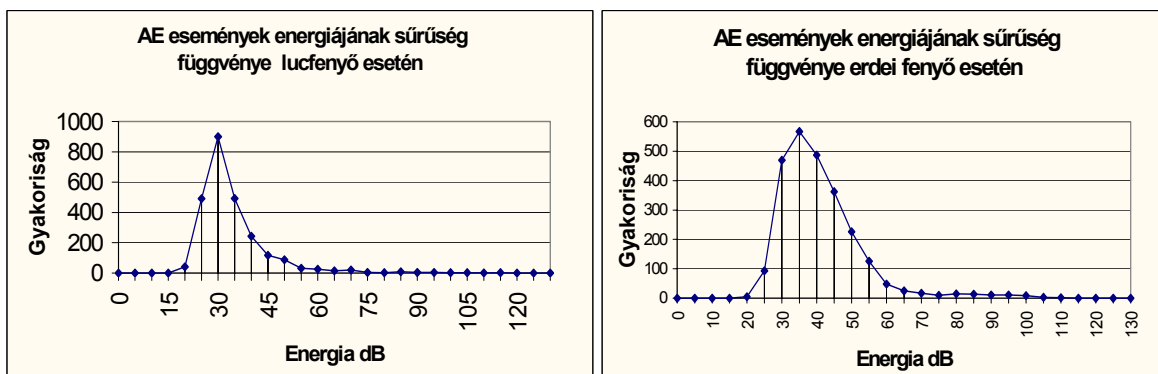
V.4. táblázat Az egyes fafajok húzóvizsgálata során kapott eseményösszegek	
Fafaj	Eseményösszeg db
Lucfenyő	4787
Erdei fenyő	16 875
Nyár	10041
Tölgy	2746
Bükk	3478
Akác	10450

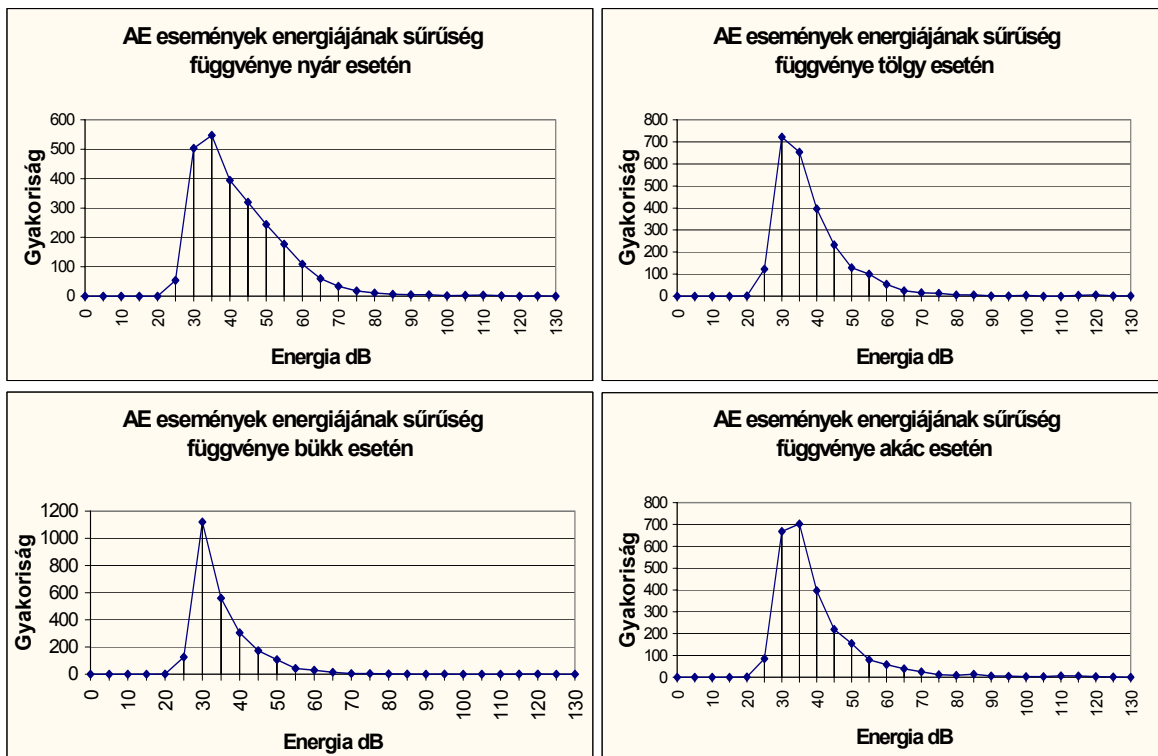
Az egyes fafajoknál kapott eseményszámbeli különbség arra enged következtetni, hogy a fafajnak jelentős szerepe van a faanyag AE-s tulajdonságainak befolyásolásában (néhány példát mutat a III. melléklet). A következőkben tekintsük át az egyes akusztikus emissziós jellemzők gyakoriság-függvényeit a vizsgált fafajoknál. Elsőként a események amplitúdójának fafaj specialitásait mutatom be.





A függvényeket elemezve a következőket mondhatjuk. A vizsgált faanyagokra jellemző amplitudó tartomány a 15-65 dB tartományban van. (15 dB a mérések szűrési küszöbe). Lucfenyő és tölgy esetén a tartomány némileg kisebb 15-60 dB, míg erdeifenyő, nyár és akác esetén 15-65 dB. Nagyobb eltérést tapasztalunk a büknél, ahol a tartomány 15-50 dB-re tehető. A legnagyobb gyakoriságú osztály lucfenyő és akác esetén 20 dB, nyár, tölgy és bükk esetén 25 dB, míg erdeifenyő esetén 30 dB. Az V.1. fejezetben ismertetett átszámítási mód szerint ez azt jelenti, hogy erdeifenyő esetén a legnagyobb gyakoriságú amplitudó értéke (30 dB = 126  $\mu$ V) mintegy háromszorosa a lucfenyő és akác esetén kapott amplitudóknak (20 dB = 40  $\mu$ V). Érdekes megfigyelnünk, hogy a kapott különbségek nem a fenyők és keményfák vagy puhafák között adódik. A megszokott elkülönítési módok, tehát nem érvényesek az egyes fafajok mikro-tönkrementeli szintjén, hanem itt új szempontok szerinti elkülönülés tapasztalható. A függvények ismeretében elmondhatjuk, hogy az egyes fafajok fizikai, mechanikai jellemzőiben lévő különbség csak kis mértékben befolyásolja a mikro-tönkrementelekből származó AE események amplitudó tartományát, ugyanakkor jelentős különbségek adódnak az egyes fafajok leggyakoribb esemény amplitudójának értékében. A sajtóságok nem igazodnak a fajok gyakorlatban megszokott elkülönítéséhez. Tekintsük át az események energiagyakorisági függvényeit.

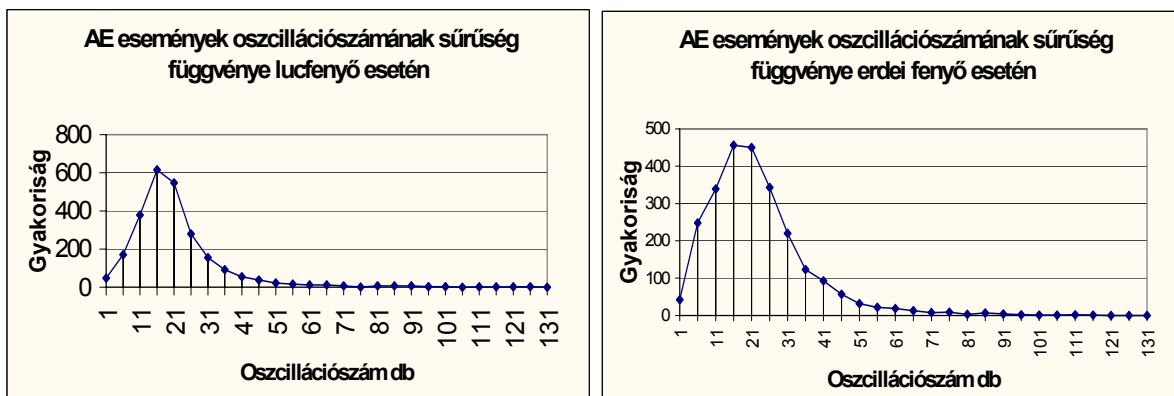


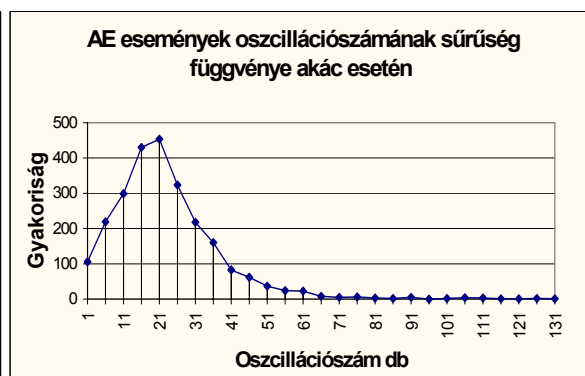
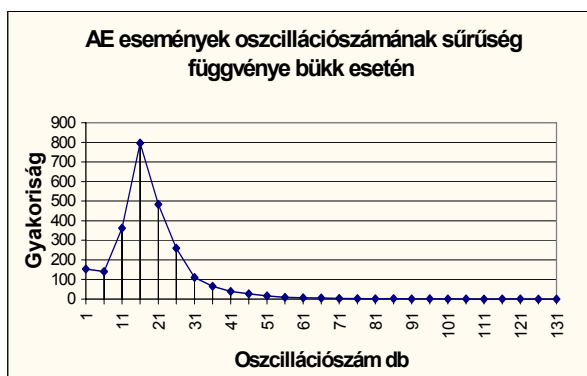
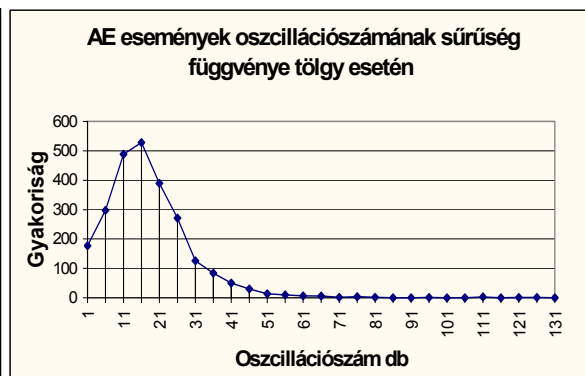
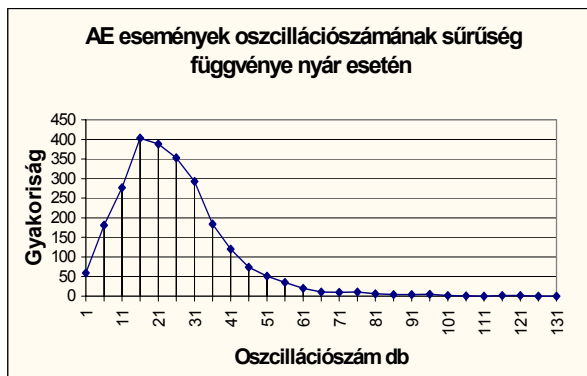


A függvényeket elemezve elmondhatjuk, hogy a vizsgált fafajok AE eseményeinek energiatarományja 20-70 dB ( $2,75 \times 10^{-4}$  -  $27,5$  pJ) tartományba esik. A legnagyobb gyakoriságú osztály lucfenyő, bükk, tölgy esetén 30 dB ( $2,75 \times 10^{-3}$  pJ), míg erdei fenyő, nyár és akác esetén 35 dB ( $8,69 \times 10^{-3}$  pJ). A legnagyobb gyakoriságú energia értékében mintegy háromszoros energiaérték különbség van a két elkülönített csoportban. Lucfenyő és bükk esetén a legnagyobb gyakoriság jelentősen kiemelkedik a szomszédos osztályok közül, a gyakoriságfüggvény gyorsabban közelít az alacsonyabb értékek felé mint a többi fafaj esetén. A vizsgálatok alapján megállapíthatjuk, hogy a mikro-tönkremenetelekből származó események energiája közel azonos tartományban van. Két csoportot különíthetünk el az események legnagyobb energiagyakoriságú osztályai alapján.

A csoporton belül a függvények hasonló jellegűek, azaz nem jelentős a különbség az egyes fafajok mikro-tönkremeneteléből származó AE események energiájában.

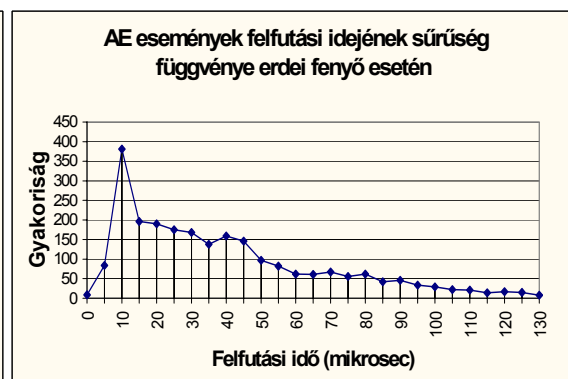
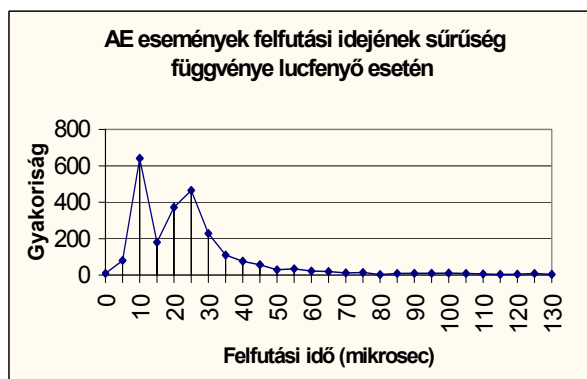
Elemezzük a továbbiakban a fafajok AE eseményeinek oszcilláció-gyakoriság függvényeit.

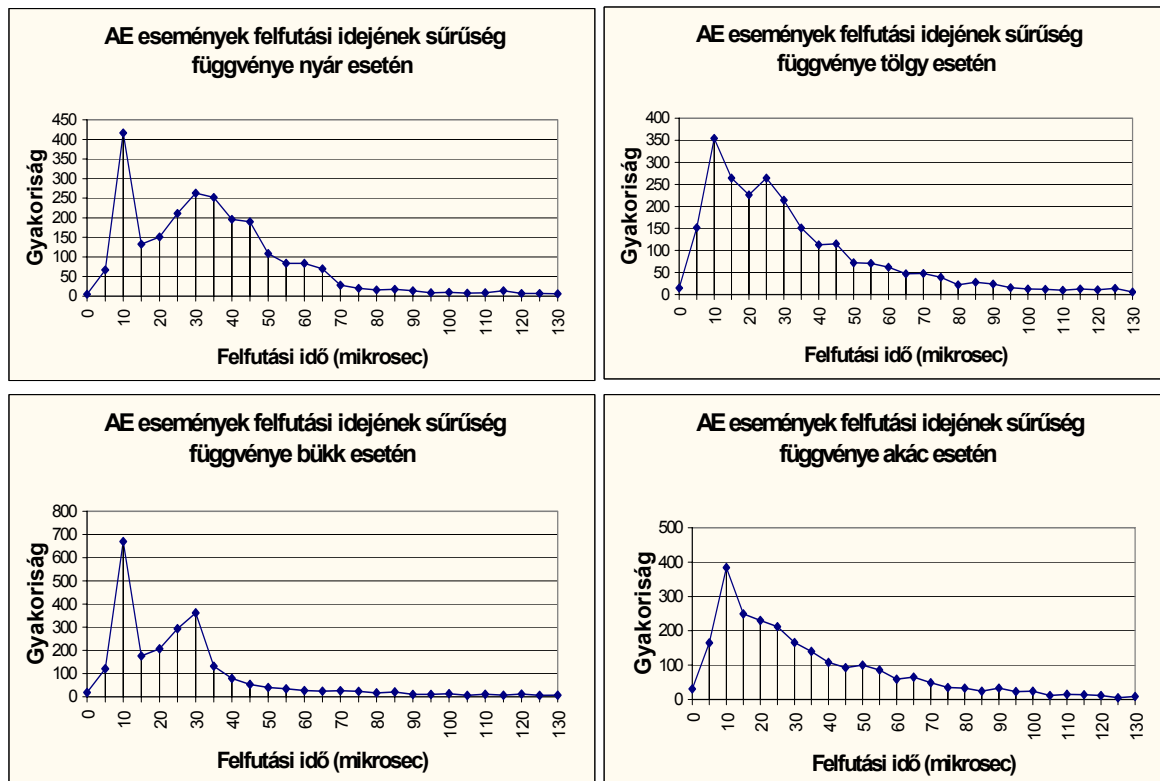




A kapott gyakoriságfüggvények azt mutatják, hogy a vizsgált fafajok oszcilláció száma az 1-66 oszcilláció tartományban van. A legnagyobb gyakoriságú osztály minden esetben a 16 oszcilláció közepű osztályba tartozik. A függvények lefutása eddigi jellemzőkéhez képest nagyobb hasonlóságot mutat. Egyedül a bükk esetén találunk jelentősebb különbséget, itt a leggyakoribb oszcillációhoz mintegy kétszer akkora gyakoriság tartozik mint más fafajok esetén. Az oszcilláció számra tehát nincs döntő befolyással a fafaj.

A fafaj AE-s tulajdonságokra való hatásának elemzését folytassuk az események időjellemzőinek vizsgálatával. Először az események felfutási idejét vizsgáljuk.





Hasonlóan a nedvességtartalom hatásvizsgálatánál leírtakhoz, különböző fafajok esetén is jelentős különbségeket tapasztalunk a nagyobb felfutási idők gyakoriságában. Az AE események felfutási idejének jellemző tartománya a vizsgált fafajok esetén az 0-130  $\mu$ s. Ezen időtartományba esik az események 95%-a. A legnagyobb gyakorisággal 10  $\mu$ s-os osztályba esnek az események minden fafaj esetén. Lucfenyő és bükk esetén a gyakoriságfüggvény szűkebb tartományt, 0-60 $\mu$ s-t ölel fel míg a többi faj esetén az események felfutási idő tartománya ennek mintegy kétszerese. A nedvességtartalomnál tárgyalt analógia felhasználásával az eredmény arra utal, hogy lucfenyő és bükk esetén kisebb mértékben vannak jelen súrlódásos típusú jelek illetve nagy amplitúdójú és nagy felfutási idejű események részaránya kisebb mint a másik négy fafajnál. Vessük össze ezt a feltevést az amplitúdó gyakorisági függvények eredményével annak megítélésére, hogy mekkora részarányban játszanak szerepet a nagy amplitúdójú események (V.5.táblázat).

**V.5.táblázat 38dB-nél nagyobb amplitúdójú (A) és 60 $\mu$ s-nál nagyobb felfutási idejű (F) események részaránya a különböző fafajok húzóvizsgálata során**

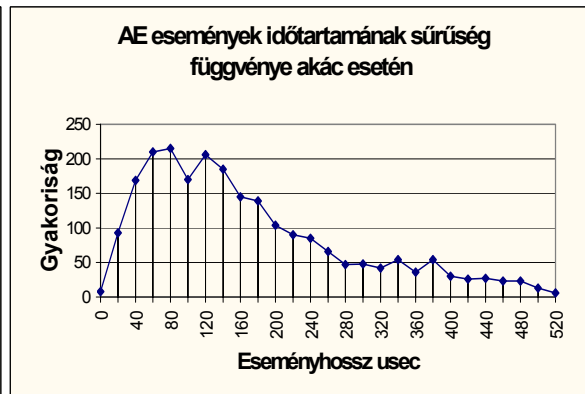
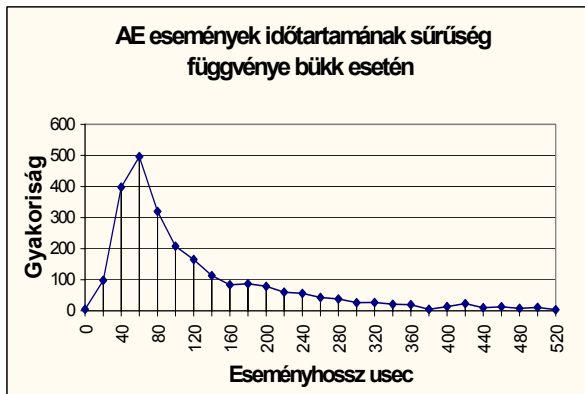
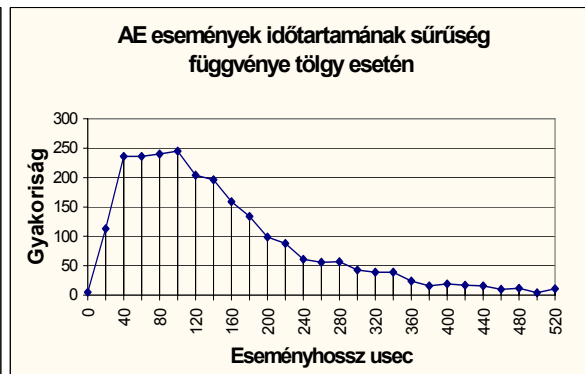
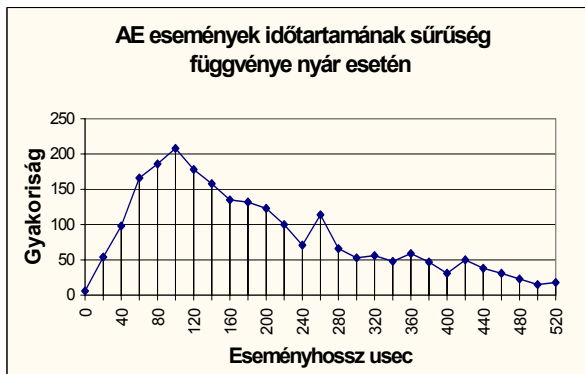
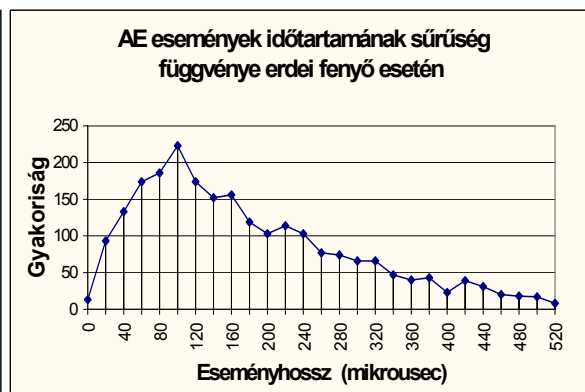
Fafaj	eseményszám A>38dB és F>60 $\mu$ s	összes esemény ahol F>60 $\mu$ s	a nagy amplitúdójú események részaránya a nagy felfutási idejű események alakulásában %
Lucfenyő	86	212	41 %
Erdeifenyő	216	583	37 %
Nyár	150	308	49 %
Tölgy	165	397	42 %
Bükk	81	254	32 %
Akác	140	448	31 %



A 40 dB-es amplitúdó osztály kiválasztását az indokolja, hogy lucfenyő és bükk esetén ez a legnagyobb amplitúdójú osztály, ahol még jelentős mennyiségű esemény tartozik.

A táblázatban feltüntetett értékek alapján a következő megállapításokat tehetjük. A szűkebb felfutási időtartományú lucfenyő és bükköt alapul véve nyár, akác és tölgy esetén mintegy kétszeres a nagy amplitúdójú, nagy felfutási idejű események száma. Erdeifenyő esetén mintegy két és félszeres. Az összes 60  $\mu$ s-nál hosszabb esemény számához viszonyítva ezen gyakoriságokat azt mondhatjuk, hogy a nagy felfutási idejű események 30-50%-a származik nagy amplitúdójú eseményekből. Az eseményszámok nem mutatnak különbséget a szűkebb felfutási időtartományú lucfenyő és bükk valamint a többi vizsgált fafaj nagy felfutási idejű eseményeinek jellegében.

Végül elemezzük a húzóvizsgálatok során kapott AE események időbeni hosszának gyakoriságfüggvényeit.



A vizsgált fafajok jellemző eseményhossz tartománya 10-520  $\mu$ s. Lucfenyő és bükk esetén a tartomány szűkebb 10-360  $\mu$ s. A legnagyobb gyakorisággal lucfenyő és bükk esetén 60  $\mu$ s időtartamú események, míg erdeifenyő és nyár esetén 100  $\mu$ s hosszú események fordulnak elő. Tölgy és akác esetén inkább egy tartomány a jellemző. Ez tölgy esetén 40-100  $\mu$ s, míg

akác esetén 60-120  $\mu$ s. Lucfenyő és bükk felfutási idő vizsgálatokhoz hasonlóan jellegében azonos időtartamú eseményeket ad a húzóvizsgálatok során. Ugyanígy erdeifenyő és nyár is nagyon hasonló jellegű eseményhossz szempontjából. Megállapíthatjuk, hogy mikro-tönkremenetek szintjén az egyes fafajok nem a megszokott csoportosításban (keményfa, puhafa, fenyő) különülnek el.

A korábbiaknak megfelelően vessük össze a következtetéseket az eloszlásfüggvényekből nyerhető karakterisztikus értékek alakulásával.(V.6.táblázat)

<b>V.6. táblázat Karakterisztikus mért és számolt AE paraméter értékek a vizsgált fafajok esetén</b>					
<b>Fafaj</b>	<b>Amplitúdó dB</b>	<b>Energia dB</b>	<b>Oscilláció db</b>	<b>Felfutási idő <math>\mu</math>sec</b>	<b>Eseményhossz <math>\mu</math>sec</b>
<b>lucfenyő</b>	25	32	20	23	98
<b>erdeifenyő</b>	32	40	22	43	212
<b>nyár</b>	34	41	26	37	232
<b>tölgy</b>	29	36	19	34	154
<b>bükk</b>	26	33	19	27	107
<b>akác</b>	28	37	24	37	189

A karakterisztikus amplitúdó alapján három csoportot különíthetünk el. Lucfenyő és bükk jellemző amplitúdója a legalacsonyabb (25dB =71 $\mu$ V), ezt alapul véve a második csoportot tölgy és akác alkotja (29 dB=113 $\mu$ V ) mintegy másfélszeres értékkel, a legnagyobb karakterisztikus amplitúdójú erdeifenyő és nyár esetén első csoporthoz képest mintegy háromszoros amplitúdót kapunk (34dB=200 $\mu$ V), melyet a sűrűségfüggvények alapján is megállapítottunk.

Előbbivel megegyezik a karakterisztikus energiaérték alapján kialakítható csoportok összetétele. Lucfenyő és bükk energiaértékét alapul véve (32dB=4.35x10<sup>-3</sup>pJ), tölgy és akác esetén (36dB=10.94x10<sup>-3</sup>pJ) mintegy két és félszeres, nyár és erdeifenyő esetén (41dB=34.6x10<sup>-3</sup>pJ) nyolcszoros a karakterisztikus energiaérték. Az egyes fafaj csoportok jellemző értékei tehát jelentős különbséget mutatnak a karakterisztikus amplitúdóban, különösen az energiában. A tönkremeneteli folyamatok különbségei aztán tükröződnek az időjellemzőkben is.

**A fafaj AE-s tulajdonságokat meghatározó hatásáról összefoglalásképpen a következőket mondhatjuk:**

- **Az egyes fafajok akusztikus aktivitásában jelentős különbséget tapasztalunk.** A legaktívabbnak az erdeifenyő, majd csökkenő aktivitási sorrendben akác, nyár, lucfenyő, bükk és tölgy adódott. **A legaktívabb és legkevésbé aktív fafaj között mintegy hatszoros a kapott eseményösszeg különbség.**

- Az AE események amplitúdójának vizsgálata során megállapítottuk, hogy az egyes fafajok fizikai, mechanikai jellemzőiben lévő különbség csak kis mértékben befolyásolja a mikro-tönkremenetekből származó AE események amplitúdó tartományát, ugyanakkor **jelentős különbségek adódnak az egyes fafajok leggyakoribb esemény amplitúdójának értékében.** A **sajátságok nem igazodnak a fajok gyakorlatban megszokott elkülönítéséhez.**

- **Az események energiagyakorisági függvényei alapján két csoportot különítettünk el a legnagyobb gyakoriságú energiaosztály alapján.** Az egyik a lucfenyő, bükk, tölgy

**csoport, míg a másik az erdefenyő, akác, nyár csoport.** Ez utóbbi csoport mikro-tönkremenetelében háromszor akkora energiájú események a jellemzőek. A csoportokon belül a függvények hasonló jellegűek, azaz nem jelentős a különbség az egyes fajok mikro-tönkremeneteléből származó AE eseményeinek energiájában. **A vizsgálatok alapján megállapíthatjuk, hogy a mikro-tönkremenetelekből származó események energiája csoporton belül közel azonos tartományban van.**

- Az események oszcilláció számának vizsgálata azt mutatta, hogy a vizsgált fajok oszcilláció száma az 1-66 oszcilláció tartományban van. A legnagyobb gyakoriságú osztály minden esetben a 16 oszcilláció közepű osztályba tartozik. A függvények lefutása a többi AE jellemzőhöz képest nagyobb hasonlóságot mutat. Egyedül a bükk esetén találunk jelentősebb különbséget, itt a leggyakoribb oszcillációhoz mintegy kétszer akkora gyakoriság tartozik mint más fajok esetén. **Végeredményben elmondhatjuk, hogy az oszcilláció számára nincs döntő befolyással a faj.**

- A kapott események felfutási idejének elemzése a következő megállapításokhoz vezetett. A legnagyobb gyakorisággal 10  $\mu$ s-os osztályba esnek az események minden faj esetén. Lucfenyő és bükk esetén a gyakoriságfüggvény szűkebb tartományt, 0-60  $\mu$ s-t ölel fel míg a többi faj esetén az események felfutási idő tartománya ennek mintegy kétszerese. A nedvességtartalomnál tárgyalt analógia felhasználásával az eredmény arra utal, hogy lucfenyő és bükk esetén kisebb mértékben vannak jelen sűrűdéses típusú jelek illetve nagy amplitúdójú és nagy felfutási idejű események részaránya kisebb mint a másik négy fajnál. Az események vizsgálata ezt a feltételezést nem támasztotta alá, a szűkebb felfutási idő tartományú lucfenyő és bükk sűrűségfüggvényei a többi fajéhoz hasonló arányban tartalmaznak nagy amplitúdójú és nagy felfutási idejű eseményeket.

- Az események időtartamának vizsgálata alapján azt tapasztaltuk, hogy a vizsgált fajok jellemző eseményhossz tartománya 10-520  $\mu$ s. Lucfenyő és bükk esetén a tartomány szűkebb 10-360  $\mu$ s. Az események döntő többsége a többi négy fajnál is ezen szűkebb tartományban van.

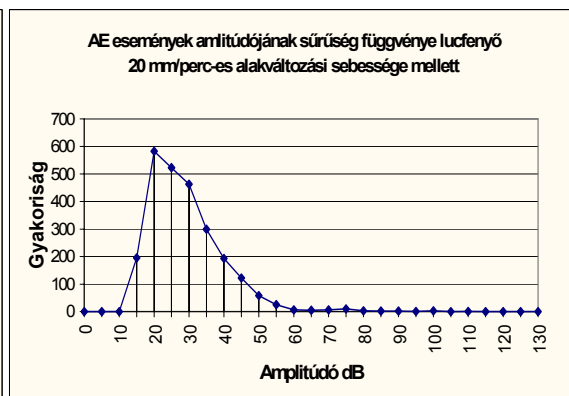
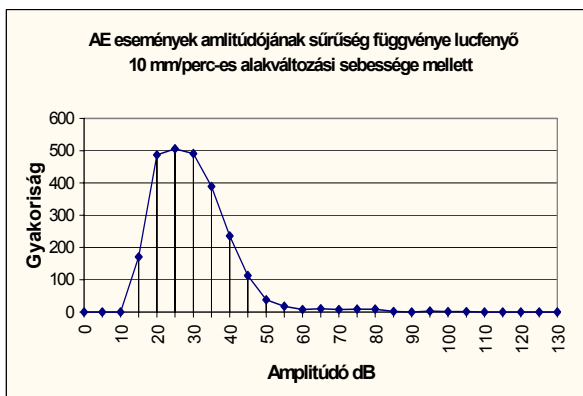
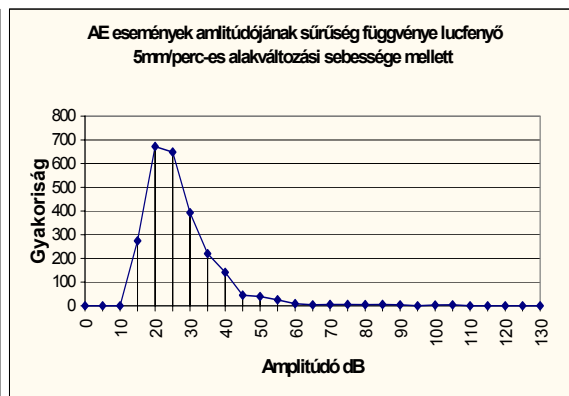
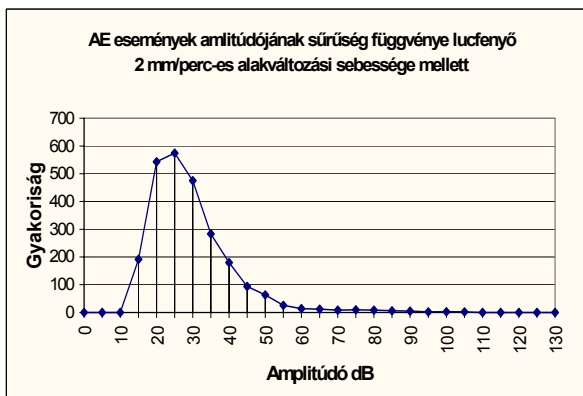
- Az eloszlásfüggvények alapján nyerhető karakterisztikus értékek vizsgálata alátámasztja a sűrűségfüggvények vizsgálata alapján levonható következtetéseket. Ugyanakkor mind az amplitúdó, mind az energia esetében a két elkülönített faj csoport helyett három csoport elkülönítését teszi szükségessé. A legkisebb és legnagyobb karakterisztikus amplitúdójú csoport között mintegy háromszoros különbség állapítható meg, míg karakterisztikus energia esetén nyolcszoros a differencia. Az említett két jellemző különbségei tükröződnek a csoportok időjellemzőiben is.

Az összes elemzést együttvéve megállapíthatjuk, hogy mikro-tönkremenetelek szintjén az egyes fajok nem a megszokott csoportosításban (keményfa, puhafa, fenyő) különülnek el, hanem a tönkremeneteli folyamatok sajátosságainak megfelelően. Az akusztikus emissziós jellemzők vizsgálatai egyöntetűen azt mutatták, hogy az egyes fajok mikro-tönkremeneteleinek jellemző tartományai a mért és számolt AE tulajdonságok esetén is megegyeznek. A tartományon belül azonban jelentős különbségeket tapasztalunk az egyes jellemzők gyakorisági és karakterisztikus értékeiben. **A mikro-tönkremenetelek szintjén tehát a fajok azonos nagyságrendű AE jellemzőkkel mennek tönkre. A tönkremeneteli folyamatok alapján elkülöníthető, faj csoportokra jellemző, AE események mért és számolt paraméterei közt azonban jelentős különbségek adódnak.**

### V.3. Az alakváltozási sebesség hatása a faanyag akusztikus emissziós tulajdonságaira

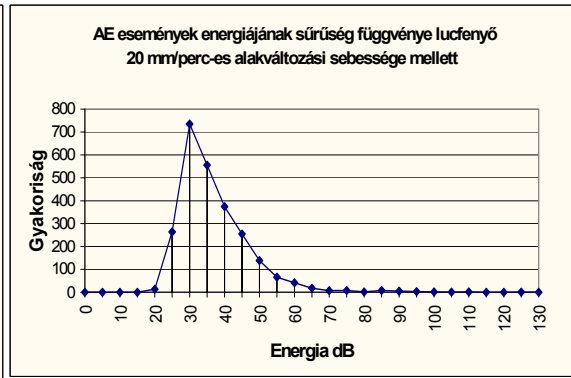
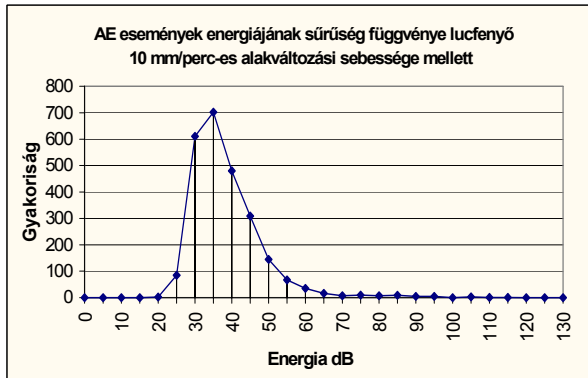
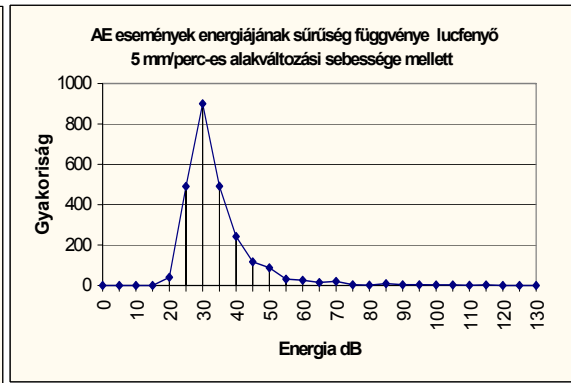
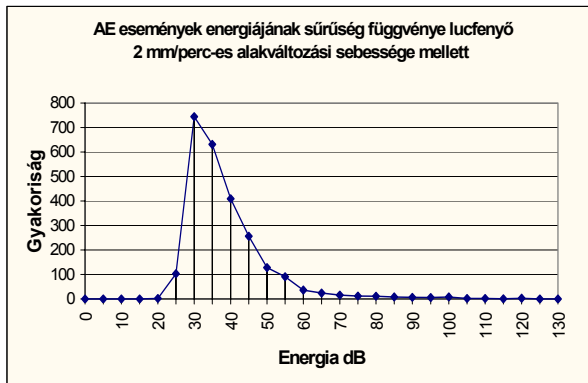
A frekvenciatartomány behatárolását leíró fejezetben megállapítottuk, hogy az alakváltozási sebesség nincs hatással a faanyag AE-s frekvenciatartományára. Ebben a fejezetben azt vizsgáljuk, hogy a faanyag mikro-tönkremeneteli folyamataira, ezáltal akusztikus emissziós tulajdonságaira milyen befolyással van az alakváltozási sebesség. Az előző fejezetekben tárgyalt AE jellemzők gyakoriságfüggvényeit vetjük össze ezúttal is a változások és befolyásoló hatás megállapítása céljából. A vizsgálatokból választ kapunk arra a kérdésre is, hogy a különböző kutatók által különböző alakváltozási sebesség mellett végzett AE-s vizsgálatok eredményei összevethetők-e. A szakirodalom szerint az alakváltozási sebességnek nincs jelentős hatása a faanyag húzószilárdságára (Kollmann 1951). Kérdés, hogy ez a megállapítás tükröződik-e a mikro-tönkremenetek szintjén.

A vizsgálatok során négy alakváltozási sebesség mellett tíz-tíz lucfenyő próbatest húzóvizsgálatát végeztem el. A vizsgált négy alakváltozási sebesség 2 mm/perc, 5 mm/perc, 10 mm/perc, 20mm/perc állandó traverzsebesség volt. Az átlagos nedvesség-tartalom 11% volt. A próbatestek kialakítása a korábban leírtakkal megegyező volt. Elsőként tekintünk át az AE-s események amplitúdó gyakoriságának alakulását a négy vizsgált esetben.



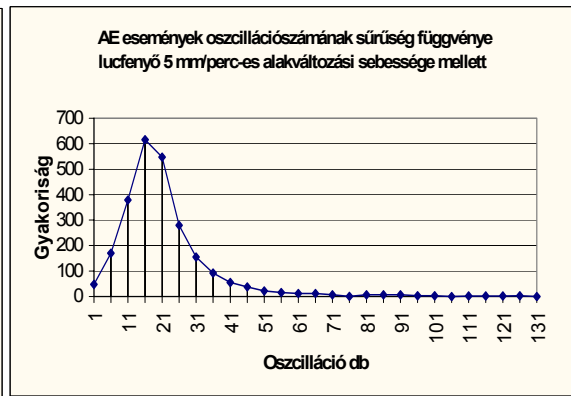
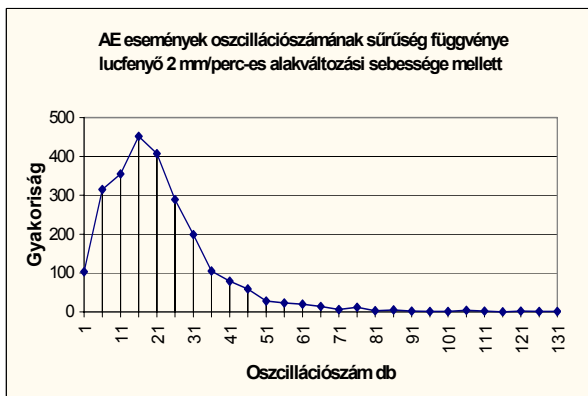
Mind a négy esetben 2500 nagyságú mintaszámot vettem figyelembe a mért adatokból hasonlóan a fafaj AE-s hatásának vizsgálatához. Ott megállapítottuk, hogy ez a mintaszám reprezentatívnek tekinthető. Összevetve a különböző sebességek mellett kapott függvényeket elmondhatjuk, hogy az emisszió tartománya mind a négy esetben 15-60 dB között van. A legnagyobb gyakoriságú osztály 20 és 25 dB a négy esetben, a két osztály között csekély a gyakoriságkülönbség. Az alakváltozási sebesség tehát nem okoz jellemző változást az események amplitúdójának tekintetében.

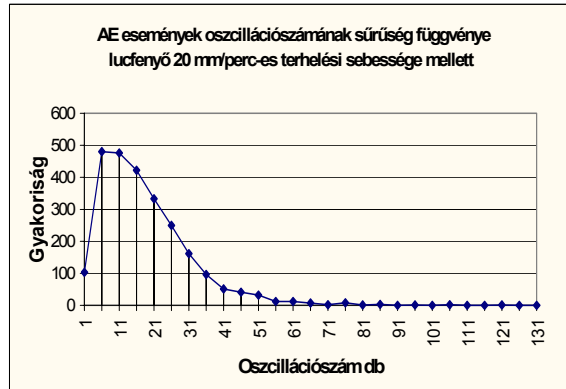
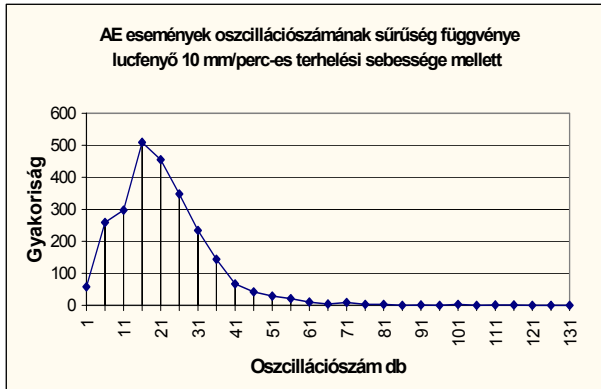
A továbbiakban nézzük meg az események energiájának változását az alakváltozási sebesség függvényében.



Az események energiájának tartománya mind a négy esetben azonos 20-70 dB. A legnagyobb gyakoriságú osztály 30DB három esetben míg 10 mm/perc alakváltozási sebességnél 35 dB. Ugyanakkor ezen utóbbi esetben a 30 dB-es tartomány is csaknem ilyen gyakoriságot mutat. Nincs okunk tehát feltételezni valamilyen speciális tönkremeneteli sajátyságot. Az alakváltozási sebesség tehát a mikro-tönkremenetek energiájára nincs számottevő hatással.

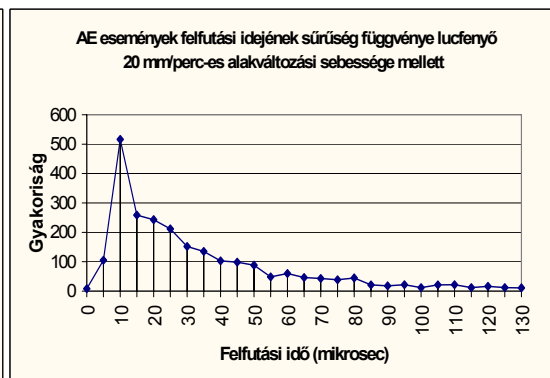
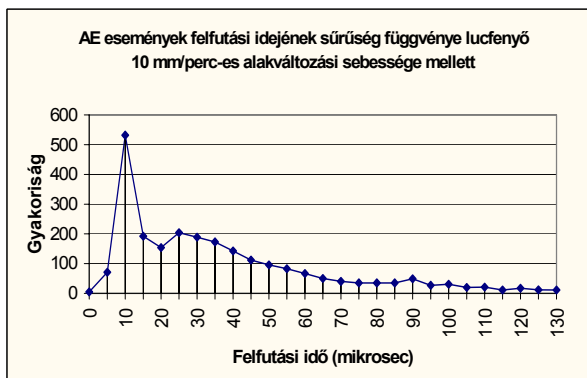
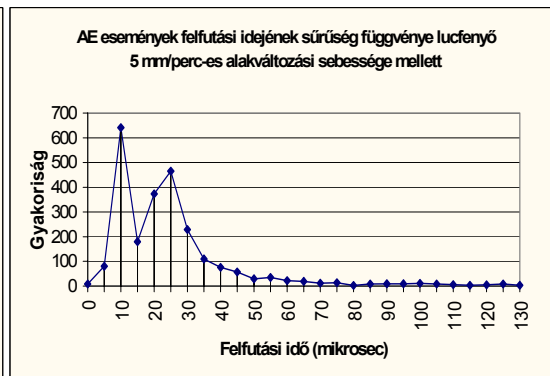
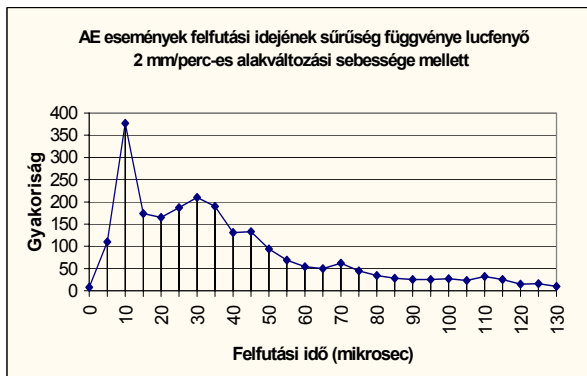
Vizsgálatainkat folytassuk az események oszcilláció számának elemzésével.





Az oszcilláció jellemző tartománya mind a négy esetben 1-60 oszcilláció szám között van. A legnagyobb gyakoriságot illetően egyedül a 20 mm/perc alakváltozási sebességnél találunk jelentősebb eltérést. Nagy alakváltozási sebesség mellett ezek szerint a kisebb oszcilláció számú események részaránya megnövekszik. A gyakorlati vizsgálatokhoz használt alakváltozási sebességek mellett azonban nem okoz számottevő változást az alakváltozási sebesség a faanyag AE-s oszcilláció számában.

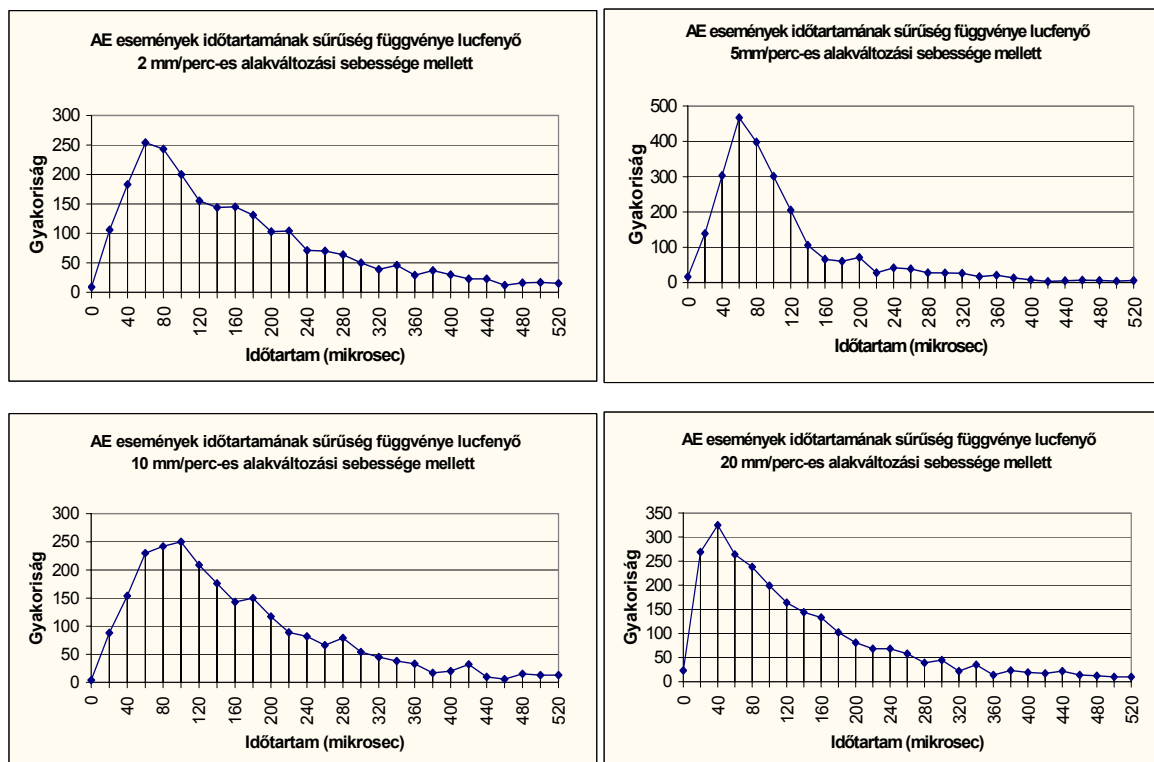
Végül tekintsük át az események időfüggvényeit annak megítélésére, hogy a növekvő alakváltozási sebesség milyen hatással van az események időbeni lefutására.



A függvények alapján elmondhatjuk, hogy az események jellemző felfutási idő tartománya a négy esetben megegyezik. A legnagyobb gyakoriságú osztály minden esetben a 10  $\mu$ s felfutási időhöz tartozik. Kisebb különbséget egyedül a 20-40  $\mu$ s felfutási időtartományban kapunk 5 mm/perc alakváltozási sebesség mellett. Nincs okunk feltételezni azonban, hogy ez

az adott alakváltozási sebességhez tartozó speciális tulajdonság. Valószínűbb, hogy egy-két próbatest kívülről nem látható belső repedései alakították ki az eloszlásban a változást. Az alakváltozási sebesség tehát nem okoz jelentős változást az események felfutási idejében.

Végül vegyük számba az események időtartamának alakulását különböző alakváltozási sebességek mellett.



A függvények ismeretében elmondhatjuk, hogy az események időtartam tartománya azonos 0-520  $\mu$ s. A legnagyobb gyakoriságú osztály 60  $\mu$ s a 2 és 5 mm/perc alakváltozási sebességnél míg 100  $\mu$ s 10 mm/perc és 40  $\mu$ s a 20 mm/perc alakváltozási sebesség mellett. A vizsgált AE jellemzők esetén tehát legnagyobb változást az események időtartamában kapunk. A változás iránya azonban nem egyértelmű, továbbá a 10 mm/perc alakváltozási sebességnél a gyakoriság csaknem a maximális gyakorisággal egyenlő a 60  $\mu$ s-os osztályban. Mindezt egybevetve tehát mondhatjuk, hogy az alakváltozási sebesség az AE események időtartamára sincs jelentős hatással.

Vessük össze az eredményeket a karakterisztikus értékekkel a különböző alakváltozási sebességek mellett, melyet az eddigiekkel megegyezően az eloszlásokból nyerünk.(V.7.táblázat)

<b>V.7. táblázat Karakterisztikus mért és számolt AE paraméter értékek a vizsgált alakváltozási sebességek esetén</b>					
<b>terhelési sebesség mm/perc</b>	<b>Amplitúdó dB</b>	<b>Energia dB</b>	<b>Oszilláció db</b>	<b>Felfutási idő <math>\mu</math>sec</b>	<b>Eseményhossz <math>\mu</math>sec</b>
2	28	36	22	41	184
5	25	32	20	23	98
10	29	37	22	37	172
20	28	35	19	33	137

A karakterisztikus értékeket vizsgálva azt mondhatjuk, hogy a terhelési sebesség növekedése nem okoz jelentős változást az AE jellemzők jellemző értékében. Kivételt képez az 5 m/perc terhelési sebesség, amely mind amplitúdó, mind energia tekintetében alacsonyabb karakterisztikus értéket mutat. Ez a jellege aztán megjelenik az időjellemzőiben is. A többi sebességértéknél kapott jellemzők közel azonos volta miatt, nincs okunk egyfajta speciális, ezen sebességérték mellett mutatott befolyást feltételeznünk. Így összefoglalásképpen egyezően a korábban leírtakkal azt mondhatjuk, hogy a vizsgált tartományban az alakváltozási sebességnek nincs számottevő hatása a lucfenyő AE jellemzőinek karakterisztikus értékeire.

**Az alakváltozási sebesség AE jellemzőkre gyakorolt hatásának vizsgálatát a következőkben foglalhatjuk össze:**

- **Az alakváltozási sebesség nincs számottevő hatással a faanyag AE jellemzőinek tulajdonságaira, azaz mért és számolt AE paramétereire és azok karakterisztikus értékeire.**
  
- **A faanyag mikro-tönkremeneteleire az alakváltozási sebesség nincs hatással, azaz a faanyag alkotórészeinek törési tulajdonságai az alakváltozási sebességtől nem függenek a vizsgált 2-20 mm/ perc sebességtartományban.**



#### V.4. Az igénybevétel hatása a faanyag akusztikus emissziós tulajdonságaira

A faanyag szilárdsági jellemzői anizotróp jellegéből adódóan jelentősen változnak az igénybevételtől függően. Általánosságban elmondhatjuk, hogy a faanyag húzószilárdsága mintegy másfél-kétszerese nyomószilárdságának. A hajlítószilárdság a húzó és nyomó szilárdsági érték között van. Az V.5. ábra a lucfenyő törőfeszültség értékét és a hozzá tartozó gyakoriságot mutatja 500 próbatest és a három igénybevétel esetén (Kollmann 1951).

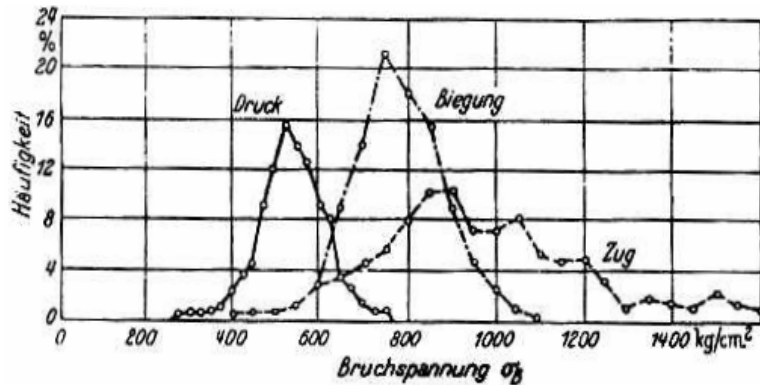
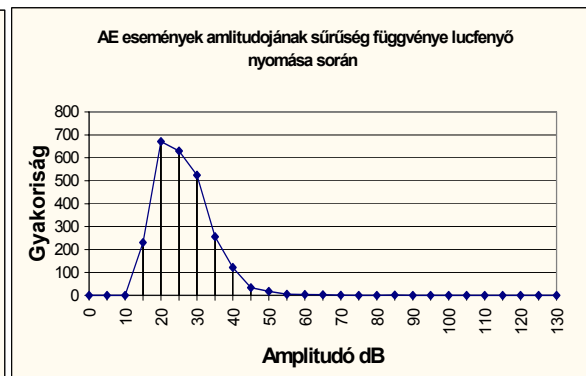
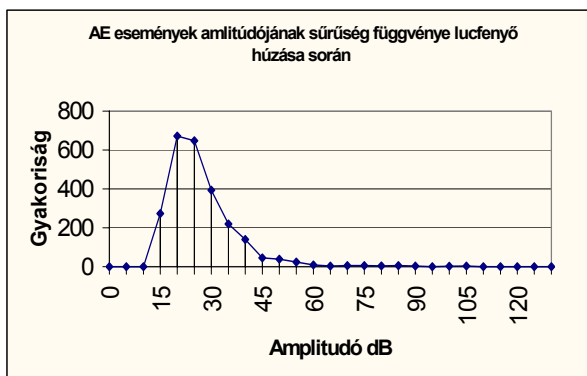
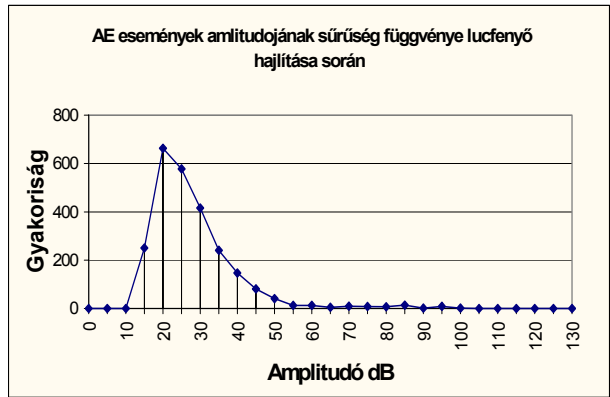


Bild 705. Häufigkeitskurven für Zug-, Druck- und Biegefestigkeit von Fichtenholz. (500 Meßwerte von H. Klemm.)

#### V.5. Lucfenyő törőfeszültség sűrűség függvényei húzás, nyomás és hajlítás során

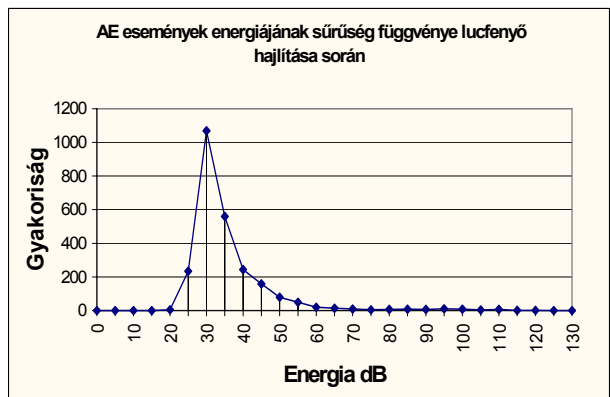
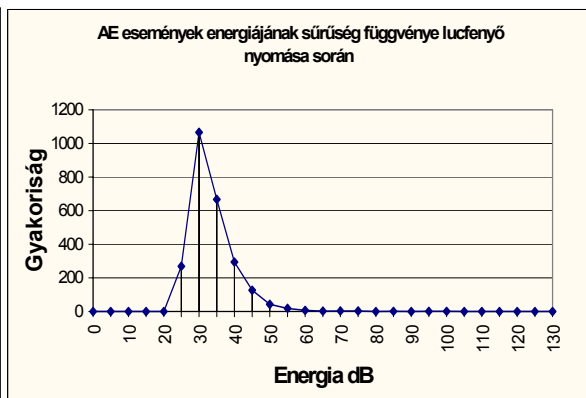
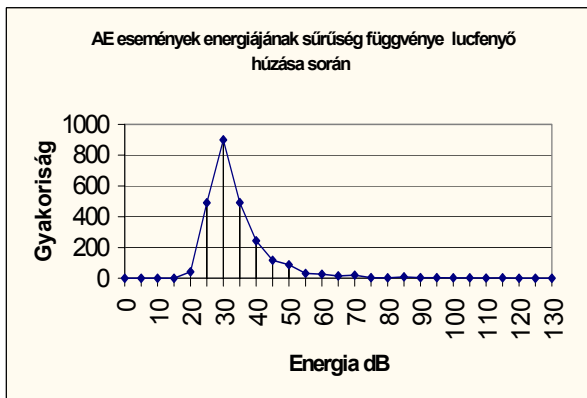
A törőfeszültségben tehát jelentős különbségek vannak a három igénybevétel esetén. Ebben a fejezetben azt vizsgáljuk meg, hogy a faanyag igénybevételtől függő viselkedése miként tükröződik az AE tulajdonságokban. A vizsgálatokat tíz-tíz próbatest számú lucfenyő sorozatokon végeztem el húzó, nyomó és hajlító-igénybevételre. A húzó próbatestek kialakítása a korábban leírtakkal megegyező kialakítású volt. A nyomó próbatestek 20x20x50 mm méretűek voltak. A próbatest kialakított hossza biztosítja, hogy a tönkremenetel során zömök rúdként menjen tönkre, azaz ne hajoljon ki. A hajlító próbatestek 20x20x300 mm méretűek voltak. A hajlító-vizsgálathoz hárompontos hajlítást alkalmaztam. Az átlagos nedvességtartalom 11% volt. Az előző fejezetekhez hasonlóan vessük össze a kapott AE események jellemzőinek gyakoriságfüggvényeit a sajátosságok megállapítására. Elsőként az események amplitúdó gyakorisági függvényeit elemezzük.





Az amplitúdó gyakoriságokat vizsgálva megállapíthatjuk, hogy mindhárom esetben az események amplitúdó tartománya 15-60 dB. A legnagyobb gyakoriságú osztály is megegyezik, mindhárom esetben 20 dB. Ezek alapján kijelenthetjük, hogy az igénybevétel jellege nem befolyásolja a detektált események amplitúdóját.

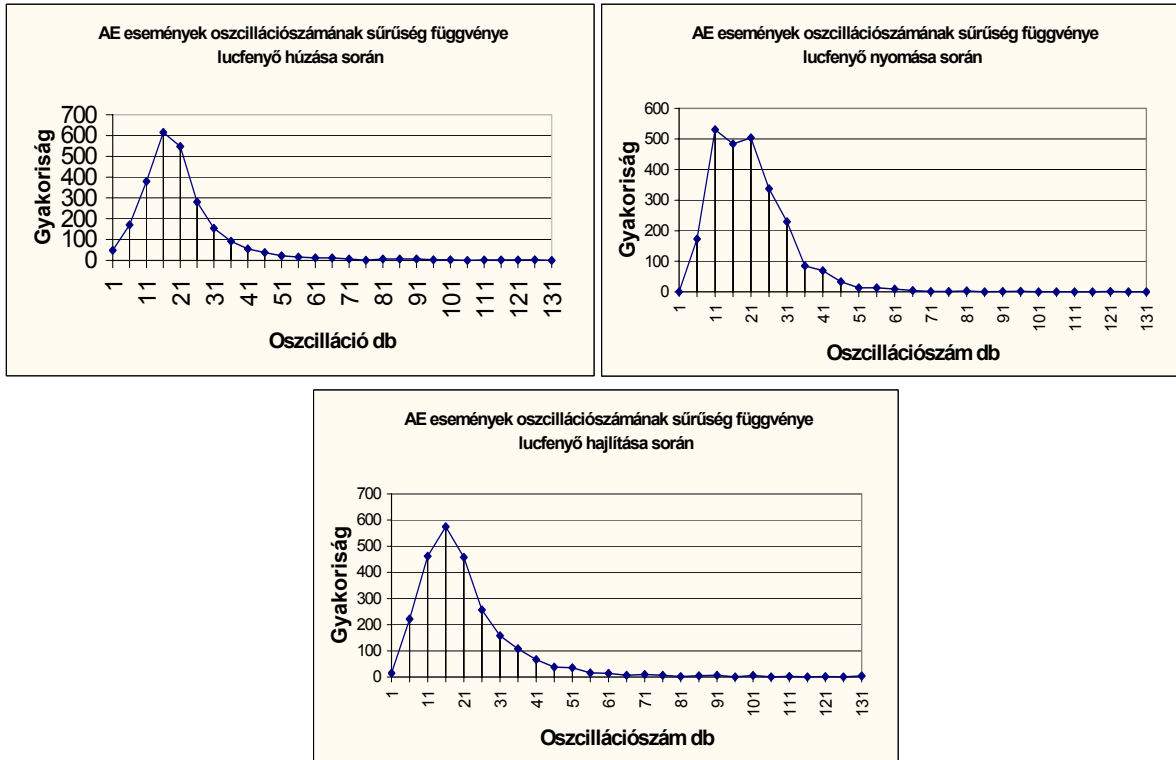
Vizsgáljuk meg másodikként az események energiájának gyakoriságfüggvényeit.



Az események energia tartománya és legnagyobb gyakorisági osztályok teljes egyezést mutatnak a három igénybevétel mellett. Különbséget a második és harmadik legnagyobb gyakoriságban találunk. A legnagyobb változás a 25 dB-es osztályban van húzás esetén.

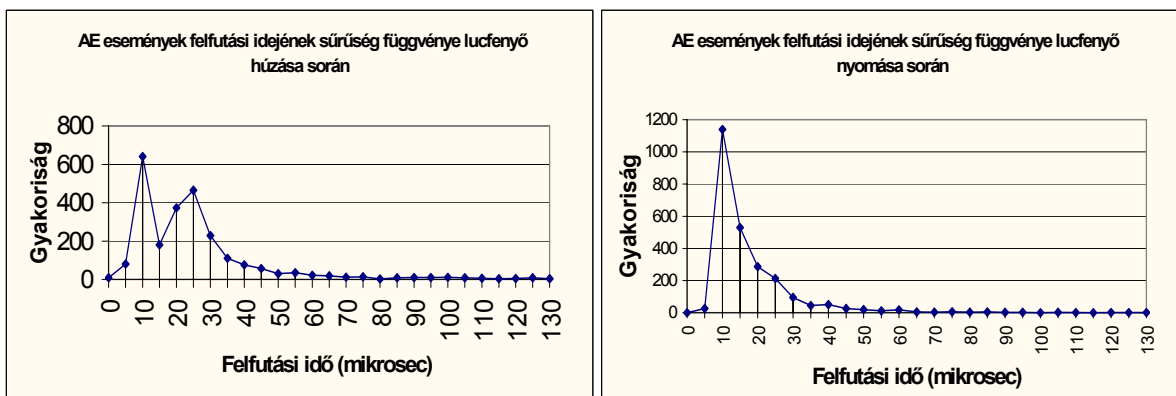
A húzás során kapott mintegy 500 db-os gyakoriság a másik két igénybevétel esetén csupán 250 db körül mozog. A kis energiájú jelek részaránya húzásnál tehát az összes vizsgált esemény mintegy 10%-ával nagyobb részarányban fordul elő. További következtetések

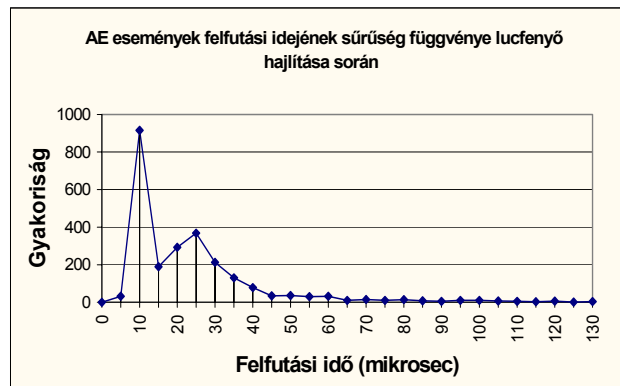
levonása előtt tekintsük át a többi AE jellemzőt, hogy ott jelentkezik-e ezen részarány különbség. Elsőként vizsgáljuk meg az oszcilláció szám gyakoriságfüggvényeit.



Ha megnézzük a három gyakoriságfüggvényt elmondhatjuk, hogy az oszcilláció szám jellemző tartománya mindhárom esetben 1-61 oszcilláció közé esik. A legnagyobb gyakoriságú osztályban eltéréseket tapasztalunk. Húzás és hajlítás esetén legnagyobb gyakoriság 16 oszcillációnál adódott. Nyomás esetén inkább egy tartomány 11-21 oszcilláció a jellemző. Ha összevetjük a második és harmadik legnagyobb gyakoriságot is akkor azt mondhatjuk, hogy a húzás és nyomás összegéből képzett gyakoriságfüggvénynek megfelel a hajlításnál kapott függvény. A hajlításnál tehát ahol húzó és nyomó igénybevétel egyaránt jelen van az oszcilláció számban jól tükröződik a két igénybevétel jelenléte.

A továbbiakban foglalkozunk az események időjellemzőivel. Elsőként az események felfutási idejét tekintsük át.

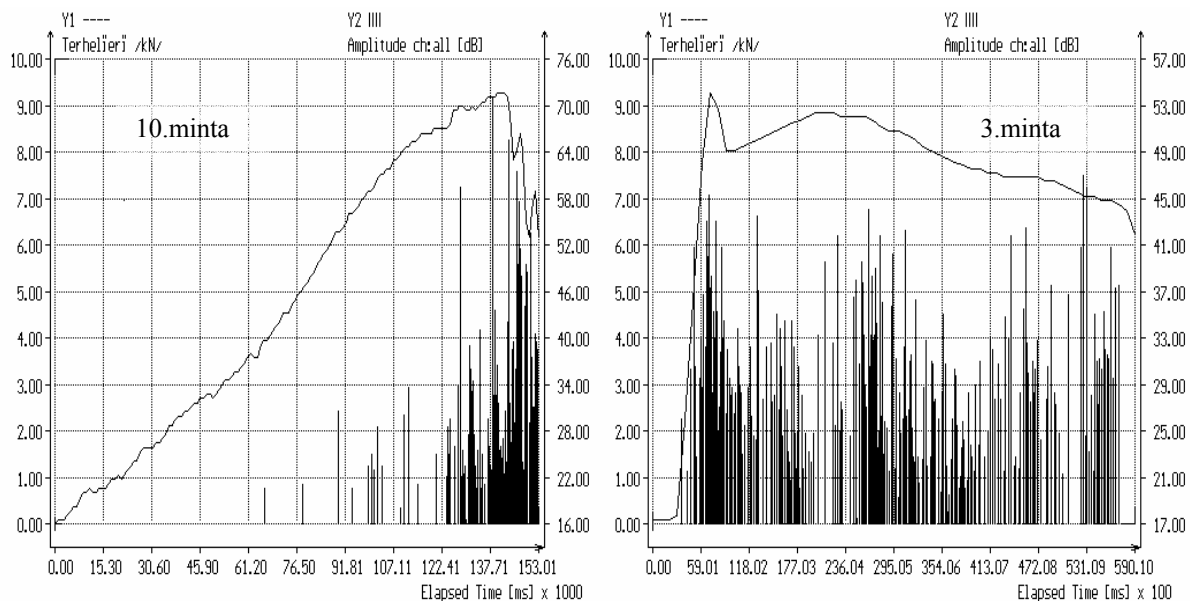




A felfutási idő jellemző tartománya húzás és hajlítás esetén 0-60  $\mu\text{s}$ , míg nyomás esetén a tartomány leszűkül 0-40  $\mu\text{s}$ -ra. A tartomány leszűkülésének oka lehet, hogy nyomás során az események csaknem a törőterhelésnél jelennek meg (ld. V.2. ábra.) és a már jelenlévő nagy nyomófeszültség hatására nagy energiájú rövid felfutási idejű események keletkeznek. Most utalok vissza az energiaérték eloszlásában tapasztalt jelenségre, miszerint nyomás során a második leggyakoribb energiaosztály 35 dB-es osztályban van és mintegy 25%-al nagyobb az események gyakorisága a húzáshoz képest. Húzás során valószínűleg a megcsúszásokból kapott események adják a húzás felfutási idő gyakoriságában a nagyobb felfutásnak megfelelő gyakorisági értékeket a 20-35  $\mu\text{s}$  tartományban. A hajlításnál szépen kirajzolódik a kétféle igénybevétel együttes jelenléte a felfutási idő gyakoriságfüggvényében.

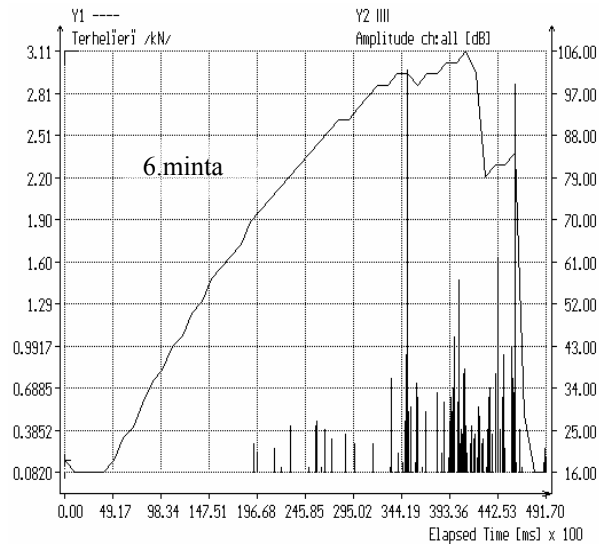
A legnagyobb gyakoriságú osztály mindhárom esetben 10  $\mu\text{s}$ -os osztályban van.

A leírt jelenségek illusztrálására nézzünk meg a három vizsgálat esetén egy-egy jellemző törési folyamatnak megfelelő ábrát (V.1.-V.3. ábra) (bővebben ld. III. melléklet).



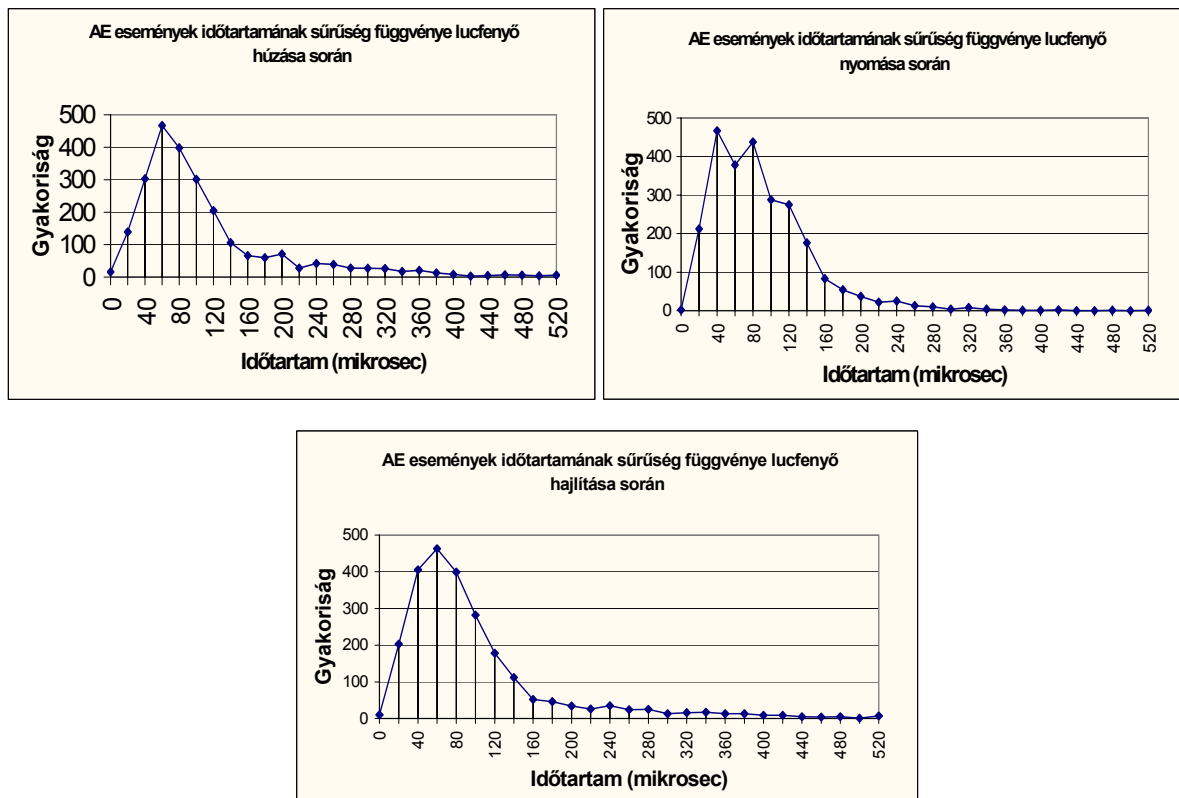
V.1. Lucfenyő akusztikus emissziója húzás során

V.2. Lucfenyő akusztikus emissziója nyomás során



V.3. Lucfenyő akusztikus emissziója hajlítás során

Végül vizsgáljuk meg az események időtartamának gyakoriságfüggvényeit.



A három igénybevétel során kapott események tartománya mindhárom esetben 0-500  $\mu$ s.

A legnagyobb gyakoriságú osztály húzás és hajlítás során 60  $\mu$ s, míg nyomás során inkább a 40-80  $\mu$ s-os tartomány a jellemző. Húzás és nyomás között elsősorban 40  $\mu$ s-os osztályban van különbség. Itt nyomás során mintegy 50%-al több eseményt detektáltunk. Ez a növekmény feltehetően a nagy feszültségi értékeknél keletkező nagy energiájú, gyors felfutású, de rövid időtartamú törési folyamatok eredményezik.

Következtetéseinket vessük össze a karakterisztikus értékek vizsgálatával. (V.8.táblázat)

<b>V.8. táblázat Karakterisztikus mért és számolt AE paraméter értékek a vizsgált igénybevételek esetén</b>					
<b>igénybevétel</b>	<b>Amplitúdó dB</b>	<b>Energia dB</b>	<b>Oszcilláció db</b>	<b>Felfutási idő µsec</b>	<b>Eseményhossz µsec</b>
<b>húzás</b>	25	32	20	23	98
<b>nyomás</b>	25	32	20	14	86
<b>hajlítás</b>	26	32	20	22	88

Amint a táblázatból kiderül amplitúdó és energia és oszcilláció szám szempontjából a különböző igénybevételek gyakorlatilag teljes egyezést mutatnak, mint azt a sűrűségfüggvények alapján is megállapítottuk. A felfutási időben nyomás során itt is jelentkezik a rövidebb karakterisztikus felfutási idő, melyet a csak törőterhelés mellett meginduló törési események okoznak. A karakterisztikus értékek vizsgálata is alátámasztja tehát, hogy az igénybevétel jellege nem okoz számottevő változást a tönkremeneteli folyamatok mért és számított AE jellemzőinek értékében.

**Foglaljuk össze a fent leírt sajátosságok alapján az igénybevétel hatását az AE folyamatokra:**

- Az amplitúdó gyakoriságokat vizsgálva megállapíthatjuk, hogy mindhárom esetben az események amplitúdó tartománya és legnagyobb gyakoriságú osztálya is megegyezik. Ezek alapján kijelenthetjük, hogy az igénybevétel jellege nem befolyásolja a detektált események amplitúdóját.
- Az események energiájának vizsgálatai azt mutatták, hogy a kis energiájú jelek részaránya húzásnál az összes vizsgált esemény mintegy 10%-ával nagyobb részarányban fordul elő. Az eloszlások itt is hasonló jellegűek.
- Az események oszcilláció számának vizsgálata azt mutatta, hogy húzás és hajlítás esetén a legnagyobb gyakoriság 16 oszcillációnál adódott. Nyomás esetén inkább egy tartomány 11-21 oszcilláció a jellemző. Ha összevetjük a második és harmadik legnagyobb gyakoriságot is akkor azt mondhatjuk, hogy a húzás és nyomás összegéből képzett gyakoriságfüggvénynek megfelel a hajlításnál kapott függvény. A hajlításnál tehát, ahol húzó és nyomó igénybevétel egyaránt jelen van, az oszcilláció számban jól tükröződik a két igénybevétel jelenléte.
- A felfutási idő jellemző tartománya húzás és hajlításhoz képest nyomás esetén leszűkül. A tartomány leszűkülésének oka lehet, hogy nyomás során az események csaknem a törőterhelésnél jelennek meg és a már jelenlévő nagy nyomófeszültség hatására nagy energiájú rövid felfutási idejű törési események keletkeznek. Ez a jelenség lehet kapcsolatban az energiaérték eloszlásában tapasztalt jelenséggel, miszerint nyomás során a második leggyakoribb energiaosztály 35 DB-es osztályban van és itt mintegy 25%-al nagyobb az események gyakorisága a húzáshoz képest. Húzás során valószínűleg a megcsúszásokból kapott események adják a húzás felfutási idő gyakoriságában a nagyobb felfutásnak megfelelő gyakorisági értékeket a 20-35 µs tartományban. A hajlításnál szépen kirajzolódik a kétféle igénybevétel együttes jelenléte a felfutási idő gyakoriságfüggvényében.

- Az események időtartamát vizsgálva megállapítottuk, hogy a három igénybevétel során kapott események tartománya mindhárom esetben azonos. A legnagyobb gyakoriságú osztály húzás és hajlítás során 60  $\mu$ s, míg nyomás során inkább a 40-80  $\mu$ s-os tartomány a jellemző. Húzás és nyomás között elsősorban 40  $\mu$ s-os osztályban van különbség. Itt nyomás során mintegy 50%-al több eseményt detektáltunk. Ezt a növekményt feltehetően a nagy feszültségi értékeknél keletkező nagy energiájú, gyors felfutású, de rövid időtartamú törési folyamatok eredményezik.

- A karakterisztikus AE jellemzők vizsgálata alátámasztja a fent leírtakat, miszerint az igénybevétel jellege nem okoz számottevő változást a tönkremeneteli folyamatok mért és számított AE jellemzőinek értékében.

**Végeredményben tehát az igénybevétel elsősorban az események energiájának kis mértékű növekedését mutatja nyomás esetén. Ez a jelenség tükröződik aztán az események időjellemzőiben is. A fa törési természete mikro-tönkremenetek szintjén tehát kismértékben változik oly módon, hogy a nyomás során csak a maximális terhelés közelében meginduló tönkremeneteli folyamatok során nagyobb számú nagy energiájú, rövid felfutási idejű törési esemény keletkezik. Ezen események nem befolyásolják a legnagyobb, tehát legjellemzőbb gyakorisági értékeket, változást a második és harmadik legnagyobb gyakoriságú osztályban okoznak. Az igénybevétel csekély befolyását a karakterisztikus AE jellemzők közel azonos volta is megerősíti, a három igénybevétel esetén. Hajlítás során a kapott függvények jól tükrözik a jelenlévő két igénybevétel együttes hatását. A faanyag törése tehát mikro-tönkremenetek szintjén csak kis mértékben függ az alkalmazott igénybevétel fajtájától. A szilárdsági tulajdonságokban mérhető különbség tehát nem a faanyag alkotóelemeinek törési energiájában különbözik. Feltehetően a farészekre kényszerített deformáció jellege kedvezőtlenebb a tönkremenetek kialakulása szempontjából nyomás és hajlítás esetén, így ugyanazon törés, repedés kisebb feszültség szinten alakul ki anélkül, hogy maga a törés energiája számottevően változna.**

## **VI. A terhelési előtörténet hatása a faanyag akusztikus emissziós tulajdonságaira: Kaiser effektus vizsgálatok erdeifenyő akusztikus eseményeivel kapcsolatban**

A természetes fa élete során a különböző környezeti hatások következtében számos igénybevételnek van kitéve. Ilyen, a fa mechanikai tulajdonságait befolyásoló tulajdonságok az önsúly, szélterhelés, hó terhelés illetve a döntéskor képződő terhelések. Ezek a faanyag törőszilárdságának esetenként 70-90%-t is kitehetik, így a fában különböző tönkremeneteleket, rotszakadásokat, repedéseket hozhatnak létre.

A feldolgozott faanyag nagy része aztán mesterséges szárítás után kerül a felhasználási területére. A feldolgozás majd az azt követő szárítás során drasztikus nedvességtartalom változás következik be és jelentős hőterhelés éri a faanyagot. Felmerül a kérdés, hogy ezen kezelések ill. a fát korábban ért terhek során bekövetkezett tönkremenetelek, hogyan hatnak a fa akusztikus emissziós tulajdonságaira. A vizsgálatok alapján választ kaphatunk arra, hogy a fában lévő repedések, hogyan hatnak annak tönkremeneteli folyamataira terhelés során.

A vizsgálatokhoz Kaiser megfigyeléseit vettük alapul, aki azt tapasztalta, hogy egyes fémek egy előterhelést követő második terhelési ciklusban nem válnak akusztikusan aktívvá mindaddig míg az újabb terhelés el nem éri a korábbi terhelés maximumát.

A jelenséget Kaiser effektusnak nevezzük (Kaiser 1953).

Felmerült a kérdés, vajon a fa mutatja-e az effektust és a jelenség milyen módon függ a két terhelési ciklus között eltelt időtől ill. a fát ért kezeléstől. A vizsgálatokat erdeifenyő fafajon végeztük el, mely a korábbi vizsgálatok alapján a legnagyobb AE aktivitást mutatta.

Az egyes mintasorozatok vizsgálatát a következő feltételek mellett végeztük el:

- I. sorozat; a törőterhelés az előterhelést, tehermentesítés után közvetlenül követte
- II. sorozat, a törőterhelés az előterhelést 15 napra követte
- III. sorozat ; a törőterhelés az előterhelést 1 hónapra követte
- IV. sorozat; a törőterhelés az előterhelést 2 hónapra követte
- V. sorozat; a törőterhelés az előterhelést 24 óra áztatás, 48 óra 90°C-os szárítás majd klimatizálás után követte, a két terhelés között eltelt idő 15 nap

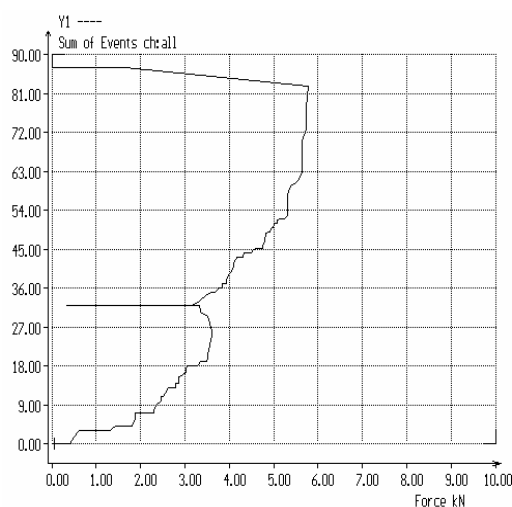
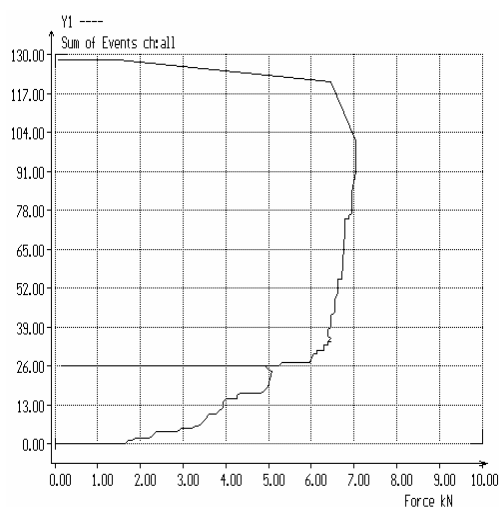
Sorozatonként 20 próbatestet vizsgáltunk húzás során az eddigi vizsgálatokkal megegyező kialakítás és feltételek mellett. A minták átlagos nedvességtartalma 10% volt. A minták összehasonlíthatósága érdekében az egyes minták esetén úgy választottuk meg az előterhelés értékét, hogy az minimum 20-25 akusztikus eseményt eredményezzen. Az effektus vizsgálatához az eseményösszeg görbéket vettük fel terhelőerő függvényében. (V/A.melléklet) Az I-es mintasorozatban a törőterhelés az előterhelést követő tehermentesítést azonnal követte. A vizsgálat eredményeinek összefoglalását a VI.1. táblázatban látjuk.

<b>VI.1. táblázat Kaiser effektus vizsgálat eredményei erdeifenyő fafajnál az előterhelést azonnal követő törőterhelés esetén</b>					
Minta száma	Előterhelés maximuma kN	Eseményszám előterhelésnél	Eseményszám előterhelés értékénél 2. terhelési ciklusban	eseményösszeg a törés során	Az effektus fennállása +igen / - nem
1.	5,2	20	1	31	+
2.	5,5	21	3	320	+
3.	5,1	26	0	128	+
4.	2,52	21	6	240	+
5.	5,72	20	4	147	+
6.	3,65	58	4	323	+
7.	7,2	52	18	530	+
8.	3,6	32	3	88	+



9.	3,7	35	11	171	+
10.	7,6	21	4	340	+
11.	4,2	26	11	93	+
12.	6,9	23	7	72	+
13.	8,1	35	15	2280	+
14.	6,8	31	131	440	-
15.	6,41	27	2	144	+
16.	4,45	20	5	61	+
17.	9,0	28	6	52	+
18.	4,85	20	9	202	+
19.	4,28	21	2	70	+
20.	5,51	21	8	112	+

20 mintából 19 mutatja, egy nem mutatja a Kaiser effektust. **Az minták 95 %-a mutatja a Kaiser effektust.** A faanyag tehát jelen kísérleti körülmények között „emlékszik” az őt a törés előtt közvetlenül ért terhelés maximumára, azaz addig a terhelési szintig újabb tönkremenetel nem jön létre. Ez azt is jelenti, hogy a fában az előterhelés során keletkezett tönkremenetek az újabb terhelési ciklusban nem akusztikus források, azaz nem képződnek ill. a beállított zajszűrési küszöb alatt maradnak a belőlük származó esetleges sűrűlódásos jellegű események. A VI.1. ábra a terhelőerő eseményösszeg függvényét mutatja két mérés esetén a Kaiser effektus szemléltetésére. Az előterhelési szint után tehermentesítettük a próbatestet (vízszintes vonal a függvényen) majd ezt közvetlenül követte a második terhelési ciklus. Jól látható, hogy az előterhelési szintig újabb tönkremenetelt nem detektáltunk. Az eseményszám csak az előterhelési szint elérése után kezd emelkedni (VI.1. bal ábra).



VI.1. ábra Kaiser effektus a 3-as és 8-as minta esetében

A további vizsgálatok ezután arra irányultak, hogy a fa ezen tulajdonsága az időben hogyan változik. A II. mintasorozat esetén az előterhelést 15 napra követte a törőterhelés.

A VI.2. táblázat az eredmények összefoglalását mutatja.

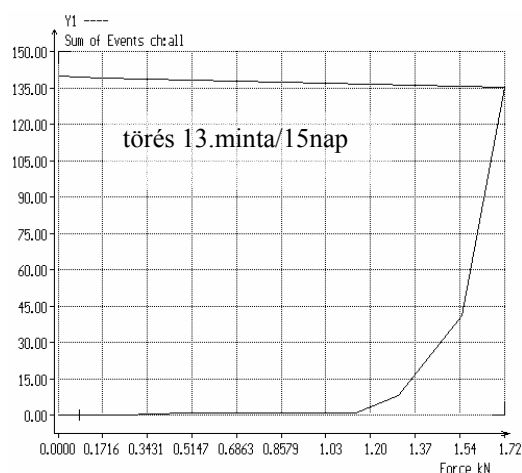
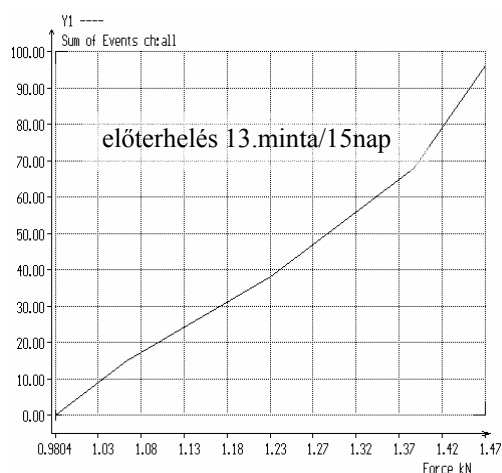
VI.2. táblázat Kaiser effektus vizsgálat eredményei erdeifenyő fafajnál az előterhelést 15 napra követő törőterhelés esetén					
Minta száma	Előterhelés maximuma kN	Eseményszám előterhelésnél	Eseményszám előterhelés értékénél 2. terhelési ciklusban	eseményösszeg a törés során	Az effektus fennállása +igen / - nem
1.	4,98	22	6	112	+
2.	8	19	4	141	+
3.	3,68	21	22	170	-
4.	7,3	20	25	244	-
5.	3,02	23	17	97	-
6.	6,9	19	18	48	-
7.	4,41	25	4	717	+

8.	4,17	31	9	1043	+
9.	3,43	29	8	542	+
10.	4,16	30	10	1427	+
11.	3,84	26	7	206	+
12.	4,0	29	6	524	+
13.	1,47	96	27	140	+
14.	3,51	26	32	176	-
15.	2,53	29	12	991	+
16.	4,57	24	175	415	-
17.	3,19	35	1	1333	+
18.	5,14	26	3	1107	+
19.	4,98	20	14	100	-
20.	2,94	74	52	192	-

A Kaiser effektus fennállását, esetünkben az előterhelés akusztikus aktivitást csökkentő hatását akkor fogadtuk el, ha a második terhelési ciklusban az előterhelés szintjéig kevesebb mint 50%-át kaptuk az előterhelés során detektált eseményszámnak. Ezen feltétel felállítását az indokolja, hogy a második terhelési ciklusban kapott 1-2 esemény megjelenése - az előkísérletek tanúsága szerint - még nem utal egyértelműen jelentősebb tönkremenetek létrejöttére. Így célszerűnek látszik az 50%-os szint felállítása, amely felett már egyértelműen jelentős számú tönkremenetelről beszélhetünk és az effektus fennállását elvethetjük.

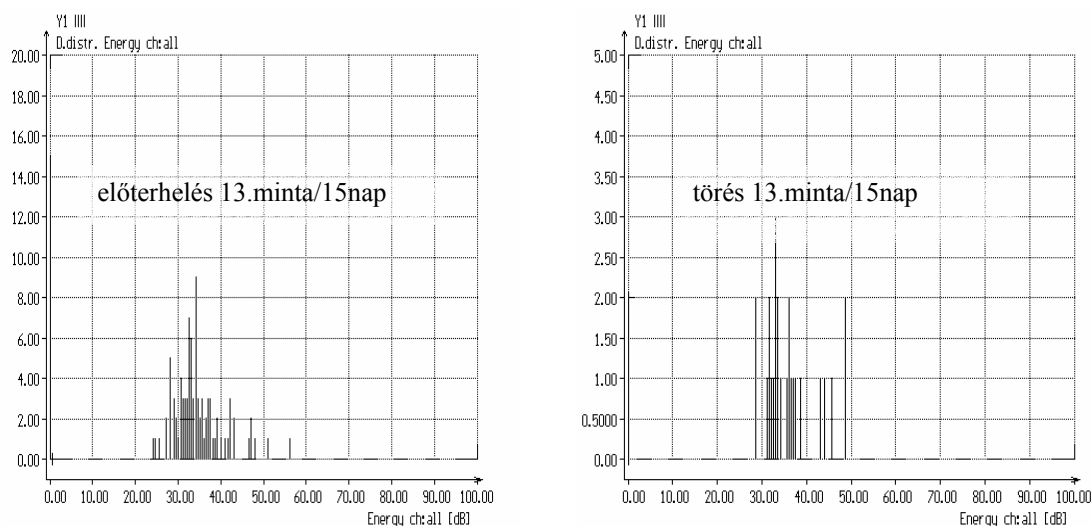
**A vizsgált 20 mintából 12 mutatta a Kaiser effektust azaz a minták 60%-a.**

A vizsgálatok szerint tehát 15 nap elteltével a minták 40%-a a korábbi előterhelés ellenére akusztikusan aktív lesz. A korábbi terhelési szintig tehát újabb tönkremenetek jönnek létre vagy a korábban kialakult repedések felületei egymáson elmozdulva akusztikus forrásokká válnak. A kapott események jellegének meghatározása érdekében az események mért fizikai paramétereinek ill. az ezekből számolt paraméter az események energiájának eloszlásfüggvényeit vizsgáltuk meg. Az események energiáját az akusztikus jel burkológörbéje alatti terület kiszámításából nyerjük mint azt az események időfüggvényeivel kapcsolatos fejezetben bemutattuk. Első lépésben az előterhelés során kapott események és a törés során az előterhelés értékéig kapott események energia sűrűség függvényeit hasonlítottuk össze. Feltételezésünk az volt, hogy ha a törés során kapott események a korábbi tönkremeneteli helyek felületeinek súrlódásából jönnek létre, akkor ezek időben hosszabb és kisebb amplitúdójú jeleket eredményeznek, mint az előterhelés során kialakult repedések és rotszakadásokból származó nagy energiájú jelek. A vizsgálatok azt mutatták, hogy az energia eloszlások tartománya az egyes mintákra jellemző, azaz a törés során az előterhelés értékéig kapott események közel azonos eloszlásúak mint az előterhelés során kapott események. Egy példát a Kaiser effektus fennállására ill. a hozzá tartozó energia sűrűség függvény



VI.2. ábra Akusztikus emisszió az előterhelést 15 napra követő törés esetén (13-as minta)

szemléltetésére a VI.2. ábra és VI.3. ábra mutat. A függvények közel azonos jellegéből arra következtettünk, hogy a második terhelési ciklusban az előterhelés értékéig kapott események nem sűrűdéses jellegűek, hanem újabb tönkremeneteli helyeken bekövetkező tönkremenetek eseményeiről ill. repedésterje-désről van szó.



VI.3. ábra A 13. minta esemény energiáinak sűrűség függvénye az előterhelés szint alatt előterhelés és azt 15 napra követő törés esetén

Ebből az következik, hogy a második terhelési ciklusban - melynek során egy tönkremeneteket tartalmazó anyagot terhelünk - más feszültségi állapot jön létre, mint az előterhelés során és a kritikus feszültség létrejöttének helyei, valamint a tönkremeneteli helyek is máshova kerülnek. A korábban létrejött tönkremenetek felületei nem okoznak a küszöbszint feletti amplitúdóval rendelkező sűrűdéses jellegű eseményeket.

Természetesen ez nem jelenti azt, hogy a korábban létrejött repedések nem lehetnek kiinduló pontjai az újabb tönkremeneteknek, csupán azt mutatja, hogy az újabb jelek újabb repedésterjedésből és rotszakadásokból származnak, melyek energiaszintje hasonló az előterhelés eseményeinek energiájához.

Mindez összhangban van a tönkremeneteli folyamatoknál későbbiekben leírtakkal, miszerint a tönkremenetek véletlenszerűen alakulnak ki a kialakult pillanatnyi feszültségállapot kritikus keresztmetszeteiben, majd a tönkremenetel létrejötte után a terhelés a még ép részekre adódik át, újabb tönkremeneteket eredményezve. (ld.VII.5. fejezet)

A III. mintasorozatot az előterhelést 1 hónap múlva követő törésnek vetettük alá.

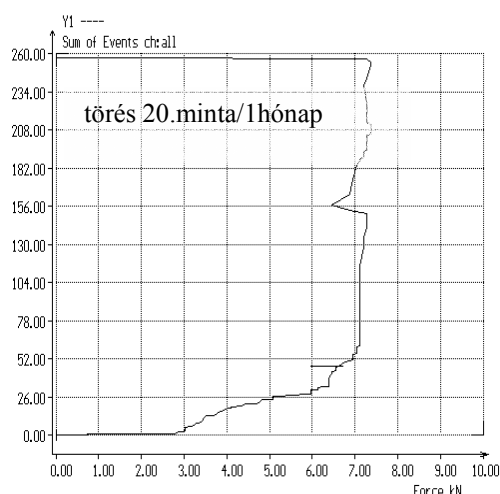
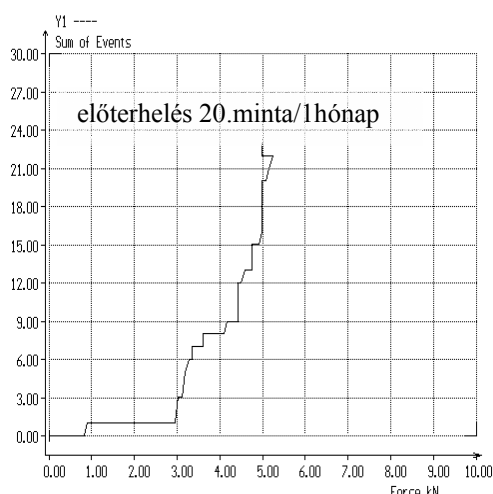
Az előterhelés ill. törés során kapott eseményösszeg/terhelőerő grafikonokat az V/A. melléklet tartalmazza, az eredményeket a VI.3. táblázatban foglaltam össze.

VI.3. táblázat Kaiser effektus vizsgálat eredményei erdeifenyő fafajnál az előterhelést 1 hónapra követő törőterhelés esetén					
Minta száma	Előterhelés maximuma kN	Eseményszám előterhelésnél	Eseményszám előterhelés értékénél a 2. terhelési ciklusban	eseményösszeg a törés során	Az effektus fennállása +igen / - nem
1.	6,2	28	0	67	+
2.	4,16	28	0	200	+
3.	5,96	23	15	162	-
4.	5,8	24	8	156	+
5.	4,57	23	6	58	+
6.	3,51	25	9	86	+
7.	3,26	23	3	172	+
8.	5,22	31	5	112	+

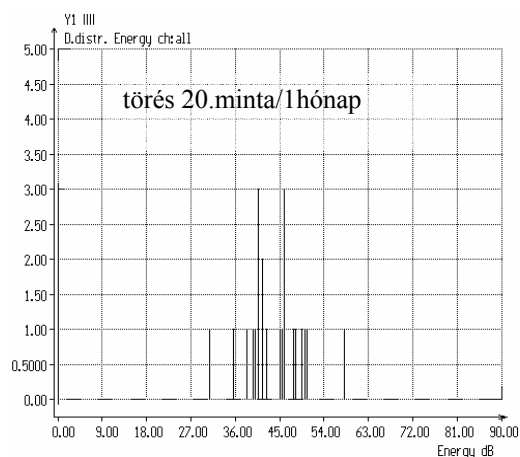
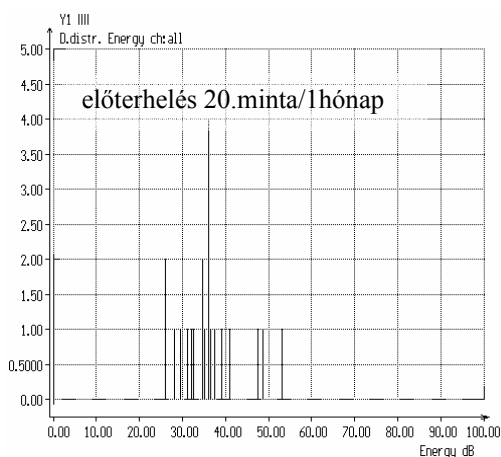
9.	7,51	33	100	195	-
10.	2,77	58	14	65	+
11.	5,22	41	27	83	-
12.	5,22	23	6	64	+
13.	2,69	33	12	159	+
14.	6,21	127	287	410	-
15.	5,71	25	0	261	+
16.	6,53	21	17	450	-
17.	7,35	23	35	381	-
18.	4,33	27	0	170	+
19.	4,41	25	25	95	-
20.	5,23	23	26	254	-

**A vizsgált 20 mintából 12 mutatja a Kaiser effektust, azaz a minták 60%-a.**

Hasonlóan a 15 napos terhelési ciklushoz a minták 40%-a akusztikusa aktív lesz az előterhelés szintje alatt, bennük jelentős mennyiségű tönkremenetel keletkezik. Megvizsgálva az előterhelés szint alatti jelek energia tartományát az előterhelés és törés során azt tapasztaljuk, hogy az események energiatarományja nem különbözik. Az energia sűrűség függvények a V/B. mellékletben láthatók. A második terhelési ciklusban tehát újabb repedésterjedések és törések következnek be, a már jelenlévő törési felületek nem okoznak sűrűdásos jellegű akusztikus eseményeket. VI.4. ábra egy példát mutat a 20 minta esetén mikor a Kaiser effektus nem áll fenn. A VI.5. ábra a 20. mintához tartozó energia sűrűség függvényt szemlélteti az előterhelés és a törés során.



VI.4. ábra A 20. minta akusztikus aktivitása az előterhelés és a törés során az előterhelést 1 hónapra követő törés esetén



VI.5. ábra A 20. minta esemény energiáinak sűrűség függvénye az előterhelés szint alatt előterhelés és azt 1 hónapra követő törés esetén

A IV. mintasorozat esetén a törés az előterhelést 2 hónapra követte. Az eseményösszeg / terhelőerő grafikonokat a V/A. melléklet, az eredményeket a VI.4. táblázat mutatja.

VI.4. táblázat Kaiser effektus vizsgálat eredményei erdeifenyő fafajnál az előterhelést 2 hónapra követő törőterhelés esetén					
Minta száma	Előterhelés maximuma kN	Eseményszám előterhelésnél	Eseményszám előterhelés értékénél 2 hónap múlva	eseményösszeg a törés során	Az effektus fennállása +igen / - nem
1.	7,27	28	141	212	-
2.	7,43	22	41	117	-
3.	4,41	27	36	129	-
4.	5,55	23	15	167	-
5.	7,02	21	53	975	-
6.	1,79	66	116	143	-
7.	4,73	23	35	169	-
8.	3,10	25	0	158	+
9.	6,86	25	52	2133	-
10.	5,47	35	29	200	-
11.	2,85	23	3	310	+
12.	7,27	34	48	78	-
13.	7,43	24	92	391	-
14.	6,94	25	42	664	-
15.	6,00	27	11	392	+
16.	6,2	52	36	235	-
17.	5,31	29	12	122	+
18.	2,77	27	22	101	-
19.	6,21	26	0	36	+
20.	6,69	23	21	249	-

20 mintából 5 mutatta 15 minta nem mutatta a Kaiser effektust.

**Az értékelt minták 75%-a nem mutatta az effektust.** Két hónap elteltével tehát a minták döntő többsége nem jelzi a korábban elszenvedett terhelések akusztikus aktivitást csökkentő hatását. A 15 mintából, ahol az effektus nem állt fenn 11 aktívabb volt az előterhelés értékénél a második terhelési ciklusban. Ez a szám egy hónapos visszaterhelés esetén 4 aktívabb a 8-ból. Ez azt mutatja, hogy az előterhelés és törés között eltelt hosszabb idő esetén a már jelen lévő tönkremenetek az akusztikus aktivitás növekedését okozzák a második terhelési ciklusban. Jelen sorozatnál feltehető, hogy a tönkremenetek egyrészt újabb repedések és törések kiinduló pontjai másrészt jelenlétük miatt a terhelt keresztmetszet kisebb, így több tönkremeneteli eseményt detektálunk adott terhelőerő mellett, hiszen a feszültség nagyobb az anyagban. Az előterhelési szint alatti események energiatarományát vizsgálva az eddigiekkel megegyezően azt a megállapítást tehetjük, hogy az nem változik. Ez alapján tehát azt mondhatjuk, hogy a második terhelési ciklusban kapott események új repedésterjedésből és törésekből származnak.

A leírt vizsgálati eredmények szerint tehát az előterhelést egy hónapon belül követő törés során az előterhelés mint akusztikus emissziót csökkentő tényező játszik szerepet, azaz az előterhelés alatt nem keletkezik jelentős mennyiségű tönkremenetel a minták többségében.

Ez azt jelenti, hogy feltehetően a terhelés során hasonló feszültségi állapot jön létre az előterhelés és törés során, így előterhelés alatt a már eltört részek nem okoznak AE-t, újabb tönkremenetek pedig csak kis számban keletkeznek. Két hónap után a fában az előterheléssel bevitt tönkremenetek az újabb terhelési ciklusban a kialakult feszültségállapotot átrendezik, az már az előterheléshez képest más módon adódik át az egyes faelemekre, így jelentős mennyiségű tönkremeneteli eseményt detektálunk. Ez a jelenség az előterhelés során bevitt belső feszültségek időbeni leépülésével is kapcsolatos lehet.

Az V. mintasorozaton a nedvességtartalom és hőmérséklet együttes hatását vizsgáltuk, mintegy modellezve ezzel az élőnedves állapotból (nedvességtartalom > 30%) szárítással felhasználási állapotba (~10% nedvességtartalom) kerülő faanyag klimatikus igénybevételeit.

A kísérletek során a 10 % nedvességtartalmú faanyagot előterheltük megelőző kísérletekkel megegyező módon. Ezt követően 24 óra áztatásnak lettek a minták kitéve. Ezzel az élőnedves állapot nedvességtartalmát érték el. Az áztatást 48 óra 90°C-on végrehajtott szárítási folyamat követte. A kiszáritott mintákat ezután klimatizáltuk a kiinduló 10 % nedvességtartalomra és törésig terheltük. Az előterhelés és törés között eltelt idő 15 nap volt.

A kapott grafikonokat a V/A. melléklet mutatja. Az eredményeket a VI.5. táblázatban foglaltam össze.

<b>VI.5. táblázat Előterhelést követő 24 óra áztatás, 48 óra 90 °C-os szárítás majd klimatizálást követő Kaiser effektus vizsgálat eredményei erdeifenyő fafaj esetén</b>					
<b>Minta száma</b>	<b>Előterhelés maximuma kN</b>	<b>Eseményszám előterhelésnél</b>	<b>Eseményszám előterhelés értékénél kezelés után</b>	<b>eseményösszeg a törés során</b>	<b>Az effektus fennállása +igen /-nem</b>
1.	6,2	31	24	159	-
2.	3,92	23	21	91	-
3.	7,67	23	25	223	-
4.	4,0	26	4	1151	+
5.	6,86	25	25	87	-
6.	6,61	46	62	105	-
7.	2,94	55	48	728	-
8.	6,2	34	65	495	-
9.	5,63	29	84	154	-
10.	8,98	38	137	152	-
11.	5,06	25	86	268	-
12.	7,43	19	110	110	-
13.	5,39	27	37	71	-
14.	5,63	24	6	751	+
15.	4,82	22	6	32	+
16.	4,98	36	16	33	+
17.	6,29	25	36	354	-
18.	8,17	28	239	323	-
19.	7,1	46	152	190	-
20.	2,94	25	2	94	+

20 mintából 5 mutatja, 15 nem mutatja a Kaiser effektust. **A minták 75 %-a nem mutatja a Kaiser effektust az áztatás és klimatizálás után.**

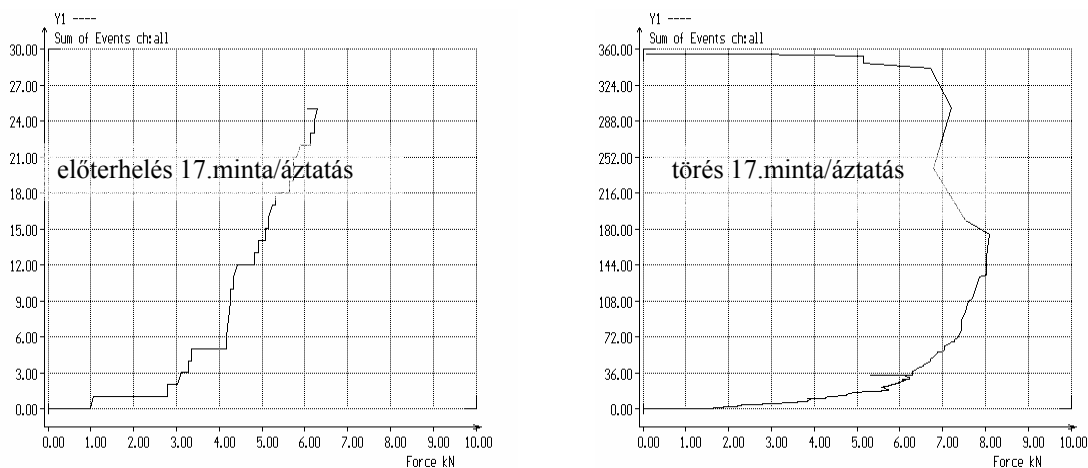
A vizsgálatok tanulsága szerint tehát a klimatikus körülményekben bekövetkező drasztikus változás jelentős mértékben befolyásolja a második terhelési ciklus akusztikus aktivitását.

A faanyagot ért korábbi terhelések hatása nem mutatkozik meg mint akusztikus emissziós aktivitást csökkentő tényező. Míg a II. sorozat esetén 15 nap után 60% mutatta az effektust, addig áztatás, szárítás után 15 napra 25% mutatja csak.

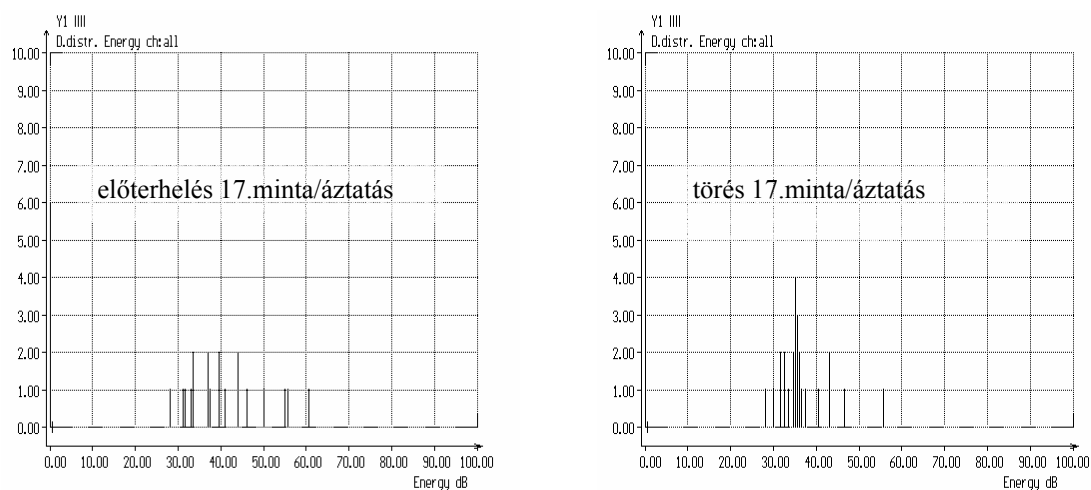
A V. sorozaton is elvégeztük az előterhelés és törés azonos terhelési szintig kapott eseményeinek energia eloszlás vizsgálatát. A grafikonokat a V/B. melléklet tartalmazza.

A vizsgálat eredménye azt mutatta, hogy a töréskor kapott események energiája az előterhelés eseményeinek energia tartományába esik és az adott próbatestre jellemző értéket ad. Ez fennáll azokban az esetekben is, amikor a törés során lényegesen magasabb eseményszámot detektáltunk mint az előterhelés során. A 17. minta esetén mutat az VI.6. ábra és VI.7. ábra a Kaiser effektus megszűnésére és a hozzá tartozó energia tartományra egy példát az előterhelés és a törés során. A törés során kapott események tehát az előterhelés tönkremeneteleihez hasonló fizikai paraméterekkel rendelkeznek. A törés során előterhelési szintig kapott nagyobb eseményszámok azzal magyarázhatók, hogy a tönkremeneteleket tartalmazó anyagban kialakuló feszültségállapot kedvezőbb a tönkremenetel szempontjából, így a több tönkremenetel miatt nagyobb eseményszámot kapunk. Ehhez járulhat még hozzá, hogy az áztatás során a cellulóz-fonalmolekulákat és lignint összekapcsoló, az előterhelés során felszakadt hidrogénhidás kötések az áztatás során részben a dagadási folyamat miatt közelebb kerülnek, másrészt a kialakulásukhoz szükséges víz jelenléte miatt újra kialakulhatnak. A

második terhelési ciklusban ezek újra tönkremennek és újabb események forrásaivá válnak. Ez a feltételezés összhangban van más kutatók megállapításaival, miszerint magas hőmérséklet és vízgőz jelenlétében a faanyag plasztikussá válik, ennek megszűnése után új hidrogénhidas kötések alakulnak ki a lignin és a poliózok között. A kialakult komplex rendszer ismét merev lesz, általában kompaktabb szerkezettel és így ridegebb mechanikai tulajdonságokkal. (Németh 1998)



VI.6 ábra Az V/17. minta akusztikus aktivitása az előterhelés és a törés során az előterhelés után áztatásnak, szárításnak majd klimatizálásnak kitett minta esetén



VI.7. ábra Az V/17. minta esemény energiáinak sűrűség függvénye az előterhelés szint alatt előterhelés és törés során

**A Kaiser effektussal kapcsolatos vizsgálataink eredményei alapján a következőket mondhatjuk:**

- Az előterhelést közvetlenül a tehermentesítés után követő törés esetén az értékelhető minták 95 %-a mutatja a Kaiser effektust. A faanyag tehát ezen kísérleti körülmények között „emlékszik” az őt a törés előtt közvetlenül ért terhelés maximumára, azaz benne előterhelési szintig újabb tönkremenetel nem jön létre. Ez azt is jelenti, hogy a fában az előterhelés során keletkezett tönkremenetelek felületei az újabb terhelési ciklusban nem akusztikus források, azaz nem képződnek ill. a beállított zajszűrési küszöb alatt maradnak a belőlük származó esetleges súrlódásos jellegű események.
- Az előterhelést 15 napra és egy hónapra követő törés esetén az értékelhető minták 60%-a mutatja a Kaiser effektust. A vizsgálatok szerint tehát 1 hónapon belül a minták 40%-a a

korábbi előterhelés ellenére akusztikusan aktív lesz az előterhelési szint alatt. A korábbi terhelési szintig tehát újabb tönkremenetelek jönnek létre vagy a korábban kialakult repedések felületei egymáson elmozdulva akusztikus forrásokká válnak. Az események energia eloszlásait vizsgálva megállapítottuk, hogy az energia eloszlások tartománya az egyes mintákra jellemző, azaz a törés során az előterhelés értékéig kapott események energiája közel azonos eloszlású, az előterhelés során kapott eseményekével. Ebből arra következtettünk, hogy a második terhelési ciklusban az előterhelés értékéig kapott események nem súrlódásos jellegűek, hanem újabb tönkremeneteli helyeken bekövetkező tönkremenetelek eseményeiről van szó. Ebből az következik, hogy a második terhelési ciklusban - melynek során egy tönkremeneteleket tartalmazó anyagot terhelünk- más feszültségi állapot jön létre, mint az előterhelés során és így a kritikus feszültség létrejöttének helyei, valamint a tönkremeneteli helyek is máshova kerülnek

- Az előterhelést két hónapra követő törés esetén az értékelt minták 75%-a nem mutatta az effektust. két hónap elteltével tehát a minták döntő többsége nem jelzi a korábban elszenvedett terhelések akusztikus aktivitást csökkentő hatását. Két hónap után a fában az előterheléssel bevitt tönkremenetelek az újabb terhelési ciklusban a kialakult feszültségállapotot átrendezik, az már az előterheléshez képest más módon adódik át az egyes faelemekre, így jelentős mennyiségű tönkremeneteli eseményt detektálunk. Ez a jelenség az előterhelés során bevitt belső feszültségek időbeni leépülésével is kapcsolatos lehet. Az események energiájának vizsgálata eddigiekkel megegyezően nem mutatott változást az előterhelés és törés során.
- Az áztatott majd szárított és klimatizált minták esetén az értékelhető minták 75 %-a nem mutatja a Kaiser effektust az áztatás és klimatizálás után. A vizsgálatok tanulsága szerint tehát a klimatikus körülményekben bekövetkező drasztikus változás jelentős mértékben befolyásolja a második terhelési ciklus akusztikus aktivitását, a faanyagot ért a korábbi terhelések hatása nem mutatkozik meg az akusztikus emissziós aktivitás csökkenésében. Ennek okát egyrészt a víz és hő jelenlétében újra létrejövő hidrogénhidas kötések törési folyamatban való aktív részvételével, másrészt az előterheléssel bevitt sajátfeszültségek átrendeződésével magyarázhatjuk.

**A vizsgálat eredményeinek gyakorlati következménye - figyelembe véve a fahasználati szokásokat- , hogy az AE vizsgálatok során a fát ért korábbi terhelések Kaiser effektus jellegű hatásával nem kell számolnunk a faanyag vizsgálatakor, mert két hónap elteltével ezen hatás nem jelentkezik.** Különösen igaz ez ha figyelembe vesszük, hogy a felhasznált faanyag nagy része mesterséges intenzív szárítási folyamaton esik át. A vizsgálatok másik fontos eredménye, hogy képet kaptunk a fában már jelenlévő tönkremenetelek faanyag AE-jára, így törési folyamataira gyakorolt hatásáról. Ezek szerint a fában lévő tönkremenetelek a terhelt keresztmetszetet csökkentő hatása miatt adott terhelőerő mellett a faanyagban több tönkremenetelt, ezáltal nagyobb AE aktivitást eredményeznek a fellépő nagyobb feszültség miatt. Megállapítottuk továbbá, hogy a tönkremeneteli felületek nem okoznak súrlódásos jellegű eseményeket, ugyanakkor forrásai lehetnek újabb repedések keletkezésének. A tönkrement részek miatt a terhelés a még ép részekre adódik át újabb kritikus feszültségi helyeket ezáltal újabb tönkremeneteleket okozva véletlenszerűen az egész terhelt keresztmetszetben, amint ezt a mikro-tönkremeneteli folyamatok bemutatásánál részletesen látni fogjuk, más kutatók megfigyeléseivel egyetértésben. **A faanyag terhelési előtörténete tehát az okozott tönkremeneteli folyamatok révén a fa tönkremenetelét gyorsítja egy újabb terhelési folyamat során, ennek következtében növeli a faanyag akusztikus aktivitását.**



## VII. A faanyag tönkremeneteli folyamata makro- és mikro- szinten

Az AE jellemzők faanyag tönkremeneteli folyamataival való kapcsolatát az V. fejezetben tárgyaltuk. Megállapítottuk, hogy az AE forrásai azok a mikro-tönkremeneteli folyamatok, melyek a faanyag mikroszkopikus szintjén játszódnak le, törési, repedési folyamatok formájában. Ebben a fejezetben a szabványos szilárdságvizsgálat során kapott tönkremeneteli sajátosságokat egy új - az elektronmikroszkóp (továbbiakban EM) segítségével nyerhető - vizsgálati módszerrel elemezzük annak érdekében, hogy a nemzetközi és saját mechanikai és EM kutatások eredményeit összevegyük az AE vizsgálatok eredményeivel, így átfogó képet nyerjünk a faanyag tönkremeneteli folyamatairól.

Az utóbbi időben irányult a figyelem a fa törésének mikroszkopikus és elektronmikroszkopikus szintjeinek vizsgálatára a faanyag törésével kapcsolatban. Nem kétséges, hogy az elektronmikroszkóp elterjedtebb használata döntő befolyással bírt erre a folyamatra, ám a morfológia befolyásának megállapítása a fa törési természetére nem olyan új, mint az elektron-mikroszkóp. Nézzünk néhány korábbi példát az anatómia befolyásának megbecsülésére a fa törési viselkedésében. Clarke 1935 a szerkezet törést befolyásoló tulajdonságát adta meg kőrisen mikroszkóp segítségével. Wardrop 1951-ben publikálta fenyők tracheidáinak mikro-szerkezete és a húzási törőfeszültsége közötti kapcsolatot 80 µm vastagra szeletelt mintákon. Ez a megközelítés lehetővé teszi egy éven belül a korai és késői pászta összevetését vagy tetszőleges évgyűrűk összevetését. Erről részletesen Kloot írt 1952-ben. Kollmann 1963-ban fotó mikro-grafikonokat használva írt a törési jelenségekről a mikroszkopikus repedések és deformációk illusztrálásáról, valamint a szubmikroszkopikus megcsúszásokról is, melyeket más szerzők korábban elméletileg megalapoztak. Wardrop és Addo-Ashong 1965-ben egy átfogó áttekintést készített a fa anatómiai és a molekuláris, szuper molekuláris rendezettségéről, a szerkezeti változások jobb megértése érdekében mechanikai törések estén. Bizonyos számú felületi és transzmissziós elektron mikro-grafikon mutatja be a szerkezeti törést és alakváltozást sejtfal szinten rosttal párhuzamos húzás és nyomás esetén. Pentoney (1966) feltárta a fa törésének morfológiáját és mechanikáját. De Base volt az első (1970-72) aki elsőként vizsgálta a sejtfal rétegeket követő repedéseket a törés precíz helymeghatározásának érdekében EM használatával.

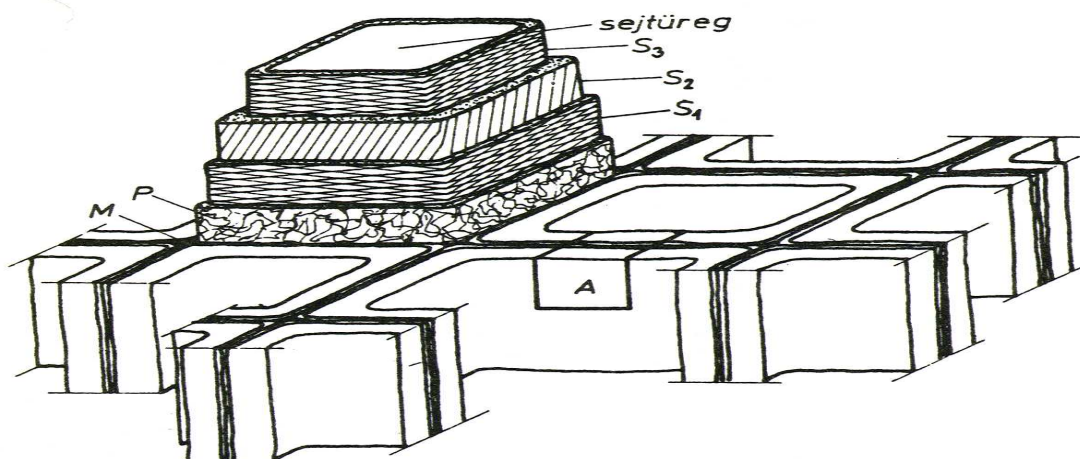
**A kutatások alapján kijelenthetjük, hogy fa mint biológiai anyag mikro szintű felépítettségének, szerveződésének fontos szerepe van és ezért pontos ismerete szükséges az anyag makroszintű tönkremenetelének megértéséhez.** Ennek érdekében az első alfejezetben röviden összefoglalom a faanyag mikro-szerkezetének ismerveit. A II. alfejezet a fa makro-szintű tönkremenetelével kapcsolatos ismereteket foglalja össze, míg a harmadik fejezet a fa EM segítségével nyert tönkremeneteli sajátosságait mutatja be a nemzetközi kutatások alapján. A negyedik alfejezetben pedig áttekintjük és összevetjük a saját vizsgálatok eredményeit más kutatók eredményeivel.

### VII.1. A faanyag mikro-szerkezete

A faanyagban mint porózus szerkezetű szilárd anyagban a szilárdítás szerepét a fát felépítő sejtek – fenyőknél tracheidák, lombos fáknál elsősorban farostok - sejtfalai látják el. A sejtfalak anyagának alapelemét a cellulóz molekulák adják. Ezek mintegy 12000 polimerizációs fokú és kb. 6000 nm hosszú fonalmolekulákat képeznek, melyek egymással párhuzamosan elrendeződve és kötegeket alkotva elemi fibrilláká szerveződnek. 50-80 fonalmolekula alkot egy elemi fibrillát. Az elemi szövetek egyes molekuláincai a szomszédos láncokkal kristályszerkezetet alkotnak. A kristályos szerkezetű cellulózt Nageli

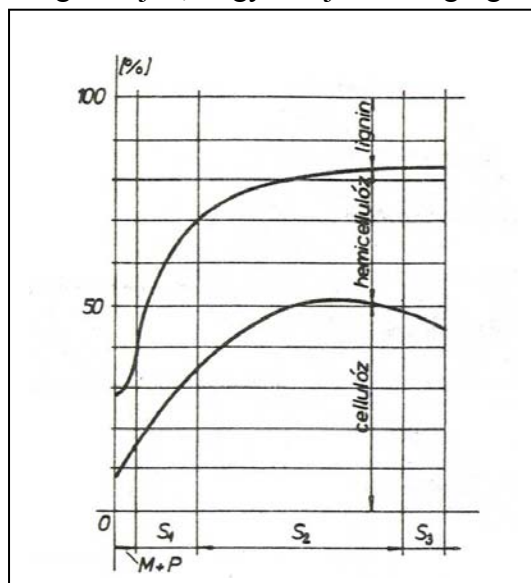
után (F. Kollmann 1951.) micelláknak nevezzük. A kristályos részek hossza 50-100 nm míg a kristályba nem szerveződött amorf részeké 20-60 nm. A kristályos és amorf részek a fibrillán belül váltakozhatnak. Az elemi fibrillákban a cellulózláncok mentén oldalirányban másodlagos kötések is kialakulnak. A kristályos részben kialakult másodlagos kötések szabályos szimmetriát mutatnak és számuk lényegesen nagyobb, mint az amorf részben. A szerkezet kristályos jellege biztosítja a cellulóz kedvező szilárdsági tulajdonságait és nagy kémiai stabilitását, míg a másodlagos kötések a hossz tengelyre merőleges szilárdságát növelik. Az elemi fibrillák keresztmetszeti mérete 3-5 nm, míg hossza a hosszanti kapcsolódások miatt a cellulózmolekula hosszának többszöröse lehet. Az elemi fibrillák tovább szerveződve sűrű szöveteket, a mikrofibrillákat képezik, melyben egyes kutatók szerint 3-5 (J. Bodig-B.A.Jayne 1982), míg mások szerint 20-30 (F.Kollman 1982) elemi fibrilla található. A mikrofibrillákban az elemi fibrillák olyan közel vannak egymáshoz, hogy köztük másodlagos kötések is kialakulhatnak. A mikrofibrillák között fennmaradó résekbe az intermicelláris térbe hemicellulóz, lignin, vízmolekulák és a rések méreténél kisebb egyéb molekulák épülhetnek be. A mikrofibrillák keresztmetszeti mérete 10-20 nm, míg hossza az egymás után kapcsolódó fibrillák miatt, azok hosszának többszöröse is lehet. A mikrofibrillák és a mikrofibrilláris teret kitöltő hemicellulóz és lignin a sejtalba beépülő egyéb anyagokkal együtt újabb kötegekbe, fibrillákba vagy vékony csíkokba, laminákba szerveződnek és ebből épülnek fel a sejtfa egyes rétegei. A sejtfa rétegek tehát a vázanyagnak tekinthető mikrofibrillákból és a töltőanyag szerepét betöltő, amorf jellegű hemicellulózból és ligninből épülnek fel. A mikrofibrillák anizotróp anyagként viselkednek fizikai-mechanikai tulajdonságaik szempontjából, azaz tulajdonságaik eltérőek a mikrofibrillák hossz tengelye és a rá merőleges irányban. A hemicellulóz molekulák rendezetlen elhelyezkedése és a lignin térhálós szerkezete miatt a töltőanyag közelítőleg izotrópnak tekinthető.

A sejtfa az élő sejt citoplazmája hozza létre. Először az elődleges (primer) sejtfa (P) alakul ki. A primer sejtfa a sejt végleges méretének eléréséig növekszik. A szomszédos sejtek a középlemezen (M) keresztül kapcsolódnak egymáshoz. Az érintkező felületeket a közép-lamella pektin anyaga ragasztja össze. A sejt teljes méretének elérése után a sejtfa vastagodni kezd és kialakul a másodlagos (szekunder) sejtfa. Ez három jól elkülöníthető rétegre bontható, jelük S1, S2, S3. A sejtfa egy kocsonyás záró réteg választja el a sejtüregtől. A sejtek kapcsolódását és sejtfa felépítését az VII.1. ábra szemlélteti.



VII.1.ábra A sejtfa rétegződése

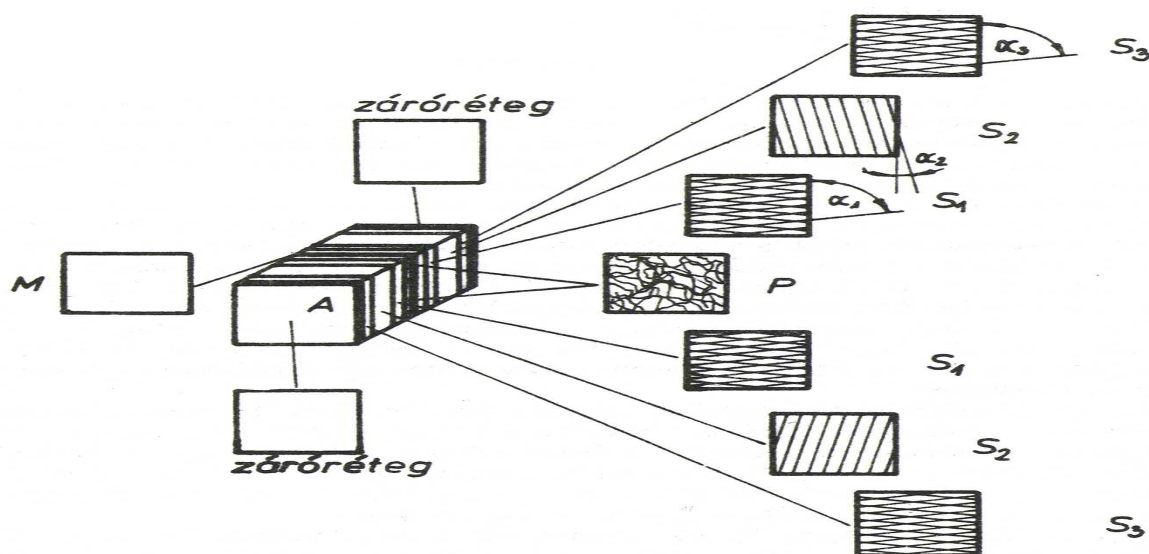
Az egyes rétegek vastagsága fajtától és a sejt falában elfoglalt helyétől függ. Átlagértéknek elfogadhatjuk, hogy a sejt falvastagság 5%-át a középlamella és az elsődleges sejt fal teszi ki, 15%-át S1, 72% S2 és 8%-át S3 réteg teszi ki. A záróréteg vastagsága elhanyagolható. Az VII.2. ábra a sejt fal fő alkotóelemeinek tömegeloszlását mutatja tűlevelű fafajokra. A közép-lamellában és primer sejt falban a cellulóz tömegaránya alacsony, átlagosan 10% ezen rétegek elsősorban töltőanyagból állnak. A legnagyobb, 50%-os értéket a vastag S2 rétegben éri el. A szilárdításban éppen ezért a vastag S2 rétegnek van a legnagyobb szerepe. Lombos fákra hasonló görbék rajzolhatók, de azok kisebb hemicellulóz és lignintartalma miatt a görbék az S2 rétegben 5-10%-al felfelé tolnának.



VII.2. ábra. A sejt fal alkotóelemeinek tömegeloszlása tűlevelű fák esetén

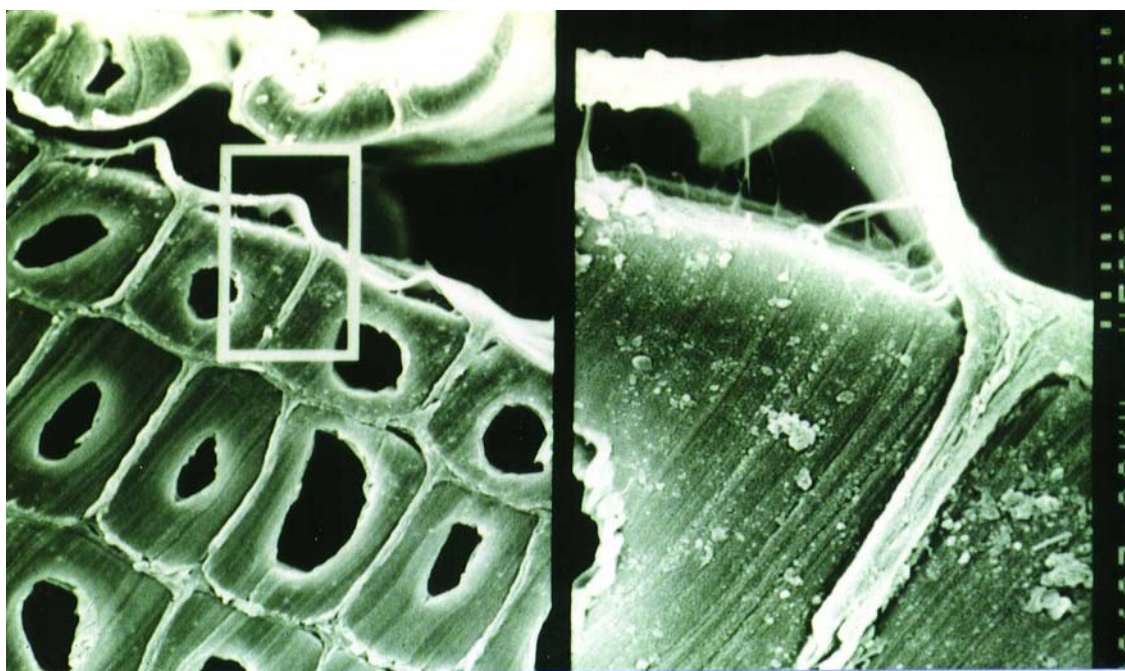
Az egyes sejt falrétegek között a legfontosabb különbség a mikrofibrillák sejt hossz tengelyével bezárt szögében van. A primer sejt falban a mikrofibrillák rendezetlenül helyezkednek el az ágyazó anyagban, egy „filcelődött” szövetet képezve. A szekunder sejt fal rétegben a mikrofibrillák hossz tengelye mindig valamilyen kitüntetett iránnyal párhuzamos. Az S1 réteg mikrofibrillái a sejt hossz tengelyével  $\alpha_1 = \pm 80^\circ$ -os szöget zárnak be, kereszt hálós szövet réteget képezve. Az S2 rétegben nincs kereszt hálós szerkezet, a mikrofibrillák a sejt hossz tengelyével párhuzamosan  $\alpha_2 = 20-30^\circ$ -os bezárva.

Az S3 réteg ugyancsak kereszt hálós a mikrofibrillák szöge  $\alpha_3 = \pm 75^\circ$  körül mozog. A VII.3. ábra két szomszédos sejt sejt falának rétegződését és a mikrofibrillák lefutásának irányát szemlélteti.

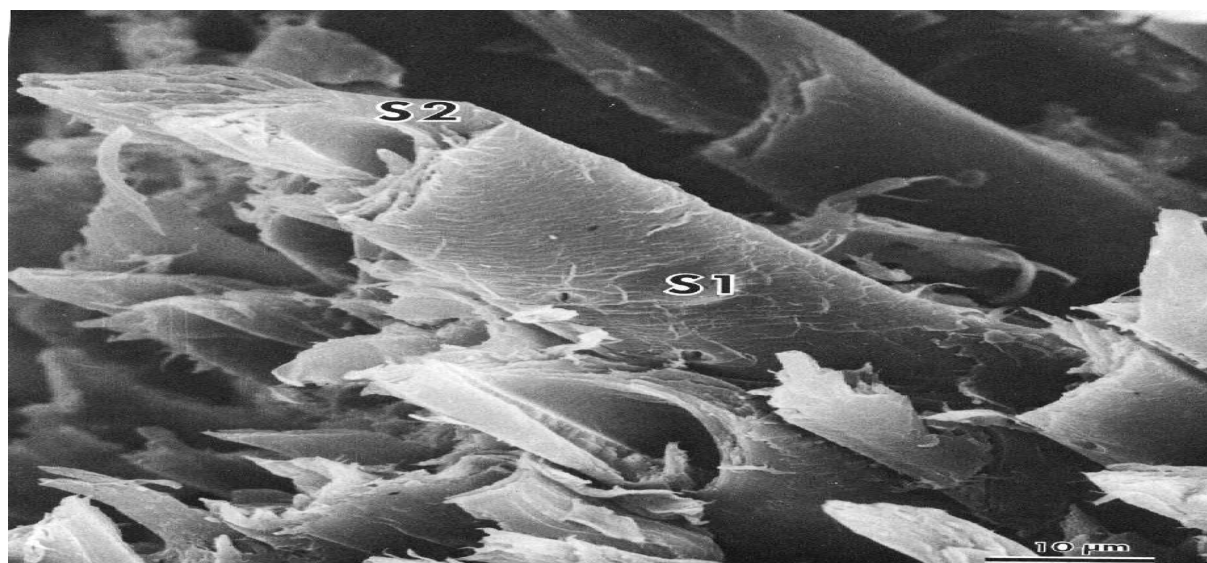


VII.3. ábra Két szomszédos sejt rétegződése és mikrofibrilláinak lefutási szöge

A sejt falának M, P, S1, S2 rétegei olyan belső szerkezeti szimmetriával rendelkeznek, amely a sejt geometriai középpontján átmenő hossz tengelyre és az arra merőleges síkra szimmetrikus. Az S2 réteg, mely a szilárdítás szempontjából a legfontosabb aszimmetrikus ugyan, de a szomszédos sejteket vizsgálva megállapíthatjuk, hogy azokban az S2 rétegek mikrofibrilláinak dőlése éppen ellentétes. Ez azt jelenti, hogy míg egyetlen mikrofibrillát hossz tengelyével párhuzamos normálerővel terhelve az hosszváltozása mellett el is csavarodna, a több sejtből álló fatest mikrofibrilláinak e sajátos szerveződése miatt, a fa rostirányú normál igénybevétel hatására nem csavarodik el és a fának ezzel nagy nyírási merevséget biztosít. Az egyes sejtfalrétegek keresztmetszeti és hossz metszeti elektronmikroszkópos képét a VII.4. és VII.5. ábra szemlélteti (Bariska ; Cote 1983.).



VII.4. Pinus Patula tracheidáinak elektronmikroszkópos felvétele



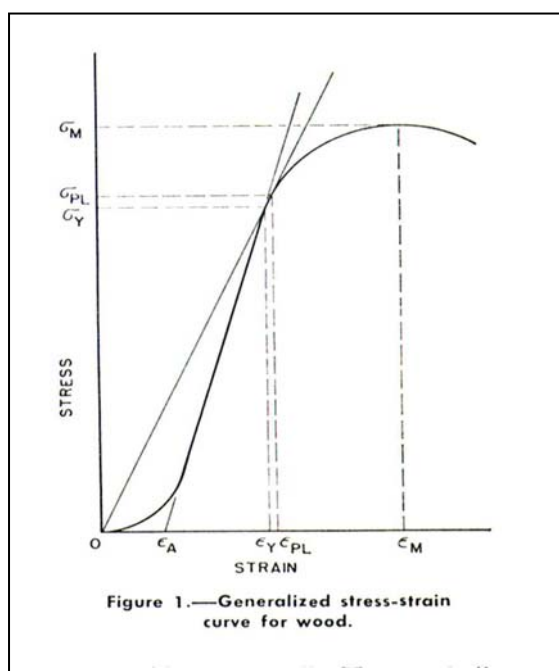
VII.5. Az S1, S2 sejtfalréteg vörös tölgy törési felületén

## VII.2. A faanyag makro-szintű tönkremenetele

A faanyag és egyéb anyagok terhelés hatására bekövetkező alakváltozását, majd szilárdságukat elérő feszültségek hatására létrejött törését feszültség-alakváltozás görbék felvételével ill. a görbék alapján meghatározott mennyiségekkel jellemezhetjük.

A faanyag makro-szintű törését vizsgálva nem törekszünk arra, hogy az anyag alacsonyabb szerveződési szintjein bekövetkező tönkremeneteleket vizsgáljuk, csupán a terhelési folyamat alatt mutatott viselkedését írjuk le.

A faanyag mint ortogonálisan anizotróp anyag esetén a mechanikai tulajdonságokat legalább a három főirányban ismernünk kell ahhoz, hogy annak anizotróp viselkedését megközelítőleg megismerjük. A VII.6. ábra A faanyagra jellemző általános feszültség-alakváltozás függvényt mutat nyomó terhelés hatására.



A feszültség-alakváltozás görbe kezdeti szakaszát vizsgálva egy görbe vonalú emelkedő szakaszt látunk, mely később egyenesbe megy át. A legtöbb anyag - fát is beleértve - mely magas feszültségértékeknél lineáristól eltérő viselkedést mutat, alacsony feszültségértékeknél egyenessel közelíthető (Pentoney, Dawidson 1962). Nincs okunk azt feltételezni, hogy ez ne lenne igaz nagyon alacsony feszültségértékeknél is. A mérési módszer a felelős a nemlineáris kezdőszakaszért (Bodig 1965). Mindig előfordulnak ugyanis felületi egyenetlenségek egyes anyagoknál, különösen a fánál, a szárítási feszültségek miatt (Erickson 1955).

VII.6.ábra A fa általános feszültség - alakváltozás görbéje nyomó igénybevételre

Ha az ilyen anyagot - ahol a felületi egyenetlenség egy valószínűségi változó lett - a terhelő berendezésbe helyezünk, csak néhány érintkezési pont lesz a befogófej és a próbatest között. A felvett erő az érintkezési felülettel lesz arányos. Ahogy a növekvő erő hatására egyre nő az érintkezési felület, a felvett nyomó feszültség mindig az épp aktuális nagyságú érintkezési felületre lesz jellemző, az erő növekménye az érintkezési felület növekedését eredményezi. Ez fejeződik ki a függvény emelkedő, görbe vonalú kezdetében. Ha a teljes felület érintkezésbe kerül a terhelőfejjel, az erő növekménye már nem okozhat újabb felületnövekedést és a függvény egyenessé válik. A kezdeti szakasz nem lineáris jellegének másik oka a faanyag makro-molekuláris rendezettségében rejlik. A faanyag makro-molekuláris szerkezetére jellemző, hogy a fonalmolekulák halmaza már kis terhelés okozta belső erők hatására nagy kezdeti alakváltozást mutat. Ez a deformáció az alakváltozási görbe kezdeti szakaszán a molekulaláncok bizonyos rendeződése után jön létre és már egészen kis erők hatására elkezdődik (Rónai 1994.). Ezen ún. "entrópiarugalmasság" tulajdonság tehát szintén hozzájárul a jelleggörbe kezdetének nem lineáris voltahoz.

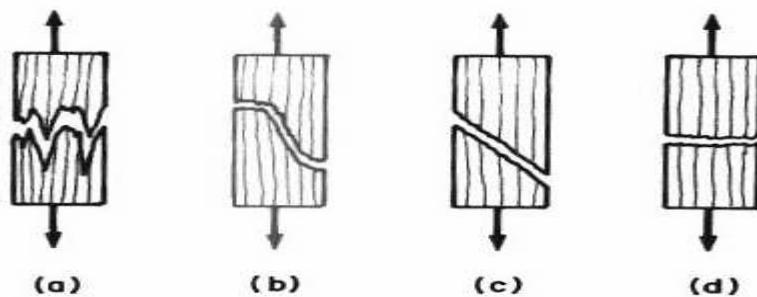
A függvény második szakaszát jó közelítéssel egyenesnek tekinthetjük, azaz feltételezzük a Hooke törvény érvényességét. A határpontot vagy arányossági határt (Y), mely a függvény egyenestől való eltérésének kezdőpontját adja meg, a függvényhez illesztett egyenes alapján

határozzuk meg. Ivanov (1963) és egyéb orosz kutatók a plasztikus folyás határát megadó módszert javasolnak (PL), melyet az origóból a görbéhez húzott érintő ad meg. Erre a módszerre más nemzetek kutatói azonban nem nagy figyelmet fordítottak az érintő felvételének önkényessége miatt. Kingston (1962) a plasztikus folyás elmélete ellen érvel szakítási kísérleti eredményei alapján, melyek nem mutatták plasztikus folyáshatár létezését. Valójában sem az arányossági határ, sem a plasztikus folyás határa nincs kapcsolatban a fa folyásával vagy tönkremenetelének kezdetével (King 1961). Mint majd azt a VII.5. fejezetben részletesen látni fogjuk, az egyenestől való eltérést, a mikro-szerkezetben bekövetkezett tönkremenetelek okozzák. A feszültség-alakváltozási görbe legmagasabb feszültség értékét tönkremeneteli szilárdságnak nevezzük ( $\sigma_M$ ).

### VII.3. Tönkremeneteli módok

#### VII.3.1. Rostokkal párhuzamos húzás

A fa rostokkal párhuzamos tönkremeneteli típusai húzás során a VII.7. ábrán láthatók.



VII.7. ábra A faanyag jellemző tönkremeneteli típusai rosttal párhuzamos húzás során (a) szakadásos törés (b) kombinált húzási és nyírási törés (c) elnyíródás (d) rideg törés

A tönkrement próbatestek késői és korai pásztáját vizsgálva megállapíthatjuk, hogy a késői pásztákra a kombinált húzási és nyírási törés míg a korai pásztákra a rideg törés a jellemző (Bodig 1982). A húzásra jellemző feszültség-alakváltozás diagrammot a VII.8. ábra szemlélteti jegenyefenyő esetén.

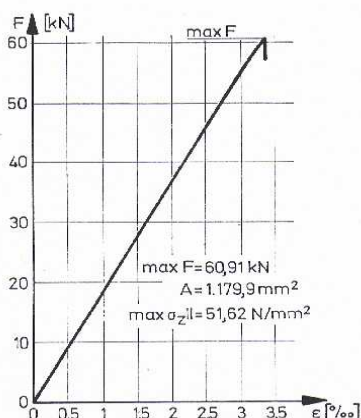


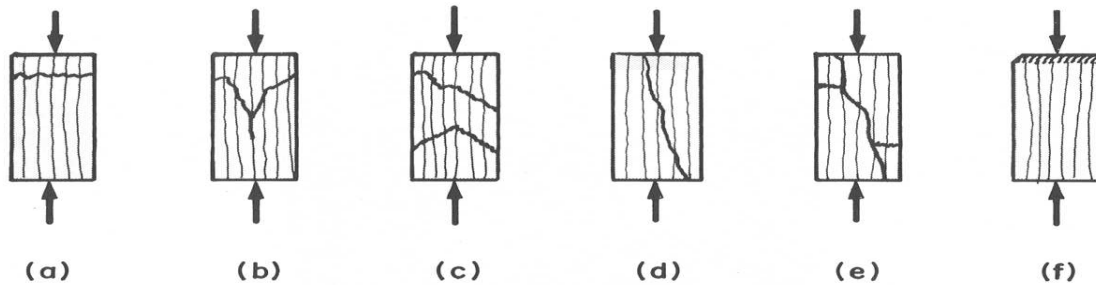
Bild 66: Typische Last-Verformungslinie bei einem reinen Zugversuch parallel zur Faserrichtung

VII.8. ábra Jegenyefenyő feszültség-alakváltozás diagrammja húzás során (Ehlbeck & Hemmer 1986)

Az ábrán jól látható a függvény lineáris jellege, mely egészen a törésig fennáll. A függvény a rideg anyagok feszültség-alakváltozás görbéire emlékeztet. Meg kell jegyezni azonban, hogy egyéb fajok esetén a törést megelőzően a jelleggörbe kissé eltér a lineáristól.

### VII.3.2. Rostokkal párhuzamos nyomás

Ha megnézzük a rostirányú nyomás hatására tönkrement próbatesteket a következő alaptípusokat figyelhetjük meg (VII.9.ábra)



VII.9.ábra Rostirányú nyomó próbatestek tönkremeneteli típusai: (a) összeroppanás, (b) ék alakú hasadás (c) nyíródás (d) hasadás (e) összeroppanás és hasadás (f) a végek elcsúszása kinyílása.

A terhelőerő-alakváltozás diagramm egy jellemző képét a VII.10. ábra mutatja jegenyefenyő esetén.

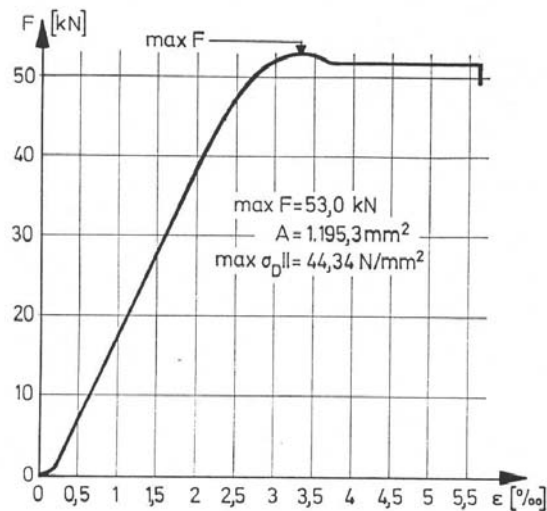


Bild 62: Last-Verformungsdiagramm bei Längsdruck; Quetschfaltenbildung innerhalb der Verformungsmeßstrecke

VII.10.ábra Jegenyefenyő rosttal párhuzamos nyomásának feszültség-alakváltozás diagrammja (Ehlbeck & Hemmer 1986)

Megfigyelhető, hogy a függvény csaknem a tönkremenetelig lineáris, majd egy maximum értéket elérése után állandó feszültségérték mellett növekszik az alakváltozás. A görbe jellege a képlékeny anyagok diagrammjaihoz hasonló és úgy tűnik, hogy a fa képlékeny folyást mutat ezen a szakaszon. Végül az 5%-ot meghaladó alakváltozás után bekövetkezik a törés.

### VII.3.3. Nyírási tönkremenetel

A fa nyírási tönkremenetele, mint azt az eddig bemutatott tönkremeneteli módoknál láttuk, gyakran más tönkremeneteli módokkal együtt lép fel. Tiszta nyírási állapotot létrehozni nehézségekbe ütközik a fellépő járulékos igénybevételek pl. hajlítás, rostra merőleges húzás miatt. Ez az oka annak is, hogy bár számtalan kísérleti módszert dolgoztak már ki a fa nyírószilárdságának meghatározására, ezek a módszerre jellemző nyírószilárdság értéket adnak és nem a valódi nyírószilárdság értékét. Tiszta nyírási feszültségek előállítására egy alkalmas módszernek tekinthetjük, a vékonyfalú cső próbatestek csavarását (Ehlbeck & Hemmer 1986) VII.11 ábra.

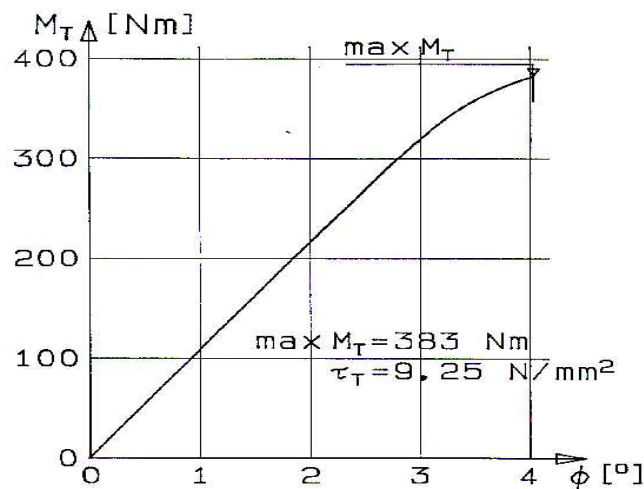
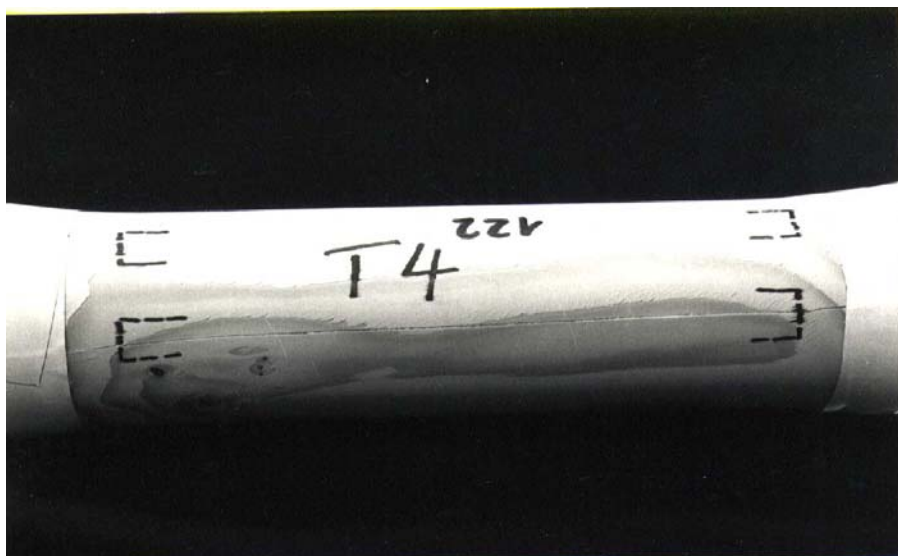


Bild 71: Last-Verdrehungslinie bei reiner Torsion

VII.11.ábra Vékonyfalú jegenyefenyő cső tiszta csavarásának csavaró nyomaték-szögelfordulás diagrammja



VII.12.ábra Jegenyefenyő nyírási tönkremenetele tiszta csavarás során



Megállapíthatjuk, hogy a diagramm hasonló az eddig tárgyalt terhelési esetek görbéihez. A nyírás során a görbe jellege lineáris, csak a törést megelőzően szakaszban változik meg annak lineáris jellege. A tönkremenetel – a dualitás tételének következtében- rosttal párhuzamos nyírási repedések formájában jött létre mind azt a VII.12. ábra mutatja.

#### **VII.4. Összefoglalás**

A VII.2-3. fejezetben áttekintettük a faanyag egyszerű igénybevételek hatására bekövetkező tönkremeneteli típusait, rövid idejű statikus vizsgálatok alapján. A feszültség-alakváltozás görbéket vizsgálva megállapíthatjuk, hogy azok jellege lineáris a különböző terhelési esetekben és anatómiai irányokban hasonló jellegű. A jelleggörbék rendelkeznek maximum értékkel, mely egyben az első tönkremenetel bekövetkezését is jelenti. A tönkremenetel általában a leggyengébb évgyűrű korai pásztyájában, ill. a bélsugarak mentén jön létre. Ezek jelentik a fa kritikus keresztmetszeteit. Nyomásnál a tönkremenetel jellege a jelleggörbék törést megelőző, lineáristól eltérő viselkedése alapján, a fa plasztikus anyagok tulajdonságaihoz hasonló jelleget mutat. Makroszkopikus szinten tehát a fa törése plasztikus jellegűnek tűnhet (Debaise 1966, Scuerfield 1972). A feszültség-alakváltozás görbe kezdeti nem lineáris szakasza a próbatest felületi egyenetlenségének és entrópia-rugalmasságának tulajdonítható.

#### **VII.5. A faanyag mikro-szintű tönkremenetele**

Az előző fejezetben tárgyalt makro-szerkezeti törést leíró, statikus, rövid idejű anyagvizsgáló módszerrel nyert eredmények, nem adnak elegendő információt a törés természetéről fa esetén. Szükséges tehát a törés makro szint alatti, a faanyagot felépítő mikro szerveződési szintben lejátszódó folyamatok vizsgálata. A törés alakjának kutatásai már több mint 100 éves múltra tekintenek vissza. Például az első mikroszkópos megfigyelést a műszaki irodalom Hartig-nak (1888) tulajdonítja. A szerző a sejtfalakban keresztirányban rendeződött vonalakat figyelt meg, ma már tudjuk, hogy ezek elcsúszási vonalak, amelyeknek a törést tulajdonítjuk. A fa szisztematikus vizsgálata, törésének megindulása után Robinson (1920) és Bienfait nevéhez fűződik, aki elcsúszási síkokat talált, kisebb megengedett feszültségű darabokban, míg nagyobb darabokban a sejtek deformálódása következett be. Kieser (1952) meghatározta a feszültség szintet, mely az elcsúszási vonalak kialakulásához, a makroszkopikusan látható törési területekhez, majd a töréshez vezetnek. Luc, erdei és vörös fenyő esetén ez az arány 0,53:0,80:1,0. Koran (1967) a sejtfalon átmenő törések csökkenését figyelte meg, ha az faanyag plasztikusabbá válik, a hőmérséklet emelkedése vagy a nedvességtartalom növekedése miatt. Wardrop (1947) különböző törési módot mutatott ki a reakció fában. A normális módon nőtt fával összehasonlítva a törés sokkal magasabb feszültség szinten következett be és sokkal kevesebb elcsúszási vonal alakult ki (Perem 1960, Keith 1974). Frey-Wyssling (1953) leírta a tipikus makroszkopikusan látható törési jelenségeket rostirányú nyomás hatására és megpróbálta megmagyarázni ezeket az anatómiai szerkezet viselkedésével. Azt feltételezte, hogy sejt deformálódás ott következik be először, ahol a sejtek elhajlanak a függőleges síkból a sejt csúcán vagy a bélsugarak körül. Úgy találta, hogy a törés a L-R síkon rost irányú nyomás hatására mindig rostokkal párhuzamosan fut le, míg L-T síkon 45-60°-ot zár be a rostokkal. A koncentrikus évgyűrű-szerkezetű próbatesteken a törési tartomány gyakran spirálisan fut le. Wardrop (1963) feltételezte, hogy rostirányú terhelés során fellép nyíró igénybevétel. Nyírás repedéseket figyelt meg a közép lamellában, valamint delaminálódást a sejtfalban. Bebizonyították, hogy szoros kapcsolat van a létrejött alakváltozás és a mikro-fibrillák sejt tengelyével bezárt szöge között.

Suzuki (1968), El-Ostra (1972) és Debaise (1966) a fa viszko-elasztikus alakváltozását vizsgálták, a fa szövet egyedülálló és csoportos mikro-törései esetén, melyek a törő terhelés 5-10%-nál lépnek fel és akusztikus jelek alapján érzékelhetők. A törés az elsődleges fal és az S1 réteg között terjed. Stupnici (1970) a korai és késői pásztában eltérő törési jelenségeket figyelt meg puhafák esetén. Dinwoodie (1978) a próbatest előtörténetének fontosságára hívja fel a figyelmet. Úgy találta, hogy előzetes rostirányú összenyomás hatására kisebb hajlítószilárdságot, de nagyobb keménységet kapunk, feltehetően a hidrogén kötések átalakítása miatt, melyeket a haránt irányú feszültségkomponensek okoznak.

Coté (1983) kisméretű próbatesteken vizsgálta a nyírás-, nyomás-, húzás hatására bekövetkező törést. Úgy találta, hogy a vastag falú sejtek az S1 és az S2 rétegek között törnek, míg a vékony falúak valószínűleg sejtfalon átmenő töréssel. A likacs gyűrű gyűrűs likacsú fafajok esetén és a több sejt sor széles bélsugarak hatással vannak a törés lefolyására és repedés irányára. Kucera (1982) kimutatta, hogy a sejtfalban nyomás hatására kialakuló gyűrődések erősen függenek a Runkel aránytól ( a másodlagos sejtfal vastagságának aránya a sejt átmérőjéhez). Sejt modellt alkalmazva Bariska (1983) alátámasztotta, hogy a nyomás hatására bekövetkező törés ultra-strukturális szinten jön létre, először nyírás hatására bekövetkező repedések formájában a lamellák között, majd az instabil sejtfalak deformálódásában, amit a sejtek és szövetek roncsolódása követ.

Choi (1990) a bélsugarak törési folyamatra gyakorolt egyre erősebb befolyását figyelte meg a bélsugarak méretének növekedésével. Coté (1983) és Ankande (1990) leírták egy ferde lépcső szerű törés terjedését egyik bélsugártól a másikig. Lai (1993) az találta, hogy a késői pászta tracheidái nyírásra és húzásra mennek tönkre, míg a korai pásztában a másodlagos sejtfal keresztirányú törése következik be fenyők esetén.

Plexibe mint izotróp anyagba fűrt lyukak segítségével modellezte Boutelje (1962) az anatómiai szerkezetet. Azt tapasztalta, hogy egy nagyfokú anizotrópia mérhető a „tangenciális” és „radiális” irányban mérhető rugalmassági modulusban. Ez a megfigyelés ellentmond Beery (1983) feltételezésének, miszerint a rugalmasság egyértelműen a sűrűséggel van kapcsolatban a fa plasztikus deformációja során.

Scuerfield (1972) azt találta, hogy a törőterhelés után az általa vizsgált két kemény és két puhafa esetén a törési formák sejtfal gyűrődés, nyírás repedések és rost deformáció volt a jellemző és tranzverzális mikro-repedések ritkán fordultak elő. Az ő megfigyelései alapján a fa törési folyamata a következő: tengelyirányú vonalak, elcsúszási vonalak, elcsúszási síkok, a szomszédos sejtek elválása, sejtfal delaminálódás végül a fellazult sejtek elcsavarodása, eltorzulása, mellyel megkezdődik a makroszkopikusan látható törés.

Keith (1974) meghatározta a repedés keletkezés helyét. Ez a bélsugár-tracheidákat érintő terület, a sugár pereme és az udvaros gödörkék.

Dinwoodie (1974) az elcsúszási síkok keletkezését figyelte meg a sejt tengelyéhez képest ugyanolyan szögben ( $60^\circ$ ) mint az S2 mikro-fibrillái. Hoffmeyer (1989) azt állította, hogy az elcsúszási síkok a felhalmozódott tönkremenetel mértékadó jellemzői. Erős korrelációt állapított meg az elcsúszási síkok száma és a terhelési szint valamint a terhelés időtartama között. (Hoffmeyer 1993).

Plasztikus hatások, mint nedvességtartalom és hőmérséklet vagy kemikáliák a fával kölcsönhatásba lépve, erősen befolyásolják a törési jelenségeket. Wilkes (1987) különböző törési jelenséget tapasztalt magas és alacsony nedvességtartalom mellett és összefoglalta a sejtfalban általuk okozott változásokat. A rosttelítettségi pont alatt a sejtfal törési felülete inkább szilánkos mint felette, ahol a törési felület inkább sima egy kevés defibrillációval. Hasonló jelenséget tapasztaltak alacsony és magas hőmérséklet esetén is.

Akande (1990) simább törési felületet figyelt meg gombafertőzés esetén.

### **A fent leírt kutatásokból levonható következtetések:**

- A fa törési jelenségei mikroszkopikus szinten jellemezhetők ugyanazon tényezőkkel, melyek a tömörfa viselkedését írják le.
- Az időfüggő jelenségek mint kúszás és a terhelési tartam az ultra-strukturális szinten kezdődnek és a csúszási síkok megjelenéséhez vezetnek.
- A fa teljes tönkremenetele akkor lesz mérhető a makro szinten, ha a sejtek és szövetek elkezdnek károsodni.
- A fa anatómiai ismereteken alapuló repedés kezdetét és terjedését megadó módszerek még nem állnak rendelkezésre.

Fontos volt továbbá az a felismerés, hogy a faanyag mechanikai jellemzői a nedvesség-tartalom növekedésével - az abszolút száraztól a nedves állapotig – folyamatosan, de azonos törvényszerűség szerint változnak, feltéve, hogy a tömör faanyag nem valamilyen diszpergált tartományok összessége (pl.: forgácslap) (James, W. L. 1961). Ez a felismerés lehetővé tette az elektron-mikroszkóppal és fénymikroszkóppal készült vizsgálatok összehasonlítását, hiszen EM méréseknél abszolút szárazra kell szárítani a próbatestet. A következőkben tekintsük át az egyes egyszerű igénybevételek hatására bekövetkező mikro-szintű tönkremeneteleket, melyeket AE-val is vizsgáltam. A leíráshoz tartozó elektronmikroszkópos felvételek az VI-VIII. számú mellékletekben találhatók.

#### **VII.5.1. Rostokkal párhuzamos húzás**

##### **Cote & Hanna (1983)**

A keményfák húzó igénybevétel hatására létrejött tönkremenetele egy nagyon összetett tönkremeneteli felületet eredményez (VI/1. kép). Általános szabályként elmondhatjuk, hogy sejtfalon átmenő tönkremenetel jön létre, mely követi az S2 fibrillák szögét azokban a sejtekben ahol S2 réteg vastag. Ez az úgynevezett „lecsavarodási jelenség” valószínűleg a mikro-fibrillák közti megcsúszás eredménye (VI/2., VI/3. kép). Ugyanakkor ugyanazon sejtfalon belüli tönkremenetel is létrejött S1-ben, mely lehetővé teszi a rost magjának kihúzódását (VI/2., VI/3. kép). Ellenben a csökkent S2 falvastagságú sejtekben egy szaggatott sejtfalon átmenő típusú tönkremenetel jött létre (VI/4. kép). Volt sok olyan sejt, ahol vastag S2 esetén is szaggatott sejten átmenő törés jött létre (VI/3. kép) és volt olyan vékony S2-jű ahol tönkremenetel követi S2 fibrillaszögét (VI/1. kép).

A tönkremeneteli mód a vizsgált puhafában meglepően hasonló a kemény fákhoz. A vastag falú késői pászta sejtfalon átmenő repedéssel mennek tönkre, mely követi S2 mikro-fibrilláris orientációját. A korai fa tracheidáiban, melyek vékonyfalúak és gödörkével tagoltak a határfelületeken szaggatott vonalú sejten átmenő tönkremenetel jellemzi. A törési zóna és a gödröcskék elhelyezkedése az összetett sejtfalban ellentmondásmentes kapcsolatban volt. A feszültségkoncentráció mindig követte a gödörke szélét vagy gyűrűjét mintsem keresztezte azt. A VI/5. kép mutat erre példákat. Vastag falú sejtek átmenő repedéssel mentek tönkre néhány esetben (VI/6. kép). Más esetben a késői pászta az S2 réteg kihúzódik S1-ből és lecsavarodik terjedő repedésként. A VI/7. képen a lecsavarodási jelenség sokkal szembetűnőbb mint keményfáknál a kevésbé összetett sejtfalszerkezet miatt.

Mivel gyakorlatilag minden hossz irányban rendeződött elem tracheida, a tönkremenetel ismétlődő módja sokkal jobban megfigyelhető.

### **Bariska (1996)**

Rostokkal párhuzamos húzás esetén, két törési típust figyeltek meg:

1. A sejtek tengelyével párhuzamosan futó sejtközi kötéseket transzverzális törések követnek egy vagy több sejten áthaladva a próbatestben véletlenszerűen szétszórva jelennek meg ezen tönkremenetek. Majd ezek növekednek és véletlenszerűen megközelítik egymást és végül kialakul a törési vonal, mely a nagy feszültség koncentrációjú zónák kialakulását idézi elő. A mikro-repedések csak ott fejlődnek ahol a feszültség meghaladja a helyi szilárdságot. A mikro-repedések szétszórta teszik a helyi feszültségcsúcsokat, ezzel azt eredményezve, hogy magasabb feszültség szinten a megmaradt még tönkre nem ment szövetekre terhelődnek és hasonló tönkremenetelt okoznak. Ez magyarázza a kezdeti tönkremenetel véletlen megjelenését a próbatestben. Erre a jelenségre utaltam a Kaiser effektus vizsgálatoknál. (VI. fejezet)
2. Általában a húzási törés a sejtek közötti nyírási jellegű elválással kezdődik, amit sejtfaon átmenő törés követ. A nyírási ill. sejtfaon átmenő törések gyakorisága a fafajtól és a próbatest fajsúlyától függ. Például az akác és a rapanea hasonló rosthosszúságú, de eltérő fajsúlyuk jelentős különbséghez vezet a törési felületben. Kis sűrűségű akác ( $660 \text{ kg/m}^3$ ) sokkal inkább simább törési felületet mutat, míg rapanea magasabb sűrűsége miatt ( $760 \text{ kg/m}^3$ ) egy szálkás törési felületet eredményez.

A kezdeti mikro-tönkremenetek semmiképpen sem határosak a végső törési zónával. Ezek inkább az egész igénybevett térfogatban szétszórta helyezkednek el. Ha a próbatestben nincs szembetűnő szerkezeti inhomogenitás, a törés véletlenszerűen oszlik el és próbatest mint egész károsodik. Ez a tény azt sugallja, hogy a fa tönkremeneteli feszültségének számításához használt erő keresztmetszet kapcsolat nem kielégítő. Így matematikai modellt kell találni, mely figyelembe veszi az igénybevett térfogatot a feszültség kiértékelésében, legalább homogén próbatestekre.

### **Zimmermann (1994)**

A fa húzószilárdságának szempontjából az S2 rétegek törése a mértékadó, hiszen az összetett sejtfaon tönkremenetelig – jelentős vastagsága és közel rostirányú fibrillalefutása miatt – ez a réteg veszi fel a terhelést döntő mértékben és ezáltal a többi kisebb szilárdságú sejtfaonréteget tehermentesíti. Az S2 réteg törése a sejt tengelyére merőlegesen következik be úgy, hogy az egyes cellulóz-fibrillák ill. fibrillakötegek interfibrilláris töréssel az egyes fibrillák egymástól való elnyíródásával mennek tönkre, az addig egységes mátrix tönkremenetelének következtében.

## **VII.5.2. Rostokkal párhuzamos nyomás**

### **Cote & Hanna (1983)**

A nyomó igénybevétellel terhelt keményfán jól behatárolható és látható alakváltozási törések jelennek meg. A tangenciális oldalon a meghibásodott területen a tönkremenetel vonala  $45\text{-}60^\circ$ -ot zár be a rostiránnyal (VII/1.bal kép). A tönkremenetel vonala a bélsugar és rost határfelületen kialakult szétválás eredménye (VII/1.bal és jobb kép). A szétválás a közép lamella mentén történik (VII/1b.,VII/2.képen). Ha nyírófeszültségek is kísérik ezen alakváltozásokat és sejtfaon belüli tönkremenetelt okoznak akkor ez az S1 és S2 réteg között jön létre (VII/1j., VII/3. kép). A rostok makroszkopikus deformációját (VII/1.b., VII/3. kép) a sejtfaon pillanatnyi deformációja előzi meg (VII/2., VII/4. kép). Az VII/2.képen a sejtfaon

belüli alakváltozás vagy az elcsúszó síkok jól láthatók. A gyűrűs- és szórt likacsú fafajok tönkremenetelében nem adódott jellemző különbség. A legjellemzőbb tönkremeneteli forma rostokkal párhuzamos nyomás esetén a bélsugár és rost határfelületeken létrejött elválás. A meglehetősen egyszerű anatómiájú fenyők esetén a tönkremenetel vonala nagyban eltér a keményfákétól, ahol a sokféle sejttípus együttesen határozza meg az alakváltozást. A kis nagyítású VII/5. képen az alakváltozásos tönkremenetel a déli fenyő esetén jellegzetesen szembetűnő. A károsodás vonala 45-60°-os szöget zár be a hossz tengellyel, ez jól látható a VII/6. képen mely 700x-os nagyítású. Utóbb említett képen a deformációs tönkremenetel dominó-effektusa jól megfigyelhető az összenyomott és hullámossá vált sejtfalakon. Ugyanezen nagyításnál az összetett sejtfalak (két szomszédos tracheida fal a középlemezzel) (VII/7. kép) kis repedést mutatnak, de van egy figyelemre méltó sejten belüli tönkremenetel is.

### VII.5.3. Nyírás

#### Cote & Hanna (1983)

Ha keményfákat vizsgálunk nyírásra azt találjuk, hogy meglehetősen hasonlóan viselkednek radiális és tangenciális nyírás esetén. A viszonylag nagy fajsúlyú mintákban az S2 sejtfalréteg mikro-fibrillái veszik fel a nyíró feszültséget orientációjukból adódóan. Ennek következtében az S1/S2 réteg mentén jön létre a tönkremenetel mindkét esetben. Például a VIII/1. képen hikori mintát mutat tangenciális teszt esetén. Az S1 réteg törése többé-kevésbé horizontális irányban szakad el S2-től, melynek fibrilláris orientációja 60-70°-os szöget zár be a horizontálissal. Kisebb fajsúlyú fa esetén, ahol az S2 sejtfalréteg sokkal vékonyabbak, a tönkremenetelre a sejtfalon átmenő repedések a jellemzők. Ha makroszkopikus szinten nézzük a törés vonala a legkisebb ellenállású területeken halad át. Radiális nyírásnál ez a sík a bélsugarak síkjára. A VIII/2. képen vörös tölgy radiális nyírása látható a törés lépcsőzetes módon halad az A bélsugárból B-be, majd C-be.

Az edények nem gyakorolnak számottevő befolyást a törésre, mivel a leggyengébb síkok a bélsugarak síkjai. Tangenciális nyíró minták esetén a leggyengébb tartomány a korai pászta a gyűrűs-likacsú keményfák esetén. A törés átmege az edényeken (VIII/3.kép) és a bélsugár sejteken, kis nyírási ellenállást kiváltva a részek szétválasztása által. A rostok sejtfalon belüli tönkremenetelt mutatnak.

A déli sárga fenyő ugyanolyan jellegzetességeket mutat a rosttal párhuzamos nyírás esetén, mint a keményfák. VIII/5. kép egy sztereo pár felvétel a törési felület három dimenziós voltának szemléltetésére adott esetben. A korai pásztában (E) átmenő törést látunk megfelelően a csökkent S2 falvastagságnak. A késői pászta sejtfalközi tönkremenetelt mutat az S1/S2 határfelületen. Az LA területen az A bélsugár felett a megmaradt S1 látható míg B alatt az S2 törési felülete jelenik meg egymást kölcsönösen kiegészítve.

Amint a keményfáknál a bélsugarak határozzák meg a tönkremenetel síkját radiális nyírás esetén az A bélsugár a késői pászta jellemző faktora míg B a korai fa leggyengébb tartományát adja. Tangenciális nyírás esetén a törési sík általában a korai fában volt és sejtfalon átmenő repedéssel jött létre. Néhány sejten az S1/S2 mentén jött létre szétválás mely az S2 S3 réteg lehámozódását eredményezte VIII/4. kép.

Összefoglalásképpen elmondhatjuk, hogy függetlenül az alkalmazott igénybevételtől a fa törése mikroszkopikus szinten két módból tevődik össze: Először is mindig fellép valamilyen nyírási, húzási és nyomási tönkremenetel, melyek valószínűleg sorban lépnek fel egy adott helyen. Másodszor a törési tartomány mindig hossz- és keresztirányban tört sejteket tartalmaz a fa anizotróp szerkezetének megfelelően (VI/8. kép).

## VII.6. Összefoglalás

A faanyag tönkremenetelével kapcsolatos eddigi szakirodalmi megállapításokat a következőkben foglalhatjuk össze:

- A faanyag mechanikai jellemzői a nedvességtartalom növekedésével- az abszolút száraztól a nedves állapotig – folyamatosan, de azonos törvényszerűség szerint változnak, feltéve, hogy a tömör faanyag nem valamilyen diszpergált tartományok összessége (pl.: forgácslap). Ez a felismerés lehetővé tette az elektron-mikroszkóppal és fénymikroszkóppal készült vizsgálatok összehasonlítását.
- Makroszkopikus szinten a faanyag tönkremenetele plasztikusnak tűnhet.
- A tönkremenetel valószínűleg a biológiai szerkezet alatti vagy makro-molekuláris szinten indul el.
- A tönkremenetel egy többfokozatú folyamat és nem lehet valamilyen egységes törésmódra korlátozni. Nyírás, kihajlás és sejtfalrepedések vegyesen figyelhetők meg.
- A törési mód a fafaj anatómiai szerveződésétől és a feszültség jellegétől erősen függ.
- A tönkremenetel megindulása a légszáraz/száraz faanyagban mikroszkopikus szinten rideg jellegű.
- A repedés keletkezhet a próbatest különböző pontjaiban, a repedések véletlenszerűen növekednek egymás irányába.
- A határfeszültség jobban függ a terhelt térfogattól mint a próbatest keresztmetszet területének nagyságától.
- A törési módok mindig keverték.
- Függetlenül a terhelés jellegétől a domináns tönkremeneteli forma nyírás.
- A próbatest anatómiai szerkezetének befolyása van a repedés megindulására és a törés módjára.
- A repedés terjedése a sejtekben és szövetekben általában lépcsőzetes.

Általában tehát elmondhatjuk, hogy a faanyag törése mikroszkopikus szinten rideg, azaz a sejtek és szövetek rugalmas deformációját hirtelen törés követi. A faanyag ezen rideg viselkedése azonban a teljes méretű próbatestek szokásos alakváltozási diagramjaiból általában nem állapítható meg. A standart vizsgálatoknál a faanyag alakváltozási görbéi magasabb terhelési értékeknél az egyenestől egyre nagyobb eltérést mutatnak a tönkremenetelt megelőző plasztikus folyásra utalva. A mikroszkopikus metszet méretű és teljes méretű próbatesteken végzett, látszólag ellentmondó megfigyelések a következő magyarázattal oldhatók fel: a törési folyamatokról készült videofelvételeken a gyűrődések, sejtfal elválások, sejt elkülönülések általában hirtelen tűnnek fel. Ezek a hirtelen megjelenő rideg repedések a térben és időben véletlenszerűen következnek be. A repedések az időben összeadódnak, létrehozva az alakváltozási diagrammon a látszólagos plasztikus szakaszt. A kezdeti mikro-repedések mégsem korlátozódnak a végső tönkremeneteli területre, hanem a próbatest egész terhelt térfogatában szétszórva jelennek meg. Ha az anyag nem mutat valamilyen szabályos szerkezeti anizotrópiát a repedések véletlenszerűen oszlanak meg és a próbatest mint egységes egész megy tönkre. Ennek az a gyakorlati következménye, hogy a faanyag határfeszültség számításánál a szokásos összefüggés a teher és keresztmetszet terület között nem áll fenn. Ennek megfelelően matematikai módszereket kellene találni a terhelt térfogat figyelembevételére.

**A szakirodalom alapján levonható következtetések szerint faanyag jellemzően rideg anyagként viselkedik mikroszkopikus szinten. A kapott AE események tehát rideg jellegű mikro-tönkremeneteli folyamatokból származnak, melyek az EM vizsgálatok tanúsága szerint dominánsan rideg nyírási törések formájában jönnek létre.**

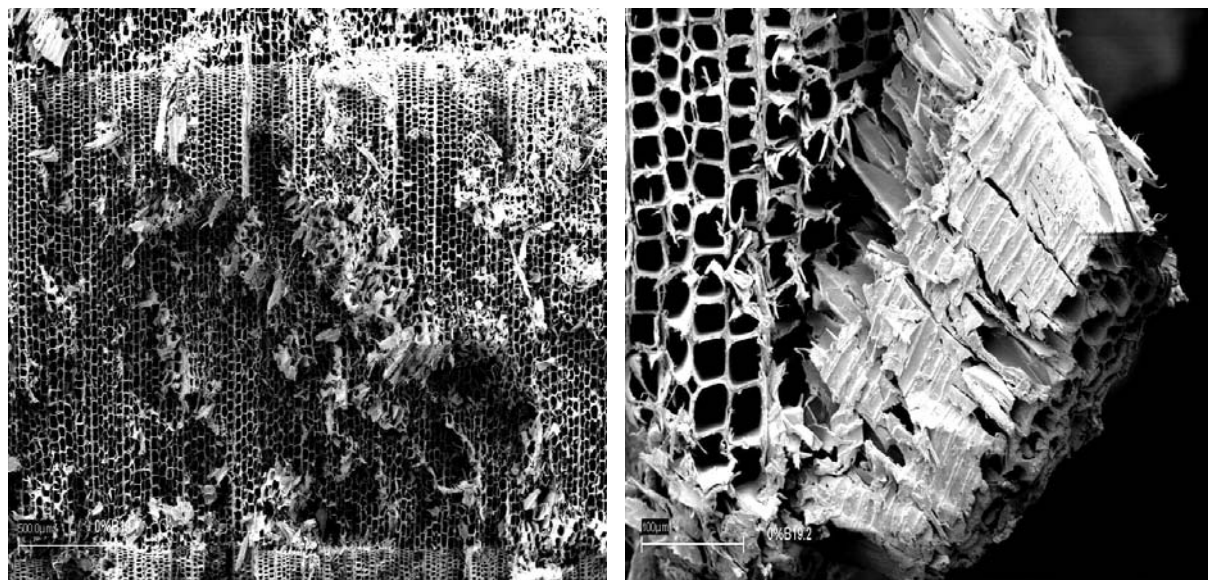
### VII.7. A faanyag mikro-tönkremeneteli folyamatainak összefüggései a faanyag nedvességtartalmával

Az előző fejezetben áttekintettük a szakirodalom alapján a faanyag mikro-tönkremeneteli folyamatait. Megállapítottuk, hogy a faanyag tönkremenetelének legjellemzőbb módja a rideg nyírási törés. A leírt megállapításokat abszolút száraz faanyag törési viselkedése alapján mondták ki. Figyelembe véve azt a felismerést, hogy a faanyag tulajdonságai folyamatosan, de nem alapvetően változnak, a leírt eredmények vonatkoztathatók nedves faanyagra is. Jelen fejezet célja éppen az, hogy a rideg nyírási törés domináns jellegét vizsgáljuk magasabb nedvességtartalmi értékek mellett létrejött törési folyamatok esetén. A Zürichi ETH-n végzett közös kutatások során lehetőség nyílt arra, hogy a különböző nedvességtartalom mellett eltört próbatestek valamint a már tárgyalt öt fafaj törési felületeiről elektronmikroszkópos felvételeket készítsünk. Ezek vizsgálata egyrészt választ adhat a törési jelleg nedvességtartalomtól való függésére, másrészt ennek tükrében értékes következtetéseket vonhatunk le a faanyag AE-s viselkedésében bekövetkező változásokra vonatkozóan.

A vizsgálatok során minden mérési sorozatból két-két próbatest törési felületét vizsgáltuk.

A jellemző törési mód lucfenyő esetén a szakadás jellegű törés és az elnyíródás jellegű törés volt mind a három - már említett- nedvességtartalmi osztályban (VII.3.1.fejezet. VII.7.a, c ábra). Ennek megfelelően egy szakadásos és egy elnyíródás jellegű mintát vizsgáltunk minden sorozat esetén. A törés után a mintákat természetesen ki kellett szárítani, ez azonban nem változtatja meg a törési felület jellegét, így a sajátságok megmaradnak és összevethetők az abszolút száraz anyagra jellemző törési felülettel.

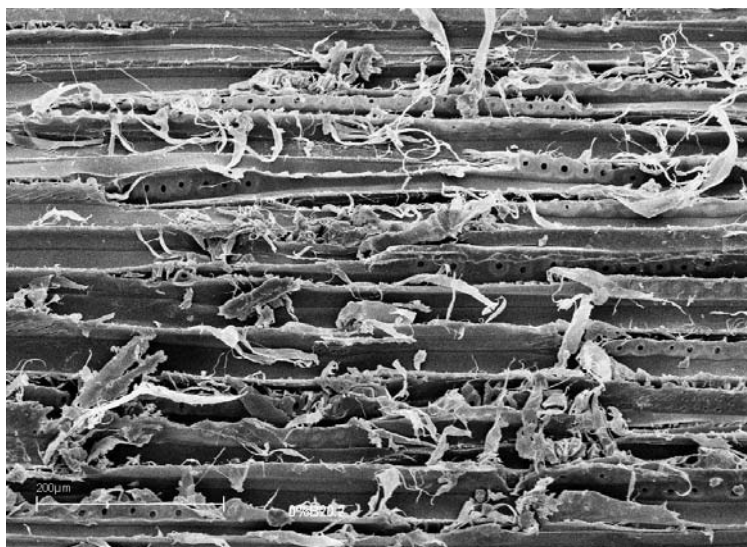
Elsőként tekintsük át a lucfenyő vizsgált három- 0%, 12%, 26%- nedvességtartalmi értékek mellett létrejött törési felületeinek EM felvételeit. (VII.13-18 ábra)(ld. még IX. melléklet)



VII.13.ábra 0% nedvességtartalmú lucfenyő próbatest szakadás jellegű törési felületének felvételei húzás során

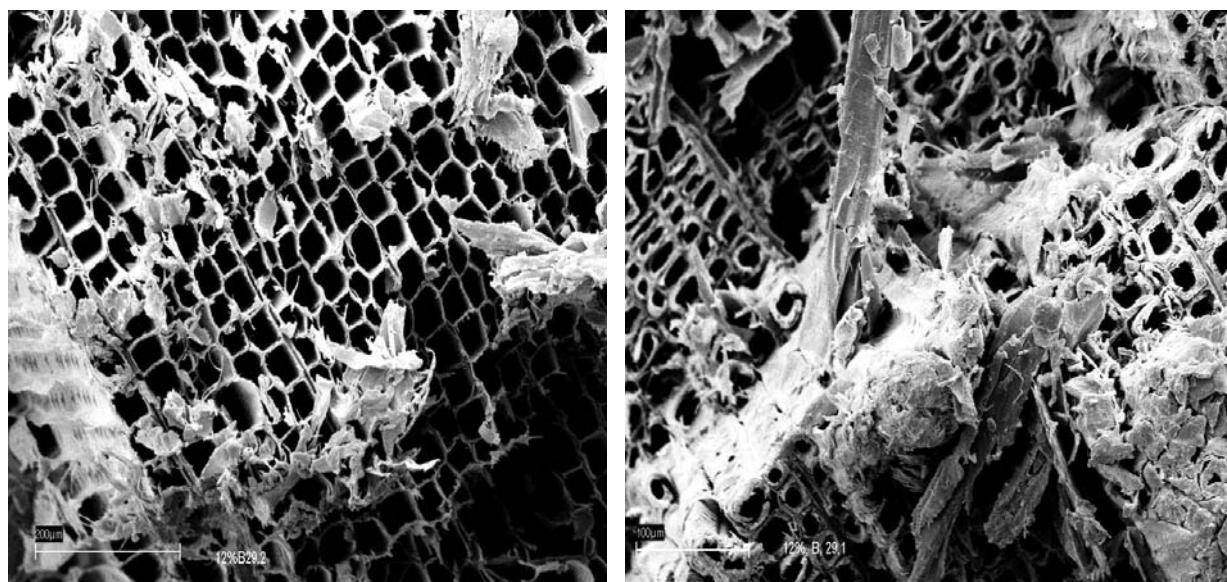
A baloldali képen egy átnézeti képet látunk, melyen megfigyelhetjük, hogy szakadás jellegű törés esetén a sejtfalak nagy része ridegen törik, míg egyes részeken kihúzóadásos szakadást találunk. Ezt részletesen a jobb oldali kép mutatja. Itt megfigyelhetjük a szakadásos töréssel együtt jelenlévő nyírási törést is a kihúzóadott rész oldalfelületén.

Az elnyíródás a bélsugár parenchimák mentén jött létre, mely tönkremenetel szempontjából kritikus keresztmetszetnek tekinthető.



VII.14. ábra 0% nedvességtartalom mellett létrejött nyírási jellegű tönkremenetel törési felülete húzás során

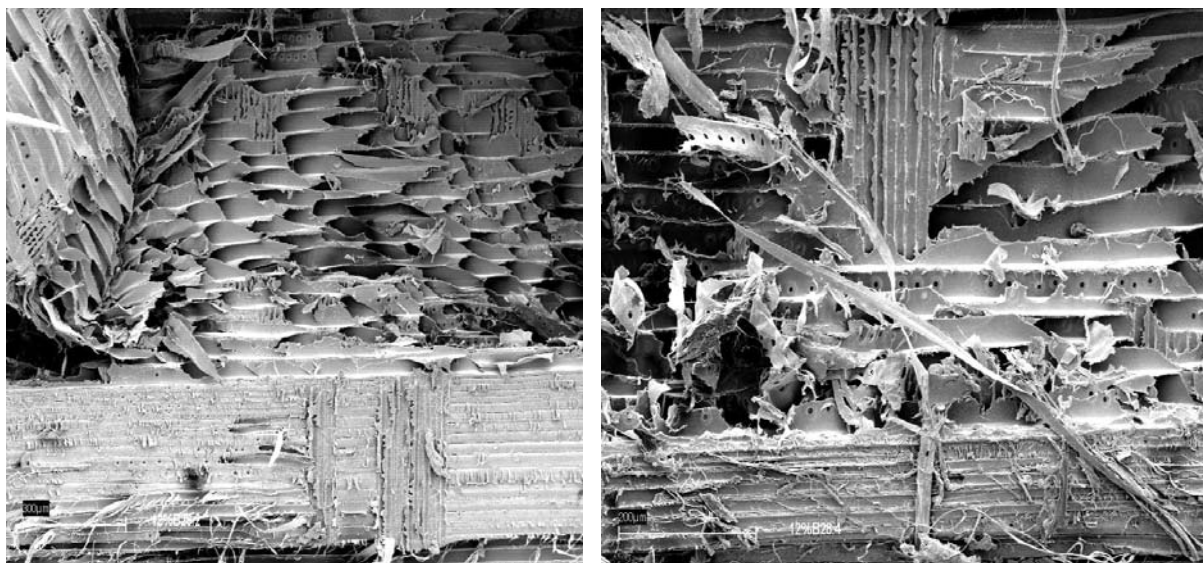
Ha a tönkremenetel nyírási jellegű, akkor a törés a vékonyfalú korai pászta tracheidák hosszirányú elnyíródását eredményezi, míg a késői pászta vastagabb falú tracheidáinál az elnyíródás együtt jár a sejtfal S2 rétegének kihúzódásával is. Az udvaros gödörkék nem nyíródnak el, az elnyíródás vonala a gödörkéket megkerüli (VII.14.ábra).



VII.15. ábra 12% nedvességtartalom mellett létrejött szakadásos jellegű törési felület húzás során

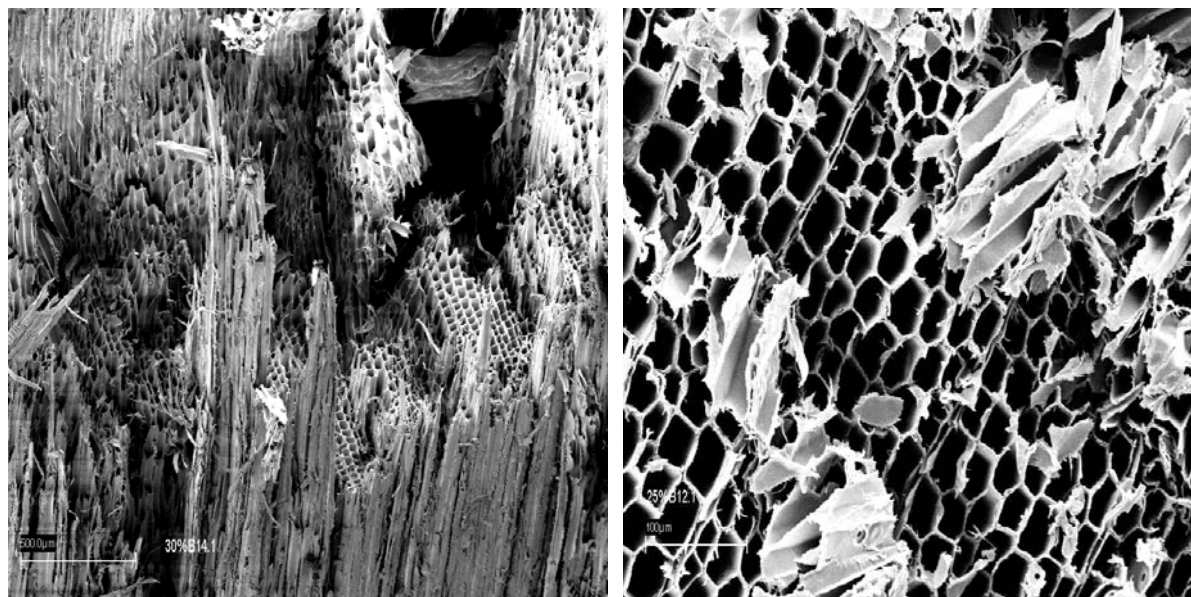
12% nedvességtartalom mellett létrejött szakadásos jellegű törési felület nagymértékben hasonló az abszolút száraz lucfenyő törési felületéhez. A sejtek nagy része sejtfalon átmenő rideg jellegű töréssel ment tönkre, míg helyenként tracheidakötegek kihúzódását figyelhetjük meg. Ezek oldalfelületein nyírási tönkremenetel következett be. A nedvességtartalom növekedése nem okozott tehát változást a szakadásos jellegű törési felületen (VII.15.ábra).





VII.16. ábra 12% nedvességtartalom mellett létrejött nyírási jellegű törési felület húzás során

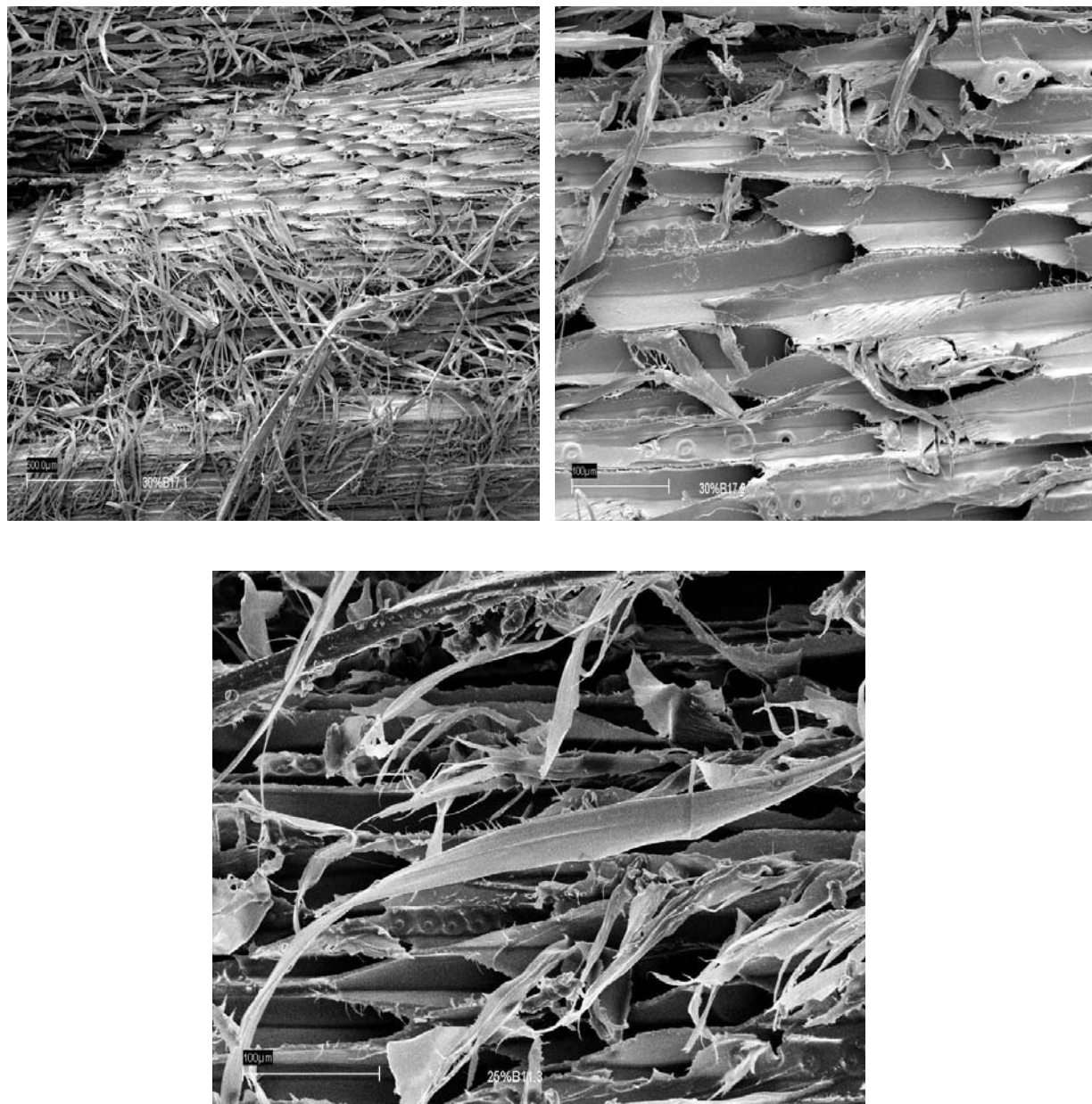
12% nedvességtartalom mellett kialakuló nyírási törés esetén a lucfenyő tracheidái hosszirányban az egész sejtfal elnyíródásával mennek tönkre. Ugyanakkor egyes tracheidák S2 rétegének kihúzódása is megfigyelhető. A nyírási síkba eső bélsugárparenchimák szintén nyírási tönkremenetelt szenvednek (VII.16. ábra).



VII.17. ábra 26% nedvességtartalmú lucfenyő minták szakadásos jellegű törési felülete húzás során

A rosttelítettségi nedvességtartalom mellett létrejött szakadásos törési felület képei nem különböznek a másik két nedvességi osztályban létrejött törési felületektől. A baloldali kép jól mutatja a szakirodalomban is említett lépcsőzetes törési módot (Bariska 1996). A jobboldali kép az eddigiekhez hasonlóan sejtfaon átmenő rideg töréssel tönkrement sejtfaonakat mutat

zömében. Ugyanakkor egyes tracheidák ill. tracheidakötegek kihúzódása is megfigyelhető. (VII.17. ábra) Ezek száma nem változik jelentős mértékben a 0% nedvességtartalmi osztályban megfigyelhető kihúzódás számától. A kihúzódott részek nyírási és szakadási törés kombinációjával mennek tönkre. Nézzük meg a lucfenyő nyírási jellegű törési képét a továbbiakban (VII.18. ábra).



VII.18. ábra 26% nedvességtartalmú lucfenyő nyírási jellegű törési képe húzóvizsgálat során

Az első kép egy átnézeti felvétel a létrejött törési felületről. A képen két különböző törési jelleget figyelhetünk meg, amit két további részlet kép jelenít meg. Az első részleten az eddigiekhez hasonló nyírási tönkremenetelt tapasztalunk, mely a tracheidák hossztengegyével közel párhuzamosan okoz elnyíródást. A második részletkép az S2 rétegek nagyszámban létrejött kihúzódását mutatja a törési felületen. Rosttelítettség közelében más minták esetében is megfigyelhető a sejtfalon belüli tönkremenetel ezen módjának domináns jellege.

A nedvességtartalom tönkremeneteli folyamatokra gyakorolt hatását saját vizsgálataim alapján a következőkben foglalhatjuk össze:

- a jellemző törési mód lucfenyőnél a szakadási és a nyírási jellegű rideg törés.
- abszolút száraz lucfenyő minták sejtfalai részben a sejt falon átmenő szakadásos rideg töréssel mennek tönkre, míg egyes tracheidakötegek kihúzódnak, ezek oldalán nyírási jellegű törés jön létre.
- abszolút száraz minták nyírási jellegű tönkremenetele esetén a tracheidák hossz tengelyük mentén nyíródnak el, ez esetenként együtt jár az S2 sejt falrétegek kihúzódásával is.
- 12% nedvességtartalom mellett a törési felület jellege- így feltehetően a törési folyamat- nem változik jelentősen. A szakadásos törési felületen szakadás és kihúzódás vegyesen fordul elő, míg elnyíródáskor a hosszirányú elnyíródás és S2 rétegek kihúzódása a jellemző.
- 26% nedvességtartalom mellett a szakadás jellegű törési felület nem mutat más nedvességtartalmú mintákhoz képest változást. Sejt falon átmenő törések és a kihúzódtott részek szakadási és nyírási tönkremenetele hasonló képet ad. Nyírási jellegű tönkremeneteli felületen a tracheidák elnyíródása mellett az eddigiekhez képes nagy számban jelentkezik az S2 sejt falrétegek kihúzódása. Nagy nedvességtartalom esetén tehát a nyírási jellegű törés mellett a sejt falon belüli tönkremenetel is számottevő.

**A törési felületek vizsgálata tehát alátámasztja a szakirodalmi megállapításokat miszerint a faanyag törése rideg jellegű. A vizsgálatok alapján az abszolút száraz faanyagra vonatkoztatott megállapításokat kiterjeszthetjük a nagyobb nedvességtartalmú mintákra is. Sikeresen tehát alátámasztani - a mikro-tönkremeneteli folyamatokra vonatkozóan - azt a feltevést miszerint a nedvességtartalom növekedésével a faanyag tulajdonságai folyamatosan, de nem alapvetően változnak (James, W.L. 1961). A nedvességtartalom növekedése tehát alapvetően nem változtatja meg a faanyag mikro-tönkremeneteli folyamatainak jellegét, a faanyag rideg módon törik.**

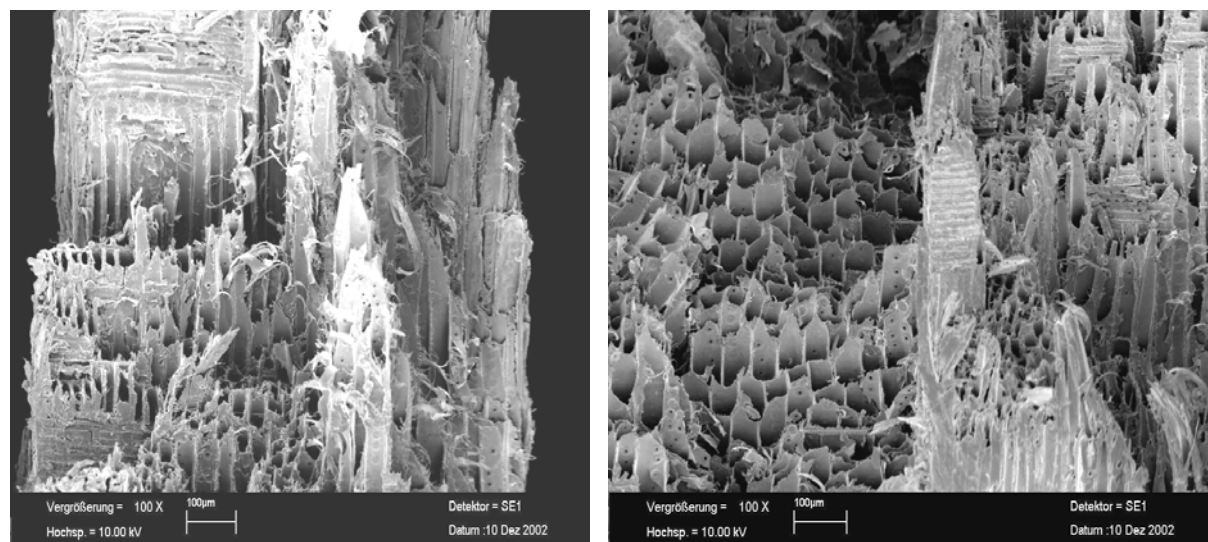
**A nedvességtartalom befolyása nagy nedvességtartalmú minták esetén számottevő csupán, ahol a sejt falon belüli tönkremenetel részaránya megnő a rideg jellegű szakadások és elnyíródások mellett.**

**Az AE vizsgálatok során kapott események tehát elsősorban a fenn leírt rideg jellegű szakadásokból és nyírási tönkremenetelekből származnak. Az EM vizsgálatok alátámasztják a faanyag AE vizsgálatok során tapasztalt rideg jellegű viselkedését, miszerint a tönkremeneteli folyamatok döntően csak a törőterhelés közelében indulnak meg. Bebizonyosodott továbbá az is, hogy a nedvességtartalom nincs döntő befolyással a mikro-tönkremeneteli folyamatokra, amit az AE vizsgálatok során is megállapítottunk.**

### VII.8. A mikro-tönkremeneteli folyamatok jellegzetességei különböző fafajok esetén

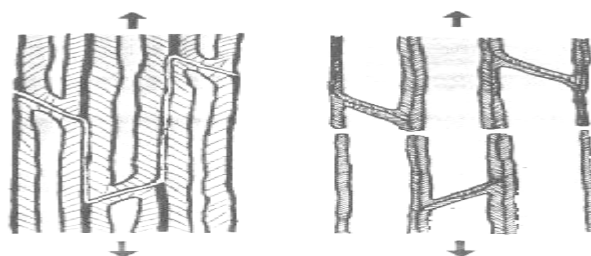
Az előző fejezetben a nedvességtartalom hatását vizsgáltuk a tönkremeneteli felületre és ebből vontunk le következtetéseket a faanyag törési viselkedésére. Megállapítottuk - hogy bár rosttelítettségénél megnő a sejtfalon belüli tönkremenetek száma - a lucfenyő faanyag ridegen törik. Ebben a fejezetben a már tárgyalt öt fafaj esetén tanulmányozzuk a törési felületeket abból a célból, hogy azok jellege ugyancsak rideg törési viselkedést mutat-e. Továbbá az egyes fafajok törési jellegzetességei és az AE viselkedésük során levont következtetéseket vetjük össze. A vizsgált öt fafaj erdeifenyő, nyár, tölgy, bükk és akác volt. A jellemző törési felület erdeifenyő, nyár és bükk esetén a lucfenyőhöz hasonlóan a tompa szakadás és az elnyíródás jellegű törés volt, míg tölgy és akác esetén a tönkremenetel elnyíródás formájában jött létre. Ennek megfelelően az első három esetben mindkét törési formának megfelelő törési felületet vizsgáltuk, míg utóbbiban csak a nyírási jellegű törést. A minták átlagos nedvességtartalma 11 % volt.

Tekintsük át elsőként az erdeifenyő törési felületeit (VII.19. kép)(ld. még IX. melléklet).



VII.19. kép. Az erdeifenyő szakadás jellegű törési képei

Az erdeifenyő szakadásos jellegű törési képe mutatja, hogy a törés lépcsőzetesen (nem egy síkban) alakult ki, ennek megfelelően sejtfalon átmenő rideg jellegű törések illetve az egyes síkok között a tracheidák rideg elnyíródása következett be. A törés lépcsőzetes jellege a korai és késő pásztáknak megfelelő vékony és vastagfalú tracheidák törésének különbözőségében rejlik részben (Bodig 1982.). A vastag falú tracheidák a végeiknél szakadnak el egymástól, míg a vékony falú sejtek sejtfalon átmenő töréssel egy vonal mentén törnek el (VII.20.ábra).



VII.20. ábra A vastag falú (bal kép) és a vékonyfalú (jobb kép) tracheidák leggyakoribb tönkremeneteli módjai húzás során (Bodig 1982.)

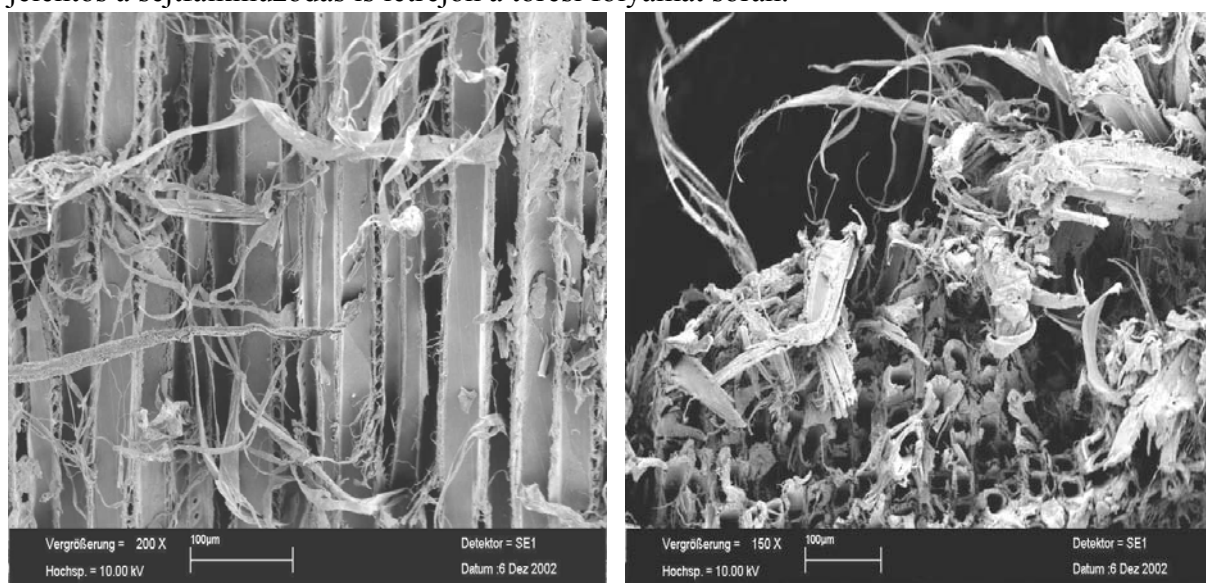
A rostirányú elnyíródás síkja általában a bélsugár-parenchimák síkja mint az a baloldali képen jól látható. A rideg törések mellett megfigyelhető - feltehetően a késő pászta vastag falú sejtjeinek esetében - az S2 sejtfalréteg kihúzódása is.

Nézzük most meg az erdeifenyő elnyíródás jellegű törési képeit (VII.21. kép). A baloldali képen láthatjuk, hogy az elnyíródás a tracheidák hossz tengelye mentén jött létre.

Az erdeifenyőnél nagyobb számban találunk a sejt falon belüli tönkremenetelre utaló sejt falkihúzódásokat. Ez a jelenség hozzájárul az erdeifenyő nagy akusztikus aktivitásához, hiszen a kihúzódások során számos eseményt detektálunk feltehetően.

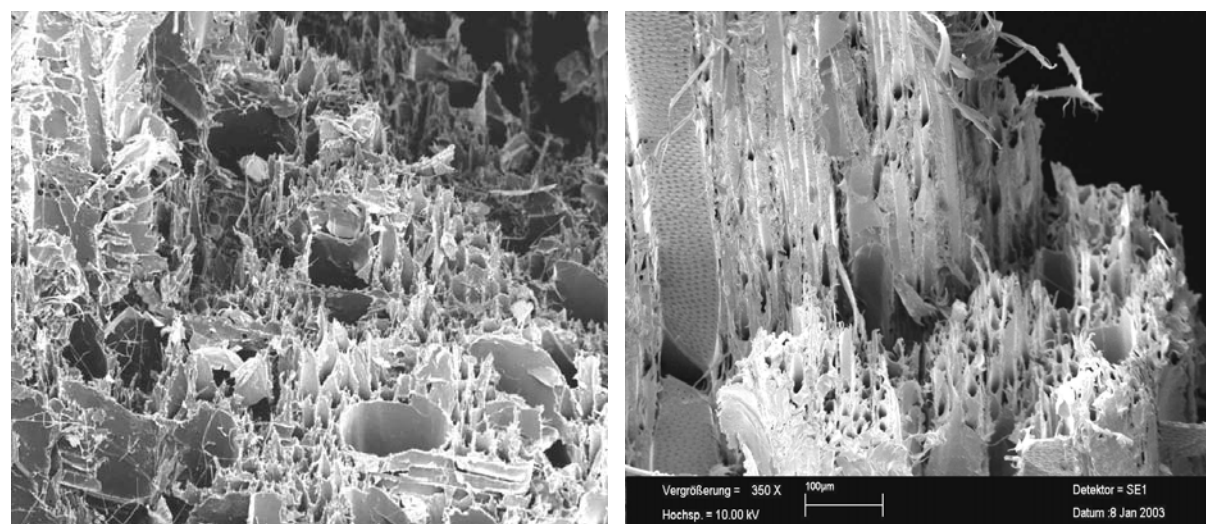
A jobb oldali kép kombinált törési felületet mutat, ahol szakadás, elnyíródott elemek és sejt falréteg kihúzódások egyaránt láthatóak.

Az erdeifenyő törési természetét illetően a törési képek alapján elmondhatjuk, hogy az erdeifenyőre is jellemző a rideg törési jelleg mind szakadás, mind nyírás során, de emellett jelentős a sejt falkihúzódás is létrejön a törési folyamat során.



VII.21. kép Az erdeifenyő elnyíródás jellegű törési felülete

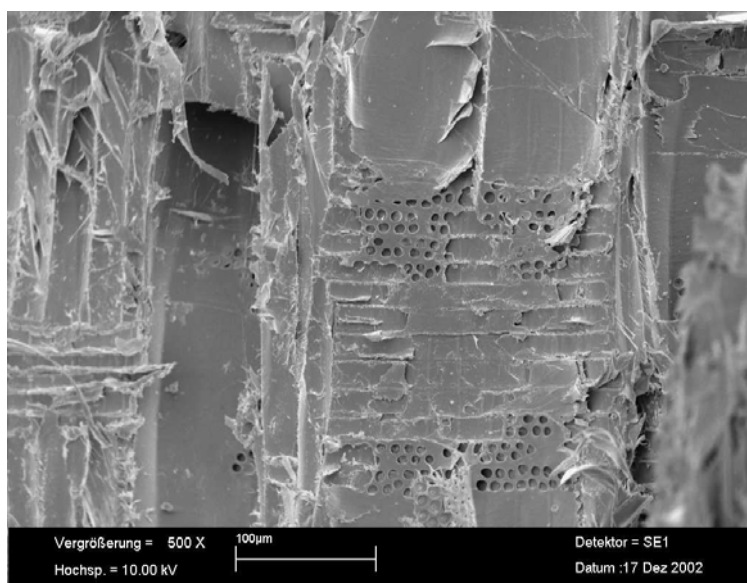
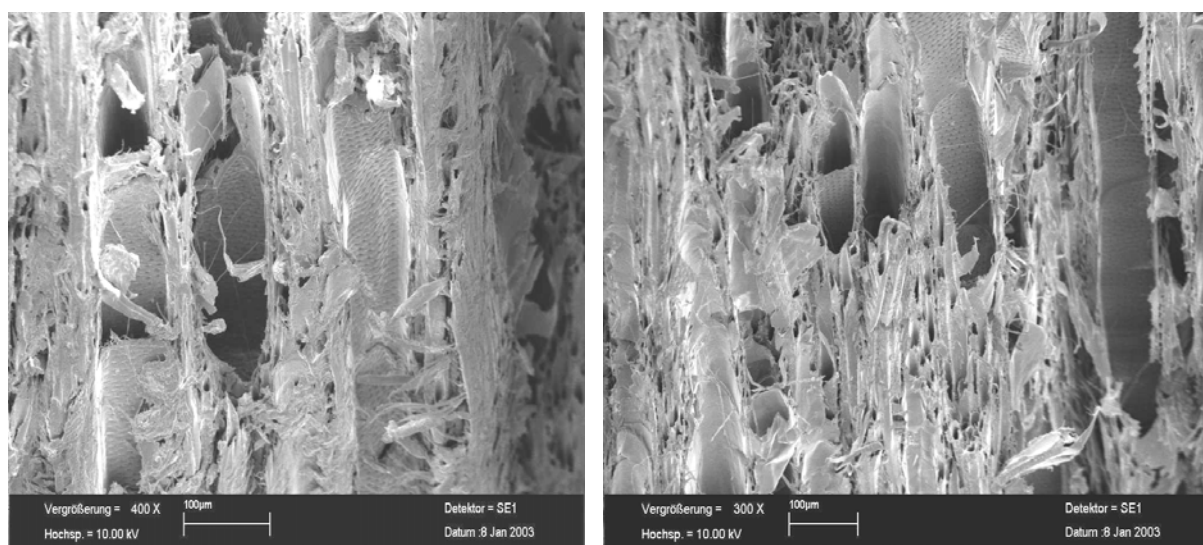
Következőként tekintsük át a nyár törési képeit (VII.22.kép).



VII.22. kép Nyár szakadásos tompa törési felülete

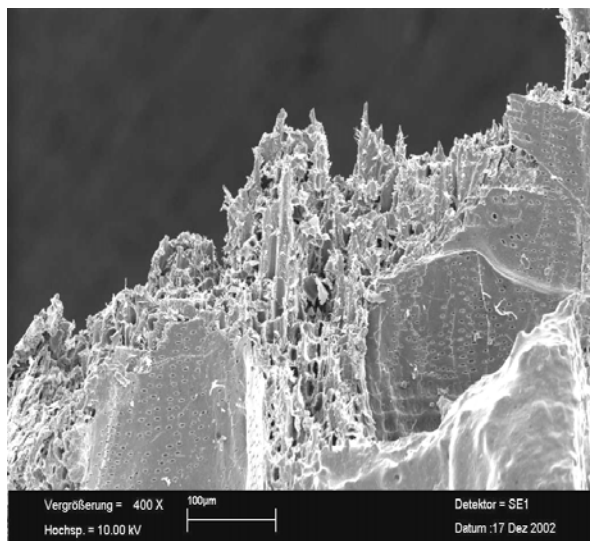
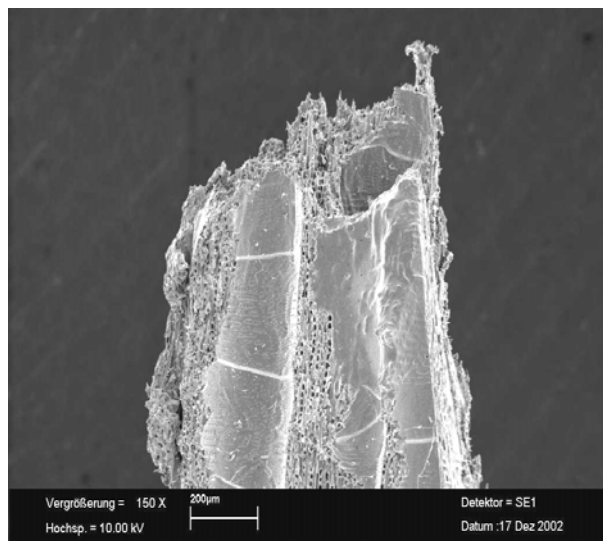
Nyár szakadós törési felületén az eddigiekhez hasonlóan rideg törési felületeket figyelhetünk meg. Mind a rostok, mind a nagy sejtüregű edények sejtfaon átmenő töréssel mennek tönkre. A jobboldali kép bal oldalán nyírás jellegű tönkremenetelt figyelhetünk meg. Nyár esetén nem találunk nagyobb számban sejtfaonkihúzóást. Ennek oka a gyors növekedésű nyár fafaj vékony falú kis szilárdságú sejtfaonfelépítéséből adódhat. Ugyanúgy ahogy ezt a vizsgált tülevelű és lombos fafajok korai pásztáinak törése során a szakirodalom és saját vizsgálatok alapján is leírtuk.

Ha elnyíródás jellegű törés következik be nyár esetén, annak törési felülete szintén rideg jellegűnek mondható (VII.23.kép). Az elnyíródás során mind az edények mind a rostsejtek hossz tengelyükkel közel párhuzamosan sejtfaon átmenő töréssel mennek tönkre. A törési felület rideg jellegét jól mutatja az 500 szoros nagyítású alsó felvétel.

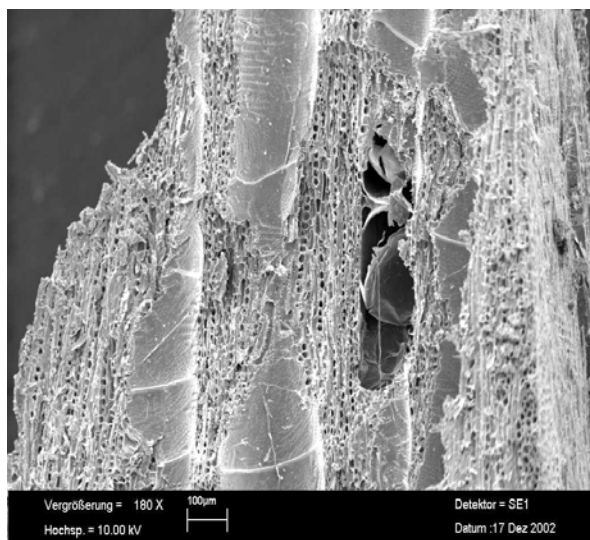
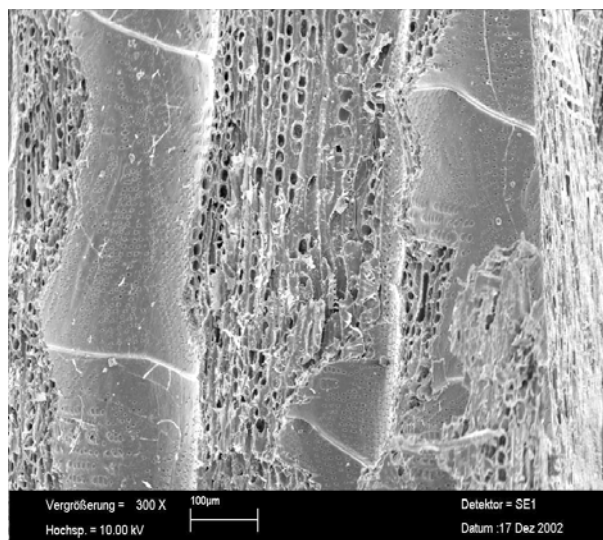


VII.23. kép. Nyár elnyíródás jellegű törési felületei

Vizsgálatainkat folytassuk a tölgy törési képeinek elemzésével (VII.24.,25. kép).



VII.24. kép. Tölgy elnyíródás jellegű törési felületei

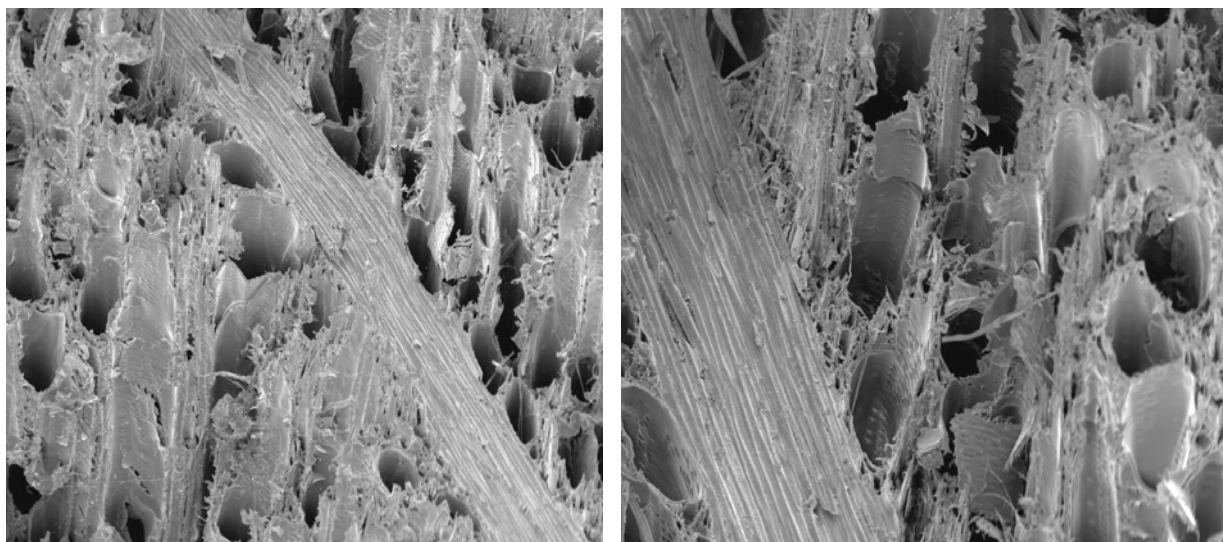


### VII.25. kép. Tölgy elnyíródás jellegű törési felületei

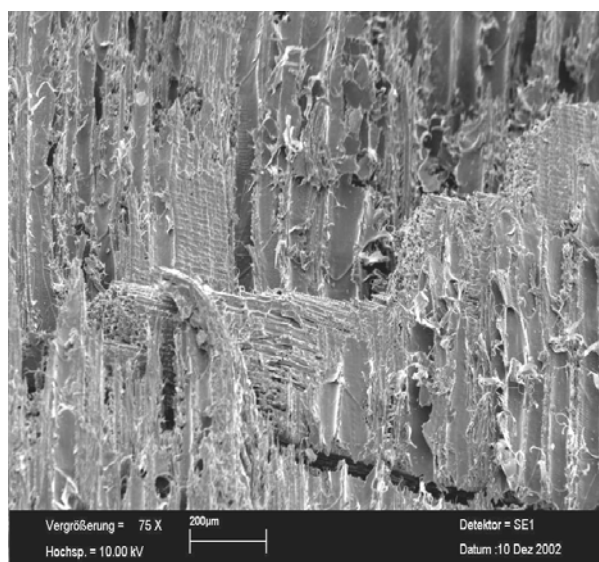
Tölgy esetén csak elnyíródás jellegű törési felületeket kaptunk, a korábban leírt húzópróbatest kialakítás mellett, így ezek bemutatására van lehetőségünk. A fenti két képen látható nyírási felületet részleteiben az alsó két kép jeleníti meg. Ezek szerint a tölgy esetén is fennáll, hogy nyírása során a sejtfaalak ridegen törnek. Ez érvényes a nagy lumenű edényekre éppúgy mint a farostokra és jobb alsó kép közepén látható bélsugárparenchima sejtekre egyaránt. Tölgy esetében sem tapasztalunk sejtfaalak belüli tönkremenetelre utaló sejtfaalkihúzódásokat. A jellemző tönkremeneteli forma tehát a sejtfaalak átmenő rideg nyírási törés.

A továbbiakban tekintsük át a bükk jellemző törési felületeit (VII.26.,27. kép).

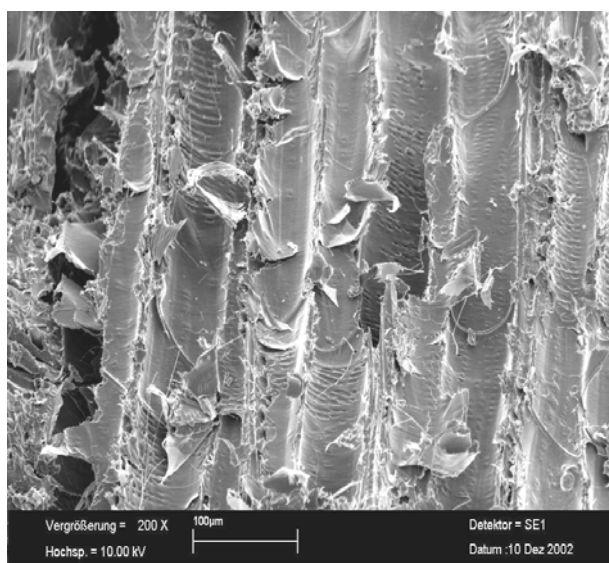
Bükk szakadásos törése esetén a farostok és edények sejtfaalak átmenő töréssel mennek tönkre. A törési felület rideg jellegű. A képen keresztirányban áthúzódó bélsugár a bélsugárparenchimák hossz tengelye mentén létrejött töréssel mennek tönkre. A sejtfaalak belüli tönkremenetelre utaló sejtfaalkihúzódásokat nem találunk a törési felületen.



### VII.26. kép. A bükk szakadásos tompa törési felülete





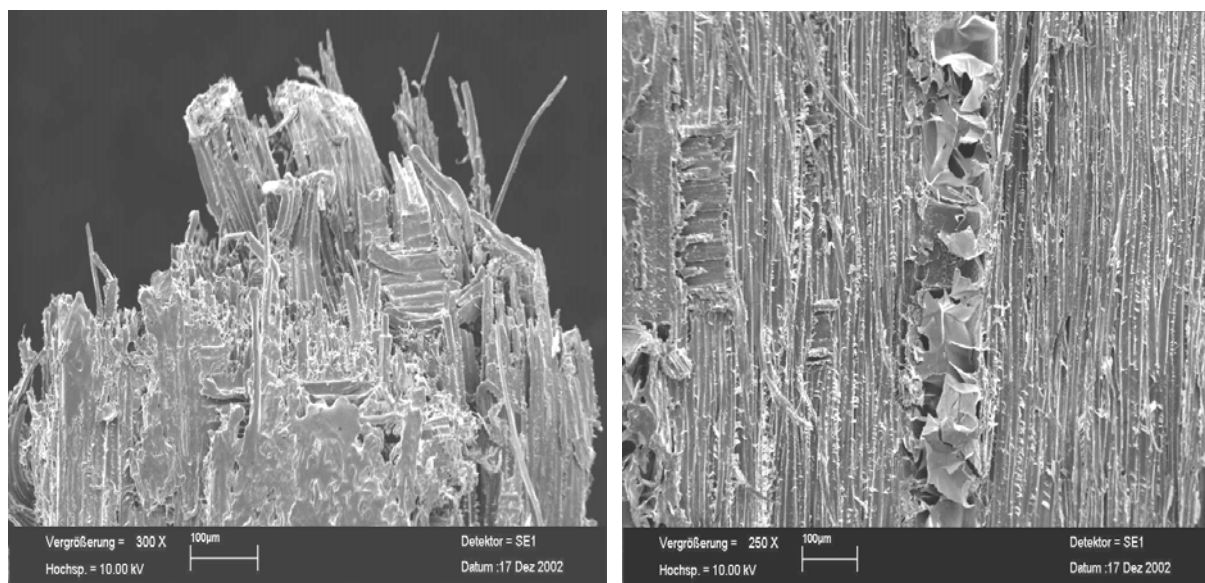


VII.27. kép. A bükk elnyíródás jellegű törési felületei

Bükk elnyíródás jellegű tönkremenetele esetén jól látható a sejtfalakon áthaladó törések rideg jellege. Minden sejtípus sejt falon átmenő elnyíródással megy tönkre, sejt falkihúzódásokat csak nagyon kis számban tapasztalunk. A bükk fafaj jellemző tönkremeneteli formája tehát a rideg jellegű szakadásos és nyírási törés.

Végül figyeljük meg az akác tönkremeneteli felületeit. Akác esetén szintén csak elnyíródás jellegű tönkremenetelt tapasztaltunk, így ezeket szemléltetjük a következő EM felvételeken (VII.28. kép). Az akác törési felületei is rideg elnyíródásról tanúskodnak. Mind a rostok mind a bélsugarak sejt falon átmenő töréssel nyíródnak el. Nem tapasztalunk sejt falkihúzódást, így a domináns tönkremeneteli mód a sejt falon átmenő rideg nyírási törés.

A jobb oldali kép közepén megfigyelhető, az akácra jellemző tilliszesedett bélsugár parenchima.



VII.28. kép. Az akác elnyíródás jellegű tönkremeneteli felületei

Foglaljuk össze a különböző fafajok EM segítségével felvett törési felületeinek megállapításait:

- Erdeifenyő esetén megállapítottuk, hogy a jellemző rideg szakadás és elnyíródás mellett jelentős mértékű sejtfalon belüli tönkremenetel is létrejön.

- Nyár fafajnál a sejtfalon átmenő rideg jellegű szakadási és nyírási törés dominál. Nem találunk számottevő sejtfalon belüli tönkremenetelt. Ez feltehetően a nyár vékony falú kis szilárdságú sejtfalainak következménye.

- Tölgyfa esetén az elnyíródás a jellemző tönkremeneteli forma. A nyírt felületek a sejtfalon átmenő rideg törésre utalnak minden sejttípus esetén.

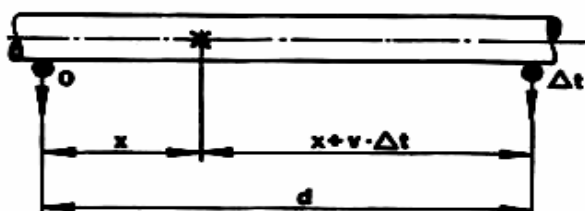
- Bükk minták vizsgálata azt az eredményt hozta, hogy mind a farostok, mind a bélsugar parenchima sejtek rideg jellegű törést mutatnak szakadás és elnyíródás esetén is. Sejtfalon belüli tönkremenetel nem jellemző.

- Akácfa törése tölgyhöz hasonlóan nyírási jellegű. A törési képek elemzése azt mutatja, hogy hasonlóan a többi fafajhoz a törés rideg és sejtfalon átmenő típusú.

**A törési képek vizsgálata tehát alátámasztja az AE vizsgálatok valamint a szakirodalom megállapításait, miszerint a faanyag tönkremeneteli viselkedése rideg jellegű. A rideg jelleg nem függ alapvetően a nedvességtartalomtól és a fafajtól sem. Így már jobban érthető, hogy az AE jellemzők eloszlás vizsgálata a faanyagra általánosan érvényes mért paraméter tartományokat adott, azaz az egyes fafajok sajátosságai a mikro-tönkremeneteli folyamatok jellegében csak a fára jellemző tartományon belül okoznak jelentős változást. Feltételezhetjük továbbá azt is, hogy az erdeifenyő esetén - ahol a sejtfalkihúzódás jelentős mértékű- a nagy AE aktivitás egyik oka lehet a sejtfalon belüli tönkremenetel jelentős részaránya. Végeredményben azt mondhatjuk, hogy a törési folyamatok tehát nagyon hasonlóan játszódnak le az egyes fafajok esetén mikroszkopikus szinten, jellemzően rideg szakadás és nyírás formájában.**

### VIII. A tönkremeneteli folyamatok és az AE keletkezési helyeinek összefüggései

A mikro-tönkremeneteli folyamatok tárgyalásánál megállapítottuk, hogy az AE forrásait képző repedések, szakadások az anyagban a terhelt keresztmetszetben véletlenszerűen alakulnak ki. Nem korlátozódnak tehát a leggyengébb keresztmetszetre és a végleges törési vonal nem esik feltétlenül egybe a kezdeti tönkremenetek helyével. Mindez a faanyag mint biológiai anyag összetett sejtszerkezeti és sejtfallszerkezeti felépítettségének következménye. Az AE mérések során lehetőség van a keletkező események lokalizációjára. Méréseink során két érzékelőt használtunk, így lineáris helymeghatározásra van lehetőségünk. A módszer lényege, hogy az első megszólaló érzékelőhöz képest a rendszer leméri a második megszólalásának időkésését. A hangterjedési sebesség és a két érzékelő helyének ismeretében a tönkremenetel kiindulásának helye könnyen kiszámolható (VIII.1. ábra).

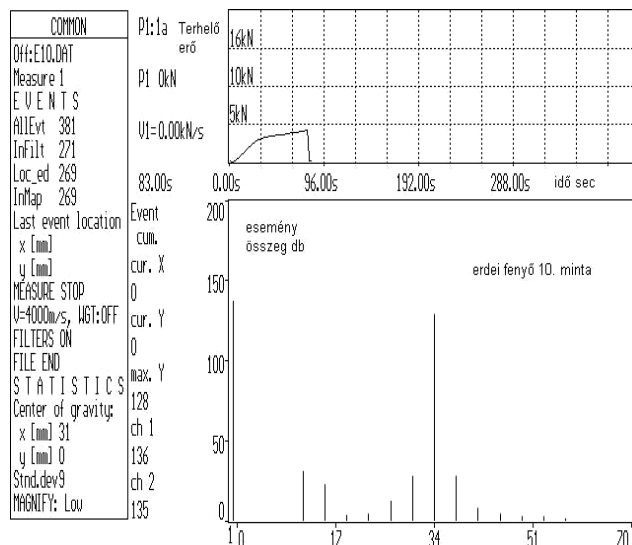
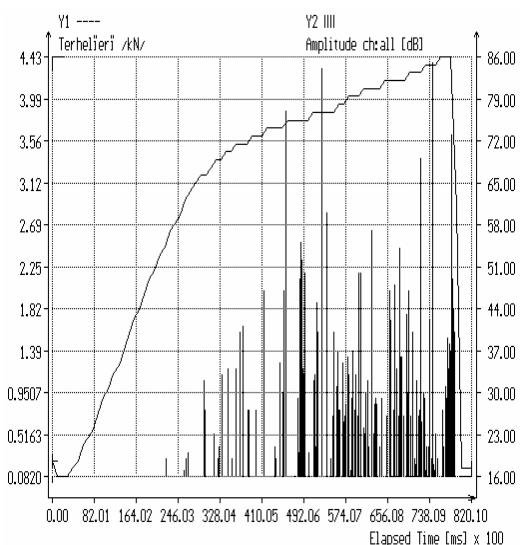


$$d = 2x + v \cdot \Delta t \text{ ebből}$$

$$x = (d - v \cdot \Delta t) / 2$$

VIII.1. ábra A lineáris hibahely lokalizáció sémája

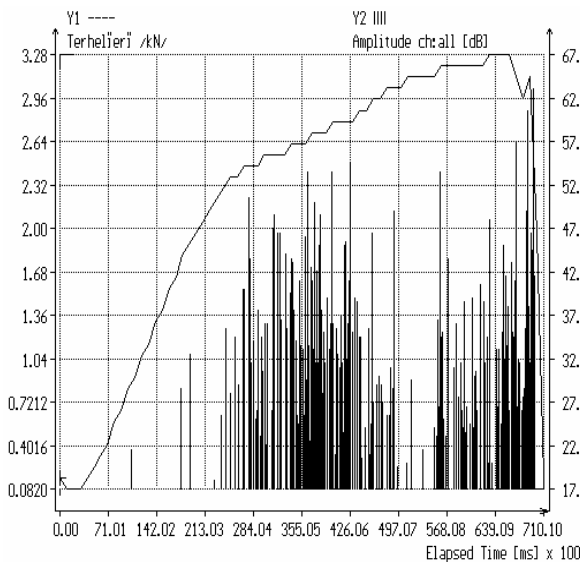
Ha megnézzük a vizsgált tartomány egy-egy adott helyéről érkező események számát a tönkremeneteli folyamat lejátszódásáról kapunk képet a vizsgált térfogatban. Az VIII.2 ábra egy erdei fenyő minta esetén mutatja az AE folyamatot, míg VIII.3 ábra a hozzá tartozó lokalizációs térképet. A térképen egy adott pontban keletkező események összegzett számát láthatjuk. ( a térkép 1 ill. 2 számú helye a vízszintes tengelyen az érzékelők helyét jelöli a köztük lévő távolság 70 mm. A detektoroknál megjelenő eseményösszeg azt az eseményszámot adja meg, melyben adott érzékelő szólalt meg elsőként. A jeleket a próbatest közepő 50 mm szakaszáról fogadtuk el.)



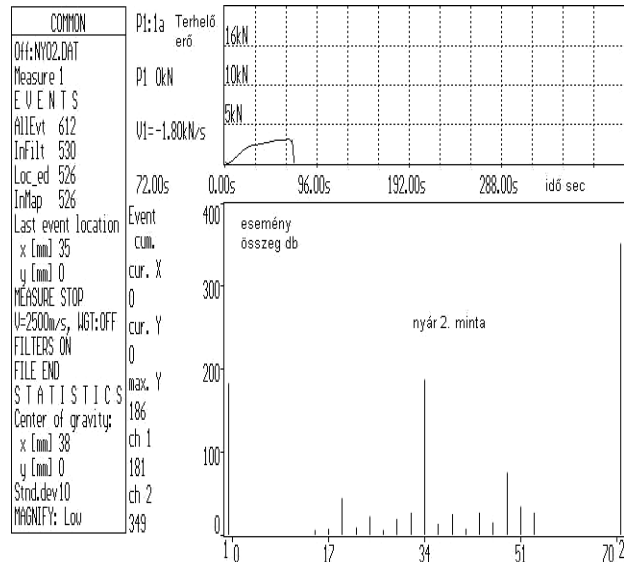
VIII.2. ábra Erdei fenyő akusztikus emissziója húzás során (10. minta)

VIII.3 ábra 10. erdei fenyő minta hibahely lokalizációs térképe

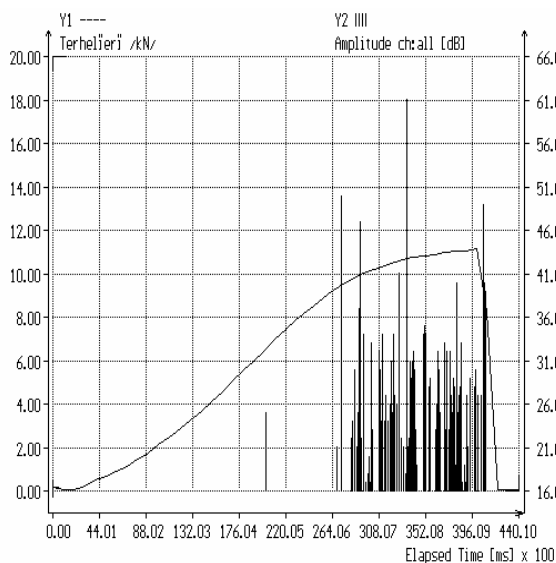
Az ábrák tanúsága szerint a tönkremeneteli folyamat során a kigyengített középső keresztmetszetben - melynek vastagsága fele akkora mint távolabb, ld. I.2.fejezet - keletkezik a legnagyobb mintegy 130 esemény. Ugyanakkor a vizsgált 50 mm-es sávban emellett még mintegy 140 esemény keletkezik véletlenszerű eloszlással. A tönkremeneteli folyamatok tehát valóban nem korlátozódnak a legkisebb keresztmetszetű részre, hanem az egész terhelt térfogatban keletkeznek véletlenszerűen. Különösen igaz ez ha nem alkalmazunk kigyengítést. Vizsgálatainkban éppen azért van szükség egy jelentős mértékű keresztmetszet csökkentésre a próbatest közepén, hogy nagy valószínűséggel itt következzen be a törés. A vizsgálatok döntő többségében ez teljesül is. A vizsgálatok során tehát elég a próbatest középső harmadából érkező jeleket elfogadnunk- mivel itt következik be a törés - a szűrési feltételek alapján. Ezzel tudjuk kizárni a befogásnál fellépő összetett igénybevételi állapotból származó jeleket. Jelentős kigyengítés nélkül a próbatesten véletlenszerűen alakul ki a tönkremenetel helye. Nézzünk egy-egy példát nyár és tölgy fafaj esetén a következőkben a tönkremeneteli helyek szemléltetésére (VIII.4.- VIII.7. ábra).



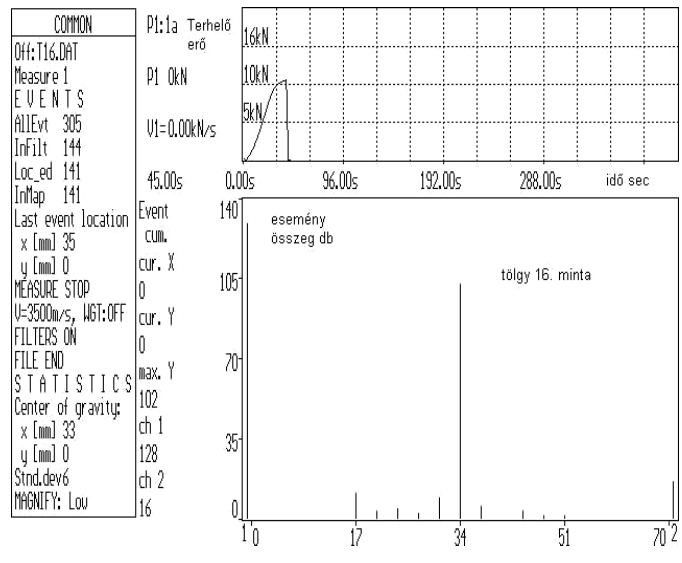
VIII.4 ábra Nyár akusztikus emissziója húzás során (2. minta)



VIII.5 ábra 2. nyár minta hibahely lokalizációs térképe



VIII.6. ábra Tölgy akusztikus emissziója húzás során (16. minta)



VIII.7 ábra A 16. tölgy minta hibahely lokalizációs térképe

Nyár esetén hasonlóan az erdei fenyőhöz a legkisebb keresztmetszetben keletkező 200 esemény mellett a vizsgált térfogatban további 300 keletkezik szemléltetve a tönkremeneteli helyek kialakulásának véletlenszerűségét.

Tölgy vizsgálata során is azt tapasztaljuk, hogy a teljes vizsgált térfogathoz kapunk AE eseményeket. A leggyengébb keresztmetszetben mintegy 100 eseményt a vizsgált tartományból további 40 eseményt.

A többi vizsgált fafaj esetén - bükk, akác, luc fenyő - ugyanezen következtetésekre juthatunk, ezeket a X. mellékletben mutatom be, terjedelmi megszorítások miatt.

**Összefoglalásként tehát elmondhatjuk, hogy a faanyag terhelése során a mikro-tönkremenetek véletlenszerűen keletkeznek az egész terhelt térfogatban az egyes farészek adott pillanatban kialakult feszültségi állapotának kritikus keresztmetszeteiben. Az AE mérésekkel tehát sikerült alátámasztani az elektron mikroszkópos és videokamerás megfigyelések állításait.**

## IX. A faanyag akusztikus aktivitásának kezdete és az alakváltozási, feszültségi jellemzők kapcsolata

A faanyag AE vizsgálatai során gyakran tapasztaljuk, hogy azonos vizsgálati körülmények között ugyanazon fafajból készült próbatestek nagyon eltérő akusztikus aktivitást mutatnak.

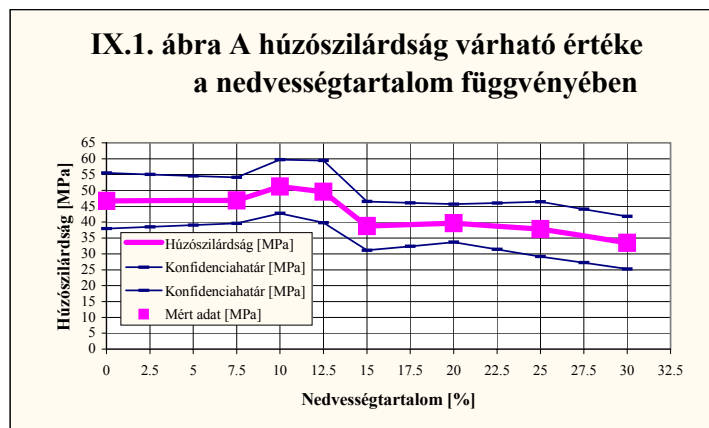
Ez az egyik fő oka annak, hogy viszonylag kevés számú írást találunk a természetes fa AE vizsgálatairól és nem találunk átfogó munkát, mely az alapvető befolyásoló tényezők AE-ra gyakorolt hatását tisztázná. Sokkal többen foglalkoznak a különféle kompozitok AE-s tulajdonságainak vizsgálatával, mert ott viszonylag állandó nagy akusztikus aktivitást tapasztalhatunk (Hansel 1988, Rice 2002). A természetes faanyag AE vizsgálata során fellépő említett problémák részben természetesen a faanyag inhomogenitásából és anizotrópiájából következnek. A fa mint biológiai anyag szöveti változékonysága következtében nem tudunk két azonos próbatestet készíteni. Ezen jellege mellett azonban tönkremeneteli sajátosságaiban is új összefüggéseket tárhatunk fel az AE vizsgálatok segítségével. Jelen fejezetben az AE kezdete és a faanyag nedvességtartalma közötti összefüggéseket tárjuk fel a faanyag tönkremeneteli folyamatainak jobb megismerése, megértése céljából.

A vizsgálatokhoz a nedvességtartalom hatását vizsgáló fejezetben elemzett lucfenyő mintasorozat adatait használtam fel. A nedvességtartalom AE-re gyakorolt hatása kapcsán megállapítottuk, hogy az alapvetően nem befolyásolja a feltehetően törési jelenségekből származó AE eseményszámot. A növekvő nedvességtartalommal csökkenő akusztikus aktivitás elsősorban a sűrűlódásos jellegű események részarány csökkenésében áll. Ha ezek az állítások a valóságnak megfelelnek, ezeknek tükröződniük kell az akusztikus emisszió kezdetéhez szükséges feszültségi és alakváltozási jellemzőkben is. A kapcsolat megállapításához megvizsgáltam az akusztikus emisszió kezdetéhez tartozó alakváltozási és feszültségi értékeket a három tárgyalt nedvességtartalmi osztályban. Ennek eredményét a IX.1. táblázat mutatja. Az akusztikus emisszió kezdetét az események 10%-nál vettem figyelembe, mert az első néhány esemény megjelenése még nem ad biztos támpontot a tönkremeneteli folyamatok egyértelmű megindulására.

IX.1. táblázat Az AE kezdetéhez tartozó alakváltozás és feszültség tartomány különböző nedvességtartalom mellett		
nedvességtartalom	alakváltozás [%]	feszültség [MPa]
0 %	0,26-1,1	37-75
12%	0,27-0,92	46-98
26%	0,22-1,2	37-71

Összevetve a táblázat értékeit megállapíthatjuk, hogy az akusztikus emisszió kezdete függetlenül a nedvességtartalomtól azonos alakváltozási tartományban van. Ez azt jelenti, hogy a nedvességtartalom nincs jelentős hatással a faanyag tönkremeneteli folyamatainak kezdetére. **A tönkremeneteli folyamatok tehát adott alakváltozási értéktartományban indulnak meg.** Ez azért is jelentős felismerés, mert ezzel alátámasztottuk a nedvességtartalom befolyásoló hatásának vizsgálatokor leírtakat, miszerint a törési folyamatok jellege és száma csak kismértékben függ a nedvességtartalomtól. Ha jellemzően függne, akkor az emisszió megindulására is hatással lenne, hiszen akkor a törések és az ebből származó események kialakulása különböző nedvességtartalom mellett más és más lenne. Az akusztikus emisszió kezdetéhez tartozó feszültségben a 12% nedvességtartalmi osztályban mintegy 20% növekedést tapasztalunk.

Ha ezt összevetjük a lucfenyő különböző nedvességtartalom mellett mért szilárdságával akkor azt tapasztaljuk, hogy a 12%-os nedvességtartalom mellett a legnagyobb a szilárdság (Szalai 2003). (IX.1.ábra). Megjegyzendő, hogy az ábra alapját képező lucfenyőminták ugyanabból az anyagból készültek mint az AE vizsgálatokhoz készített próbatestek, így a kettő jól összevethető. A szilárdság nedvességtartalomtól függő ezen jellegét több kutató mérte és különféleképpen próbálták magyarázni ( F. Kollmann, E. Gaber, O. Graf, W. Küch, 1951.).



A IX.1. ábrán bemutatott tendenciát a következőképpen magyarázhatjuk:

- Abszolút száraz faanyagban nagy számú száradási repedés van jelen, melyek csökkentik a terhelt keresztmetszetet, így adott alakváltozást kisebb feszültséggel lehet létrehozni és a szilárdság is kisebb lesz a már jelenlévő tönkremenetelek miatt.

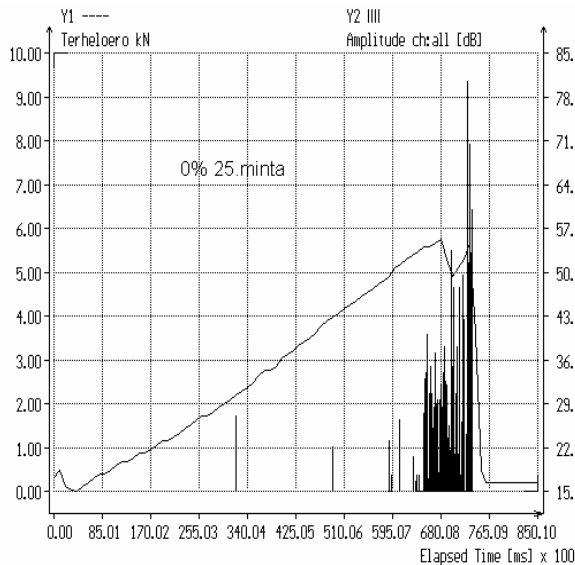
-12%-os nedvességtartalom körül lényegesen kevesebb a fában lévő repedés ill. a jelenlévő repedési felületek között a kötött víz újra létrehozhatja a kémiai kötéseket. A kötések létrejöttével optimálisan alakulnak a szilárdsági jellemzők

- Rosttelítettségi nedvességtartalom felé haladva az újabb kötött víz már nem járul hozzá jelentősen a kémiai kötések megerősítéséhez a fonalmolekulák ill. fonalmolekula lignin között, hanem a kötések fellazulását idézi elő, a rugalmassági modulusz lecsökken, így adott alakváltozáshoz egyre csökkenő feszültség tartozik. A szilárdság is kisebb lesz.

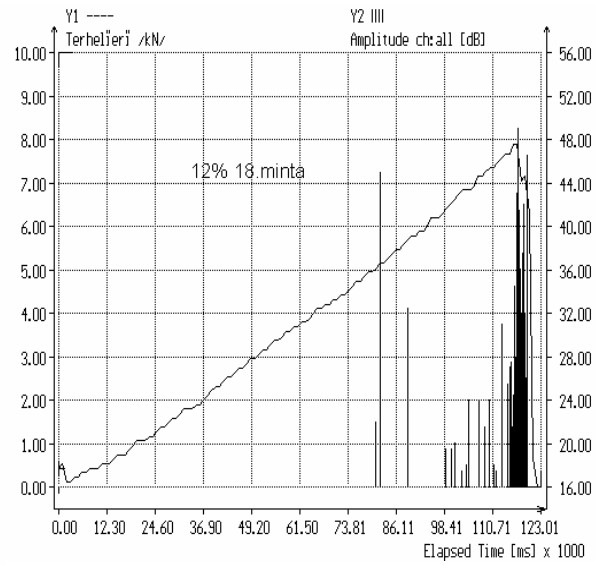
Mindebből következik tehát, hogy az akusztikus emisszió kezdetéhez tartozó feszültség szint növekedése 12% nedvességtartalomnál a faanyag ezen nedvességtartalma mellett mutatott nagyobb szilárdságával kapcsolatos. Megjegyzendő, hogy mivel az alakváltozási tartomány nem változik, ez a szilárdságnövekedés a rugalmassági modulusz megnövekedését is jelenti a Hooke törvény értelmében. A másik két nedvességtartalom esetén azonos feszültség szint azonban eltérő hatásokból adódik. 0%-nál a repedések jelenléte, míg 26%-nál a rugalmassági modulusz csökkenése hoz létre azonos feszültségtartományt a 12%-os osztályhoz képest.

Ha összevetjük az emisszió kezdetéhez tartozó feszültség szintet a lucfenyő különböző nedvességtartalmához tartozó szilárdsági értékeivel akkor azt figyelhetjük meg, hogy csaknem a szilárdságot elérő feszültségek mellett kezdődik meg az AE. Ezt szemléltetik a három nedvességi osztályból bemutatott ábrák (IX.2-4 ábrák). Ez arra utal, hogy a faanyag tönkremeneteli folyamatai csak a törőszilárdság közelében kezdődnek el. Ha megfigyeljük a három nedvességtartalom mellett felvett ábrát akkor azt mondhatjuk, hogy az erő-eltelt idő(mely arányos az alakváltozással) függvények a rideg anyagokhoz hasonló jellegűek. Erre a megállapításra jutottak más kutatók is. (Ehlbeck, Hemmer 1987, Szalai 2003).

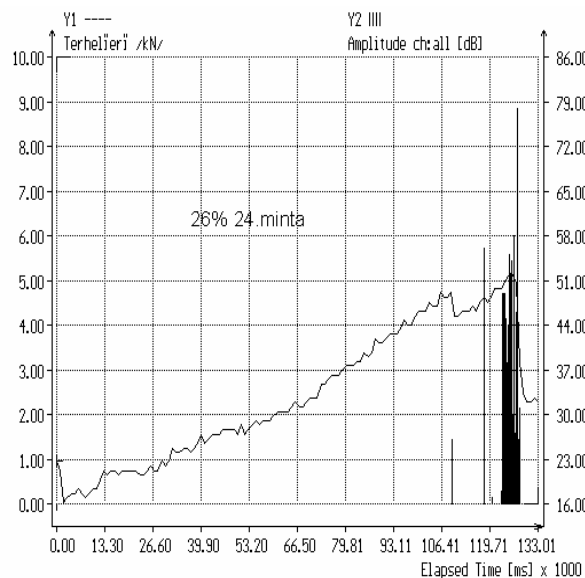
Rideg anyagokra jellemző, hogy a törésig nem mutatnak tönkremenetelre utaló jeleket- így akusztikus emissziót sem- majd pillanatszerűen jön létre törésük.



IX.2. ábra Lucfenyő akusztikus emissziója 0% nedvességtartalom mellett



IX.3. ábra Lucfenyő akusztikus emissziója 12% nedvességtartalom mellett



IX. 4. ábra Lucfenyő akusztikus emissziója 26% nedvességtartalom mellett

A feszültség-alakváltozás függvény más fafajoknál is hasonló jellegű, így kijelenthetjük, hogy a faanyag viselkedése a rideg anyagokéhoz hasonló jellegű, melyet a feszültség alakváltozás függvények lineáris jellege mellett az akusztikus emisszió csak a törő terhelés közelében való megindulása is alátámaszt.

**Összefoglalásképpen elmondhatjuk, hogy a faanyag akusztikus emissziójának, ezáltal tönkremeneteli folyamatainak kezdete nem függ a nedvességtartalomtól. A faanyag mikro-tönkremeneteli folyamatai adott alakváltozás mellett indulnak meg. A tönkremeneteli folyamatok kezdetéhez tartozó feszültség követi a szilárdság nedvességtartalomtól való függésének jellegét. Az AE törőterhelés környezetében való kezdete a faanyag rideg törési viselkedésének újabb bizonyítéka.**



## X. Az AE események mennyisége és a szilárdság kapcsolata

Az AE vizsgálatok során ugyanazon farönkből készült próbatestek esetén is jelentős különbségeket tapasztalunk azok akusztikus eseményszámában. Ennek egyik oka lehet a fa mint biológiai anyag nagy változékonysága akár adott fatörzsön belül is. Ezen inhomogenitás a fa életrétegében a fát ért kémiai, biológiai, mechanikai hatások eredményeként jön létre. Jelen fejezetben arra a kérdésre keressük a választ, hogy a fa törésekor a mikro-tönkrementeli folyamatokból származó AE események száma milyen kapcsolatban van az egyes próbatestek szilárdságával.

A fa mikro-tönkrementeli folyamatainak leírásával kapcsolatban M. Bariska (1985) nevét kell megemlíteni, aki a törési folyamat létrejöttét elektronmikroszkóp és videokamera összekapcsolásával vizsgálta a terhelési folyamat során. A törési folyamatokat húzás során a következő megállapításokkal jellemezte (bővebben ld. VII.5. fejezet.):

- A sejtek tengelyével párhuzamosan futó sejtközi kötéseket transzverzális törések követnek egy vagy több sejten áthaladva a próbatestben véletlenszerűen szétszórva jelennek meg ezen tönkrementelek. Majd ezek növekednek és véletlenszerűen megközelítik egymást és végül kialakul a törési vonal, mely a nagy feszültség koncentrációjú zónák kialakulását idézi elő. A mikro-repedések csak ott fejlődnek ahol a feszültség eléri a helyi szilárdságot. A mikro-repedések szétszórta teszik a helyi feszültségcsúcsokat, ezzel azt eredményezve, hogy magasabb feszültség szinten a megmaradt még tönkre nem ment szövetekre terhelődnek és hasonló tönkrementelt okoznak. Ez magyarázza a kezdeti tönkrementel véletlen megjelenését a próbatestben.

- Általában a húzási törés a sejtek közötti nyírási jellegű elválással kezdődik, amit sejtfalon átmenő törés követ. A nyírási ill. sejtfalon átmenő törések gyakorisága a fafajtól és a próbatest fajsúlyától függ.

- A kezdeti mikro-tönkrementelek semmiképpen sem határosak a végső törési zónával. Ezek inkább az egész igénybevett térfogatban szétszórta helyezkednek el. Ha a próbatestben nincs szembeutó szerkezeti inhomogenitás, a törés véletlenszerűen oszlik el és próbatest mint egész károsodik.

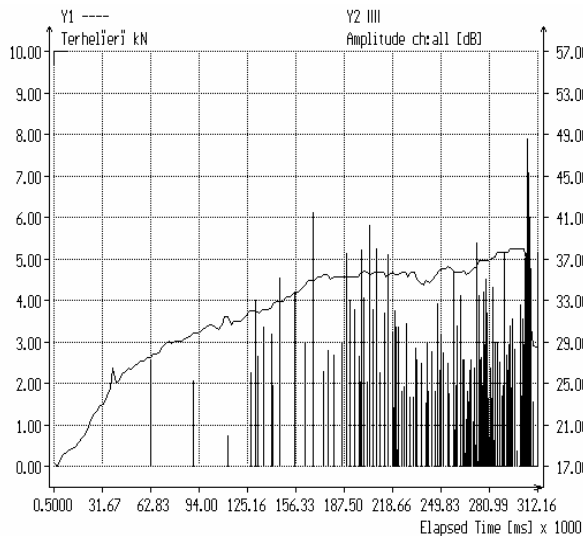
Ennek ismeretében vizsgáljuk meg az AE eseményszám és a szilárdság kapcsolatát.

A X.1. táblázat tíz-tíz mintát mutat a vizsgált három nedvességtartalmi osztály esetén.

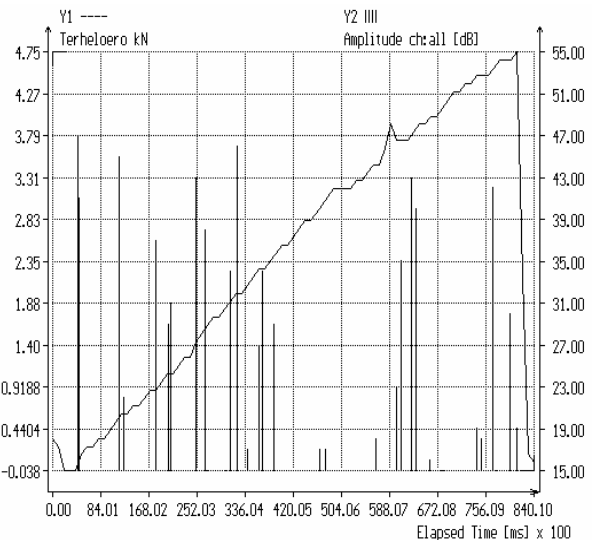
<b>X.1. Az AE eseményszám és a szilárdság összetartozó értékei lucfenyő esetén</b>						
<b>Nedvesség tartalom</b>	<b>0%</b>		<b>12%</b>		<b>26%</b>	
	<b>eseményszám db</b>	<b>szilárdság MPa</b>	<b>eseményszám db</b>	<b>szilárdság MPa</b>	<b>eseményszám db</b>	<b>szilárdság MPa</b>
1.	413	41	569	27	62	21
2.	156	43	32	38	38	23
3.	326	30	53	51	316	15
4.	817	33	204	50	207	17
5.	61	33	152	39	20	16
6.	85	31	32	34	100	21
7.	83	40	123	32	123	22
8.	25	26	82	37	262	27
9.	63	27	146	45	167	26
10.	30	31	26	25	60	29

Az összetartozó adatok alapján kijelenthetjük, hogy nedvességtartalomtól függetlenül az események száma és a szilárdság között nincsen szignifikáns kapcsolat. Kis és nagy eseményszámokhoz is tartozik közel azonos szilárdsági érték (X.1-2. ábra).

A fent leírt szakirodalmi állítás szerint is, a tönkremenetelek véletlenszerűen keletkeznek a faanyag egész terhelte térfogatában.



X.1 ábra A 4. számú 0% nedvességtartalmú lucfenyő minta akusztikus emissziója



X.2. ábra A 10. számú 0% nedvességtartalmú lucfenyő minta akusztikus emissziója

A véletlenszerű tönkremenetelekből származó események száma tehát nincs kapcsolatban a próbatest szilárdságával. Ez a következő megfontolásokkal magyarázható.

- A véletlenszerűen kialakult repedések hatására véletlenszerűen alakulnak ki a feszültségcsúcsok. A feszültségcsúcsok törést eredményezhetnek, de le is épülhetnek- különösen magasabb nedvességtartalmú minták esetén- így a kapott AE események száma véletlenszerűen kialakult törési mechanizmus eredménye, mely nincs egyértelmű kapcsolatban a szilárdsággal.

- Az események számát nagyban befolyásolhatja az anyagban létrejött törési felületek egymáson való elcsúszása is, mely súrlódásos jellegű eseményeket kelt egyes esetekben, míg máskor nem jönnek létre megcsúszások.

További megállapításokat tehetünk a VII.8. fejezetben említett kétféle törési mód, a szakadásos és elnyíródás jellegű próbatestek eseményszámának vizsgálata alapján.

Ha megvizsgáljuk a elnyíródott és elszakadt törési felülethez tartozó eseményszámokat, akkor arra a következtetésre jutunk, hogy a törés makroszkopikus jellege sincs egyértelmű kapcsolatban a kapott AE eseményszámmal és a szilárdsággal sem. Ez a megállapítás alátámasztja más szerzők állítását, miszerint a törési kép faanyag esetén nincs kapcsolatban a szilárdsággal (Kollmann 1982). Az a gyakorlatban elterjedt nézet tehát, miszerint a vonal mentén tört próbatestek szilárdsága kisebb, mint a szálkás kombinált húzási nyírási törésfelületűé, saját vizsgálataink esetén is megdőlt. Ez a jelenség is alátámasztja, hogy a tönkremeneteli folyamatok véletlenszerűen játszódnak le és így a kapott AE események száma is véletlenszerűen alakul. **A kapott események száma tehát a fa ill. az egyes próbatest egyedi biológiai szerkezetéből adódó véletlenszerűen kialakuló mikro-tönkremeneteli folyamatok eredménye, mely nincs egyértelmű kapcsolatban a szilárdsággal.**

## Tézisek

**I. tézis** Elsőként végeztem széleskörű frekvenciaanalízist a faanyag jellemző akusztikus emissziós (AE) tartományának behatárolására. Ezek alapján kimutattam, hogy a 20-250 kHz frekvenciatartományt kell megjelölnünk, mint szükséges érzékelési tartományt.

**II. tézis** Felismerve, hogy egy-egy próbatest tönkremenetelének AE folyamata nem ad egyértelmű képet önmagában a faanyag tönkremeneteli folyamatáról - ugyanazon faanyagból készült próbatestek esetenként csaknem zérus, míg más esetekben jelentős akusztikus aktivitást mutatnak -, elsőként alkalmaztam statisztikai módszert a faanyag AE jellegzetességeinek kiértékelésében. Az azonos mérési körülmények között kapott AE eseményeket egységes mintának tekintettem és ezek statisztikai kiértékelésével kimutattam, hogy nagyszámú esemény feldolgozása alapján értékes következtetésekre juthatunk a faanyag tönkremeneteli folyamataival kapcsolatban.

**III. tézis** Kimutattam, hogy a nedvességtartalom növekedésével jelentősen csökken a faanyag akusztikus aktivitása. Megállapítottam, hogy a jelenséget a súrlódásos jellegű jelek számának csökkenése és az akusztikus csillapítás növekedésének együttes hatása okozza. Igazoltam, hogy a törésekből származó AE események jellege és száma közel állandó marad, és ezen események alkotják a legnagyobb gyakoriságú osztályok elemeit a sűrűség-függvényekben.

**IV. tézis** Az egyes fafajok AE vizsgálatai alapján kimutattam, hogy azok akusztikus aktivitásában jelentős különbségek mérhetők. A legaktívabbnak az erdeifenyő, majd csökkenő aktivitási sorrendben akác, nyár, lucfenyő, bükk és tölgy adódott. A legaktívabb és legkevésbé aktív fafaj között mintegy hatszoros eseményösszeg különbséget mértem. Igazoltam, hogy mikro-tönkremenetelek szintjén az egyes fafajok azonos nagyságrendű AE jellemzőkkel mennek tönkre. Megállapítottam, hogy mikro-tönkremenetelek szintjén az egyes fafajok nem a megszokott csoportosításban - keményfa, puhafa, fenyő - különülnek el, hanem a tönkremeneteli folyamatok sajátosságainak megfelelően.

**V. tézis** Kimutattam, hogy az alakváltozási sebesség nincs számottevő hatással a faanyag AE jellemzőinek tulajdonságaira a 2-20 mm/perc vizsgált tartományban. A faanyag mikro-tönkremeneteleire tehát az alakváltozási sebesség nincs hatással, - annak ellenére, hogy a szilárdság nő az alakváltozási sebesség növekedésével - a vizsgált viszonylag alacsony tartományban.

**VI. tézis** Az igénybevétel jellegének befolyását vizsgálva megállapítottam, hogy az elsősorban az események energiájának kis mértékű növekedésében mutatkozik meg nyomás esetén húzáshoz képest. Az eloszlások karakterisztikus értékeinek vizsgálatával alátámasztottam, az igénybevétel a tönkremeneteli folyamatokra nincs jelentős hatással. Kimutattam, hogy a szilárdsági tulajdonságokban mérhető különbség, nem a mikro-tönkremeneteli folyamatok mérhető AE jellemzőiben különbözik.

**VII. tézis** A faanyag terhelési előtörténetének hatását vizsgálva megállapítottam, hogy az előterhelés során bevitt tönkremenetek AE-ra, ezáltal tönkremeneteli folyamatokra gyakorolt Kaiser effektus jellegű hatásával számolnunk kell. Az előterhelést egy hónapon belül követő törés esetén kimutattam a Kaiser effektust, azaz az előterhelés AE aktivitást csökkentő hatását. Kimutattam, hogy két hónap után a faanyag terhelési előtörténete - melynek során mikro-repedések keletkeznek az anyagban - a fa tönkremenetelét gyorsítja egy újabb terhelési folyamat során, ezáltal növeli a faanyag akusztikus aktivitását. Megállapítottam, hogy a fát ért klimatikus hatások gyorsítják a Kaiser effektus eltűnését.

**VIII. tézis** Az AE vizsgálatok során eltört különböző nedvességtartalmú és fafajú minták törési felületeinek elektronmikroszkópos vizsgálatával alátámasztottam a szakirodalom abszolút száraz faanyagra vonatkozó megállapításait, miszerint a faanyag törése rideg jellegű. A vizsgálatok alapján az abszolút száraz faanyagra vonatkoztatott szakirodalmi megállapításokat kiterjesztettem a nagyobb nedvesség-tartalmú mintákra is. Kimutattam, hogy 0-30% nedvességtartalom tartományban és szobahőmérsékleten a faanyag törési természete rideg jellegű.

**IX. tézis** A tönkremenetek helyének lokalizálása segítségével bebizonyítottam, hogy a faanyag terhelése során a mikro-tönkremenetek számunkra véletlenszerűen keletkeznek az egész terhelt térfogatban, az egyes farészek adott pillanatban kialakult feszültségi állapotának kritikus pontjaiban.

**X. tézis** Kimutattam, hogy a faanyag akusztikus emissziójának, ezáltal tönkremeneteli folyamatainak kezdete nem függ a nedvességtartalomtól. A faanyag mikro-tönkremeneteli folyamatai ugyanazon (0.22-1.2%) alakváltozási tartományban indulnak meg. A tönkremeneteli folyamatok kezdetéhez tartozó feszültség követi a szilárdság nedvességtartalomtól való függésének jellegét. Az AE törőterhelés környezetében való kezdete a faanyag rideg törési viselkedésének újabb bizonyítéka.

**XI. tézis** Az AE vizsgálatok során kapott események száma és szilárdság kapcsolatát vizsgálva megállapítottam, hogy az eseményösszeg a fa ill. az egyes próbatest egyedi biológiai szerkezetéből adódó, véletlenszerűen kialakuló mikro-tönkremeneteli folyamatok eredménye, mely nincs egyértelmű kapcsolatban a szilárdság nagyságával.

**XII. tézis** A faanyag kutatás területén elsőként végeztem szisztematikus, széleskörű alapkutatást a faanyag akusztikus emissziós jellemzői - frekvencia, mért és származtatott AE jellemzők - és a faanyag tulajdonságait befolyásoló faktorok - fafaj, nedvességtartalom, igénybevétel, alakváltozási sebesség - között fennálló kapcsolatok feltárására. A vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy az akusztikus emissziós technika alkalmas faanyag vizsgálatára, elsősorban a faanyag tönkremeneteli folyamatainak és mechanikai viselkedésének feltárására.

## **A kutatási eredmények hasznosítása**

Az elvégzett vizsgálatok alapkutatásnak tekinthetők. Feltártam a faanyag akusztikus emissziós (AE) jellemzői - frekvencia, mért és származtatott AE jellemzők - és a faanyag tulajdonságait befolyásoló faktorok - fafaj, nedvességtartalom, igénybevétel, alakváltozási sebesség - között fennálló kapcsolatokat. Ezen eredmények alapvető jelentőségűek a későbbi alkalmazott kutatásokban, melyek lehetővé teszik az AE technika faipari alkalmazását.

### **A faipar területén az AE alkalmazásaként a következő területeket jelölhetjük meg:**

- Faszervezeti elemek terheléspróbájának AE-s ellenőrzése. Ennek eredményeképpen ellenőrizni lehet, hogy történik-e számottevő tönkremenetel a folyamat során.
- Megvalósítható, kész szerkezetek terheléspróbája során, a keletkező tönkremeneteli helyek - veszélyes keresztmetszetek- lokalizációja vonal menti, síkbeli, később esetleg térbeli esetben is.
- A faanyagban már jelenlévő tönkremenetelek hatását vizsgáló Kaiser effektus méréseim alapján lehetőség van, egy jelentős meteorológiai terhet (pl. orkán erejű szél) elszenvedő faszerkezet szerkezeti részeire kényszerített terhelési szint utólagos megállapítására oly módon, hogy a szerkezetet terhelve az akusztikus emissziót csak akkor mutat, ha teherszint átlépi az elszenvedett meteorológiai teher maximumát.
- Az eredmények alapján el lehet indulni egy hazai, AE-s jellemzők által vezérelt szárítóberendezés fejlesztésének irányába. A technikát szerte a világon alkalmazzák szárítási folyamatok vezérlésére.

### **A kutatások eredményeinek további gyakorlati következményei:**

- Kimutattam, hogy ha általában a faanyagról beszélünk a mikro-tönkremeneteli folyamatok jellemző frekvenciatartománya 20-250kHz. Egy kész szerkezet állapotellenőrzése vagy terhelési próbája során tehát ezen tartományt lefedő érzékenyséigű detektorokkal kell dolgoznunk.
- Megállapítottam, hogy a faanyag rideg törési természetű a 0-30% nedvességtartalmi osztályban, szobahőmérsékleten. Ennek gyakorlati következménye, hogy a faanyag tönkremenetele során nem számíthatunk a szívós anyagokhoz hasonló folyási tartományra. A faanyag tönkremenetelére utaló hallható tartományba eső recsegő-ropogó hangesemények megjelenése a törőterhelés 90%-a felett várható és a rövidesen bekövetkező totális tönkremenetelre utalnak. A vizsgálatok során kimutattam, hogy a tönkremeneteli folyamatok csak a törő terhelés 70% felett indulnak meg számottevően. Ez azt jelenti, hogy a környezeti hatások hirtelen megváltozása (szélterhelés) miatt rövid ideig magas kihasználtságúvá váló teherviselő faszerkezetekben, nem jön létre számottevő teherbírás csökkenés ezen terhelési szint alatt.
- Az AE hangesemények lokalizációjával alátámasztottam más kutatók megállapításait miszerint a tönkremeneteli folyamatok véletlenszerűen jelennek meg a teljes terhelt térfogatban, a kialakult törési felülettől távol is jelentős mértékben tönkremegy a próbatest. Ennek az a gyakorlati következménye, hogy a faanyag erőtani méretezése során szokásos összefüggést a teher és keresztmetszet terület között ( $\sigma=N/A$ ) nem tekinthetjük helyesnek. Ennek megfelelően át kell gondolni a méretezés eddigi alapelveit és valamilyen módon a terhelt térfogatot is figyelembe kellene venni.

## **Köszönetnyilvánítás**

**Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek Dr. Szalai Józsefnek, aki döntő szerepet játszott a kutatásaim anyagi és tárgyi feltételeinek megteremtésében, továbbá ötleteivel, véleményével, szakmai és kutatási tapasztalatával nagyban hozzájárult, hogy ezen disszertáció létrejöhetett.**

**Köszönet illeti Csikós Szabolcs tanszéki mérnököt is, aki az összes mérést velem együtt küzdötte végig. Segítségével, ötleteivel szintén hozzájárult a munka sikeréhez.**

**Köszönöm még Peter Niemz professzor segítségét is, aki a Zürich ETH Faanyag tudományi Intézetében lehetőséget biztosított a mérések egy részének elvégzésére, valamint az elektron-mikroszkópos felvételek elkészítésére.**

**Köszönettel**

## **XII. Publikációk**

### **Nemzetközi kiadványokban megjelent cikkek:**

- Kánnár, A. 1999. Acoustic emission research in relation to the damage process of wood. Proceedings of COST Action E8 Workshop Damage in wood Bordeaux 27-28 May 1999. 69-74.
- Kánnár, A. 2000. Kaiser effect experiments in wood by acoustic emission testing Proceedings of 12<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood Sopron 13-15 September 2000. 393-401.

### **Nemzetközi konferenciákon tartott előadások:**

- Kánnár, A. 1999. Acoustic emission research in relation to the damage process of wood. Proceedings of COST Action E8 Workshop Damage in wood Bordeaux 27-28 May 1999. 69-74.
- Kánnár, A. 2000. Kaiser effect experiments in wood by acoustic emission testing Proceedings of 12<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood Sopron 13-15 September 2000. 393-401.
- Kánnár, A. 2003. Micro-damage processes of hardwoods Issues of Hardwood Research and Utilisation in Europe International Conference September 25-26, 2003 University of West Hungary Sopron Poster
- Kánnár, A. 2003. Investigation of micro-damage processes of wood using acoustic emission and electron-microscopy XXth. Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics September 24-27, 2003 Győr in Hungary; Proceedings 26-27.

### **Hazai kiadványokban megjelent cikkek:**

- Kánnár, A. 1998. Akusztikus emissziós anyagvizsgáló módszer a fakutatásban Faipar 1998/1 28-30.
- Kánnár, A. 1998. Akusztikus emissziós anyagvizsgáló módszer a faiparban Magyar Asztalos 1998/07 76-77.
- Kánnár, A., Szalai, J. 2000. A faanyag és faalapú anyagok mechanikai viselkedésének vizsgálata akusztikus emissziós analízissel. OTKA zárójelentés nyilvántartási szám T 019040 Lóvér Print nyomdaipari Kft. Sopron 2000. 14-116.
- Kánnár, A. 2000. Acoustic emission research in relation to the specification of mechanical properties of wood A Nyugat-Magyarországi Egyetem Tudományos közleményei 2000. 171-177.
- Kánnár, A. 2001. A nedvesség- és hőmérsékletprofil modellezésének hatása a rétegelt szerkezetek számított sajátfeszültség eloszlására; Konferencia kiadvány Alkalmazott matematika és mechanika konferencia Sopron. 2001.nov.23. Konferencia kiadvány 14-15.

- Kánnár, A. 2002. A faanyag makro- és mikro-szintű tönkremeneteli folyamatai és ezek összefüggései  
Tanulmány, Lövőer Print nyomdaipari Kft. Sopron 2002. 33 o.
- Szalai, J.; Kánnár, A. 2002. Réteges felépítésű faszerkezeti elemek klímaváltozás során bekövetkező vetemedésének és sajátfeszültségeinek számítása I. rész: elméleti összefoglaló  
Faipar 2002/1. 19-23.
- Kánnár, A. 2002. A tönkremenetel makro-folyamatai I. rész.  
Magyar Asztalos és Faipar 2002/5 172-173.
- Kánnár, A. 2002. A tönkremenetel makro-folyamatai II. rész.  
Magyar Asztalos és Faipar 2002/6 173-175.
- Kánnár, A. 2002. A tönkremenetel makro-folyamatai III. rész.  
Magyar Asztalos és Faipar 2002/9 139-141.
- Kánnár, A., Szalai, J. 2002. Réteges felépítésű faszerkezeti elemek klímaváltozás során bekövetkező vetemedésének és sajátfeszültségeinek számítása II. rész: Az elméleti levezetések eredményeinek alkalmazása  
Faipar 2002/4. 7-12.
- Kánnár, A. 2003. A faanyag mikro-tönkremeneteli folyamatainak feltárása akusztikus emissziós és elektron-mikroszkópos vizsgálatokkal különböző fafajok esetén  
I. rész Különböző fafajok akusztikus emissziós sajátosságainak vizsgálata  
Anyagvizsgálók lapja 1/2004. megjelenés alatt

#### **Magyar nyelvű előadások :**

- Kánnár, A. 1998. Akusztikus emissziós anyagvizsgáló módszer a fakutatásban  
Új tudományos eredmények a faiparban konferencia  
Sopron 1998. aug. 27. Faipar 1998/1 28-30.
- Kánnár, A. 2001. A nedvesség- és hőmérsékletprofil modellezésének hatása a rétegezt szerkezetek számított sajátfeszültség eloszlására  
Alkalmazott matematika és mechanika konferencia  
Sopron. 2001.nov.23. Konferencia kiadvány 14-15.
- Kánnár, A. 2003A faanyag mikro-tönkremeneteli folyamatai és az akusztikus emissziós vizsgálat során kapott események összefüggései  
IX. Magyar Mechanikai Konferencia Miskolc, 2003. augusztus 27 - 29.  
Konferencia kiadvány 46.
- Kánnár, A. 2003 A faanyag mikro-tönkremeneteli folyamatainak összefüggései a faanyag nedvességtartalmával  
II. Alkalmazott matematika és mechanika tudományos konferencia Sopron. 2003.nov.21. Konferencia kiadvány 20-21.



### XIII. Felhasznált irodalom

- Akande J.A., Kyanka G.H.(1990): Evaluation of tensile fracture in aspen using fractographic and theoretical methods. *Wood Fib. Sci.* 22(3): 283-297.
- Anastassopoulos, A. (1998): Pattern Recognition Analysis of AE from Composites  
Proceedings of 23<sup>rd</sup> European Conference on Acoustic Emission Testing,  
Vienna 6-8 May 1998
- Ansell M.P, Harris B.(1979): The relationship between toughness and fracture surface topography in wood and composites. *Mat. Sci.* (3): 309-318.
- Ansell M.P. (1982): Acoustic Emission from Softwoods in Tension  
*Wood Sci. Technol.* 16. p. 35-58.
- Auge F. (1990) : Influence de l'Humidite du Bois et de sa Temperature sur la Propagation des Ultrasons; Rep. D.E.A. Universite de Nancy I, Nancy, France
- Bariska M.(1992): Collapse phenomena in eucalypts. *Wood Sci. Technol.* 26: 165-179.
- Bariska M., Kucera L.J. (1985): On the fracture morphology in wood. Part II.  
Macroscopical deformations upon ultimate axial compression in wood.  
*Wood Sci. Technol.*19: 19-34.
- Bariska M., Pizzi A., Conradie WE.(1988): Structural weakening of CCA-Treated Timber.  
*Holzforschung* 42(5): 339-345.
- Bariska M. (1996) : Fracture mechanics and wood anatomy.  
*NZ.For.Res.Inst.* 429 p.
- Beall, F.C. (1986): Effect of resin content and density on acoustic emission from particleboard during internal bond testing . (*Forest Products Journal* vol. 36, No. 7\8 )
- Beall, F.C. - Wilcox, W.W. (1987): Relationship of acoustic emission during radial compression to mass loss from decay. ( *Forest Products Journal* vol.37, No. 4 )
- Beall F. C. (2002): Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonics  
Nondestructive Evaluation of Wood, Forest Products Society Madison, WI. 37-49
- Beall F.C.; Ute Seeling (2003): Process and Analysis of Signals Trough Dimension Wood Using Acousto-Ultrasonics; Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood 213-219.
- Beery W.H., I.G., McLain T.E.(1983): Quantitative wood anatomy - relating anatomy to transverse tensile strength. *Wood Fib. Sci.*15(4): 395-407.
- Bentur A., Mindess S.(1986): Characterisation of load-induced cracks in balsa wood. *J. Nat. Sci.* 21: 559- 565.

- Berg J. (2000) Effect of temperature on fracture of spruce in compression, investigated by use of acoustic emission monitoring, *Journal of Pulp and Paper Science* Vol. 26. No.8. 294-298.
- Bernatowicz G., Niemi P. (1991): Untersuchungen zur Analyse von Schallsignalen bei der Holz Trocknung, *Holzforstung und Holzverwertung* Nr. 5/1991 99-100.
- Bienfait J.L.(1926): Relation of the manner of failure to the structure of wood under compression parallel to the grain. *J. Agron. Res.* 33:183-194.
- Bodig J. (1965): The effect of anatomy on the initial stress-strain relationship *For. Prod. Jour.* May 1965: 197-202 p.
- Bodig J., Jayne B. (1982): *Mechanics of Wood and Wood Composites* Van Nostrand Reinhold Company Inc. 289-302 p.
- Booker, J.D. (1994): Acoustic emission and surface checking in Eucalyptus renans boards during drying. (*Holz als Roh-und Werkstoff* 52)
- Booker, J.D.- Doe, P.E. (1995): Acoustic emission related to strain energy during drying of Eucalyptus regnans boards. *Wood Sciens and Technology* 29. 145-156.
- Breese, M.C. - Zhao, S. - Mcleod, G. (1995) : The use of acoustic emissions and steaming to reduce checking during the drying of European oak. (*Holz als Roh-und Werkstoff* 53 )
- Boutelje J.(1962): The relationship of structure to transverse anisotropy in wood with reference to shrinkage and elasticity. *Holzforschung* 16: 33-46.
- Bucur V. (1984) : Relationship between grain angle of wood specimens and ultrasonic velocity; *Catgut Acoust. Soc. Newslett.* no. 41, 30-35.
- Choi D., C t\_ W.A., Hanna R.B.(1990): Quantification of compression failure propagation in wood in relation to its structure using digital image pattern recognition. *IAWA - IUFRO Wood Anatomy Symposium* 1990.
- Cote, W.A., Hanna R.B.(1983): Ultrastructural characteristics of wood fracture surfaces. *Wood Fib. Sci.* 15(2): 135-163.
- Czigány T. (1997.) A károsodási zóna kialakulása és a repedésterjedés erősített polipropilén rendszerekben BME. PhD értekezés.
- Cyra, G. - Tanaka, C. - Nakao, T. (1996): On line controll of router feed speed using acoustic emission. (*Forest Products Journal* Vol. 46, No. 11\12)
- Debaise G.R., Porter A.W., Pentoney R.E.(1966): Morphology and mechanics of wood fracture. *Materials Research and Standards* 6(10): 493-499.

- Debaise G. R. (1970): Mechanics and morphology of wood shear fracture. Ph.D. dissertation, Dept. of Wood Products Engineering, State University College of Forestry at Syracuse University. 1972. Morphology of wood shear fracture. *J. Materials* 7(4):568-572.
- Dill-Langer G. (2003): Location of Acoustic Emission Sources in Timber Loaded Parallel to Grain; ; Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood 179-186.
- Dinwoodie J.M.(1966): Induction of cell wall dislocations (slip planes) during the preparation of microscopic sections of wood. *Nature* 212: 525-527.
- Dinwoodie J.M.(1973): Failure in timber. Part II. The angle of shear through the cell wall during longitudinal compression stressing. *Wood Sci. Technol.* 8: 56-67.
- Dinwoodie J.M.(1978): Failure in timber. Part III. The effect of longitudinal compression on some mechanical properties. *WoodSci. Technol.*12: 271-285.
- Elbeck J., Hemmer K. (1986): Erfassung, systematische Auswertung und Ermittlung von Grundlagen über das Zusammenwirkwn von langs-, quer-, und schubspannungen bei fehlerfreiem und fehlerbehaftetem Nadelholz. Universität Karlsruhe s. 271-272
- El-Osta M., Lotfy M., Wellwood R.W (1972): Short-term creep as related to microfibril angle. *Wood Fib.* 4(I): 26-32.
- Erickson, H. D. (1955): Tangential shrinkage of serial sections within annual rings of Douglas and western redcedar. *Hor. Pcod. Jour.* 5 (4) : 241-50.
- Frey-Wyssling A. (1953): Über den Feinbau der Stauchlinien in überbeanspruchtem Holz. *Holz-Roh Werkstoff:* 11(7): 283-388.
- Fujii, Y. - Noguchi, M. - Imamura, Y. - Tokoro, M (1990): Using acoustic emission monitoring to detect termite activity in wood. ( *Forest Prducts Journal* Vol.40, No. 1. )
- Garg,A.,Ishai,O.(1985): Characterization of damage initiation and propagation in graphite/epoxy laminates by acoustic emission . *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 22.No.4.
- Griffith A. (1920): The phenomena of rupture and low in solids. *Philosoph. Trans. Royal Soc. London, Sec A,* 221: 163-198.
- Groom,L., Polensek, A.(1987): Nondestructive prediction of load-deflection relations for lumber *Wood and Fiber Science* 19(3)
- Hansel,A., Niemz,P. (1980): Anwendung der Schallemissziionsanalyse zur Untersuchung von Bruch und Kriechvorgangen in Werkstoffen aus Holz. *Holztechnologie.-Leipzig* 21/2

- Hansel, A., Niemz, P. (1988): Untersuchungen zur Ermittlung wesentlicher Einflussfaktoren auf die Schallemission von Vollholz und Holzwerkstoffen. Holztechnologie.-Leipzig 29/ 2
- Hansel, A. - Niemz, P. (1989): Untersuchungen zur Schallemission von Holzwerkstoffen bei Biegebeanspruchung. ( Holztechnologie.-Leipzig 30/2)
- Hartig R., Weber R.(1888): "Das Holz der Buche in anatomisch-physiologischer, chemischer und forstlicher Richtung." Springer Verlag, Berlin.
- Hoffmeyer P (1993): Non-linear creep caused by slip plane formation. Wood Sci. Technol. 27: 321-335. Hoffmeyer P, Hanna. R.B. 1989: Electron beam damage during testing of wood in the SEM. Wood Sci. Technol. 23: 211-214.
- Hoffmeyer P, Davidson R.W. (1989): Mechano-sorptive creep mechanism of wood in compression and bending. Wood Sci. Technol. 23: 215-227.
- Honeycutt, R.M.- Skaar C. - Simpson W.T. (1985): Use of acoustic emissions to control drying rate of red oak. (Forest Products Journal vol.35, No.1.)
- James, W.L. (1961): Effect of temperature and moisture content on internal friction and speed of sound in Douglas fir. For. Prod. J. , 9 : 383-390.
- Jeronimidis, G.1976: The fracture of wood in relation to its structure. Bot. Series Nr. 3: 253-265.
- Kaiser, J. (1953): Untersuchungen über das Auftreten Geräuschen beim Zugversuch. Ph.D. Thesis, München, Technische Hochschule
- Keith C.T.(1971): The anatomy of compression failure in relation to creep-inducing stresses. Wood Sci. 4: 71-82.
- Keith C.T. (1974): Longitudinal compressive creep and failure development in white spruce compression wood. WoodSci. 7(1):1-12.
- Keith C.T., Cote, W.A.(1968): Microscopic characterisation of slip planes and compression failures in wood cell walls. For Prod. J.18(3): 67-74.
- King, E. G.,Jr. (1961): Time-dependent strain behaviour of wood in tension parallel to the grain. For.Prod.Jour. 11(3):156-165.
- Kisser J., Steininger A.(1952): Makroskopische und mikroskopische Strukturänderungen bei der Biegebeanspruchung von Holz. Holz-RohWerkstoff0(II): 415-421.
- Koran Z., Pepelea T.(1981): Mechanical fibre separation under torsional forces. Proceedings of EUCEPA International Mechanical Pulping Conference. Session I: No. 2.
- Koran Z.(1967): Electron microscopy of radial tracheid surfaces of black spruce separated by tensile failure at various temperatures. Tappi 50(2): 60-67.

- Krietsch, T., Bohse, J. (1998): Classification of damage mechanism in fibre composites by acoustic emission Proceedings of 23<sup>rd</sup> European Conference on Acoustic Emission Testing 1998.
- Krug D. Tobisch S. (1995): Nutzbarkeit einzelner Kenngrößen der Schallemissionsanalyse für die Überwachung der Schnittholztrocknung, Holz als Roh- und Werkstoff 53, 253-256.
- Kucera L.J., Bariska M. (1982): On the fracture morphology in wood. Part I. A SEM study of deformations in wood of spruce and aspen upon axial compression load. Wood Sci. Technol.16: 214-259.
- Lai Y-Z., Iwamida T.(1993): Effects of chemical treatments on ultra-high-yield pulping. I. Fibre separation. Wood Sci. Technol. 27: 195-203.
- Molinski, W., Raczkowski, J. and Poliszko, S. (1994): Crack accumulation in wood under cyclic changes of its moisture content as investigated by acoustic emission method. Workshop on service life assessment of wooden structures Technical research Centre of Finland Espoo, Finland 1994.
- Németh Károly (1998) A faanyag degradációja  
Mezőgazdasági szaktudás kiadó, Budapest 1998
- Nimz, P.- Wagner, M. - Theis, K. (1983): Stand und Möglichkeiten der Anwendung der Schallemissionsanalyse in der Holzforschung. (Holztechnologie 24/ 2)
- Niemz P., Kucera L. (1997): Untersuchungen zum Einfluss ausgewählter Strukturparameter von Spanplatten auf die Schallemission bei Biegebelastung Holz als Roh- und Werkstoff 55, 149-152.
- Pellionisz, P. (1992): Akusztikus Emissziós szerkezetvizsgálatok GTE. Bp.
- Poliszko, S., Molinski, W. and Raczkowski, J. (1994) Relationship between water binding energy in wood and its mechanical strength determined by acoustic emission method; ( Workshop on service life assessment of wooden structures Technical research Centre of Finland Espoo, Finland 1994.
- Porter A. W. and R. E. Pentoney. (1966): Morphology and mechanics of wood fracture. Mater. Res. Stand. 6(10):493-499.
- Porter (1972): Prediction of failure of finger joints using acoustic emission . Forest Products Journal vol.22. No. 22.
- Quarles, L. S. (1992): Acoustic emission associated with oak during drying. Wood and Fiber Science 24(1)
- Raczkowski J., Lutomski K. (1999): Detection of early stages of wood decay by acoustic emission technique, Wood Science and Technologie 33 , 353-358.

- Reiterer A., Tshegg S.E. (2000): Mode I fracture and acoustic emission of softwood and hardwood , Wood Science and Technologie 34 , 417-430.
- Rice R., Phillips D. (2001): Estimating the moisture excluding effectiveness of surface coatings on southern yellow pine using acoustic emission technology, Wood Science and Technologie 34, 533-542.
- Rice R., Chunyan Wang (2002): Assesing teh effect of swelling pressures in particleboard and MDF using acoustic emission technology, Wood Science and Technologie 34, 577-586.
- Sakai H, Minamisawa A. (1990): Effect of moisture content on ultrasonic velocity and attenuation in woods; Ultrasonics 28(6), 382-385.
- Schniewind A.P, Ohgama T., Aoki T., Yamada. T. (1982): Effects of specific gravity, moisture content, and temperature on fracture toughness of wood. Wood Sci. IS(2): 101-109.
- Schniewind, A. P. (1959) Transverse anisotropy of wood. Foc. Prod.Jour. 9 (10) : 350-360.
- Scurfield G. Silva S.R., Wold M.B. (1972): Failure of wood under load applied parallel to grain. A study using SEM. Micron 3:160-184.
- Schniewind,A.P., Quarles,S.L. and Lee,H. (1996) Wood fracture, acoustic emission, and the drying process Part1. Acoustic emission associated with fracture Wood Science and Technology 30/1996
- Sell, J.; Zimmermann, T. (1993): Radial fibril agglomerations of the S2 on transverse-fracture surfaces of tracheids of tension-loaded spruce and white fir. Holz Roh- Werkstoff 51: 384.
- Simpson W. (1998): Relationship between speed of sound and moisture content of red oak and hard maple during drying; Wood and Fiber Science 30(4), 405-413.
- Sitkei Gy. (1994) A faipari műveletek kézikönyve; Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó Kft. 1994. 105-140.
- Stupnicki J. (1970): Strukturmodell der Holzzelle zur Untersuchung von Bruchvorgangen. Holztechnologie 11(3): 168-176.
- Suzuki M.(1968): The relationship between elasticity and strength properties and cell structure of coniferous wood. Foc Expt. Sta. Meguro, Tokyo. Bull. 2I2: 89-149.
- Szalai J. (1995): A faanyag és faalapú anyagok anizotróp rugalmasság- és szilárdságtana I. rész A mechanikai tulajdonságok anizotrópiája Hillebrand Nyomda kft. 398 o.
- Szalai, J.; Niemz, P. (2003): The influence of moisture content on the tensile strength behaviour of Norway spruce in the grain direction Holztechnologie 2003 megjelenés alatt

- Surgeon, M. (1998): Damage in cross ply CFRP laminates: correlation between AE signals measured with conventional AE equipment and signals measured with embedded optical fibres, Proceedings of 23<sup>rd</sup> European Conference on Acoustic Emission Testing, Vienna 6-8 May 1998
- Vautrin A., Harris B.(1987): Acoustic emission characterization of flexural loading damage in wood, Journal of Material Science 22, 3707-3717.
- Wassipaul F. (1986): Klima und Schallemissionen bei der Holz Trocknung Holzforshung und Holzverwertung 38 jg. heft 4, 73-79.
- Wardrop A.B., Addo-Ashong F.W. (1963): The anatomy and fine structure of wood in relation to its mechanical failure. CSIRO Aust. Dept. For Prod. Rep. 560. Proc. Tewksbury Symposium on Fracture 169-199.
- Wardrop A.B., Dadswell H.E.(1947): Contributions to the study of the cell wall. 5. The occurrence, structure and properties of certain cell wall deformations. Aust. C.S.I.R.O. Bull. 22I:14-32.
- Wardrop, A. B. (1951): Cell wall organisation and the properties of the xylem. I. Cell wall organisation and the variation of breaking load in tension of the xylem in conifer stems. Aust. J. Sei. Res., B 4(4):391-417. 11:122-127.
- Wewers, M. (1998) Fatigue Damage Growth Models for Quasi- Isotropic CFRP Laminates Formulated Using AE Data Proceedings of 23<sup>rd</sup> European Conference on Acoustic Emission Testing, Vienna 6-8 May 1998
- Wilkes J. (1987): Effect of moisture content on the morphology of longitudinal fracture in Eucalyptus maculata. IAWA Bull. n.s. 8(2): 175-181.
- Youngs R. L. (1957): The perpendicular-Co-grain mechanical properties of red oak as related to temperature, moisture content, and time. U.S. For. Prod. Lab. Rpt. No. 2079. 124 pp.
- Ivanov, Yu. M. (1953): Approximate graphical determination of the boundary between two deformation regions in wood testing-machine P.S.T. Cat. No.164
- Zimmermann, T.(1983): Das Gefüge der Zellwandschicht S2 Untersuchungen mit dem Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop an Querbruchflächen von Fichten- und Tannenholz. Forschungs- und Arbeitsberichte Abt. Holz 115/28. 27 S.
- Zimmermann T., J. Sell 1994: Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an Zugbruchflächen von Fichtenholz Holz als Roh- und Werkstoff 52 : s. 223-229.