

Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola  
Vezetője: **Dr. Roósz András** egyetemi tanár, MTA rendes tagja



# **ROSTIRÁNYÚ TÖMÖRÍTÉS HATÁSA A BÜKK FAANYAG SZERKEZETÉRE ÉS MECHANIKAI TULAJDONSÁGAIRA**

Doktori (Ph. D.) értekezés

**Kuzsella László**

okleveles mérnök-fizikus

Tudományos vezető

**Dr. Bárczy Pál**

egyetemi tanár

Mentor

**Dr. Szabó Imre**

professor emeritus

Miskolci Egyetem  
Műszaki Anyagtudományi Kar  
Polimermérnöki Tanszék  
Miskolc, 2011.

---

*„Hajlítani vagy törni”*

Michael Thonet (1796) [1]

*„A fa természetes, cellás, szálerősítésű, polimermatrixú kompozit”*

J. M. Dinwoodie (1989) [2]

*Jézus mondá: „Ismerd meg amit látsz, és a rejtett dolgok világossá válnak.”*

Tamás evangéliuma

---

---

## Rostirányú tömörítés hatása a bükk faanyag szerkezetére és mechanikai tulajdonságaira

Doktori (Ph. D.) értekezés összefoglalása  
Készítette: Kuzsella László

A fa a legrégebben és napjainkig leggyakrabban alkalmazott szerkezeti anyag. Az életünk minden területén megtalálható. Felhasználása az anyagok közül a legszélesebb körű. Energetikai célú felhasználásától bútort és épületasztalosipari alkalmazásokon át a dísz tárgyakig, sőt a papírgyártásig számtalan területen alkalmazzák, és az ásványkincsek folyamatos csökkenése mellett, megújuló, újratermelődő anyagként ez várhatóan a jövőben is így marad.

Hosszú idők óta folyamatosan kutatták a fa szerkezetét, tulajdonságait és természetesen a kettő kapcsolatát.

A tudomány és a technológia fejlődésével egyre több módszer születik az anyagok szerkezetének és tulajdonságainak megváltoztatására. Nem kivétel ez alól a fa sem. Újabb és újabb technológiák születnek a faanyag megváltoztatására, miáltal alkalmazási területe is folyamatosan bővül.

A fahajlítási technológia már az ókortól ismert. A 19. században Thonet a fahajlítási technológiát nagyipari méretűvé fejlesztette ezzel forradalmat robbantott ki a bútorgyártásban.

A fahajlítási technológia történetében hasonló fejlődést jelent a fa rostirányú tömörítésének felfedezése. A tömörített fa előnye többek között, hogy

- környezetbarát módon – vegyszerek alkalmazása nélkül állítható elő,
- hidegen formázható, és a körülményektől függően (tárolási hőmérséklet és relatív páratartalom), több hónapig hajlítható marad,
- nagyobb mértékű alakváltozást elvisel a fa, és a tér minden irányában hajlíthatóvá válik,
- a tömörített fa hajlítása melegítés nélkül és egyszerű eszközökkel elvégezhető.

A tömörítés hatására a faanyag mikroszerkezete megváltozik, aminek eredményeképpen a faanyag tulajdonságai drasztikusan megváltoznak. A mikroszerkezet és a tulajdonságok megváltozásának vizsgálata elengedhetetlen a rostirányú tömörítés technológiájának fejlesztéséhez.

- ➔ A munka során célul tűztem ki a rostirányban tömörített bükkfa mechanikai tulajdonságainak feltérképezését roncsolásos és roncsolásmentes módszerekkel.
- ➔ Célul tűztem ki, hogy felfedem a tömörítés mértéke milyen hatással van, hogyan befolyásolja a legfontosabb tulajdonságokat. A roncsolásmentes módon meghatározott dinamikus jellemzőket összevettem a statikus módszerekkel meghatározott jellemzőkkel.
- ➔ Célom volt, hogy megtaláljam a rostirányú tömörítés hatását a mikroszerkezetben, ami a tulajdonságok megváltozására adhat magyarázatot. Továbbá célom volt, hogy pásztázó elektronmikroszkóp segítségével a mikroszerkezetben végbement változást számszerűen határozzam meg a rostirányú tömörítés mértékének függvényében.
- ➔ Célul tűztem ki, hogy a gyakorlatban alkalmazott eljárással bizonyítsam a tömörített bükk kiemelkedő hajlíthatóságát a tömörítetlen bükkal szemben.

---

# The Effect of Longitudinal Compression on the Structure and Mechanical Properties of Beech Wood Material

Ph.D Dissertation Abstract

Author: László Kuzsella

Wood is one of the most frequently used structural materials. It is widely applied in all fields of everyday life. Due to its low price, availability and just simply its beauty, it is hard to find any application where wood is not used.

The structure and the properties of wood and also their connection have been studied for a long time. With the improvement of science and technology a high number of applications have emerged to change the structures and properties of almost all materials. Wood is not an exception either with new technologies to change its properties since its area of application has continuously been extended.

The technology of hot steam bending has been applied since ancient times. In the 19<sup>th</sup> century Michel Thonett expanded this technology to industrial size, which resulted in a revolutionary change in furniture manufacturing. A similar improvement in this technology was the discovery of compression in fibre direction. This process changes the properties of the wood material and results in a number of new applications.

The compression technology has numerous advantages:

- It can be produced by means of an environment-friendly process without adding any chemicals.
- It can be cold formed and remains flexible for several months.
- It is able to resist major deformation (much more than without compression) and it becomes flexible in each direction, the deformation is much less determined by the orientation as is usual in the case of wood.
- The bending of compressed wood can be performed with simple technologies and with less energy.

The macroscopic compression causes microstructural changes, which result in changing the properties of wood to a large extent. The study of the microstructural changes is essential to improve the technology of wood compression.

The objectives of my research project are as follows:

- ➔ to discover and map the mechanical properties of compressed wood with both destructive and non-destructive methods
- ➔ to discover the effect of the extent of compression on the mechanical properties. The scope of my study includes how the effect of the compression can be calculated preliminarily, and how the results from the dynamic method compare to the ones deriving from the static method
- ➔ to find the structure change caused by the compression and give quantitative method based on SEM micrographs
- ➔ to test and prove the exceptional formability of compressed wood with the help of a special technological method.

---

## **Die Wirkung der Kompression in Faserrichtung an die Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften der Buche**

Zusammenfassung von der Ph. D. Dissertation  
vorgelegt von: László Kuzsella

Holz ist das älteste und bis zum heute am öftesten angewandte Konstruktionsmaterial. Es ist an allen Lebensgebieten erfindbar und verfügt über den breitesten Verwendungskreis. Es wird verwendet an unzähligen Gebieten, von der Energetikanwendung an durch die Möbel- und Tischlerindustrie bis zum Schmuckstücke, sogar an dem Gebiet des Papierproduktions, und neben den immer abnehmenden Mineralien Holz bleibt reproduktives Material, was seine breite Verwendung auch in Zukunft versichern kann.

Seit lange wurde die Struktur und Eigenschaften des Holzes und natürlich die Zusammenhänge zwischen denen geforscht.

Mit der Entwicklung der Wissenschaft und der Technik wurden immer mehrere Methoden erarbeitet für die Veränderung der Strukturen und Eigenschaften der Materialien. Holz ist auch keine Ausnahme. Es wurden immer neueren Techniken geboren um das Holz zu verändern, wodurch seine Anwendungsgebiet sich auch verbreiten kann.

Die Holzbiegungstechnik ist schon seit dem Altertum bekannt. In dem 19. Jahrhundert wurde die Holzbiegungstechnik durch Thonet großindustrialisiert, und damit in Möbelfabrik Revolution ausgesprengt. In der Geschichte der Holzbiegungstechnik bedeutet die Erfindung der Kompression in Faserrichtung des Holzes eine ähnliche Entwicklung. Die Vorteile des kompressierten Holzes sind zwischen den anderen:

- umweltfreundlich – ohne zusätzliche Chemikalien,
- kalt biegsam abhängig von dem Umständen (Temperature und relative Feuchtigkeitsgehalt) durch mehreren Monate lang,
- das Holz kann größere Verformungen ertragen, und kann in alle drei Richtungen des Räumes gebogen werden,
- Die Biegung des kompressierten Holzes kann ohne Erwärmung und mit einfachen Geräte durchgeführt werden.

Durch der Kompression die Mikrostruktur von dem Holz verändert sich, wodurch die Eigenschaften des Holzes werden drastisch verändert. Die Prüfung der Veränderung der Mikrostruktur und der Eigenschaften ist unabdingbar für die weitere Entwicklung der Technik von der Kompression in Faserrichtung.

- ➔ Während der Arbeit mein Ziel war das Mappieren von den mechanischen Eigenschaften der in Faserrichtung kompressierten Buche durch zersetzenden und zerstörungsfreien Prüfmethode.
- ➔ Als Ziel habe ich die Analyse ausgesetzt, wie das Ausmass der Kompression die wichtigsten Eigenschaften beeinflussen kann. Die durch zerstörungsfreien Methoden bestimmten dynamischen Eigenschaften wurden mit den Kennwerten von der statischen Prüfung verglichen.
- ➔ Mein weiteres Ziel war die Wirkung der Kompression in Fasserrichtung an die Mikrostruktur zu finden, und die Änderung der Eigenschaften zu erklären. Nebenbei mein Ziel war durch scanning elektron microscope die Veränderungen in den Mikrostruktur als Zahl zu bestimmen in Abhängigkeit von dem Ausmass der Kompression.
- ➔ Als Ziel habe ich weiterhin ausgesetzt, mit in dem Praxis angewandten Verfahren zu prüfen und beweisen, die ausgezeichnete Biegsamkeit der kompressierten Buche entgegen der unkompressierten.

---

## **Efecto de la compresión de la madera de haya en la dirección de las fibras sobre la estructura y las propiedades mecánicas**

Resumen de la tesis doctoral realizada por László Kuzsella

La madera es la materia estructural más empleada desde los tiempos remotos hasta la actualidad. Se encuentra prácticamente en cualquier campo de nuestra vida y su empleo se halla muy generalizado. Se utiliza en innumerables campos como la ebanistería, carpintería de obras, pasando por los objetos de adorno o la fabricación de papeles. Con la reducción continua de los minerales, como es una materia renovable y reproducible, se espera que en el futuro quede de esta forma. Hace ya mucho tiempo que se investiga la estructura, las características de la madera y naturalmente la relación entre éstas. Con el desarrollo de la ciencia y la tecnología han aparecido cada vez más métodos para cambiar la estructura y las características de los materiales. La madera en este sentido, tampoco es una excepción, y han surgido nuevas tecnologías para modificar su estructura y propiedades para lograr que sus aplicaciones sean mayores.

La técnica de flexión de la madera es conocida ya desde antiguo. En el siglo XIX Thonet desarrolló el método para producir el doblado en caliente de la madera (flexión), logrando una auténtica revolución en la fabricación industrial de muebles. En el desarrollo de la tecnología de la flexión tiene igualmente mucha importancia el descubrimiento de la compresión de la madera en la dirección de las fibras. Algunas de las ventajas de la madera comprimida son las siguientes:

- Puede producirse de una manera ecológica sin necesidad de usar productos químicos.
- Puede ser curvada en frío y dependiendo de las circunstancias (temperatura de almacenamiento y contenido de vapor relativo) mantiene su capacidad de ser flexible durante meses.
- La madera puede sufrir un cambio de grandes escalas y hacerse maleable en todas las direcciones del campo.
- La flexión de la madera comprimida puede producirse sin calentamiento y con instrumentos simples.

Por la influencia de las fuerzas de compresión la microestructura de la madera sufre importantes cambios que se traducen en un cambio drástico de sus características. El análisis de los cambios generados en la microestructura y sus propiedades es imprescindible para el desarrollo de la tecnología de la compresión en la dirección de las fibras.

- ➔ A lo largo del presente trabajo una meta importante fue el estudio de las propiedades mecánicas de la madera de haya comprimida en la dirección de crecimiento de las fibras por métodos de análisis destructivos y no destructivos.
- ➔ El objetivo fundamental consistió en descubrir cómo influía la intensidad de la compresión en las características más importantes. Comparé las características dinámicas definidas por el método destructivo con las definidas por los métodos estáticos.
- ➔ Fue un objetivo prioritario encontrar correlaciones entre el efecto de la compresión en dirección de fibras con la microestructura que explicaran el cambio sufrido en sus características mecánicas. Asimismo, he querido definir numéricamente el cambio que sucede en la microestructura con el microscopio electrónico de barrido, en función de la medida de la compresión en la dirección de las fibras.
- ➔ Por último, se evaluaron las conclusiones obtenidas sobre la compresión de la madera con un método empleado en la práctica que también sirviera para demostrar la flexibilidad de la haya comprimida frente a la no comprimida.

---

## PROLÓGUS

Jelen disszertáció a faanyag rostirányú tömörítéséről szól és egy olyan vizsgálatsorozat eredményeit mutatja be, amely öt évvel ezelőtt kezdődött. Az érdemi vizsgálatokat hosszú előkészítő munka, sokirányú tudásgyarapítás és sok előkísérlet előzte meg.

Hat alkalommal végeztem fatömörítő technológiai munkát. Az egyes tömörítéseket követő vizsgálatok mindig újabb kérdéseket eredményeztek, ami a minta előkészítés módjának a megváltoztatásához vezetett és új kísérlet lefolytatását követelte. Egy példa, a maradó alakváltozás hosszmenti inhomogenitásának a vizsgálata. Az első két zsugorításnál a mintadarabokat makroszkópiusan homogénnek tételeztük fel, s csak az eredmények birtokában merülhetett fel az inhomogenitás gyanúja. Ennek a kérdésnek az eldöntésére a harmadik zsugorítási kísérletnél került sor. A méréshez a tömörítendő farúd felületére, a hossz-tengely mentén ekvidisztáns vonalhálózatot vittünk fel. A vonalhálózat torzulásait a tömörítés után lemérve, a maradó alakváltozások lokálisan is mérhetők. De a hálózat felviteli módszer kikísérletezése sem volt egyszerű. Először filctollat használtam a jelölésekhez. De a tömörítést megelőző gőzölés közben a jelölő anyag a rostokba infiltrálódott, szétterjedt és a jel elmosódott. A megoldás végül a grafit ceruza lett. A szerszámfelületen elmozduló mintafelületen lévő vonalak elkenődését teljesen megakadályozni azonban így sem lehetett.

Ilyen egyszerű problémából számos akadt. Magam programoztam a tömörítőgép PLC-jét, továbbfejlesztettem az ultrahangos modulus mérés módszerét, végeztem el a fa minták előkészítését az elektronmikroszkópos vizsgálathoz. Az egyes kísérletek hibáit újabb tömörítéssel és azokon a mintákon végzett újabb mérésekkel lehetett korrigálni, és e miatt tartott a munka öt évig.

Aki olvassa ezt a disszertációt, kérem, gondoljon arra, hogy bár a benne szereplő eredmények „csupán” egyetlen tömörítési széria kiterjedt vizsgálatainak az eredményei, de a módszerek kidolgozásához öt megelőző vizsgálat-sorozatra volt szükség.

---

# TARTALOMJEGYZÉK

<b>PROLÓGUS</b>	<b>5</b>
<b>TARTALOMJEGYZÉK</b>	<b>6</b>
<b>JELÖLÉSEK JEGYZÉKE</b>	<b>9</b>
<b>1. BEVEZETÉS, AZ ÉRTEKEZÉS CÉLJA</b>	<b>12</b>
1.1. Célkitűzések összefoglalása	13
<b>2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS</b>	<b>14</b>
2.1. A fa szerkezete, molekuláris-, mikroszkópikus-, makroszkópikus felépítése	14
2.1.1. A fa molekuláris felépítése	14
2.1.1.1. Elemösszetétel	14
2.1.1.2. Makromolekuláris felépítés	14
2.1.1.3. Cellulóz	15
2.1.1.4. Hemicellulóz	17
2.1.1.5. Lignin	18
2.1.2. A fa mikroszerkezete	19
2.1.2.1. A sejt	19
2.1.2.2. A sejtfa szerkezete	19
2.1.2.3. Tracheidák és tracheák	20
2.1.2.4. Parenchimatikus sejtek	21
2.1.2.5. Farost- vagy libriform sejtek	21
2.1.3. A fák makroszkópos felépítése	22
2.1.3.1. Kéreg	22
2.1.3.2. Kambium	22
2.1.3.3. Évgyűrűk	22
2.1.3.4. Bél és bélsugarak	23
2.1.3.5. Geszt és szíjacs	24
2.1.4. A faanyag mechanikai tulajdonságait befolyásoló tényezők	25
2.1.5. Bükkfa ( <i>Fagus Sylvatica</i> L.)	27
2.2. Faanyag hajlítása	29
2.3. A faanyag rostirányú tömörítése	30
2.3.1. A rostirányú tömörítésre alkalmas faanyag	30
2.3.2. A faanyag méretre szabása	30
2.3.3. Hidrotermikus kezelés (plasztifikálás, lágyítás)	30
2.3.4. Tömörítés	31
2.3.5. A tömörített faanyag előnyei	31
2.4. A faanyag akusztikus vizsgálata	32



2.4.1.	Roncsolásmentes vizsgálatok	32
2.4.1.1.	Vizuális faanyag-osztályozás	32
2.4.1.2.	Szilárdságbecslő módszerek	33
2.4.1.3.	Hibahely-lokalizáló megoldások	33
2.4.2.	Dinamikus viselkedés elméleti modelljei, rezonancia technikák	33
2.4.3.	Rezgés csillapodása, logaritmusos dekrementum	35
2.4.4.	Az ultrahangos vizsgálat	36
2.4.4.1.	Alapfogalmak	36
2.4.4.2.	Az ultrahang gerjesztése	37
2.4.4.3.	A dinamikus rugalmassági modulus meghatározása a hang terjedési sebességének segítségével	38
2.4.5.	A dinamikus rugalmassági modulus mérése hajlítórezgésekkel	38
2.4.5.1.	Rayleigh – Timoshenko – elmélet	39
2.4.5.2.	Euler / Saint-Venant elmélet	39
2.4.6.	A dinamikus torziós rugalmassági modulus	40
2.4.7.	ASTM	40
2.4.7.1.	Dinamikus hajlító rugalmassági modulus meghatározása az ASTM szerint	41
2.4.7.2.	Dinamikus torziós rugalmassági modulus meghatározása az ASTM szerint	41
2.5.	A faanyag mechanikai tulajdonságainak meghatározása	42
2.5.1.	Faanyag statikus hajlítoszilárdságának és statikus rugalmassági modulusának meghatározása hárompontos hajlító vizsgálatokkal	42
2.5.1.1.	Faanyag rugalmassági modulusának meghatározása	43
2.5.2.	Faanyagok ütő-hajlító szilárdságának meghatározása	44
2.5.2.1.	Ütő-hajlító vizsgálat töreteleinek elemzése	47
<b>3.</b>	<b>VIZSGÁLATOK ÉS EREDMÉNYEK</b>	<b>48</b>
3.1.	A mintadarabokon végzett vizsgálatok kronológiájukat tekintve	49
3.2.	A hasáb méreteinek változása rostirányú tömörítés hatására	50
3.3.	Ultrahangos vizsgálat	53
3.3.1.	Rostirányú ultrahangos vizsgálat kivitelezése	53
3.3.2.	Rostirányú ultrahangos vizsgálatok eredményei	54
3.3.2.1.	Sugár- és húrirányú ultrahangos vizsgálatok eredményei	55
3.4.	Dinamikus rugalmassági modulus meghatározása, rezonancia vizsgálatokkal	56
3.4.1.	Longitudinális hullámok	56
3.4.2.	Dinamikus rugalmassági modulus meghatározása hajlító rezgésekkel	58
3.4.2.1.	Euler vs. ASTM hajlító rezgések estén	58

---

3.4.3.	Dinamikus rugalmassági modulus meghatározása csavaró rezgésekkel	60
3.4.3.1.	Elméleti vs. ASTM csavaró rezgések estén	60
3.4.4.	Logaritmikus dekrementum meghatározása	62
3.5.	A rostirányban tömörített faanyag feldarabolása a mechanikai vizsgálatokhoz	64
3.6.	Hárompontos hajlító vizsgálat	65
3.6.1.	Statikus rugalmassági modulus eredményei hárompontos hajlító vizsgálat alapján	66
3.6.2.	Statikus hajlítoszilárdság eredményei hárompontos hajlító vizsgálat alapján	67
3.7.	Statikus rugalmassági modulus becslése dinamikus rugalmassági modulusok alapján	70
3.8.	Dinamikus ütő-hajlító vizsgálat	72
3.8.1.	Ütő-hajlító vizsgálat töreteinek elemzése	76
3.9.	Vizsgálatok összefoglalása	76
3.10.	Inhomogenitás vizsgálatok	77
3.10.1.	Inhomogenitás a hossz tengely mentén	77
3.10.1.1.	Maradó alakváltozás	77
3.10.1.2.	Rostirányú ultrahangos vizsgálatok eredményei	78
3.10.1.3.	Statikus rugalmassági modulus eredményei hárompontos hajlító vizsgálat alapján	80
3.10.1.4.	Maradó alakváltozás és rugalmassági modulus a hossz tengely mentén	80
3.10.1.5.	Statikus hajlítoszilárdság eredményei hárompontos hajlító vizsgálat alapján	82
3.10.1.6.	Dinamikus ütő-hajlító vizsgálat	82
3.10.2.	Inhomogenitás a keresztmetszetben	84
3.11.	Mikroszerkezet vizsgálat	86
3.11.1.	Minta előkészítés mikroszerkezet vizsgálat előtt	87
<b>4.</b>	<b>A MINIMÁLIS HAJLÍTÁSI SUGÁR MEGHATÁROZÁSA</b>	<b>90</b>
4.1.1.	Eredmények, következtetések	93
<b>5.</b>	<b>ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA</b>	<b>94</b>
<b>6.</b>	<b>KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS</b>	<b>96</b>
<b>7.</b>	<b>FELHASZNÁLT IRODALOM</b>	<b>97</b>

---

## JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

a	kinetikus gyorsulás, $\text{m/s}^2$
A	felület, $\text{mm}^2$
$ \bar{a} $	a cellulóz rácselemének nagysága x irányban, nm
$A_{\text{ASTM}}$	empirikus korrekciós tényező, mely a mintadarab szélességének és vastagságának az arányától függ, -
b	a prizmatikus rúd szélessége, mm
$ \bar{b} $	a cellulóz rácselemének nagysága y irányban, nm
$B_{\text{ASTM}}$	empirikus korrekciós tényező, -
c	hossztengelyre merőleges oldalak arányához tartozó konstans, -
$ \bar{c} $	a cellulóz rácselemének nagysága z irányban, nm
E	rugalmassági modulus, GPa
$E_B$	statikus hajlító rugalmassági modulus, GPa
$E_d$	dinamikus rugalmassági modulus, GPa
$E_{dB}$	dinamikus hajlító rugalmassági modulus, GPa
$E_{dB\text{ASTM}}$	ASTM szerinti dinamikus rugalmassági modulus, GPa
$E_{dL}$	dinamikus longitudinális rugalmassági modulus, GPa
$E_{dU}$	ultrahang terjedési sebessége alapján meghatározott dinamikus rugalmassági modulus, rostirányban GPa
$E_{dUR}$	ultrahang terjedési sebessége alapján meghatározott dinamikus rugalmassági modulus, sugárirányban GPa
$E_{dUT}$	ultrahang terjedési sebessége alapján meghatározott dinamikus rugalmassági modulus, húrirányban GPa
F	terhelőerő, N
f	frekvencia, Hz
$f_{B-n}$	az n-edik hajlító módus sajátfrekvenciája, Hz
$f_{T-n}$	az n-edik torziós módus sajátfrekvenciája, Hz
G	torziós rugalmassági modulus, GPa
$G_d$	dinamikus torziós rugalmassági modulus, GPa

---

$G_{dASTM}$	ASTM szerinti dinamikus torziós rugalmassági modulus, GPa
$h$	a prizmatikus rúd vastagsága, mm
$I$	tehetetlenségi nyomaték, $m^4$
$I_p$	poláris tehetetlenségi nyomaték, $m^4$
$k$	lengések száma
$K_T$	torziós keresztmetszeti tényező, $m^4$
$L$	a prizmatikus rúd hossza, mm
$m$	a prizmatikus rúd tömege, kg
$M_{hm}$	hajlítónyomaték maximális értéke, Nm
$n$	polimerizációs fok
$n$	a felharmónikusok sorszáma
$r$	a $dA$ infinitézimális felületelem $z$ tengelytől mért radiális távolság, mm
$R$	a minimális hajlítási sugár, amelynél a fa még biztonságosan (törés-mentesen) hajlítható adott vastagság mellett, mm
$R_{mh}$	hajlítószilárdság, MPa
$t$	idő, s
$T$	periódusidő, s
$T_1$	korrekciós tényező, -
$u$	nedvességtartalom, %
$v$	a hang terjedési sebessége, m/s
$v_{long}$	longitudinális hullám terjedési sebessége adott közegben, m/s
$x$	a prizmatikus rúd hossz tengelye irányában mért távolság, mm
$w$	fajlagos ütőmunka, $J \cdot cm^{-2}$
$\Delta l$	hosszváltozás, mm
$\alpha$	fáziseltolódás szöge, rad
$\beta$	$\bar{a}$ és $\bar{c}$ bázisvektorok közrezárt szöge, °
$\beta$	alaktényező, -
$\beta$	csillapítási tényező, $s^{-1}$
$\gamma_n$	felharmónikustól függő érték, -
$tg\delta$	veszteségi tényező, -

---

---

$\varepsilon$	az F erő hatására a rúd hossztengelyén kialakult relatív alakváltozás, m/m
$\varepsilon$	rostirányú tömörítés mértéke, mm/mm
$\varepsilon_B$	hárompontos hajlítóvizsgálat során a repedéskeletkezésig elviselt alakváltozás, %
$\varepsilon_w$	ütő-hajlító vizsgálat során a repedéskeletkezésig elviselt alakváltozás, %
$\Lambda$	logaritmikus dekrementum, -
$\mu$	Poisson-tényező, -
$\xi$	a z és az y irányú elmozdulás, mm
$\rho$	sűrűség, g·cm <sup>-3</sup>
$\sigma$	az F erő hatására az anyag keresztmetszetében keletkező feszültség
$\varphi$	anatómiai iránytól függő hatványkitevő rugalmassági modulus esetén, -
$\vartheta$	anatómiai iránytól függő hatványkitevő hajlítószilárdság esetén, -

# 1. BEVEZETÉS, AZ ÉRTEKEZÉS CÉLJA

A fa a legrégebben és napjainkig leggyakrabban alkalmazott szerkezeti anyag. Az életünk minden területén megtalálható. Felhasználása az anyagok közül a legszélesebb körű. Energetikai célú felhasználásától bútor és épület asztalosipari alkalmazásokon át a dísz tárgyakig, sőt a papírgyártásig számtalan területen alkalmazzák, és az ásványkincsek folyamatos csökkenése mellett, megújuló, újratermelő anyagként ez várhatóan a jövőben is így marad.

Hosszú idők óta folyamatosan kutatták a fa szerkezetét, tulajdonságait és természetesen a kettő kapcsolatát.

A tudomány és a technológia fejlődésével egyre több módszer születik az anyagok szerkezetének és tulajdonságainak megváltoztatására. Nem kivétel ez alól a fa sem. Újabb és újabb technológiák születnek a faanyag megváltoztatására, miáltal alkalmazási területe is folyamatosan bővül.

A fa hajlítással történő megmunkálásának a forgácsolással szembeni legfőbb előnye, az anyagmegtakarítás és az, hogy az íves alkatrészek előállításakor a kisebb keresztmetszeti méretek mellett nagyobb szilárdság érhető el, mert hajlításkor nem vágjuk el a fa rostjait. [1, 3, 4, 5]. A feldolgozás során nem szakadnak meg a rostok, ezáltal a fa kedvező vízzáró tulajdonsága megmarad és a mechanikai tulajdonságait sem veszíti el, mint forgácsoláskor.

A fahajlítási technológia már az ókortól ismert. Gondoljunk a hajókészítő mesterekre, vagy a kádárok ősi mesterségére. De említhetjük az ősi magyarokat is, akik tűz fölött melegítették a fát, melyből aztán íjat hajlítottak. A 19. században Thonet a fahajlítási technológiát nagyipari méretűvé fejlesztette ezzel forradalmat robbantott ki a bútorgyártásban [1].

A fahajlítási technológia történetében hasonló fejlődést jelent a fa rostirányú tömörítésének felfedezése. A tömörített fa előnye többek között, hogy

- környezetbarát módon – vegyszerek alkalmazása nélkül állítható elő,
- hidegen formázható, és a körülményektől függően (tárolási hőmérséklet és relatív páratartalom), több hónapig hajlítható marad,
- nagyobb mértékű alakváltozást elvisel a fa, és a tér minden irányában hajlíthatóvá válik,
- a tömörített fa hajlítása melegítés nélkül és egyszerű eszközökkel elvégezhető [6].

A tömörítés hatására a faanyag mikroszerkezete megváltozik, aminek eredményeképpen a faanyag tulajdonságai drasztikusan megváltoznak. A mikroszerkezet és a tulajdonságok megváltozásának vizsgálata elengedhetetlen a rostirányú tömörítés technológiájának fejlesztéséhez.

A fa – szerkezetét rendkívüli módon leegyszerűsítve – felfogható természetes, cellás, szál-erősítésű polimermátrixú kompozitként. Ebből következően, Ashby cellás anyagokra kidolgozott elméletét alkalmazva, a fa összes mechanikai tulajdonságát a relatív sűrűsége, vagyis a faanyag tényleges sűrűsége, és a cellafalakat alkotó anyag sűrűségének hányadosa határozza

meg [7]. A cellafalakat, sejtfalak alkotják, melyek tulajdonságai a bennük lévő „szálerősítés”, vagyis a cellulóz fibrillák, és a terhelés által bezárt szögletől függenek [8]. A faanyag tulajdonságai tehát a sűrűségtől és a mikrofibrillaszögletől függenek döntő mértékben. Ez igaz az alacsonyabb sűrűségű, és kis szilárdsággal rendelkező puha fenyőféléktől a nagyon nagy sűrűségű és szilárdságú kemény, lombosfákig.

A szakirodalomban az utóbbi években felfedezhetők olyan publikációk [9, 10], melyek a balsafa (*Ochroma pyramidale*) rostirányú összeroppantása közben végbemenő folyamatokat vizsgálják. A balsafa gyorsan és magasra növekvő lombosfa. Faanyaga nagyon puha és testsűrűsége a legkisebb a faanyagok között. Szerkezete méhsejt szerkezethez rendkívül hasonló, ennek köszönhetően előszeretettel alkalmazzák modellanyagként, mivel a szerkezetben végbemenő változások egyszerűbben, jobban leírhatók. Ám a keményfák rostirányú tömörítéséről nincs fellelhető kutatási eredmény. Viszont, felhasználható módon, ipari méretben eddig csak lombos keményfákat sikerült tömöríteni.

A bükk, lombos keményfa, felhasználása rendkívül elterjedt, a hazai fakitermelés közel 10%-át a bükkösök adják, de még nagyobb jelentőségű a furnér- és rétegeltlemez-gyártásban (75%) és a fűrésziparban (21%). Szerkezete a keményfák között az egyik legszabályosabbnak tekinthető. A fatest szórlikacsú, tehát a korai és késői pászta edényeinek átmérői között nem nagyok a különbségek. Ezért választottam a rostirányú tömörítés hatásainak vizsgálati alanyául a bükkfát (*Fagus Silvatica L.*).

A feladat újszerűsége hozta, hogy az ismert mérési módszerek fejlesztésére is szükség volt. A faanyagok roncsolásos mechanikai vizsgálatára számos magyar és nemzetközi szabvány található [11, 12, 13], és a roncsolásmentes dinamikus jellemzők meghatározásával is egyre gyakrabban találkozhatunk hazai és nemzetközi publikációkban [14, 15, 16, 17]. A roncsolásmentes faanyagvizsgálatok legnagyobb hazai bázisa a Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Karán található. Az ottani oktatóktól rengeteg segítséget kaptam, az ott alkalmazott technikák közül többet átvettem és továbbfejlesztettem. Más anyag típusok vizsgálati módszereit alkalmaztam faanyagok vizsgálatára. Bizonyos vizsgálati módszereknél a szokásos anyagjellemzőkön túl más vizsgálómódszerekből átvett mérőszámokat is meghatároztam és vizsgáltam a tömörítés hatását ezen mérőszámokra is.

## 1.1. Célkitűzések összefoglalása

- ♣ A munka során célul tűztem ki a rostirányban tömörített bükkfa mechanikai tulajdonságainak feltérképezését roncsolásos és roncsolásmentes módszerekkel.
- ♦ Célul tűztem ki, hogy felfedem a tömörítés mértéke milyen hatással van, hogyan befolyásolja a legfontosabb tulajdonságokat. A roncsolásmentes módon meghatározott dinamikus jellemzőket összevettem a statikus módszerekkel meghatározott jellemzőkkel.
- ♥ Célom volt, hogy megtaláljam a rostirányú tömörítés hatását a mikroszerkezetben, ami a tulajdonságok megváltozására adhat magyarázatot. Továbbá célom volt, hogy pásztázó elektronmikroszkóp segítségével a mikroszerkezetben végbement változást számszerűen határozzam meg a rostirányú tömörítés mértékének függvényében.
- ♠ Célul tűztem ki, hogy a gyakorlatban alkalmazott eljárással bizonyítsam a tömörített bükk kiemelkedő hajlíthatóságát a tömörítetlen bükkal szemben.

## 2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

### 2.1. A fa szerkezete, molekuláris-, mikroszkópikus-, makroszkópikus felépítése

#### 2.1.1. A fa molekuláris felépítése

##### 2.1.1.1. Elemösszetétel

A faanyag a *fotoszintézis* végterméke. Ebből következően, a faanyag összetétele a fotoszintézis kiinduló anyagainak, a *szén-dioxidnak és a víznek elemösszetételét* tükrözi. A felépülési folyamat, a fotoszintézis egységessége alapján érthető tehát, hogy különböző éghajlati klímában, eltérő termőhelyi viszonyok mellett, más-más korú fák elemi összetétele csupán kis eltérést mutat. Különböző szerzők szerint a *széntartalom 48,5...50,4%*, az *oxigéntartalom 43,4...44,5%* és a *hidrogéntartalom 5,8...6,3%* között mozog [18, 19].

A faanyag a biokémiai folyamatok eredményeképpen nitrogéntartalmú vegyületeket is tartalmaz, ezeknek mennyisége azonban csekély, így a faanyag nitrogéntartalma is alacsony, 0,04...0,26% közötti.

A faanyag szerves összetevőinek meghatározása a faanyag elégetése után visszamaradt hamutartalom elemzésével történik. Száraz fára vonatkoztatva a hamutartalom 0,1...0,5% között változik. Legfőbb összetevője a kalcium, kálium és a magnézium. Száraz fára vonatkoztatva a kalcium mennyisége 800...1100 ppm, kálium mennyisége 200...1000 ppm, és a magnéziumé 100...200 ppm között van. Egyéb nyomelemek (Ba, Al, Fe, Zn, Cu, Ti, Pb Ni, V, Co, Ag, Mo, Au) csupán 50 ppm alatti mennyiségben vannak jelen a faanyagban.

A faanyag elemi összetételéből a kémiai felépítésére nem lehet következtetni. Egyértelmű az összetétel alapján, hogy a faanyag *szerves anyag*, melynek termikus stabilitása korlátozott. Ezt igazolja a faanyag finomszerkezet-vizsgálata is.

##### 2.1.1.2. Makromolekuláris felépítés

A faanyag elemanalízise, de egyszerű vizuális vizsgálata is rámutat, hogy nem egy homogen felépítésű rendszerrel van dolgunk. A mikroszkópos és elektronmikroszkópos vizsgálat pedig egyértelműen megmutatja, hogy a fában különböző funkciót ellátó morfológiai részek különíthetők el, amelyek további eltérő szerkezetű egységekből épülnek fel, szálak, rostok, hálós egységek fedezhetők fel, ami a makromolekuláris felépítésre utal. A faanyag tehát összetett *morfológiai szerkezetű, komplex makromolekuláris rendszer* [20].



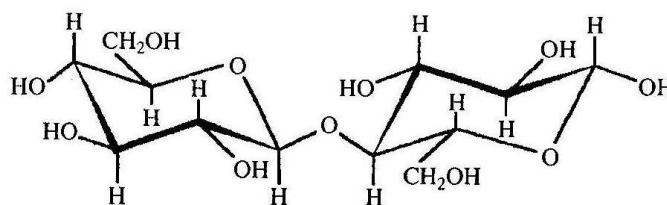
Az iparilag felhasznált fa anyagát döntően az elszáradt sejtfalak alkotják. A sejtfal anyaga strukturálisan és kémiai is három vegyületcsoportból áll. A vázanyagot képező *makromolekuláris cellulózból*, a döntően kötőanyag szerepet betöltő aromás szerkezetű *ligninből*, valamint a sejtfalban a cellulózzal szoros kapcsolatban lévő és a ligninnel is kémiai kötést képező szénhidrátokból, a *hemicellulózból*, vagy más néven *poliózokból* áll.

Az egyes komponensek önmagukban is kompakt, inter- és intramolekuláris kötésekkel összekapcsolódó rendszert képeznek, de egymáshoz is kapcsolódnak elsődrendű és másodrendű kémiai kötésekkel. Ez a kapcsolódás a makromolekuláris jellegből adódóan az esetleges gyengébb kémiai kötések ellenére, a nagyszámú kötés miatt elég erős lehet.

### 2.1.1.3. Cellulóz

A faanyagban lévő alkotóelemek szétválasztására (elválasztására) a XX. század elejétől kezdve számos kémiai eljárást dolgoztak ki. Ezen eljárások alapján sikerült meghatározni, hogy *a kémiaiilag tiszta cellulóz a  $\beta$ -D-glükóz egységekből felépülő poliszaharid*, melyben az ismétlődő egység az 1,03 nm hosszúságú celliobióz (2.1. ábra. és 2.2. ábra.).

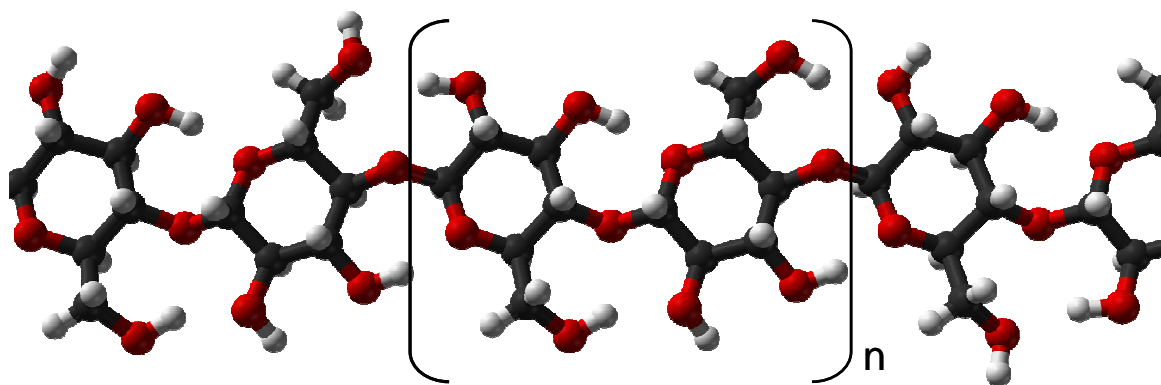
A celliobiózon belül a glükóz egységek a legkisebb energiát jelentő székformát veszik fel és glikozidos kötéssel kapcsolódnak.



2.1. ábra.

A celliobióz molekula szerkezete

A cellulóz tehát lineáris makromolekula, *polimer*. A cellulózmolekula hossza a polimerizációs fok ( $n$ ) függvénye (tehát  $n$ -szer 1,03 nm). A természetes cellulóz polimerizációs foka pamut esetében 14 ... 15000, facellulóz esetében 8 ... 10000 közé esik.



2.2. ábra.

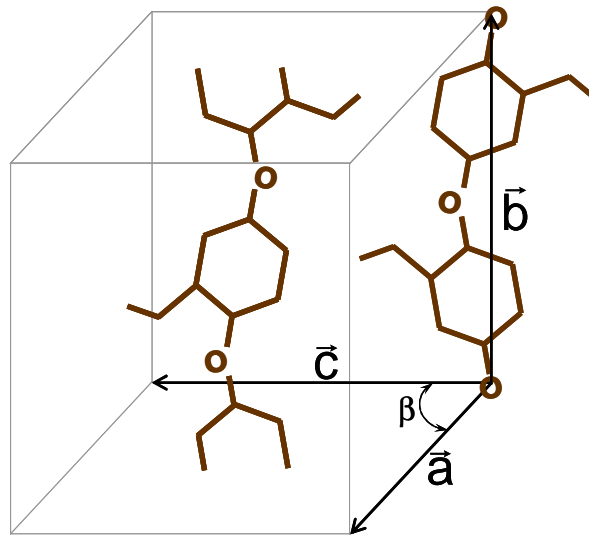
A cellulóz molekula szerkezete

A cellulózmolekula fonalszerű felépítése szabályos elrendeződést sejtet.

Röntgen diffrakciós vizsgálatokkal bizonyították, hogy a természetes, natív cellulózban – származási helytől függetlenül – azonos kristálystruktúra ismerhető fel, melyet cellulóz-I-nek neveztek el. A cella alapvető méreteit először Mayer és Misch (1937.) határozták meg, majd mások pontosították. Az elemi cella kristálytanilag monoklin rács [21, 22], melynek méretei

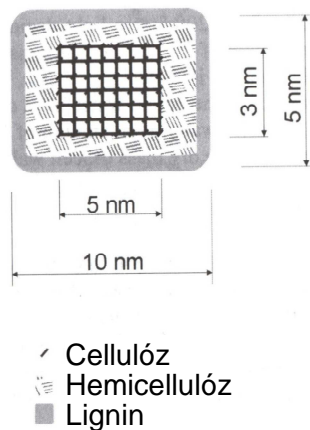
$|\vec{a}|=0,785 \text{ nm}$ ;  $|\vec{b}|=1,033 \text{ nm}$ ;  $|\vec{c}|=0,814 \text{ nm}$  és a  $\beta=84^\circ$ .

A következő, 2.3. ábra a cellulóz I rácselemét mutatja be. Az ábrában az „O” az egységek közötti oxigénatomot jelöli.



**2.3. ábra.**  
A cellulóz I rácseleme

A celliobióz egységek az  $bc$  síkban helyezkednek el, hossz tengelyük a  $\vec{b}$  vektorral párhuzamos. Két molekula alkotja az elemi alakzatot. Egyik a monoklinrács élén, és egy fordított állású az  $ac$  sík közepén. A cellulóz szerkezetének leírásakor gyakran alkalmazzák a *micella* kifejezést, ami a cellulóz kristály *elemi celláját* jelenti. Az elemi cella annyiban különbözik az ábrában bemutatott rácselemtől, hogy a paralelepipedon  $\vec{b}$  vektorral párhuzamos élein is ábrázoljuk a celliobióz egységeket.

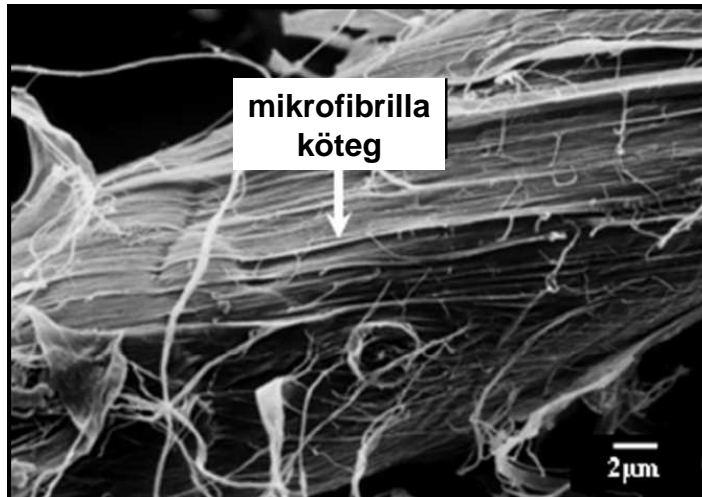


**2.4. ábra.**

A microfibrillák keresztmetszetének sematikus ábrázolása

A cellulóz micellák microfibrillákba (elemi fibrillák) szerveződnek, mintegy 3...10 nm-es keresztmetszettel. Egy microfibrillában mintegy 40-50 cellulóz-molekula található, melyek a központi, kristályos részt alkotják, melyet körbevesz egy hemicellulóz és egy lignin réteg. A 2.4. ábra a microfibrilla keresztmetszetének sematikus ábrázolását tartalmazza.

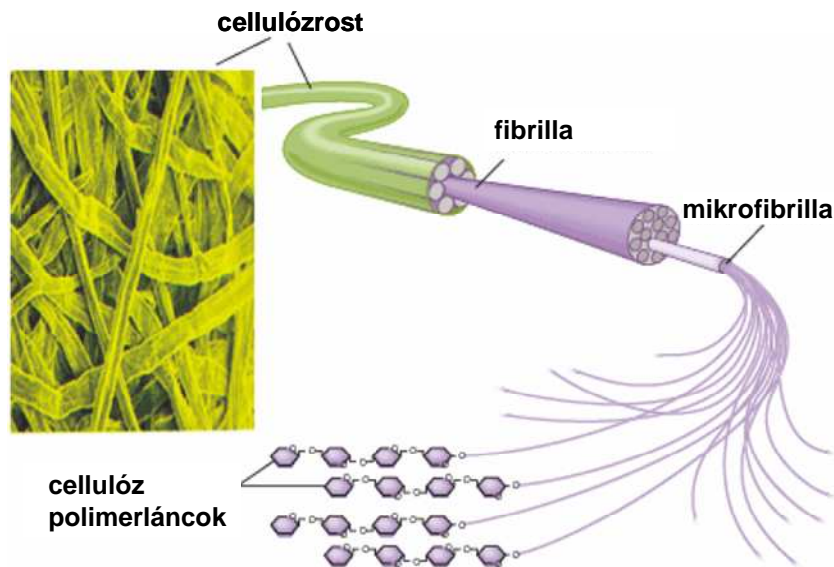
A microfibrillák már elektronmikroszkóp segítségével is láthatóvá tehetők (2.5. ábra.).



2.5. ábra.

Cellulózzrostról készült elektronmikroszkópos felvétel

Az elektronmikroszkópos felvételeken a mikrofibrillák, ún. fibrillákba (makrofibrillákba) agglomerálódott egységekben figyelhetők meg, melyeknek átmérője néhány tized μm, vagyis egy fibrilla ezres nagyságrendű cellulózmolekulát tartalmaz. A következő ábrában a cellulózmolekulák rostokba történő agglomerálódása figyelhető meg.



2.6. ábra.

A cellulózzrost szerkezetének sematikus ábrázolása

#### 2.1.1.4. Hemicellulóz

A fizikai és kémiai tulajdonságaiban a cellulózhoz sok tekintetben hasonlító poliszaharid-részeknek vagyis a *többfajta szénhidrát egységből felépülő, elágazó láncú, könnyen hidrolizálható, lúgokban oldható faanyagkomponenseknek* Schultze (1891.) a *hemicellulóz* (hemi = fél) elnevezést adta. A később alkalmazott *poliózok* elnevezés a kémiai felépítésre jobban utal, de nem foglalja egyértelműen magába a szerkezetileg és tulajdonságokat tekintve is ide sorolandó poliuronsavakat, és poliuronidokat. A *fa-polióz* elnevezést először *Staudinger* és *Reinecke* (1939.) alkalmazta.

A hemicellulóz szerkezeti és fizikai-kémiai szempontból is az átmenetet képezi a cellulóz és a lignin között. Részben beépül a kristályos cellulózba és kapcsolatot teremt a faanyag többi komponensével.

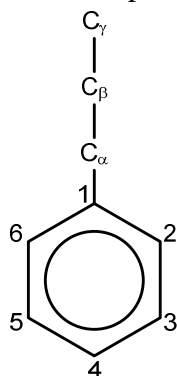
Sokféle hemicellulóz létezik. Ezeket összesen négyféle osztályba sorolhatjuk, xilánok, mannánok, glükánok, galaktánok (ez utóbbihoz tartoznak a pektinek, melyek fontos gélképzők) [23].

### 2.1.1.5. Lignin

A lignin a növényvilágnak a cellulóz után a legnagyobb mennyiségben termelődő és jelentőségű szerves polimer vegyülete. Összetétele, valamint fotoszintetikus úton történő újratermelődése következtében a föld legjelentősebb aromás vegyületforrása.

A különböző fafajokból származó ligninek elemi összetétele nem mutat jelentős eltérést. A széntartalom 58...64%, a hidrogéntartalom 6,1...6,5% és az oxigéntartalom 29...35% között változik.

Szerkezetét tekintve azonban, a különböző fafajokban található lignin összetétel-, és felépítéssel járó sajátosságai, különbözőségei miatt, nehezebben definiálható, mint a többi makromolekuláris fakomponens.



2.7. ábra.

A lignin fenil-propán váza és a szénatomok jelölése

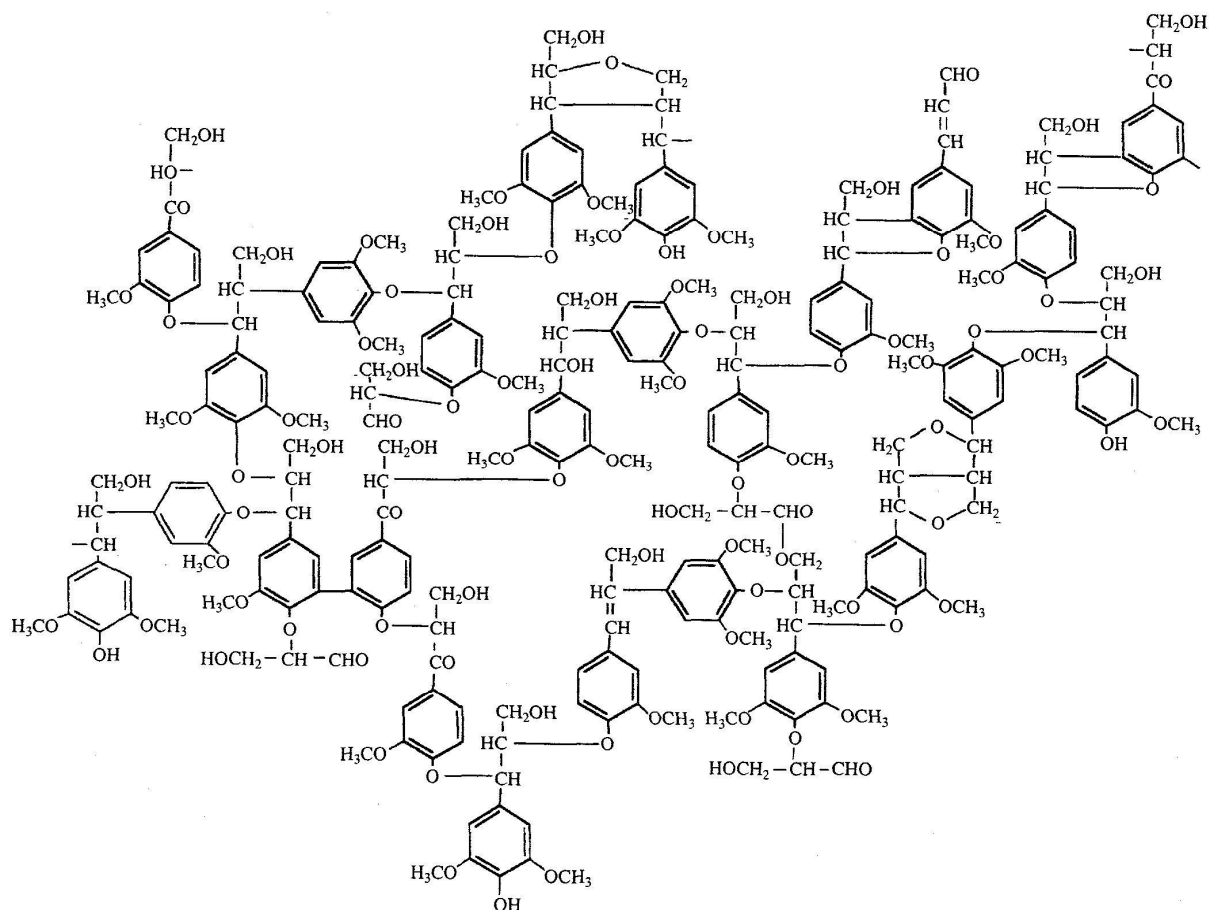
Ám a lignin nagyon komplex felépítése ellenére található benne egy olyan jellegzetes szerkezeti elem, a fenil-propán-egység, melyből a lignin makromolekula struktúrája felépíthető, további metoxilcsoportok ( $-\text{OCH}_3$ ) segítségével.

Az elemi összetételből és a  $\text{C}_6 + \text{C}_3 = \text{C}_9$  fenil-propán bázisra számolva a lignin modellre első közelítésként meghatározható egy összegképlet, melynek legáltalánosabb formája a következő:  $\text{C}_9\text{H}_x\text{O}_y(\text{OCH}_3)_z$ ,

ahol az  $x$ ,  $y$ ,  $z$  indexek a fafajtól függően a következők szerint változhatnak:

$$x = 8,38 \dots 9,03; \quad y = 2,52 \dots 3,30; \quad z = 0,95 \dots 1,49.$$

A természetes lignin elemzése során nyert információk alapján a lignin makromolekula első, többek által elfogadott szerkezeti modelljét Freudenberg alkotta meg 1964-ben, mely 18 fenil-propán egységből épült fel. Majd a számítógépes modellezés fejlődésének köszönhetően 1981-ben Glasser 94 elemből felépítette a fenyő, és 98 egységből a lombosfa lignin szerkezeti modelljét. A következő, 2.8. ábrában, a bükkfa ligninjének Nimz által megalkotott szerkezeti modellje látható.



2.8. ábra.

A bükkfa ligninjének szerkezeti modellje

## 2.1.2. A fa mikroszerkezete

### 2.1.2.1. A sejt

A növények külső megjelenésre nagyon eltérőek lehetnek, abban azonban mind megegyeznek, hogy sejtekből épülnek fel. Általában minden *élő* sejtben megkülönböztetjük a sejtfalet és a sejt belsejét kitöltő színtelen kocsonyás testet, a plazmát és a sejtmagot. A fiatal élő sejt fala a gázok és a víz számára átjárható, folyékony, valamint szilárd szerves élő anyagokból áll.

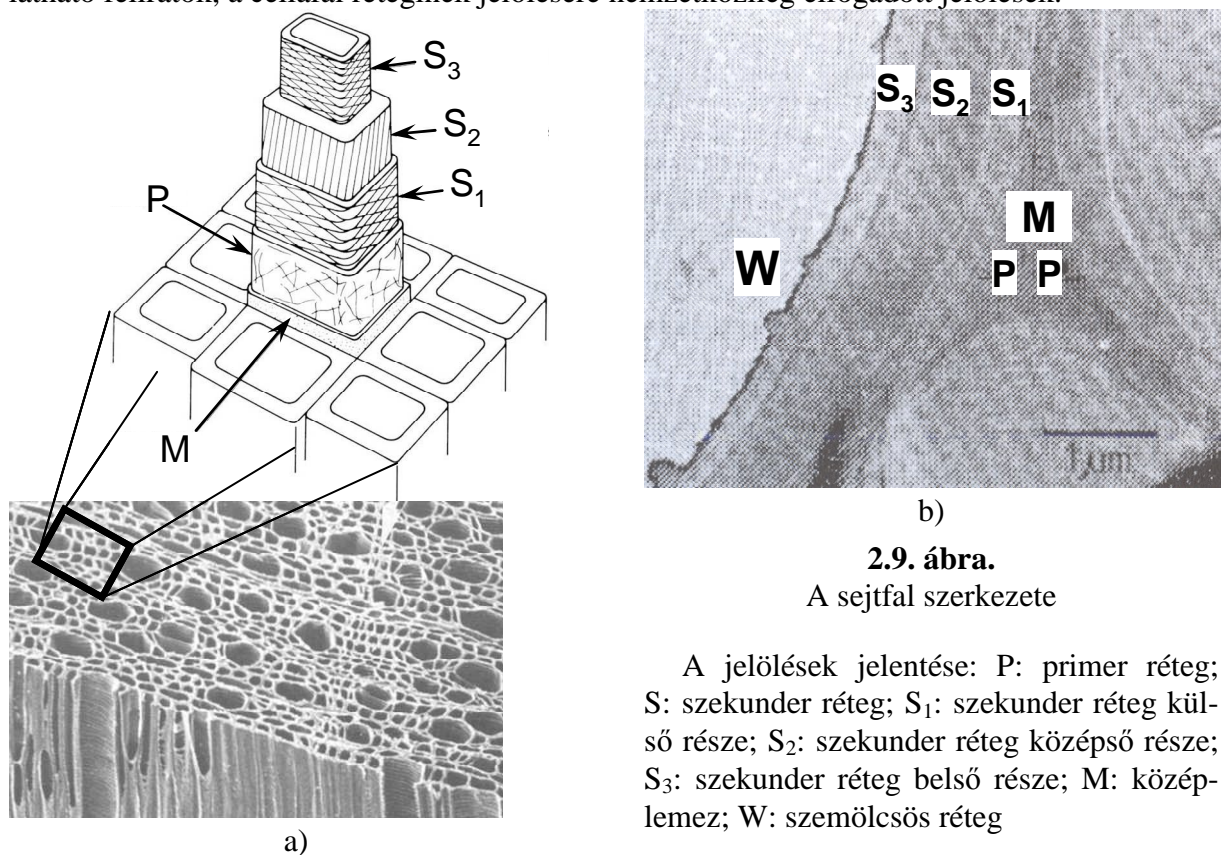
### 2.1.2.2. A sejtfalet szerkezete

A fiatal sejtek sejtfalet rendkívül vékony. A sejtek növekedése az élő protoplazma működésének következménye. A sejtfalet felületi kiterjedésben és vastagságban növekedik. A vastagodás folyamatos, de nem egyenletes a sejt élete folyamán.

A sejtek többségének sejtfalet tartalma korán elhal, sejtfaletaik pedig fokozatosan elfásodnak. Elfásodás közben a cellulózvázba lignin rakódik [24].

A sejtek falai három rétegből állnak, melyek rendkívül nagyszámú, finom, csavarvonal alakú fonalból épülnek fel. A legkülső, a primer réteg igen vékony. A középső, a szekunder réteg, amely a sejtfalet vastagságát leginkább befolyásolja, vastagabb, és benne a mikrofibrilla és fibrilla-nyalábokból álló cellulózzrostok több sorban, váltakozva jobbra és balra csavarodva helyezkednek el. A sejtfaletoknak ez a felépítése a kábel drótjaihoz hasonló. A legbelső, a terciér réteg vékony, és nem minden sejtfaletban van meg.

A 2.9. ábra a.) része sematikus rajz segítségével mutatja be a sejtfal rétegeit, a b.) része bükk sejtfaláról transzmissziós elektronmikroszkóppal készült felvételt mutat be. Az ábrákon látható feliratok, a cellafal rétegeinek jelölésére nemzetközileg elfogadott jelölések.



**2.9. ábra.**

A sejtfal szerkezete

A jelölések jelentése: P: primer réteg; S: szekunder réteg; S<sub>1</sub>: szekunder réteg külső része; S<sub>2</sub>: szekunder réteg középső része; S<sub>3</sub>: szekunder réteg belső része; M: középlemez; W: szemölcsös réteg

A fát alkotó sejtek nem egyformák, hanem rendeltetésüknek megfelelően különböző alakúak. E sokféle sejtet három fő alakra lehet visszavezetni. A víz szállítására szolgáló edények a lombosfáknál és az áledények a fenyőknél, a tápanyagszállításra és raktározásra szolgáló parenchimatikus sejtek és a szilárdítást végző farost – vagy libriform sejtek [2, 25, 26].

### 2.1.2.3. Tracheidák és tracheák

A tracheidák bő üregű, vékony falú sejtek, amelyek általában belül gyűrűs, csavaros, lépcsős stb. vastagodással merevítettek. Az egymás fölött elhelyezkedő tracheidák növekedés közben összeolvadnak, kereszt vagy létraalakú áttörések (2.10. ábra.) keletkeznek közöttük és hosszú, bükk esetében akár méteres hosszúságú egybefüggő csöveket, úgynevezett tracheákat, alkotnak. A tracheákat rostirányban keresztülmetszve a bütümentszeten, apró, akár szabad szemmel is elkülöníthető lukakként láthatjuk (2.10. ábra. és 2.11. ábra.). Ezen lukak vagy régiesen likak, elhelyezkedése alapján a lombosfák gyűrűs vagy szórtlikacsúak közé sorolhatók. A gyűrűslikacsú fákban az évgyűrűk belső határán gyűrű alakban helyezkednek el a tracheák, a szórtlikacsúaknál pedig az évgyűrűben többé – kevésbé egyenletesen elszórva. A tracheáknak az évgyűrűk korai és késői pásztaájában való elhelyezkedése és egymáshoz viszonyított átmérője sok fafajra nézve jellemző és a lombosfák egymástól való megkülönböztetésének alapját képezik. A 2.1. táblázat a tracheák átmérőjét foglalja össze különböző fafajok esetén.

**2.1. táblázat. A tracheák átmérője a különböző fajok esetében**

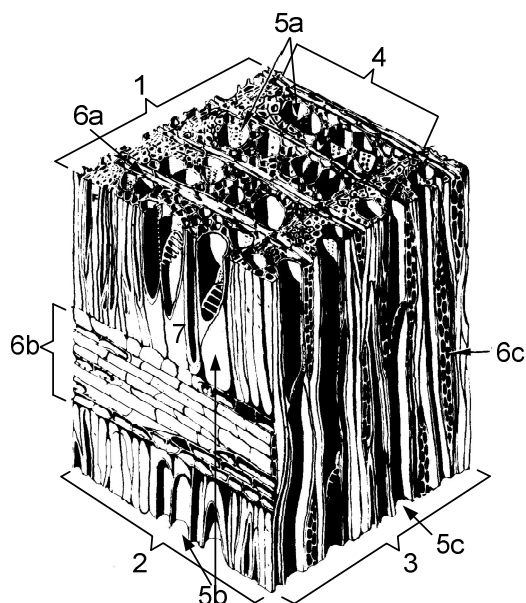
Faj	Tracheák elhelyezkedése	Trachea átmérő, mm
Akác	gyűrűs	0,01 ... 0,40
Bükk	szórt	0,016 ... 0,08
Szil	gyűrűs	0,02 ... 0,34
Nyír	szórt	0,03 ... 0,13
Kóris	gyűrűs	0,03 ... 0,3
Tölgy	gyűrűs	0,035 ... 0,34

**2.1.2.4. Parenchimatikus sejtek**

A parenchimatikus sejtek közé tartoznak a fa parenchima és a belsejtek (2.10. ábra. és 2.11. ábra.). A parenchimatikus sejtek alakja többnyire kocka vagy téglatest, de gyakran hatszög alakú. Faluk fiatal korban vékony, később, különösen azokban, amelyek szilárdítási feladatot is ellátnak, megvastagszik. A fa parenchima sejtek feladata a tápanyagszállítás és raktározás. Fala vékony és korán elhal. Fiatal korban tartalék tápanyagot tartalmaznak, később a gesztetés során levegővel, szerves vagy szervetlen anyaggal telnek meg. Szilárdságuk csekély, ezért könnyen összenyomódnak.

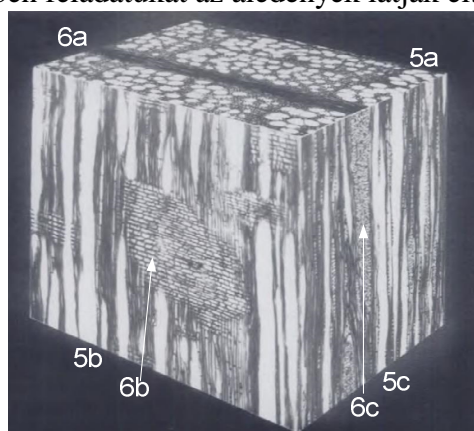
**2.1.2.5. Farost- vagy libriform sejtek**

A farostsejtek feladata a szilárdítás. Alakjuk megnyúlt orsó alakú, végük erősen kihegyezett. Kis üregű, vastag falú sejtek, tömeges előfordulásuk a fát szívóssá teszi. A farostsejtek csak a lombosfákban fordulnak elő, a fenyőfélékben feladatukat az áledények látják el.



**2.10. ábra.**

A bükk mikroszerkezetének sematikus ábrázolása



**2.11. ábra.**

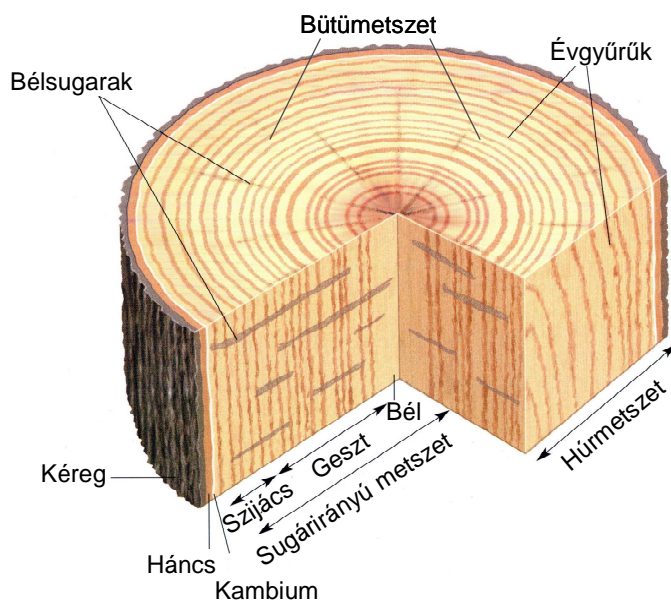
A bükk mikroszerkezetéről készült felvétel

- 1: bütümentszet
- 2: sugármetszet
- 3: húrmetszet
- 4: évgűrű
- 5a: tracheida bütümentszeten
- 5b: tracheida sugármetszeten
- 5c: tracheida húrmetszeten
- 6a: bélsugár bütümentszeten
- 6b: bélsugár sugármetszeten
- 6c: bélsugár húrmetszeten
- 7: létrás áttörés

### 2.1.3. A fák makroszkópos felépítése

Méretskálán a makroszkópikus szerkezet, a szabad szemmel is felismerhetően elkülönülő részeket jelenti. A fa rendkívül összetett szerkezete makroszkópikus skálán is észrevehető. Más-más szerkezet tapasztalható ha a fa hosszirányára merőlegesen vagy párhuzamosan, illetve az évgyűrűkhöz érintőlegesen (húrirányban) vagy sugárirányban vizsgáljuk a fa felépítését. Jól megfigyelhető a fák makroszkópos felépítése, ha a törzs- vagy ágrészről metszetet alakítunk ki a 2.12. ábra szerinti formában.

A fa keresztmetszetén a következő részeket különböztetjük meg kívülről befelé haladva: a külső kérget, a belső kérget vagy a háncsréteget, a kambiumot, az évgyűrűket, és a belet. Az évgyűrűkön belül találjuk a korai és kései pásztát és egyes fafajoknál szabad szemmel is felismerhetjük a tápanyag szállítására szolgáló tracheákat, és a bélsugarakat [27, 28].



**2.12. ábra.**

Fatörzs makroszkópos felépítése, rétegszerkezete

#### 2.1.3.1. Kéreg

A kéreg a fa „bőre”. Ez védi a fát a sérülésektől és a kiszáradástól.

#### 2.1.3.2. Kambium

A fa keresztmetszetén a belső kéreg után következik a kambium. A kambium osztódásra képes sejtréteg. Osztódásuk révén befelé fásszöveteket képeznek, amelyek az előző évi fapalástot gyűrű alakban övezik, és mivel ez évenként képződik, évgyűrűnek nevezzük.

#### 2.1.3.3. Évgyűrűk

Az egyes fák műszaki tulajdonságait, pl. a térfogatsúlyt, szilárdsági tulajdonságokat, elsősorban az évgyűrűk felépítése, az évgyűrűket alkotó sejtformák viszonylagos mennyisége, méretei és elhelyezkedése határozza meg.

Az évgyűrűkön belül két réteget különböztethetünk meg, amelyek közül a belső az ún. tavaszi vagy korai pászta, ez mindig lazább szerkezetű és puhább, mint az évgyűrű külső része, az ún. őszi vagy kései pászta.



A korai pásztában, tavasszal a nedvkeringés megindulásakor képződő sejtek rendszerint nagy üregűek és vékony falúak, a később képződő sejtek többnyire kis üregűek és vastag falúak, ezért a két pászta keménysége és tömörsége között igen nagy lehet a különbség. Az évgyűrűk korai és kései pásztáját egyes fajoknál, pl. a fenyőfélnél jól meg lehet különböztetni, a lombosfák között a gyűrűlikacsú fáknál szintén elég éles a határ, ellenben a szörtlikacsú fáknál a korai pásztától elkülöníteni nem lehet. A korai és kései pászták nemcsak a tömörségben, hanem színben is különböznek.

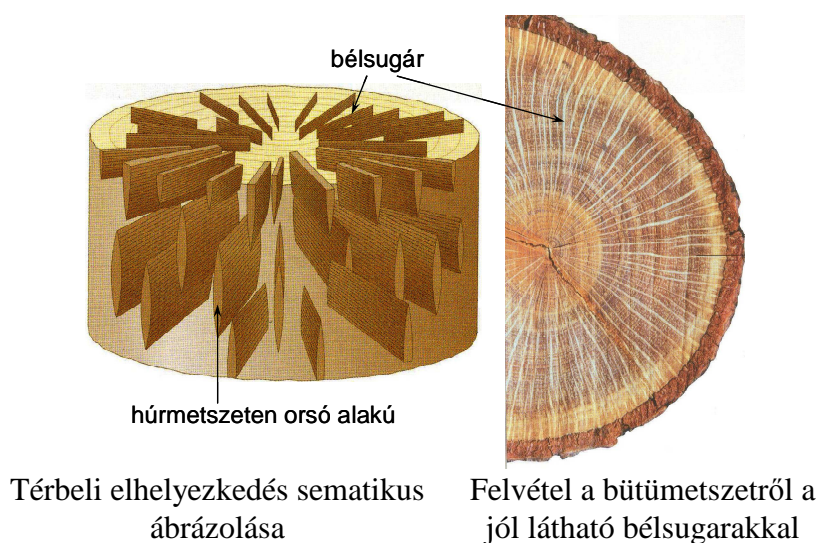
A gyakorlatban szabályos és szabálytalan évgyűrűszerkezeztől beszélünk. Szabályos évgyűrűi annak a fának vannak, melyben az évgyűrűk szabályos kör alakúak, és az évgyűrűk középpontja egybeesik a törzskeresztmetszet elméleti középpontjával. Ha az évgyűrűk egyforma szélesek, akkor egyenletes évgyűrűszerkezeztől beszélünk, és ha az egyforma szélesség mellett még keskenyek is, akkor finomszövetű a fa. Amely fa évgyűrűi nem egyforma szélesek, azt egyenlőtlen szövetűnek, és ha amellet az évgyűrűk szélesek is, akkor durva szövetűnek nevezük.

Az évgyűrűszerkezeztől következtetni lehet a fa műszaki tulajdonságaira és ennek alapján felhasználhatóságára. A fenyőfélnél pl. a keskeny, egyenletes évgyűrűszerkezet rendszerint nagyobb térfogatsúlyt eredményez, ezzel együtt pedig a fa szilárdsági tulajdonságai is javulnak. A lombosfáknál ilyen általános érvényű szabályról nem beszélhetünk [29].

#### 2.1.3.4. Bél és bélsugarak

A kétszikű növények keresztmetszetén belül találjuk a belet (2.13. ábra.), amely csupa nagyüregű, vékonyfalú sejtből áll. A bélnek a kifejlődött fa szempontjából nincs jelentősége. Nagysága és formája fajoként változik, keresztmetszete lehet kör, négyszög, hatszög vagy csillag alakú. Nagysága a legtöbb fajoknál 1–2 mm, egyes fajoknál azonban a 10–15 mm-t is elérheti, ilyen pl. a balsafa vagy a szappanfa, más fajoknál, mint pl. a vörösfenyőnél és a borókánál olyan kicsi, hogy szabad szemmel alig vagy egyáltalán nem látható.

A bélsugarak a fa sugárirányú metszetén egyes fajoknál nagy, fénylő bélsugártükrök alakjában jelennek meg [30, 31]. Különösen szép bélsugártükröket találunk a bükk és a tölgy sugármetszetén. A bélsugártükrök a fát széppé és értékessé teszik. A fa húrmetszetén a bélsugarak kevésbé jól láthatók, egyes fajoknál orsó alakú, sötét színű vonalak alakjában jelentkeznek.



Térbeli elhelyezkedés sematikus ábrázolása

Felvétel a bütümetetről a jól látható bélsugarakkal

#### 2.13. ábra.

Bélsugár helyzete a fatörzsben

A bélsugarak nagysága és száma befolyásolja a faanyag hasíthatóságát, ami egyes választékok készítésekor lényeges tulajdonság.

Bükk esetében két típusa figyelhető meg a bélsugaraknak.

- a keskeny (1-4 sejtsor szélességű) bélsugarak szabad szemmel nem láthatók,
- a széles (5-25 sejtsor szélességű) bélsugarak szinte szabályosan, egymástól 0,5-1,0 mm távolságra követik egymást az évgyűrűk mentén.

E makroszkóposan is kiválóan észlelhető bélsugarak egy jellegzetes esztétikai megjelenést eredményeznek (a húr- és sugármetszeteken). A nagyméretű (0,1-0,3 mm széles) bélsugarai a húrmetszeten feltűnő vörösbarna „orsók” (0,5-1,5 mm hosszúak), a sugármetszeten több milliméter széles „tükrök” formájában láthatók.

### 2.1.3.5. Geszt és szíjács

A fiatal fa színe az egész keresztmetszeten belül egyforma, legtöbbször sárgásfehér, mivel a sejtfalakat alkotó cellulóz is fehér, és a sejtek falába idegen anyagok még nem rakódtak be. Ilyenkor a fiatal évgyűrűket az idősebbektől elhatárolni nem lehet, mert különbség közöttük legfeljebb csak a víztartalomban van. A legkülső évgyűrűk sejtsorai még vízzel teljesen telítettek: a víztartalom kívülről a bél felé haladva mindinkább csökken. Bizonyos kor elérése után a fa belső részei lényeges változáson mennek át. A sejtek elhalnak, és a sejtfalakba festő- és ún. gesztesítő anyagok, pl. fagumi, gyanták, mézgák, cserző- és ásványi anyagok stb. rakódnak be, a sejtüregek pedig töltőanyagokkal, tilliszekkel telnek meg.

Ezt a folyamatot nevezzük gesztesedésnek, és az ilyen anyagokkal telítődött szöveti részeket hívjuk gesztnek. A külső, az életműködésben még résztvevő szöveteket szíjácsnak nevezzük.

A geszt legtöbb fafajunknál – a berakódott festőanyagok következtében – más színű, mint a szíjács. De nemcsak színben van különbség, a geszt műszaki tulajdonságai is sokban eltérőek.

A geszt rendszerint keményebb, nagyobb térfogatsúlyú és szilárdságú, mint a szíjács. Tartóssága is messze felülmúlja a szíjácsét. A gesztben nincsenek könnyen romló anyagok, és a berakódott gesztesítőanyagok a tartósságát növelik.

A geszt és a szíjács nagysága az egyes fafajoknál nagyon változó, de a szíjács a geszthez viszonyítva mindig kisebb. Igen keskeny szíjácsúak a tiszafa, az akác, a szelídgesztenye, a tölgy és a vörösfenyő, míg a többi fafajok legnagyobb része széles szíjácsú.

Vannak olyan fafajok, ahol a keresztmetszeten belül színben eltérést nem találunk. Az ilyen fánál a fatest belső, bél körüli része és a külső, kéreg felé eső része között csak víztartalomban van különbség. A belső, az életműködésben már részt nem vevő szöveti részek víztartalma jóval kisebb, általában fele az élő farészek víztartalmának, az ilyen fafajoknál gesztről nem beszélhetünk és a belső, életműködésben már részt nem vevő szöveti részeket érett fának nevezzük. Érett fája van pl. a bükknek, a hársnak, lúccs- és jegenyefenyőnek.

A nem színes gesztű fák második csoportját képezik az ún. szíjácsfák, mint pl. az éger, rezgőnyár, gyertyán, hegyi juhar és a korai juhar. Ezeknél a fafajoknál a belső és külső részek között sem színben, sem egyéb tulajdonságokban nincs különbség.

Végül a harmadik csoportba tartozik a kőris és a mezei szil. Ezeknél a fafajoknál megkülönböztetünk szíjácsot, érett fát és gesztet is.

A gesztesedés bizonyos kor elérése után kezdődik. Megindulásának ideje a talajtól és az éghajlattól függ.

Jó talajon, ahol a fa gyorsan nő, a gesztesedés később kezdődik. A meleg éghajlat elősegíti, a nedves éghajlat késlelteti, a száraz pedig gyorsítja a gesztesedést. A geszt kialakulására a napsütésnek is befolyása van, mert a napsütés sietteteti és elősegíti a geszt elszíneződését.

### 2.1.4. A faanyag mechanikai tulajdonságait befolyásoló tényezők

Az eddig leírtak alapján kitűnik, hogy a faanyag rendkívül összetett szerkezet. Tulajdonságai és potenciális felhasználhatósága, értéke, számos faanatómiai jellemzőtől függ. Ezeket a jellegzetességeket első megközelítésben a genetika, a növekedési körülmények, az erdőgazdálkodás, továbbá a döntés kora határozza meg.

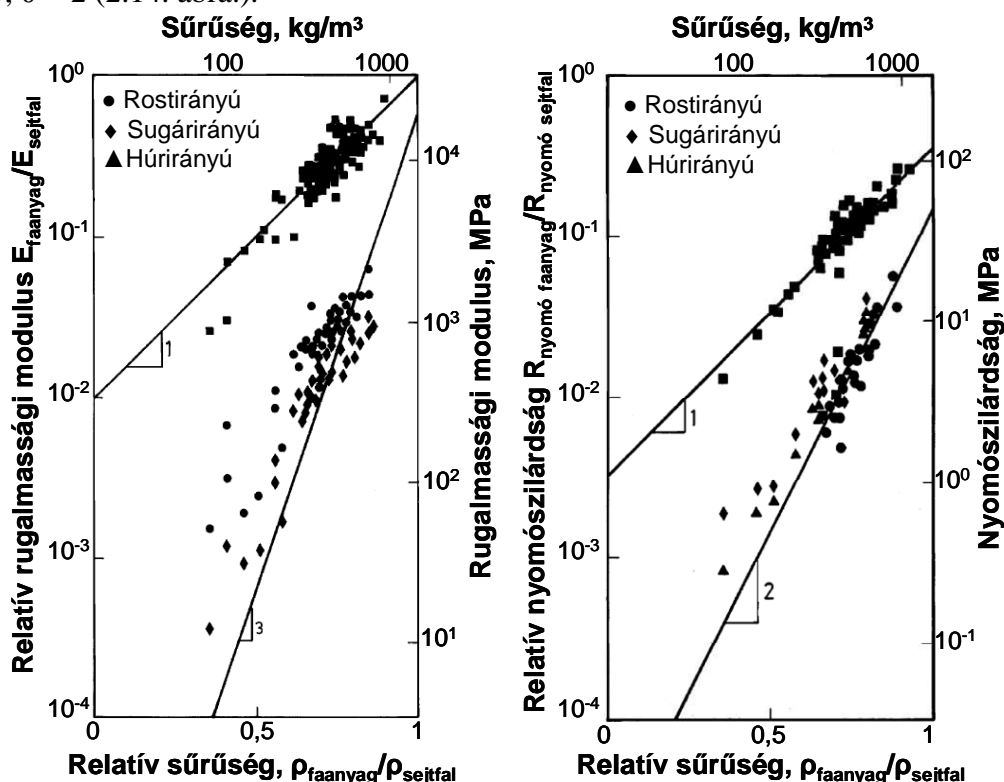
Az 1660-as évek elején **Robert Hooke** mikroszkópjának tökéletesítése közben a fa szerkezetét vizsgálta. Ő volt az, aki **1664**-ben a *Micrographia* című művében először leírta, hogy a fa cellás anyag. Ezt a felfedezést **Dinwoodie** kiegészítette és a fa szerkezetét rendkívüli módon leegyszerűsítve, *természetes, cellás, szálerősítésű polimermátrixú kompozit*-ként írta le. Ebből következően, **Ashby** cellás anyagokra kidolgozott elméletét alkalmazva, a fa összes mechanikai tulajdonságát a relatív sűrűsége, vagyis a faanyag tényleges sűrűsége, és a cellafalakot alkotó anyag sűrűségének hányadosa, határozza meg [7, 32, 33, 34]. Rugalmassági modulus esetén a következő összefüggés írható fel.

$$E_{\text{faanyag}} = E_{\text{sejtfal}} \left( \frac{\rho_{\text{faanyag}}}{\rho_{\text{sejtfal}}} \right)^\varphi \quad (1)$$

Hasonló összefüggés alkalmazható a nyomószilárdságra ( $R_{\text{nyomó}}$ ) is.

$$R_{\text{nyomó faanyag}} = R_{\text{nyomó sejtfal}} \left( \frac{\rho_{\text{faanyag}}}{\rho_{\text{sejtfal}}} \right)^\vartheta \quad (2)$$

Az  $\varphi$  és az  $\vartheta$  kitevő értéke irányfüggő. Rostirányban mindkettő közel 1, sugár és húrirányban  $\varphi \approx 3$ ;  $\vartheta \approx 2$  (2.14. ábra.).



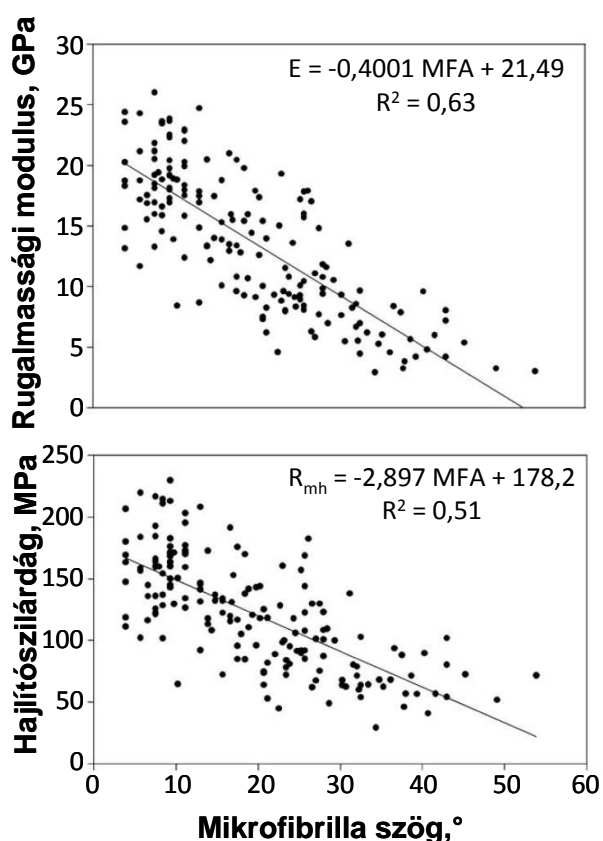
2.14. ábra.

A rugalmassági modulus változása különböző sűrűségű fafajok esetén

Az abszolút tömör (pórusmentes) faanyag a sejtfal. Sűrűsége kb.  $1500 \text{ kg/m}^3$ . Ez az érték igaz minden fafajra, a balsától a teak fáig [35]. A lágylombosok sűrűsége átlagosan  $400 \dots 600 \text{ kg/m}^3$  között változik, feltéve, hogy a sejtfal kb.  $1/3$  a sejtüreghez képest. Easterling és munkatársai megfigyelték [36, 37, 38, 39], hogy a fa anizotróp jellege függ a sejtfal tulajdonságaitól, illetve a sejtek méretétől és alakjától. Megállapították, hogy a faanyag rostirányú rugalmassági modulusa a sejtfallal van összefüggésben.

A cellafalakat, sejtfalakat alkotják, melyek tulajdonságai a bennük lévő „szálerősítés”, vagyis a cellulózfibrillák, és a terhelés által bezárt szögtől függenek.

A mikrofibrillák rostiránnyal bezárt szögét egyszerűsítve mikrofibrilla-szögnek (MFA) szokás nevezni. A másodlagos sejtfal  $60 \dots 90\%$ -a az egész sejtfallaknak. Ebből következően ez a réteg határozza meg a sejtfal szilárdságát. Ha ebben a rétegben a mikrofibrillák-szöge nagy, akkor ezek a mikrofibrillák csak csekély mértékben vesznek részt a réteg szilárdításában és a teljes sejtfal szilárdsága alacsony.



**2.15. ábra.**

A mikrofibrilla szög hatása a sejtfal rugalmassági modulusára, és hajlítószilárdságára

A faanyag tulajdonságai tehát a sűrűségtől és a mikrofibrilla-szögtől függenek. Ebből kiindulva, ha egy adott faanyag esetében a mechanikai tulajdonságok számottevően megváltoznak, a sűrűség jelentős változása nélkül, akkor a változás a mikrofibrilla-szög megváltozásában keresendő.

A következő ábrában (2.15. ábra) a hárompontos hajlító-vizsgálattal megállapított rugalmassági modulus, és a hajlítószilárdság változása látható az  $S_2$  rétegben lévő MFA függvényében [40]. A mérési eredményekre illesztett egyenesek egyenlete az ábrában látható.

A mikrofibrilla-szög az  $S_2$  rétegben az érettfarostjaiban  $5 \dots 20^\circ$ , és akár  $60^\circ$  is lehet a bélhez közel. A fokozatos változás, ami közel ötszörös növekedést jelent a beltől a kéreg felé haladva, a rostirányú szilárdságban is hasonló mértékű.

Több elméleti modell is létezik az  $S_2$  rétegben lévő MFA szilárdságra gyakorolt hatásának leírására [41, 42]. Ezek általában nem lineáris hatásra vezetnek, de teljesen hasonló eredményt adnak.

### 2.1.5. Bükkfa (*Fagus Sylvatica* L.)

A bükkök nemzetségének mintegy 13 fafaja van. A fajok között a természetes hibridek is igen gyakoriak, azonban a különböző bükkfafajok fája között jelentős különbség nem tapasztalható. A továbbiakban a hazai felhasználásban fontos szerepet betöltő közönséges bükkal (*Fagus Sylvatica* L.) foglalkozom.

Alapvetően holarktikus, az északi mérsékelt égöv 40...60 szélességi fokok közötti lombhullató erdeiben elterjedt nemzetség, 600 m fölötti zonális bükkös erdőtársulások meghatározó fája. Főként a gyertyánnal, cserrel és a kocsánytalan tölgygel alkot elegyes állományokat. Németországban és Dániában is honos, de megtalálható Franciaország, Anglia, Írország meszes talaján éppen úgy, mint Norvégia és Lengyelország páradús termőhelyein.

Magyarország erdőállományának mintegy 9,5%-át alkotja. A Bükk, Bakony, Vértes, Mátra, továbbá a Balaton vidékén nagyobb összefüggő állományokat alkot. Több területen már védelem alatt áll, így védett a „Vétyemi Ösbükkös”, a soproni „Asztalfői-bükkös”, a Bükk hegységi „Öserdő” és a „Tátika-hegyi Ösbükkös”.

Koronája szétterülő; magányosan szabályos gömb alakúvá fejlődik, erdőben hengeres.



**2.16. ábra.**

Az Északi-középhegységben, Bükkben, Lillafüred melletti bükkösről készített saját felvétel

Az elegyetlen bükkösök lombkoronája rendkívül zárt, emiatt cserje- és gyepszintjük is fejletlen. Törzsformája zárt állásban egyenes, hengeres, óriási méretű törzseket fejleszt. A fák magassága 35...40 m-t is elérhet, az ágtiszta törzshossz pedig 15...20 m. Véghasználati korban (100...120 év) a mellmagassági átmérő 0,4...0,7 m, idősebb korban (200...300 év) elérheti az 1,5...1,8 m-t is. A fa színe friss állapotban szürkés, világos zöldessárga, később sárgászöld, világos sárgászöld, látható geszt nélkül.

Fája szórtlikacsú, tehát a korai és késői pászta edényeinek átmérői között nem nagyok a különbségek, a likacsok aránylag egyenletes eloszlásban található az évgűrükben. Az évgűrük keresztmetszetben jól láthatók. Edényei sem kereszt-, sem húrmetszetben, de a sugármetszeteken sem láthatók. Bélsugarai meglehetősen szélesek, fényesek és elhatároltak. Bélsugarai a tükörmetszetben világos és fényes, majd sötét és fakóbarna nyalábszerű rajzolatban vagy foltokban (féltükörmetszet) különböző szélességben észlelhetők. Sugármetszetben a bélsugarak olykor vörösesbarna, rövid csíkokban, a húrmetszeten orsóhoz hasonlítható alakban ismerhetők fel. E makroszkóposan is kiválóan észlelhető bélsugarak egy jellegzetes esztétikai megjelenést eredményeznek a húr- és sugármetszeteken egyaránt [43].

Az edények vékony falúak, alakjuk leginkább ovális. Vermesgödörkék nagyobb számban az edények tangenciális falán rövidebb-hosszabb sorokba rendeződve, változatos alakban találhatóak [44].

Sokféleképpen hasznosítható, jól alakítható keményfa. Az egyenes szálú, nagy átmérőjű rönkökből sokféle félkész termék állítható elő. Minden szerszámmal jól megmunkálható: késeléssel, hámozással furnér készíthető belőle. Nem időjárásálló; külső térben gombák és rovarok is károsíthatják. Rajzolata jellegtelen, ezért felületét gyakran páccal, színezéssel, festéssel

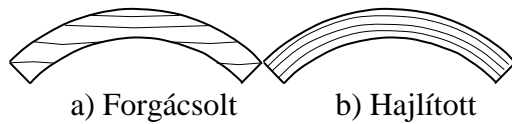
kezelik. Papír, farost és faszén gyártására is kiválóan alkalmas. Magas hőmérsékleten ég, a régi fazekasság kedvenc tüzelőanyaga volt.

Bükkal kapcsolatos érdekes megfigyelés, hogy a bükknél igen ritka a villámcsapás okozta kár. Egy angol kutató 17 éves megfigyelés eredményeként megállapította, hogy a tölgyvel és lucfenyővel elegyített bükkösben a tölgnél 60-szor, a lucfenyőnél 30-szor volt gyakoribb a villámsújtás.

A bükk faanyag kereskedelmi elnevezése néhány fontosabb nemzetközi nyelven: Buche, Rotbuche (német), beech (angol), faggio (olasz), hétre (francia), бук (orosz, szláv), haya (spanyol), ブナ (japán).

## 2.2. Faanyag hajlítása

A fa hajlítása a fa megmunkálásának egyik igen fontos módja. A hajlítás egyik előnye, hogy hajlítással igen változatos sík-, illetve térgörbe alkatrészek állíthatók elő [4].



A másik előny az anyagmegtakarítás, mivel az íves alkatrészek előállításánál a kisebb keresztmetszeti méretek mellett nagyobb szilárdság érhető el, mert hajlításkor nem vágjuk át a fa rostjait.

**2.17. ábra.**

Két különböző módon kialakított íves alkatrész

Már az ókori görögök és egyiptomiak is ismerték ezt a technikát. Ehhez a megnedvesített faelem egyik oldalát a tűz fölé tartották, melyet ezután könnyebben alakítottak a kívánt formára. Ezt a technológiát elsősorban a hajógyártásnál használták, később került be egyéb faipari területekre. A bútoriparban a hajlított alkatrészekkel már a XVII. században találkozhattunk az angol Windsor székeknél. A fa hajlításának technológiájában az igazi áttörést a XIX. század jelentette. Ekkor egyre nőtt az igény arra, hogy a hajlított fa alkatrészek gyártására egy gazdaságosabb technológiát fejlesszenek ki, az idő- és alapanyag-igényes, több részből ragasztott, majd alakra fűrészelt technológiához képest. Az első fejlesztések eredményeként született meg a laminált fából készült, furnérozott székek a XIX. század elején. Michael Thonet ezen hajlított fa technológiában kiváló lehetőségeket látott, az íves alkatrészekből álló szerkezeteihez ezt a technológiát alkalmazta. Ám számos probléma merült fel. A laminált szerkezet kötőanyagaként használt ragasztó a szélsőségesen nagy páratartalomban feloldódott, így a lamellák a szállítás során elváltak egymástól. Ezért Thonet [1] tovább kísérletezett, majd fejlesztéseinek eredményeként született meg a ma is használatos módszer a tömörfa acélszalagos sablonban történő formálása. A hőkezeléssel plasztikussá tett faanyag a sablonból száradás után kivéve megtartja alakját és masszív alapanyagot biztosít az alkatrésznek. A Thonet cég fejlődését azonban a versenytársak sem nézték tétlenül. Azért, hogy Thonet a saját ötletét megőrizhesse, szabadalmaztatnia kellett. A nevéhez fűződő első és második osztrák szabadalom után, 1856. június 17-én ismét siker koronázta törekvését, megkapta a harmadik és legfontosabb szabadalmát: „a gőzzel vagy forró folyadékba mártással hajlított faelemekből készült székek és asztallábak gyártására”. A szabadalomban megemlíti a csavarszorítókkal a fához rögzített fémszalagot is. Ez a technológiai lépés volt tulajdonképp alapkövetelménye a tömeggyártás megalapozásának.

## 2.3. A faanyag rostirányú tömörítése

A Thonet eljárás technológiai kivitelezésének számos nehézsége van. Legelőször is a nagy gépigény. A faanyag plasztifikálásához nagyméretű autoklávokra van szükség, melyek beszerzése és üzemeltetése kizárólag nagyüzemi keretek mellett kifizetődő. Továbbá melegítés után csupán néhány perc áll rendelkezésre, hogy a faanyagot a sablonba hajlítsák, mert hűlés közben a faanyag egyre kevésbé hajlítható.

Az idők folyamán számos további próbálkozás történt a faanyag hajlíthatóbbá tételére, végül 1988-ban kifejlesztettek egy szabályozott nagynyomású présberendezésre épülő eljárást, a rostirányban tömörítés technológiáját.

A tömörítésre alkalmas faanyagot a méretre szabás után, hidrotermikusan kezelik, majd hossz tengelye mentén rostirányban tömörítik úgy, hogy közben az alkatrész keresztmetszete nem változik jelentős mértékben.

A rostirányú tömörítés lépései a következők:

1. A tömörítésre alkalmas faanyag kiválasztása,
2. A faanyag méretre szabása,
3. Hidrotermikus kezelés,
4. Hossz tengely mentén rostirányú tömörítés.

### 2.3.1. A rostirányú tömörítésre alkalmas faanyag

A fa tömöríthetősége fafajonként változó. Az eddigi tapasztalatok alapján a következő fafajok bizonyultak tömörítésre alkalmasnak: bükk, tölgy, akác, szil, juhar, kőris, hárs, cseresznye és fekete dió. A szelvényen belül a szíjács és geszt aránya a tömörítés minőségét nem befolyásolja; ez vonatkozik az évgyűrűk elhelyezkedésére is.

Nagyon fontos a faanyag nedvességtartalma. A rosttelítettségi ponttól 2-8% -kal alacsonyabb nedvességtartalmú faanyag alkalmas rostirányú tömörítésre.

Döntő fontosságú a faanyag párhuzamos száliránya is. A tömörítendő faanyag rostkifutásának  $7^\circ$  alatt kell lennie.

### 2.3.2. A faanyag méretre szabása

A tömörítendő alkatrészek méretét/többszörös méretét a tömörítő berendezés befogadóképessége határozza meg.

A hazánkban alkalmazott „Compwood Maskiner A/S” tömörítő berendezéseinek befogadóképessége  $80 \times 120 \times 3000$  mm. Tömörítés után a faanyag kisebb darabokra szabható, ill. kötegelt tömörítés is lehetséges.

A bútortipar, amely jelenleg a tömörített faanyag legjelentősebb felhasználója, rendszerint tömörítő berendezés kapacitásánál kisebb keresztmetszetű alkatrészeket használ, ezért lehet előnyös a „kötegelt” tömörítés. Ilyenkor a „kötegebe” azonos fafajú és lehetőleg azonos méretű darabok kerüljenek.

### 2.3.3. Hidrotermikus kezelés (plasztifikálás, lágyítás)

Tömörítés előtt a faanyagot a lignin plasztifikálódási hőmérséklete felé kell melegíteni, kb.  $70-90^\circ\text{C}$ -ra. Ettől a tömörítendő faanyag könnyen alakítható válik, „kilágyul”.





**2.18. ábra.**

A fa gőzölésére használt autokláv

A plasztifikálás történhet gőzöléssel autoklávban, vagy nagyfrekvenciás erőterrel való melegítéssel. A gőzöléssel történő melegítés az előnyösebb különösen alacsonyabb nedvességtartalmú faanyag ( $u = 18...25\%$ ) esetén. Gőzzel történő melegítés esetén kb. 45 perc / 25mm gőzölési idővel kell számolni.

### 2.3.4. Tömörítés

A melegített faanyagot a tömörítő berendezésbe helyezik, majd rostirányban nagy nyomással tömörítik. A nyomás hatására az eredeti hossz 10...25 %-kal csökken. Ezt az értéket a fafaj és a faanyag későbbi felhasználásának függvényében határozzák meg. Tömörítés közben a faanyagot minden irányban meg kell támasztani, a nyomás hatására fellépő kihajlás és a jelentősebb keresztmetszet-változás megakadályozására. A nyomást illetve az oldalsó és a felülről való megtámasztást egy PLC vezérelt hidraulikus rendszer végzi az előre beállított értékeknek megfelelően. Az oldalsó illetve kalapnyomás, valamint az összenyomás sebessége a sikeres tömörítés zálogai. Értékeik a fafajtól és a kívánt összenyomás mértékétől függenek. Én a diszsertációban részletezett vizsgálataimhoz minden esetben, a gyakorlatban legoptimálisabb értékeket használtam. A kívánt mértékű tömörítés elérése után pár percig összenyomva tartják a faanyagot. Nyomást követően a faanyagot kivesszük a tömörítő berendezésből és hagyják lassan kihűlni. A nyomás megszüntetése után, hűlés közben a faanyag „visszarugózik” és a maradandó hosszcsökkenés (az összenyomás nagyságától függően) 3...10 %. Végző méretét a faanyag hamar elnyeri (pár perc) és később sem fog tovább nőni.

### 2.3.5. A tömörített faanyag előnyei

- Hidegen is tárolható, és időbeni korlátozás nélkül hajlítható.
- A tömörítés mértékének függvényében, néhány mechanikai tulajdonsága (alakíthatóság, merevség, szívósság) kedvezően változik.
- Nagymértékű alakváltozásokat is elvisel, lényegesen nagyobbat, mint tömörítés nélkül, továbbá minden irányban hajlítható.
- A hajlítás egyszerű eszközökkel és kis hajlító erővel végezhető.
- Környezetbarát módon – vegyszerek alkalmazása nélkül állítható elő.
- A kiszáradás utáni alaktartóssága igen kedvező.

## 2.4. A faanyag akusztikus vizsgálata

### 2.4.1. Roncsolásmentes vizsgálatok

A roncsolásmentes anyagvizsgálat egy rendkívül széles gyűjtőfogalom. Minden olyan vizsgálati módszert idesorolunk, melynek során az anyag semmiféle károsodást sem szenved. A vizsgálat a továbbfelhasználást nem befolyásolja.

A roncsolásmentes anyagvizsgálatoknak ennél fogva több figyelemre méltó előnye van a roncsolásos módszerekkel szemben.

- a vizsgálatok ugyanazon a mintadarabon megismételhetők más körülmények között is (pl. különböző nedvesség és hőmérsékleti viszonyok),
- egy mintadarabon többféle tulajdonság is tesztelhető és ezek összehasonlíthatók egymással,
- a beépített anyag, minden tartószerkezeti elem (oszlop, gerenda) is vizsgálható.

A műszerekkel elvégzett roncsolásmentes vizsgálatokat a fémiparban dolgozták ki. A fémiparban már évtizedek óta használják és elismerik a roncsolásmentes vizsgálatokat. A XX. század óriási technikai fejlődése tette lehetővé új eszközök, mérési és vizsgálati módszerek kialakítását. A kidolgozott eljárások némelyike megfelelő módosítással alkalmazhatóvá vált a faipari felhasználásra is, de számos új, a faiparra jellemző roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer is elterjedt. Az első roncsolásmentes faanyagvizsgálatokat Észak-Amerikában az 1950-es években kezdték meg. A Washington Állami Egyetem Faanyag Laboratóriuma egy új és (az akkori méretekre jellemzően) nehéz számítógépet kapott. A számítógép tönkremeneteléhez az vezetett, hogy összetört alatta az asztal. Ez az esemény készítette az egyetem professzorát, hogy a fa roncsolásmentes vizsgálatával kezdjen el foglalkozni. Az első eszközök oszcilloszkóp és különböző rezgésdetektorok voltak. Ezen kutatások célja a dinamikus rugalmassági modulus és a szilárdsági paraméterek közötti kapcsolat megállapítása volt. Mára a legkülönbözőbb eljárásokat dolgozták ki, elsősorban Amerikában, Japánban, Németországban, Svédországban és Magyarországon. Az új eljárások, pl.: a dinamikus rugalmassági modulus mérése, ultrahangos sebességmérés, akusztoultrahangos mérések, elektromágneses mérések, számítógépes tomográfia segítségével egyre több és pontosabb eredményekre vezetnek.

A következő roncsolásmentes vizsgálatok terjedtek el a faiparban.

#### 2.4.1.1. Vizuális faanyag-osztályozás

A vizuális osztályozás a faanyagok szilárdsági tulajdonságai és a különböző jellemzők közötti kapcsolaton alapszik. A fontosabb tulajdonságokat befolyásoló, vizuálisan megállapítható jellemzők a következők: göcsösség, ferdeszálúság, csavart növény, repedezettség, alaki hibák, évgűrűszerkezet, fagömbösség, keresztmetszeti hiányok.

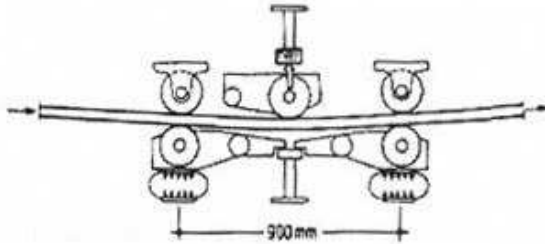
A vizuális faanyag-osztályozás egyik nagy előnye, hogy nagymértékben automatizálható, digitális képelemzés, számítógépes képfeldolgozó rendszer segítségével végezhető. A fűrészelt faanyagot négy oldalról megfigyelő videokamerák, képesek a különböző fahibák felvételére, majd a digitalizált képek alapján egy számítógép meghatározza a minőséget. A számítógépes technika nagy előnye, hogy kizárja az emberi szubjektivitást és annak tévedési lehetőségeit. Különösen a fűrészelt áruk osztályozására használják.

### 2.4.1.2. Szilárdságbecslő módszerek

#### a.) A statikus rugalmassági modulus mérésén alapuló módszerek

A rugalmasság az anyagnak az a képessége, amikor külső erő hatására alakját és méretét megváltoztatja, de az erő megszűnése után visszanyeri eredeti formáját. A rugalmassági határon belül a méretváltozás mértéke arányos a terhelőerő által, az anyagban létrejövő feszültséggel, ez az ún. Hooke-törvény.

A szilárdságbecslő módszerek közül, a vizuális és a statikus hajlító rugalmassági modulus módszer kombinálása terjedt el leginkább. Alapja a hajlító rugalmassági modulus és az anyag hajlítószilárdsága közti összefüggés. Ez a hajlító rugalmassági modulus mért értékei alapján szilárdsági kategóriákba való besorolást tesz lehetővé.



**2.19. ábra.**  
COOK-BOUNDERS-féle statikus rugalmassági modulus alapján osztályozó elvi sémája

A módszer lényege, hogy a gyalult, adott keresztmetszetű faanyagot görgősorok közé vezetjük, és adott pontokon mérjük vagy az adott behajláshoz tartozó erőt, vagy az adott erőhöz tartozó behajlást (2.19. ábra.), melyekből a rugalmassági modulus és ebből pedig a szilárdság becsülhető.

#### b.) A térfogsűrűség mérésén alapuló eljárások (Izotópos módszer)

Az eljárás a térfogsűrűség és a hajlítószilárdság kapcsolatán alapszik. A hibamentes faanyagok hajlítószilárdságával egyenes arányban változó sűrűség meglehetősen pontos becslést biztosít a hajlítószilárdságra. A térfogsűrűség mérésén alapuló eljárásoknál a faanyag a sugárforrás és a sugárdetektor között halad át. A faanyagon keresztülhaladt sugármennyiség mértékéből számolható a sűrűség, amelyből következtetnek a szilárdsági tulajdonságokra.

#### c.) A dinamikus rugalmassági modulus meghatározásán alapuló módszerek

A dinamikus rugalmassági modulus megállapításának két módja van. A hang terjedési sebességének segítségével és a sajátfrekvenciák meghatározásával.

### 2.4.1.3. Hibahely-lokalizáló megoldások

Hibahely lokalizálására számos technikát dolgoztak ki, melyek elméletükben is nagymértékben eltérnek egymástól. Ilyenek az ultrahangos, akusztó-ultrahangos, akusztikus emissziós, mikrohullám, és nukleáris módszerek. Ez utóbbi módszeren belül, bevált a számítógépes tomográfiai módszer (CT). Ezt a módszert rönkök átvilágítására, fűrészelési terv elkészítésére használják. Hazánkban azonban a leggyakrabban használt hibahely-lokalizáló módszerek az ultrahangos technikák.

## 2.4.2. Dinamikus viselkedés elméleti modelljei, rezonancia technikák

Ha egy fadarabot bárhol megütünk, rezgésbe jön. Megfelelő frekvenciatartományban ez hallható is (pl. xilofon, marimba). A rudak rezgéseit leíró egyenletek mindegyike tartalmazza a faanyag rugalmasságát jellemző dinamikus rugalmassági modulus értékét. Ahhoz, hogy meghatározhassuk a dinamikus rugalmassági modulus a rúd geometriai méreteit, tömegét, és egy adott befogáshoz illetve alátámasztáshoz tartozó sajátrezgési frekvenciáját kell ismerni.

A dinamikus rugalmassági érték meghatározására, annak egyenlettel való leírására a szakirodalomban több próbálkozás történt.

Rugalmas hullámok terjedésénél az anyagi közeg részecskéi (térfogatelemei) között fellépő rugalmas erők játszanak szerepet. Szilárd közegben adott irányban megjelenő zavar, elmozdulásként vagy rezgésként nyilvánul meg, és a zavar irányában nyomóerők, rá merőleges irányban nyíróerők formájában jelentkeznek. Folyadékokban és gázokban is keletkeznek nyíróerők a belső súrlódás következtében, azonban ezek a hullámhossz tört részén belül elnyelődnek. Vagyis folyadékok és gázok esetében lényegében csak longitudinális, szilárd anyagok esetében longitudinális és transzverzális rugalmas hullámok is lehetségesek.

Ha egy vízszintesen fekvő, „ $\rho$ ” sűrűségű, „ $A$ ” keresztmetszetű homogén prizmatikus rúd hossz tengelyre merőleges síkjára rövid „ $t$ ” ideig adott „ $F$ ” erő hat (pl. egy kalapáccsal megütjük a rúd egyik végét), akkor a rúd összenyomásában megnyilvánuló zavar longitudinális hullámként terjed végig a rúdon „ $v_{\text{long}}$ ” sebességgel. Az állandónak tekintett „ $F$ ” erő a rudat Hooke-törvénye értelmében „ $\Delta l$ ”-vel megrövidíti a következő egyenlet alapján.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\Delta l/L} \rightarrow \Delta l = \frac{F}{A} \cdot \frac{L}{E} \quad (3)$$

Ahol,

$E$ := rugalmassági modulus,

$L$ := a prizmatikus rúd hossza,

$\sigma$ := az  $F$  erő hatására az anyag keresztmetszetében keletkező feszültség,

$\varepsilon$ := az  $F$  erő hatására a rúd hossz tengelyén kialakult relatív alakváltozás.

Az ütés hatására először a megütött véglap, majd egymás után valamennyi keresztmetszet elmozdul  $v = \Delta l / t$  sebességgel. Tehát lényegében a rúd teljes tömege ( $m$ ) elmozdult. Mivel az  $F$  erő  $t$  ideig hat a rúdra, Newton második törvénye értelmében felírható a következő összefüggés [45].

$$F = m \cdot a \quad \text{ami felbontható a következő összefüggésre, } F = \rho \cdot A \cdot L \cdot \frac{v}{t} \quad (4)$$

Ahol,

$a$ := kinetikus gyorsulás (időegység alatti sebesség változás).

Ezt összevetve a (3) egyenlettel kapjuk a következő összefüggéseket.

$$F = \rho \cdot A \cdot L \cdot \frac{v}{t} = \frac{\Delta l \cdot A \cdot E}{L} \quad (5)$$

Az előzőekben felírtak alapján,  $v = \Delta l / t$ . Amiből a következő egyszerűsítések származnak.

$$F = \rho \cdot A \cdot L \cdot \frac{\Delta l}{t^2} = \frac{\Delta l \cdot A \cdot E}{L} \quad (6)$$

Ezek alapján a dinamikus longitudinális rugalmassági modulus a hang terjedési sebességének segítségével a következő összefüggéssel fejezhető ki:

$$E_{dL} = \rho \cdot \frac{L^2}{t^2} = \rho \cdot v_{\text{long}}^2 \quad (7)$$

Hosszú prizmatikus rudak esetében a dinamikus rugalmassági modulus sajátrezgések segítségével is meghatározható.

$$E_{dL-n} = \left( \frac{2L \cdot f_{L-n}}{n} \right)^2 \cdot \rho \quad (8)$$

Ahol,  $n$ := a felharmónikus sorszáma.

Valós esetben a longitudinális lökéshullámok által keltett rezgés – akár csak az összes többi rezgésfajta – nem pontosan harmonikus rezgés, mert az anyag belső súrlódása és egyéb tényezők hatására a rezgés amplitúdója csökken, végül a rezgés elhal. Ezt a jelenséget csillapításnak nevezzük. A csillapítás a rezgés frekvenciájára is hatással van, amit – továbbá a vizsgált testek véges kiterjedését – a Rayleigh korrekcióval vehetünk figyelembe [46, 47, 48].

### 2.4.3. Rezgés csillapodása, logaritmikus dekrementum

Rezgésbe hozott farúd rezgése csillapodik. A rezgésbehozáskor bevitt energia egyrészt hang formájában kisugárzódik, hővé alakul a rúd megfogási pontjain, alátámasztásain a súrlódás következtében, valamint a faanyag belső súrlódása következtében elnyelődik.

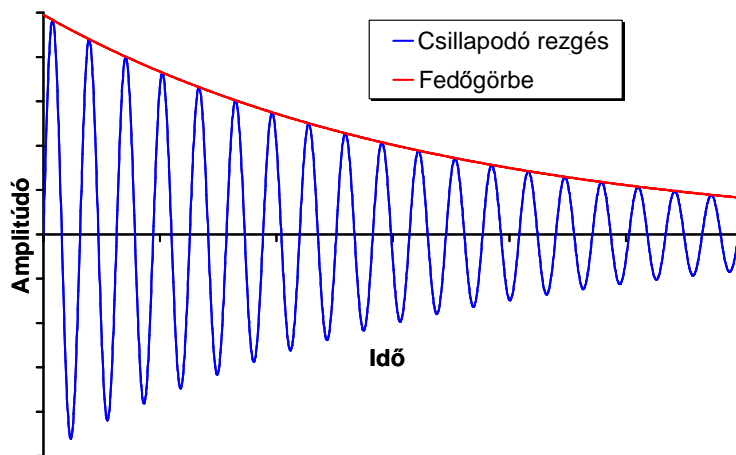
Időben csillapodó rezgést általános alakban a következő függvény írja le.

$$x(t) = x_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \alpha) \quad (9)$$

Ahol,

- $x$  := kitérés mértéke, m
- $x_0$  := kitérés  $t = 0$  időpillanatban, m
- $f$  := a csillapított rezgés frekvenciája, Hz
- $\alpha$  := a fáziseltolódás szöge, rad
- $t$  := idő, s
- $\beta$  := csillapítási tényező, -.

A következő, 2.20. ábrában megfigyelhető a csillapodó rezgés és a burkológörbéje.



A függvény felbontható két függvény szorzatára – a (9) egyenletnek megfelelően – egy szinuszos függvényre és egy exponenciális részre. Az exponenciális rész a csillapodó rezgés fedőgörbéjeként is felfogható [49].

#### 2.20. ábra.

Csillapodó rezgés és exponenciális fedőgörbéje

A csillapítási tényezőn túl több csillapítást leíró paraméter is elterjedt, ezek közül az egyik legfontosabb a logaritmikus dekrementum ( $\Lambda$ ), mely két egymást követő amplitúdó hányadosának a természetes alapú logaritmus.

$$\Lambda = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}, \text{ általános esetben pedig } \Lambda = \frac{1}{k} \ln \frac{A_n}{A_{n+k}} \quad (10)$$

Ahol,  $k$  := a lengések száma.

A logaritmusos dekrementum a csillapítási tényezőtől is származtatható a következő összefüggéssel.

$$\Lambda = \frac{\beta}{f} = \beta \cdot T \quad (11)$$

Ahol,  $T$ : a csillapodó rezgés periódusideje, s.

A logaritmusos dekrementum használatának előnye, hogy független a rezgés frekvenciájától és segítségével megadható a csillapító erők által befolyásolt rezgés frekvenciája a következő összefüggéssel.

$$f_0 = f \sqrt{1 + \left(\frac{\Lambda}{2\pi}\right)^2} \quad (12)$$

Ahol,  $f_0$ : a csillapítatlan rezgés frekvenciája.

A logaritmusos dekrementum meghatározása az előző képletek alapján egyszerűnek tűnik. A csillapodó rezgést rögzíteni kell digitálisan, és a fedőgörbe egyenletéből a kitevő és a frekvencia segítségével kiszámítható. Ez a gyakorlatban úgy történik, hogy elvégezzük kétszer időben eltolva a digitális jel Fourier transzformációját. Kiválasztjuk valamelyik tetszőleges karakterisztikus csúcsot és a csúcsamplitúdók aránya és az időeltolás ismeretében a csillapítási tényező kiszámítható a (10) és a (11) egyenletből származtatott következő összefüggéssel.

$$\beta = -1 \cdot \frac{\ln \frac{A_{n+k}}{A_n}}{k \cdot T} \quad (13)$$

A karakterisztikus csúcs kiválasztásakor célszerű olyat választani, amelynek amplitúdója minél nagyobb és a többi csúcstól jól elkülönül. A vizsgálataim során a longitudinális hullámok sajátfrekvencia csúcsát választottam, bár a módszer több csúcs párhuzamos vizsgálatát is lehetővé teszi.

A módszer kivitelezése számítógépet és megfelelő szoftvert használva viszonylag egyszerű. Az időeltolást ( $k \cdot T$ ) úgy kell megválasztani, hogy 3...5 periódus idejétől nagyobb legyen, és ne legyen túl nagy sem, mert a második Fourier transzformált a zaj tartományába eshet.

Adott anyag logaritmusos dekrementuma jellemzi az anyag veszteségi tényezőjét ( $\text{tg}\delta$ ) és belső súrlódását, ezzel együtt az anyag viszkoelasztikus viselkedésére is következtetni lehet belőle. Minél nagyobb a logaritmusos dekrementum értéke, annál inkább viszkoelasztikusan viselkedik az anyag [50, 51].

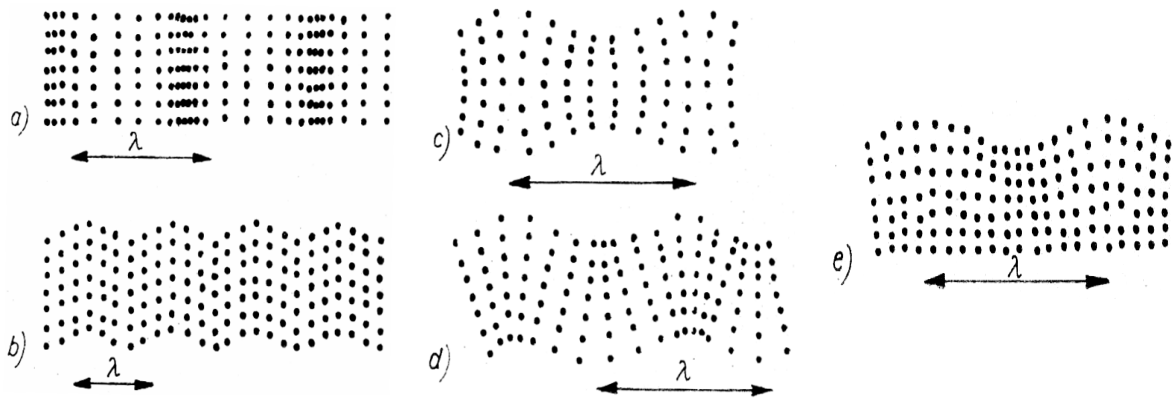
## 2.4.4. Az ultrahangos vizsgálat

### 2.4.4.1. Alapfogalmak

A hang rugalmas közegben egy hangforrásból hullám alakban kisugárzott rezgés. A rezgések frekvenciája szerint megkülönböztetünk

infrahangok	0 ... 16 Hz,
hallható hangok	> 16 Hz... 16 kHz,
ultrahangok	16 kHz ... 100 MHz,
hiperhangok	100 MHz felett.

Ez a fizikai alapon nyugvó beosztás a fül fiziológiai tulajdonságaiból következik, mert a fül csak a 16 Hz és a 16 kHz közötti rezgéseket észleli. A hangforrásból kilépő hanghullámok a környező közegben meghatározott sebességgel egyenes vonalban terjednek.



2.21. ábra.

Hullámtípusok: a) longitudinális hullám; b) transzverzális hullám; c) tágulási hullám; d) hajlítási hullám; e) felületi hullám

Az ún. „végtelen kiterjedésű” közegben (amelynek méretei a hullámhosszhoz viszonyítva nagyok) longitudinális és transzverzális hullámok keletkeznek (2.21. ábra a, és b, ábrarészlete). Az olyan testekben, amelyeknek anyagvastagsága az ultrahang hullámhosszával azonos nagyságrendű, tágulási és hajlítási hullámok, míg a közeg felületén felületi hullámok (ezt Rayleigh hullámnak is nevezik) keletkeznek (2.21. ábra c, d, és e, ábrarészlete) [52, 53, 54, 55, 56, 57, 58].

#### 2.4.4.2. Az ultrahang gerjesztése

Ultrahangot sokféle módon gerjeszthetünk. Kezdetben ún. mechanikusan működő ultrahangadókat alkalmaztak. Ide tartozik a Galton–féle síp, a Hartmann–féle gázáramú rezgőgenerátor, a Pohlmann–Janovski–féle síp és a különböző típusú ultrahangszirénák. Különösen ez utóbbiak alkalmasak a „teljesítmény–hang” keltésére, de roncsolásmentes anyagvizsgálatra nem voltak használhatók. Az elektrotechnika fejlődésével, megjelentek az elektromos eljárások [59, 60, 61].

A piezoelektromos módszer a Curie testvérek (Pierre Curie és Jacques Curie) által 1880-ban felfedezett elven alapszik, amelynek lényege, hogy bizonyos kristályok felületén, amelyek nyomásnak vagy húzásnak vannak kitéve, villamos töltés keletkezik. A kristályrács alakváltozása folytán a negatív rácspontok a pozitívokhoz képest úgy tolódnak el, hogy a kristály határfelületein felületi töltések jönnek létre. A töltéshordozók száma és ezáltal a felületek közötti potenciál-különbség arányos a nyomás, ill. a húzás nagyságával. A piezoelektromos jelenség csak azokon a kristályokon jelentkezik, amelyeknek egy vagy több poláris tengelyük van. Ilyen kristályok a kvarc, a borkősav, a cinkszulfid stb.

Hasonló a dielektrosztrikciós jelenség is, amely a báriumtitanát és az ólomtitanát – ólomcirkonát – kerámia többkristályon lép fel. Az ultrahang-hullámok keltésére vagy érzékelésére való kristálylemezt az egyik poláris tengelyre merőlegesen kell a kristályból kivágni [62, 63].

A reciprok piezoelektromos jelenség szerint a piezoelektromos kristály villamos erőterben az erővonalak iránya szerint összehúzódik vagy kitágul. Váltakozó erőter esetén tehát a kristály rezgéseket végez. A kristályt önrezgésszámával, azaz rezonanciában gerjesztve igen intenzív (erős) rezgéseket sugároz ki környezetébe, és ezek a rezgések a kristálylemez méretei szerint mélyen belenyúlhatnak az ultrahangtartományba [64].

A magnetosztrikciós vagy Joule-hatás azon a jelenségen alapszik, hogy ferromágneses anyagok, ha velük párhuzamosan haladó mágneses térbe kerülnek, hosszukat megváltoztatják. A hosszabbodás vagy rövidülés függ az anyag előkezelésétől, hőmérsékletétől, valamint az

előmágnesezés mértékétől. Egy ferromágneses rúd váltakozó mágneses térben az előmágnesezésnek megfelelően a mágneses tér rezgéseinek ütemében változtatja hosszúságát, és e hosszváltozások a környező molekulákat hangrezgésbe hozzák.

#### 2.4.4.3. A dinamikus rugalmassági modulus meghatározása a hang terjedési sebességének segítségével

Dinamikus rugalmassági modulus ultrahangos meghatározásnak az elve, hogy a hang terjedése egy adott szilárd testben összefügg a szilárd test dinamikus rugalmassági modulusával a következő képletnek (14) megfelelően [65].

$$E_{dU} = \rho \cdot v^2 \quad (14)$$

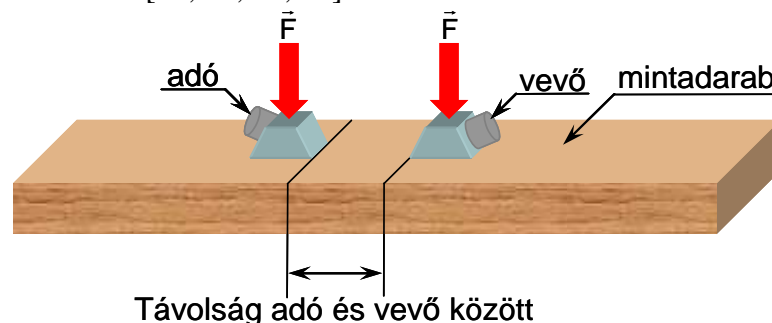
Vagyis, ha egy szilárd testben nagy pontossággal mérhető a hang terjedési sebessége, és meghatározható a test tömeg szerinti térfogatsűrűsége, akkor a dinamikus rugalmassági modulus egy egyszerű kifejezéssel meghatározható.

Néhány hozzávetőleges érték az ultrahang terjedési sebességére különböző anyagokban 20 °C-on,

- levegő: 343 m/s,
- víz: 1460 m/s,
- beton: 3800 m/s,
- acél: 5100 m/s.

A hangterjedési sebesség kiszámítható, ha egy hangforrásból, egy tőle jól definiált távolságban lévő vevő között mérjük a hangnak a forrásból a vevőbe érkezés idejét [66].

Vagyis a dinamikus rugalmassági modulus, lényegében egy nagy pontosságú időmérés eredményének segítségével megadható. A hangterjedési idő mérésének sematikus rajza következő, 2.22. ábrában látható [67, 68, 69, 70].



2.22. ábra.

Az ultrahang szilárd anyagban való terjedési idejének mérésének sematikus rajza

#### 2.4.5. A dinamikus rugalmassági modulus mérése hajlítórezgésekkel

Hajlítórezgés frekvenciájának mérésén alapuló eljárás.

Ha egy fadarabot bárhol megütünk, rezgésbe jön. Megfelelő frekvenciatartományban ez hallható is (pl. xilofon, marimba).

A prizmatikus rudak rezgéseit leíró egyenletek mindegyike tartalmazza a faanyag rugalmasságát jellemző rugalmassági modulus értékét. Ennek megfelelően, a prizmatikus rúd sajátrezgéseit és néhány fizikai jellemzőjét meghatározva a rúd anyagának dinamikus rugalmassági modulusa meghatározható. Ilyen jellemzők a prizmatikus rúd geometriai méretei, és tömege (sűrűsége) [ 71, 72, 73, 74].

Prizmatikus rudak esetében nagyon jó közelítést ad az un. Timoshenko–elmélet.



### 2.4.5.1. Rayleigh – Timoshenko – elmélet

A Rayleigh–Timoshenko–elmélet (röviden Timoshenko–elmélet) a hajlító rezgések mozgásegyenletének negyedfokú sorbafejtéséből indul ki, és hajlító hullámok esetében is figyelembe veszi a csavaró nyomatékot és a belőle származó csavaró alakváltozást.

A Timoshenko–elmélet alapján felírt differenciálegyenlet a következő [25, 75].

$$EI \frac{\partial^4 \xi}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - \rho I \left( 1 + \frac{E}{\beta G} \right) \frac{\partial^4 \xi}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\rho^2 I}{\beta G} \frac{\partial^4 \xi}{\partial t^4} = 0 \quad (15)$$

Ahol,

$I$ := tehetetlenségi nyomaték,

$\xi$ := a z és az y irányú elmozdulás,

$x$ := a prizmatikus rúd hossz tengelye irányában mért távolság,

$\beta$ := alaktényező, értéke prizmatikus rudak esetében  $(1,2)^{-1} = 0,833$ .

Jelenleg nem létezik a Timoshenko–elmélet alapján felírható összefüggés zárt alakban. Numerikus, iterációs módszereket vagy végelelemes programokat alkalmaznak a közelítő megoldására.

### 2.4.5.2. Euler / Saint-Venant elmélet

Az Euler–elmélet, a Timoshenko–elmélettel ellentétben nem veszi figyelembe a torziós nyomatékot és a belőle származó csavaró alakváltozást. Ám téglalap keresztmetszetű prizmatikus rudak esetén, sajátfrekvenciáknál (tehát az első felharmónikusoknál), és ha a hosszúság legalább tizenötször nagyobb, mint a vastagság ( $L/h > 15$ ), a két elmélettel meghatározott rugalmassági modulus esetén nincs jelentős különbség. Ez alatt az Euler–egyenlet segítségével számított rugalmassági modulus értéke exponenciálisan csökken és ezáltal egyre pontatlanabbá válik [76].

Prizmatikus rúd hajlító sajátfrekvenciája Euler–elmélet szerint a következő differenciálegyenlet segítségével határozható meg.

$$EI \frac{\partial^4 \xi}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0 \quad (16)$$

A határfeltételek figyelembevételével az  $n$ -ed rendű sajátfrekvencia a következő képletek alapján számítható hajlító rezgések esetén [77, 78, 79, 80].

$$f_{Bn} = \gamma_n \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}} = \gamma_n \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI}{m L^3}} \quad (17)$$

Ahol,

$f_{Bn}$ := az  $n$ -edik hajlító módus frekvenciája,

$\gamma_n$ := felharmónikustól függő érték, általánosan megközelítőleg igaz, hogy  $\gamma_n \approx \left( n + \frac{1}{2} \right)^2$ , az

első két felharmónikus esetén,  $\gamma_1 = 2,267$ ;  $\gamma_2 = 6,249$ .

Az előző (17) egyenlet alapján a dinamikus hajlító rugalmassági modulus a következő összefüggéssel határozható meg.

$$E_{dBn} = \left( \frac{2f_{Bn}}{\gamma_n \pi} \right)^2 \frac{m L^3}{I} \quad (18)$$

Ahol,  $E_{dBn}$ := az  $n$ -edik hajlító módusból számított rugalmassági modulus.

### 2.4.6. A dinamikus torziós rugalmassági modulus

Az  $n$ -ed rendű csavaró rugalmassági modulus a következő összefüggéssel határozható meg [81, 82, 83].

$$f_{Tn} = \left( \frac{n}{2L} \right) \sqrt{\frac{G_d K_T}{\rho I_p}} \rightarrow G_d = \left( \frac{2L \cdot f_{Tn}}{n} \right)^2 \frac{\rho \cdot I_p}{K_T} \quad (19)$$

Ahol,

$I_p$ := poláris tehetetlenségi nyomaték,  $I_p = \int_A r^2 dA$ , téglalap keresztmetszetű rúd esetén:

$$I_p = \int_{-a/2}^{+a/2} \int_{-h/2}^{+h/2} (x^2 + y^2) dx dy = \frac{b \cdot h}{12} (b^2 + h^2) \quad (20)$$

Ahol,

$r$ := a  $dA$  infinitézimális felületelem  $z$  tengelytől mért radiális távolsága,

$b$ := a prizmatikus rúd szélessége,

$h$ := a prizmatikus rúd vastagsága,

$K_T$ := torziós keresztmetszeti tényező, téglalap keresztmetszetű rúd esetén

$K_T = c \cdot b \cdot h^3$ ,

$c$ := hossz tengelyre merőleges oldalak aránya  $\frac{b}{h}$ -hoz tartozó konstans.

Értékét táblázatból lehet meghatározni.

#### 2.2. táblázat. Hossz tengelyre merőleges oldalak aránya

b/h	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	10	$\infty$
c	0,141	0,196	0,229	0,249	0,263	0,281	0,291	0,299	0,312	0,333

Annak érdekében, hogy a köztes arányokhoz tartozó  $c$  értékeket is pontosan meg tudjam határozni, a számításaimhoz a táblázat értékeire 4-ed fokú polinomot illesztettem. A kapott polinom, a következő.

$$c = -0,0007568 \left( \frac{b}{h} \right)^4 + 0,0131927 \left( \frac{b}{h} \right)^3 - 0,0865176 \left( \frac{b}{h} \right)^2 + 0,2657794 \left( \frac{b}{h} \right) - 0,0500641 \quad (21)$$

Az egyenlet determinációs koefficiense 0,9996, a  $\frac{b}{h} = [0; 5]$  tartományon [84].

### 2.4.7. ASTM

American Society for Testing and Materials (ASTM) egyike a legnagyobb és legelfogadottabb szabványgyűjteményeknek. A C1189 – 96 és a C1259 – 98 számú szabványok a dinamikus hajlító- és nyíró rugalmassági modulus meghatározásával foglalkoznak. A szabványban definiált képletek nagy előnye, hogy a Timoshenko elmélethez hasonlóan figyelembe veszi a torziós nyomatékot és a belőle származó csavaró alakváltozást.

A szabvány specifikálja a vizsgálat körülményeit, a vizsgálatához használt berendezéseket, és a vizsgálni kívánt mintadarabot is.

A mintadarabra vonatkozó előírások a következők. Paralelogramma, vagy kör keresztmetszetű hasábok vizsgálhatók. De a téglalap keresztmetszetű rúd a legalkalmasabb.

A szemközti oldalaknak párhuzamosnak kell lenniük. A felületi minőség minél jobb, kis felületi érdességű kell legyen. A geometriai méreteket és a tömeget, legalább 0,1%-os pontos-

sággal kell meghatározni. A keresztmetszet kisebbik méretétől legalább tízszer nagyobbak kell lenni a rúd hosszának, de a legalább húszszor nagyobb hossz a kívánatos.

#### 2.4.7.1. Dinamikus hajlító rugalmassági modulus meghatározása az ASTM szerint

A dinamikus hajlító rugalmassági modulus a következőképpen határozható meg.

$$E_{dB\ ASTM} = 0,9465 \cdot \left( \frac{m \cdot f_{B-1}^2}{b} \right) \cdot \left( \frac{L}{h} \right)^3 \cdot T_1 \quad (22)$$

Ahol,

$T_1$  := korrekciós tényező.

$$T_1 = 1 + 6,585 (1 + 0,0752 \mu + 0,8109 \mu^2) \left( \frac{h}{L} \right)^2 - 0,868 \left( \frac{h}{L} \right)^4 - \left[ \frac{8,34 (1 + 0,2023 \mu + 2,173 \mu^2) \left( \frac{h}{L} \right)^4}{1 + 6,338 (1 + 0,1408 \mu + 1,536 \mu^2) \left( \frac{h}{L} \right)^2} \right] \quad (23)$$

Ahol,  $\mu$  := Poisson-tényező (A szabványban szereplő jelölést alkalmaztam, a magyar szakirodalom  $\nu$ -vel jelöli).

Amennyiben a mintadarab hossza legalább húszszor nagyobb, mint a vastagsága ( $L/h \geq 20$ ) akkor a kifejezésben a negyedrendű és a Poisson-tényezőt tartalmazó tagokat elhagyhatjuk. Ennek megfelelően a korrekciós tényező a következőképpen egyszerűsödik.

$$T_1 = 1 + 6,585 \left( \frac{h}{L} \right)^2 \quad (24)$$

#### 2.4.7.2. Dinamikus torziós rugalmassági modulus meghatározása az ASTM szerint

A dinamikus torziós rugalmassági modulus a szabvány szerint a következő.

$$G_{d\ ASTM} = \left( \frac{4 L m f_{T-1}^2}{b \cdot h} \right) \left( \frac{B_{ASTM}}{1 + A_{ASTM}} \right) \quad (25)$$

Ahol,

$A_{ASTM}$  := empirikus korrekciós tényező, mely a mintadarab szélességének és vastagságának az arányától függ. Ennek a korrekciós tényezőnek a hatása kisebb, mint 2%, vagyis ha nem kívánjuk meg az eredménytől, hogy 2%-tól kisebb hibával adja meg a valós értéket, a tényezőtől el is tekinthetünk.

$$A_{ASTM} = \frac{0,5062 - 0,8776 \left( \frac{b}{h} \right) + 0,3504 \left( \frac{b}{h} \right)^2 - 0,0078 \left( \frac{b}{h} \right)^3}{12,03 \left( \frac{b}{h} \right) + 9,892 \left( \frac{b}{h} \right)^2} \quad (26)$$

$B_{ASTM}$  := szintén empirikus korrekciós tényező, mely a mintadarab vastagságának és szélességének az arányától függ.

$$B_{ASTM} = \frac{\frac{b}{h} + \frac{h}{b}}{4 \left( \frac{h}{b} \right) - 2,52 \left( \frac{h}{b} \right)^2 + 0,21 \left( \frac{h}{b} \right)^6} \quad (27)$$

## 2.5. A faanyag mechanikai tulajdonságainak meghatározása

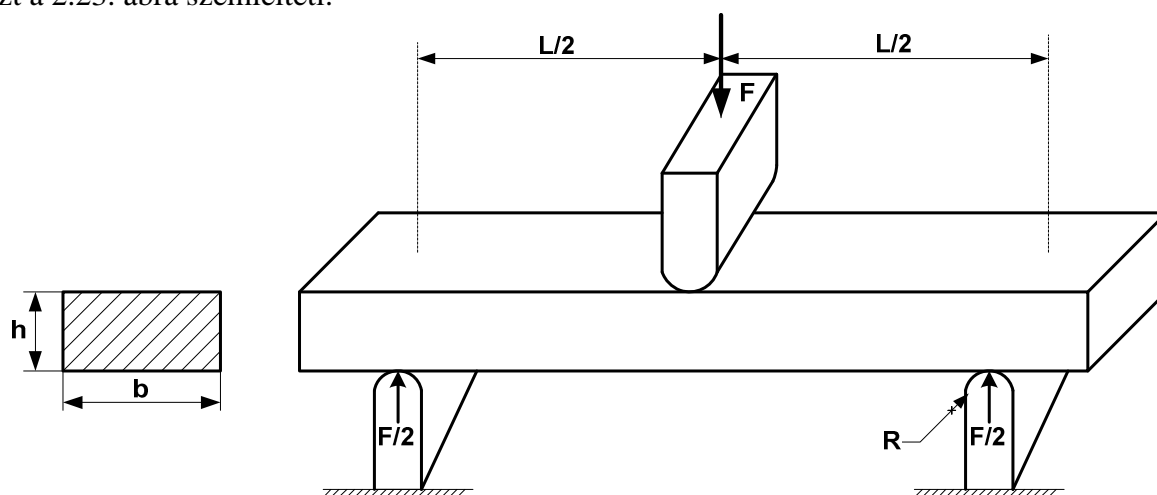
### 2.5.1. Faanyag statikus hajlítószilárdságának és statikus rugalmassági modulusának meghatározása hárompontos hajlító vizsgálattal

A hajlító vizsgálat a mechanikai anyagvizsgáló módszerek közül az egyik legelterjedtebb minősítő eljárás. Különösen rideg anyagok estében végzik, köszönhetően annak, hogy nincs szükség a mintadarab szoros rögzítésére, megfogására, ami a mintadarab vizsgálat előtti tönkremenetelét eredményezné. Továbbá, a vizsgálható mintadarab alakja (és ebből következően kimunkálása!) nagyon egyszerű. Tulajdonképpen minden prizmatikus test vizsgálható hajlító vizsgálattal [85, 86].

Faanyagok esetében szintén a hajlító vizsgálat az egyik legfontosabb és leggyakrabban alkalmazott vizsgálati módszer. Fontosságának megfelelően, faanyagok statikus hajlítószilárdságának ( $R_{mh}$ ) és statikus rugalmassági modulusának ( $E_B$ ) meghatározásával számos szabvány foglalkozik. Ilyen például az MSZ EN 789, mely faszerkezetek, fa alapanyagú lemezek, vagy az MSZ EN 408, mely szerkezeti fa és rétegelt-ragasztott fa egyes mechanikai tulajdonságainak meghatározásával foglalkozik. De ide tartozik a MSZ EN 310 is, mely kifejezetten a fa alapú lemezek hajlítószilárdság és hajlítási rugalmassági tényező meghatározását részletezi.

Két fajtája terjedt el, a három-, és a négy pontos hajlítás. A négy pontos hajlító vizsgálat előnye, hogy a nyíróerőket kiküszöböli, ezért különösen a hajlító rugalmassági modulus esetében gyakrabban alkalmazzák. A vizsgálataim során hárompontos hajlító vizsgálatokat végeztem, ezért a továbbiakban azt ismertetem.

A hárompontos hajlító vizsgálat során a próbatestet két ponton alátámasztjuk és az alátámasztásokkal ellentétes oldalon, a támaszköz középvonalaiban egy ponton terheljük, ahogyan azt a 2.23. ábra szemlélteti.

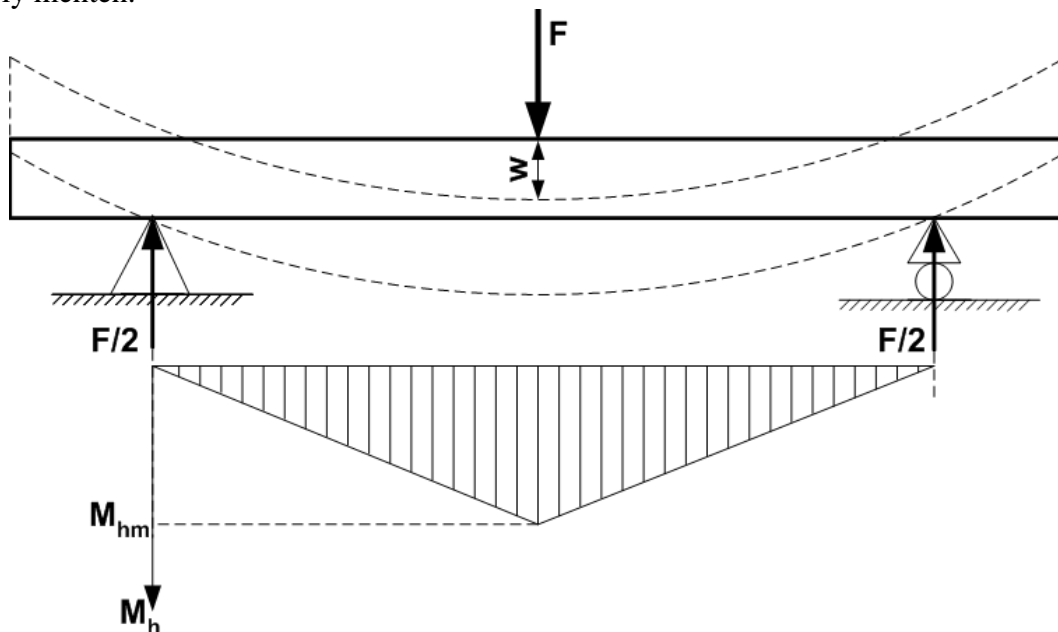


2.23. ábra.

A hárompontos hajlító vizsgálat elrendezési rajza

A terhelést nulláról indulva a behajlással együtt folyamatosan mérjük és regisztráljuk, mindaddig, amíg a próbatest el nem törik. A mért erő értékét a behajlás függvényében ábrázolva megkapjuk a vizsgálat hajlító diagramját, melyet a mintadarab kezdeti méreteit figyelembe véve relatív értékekben is szokás ábrázolni, vagyis az alakváltozás függvényében a hozzá tartozó feszültség értéket.

Mechanikai szempontból a hárompontos hajlítás során a próbatestet kéttámaszú tartóként terheljük a központban ható erővel miközben nyomoték a 2.24. ábra szerint változik a hossz-tengely mentén.



**2.24. ábra.**

A hárompontos hajlítóvizsgálat elvi vázlata és nyomatéki ábrája [87]

Az ábrában  $M_{hm}$  a maximális hajlítónyomatékot jelenti, melynél a próbatestet eltörik. A hajlítónyomaték maximális értéke a (28) egyenlet alapján számítható,

$$M_{hm} = \frac{F_m \cdot L}{4} \quad (28)$$

ahol,  $F_m$  a középponti terhelőerő legnagyobb értéke,  $L$  az alátámasztások közötti távolság.

Az erőhatás nagyságából ( $F$ ) és a behajlás mértékéből ( $w$ ) az anyag alakváltozása ( $\epsilon_B$ ) és az anyagban ébredő feszültség ( $\sigma_B$ ) kiszámítható a mintadarab geometriájának ismeretében. Hasáb alapú prizmatikus rudak esetében a következő képletek alkalmazhatók.

$$\sigma_B = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (29)$$

$$\epsilon_B = \frac{6 \cdot w \cdot h}{L^2} \quad (30)$$

A hajlítószilárdság a vizsgálat során fellépő legnagyobb erőhöz tartozó feszültség. Hasáb próbatest esetén a hajlítószilárdság a (29) képletnek megfelelően, a következő összefüggés segítségével számítható [88].

$$R_{mh} = \frac{3 \cdot F_m \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (31)$$

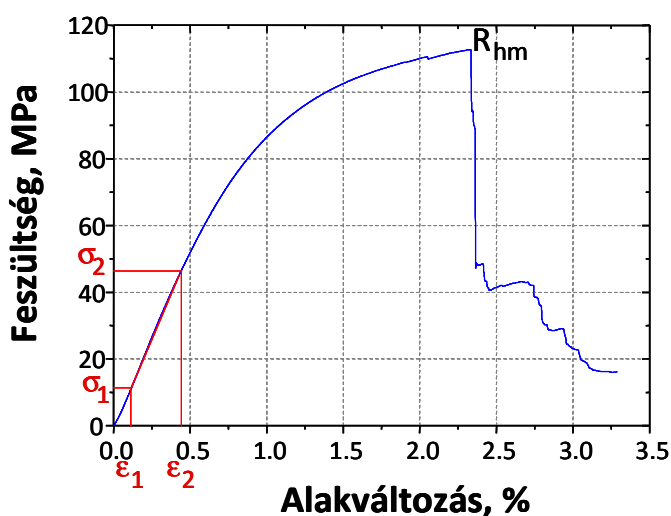
Az erő értékét newtonban, a méreteket milliméterben behelyettesítve a hajlítószilárdságot megapaszkál dimenzióban kapjuk meg.

### 2.5.1.1. Faanyag rugalmassági modulusának meghatározása

A [94] szabvány alapján a rugalmassági modulus meghatározásának elve: a tiszta hajlítás tartományában egyenletesen növekvő terhelés mellett határozzuk meg a modulus értékét a hajlítódiagramból azon a szakaszon, ahol a behajlás a terheléssel arányos. Ennek a szakasznak a kiválasztása elég nehéz. A hajlítóvizsgálat kezdeti szakaszában a terhelést átadó hajlítófej és az alátámasztások belenyomódnak a mintadarab felületébe. Ez a szakasz nem lineáris és nem

is az anyag merevségét jellemzi, hanem a hajlítófej és az alátámasztások görbületi sugara, a mintadarab felületi minősége, és leginkább a keménysége határozza meg. Majd egy rövid lineárisnak tekinthető szakasz után ismét egyre jobban kezd eltérni a lineáristól, laposodik a diagram egész a hajlítószilárdságot jellemző maximális értékig, ami a fa viszkoplasztikus viselkedésére utal. Faanyagok esetében egyezményesen a maximális terhelőerőhöz viszonyított szakaszon kell meghatározni a rugalmassági moduluszt. Ez a szakasz a maximális terhelőerő 10 és 40 %-a közé eső tartomány. A tartomány, hosszú évtizedek tapasztalatai alapján lett kiválasztva, úgy hogy a faanyagok nagytöbbségének esetében ezen a tartományon belül jó közelítéssel lineárisnak tekintető a hajlítódiagram. Rugalmassági modulusz ilyen meghatározásának előnye, hogy a moduluszt meghatározó személyétől független a meghatározott érték.

A következő, 2.25. ábrában egy bükkfa tipikus hajlítódiagramja látható.



A diagramon látható jellegzetes értékek:

$$\sigma_1 := 0,1 \cdot R_{mh}$$

$$\sigma_2 := 0,4 \cdot R_{mh}$$

$$\varepsilon_1 := \text{A } \sigma_1\text{-nek megfelelő alakváltozás értéke}$$

$$\varepsilon_2 := \text{A } \sigma_2\text{-nek megfelelő alakváltozás értéke}$$

A  $\varepsilon_1$  és  $\varepsilon_2$  közötti szakaszra illesztett egyenes meredekségként megkapható a statikus hajlító rugalmassági modulusz.

### 2.25. ábra.

Bükkfa tipikus hajlítódiagramja  
(keresztmetszet  $10 \times 10$  mm, alátámasztás: 120 mm)

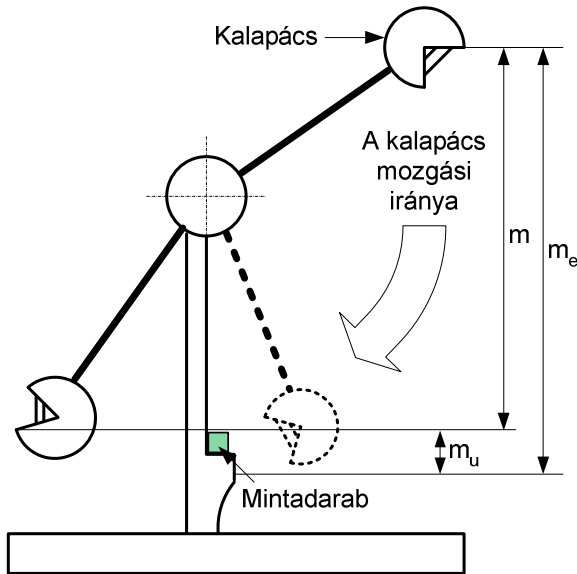
A fa anizotróp, inhomogén felépítésű kompozit anyag, melynek hajlítószilárdsága erősen függ a szerkezettől. Szilárdabb az egyenes rostlefutású faanyag, ha tömörebb a szövete. A szíjács hajlítószilárdsága általában kisebb, mint a geszté. A fák makroszerkezeti rendellenességei, pl. göcs csak akkor befolyásolják a hajlítószilárdságot, ha azok a legnagyobb hajlítónyomatók helyén vagy annak közelében és a legkülső nyomott vagy húzott övben helyezkednek el. A hajlítóvizsgálat eredményére azonban nemcsak a szerkezeti inhomogenitás, hanem más befolyásoló tényezők is hatnak, úgymint a próbatest mérete, illetve a nedvességtartalma. A hajlítószilárdság ugyanazon fa esetében annál kisebb, minél kisebb az alátámasztás köze és a próbatest magassága közötti viszonyszám. Illetve a fa nedvességtartalmának 1 %-os növekedése a hajlítószilárdságban 4 %-os csökkenést okozhat.

### 2.5.2. Faanyagok ütő-hajlító szilárdságának meghatározása

A gyors, lökésszerű erőhatásokkal szembeni ellenállást nevezzük dinamikai szilárdságnak. A dinamikai szilárdságot azzal a munkával mérjük, amelyet az anyagra ható erők a gyorstörés előidézésekor kifejtnek. Az anyagvizsgálati gyakorlatban a lengőkalapácsos ütőművel megvalósítható ütő-hajlító szilárdsági vizsgálat terjedt el. Ez a szilárdság kifejezi azt a keresztmetszetre vonatkoztatott fajlagos törő munkát, amelyet a lengőkalapács kifejt a faanyag eltörésekor. Ez jellemzi, hogy az adott faanyag mennyire szívós dinamikus igénybevételek esetén [89, 90, 91, 92, 93].

A faanyagok ütő-hajlítószilárdságát úgy határozzuk meg, hogy a próbatestet dinamikusan terhelve rostirányra merőleges hajlításra vizsgáljuk. Ehhez szükséges eszköz, egy lengőkalapács, amelynek energiatartaléka 3-5-ször nagyobb a próbatest töréséhez szükséges munkánál [94]. A kalapácsot adott magasságban elengedve a kalapács potenciális energiája folyamatosan kinetikus energiává alakul. A mintadarabba való becsapódás pillanatában a kalapács csak kinetikus energiával rendelkezik, melynek egy része elnyelődik a mintadarabban, és a maradék kinetikus energia teljesen visszaalakul helyzeti energiává [95].

A mérést Charpy-féle ütőművön végezzük el, amelynek sematikus rajza a következő ábrában található.



2.26. ábra.

Az ütő-hajlító vizsgáló gép elvi sémája [8]

$$w = \frac{M_k \cdot g \cdot m_e - M_k \cdot g \cdot m_u}{A} = \frac{M_k \cdot g \cdot (m_e - m_u)}{A} = \frac{M_k \cdot g \cdot m}{A} \quad (32)$$

Ahol,

$w$  := a fajlagos ütő-hajlító munka,  $J/cm^2$ ,

$M_k$  := a kalapács tömege, kg,

$g$  := a gravitációs gyorsulás,  $m/s^2$ ,

$m_e$  := a kalapács ejtési magassága, m,

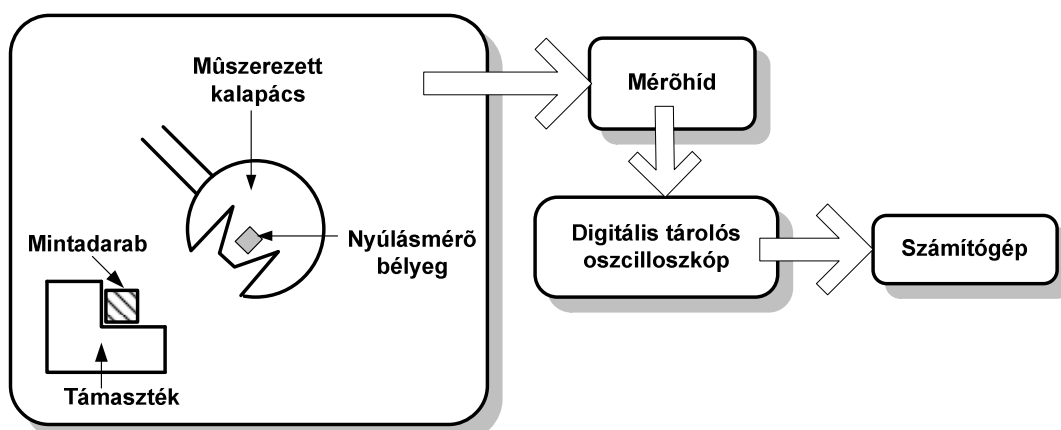
$m_u$  := a kalapács túllengés utáni magassága, m,

$m$  := a töréshez szükséges magasság, m,

$A$  := a próbatest keresztmetszete,  $cm^2$ .

A mintadarab által elnyelt munkát 0,1 joule pontossággal mérjük. A vizsgálat után meghatározzuk a törésképet.

A hagyományos Charpy-féle ütő-hajlító vizsgálatokon túlmenően lehetőség van a berendezés felműszerezésére, így viszonylag olcsó és egyszerű módszerrel felvehető az adott anyagra jellemző erő-idő vagy erő-behajlás diagram, amelyből értékes információk nyerhetők a törési folyamat jellegére vonatkozóan. A műszerezett ütővizsgálathoz tartozó rendszerek négy fő elemre bonthatók, melyek az alábbiak:



2.27. ábra.

A műszerezett ütővizsgálat egy lehetséges elrendezési vázlata

A négy fő elem a következő: [96]

- **Ütőgép:** Az ütőmű jellemzője, hogy fokozatmentesen állítható az ütési sebesség, valamint a nagyobb maximális ütési energiájú kalapácsok, illetve nagyobb terhelési sebességgel végzett vizsgálatok alkalmával az ütési energia közvetlenül, digitálisan leolvasható a berendezésről.
- **Erőmérő:** Az erőmérés nyúlásmérő bélyegekkel történik, amelyek a kalapács homlokfelületére vannak felragasztva. A terhelőerő mérése az ún. kiegyenlített Wheatstone–hidas kapcsolásban történik. Ez a fajta erőmérés egy speciális közvetett módszer az erő – ellenerő elvén alapszik, mivel amennyi erő terheli a kalapácsot, ugyanannyival deformálódik a mintadarab. Hagyományos esetekben ezeket a nyúlásmérő bélyegeket a próbatestre szokás felhelyezni, azonban költségtakarékosági és praktikusági szempontokból ez a fajta megoldás is eredményhez vezet.
- **Mérőerősítő:** Maximum 1000-szeres erősítés oldható meg, a híd tápfeszültség állítható.
- **A mért adatok tárolására szolgáló eszköz:** Digitális tárolós oszcilloszkóp, melyen az erő-idő diagramokat jelenítjük meg. Ezen diagramok digitális adatai csv fájl formátumban kerülnek tárolásra, melyekből a mérési eredményeket képviselő diagramok az erre a célra szolgáló számítógépes program (ceast15a) segítségével feldolgozhatók és újra megjeleníthetők. A kiértékelt mérési eredmények ezen programban már mint Excel fájl jelennek meg.

A mérés megkezdése előtt rögzíteni kell az ún. beállítási paramétereket. Ilyen paraméter például az oszcilloszkóp vízszintes és függőleges osztásnagysága mV/osztás egységekben.



A mérés információtartalma:

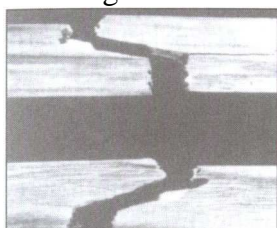
Műszerezett ütővizsgálattal egyfelől meghatározhatunk minden olyan szokásos mérőszámot, amelyet a hagyományos ütővizsgálat során mérünk, ezen túlmenően pedig a dinamikus hatásokkal szembeni viselkedésre, a törési folyamatra vonatkozó számos további információt nyerhetünk a felvett ütő-hajlító diagram alakjából.

### 2.5.2.1. Ütő-hajlító vizsgálat töreteinak elemzése

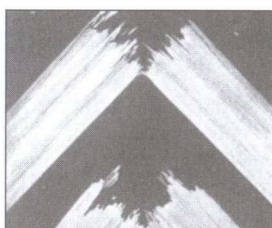
Az ütővizsgálatok számszerű értékelésén túl a vizsgálat során keletkező **töreték elemzése** is segíthet a rideg vagy szívós viselkedés jellemzésében. A szakirodalom a faanyag töretek megjelenési formájának és azok ridegségre vagy szívósságra utaló jellemzőinek elemzését illetően nem egységes [97, 98].

A [94] szabvány két csoportot, rideg és szívós törési képeket különít el. A szívós törésképre a hosszúrostú törés jellemző. A rideg törésképeknek három megjelenési formáját különbözteti meg, a csipkésen fogazott, a sima, és a lépcsős töretet. Nehézsége ennek az osztályozási típusnak, hogy nem ad meg jellemző törésképeket viszonyítási alapként (nincsenek sem felvételek, sem sematikus rajzok a szabványban).

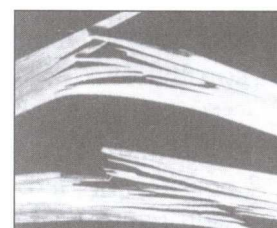
A [8] irodalom alapvetően három töréstípust különít el: rideg, normál és szálkás (szívós). A nagyobb ütő-hajlító szilárdsággal rendelkező szívós fák nagy alakváltozás mellett szálkásan törnek, lásd 2.28. ábra. A töréstípusok egy-egy jellemző törésképe a következő ábrában figyelhető meg.



a) Rideg töret



b) Normál töret



c) Szálkás (szívós) töret

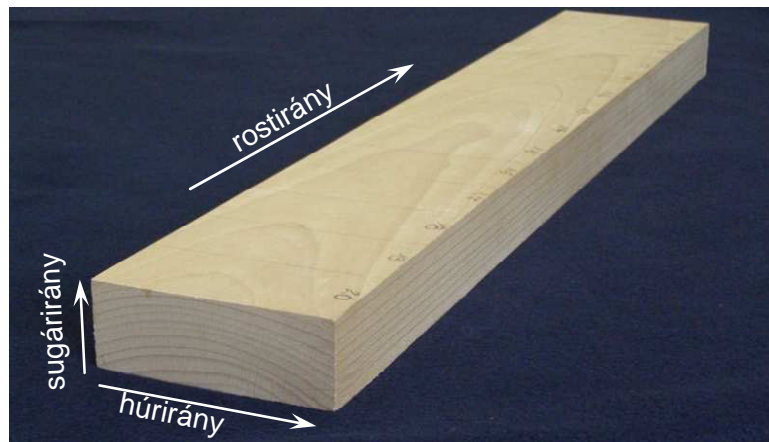
### 2.28. ábra.

Jellemző törésképek ütő-hajlításakor Molnár Sándor Faanyagismeret című könyve alapján

### 3. VIZSGÁLATOK ÉS EREDMÉNYEK

Jelen disszertációban a közönséges bükk (*Fagus Sylvatica* L.), rostirányú tömörítés utáni fizikai tulajdonságaival és mikro–szerkezetbeli változásaival foglalkozom.

A tömörített hasábok gondosan lettek kiválasztva. Azonos területről származó rönkök, melyeknél biztosított a növekedés során az azonos szélterhelés, és az időszakonkénti azonos csapadékmennyiség, ami feltétele az azonos évgűrűszerkezetnek. A rönkök döntés utáni pihentetése és természetes (elő)szárítása, a növekedési, illetve belső feszültségek csökkentése érdekében azonos körülmények között történt. A rönkökből a hasábok azonos magasságban lettek kivágva. A kivágás során ügyelni kell az anatómiai irányokra, a szálf kifutásra. A hasábokat aszerint válogattam, hogy a tömörítendő faanyag korhadás-, hiba-, és göcsmentes, valamint minél kisebb rostkifutású legyen. A következő ábra az anatómiai irányokat mutatja a tömörítéshez előkészített hasábban.



**3.1. ábra.**

Az anatómiai irányok a tömörítéshez előkészített hasábban

Az általam végzett tömörítések dokumentációja a mellékletben található.

Jelen disszertációban a hatodik alkalommal végzett tömörítés–sorozat hasábjainak, mintadarabjainak vizsgálatait részletezem.

Összesen hatféle tömörítési szintet vizsgálok, a hasábok eredeti hosszához képest 0, 5, 8, 10, 15 és 23%-kal tömörített mintadarabokat. (Ez tehát öt tömörítést jelent, a 0%-os, a tömörítetlen, eredeti kontroll faanyagot jelenti.)

### 3.1. A mintadarabokon végzett vizsgálatok kronológiájukat tekintve

1. A hasáb teljes hosszának megmérése, amiből a tömörítés utáni teljes hosszra vonatkoztatott maradó alakváltozást határoztam meg.
2. A tömörítés előtt felvitt 50 mm-es jeltávok hosszának megmérése, amiből 50 mm-es szakaszokon határoztam meg a maradó alakváltozás eloszlását a hossz tengely mentén, húsz szakaszon.
3. A keresztmetszet (szélesség és vastagság egyaránt) megmérése jeltávonként, amiből jeltávonként határoztam meg a keresztmetszetet és a keresztmetszet változását a hossz tengely mentén, húsz szakaszon.
4. Ultrahangos vizsgálattal meghatároztam a hangterjedési sebességet három jeltávonként (kb. 150 mm-enként), amiből meghatároztam a dinamikus rugalmassági moduluszt a mintadarab hossz tengelye mentén, hat szakaszon.
5. Longitudinális sajátfrekvencia mérése, amiből kiszámítottam a dinamikus rugalmassági moduluszt a teljes mintadarabra.
6. Logaritmikus dekrementum meghatározása longitudinális sajátfrekvencia segítségével a teljes mintadarabra.
7. Hajlító frekvencia meghatározása az első három módusra, amiből az első felharmónikus segítségével meghatároztam a dinamikus hajlító rugalmassági moduluszt Euler / Saint-Venant elmélet és az ASTM szabványban rögzített módon is a teljes hasábra.
8. Csavaró frekvencia meghatározása az első két módusra, amiből az első felharmónikus segítségével meghatároztam a dinamikus csavaró rugalmassági moduluszt két különböző képlet alapján a teljes hasábra.
9. Hajlító vizsgálat a hossz tengely mentén 150 mm távolságonként vett mintadarabokon, keresztmetszetenként 30 mintadarabon (összesen 930 mérés), amiből meghatároztam a statikus hajlító rugalmassági moduluszt, a hajlítószilárdságot, a hajlítószilárdságig elviselt alakváltozást, és a törésig elnyelt fajlagos energia átlagértékeit keresztmetszetenként a hossz tengely mentén és a teljes hasábra.
10. Charpy-féle ütő-hajlító vizsgálat a hajlító próbatestek ép részein, keresztmetszetenként 6 mintadarabon (összesen 210 mérés), amiből meghatároztam a fajlagos ütőszilárdságot, és a repedéskeletkezéshez tartozó feszültség és alakváltozás átlagértékeit keresztmetszetenként a hossz tengely mentén és a teljes hasábra.
11. Sűrűség ill. a nedvességtartalom meghatározás a hossz tengely mentén 150 mm távolságonként vett mintadarabokon.
12. Mikroszerkezet vizsgálat anatómiaiailag megfelelően kimunkált és előkészített mintákon, pásztázó elektronmikroszkóp segítségével.

A tömörítendő anyag geometriai méreteit a tömörítő berendezés és a tömörítés utáni vizs-  
gálsorozat határozta meg. A rezonancia és az ultrahangos vizsgálatokhoz optimális méret-  
arányokat és méreteket figyelembe véve a tömörítendő faanyag méreteit a következőkben ha-  
tároztam meg.

Vastagsága:= 40 mm

Hossza:= 1000 mm

Szélessége:= 120 mm

Így a 80×120 mm keresztmetszetű tömörítő berendezésben két mintadarabot tudtam tömö-  
ríteni egyszerre. A tömörített faanyag hossza a vastagságnak huszonötszöröse, ami a longitu-  
dinális és a hajlító rezonancia vizsgálatnál fontos, és a szélesség is jóval nagyobb, mint a vas-  
tagság, ami a torziós rezonanciavizsgálathoz elengedhetetlen.

A tömörítést megelőző hidrotermikus kezelés előtt minden hasábot a hossz tengely mentén,  
a szélesebbik oldalon ötven milliméterenként jól látható vékony jelölésekkel láttam el. A tö-  
mörítés előtt két órán keresztül 90...100 °C hőmérsékletű autoklávban melegítettük. A tömö-  
rítés után fóliába csavartuk majd otthon kicsomagoltam és egy fűtetlen, hideg, sötét szobában  
felmáglyáztam és súlyokkal leterheltem. A hasábok bütijét vizes diszperziós ragasztóanyaggal  
bekentem, hogy lassan száradjon ki a faanyag, a száradási vetemedés elkerülése érdekében. A  
száradás során folyamatosan mértem a hasábok tömegét és a testsúlyállandóság három hónap  
után állt be. A vizsgálatokat a tömörítés után öt hónappal kezdtem meg.

### 3.2. A hasáb méreteinek változása rostirányú tömörítés hatására

A tömörítést követően a faanyag kihűlése után megmértem minden hasáb hosszát és ke-  
sztmetszetét. Majd a száradás után ismét elvégeztem a méréseket. Mérhető változást nem  
tapasztaltam a hasábok hosszában a száradás után.



3.2. ábra.

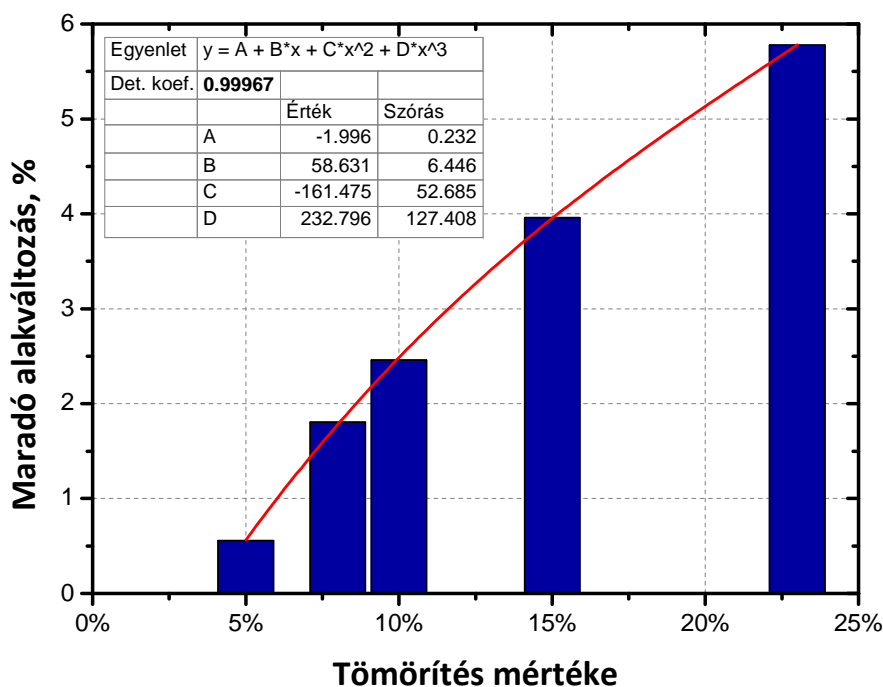
A hasábok a tömörítés és szárítás után

A tömörítés előtt minden ha-  
sáb közel egy méter hosszúságú  
volt. A 3.2. ábrában a hasábok  
láthatók tömörítés és szárítás  
után, a vizsgálatok előtt. A hasá-  
bok eleje, ami a tömörítő beren-  
dezésben az állórész volt az ábra  
tetején; vége, ami a dugattyú fel-  
őli rész volt az ábra alján látható.  
Szemmel látható, hogy a tömörí-  
tés mértékének növekedésével a  
hasábok tömörítés és szárítás  
utáni hossza egyre kisebb lett. A  
hasábok tömörítés és szárítás  
utáni hossza és a  
tömörítésenkénti átlaguk a 3.1.  
táblázatban van összefoglalva.

3.1. táblázat. A hasábok tömörítés és szárítás utáni hossza, keresztmetszete, térfogata, sűrűsége és a maradó alakváltozása tömörítésenként

Tömörítés mértéke	Hasáb	Hossz, m	Keresztmetszet, mm <sup>2</sup>	Térfogat, mm <sup>3</sup>	Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	Maradó alakváltozás, %
0%	0/1	1000,0	4577,8	4577770,2	692,7	-
	0/2	1000,0	4622,4	4622372,3	690,3	-
	<b>Átlag</b>	<b>1000,0</b>	<b>4600,1</b>	<b>4600071,2</b>	<b>691,4</b>	-
	Szórás	-	31,5	31538,5	1,7	-
5%	1/1	993,8	4612,5	4584075,4	696,8	0,6
	1/2	995,1	4603,3	4580569,2	687,2	0,5
	<b>Átlag</b>	<b>994,4</b>	<b>4607,9</b>	<b>4582322,3</b>	<b>692,0</b>	<b>0,6</b>
	Szórás	0,9	6,5	2479,2	6,8	0,1
8%	2/1	981,2	4708,1	4619643,9	686,3	1,9
	2/2	982,7	4724,1	4642196,5	701,2	1,7
	<b>Átlag</b>	<b>981,9</b>	<b>4716,1</b>	<b>4630920,2</b>	<b>693,8</b>	<b>1,8</b>
	Szórás	1,0	11,4	15947,1	10,5	0,1
10%	3/1	975,1	4734,9	4616934,4	704,6	2,5
	3/2	975,7	4726,9	4612046,2	705,8	2,4
	<b>Átlag</b>	<b>975,4</b>	<b>4730,9</b>	<b>4614490,3</b>	<b>705,2</b>	<b>2,5</b>
	Szórás	0,4	5,7	3456,5	0,8	0,0
15%	4/1	959,3	4797,2	4602196,8	705,1	4,1
	4/2	961,5	4726,9	4544917,7	724,3	3,8
	<b>Átlag</b>	<b>960,4</b>	<b>4762,0</b>	<b>4573557,3</b>	<b>714,6</b>	<b>4,0</b>
	Szórás	1,5	49,8	40502,4	13,6	0,2
23%	5/1	941,4	4903,5	4616096,1	702,0	5,9
	5/2	943,0	4858,6	4581755,1	714,5	5,7
	<b>Átlag</b>	<b>942,2</b>	<b>4881,0</b>	<b>4598925,6</b>	<b>708,2</b>	<b>5,8</b>
	Szórás	1,2	31,8	24282,8	8,8	0,1

A következő ábra a hasábok tömörítés és szárítás utáni maradó alakváltozásának tömörítésenkénti átlagát mutatja a tömörítés mértékének függvényében, oszlopdiagramban ábrázolva. Az átlagokra illesztett harmadfokú polinom fekete görbével látható. Az egyenlet 400 iterációval lett megkeresve, az illesztett görbe 100 pontot tartalmaz, toleranciaszintje  $10^{-9}$ . Az egyenlet szorzótényezői és a hozzájuk tartozó szórás az ábrán van feltüntetve. (Az egyenletben a tömörítés mértékét nem százalékos, hanem relatív értékben kell behelyettesíteni, hogy a helyes függvényértéket kapjuk.)

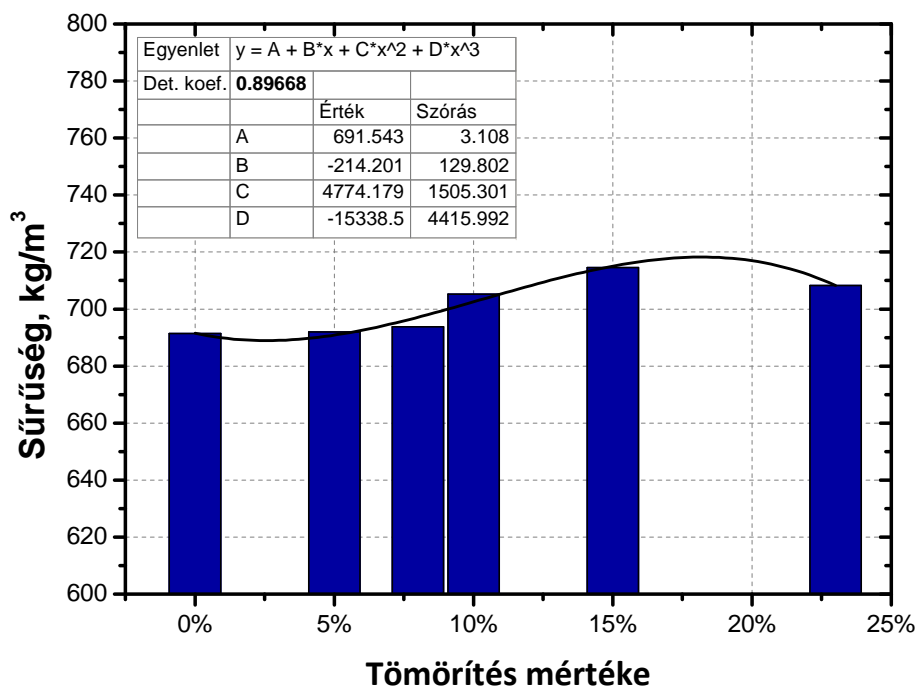


3.3. ábra.

A hasábok maradó alakváltozásának tömörítésenkénti átlaga

A diagramon egyértelműen látható, hogy a tömörítés mértékének növelésével a tömörítés utáni maradó alakváltozás folyamatosan növekszik a vizsgált 5...23%-ig terjedő tartományon. Figyelemre méltó a függvény „három kilences” illeszkedése. Ha a 0% tömörítéshez tartozó 0%-os értéket is figyelembe vesszük, akkor (természetesen az egyenlet tényezői is kismértékben változnak) a determinációs koefficiens leromlik 0,98-ra, de az illeszkedés még mindig jónak mondható.

A tömörítés a keresztmetszetet is megváltoztatta. Minden hasábon a hossz tengely mentén húsz helyen megmértem a szélességet és a vastagságot, ebből meghatároztam a keresztmetszetet. A mért eredmények és azok átlaga hasábonként a 3.1. táblázatban található. A táblázat adataiból kitűnik, hogy a tömörítés mértékének növelésével a hasábok keresztmetszete a hosszával ellentétben egyre nagyobb. Ezek után kíváncsiak voltunk, hogy a rostirányú tömörítés hatására megváltozik-e a faanyag sűrűsége. Ezért megmértem a hasábok tömegét, és meghatároztam a sűrűségüket. A következő ábra a hasábok tömörítés és szárítás utáni sűrűségének tömörítésenkénti átlagát mutatja a tömörítés mértékének függvényében oszlopdiagramban ábrázolva. Az átlagokra illesztett harmadfokú polinom fekete görbével látható. A mért eredmények és az átlaguk hasábonként a 3.1. táblázatban található.



3.4. ábra.

A hasábok sűrűségének tömörítésenkénti átlaga

A diagramot figyelve észrevehető, hogy a sűrűség nagysága a tömörítés növekedésével növekvő tendenciát mutat, ám az adatok statisztikai értékelését elvégezve nincs szignifikáns különbség az eredmények között. A tömörített hasábok sűrűségét tömörítésenként összehasonlítottam t-próbával a tömörítetlen bükk sűrűségével, és egyetlen esetben sem volt szignifikáns az eltérés. A két hatás, a hasábok hosszának és keresztmetszetének változása közel kiegyenlíti egymást, minek következtében a sűrűség változása nem nevezhető szignifikánsnak.

### 3.3. Ultrahangos vizsgálat

Ultrahangos vizsgálat segítségével meghatározható a dinamikus rugalmassági modulus egy adott szakaszon, az adott szakaszon mért hangterjedési sebesség és a sűrűség ismeretében.

A faanyag ortogonálisan anizotróp, vagyis a három anatómiai irányban a tulajdonságai különbözőek. Ezért a hangterjedési sebesség mérését ultrahang segítségével mindhárom irányban (rost-, sugár-, húrirány) elvégeztem.

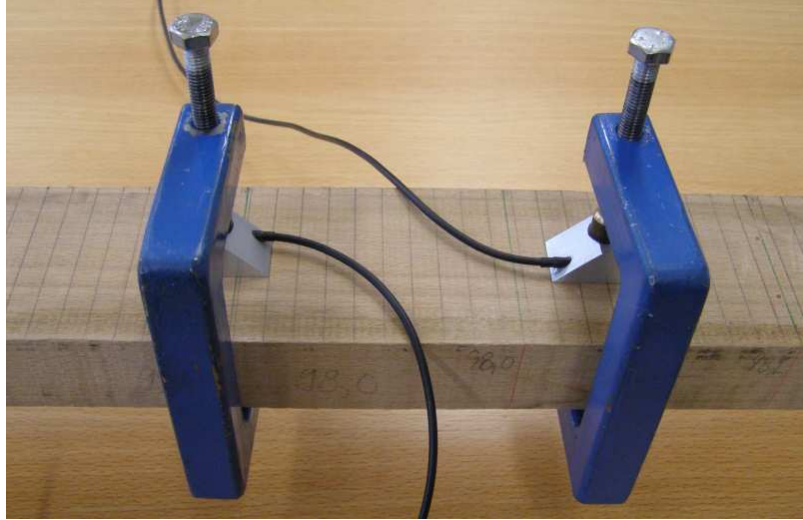
Rostirányban trapéz alakú, 45 kHz-es adót és vevőt használtam. Mivel húr és sugárirányban a rugalmassági modulus várhatóan kb. tizede a rostirányúnak, egy alacsonyabb frekvenciájú, 25 kHz-es adót és vevőt használtam, alakja pedig a rúd geometriája miatt téglalap alakú.

#### 3.3.1. Rostirányú ultrahangos vizsgálat kivitelezése

A mérés megkezdése előtt a hasáb két vége alá olyan támasztékot (PE hab) tettem, melyben a hang terjedési sebessége biztosan nagyobb, mint a mérendő mintadarabban. Ezzel elkerülhető, hogy az alátámasztás befolyásolja az eredményeket.

A forrást és a vevőt az előre meghatározott távolságra helyezük egymástól és rögzítjük, szorítjuk őket leszorító alkatrész segítségével a fa felületéhez. A leszorító erő az anyag és az érzékelők között a megfelelő csatolás elérése érdekében rendkívül fontos. Megfelelő erő elérésével a felületi egyenetlenségek kisimulnak, és az érzékelők és a faanyag közül kipréselő-

dik a levegő, ami nagymértékben megmászítaná (magnövelné) az eredményeket. Csatoló közeg (pl. szilikongél) alkalmazása faanyag esetében sajnos nem vált be. A csatoló közeg, ha kis mértékben is, de infiltrálódott a faanyag pórusos felületébe, és érzékelhetően megnövelte a hangterjedési sebességet. A mérések szórásának csökkentése, az ismételhetőség növelése érdekében egy leszorító eszközt terveztem, melyet Márkus Zoltán készített el 2008. februárjában. A következő, 3.5. ábrában a tényleges mérési összeállítás látható a leszorítókkal.



**3.5. ábra.**

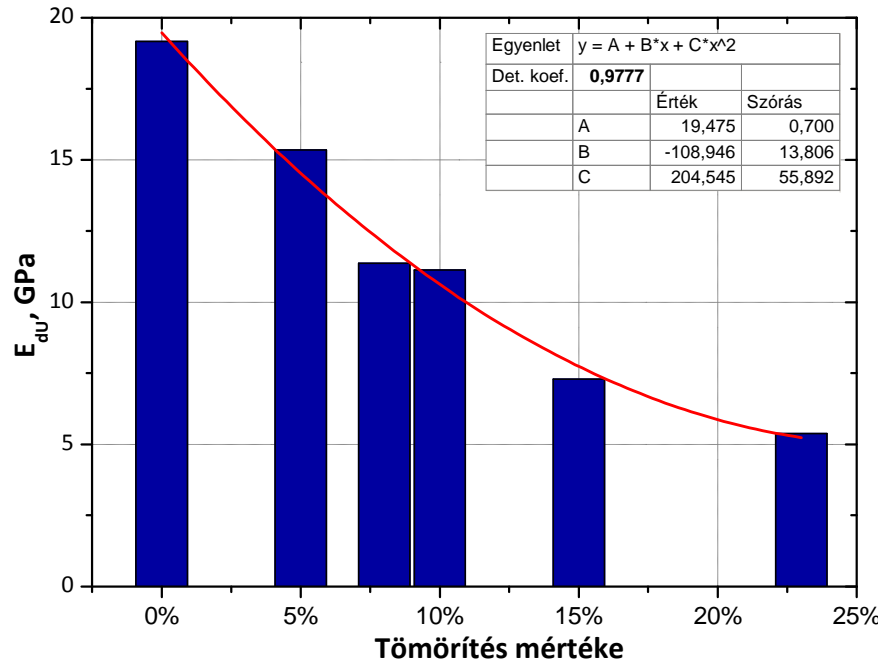
Ultrahang terjedési sebesség meghatározásának összeállításáról készült felvétel

Bizonyos összeszorító erőn túl nincs értelme növelni az összeszorítást. Számos kísérletet végezve nyomatékmérő kulcs segítségével megállapítottam, hogy a szükséges (és elégséges) nyomaték 150 Nm. Ettől nagyobb nyomaték alkalmazása esetén sem csökken tovább a mért hangterjedési idő értéke azonos szakaszon.

### **3.3.2. Rostirányú ultrahangos vizsgálatok eredményei**

A következő ábra a hasábok tömörítés és szárítás utáni hangterjedési sebességből meghatározott dinamikus rugalmassági modulusának tömörítésenkénti átlagát mutatja a tömörítés mértékének függvényében, oszlopdiagramban ábrázolva. Az átlagokra illesztett másodfokú polinom piros görbével látható.





3.6. ábra.

A hasárok hangterjedési sebességéből meghatározott dinamikus rugalmassági modulusának tömörítésenkénti átlaga

Az ábra egyértelműen bizonyítja, hogy a tömörítés mértékének növekedésével a hangterjedési sebességéből megállapított dinamikus rugalmassági modulus folyamatosan csökken. A 23%-ban tömörített hasárokon meghatározott érték kevesebb, mint egynegyede a tömörítetlen hasárok  $E_{du}$ -jának. **Az illesztett parabola determinációs koefficiense 0,979, ami azt bizonyítja, hogy az ultrahang terjedési sebességének meghatározása alkalmas lehet a tömörítési szint megállapítására.**

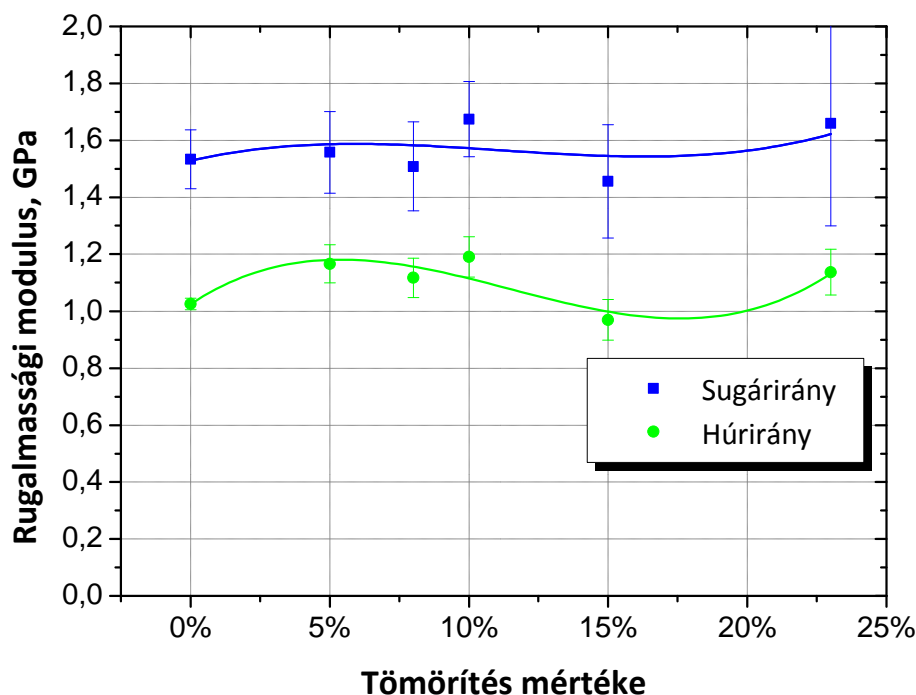
### 3.3.2.1. Sugár- és húr irányú ultrahangos vizsgálatok eredményei

A sugár- és húr irányú vizsgálatokhoz, a rostirányú vizsgálatoktól eltérő adót és vevőt használtam, melyeket lezorító szerkezet segítségével kézzel rögzítettem a hasárhoz a vizsgálatok idejére.

A mérést tömörítésenként 50 mm-enként végeztem. Ez tömörítésenként 40-40 mérést jelentett a két irányban mintadarabonként (összesen 440 mérés).

A sugár- és a húr irányban végzett ultrahangos mérések azt bizonyították, hogy a rostirányú tömörítés nem befolyásolta a bukkfa dinamikus rugalmassági modulusát sugár- és húr irányban.

A tömörítésenként két hasábra vett átlagértékek vannak a következő diagramban ábrázolva, a tömörítés mértékének függvényében.



3.7. ábra.

A hangterjedési sebességből meghatározott dinamikus rugalmassági modulus húr-, és sugárirányban, tömörítésenként átlagolva

Az ábrából kitűnik, hogy a tömörítés nem befolyásolja a hangterjedési sebességből megállapított rugalmassági modulusot sem sugár, sem pedig húrirányban.

### 3.4. Dinamikus rugalmassági modulus meghatározása, rezonancia vizsgálatokkal

A dinamikus rugalmassági modulusot meghatároztam többféle rezonancia technikával is. Longitudinális hullámok sajátfrekvenciájának meghatározásával, hajlító rezgések első három módusának és torziós rezgések első két módusának meghatározásával. A továbbiakban ezen vizsgálatok eredményét részletezem.

#### 3.4.1. Longitudinális hullámok

A faanyagban terjedő rezgés sebessége a longitudinális rezgés frekvenciájából is megállapítható a (7) egyenlet segítségével. A mérés frekvenciatartományát az előzetesen meghatározott frekvenciaérték segítségével lehet beállítani. A mikrofont közel helyezük a hasáb végéhez, majd finoman, de határozottan megütjük az anyag másik végét egy kalapács segítségével. A hasáb bütüjének finom megkoccintásával a faanyagban egy rostirányú lökéshullámot indítunk el, ami longitudinális rezgésbe hozza a próbatestet. A longitudinális frekvencia méréséhez FFT programot használtam.

Méréstechnikailag fontos, hogy milyen keménységű anyagot használunk a próbatest megütéséhez. Egy lágy ütővel az időben elnyújtott koppintás miatt csak alacsony frekvenciák gerjeszthetők, míg egy kemény ütővel rövid ideig tartó koppintás után magas frekvenciák is nyerhetők, vagyis a puhább anyagok jobban megfelelnek, ha alacsonyabb frekvenciát akarunk gerjeszteni, és ha magasabb frekvenciatartományban kell mérnünk, kemény kalapácsot kell használni. Általános irányelvként elmondható, hogy minél kisebb a próbatest, illetve minél

nagyobb a rugalmassági modulusa, annál magasabb frekvenciát kell gerjeszteni, azaz keményebb kalapácsra van szükség.

Sajátfrekvenciák közül a longitudinális hullámok rezonancia-frekvenciája határozható meg a legkönnyebben, mert a többi rezgés alacsonyabb felharmónikusaitól jól elkülönülve magas frekvencia értékeknél nagy intenzitással jelentkezik.

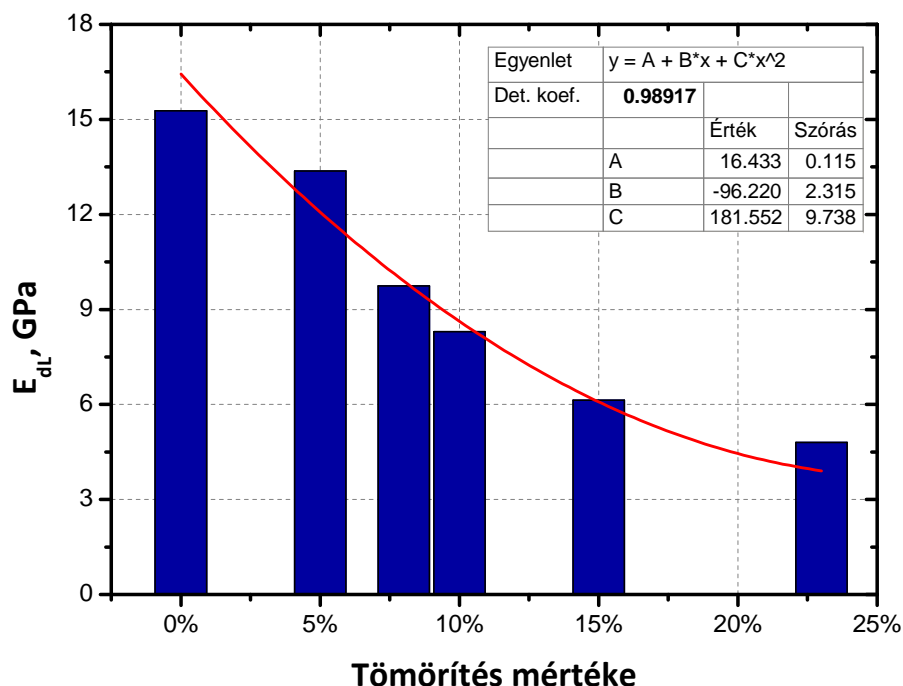
A mérést minden tömörítési szinten mindkét rúdon elvégeztem. A kapott sajátfrekvencia értékeket és a belőlük számított hangterjedési sebesség és dinamikus rugalmassági modulusokat a következő táblázat tartalmazza.

**3.2. táblázat. Longitudinális hullámok frekvencia értékei és a belőlük számított hangterjedési sebesség és dinamikus rugalmassági modulusok**

Tömörítés mértéke	Hasáb	Frekvencia, Hz	v, m/s	$E_{dL}$ , GPa
0%	0/1	2391	5282,4	15,839
	0/2	2450	5248,5	16,573
	<b>Átlag</b>	<b>2421</b>	<b>5265,5</b>	<b>16,211</b>
5%	1/1	2343	4841,5	15,112
	1/2	2209	4578,7	13,281
	<b>Átlag</b>	<b>2276</b>	<b>4710,1</b>	<b>14,180</b>
8%	2/1	1973	3934,9	10,289
	2/2	1957	4045,3	10,373
	<b>Átlag</b>	<b>1965</b>	<b>3990,1</b>	<b>10,332</b>
10%	3/1	1737	3934,1	8,086
	3/2	1881	4011,5	9,510
	<b>Átlag</b>	<b>1809</b>	<b>3972,8</b>	<b>8,783</b>
15%	4/1	1559	3216,5	6,308
	4/2	1581	3168,5	6,695
	<b>Átlag</b>	<b>1570</b>	<b>3192,5</b>	<b>6,499</b>
23%	5/1	1397	2746,6	4,857
	5/2	1435	2766,6	5,234
	<b>Átlag</b>	<b>1416</b>	<b>2756,6</b>	<b>5,043</b>

A következő ábra a hasábok tömörítés és szárítás utáni longitudinális rezgéseinek frekvenciáiból meghatározott dinamikus rugalmassági modulusának tömörítésenkénti átlagát mutatja, a tömörítés mértékének függvényében, oszlopdiagramban ábrázolva. Az átlagokra illesztett másodfokú polinom piros görbével látható.

Az ábra egyértelműen bizonyítja, hogy a tömörítés mértékének növekedésével a longitudinális hullám sajátfrekvenciájából megállapított dinamikus rugalmassági modulus folyamatosan csökken. A 23%-ban tömörített mintadarabokon meghatározott érték kevesebb, mint egyharmada a tömörítetlen mintadarabok  $E_{dL}$ -jének. **Az illesztett parabola determinációs együtthatója 0,989, ami azt bizonyítja, hogy logaritmikus hullám sajátfrekvenciájából megállapított rugalmassági modulus meghatározása, alkalmas lehet a tömörítési szint megállapítására.**



3.8. ábra.

A hasábok longitudinális rezgésből meghatározott dinamikus rugalmassági modulusainak tömörítésenkénti átlaga

### 3.4.2. Dinamikus rugalmassági modulus meghatározása hajlító rezgésekkel

A hajlító és a csavaró hullámok sajátfrekvenciáinak megállapítása lényegesen nagyobb gyakorlatot igényel az előbbi, longitudinális hullámok sajátfrekvenciájának megállapításától. A hajlító és a csavaró hullámok modulusai összetéveszhető módon egyszerre is megjelenhetnek. Az egyes csúcsok szétválasztásához elengedhetetlen tudni, hogy a csúcsok egymás után szigorú sorrendben következnek, ill. a hajlító hullámok egymás utáni modulusainak csúcsainak arányai és a csavaró hullámok egymás utáni modulusainak csúcsainak arányai is kizárólag egy meghatározott értéket vehetnek fel.

Minden tömörítési szinten mindkét hasábon a harmadik modulusig határoztam meg a frekvenciákat, melyek közül az első felharmónikusokat használtam a dinamikus rugalmassági modulus meghatározáshoz. A dinamikus rugalmassági modulus, az Euler egyenletből származó (18) képlettel és az ASTM által (22) képlettel meghatározott módon is kiszámítható.

#### 3.4.2.1. Euler vs. ASTM hajlító rezgések estén

A (18) képlet, a tehetetlenségi nyomatékot (I) felbontva és a konstansokat csoportosítva, a következőképpen egyszerűsíthető.

$$E_{dBn} = \left( \frac{2f_{Bn}}{\gamma_n \pi} \right)^2 \frac{mL^3}{I} \rightarrow E_{dB1} = \left( \frac{2}{\gamma_1 \cdot \pi} \right)^2 \cdot f_{B1}^2 \cdot \frac{m \cdot L^3}{h^3 \cdot b} \cdot 12 = \left( \frac{2}{\gamma_1 \cdot \pi} \right)^2 \cdot 12 \cdot \left( \frac{m \cdot f_{B1}^2}{b} \right) \cdot \left( \frac{L}{h} \right)^3$$

A sárgával jelölt tag konstans, az értéke 0,9465. A kék pedig az ASTM szabványban is szerepel. Ez alapján a (22) egyenlet segítségével felírható a következő összefüggés.

$$E_{dB\text{ ASTM}} = E_{dBn} \cdot T_1 \quad (33)$$

Az ASTM szabványban szereplő képlet a  $T_1$  szorzótényezőben tér el az Euler egyenlettől. A szabvány iránymutatásai alapján ez a tag a mi estünkben a megfelelően megválasztott min-

tageometria következtében nem tartalmazza a Poisson-tényezőt és a (24) szerint egyszerűsödik.

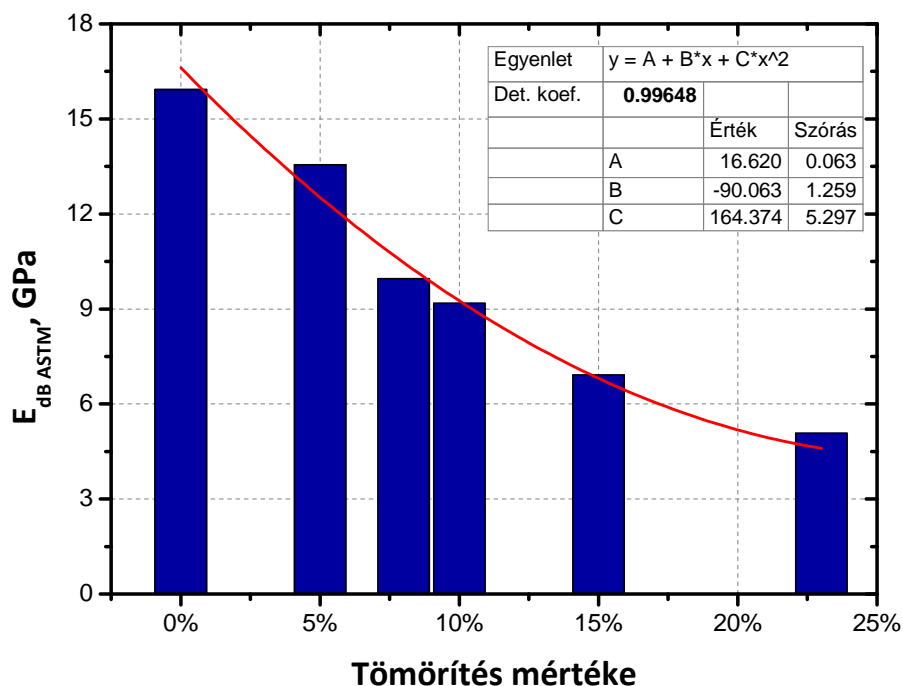
A kapott frekvencia értékeket és a belőlük számított dinamikus rugalmassági modulusokat a 3.3. táblázat tartalmazza.

### 3.3. táblázat. Dinamikus rugalmassági modulus meghatározása hajlító rezgésekkel

Tömörítés mértéke	Hasáb	Frekvencia, Hz			E <sub>dB Euler</sub> , GPa	E <sub>dB ASTM</sub> , GPa	Eltérés, %
		1. modus	2. modus	3. modus			
0%	0/1	189,5	501,0	920,1	15,337	15,486	-0,97
	0/2	195,5	521,5	947,2	16,222	16,380	-0,97
	<b>Átlag</b>	<b>192,5</b>	<b>511,3</b>	<b>933,7</b>	15,777	<b>15,931</b>	-0,97
5%	1/1	189,3	513,9	947,3	14,828	14,976	-0,99
	1/2	170,7	453,9	861,4	12,085	12,204	-0,98
	<b>Átlag</b>	<b>180,0</b>	<b>483,9</b>	<b>904,4</b>	13,422	<b>13,556</b>	-0,99
8%	2/1	160,1	444,6	851,9	9,576	9,679	-1,06
	2/2	162,9	443,8	855,6	10,135	10,243	-1,06
	<b>Átlag</b>	<b>161,5</b>	<b>444,2</b>	<b>853,8</b>	9,853	<b>9,959</b>	-1,06
10%	3/1	151,6	405,3	778,6	8,523	8,669	-1,08
	3/2	160,3	424,7	779,5	9,601	9,705	-1,08
	<b>Átlag</b>	<b>156,0</b>	<b>415,0</b>	<b>779,1</b>	9,053	<b>9,179</b>	-1,08
15%	4/1	139,3	392,1	744,7	6,665	6,762	-1,13
	4/2	139,0	395,6	749,3	6,985	7,064	-1,11
	<b>Átlag</b>	<b>139,2</b>	<b>393,9</b>	<b>747,0</b>	6,824	<b>6,911</b>	-1,12
23%	5/1	124,4	340,0	648,9	4,781	4,909	-1,21
	5/2	126,7	348,3	663,1	5,148	5,242	-1,19
	<b>Átlag</b>	<b>125,6</b>	<b>344,2</b>	<b>656,0</b>	4,962	<b>5,073</b>	-1,20

Minden tömörítési szinten az Euler egyenlettel megállapított rugalmassági modulus kisebb. Meghatároztam a két érték százalékos eltérését a két érték különbségének és átlagának hányadosából. Az eltérés a tömörítés mértékének növekedésével folyamatosan nő. Az eltérés, abból adódik, hogy a  $T_1$  tag függvénye a  $h/L$  négyzetének, a mintadarab hossza pedig a tömörítés mértékének növekedésével egyre nagyobb.

A következő ábra a hasábok tömörítés és szárítás utáni hajlító rezgések sajátfrekvenciájából, az ASTM alapján meghatározott dinamikus rugalmassági modulusának tömörítésenkénti átlagát mutatja, a tömörítés mértékének függvényében, oszlopdiagramban ábrázolva. Az átlagokra illesztett másodfokú polinom piros görbével látható.



3.9. ábra.

A hasárok longitudinális rezgésből meghatározott dinamikus rugalmassági modulusának tömörítésenkénti átlaga

A hajlítórezgések sajátfrekvenciájából megállapított rugalmassági modulus a tömörítés mértékének növelésével folyamatosan csökken. A csökkenés  $E_{dB\ ASTM}$  esetén az általam vizsgált 0...23% tartományon közel 70%, ami azt jelenti, hogy a rugalmassági modulus kevesebb, mint a harmadára csökkent.

### 3.4.3. Dinamikus rugalmassági modulus meghatározása csavaró rezgésekkel

Minden tömörítési szinten mindkét hasábon az első két módusnak határoztam meg a frekvenciáját, melyek közül az első felharmónikusokat használtam a dinamikus csavaró modulus meghatározáshoz. A dinamikus csavaró modulus a (19) képlettel, és az ASTM által (25) képlettel meghatározott módon egyaránt kiszámítható.

#### 3.4.3.1. Elméleti vs. ASTM csavaró rezgések estén

A (19) képletben a sűrűséget felbontva a tömeg és méretek hányadosára, a következő összefüggés nyerhető.

$$G_{d1} = (2L \cdot f_{T1})^2 \frac{\rho \cdot I_P}{K_T} = \left( \frac{4Lm f_{T1}^2}{b \cdot h} \right) \cdot \frac{I_P}{K_T} \quad (34)$$

Amit összevetve, a (25) képlettel, megállapítható, hogy csupán a poláris tehetetlenségi nyomaték és a csavaró keresztmetszeti tényező hányadosának megadásában, tehát méreteket tartalmazó szorzótényezőkben térnek el.

Az elméleti képlet alapján a szorzótényező,

$$\frac{I_P}{K_T} = \frac{b \cdot h (b^2 + h^2)}{12 c \cdot b \cdot h^3} \quad (35)$$

Az ASTM esetén a szorzótényező,

$$\frac{B_{ASTM}}{1 + A_{ASTM}} \quad (36)$$

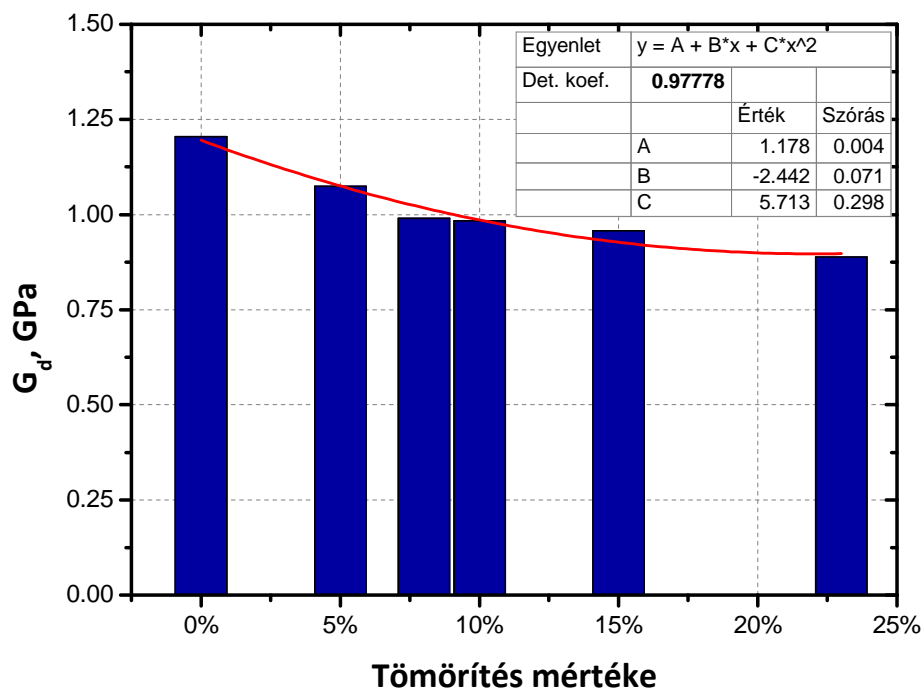
A kapott frekvencia értékeket és a belőlük számított dinamikus rugalmassági modulusokat a következő táblázat tartalmazza.

**3.4. táblázat. Dinamikus rugalmassági modulus meghatározása csavaró rezgésekkel**

Tömörítés mértéke	Hasáb	Frekvencia, Hz		G <sub>d</sub> , GPa	G <sub>d</sub> ASTM, GPa	Eltérés, %
		1. modus	2. modus			
0%	0/1	374,1	756,0	1,214	1,207	0,58
	0/2	370,3	742,7	1,198	1,191	0,61
	<b>Átlag</b>	<b>372,2</b>	<b>749,4</b>	<b>1,206</b>	<b>1,199</b>	<b>0,60</b>
5%	1/1	353,3	736,2	1,067	1,061	0,57
	1/2	355,5	733,7	1,084	1,077	0,60
	<b>Átlag</b>	<b>354,4</b>	<b>735,0</b>	<b>1,075</b>	<b>1,069</b>	<b>0,58</b>
8%	2/1	350,7	718,8	0,986	0,981	0,51
	2/2	349,0	712,9	0,998	0,993	0,50
	<b>Átlag</b>	<b>349,9</b>	<b>715,9</b>	<b>0,992</b>	<b>0,987</b>	<b>0,51</b>
10%	3/1	347,5	710,6	0,983	0,978	0,50
	3/2	348,4	730,1	0,987	0,982	0,51
	<b>Átlag</b>	<b>348,0</b>	<b>720,4</b>	<b>0,985</b>	<b>0,980</b>	<b>0,50</b>
15%	4/1	345,5	733,0	0,940	0,935	0,50
	4/2	347,4	706,8	0,978	0,973	0,51
	<b>Átlag</b>	<b>346,5</b>	<b>719,9</b>	<b>0,959</b>	<b>0,954</b>	<b>0,50</b>
23%	5/1	335,9	642,1	0,856	0,851	0,49
	5/2	345,8	662,8	0,924	0,919	0,50
	<b>Átlag</b>	<b>340,9</b>	<b>652,5</b>	<b>0,889</b>	<b>0,885</b>	<b>0,50</b>

A (19) képlettel és az ASTM által megadott (25) képlettel meghatározott dinamikus csavaró modulus között lényeges eltérés nincs. Az eltérés minden tömörítési szinten 0,5% körül mozog és nem nagyobb, mint 0,6%.

A (19) képlettel meghatározott dinamikus csavaró modulus tömörítésenkénti átlagát mutatja oszlopdiagramban ábrázolva a következő ábra. Az átlagokra illesztett másodfokú polinom piros görbével látható.



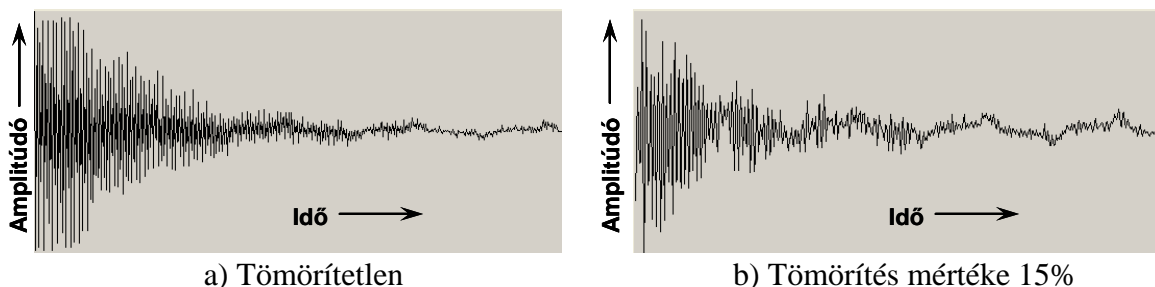
3.10. ábra.

A hasábok csavaró rezgésből meghatározott dinamikus rugalmassági modulusának tömörítésenkénti átlaga

A tömörítésnek egyértelmű hatása van a csavaró rugalmassági modulusra, ám nem változtatja meg olyan nagy mértékben, mint a statikus vagy a többi dinamikus rugalmassági modulusokat. A csökkenés  $G_d$  esetén az általam vizsgált 0...23% tartományon mindössze 27% körüli (kevesebb, mint a fele, a többi anyagjellemzőn tapasztalhoz képest).

#### 3.4.4. Logaritmikus dekrementum meghatározása

A logaritmikus dekrementum megállapítását rostirányban végeztem el a rostirányú longitudinális hullám sajátfrekvenciájának meghatározásakor. A logaritmikus dekrementum értékét a rezgés digitalizálása után az alkalmazott szoftver közvetlenül megadta. Alátámasztásnak poli-etilén habot, a rezgés keltésére pedig kisfejű acélkalapácsot használtam. A méréseket minden tömörítési szinten mindkét hasábon elvégeztem. A következő, 3.11. ábrában egy tömörítetlen, és egy 15%-kal tömörített bükkfa csillapódó rezgései figyelhetők meg.



3.11. ábra.

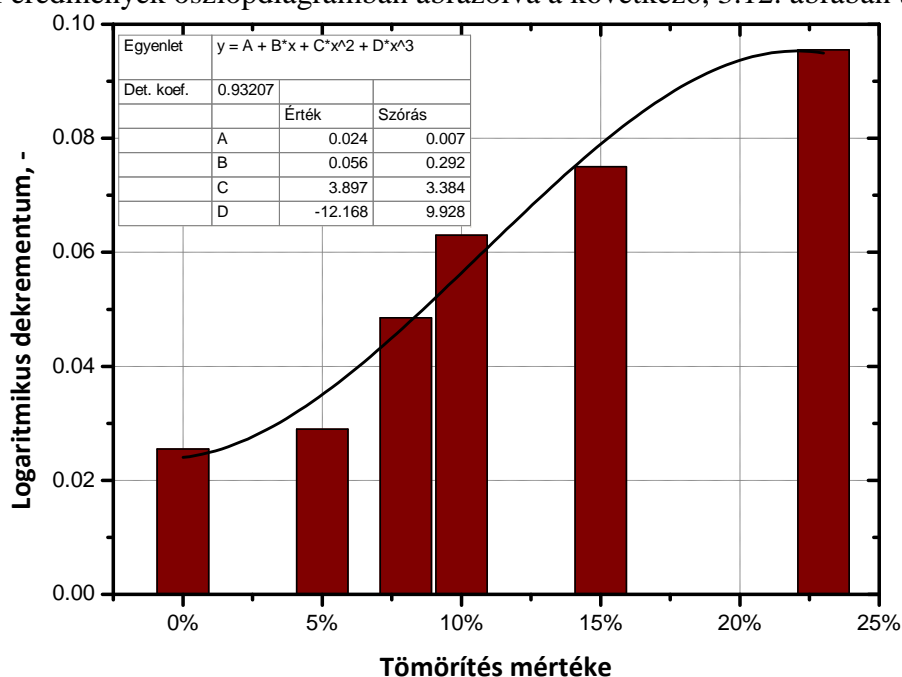
Bükkfa csillapódó rezgései



3.5. táblázat. Logaritmusos dekrementum értéke, a két hasáb eredményei

Tömörítés mértéke	Hasáb	Logaritmusos dekrementum, -
0%	0/1	0,026
	0/2	0,025
	Átlag	0,0255
5%	1/1	0,028
	1/2	0,030
	Átlag	0,029
8%	2/1	0,049
	2/2	0,048
	Átlag	0,049
10%	3/1	0,067
	3/2	0,059
	Átlag	0,063
15%	4/1	0,076
	4/2	0,074
	Átlag	0,075
23%	5/1	0,097
	5/2	0,094
	Átlag	0,0955

A mérési eredmények oszlopdiaagramban ábrázolva a következő, 3.12. ábrában található.



3.12. ábra.

Két hasáb eredményeit átlagolva a logaritmusos dekrementum értéke tömörítésenként

A logaritmusos dekrementum értéke a tömörítés mértékének növekedésével növekszik. A faanyag csillapító képessége nő, egyre viszkoelasztikusabban viselkedik az anyag.

Ezt a megfigyelésünket egy korábbi vizsgálat sorozat is alátámasztotta, melynek keretében tömörített és tömörítetlen bükk faanyagot vizsgáltunk dinamikus mechanikai termikus analízátorral (DMTA). Az eredményekből diplomaterv született 2008-ban. Ezeket az eredményeket nem tettem bele a dolgozatba.

### 3.5. A rostirányban tömörített faanyag feldarabolása a mechanikai vizsgálatokhoz

A mechanikai vizsgálatok közül hárompontos hajlító-vizsgálatokat végeztem statikus rugalmassági modulus és a hajlítószilárdság megállapítására, valamint a hajlítógörbe felvételére. Charpy-féle ütő-hajlító vizsgálatokat végeztem a fajlagos ütő-hajlító szilárdság megállapításához és a szívós–rideg viselkedés vizsgálatához.

A mérések sorrendjét és a mintadarabok méretét úgy terveztem meg, hogy a hárompontos hajlítóvizsgálat után a mintadarabok darabjait fel tudjam használni az ütő-hajlító vizsgálatokhoz. Ennek megfelelően a hárompontos vizsgálatához  $10 \times 10 \times 150$  mm (vastagság  $\times$  szélesség  $\times$  hosszúság) méretű mintadarabokat használtam, amit félbetörve a mintadarab még alkalmas volt egy  $10 \times 10 \times 55$  mm méretű mintadarab kimunkálásához az ütő-hajlító vizsgálatához.

Az eredetileg 1 m-es hasábok és a bejelölt 50 mm-es mérőszakaszok a tömörítés után (a tömörítés mértékének megfelelően) rövidebbek lettek.

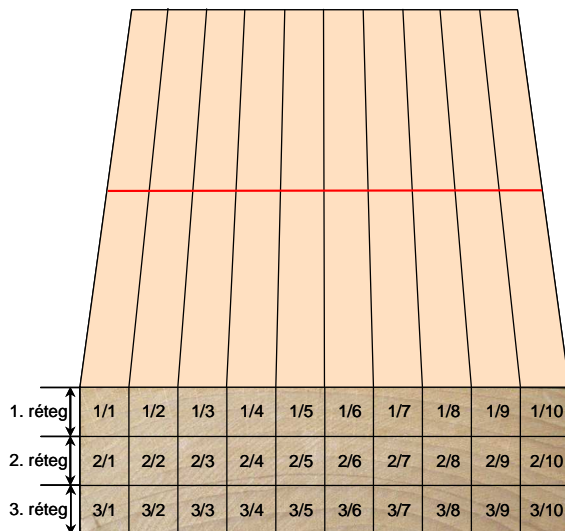
A mechanikai vizsgálatokhoz csak az egyik, 1-es jelölésű, tömörítéskor alul lévő hasábokat daraboltuk fel, előre eltervezett szabásterv alapján a vizsgálatokhoz. Először levágtuk az első és az utolsó (50 mm-es) szakaszt, majd a megmaradt hasábot három részre vágtuk (következő ábra piros vonalak) hat szakaszonként (fekete vonalak) a következő, 3.13. ábrának megfelelően.



3.13. ábra.

A hasábok feldarabolása

A keletkezett  $40 \times 120$  mm keresztmetszetű darabok két-két oldalát, egy szélesebb és egy keskenyebb oldalt simítógyaluuval meggyalultunk, hogy két egymással derékszögű oldalt kapjunk.



3.14. ábra.

A hasábkok keresztmetszetének feldarabolása

A darabolás végén minden hasázból 180 darab  $10 \times 10 \times 150$  mm-es (vastagság  $\times$  szélesség  $\times$  hosszúság) próbapálca keletkezett, melyeknek három oldaluk gyalult volt. A próbapálcákat a vizsgálatok során úgy helyeztem el, hogy a gyalulatlan oldal rosszabb felületi minősége a vizsgálati eredményeket nem befolyásolta.

### 3.6. Hárompontos hajlító vizsgálat

A méréseket a Miskolci Egyetem Polimermérnöki Tanszékének Polimerfizikai laboratóriumában végeztem, a légkondicionált hőmérsékletű és páratartalmú helyiségben, INSTRON 5566 típusú univerzális mechanikai anyagvizsgáló berendezésen, melynek maximális terhelhetősége 10 kN és érzékenysége minden vonatkozásban kielégítette a faanyagokra vonatkozó nemzetközi és hazai szabványokat. A berendezéshez tartozó eredeti hárompontos hajlító készlet alátámasztásainak ill. a keresztfejnek a lekerekítési sugara 12 mm. A viszonylag csekély lekerekítési sugár az alátámasztások és főleg a keresztfej mintába való kismértékű benyomódását eredményezte és ezáltal a hajlítódigram kezdeti rugalmas szakaszát módosította. Ezt úgy próbáltam meg kiküszöbölni, hogy a szabvány előírásainak megfelelően a hajlítódigram  $\epsilon_1$ -ig terjedő (lásd 2.25. ábra) szakaszát a statikus hajlító rugalmassági modulusához nem vettem figyelembe. A vizsgálatról készített felvételt a következő ábra tartalmazza.



**3.15. ábra.**

Hárompontos hajlító vizsgálat során készített felvétel, az INSTRON 5566 típusú univerzális mechanikai anyagvizsgáló berendezés

A mintadarabok  $10 \times 10 \times 150$  mm méretű, az anatómiai irányoknak megfelelően gondosan kimunkált, és megfelelő felületi minőségűek voltak. A vizsgálat során az alátámasztások és a keresztfej a húrsíkra támaszkodtak fel, tehát a keresztfej a mintadarab sugárirányában mozgott.

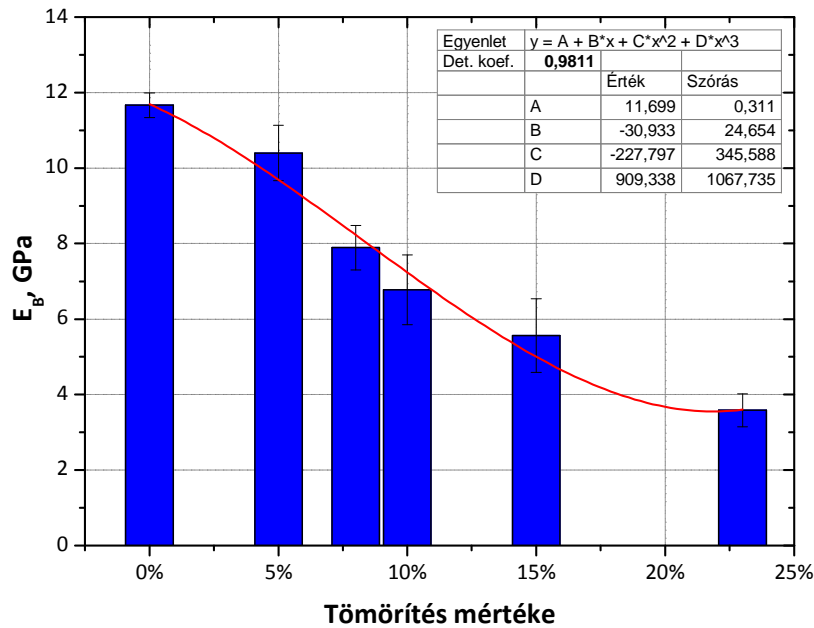
Az előre megtervezett és gondosan kivitelezett darabolásnak köszönhetően minden hajlítópróba mintavételi helye beazonosítható, pontosan visszakövethető, hogy a tömörített rúd hossz tengelye mentén mely szakaszból és a keresztmetszeten belül honnan lett kialakítva. Ezért a hajlító vizsgálat eredményei (és eloszlásuk) a rúd hossz tengelye mentén és keresztmetszetenként is megjeleníthetők.

Az alátámasztási távolság 120 mm, a keresztfej elmozdulás sebessége 10 mm/perc volt. A rendelkezésre álló rendszer a behajlást a keresztfej elmozdulásával méri. Az alátámasztási felületekre szimmetrikusan elhelyezett próbatestet középen, sugárirányban törtük el.

### **3.6.1. Statikus rugalmassági modulus eredményei hárompontos hajlító vizsgálat alapján**

Minden tömörített hasábot a hossz tengely mentén hat részre vágunk és részenként 30 hajlító mintadarabot alakítottunk ki, ami összesen 180 hajlító-mintadarabot jelent minden tömörítési szinten. A nagy mintaszámnak köszönhetően a megállapított anyagjellemzők szórása alacsonynak mondható. A mérési eredmények kiértékelése a mellékletben található.

Az azonos hasábból származó (tömörítettségű), mintadarabok hajlító rugalmassági modulusát átlagolva oszlopdiagramban ábrázolva a következő (3.16. ábra) ábrában láthatjuk. A szórási intervallumok az egyes tömörítési szinteken az oszlopokon jelölve vannak. Az eredményekre illesztett harmadfokú polinom piros görbével látható. A polinom determinációs koefficiense 0,98, ami a görbe jó illeszkedését mutatja.



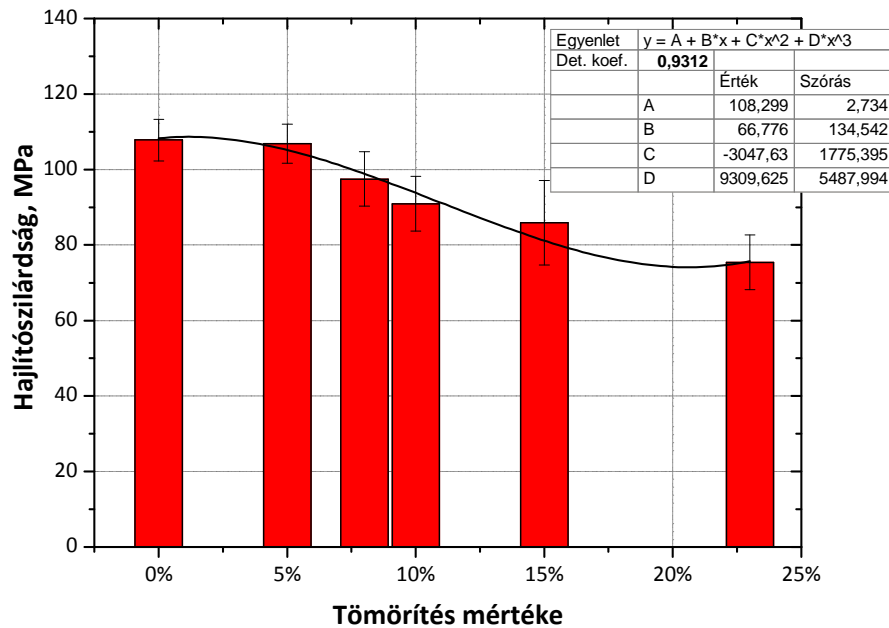
3.16. ábra.

Hárompontos hajlító vizsgálatlal megállapított statikus rugalmassági modulus változása a tömörítés mértékének függvényében

A hárompontos hajlításból megállapított rugalmassági modulus a tömörítés mértékének növelésével folyamatosan csökken. A csökkenés  $E_{dB}$  ASTM esetén az általam vizsgált 0...23% tartományon közel 70%, ami azt jelenti, hogy a rugalmassági modulus kevesebb, mint a harmadára csökkent teljesen azonosan, mint a hajlítóhullámokból megállapított rugalmassági modulus esetében.

### 3.6.2. Statikus hajlítószilárdság eredményei hárompontos hajlító vizsgálat alapján

A statikus hajlítószilárdság értékeket a rugalmassági modulushoz hasonlóan oszlopdiagramban ábrázoltam, szórási intervallumok az egyes tömörítési szinteken az oszlopokon jelölve vannak (3.17. ábra). Az eredményekre illesztett harmadfokú polinom fekete görbével látható. A polinom determinációs koefficiense 0,93, ami a görbe jó illeszkedését mutatja.

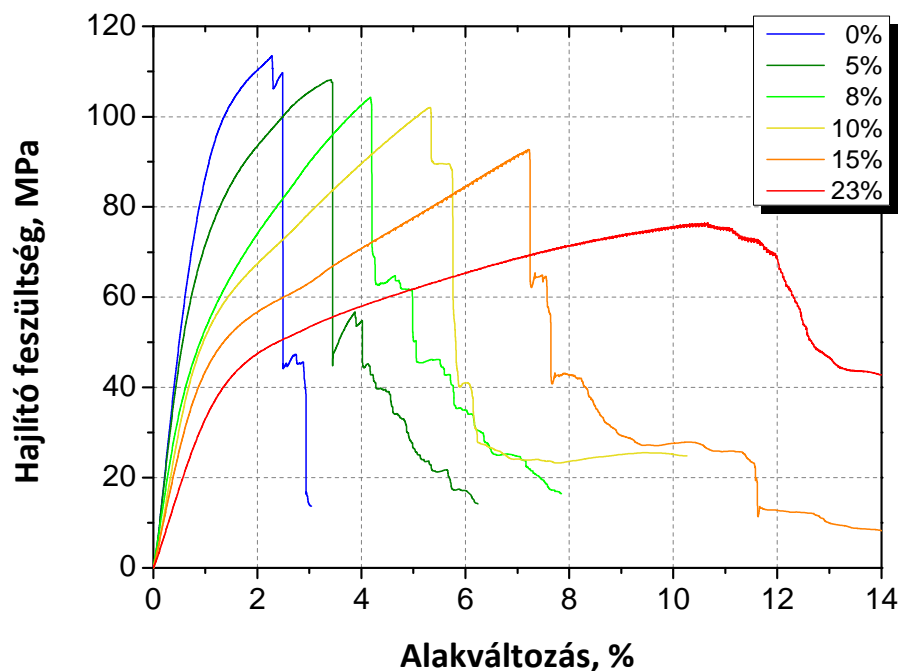


3.17. ábra.

Hárompontos hajlító vizsgálattal megállapított hajlítószilárdság változása a tömörítés mértékének függvényében, oszlopdiagramban ábrázolva

A hajlítószilárdság ugyanúgy, ahogyan a rugalmassági modulus, a tömörítés mértékének növekedésével csökken. A 23%-os rostirányú tömörítés hatására a bükk hajlítószilárdsága közel 2/3-ára (30%-kal) csökkent a tömörítetlen bükkhöz képest.

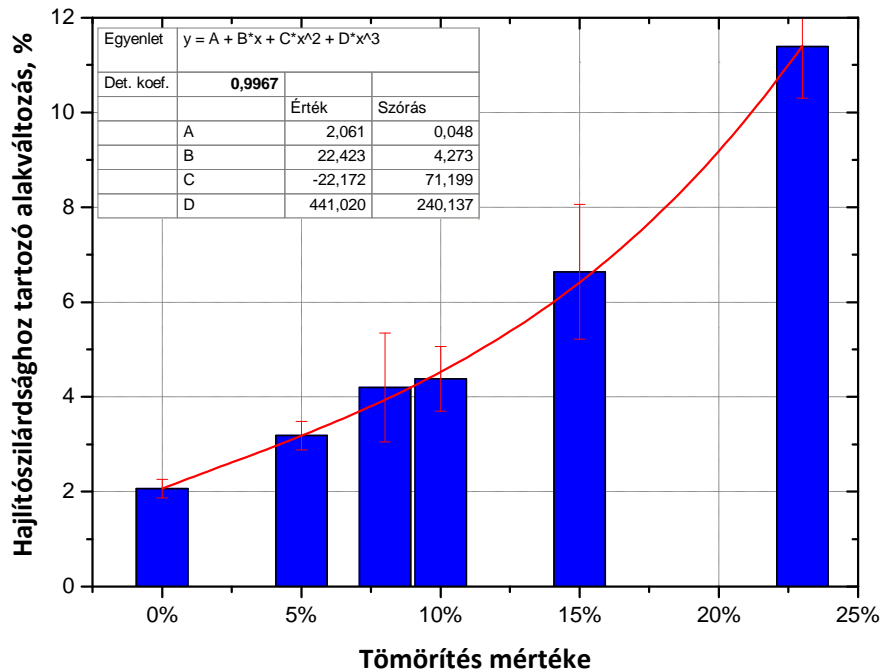
A hajlító vizsgálatok során felvett hajlítógörbékből nemcsak numerikusan, mérőszámokkal lehet jellemezni a vizsgált anyagot, hanem a görbe alakjának beható analizéséből elasztikus-plasztikus viselkedéséről is képet alkothatunk. A *tömörítésenként* végzett 180 mérésből kiválasztottam *egyet-egyét*, melyek jól reprezentálják az adott tömörítési szintet, ezek a hajlítódigramok láthatók a következő, 3.18. ábrában.



3.18. ábra.

Hárompontos hajlító vizsgálat során felvett hajlítódigramok

A hajlítódigramokon megfigyelhető, hogy a tömörítés mértékének növelésével a diagram egyre jobban ellaposodik, „megnyúlik” vízszintes irányban. A maximális feszültséghez tartozó hajlítószilárdság, egyre nagyobb alakváltozásoknál következik be. A legnagyobb feszültség után a diagram rohamosan esik, a tönkremenetel kinetikáját figyelembe véve az igazán nagy károsodás ettől a ponttól indul el, itt keletkeznek a repedések, melyek a teljes töréshez vezetnek. A következő (3.19. ábra) ábrában a hajlítószilárdsághoz, vagyis a repedés keletkezéséhez tartozó alakváltozás látható százalékos értékben kifejezve, a tömörítés mértékének függvényében.

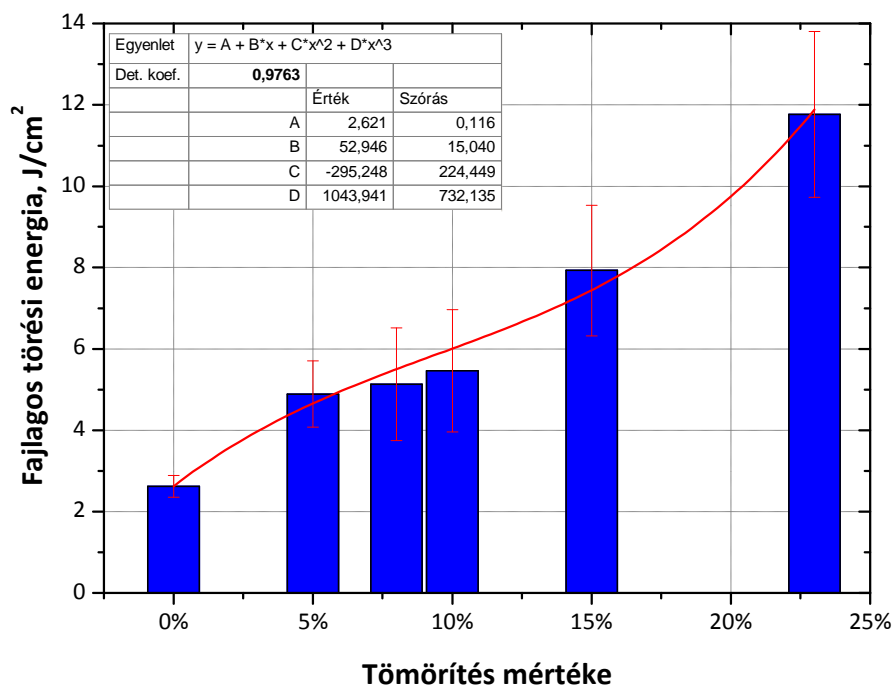


3.19. ábra.

A hajlítószilárdsághoz tartozó alakváltozás a tömörítés mértékének függvényében a különböző tömörítések során

A faanyag törésig elnyelt energiája a hajlítódigram alatti területtel egyezik meg. Meghatározása a hajlítóvizsgálat során felvett adatokból viszonylag egyszerű, ám főleg nagyobb tömörítések esetében a hajlító vizsgálatot nem lehet a teljes törésig végezni. Az alkalmazott alátámasztási távolság mellett olyan nagy alakváltozásokat képes elviselni az anyag, hogy az alkalmazott alátámasztások magasságának megfelelő behajlásnál sem tört el minden esetben a mintadarab. Ezért a hajlító vizsgálatot minden esetben befejeztem, amint az erő 100 N alá esett a vizsgálat során és az addig elnyelődött energiát tekintem a töréshez szükséges energiának azon mintadarabok esetében is, melyek nem törtek el.

A törésig elnyelt energiát keresztmetszetre vonatkoztatva megkapható a *fajlagos törési energia*. Segítségével az ütő-hajlító vizsgálatokhoz hasonlóan az anyag szívós viselkedése jellemezhető. Értéke minél nagyobb, annál szívósabb az anyag. A következő (3.20. ábra) ábrában az elnyelt energia látható a tömörítés mértékének függvényében.



3.20. ábra.

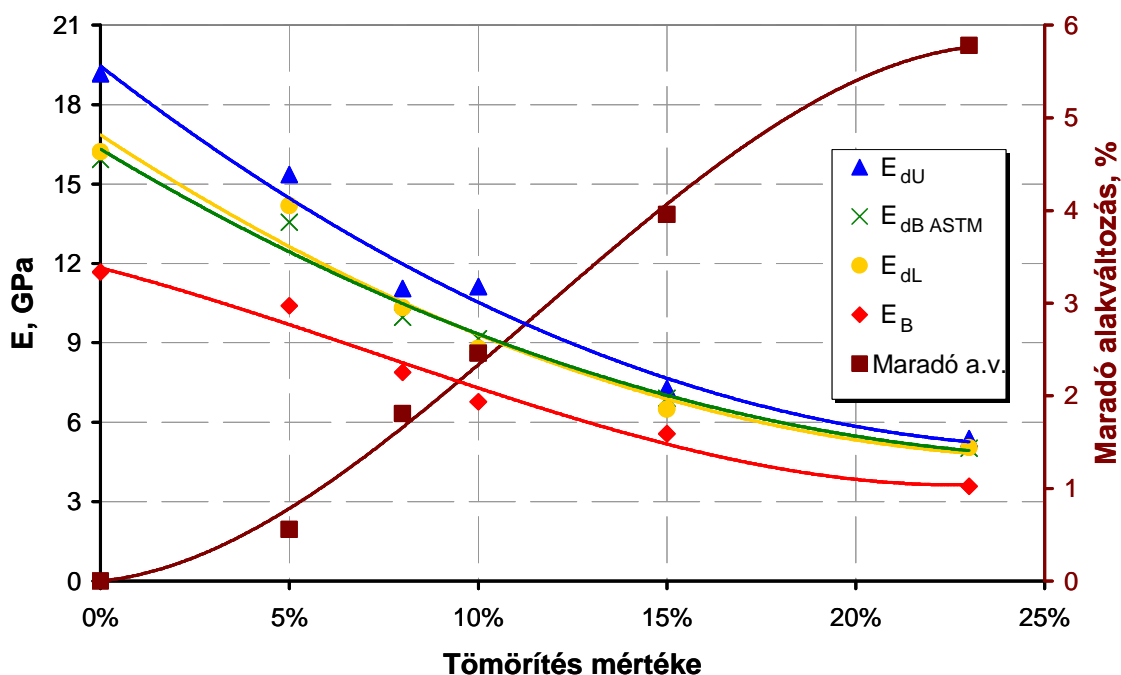
A hajlítóvizsgálatok során megállapított fajlagos törési energia a tömörítés mértékének függvényében a különböző tömörítések során

*A hárompontos hajlítóvizsgálat során megállapított fajlagos törési energia a tömörítés mértékének növelésével folyamatosan nő. A növekedés az általam vizsgált 0...23% tartományon négyszeres, ami azt jelenti, hogy négyszer több energiát képes elnyelni a tömörített bükk faanyag mielőtt eltörne.*

### 3.7. Statikus rugalmassági modulus becslése dinamikus rugalmassági modulusok alapján

A különböző módon megállapított rugalmassági modulusok mind azt mutatják, hogy a tömörítés jelentős hatással van a rugalmassági modulusra. A következő (3.21. ábra) ábrában a rugalmassági modulusok közös diagramban vannak ábrázolva a tömörítés mértékének függvényében úgy, hogy az egyes tömörítésekhez tartozó maradó alakváltozás is megtalálható a diagramon.





3.21. ábra.

A különböző módon meghatározott rugalmassági modulusok, valamint a maradó alakváltozások a tömörítés mértékének függvényében ábrázolva

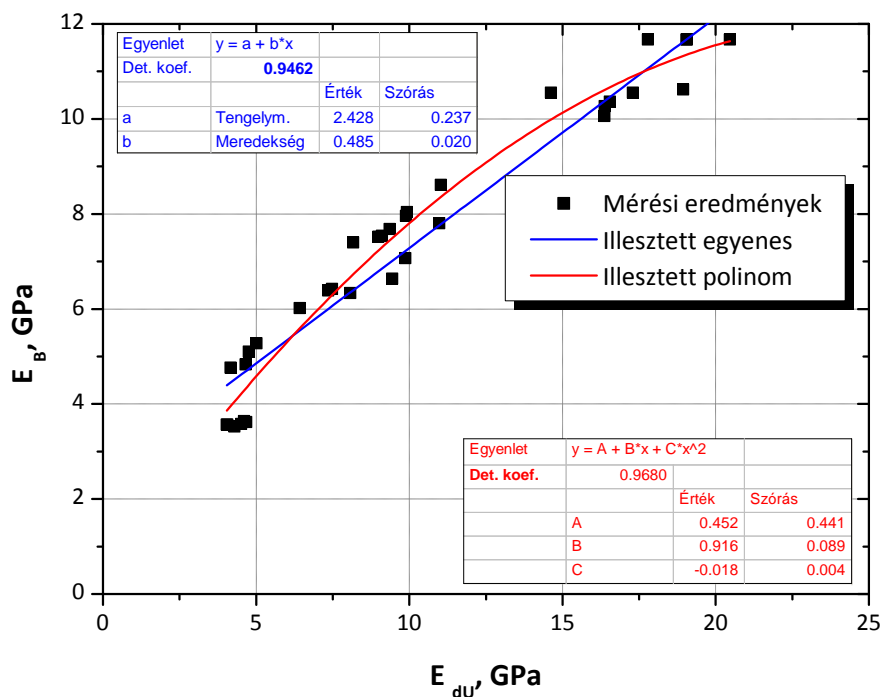
Az egyik szembeötlő dolog, hogy a maradó alakváltozás folyamatos növekedésével együtt mind a négy rugalmassági modulus csökken, ahol kicsi a maradó alakváltozás nagyobb a rugalmassági modulus, ahol nagy a maradó alakváltozás, a rugalmassági modulus kisebb.

Továbbá, a rugalmassági modulusok négy görbéje, tendenciáját tekintve teljesen hasonló, ám az értékek, különösen kisebb tömörítés esetén (a longitudinális és a hajlító rugalmassági hullámok segítségével meghatározott modulusok kivételével), eltérnek. A mérések között két alapvető különbség állapítható meg.

- A mérések közben az *alakváltozás mértéke* különböző.
- A mérések közben az *alakváltozás sebességének nagysága* különböző.

Mivel a mérések során az alakváltozás minden esetben a rugalmas, lineáris tartományban volt, ez nem lehet a különbségek oka. A mérések során az alakváltozási sebesség viszont több nagyságrendben is különbözhet. Ha a fa viszkoelasztikus viselkedését figyelembe vesszük, ez jelentős eltéréseket okozhat. A különböző módon megállapított rugalmassági modulusok közötti eltérés oka tehát, a mérés közbeni alakváltozási sebességek közötti nagy különbségekben keresendő.

A rugalmassági modulus roncsolásmentes meghatározása jóval egyszerűbb és üzemi körülmények között is végrehajtható [99]. Mindemellett gyakran a statikus modulusra lennének kíváncsiak. Egyszerűen, mert a statikus értékek a szerkezetek tervezésekor jobban alkalmazhatók, és a statikus rugalmassági modulushoz szokott szakemberek idegenkedve fogadják a roncsolásmentesen meghatározott dinamikus rugalmassági modulus értékeket. A következő (3.22. ábra) ábrában a különböző mértékben tömörített bükk hangterjedési sebesség alapján meghatározott rugalmassági modulusai vannak ábrázolva a statikus rugalmassági modulus függvényében.



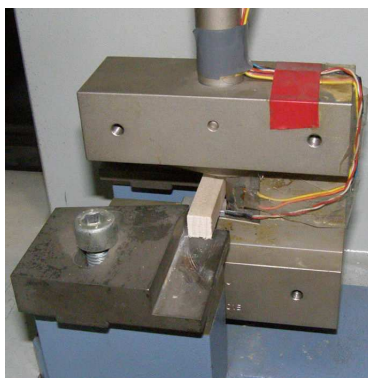
3.22. ábra.

A statikus rugalmassági modulus a hangterjedési sebességből megállapított rugalmassági modulus függvényében

A hangterjedési sebességből meghatározott rugalmassági modulus értékei 4...21 GPa tartományban vannak. A dinamikus és statikus rugalmassági modulus közötti korrelációt ezen értelmezési tartományra határoztam meg lineáris (kék vonal) és parabolikus (piros vonal) közelítéssel. A parabola esetében a korreláció nagyon jó, a determinációs koefficiens 0,968, de nem sokkal rosszabb a lineáris regresszió esetén sem, ekkor a determinációs koefficiens 0,946 a vizsgált tartományon.

### 3.8. Dinamikus ütő-hajlító vizsgálat

A vizsgálatok során a rostirányban kialakított mintadarabok mérete  $10 \times 10 \times 55$  mm volt.



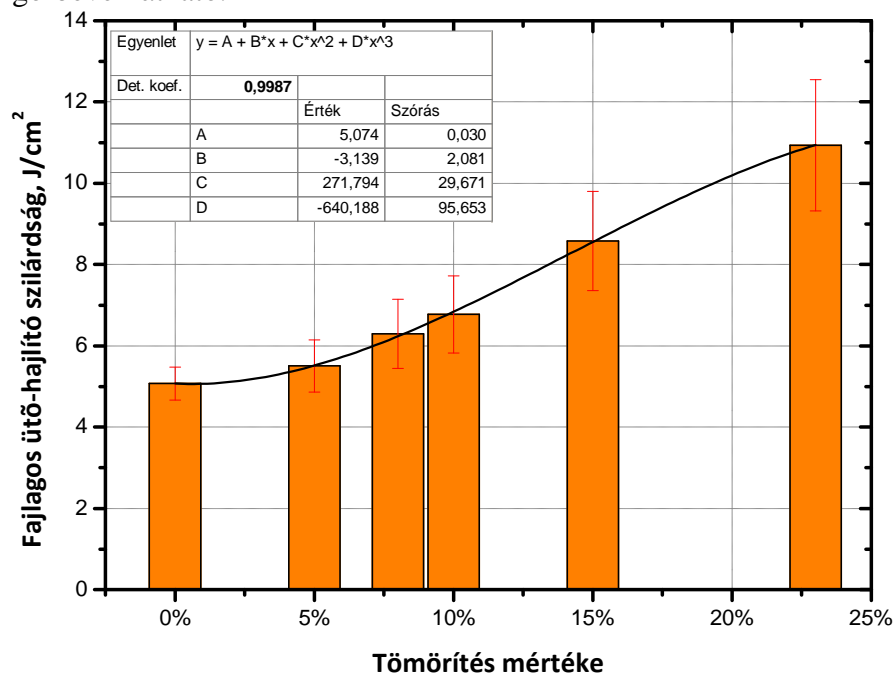
3.23. ábra.

A vizsgálatokhoz használt ütőmű és a mintadarab helyzete

A vizsgálatokat a Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszékén végeztem, Csukás Géza segítségével, CEAST gyártmányú műszerezett ütőművön (3.23. ábra).

Az alátámasztási felületekre szimmetrikusan elhelyezett próbatestet középen a húrsíkra mért egyetlen ütéssel (sugárirányú behajlás) törtük el (a hárompontos hajlításhoz hasonlóan).

Az eredmények tömörítésenként oszlopdiagramban ábrázolva a következő (3.24. ábra) ábrában található. Tömörítetlen esetben harminc (ebből húsz esetben volt adatgyűjtés), a többi tömörítési szinten 36 mintadarabot törtünk el. A szórási intervallumok az egyes tömörítési szinteken az oszlopok tetején jelölve vannak. Az eredményekre illesztett harmadfokú polinom fekete görbével látható.

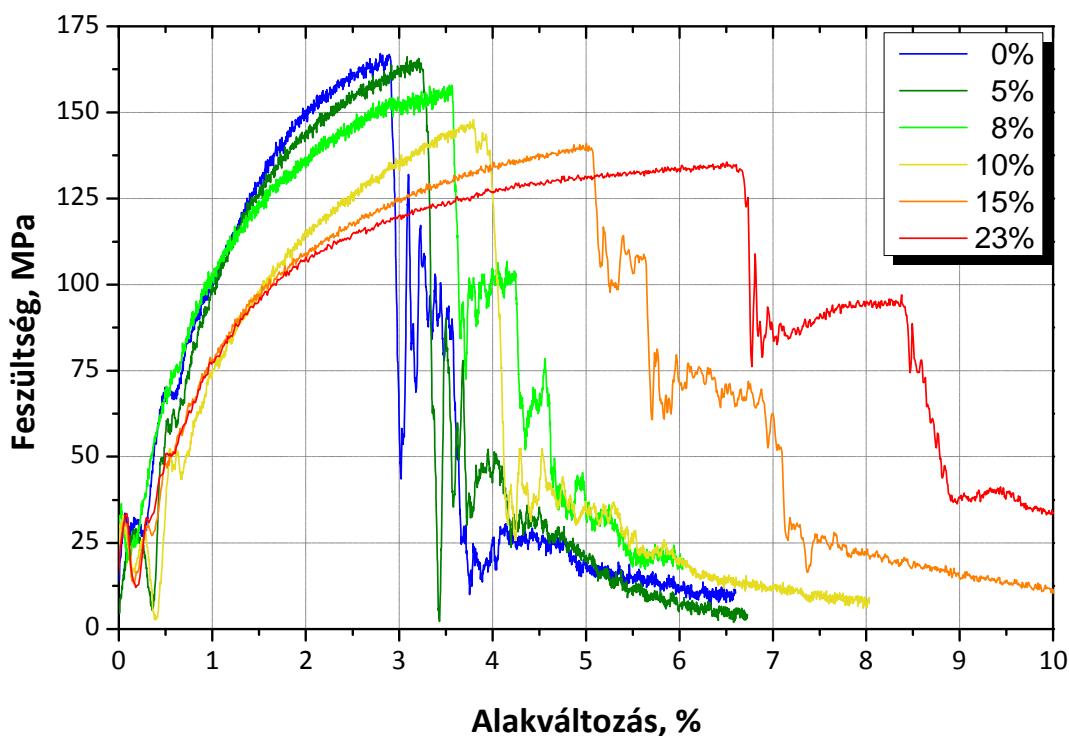


**3.24. ábra.**

Ütés-hajlító szilárdság változása a tömörítés mértékének függvényében, oszlopdiagramban ábrázolva

A tömörítés mértékének növekedésével a fajlagos ütés-hajlító szilárdság növekszik. A tendenciát harmadfokú polinommal közelítve a determinációs koefficiens 0,9987.

A vizsgálatok során mértük az erőt a kalapácsra rögzített mérőbéllyeg segítségével. Az erő értékeket feszültségre, a behajlást alakváltozásra átszámítva tömörítésenként egy-egy jellemző ütés-hajlító diagram található következő (3.25. ábra) ábrában.

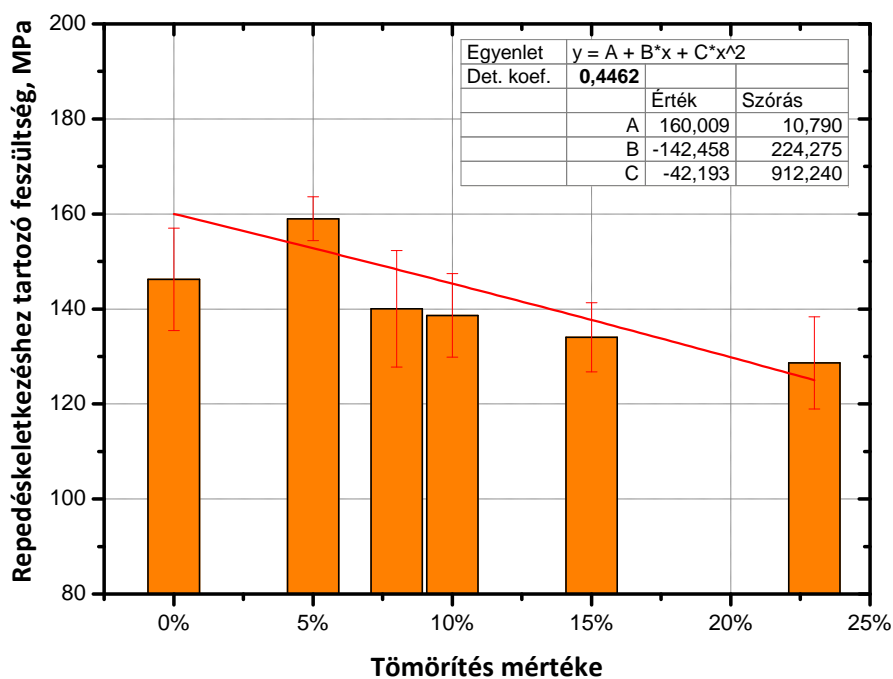


3.25. ábra.

Ütő-hajlító vizsgálat során felvett diagramok

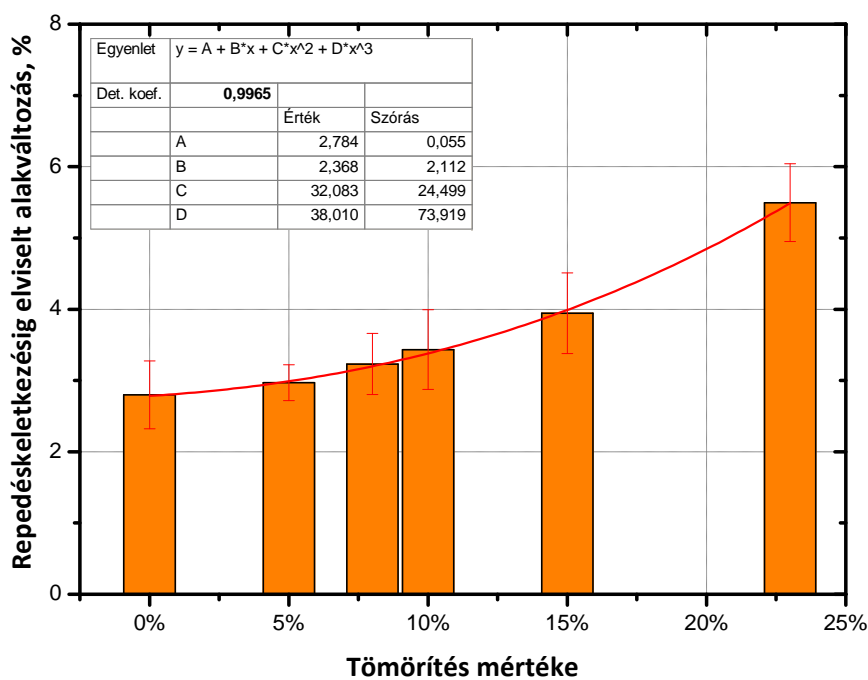
A tömörítés mértékének növekedésével a diagramok jellege a hajlítás során felvett diagramok jellegéhez hasonlít. A tömörítés mértékének növekedésével a diagramok egyre jobban elnyúlnak. Az anyag egyre nagyobb alakváltozást képes elviselni.

A mérés során folyamatosan rögzített adatok alapján nem csupán *fajlagos ütő-hajlító szilárdságot* tudtam meghatározni, hanem a *repedéskeletkezésig elviselt alakváltozást*, és a *repedéskeletkezéshez tartozó feszültséget* is. Ezen mérőszámok meghatározása nem szokásos faanyagok ütő-hajlító vizsgálatainak során, ám tömörített faanyag esetében, a tömörítés hatását jól mutatják. A repedéskeletkezéshez tartozó feszültség, a tömörítés mértékének függvényében a különböző tömörítések esetében oszlopdiagramban ábrázolva (3.25. ábra) látható. Megfigyelhető, hogy a repedéskeletkezéshez tartozó feszültség a tömörítés mértékének növelésével csökken. Ettől a csökkenő tendenciától eltérő eredmény csupán az 5%-os tömörítés esetében figyelhető meg, ahol az érték meghaladja a tömörítetlen faanyag értékét is.



3.26. ábra.

Az ütő-hajlító vizsgálatok során megállapított repedéskeletkezéshez tartozó feszültség a tömörítés mértékének függvényében, a különböző tömörítések során



3.27. ábra.

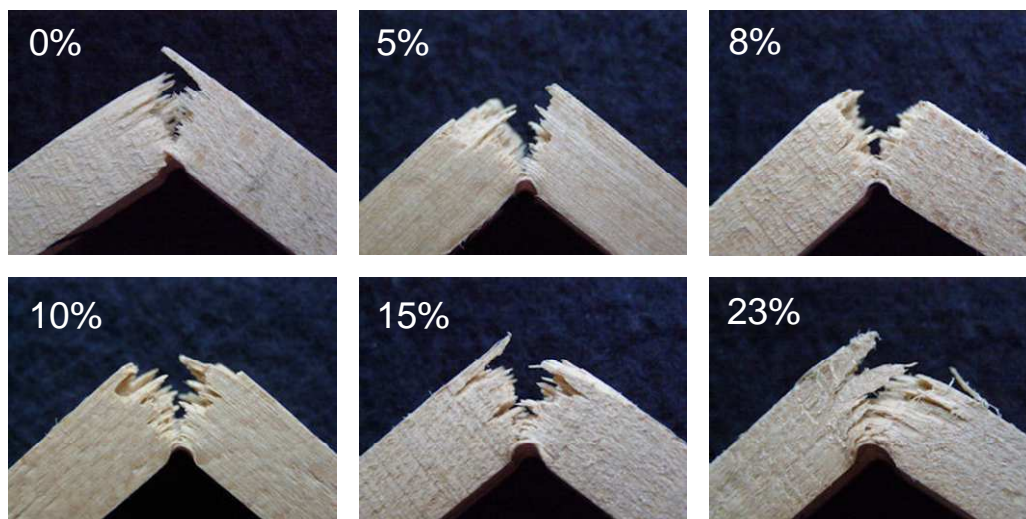
Az ütő-hajlító vizsgálatok során megállapított repedéskeletkezéshez tartozó alakváltozás a tömörítés mértékének függvényében a különböző tömörítések során

A repedéskeletkezéshez tartozó alakváltozás esetében a tendencia folyamatosan növekvő. Egyik tömörítési szint sem kivétel a tendencia alól. Az ábra egyértelműen bizonyítja, hogy a tömörítés mértékének növekedésével a repedéskeletkezésig elviselt alakváltozás folyamatosan

nő. A 23%-ban tömörített mintadarabon meghatározott érték közel kétszerese a tömörítetlen mintadarabokon meghatározott értékeknek.

### 3.8.1. Ütés-hajlító vizsgálat töreteinak elemzése

Ütés-hajlító vizsgálatok után, a mintadarabok töretét vizsgálva megállapítható az anyag rideg – szívós viselkedése. A következő ábrában tömörítésenként egy-egy jellemző töréskép található.



3.28. ábra.

Különböző tömörítettségű mintadarabok törete ütés-hajlító vizsgálat után

A felvételeket a Molnár Sándor Faanyagismeret könyvben [8] található jellemző törésképekkel (2.28. ábra), ill. az ide vonatkozó faipari szabványokkal összehasonlítva megállapítható, hogy a tömörítetlen bükk törésképe a normál törésképhez hasonlít leginkább. A rostirányú tömörítés mértékének növelésével a töréskép egyre inkább a szálkás (szívós) törésképhez hasonlít. Sőt, a kalapács beütődésének helyén egyre nagyobb alakváltozás figyelhető meg, ami szintén a szívós jelleg erősödését igazolja.

### 3.9. Vizsgálatok összefoglalása

A tömörítés mértékének növelésével a

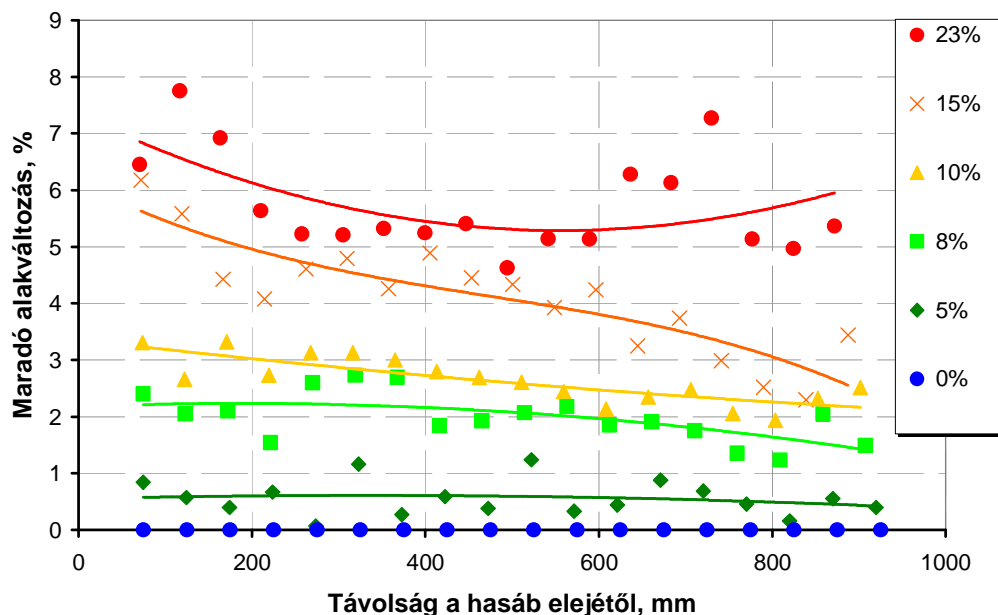
- ➔ maradó alakváltozás nő,
- ➔ rugalmassági modulus csökken,
- ➔ hajlítószilárdság csökken,
- ➔ repedéskeletkezésig elviselt alakváltozás (mind hajlító, mind ütés-hajlító vizsgálat során egyaránt) nő,
- ➔ törésig elnyelt fajlagos energia nő,
- ➔ repedéskeletkezéshez tartozó feszültség csökken.

## 3.10. Inhomogenitás vizsgálatok

### 3.10.1. Inhomogenitás a hossztenegely mentén

#### 3.10.1.1. Maradó alakváltozás

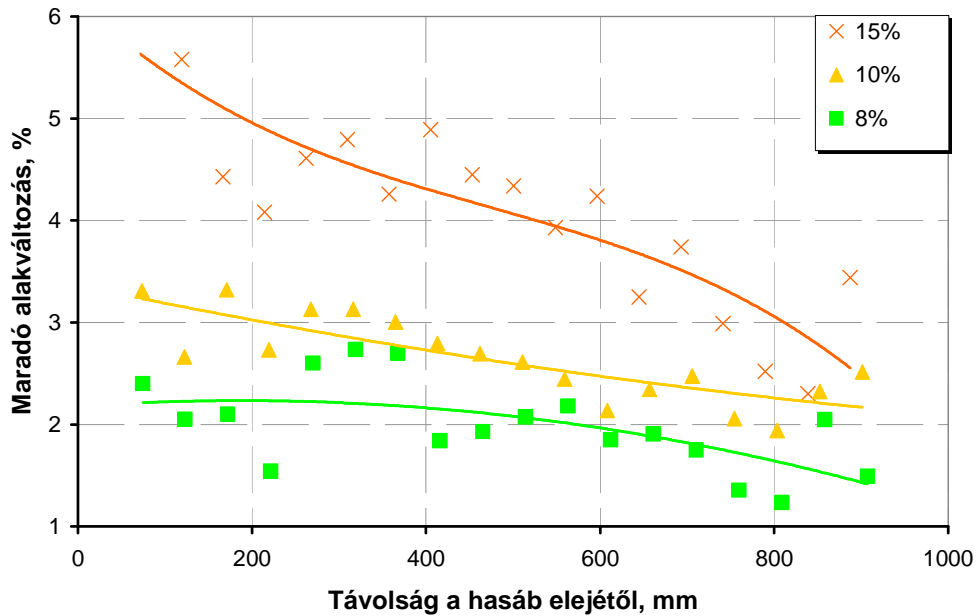
Az előzetes tömörítések során megfigyeltük, hogy nem volt azonos a tömörítés hatása a hasábok hossztenegelye mentén. Ezért tömörítés előtt minden hasábot a hossztenegely mentén, a szélesebbik oldalon (húrmetszet) ötven milliméterenként jól látható vékony jelölésekkel láttam el, hogy a tömörítés hatására bekövetkező elsődleges hatás, a maradó alakváltozás nyomkövethető legyen. A vizsgálat után és öt hónappal később megmértem az eredetileg ötven milliméterenként behúzott jeltávok közötti távolságot és ezek segítségével meghatároztam a maradó alakváltozást minden mintadarabon. Ennek eredménye látható a következő (3.29. ábra) ábrában.



3.29. ábra.

A maradó alakváltozás a hossztenegely mentén a különböző tömörítettségű hasábok esetében

A diagram alapján megállapítható, hogy a maradó alakváltozás a hossztenegely mentén nem egyenletes. A diagram függőleges tengelyét jobban széthúzva a tendencia még inkább szembeötlő. A következő ábrában (3.30. ábra) az előző diagram függőleges tengelyének 1...6 %-os tartománya látható kinagyítva. A hasáb vége, vagyis a dugattyú felőli oldalon a maradó alakváltozás sokkal kisebb. A 8, 10 és 15%-ban tömörített hasáboknál a tömörítés mértékének növelésével, a maradó alakváltozásban egyre nagyobb a különbség a hasábok eleje és vége között.



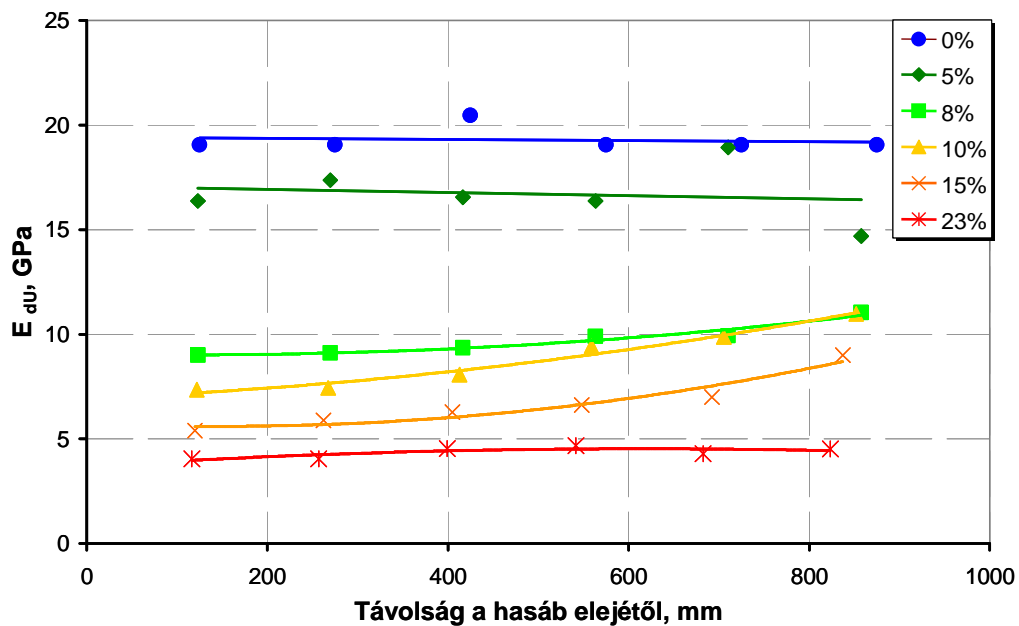
3.30. ábra.

A maradó alakváltozás a hossz tengely mentén a különböző tömörítettségű hasábok esetében

### 3.10.1.2. Rostirányú ultrahangos vizsgálatok eredményei

Ultrahangos berendezéssel három szakaszonként (kb. 150 mm) – a később végzett hárompontos hajlító vizsgálattal megegyező távolságokon – mértem a hang terjedési sebességét, amiből a (14) képlettel meghatároztam a dinamikus rugalmassági moduluszt az adott szakaszon.

A következő (3.31. ábra) ábrában a két hasábban mért dinamikus rugalmassági modulus értékek átlaga található, a hasáb elejétől mért távolság függvényében tömörítésenként.



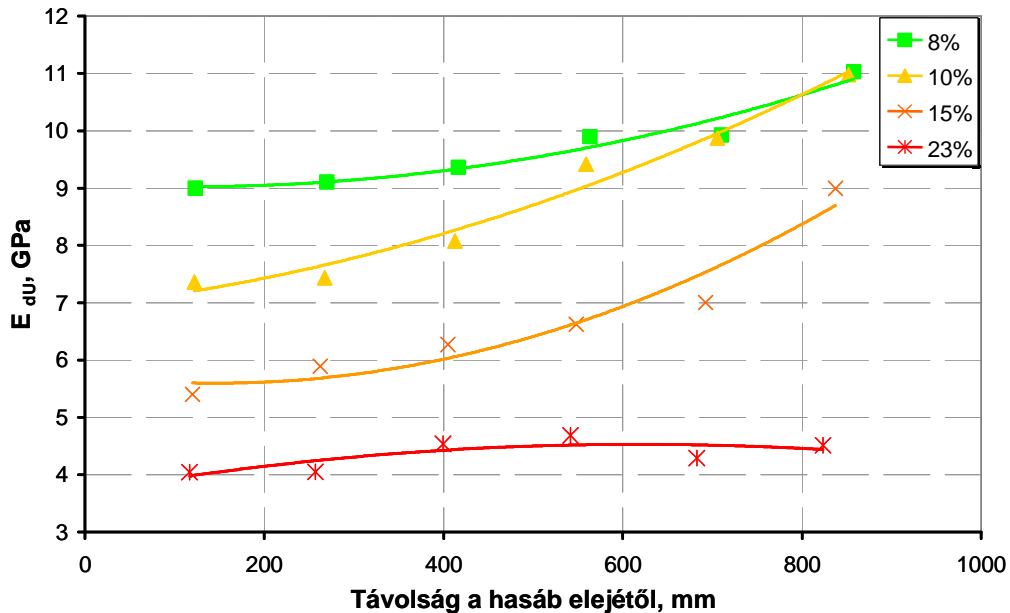
3.31. ábra.

A hangterjedési sebességből meghatározott rostirányú dinamikus rugalmassági modulus változása a hossz tengely mentén, a különböző tömörítettségű minták esetében



A diagramon megfigyelhető, hogy a hangterjedési sebességből megállapított rugalmassági modulus a hasáb eleje és vége között eltér.

A diagram függőleges tengelyét jobban széthúzva a tendencia még inkább szembeötlő. A következő (3.32. ábra) ábrában az előző diagram látható, a 3...12 GPa-os tartomány kinagyítva.



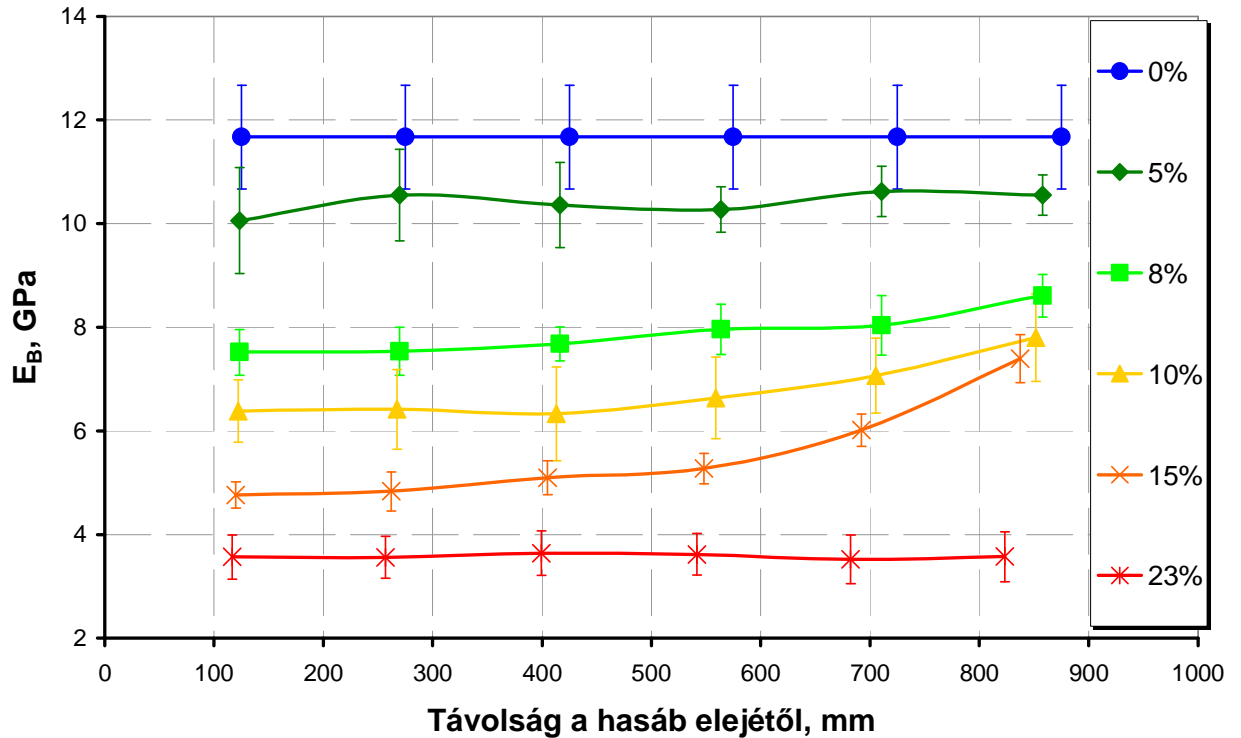
3.32. ábra.

A hangterjedési sebességből meghatározott rostirányú dinamikus rugalmassági modulus változása a hossz tengely mentén, a különböző tömörítettségű minták esetében

Az  $E_{dU}$  hossz tengely menti eloszlását figyelve szembeötlő, hogy a tömörítés mértéke nem egyenletes. **A tendencia a maradó alakváltozásnál tapasztalt tendenciával ellentétes!** A hasáb vége, vagyis a dugattyú felőli részén a rugalmassági modulus sokkal nagyobb. A 8, 10 és 15%-ban tömörített hasáboknál a tömörítés mértékének növelésével egyre nagyobb a különbség a hasábok eleje és vége között a rugalmassági modulusban. Azonban a 23%-ban tömörített hasáboknál a hossz tengely mentén közel azonos a rugalmassági modulus.

### 3.10.1.3. Statikus rugalmassági modulus eredményei hárompontos hajlító vizsgálat alapján

A következő ábrában a hárompontos hajlító vizsgálatnál megállapított statikus rugalmassági modulus változása látható a hasáb hossz tengelye mentén, a hat tömörítési fok esetében.



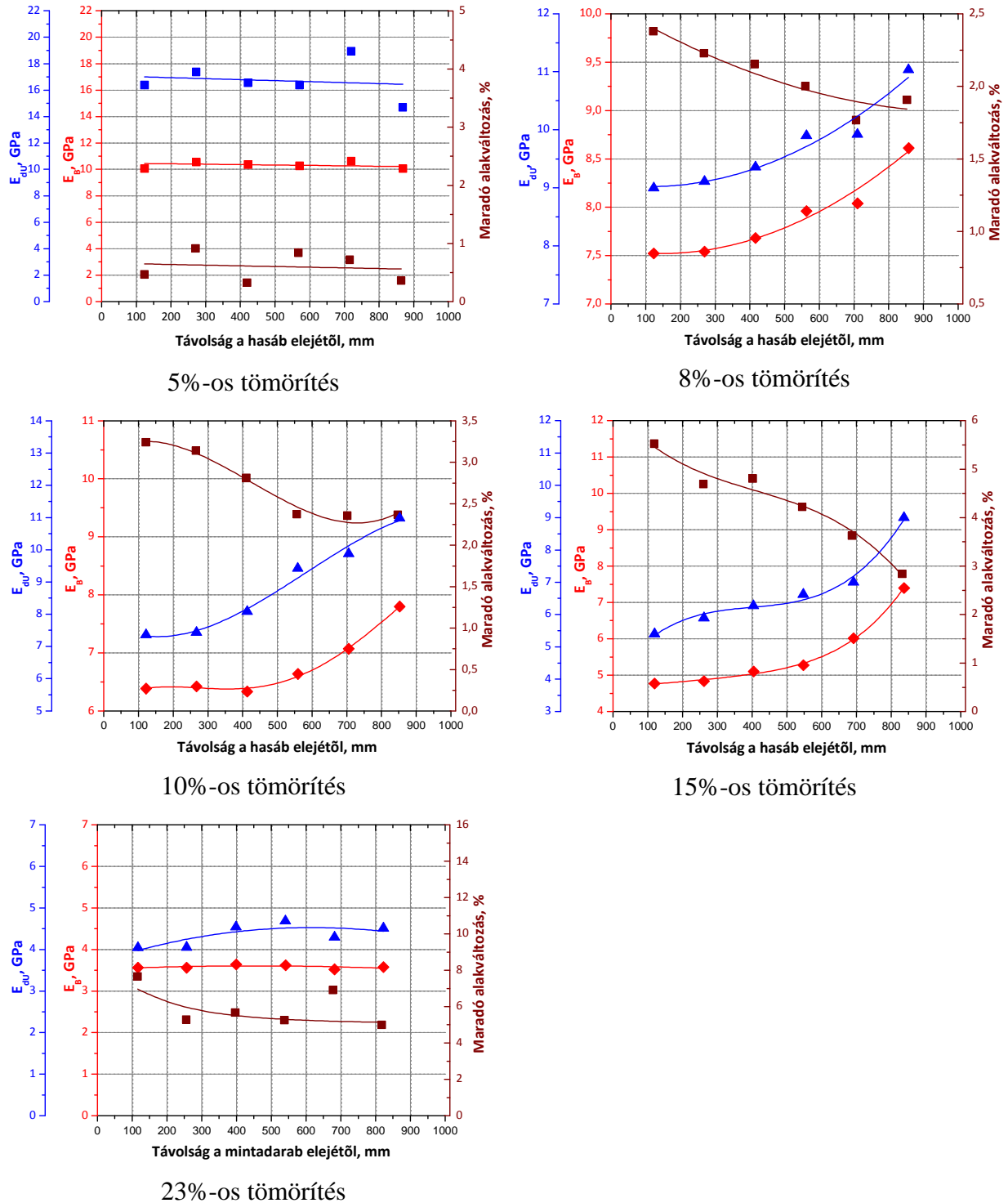
**3.33. ábra.**

Hárompontos hajlító vizsgálatnál megállapított statikus rugalmassági modulus változása a hossz tengely mentén, a különböző tömörítettséű minták esetében

Mivel minden keresztmetszetben 30 mérést végeztem, az ábrázolt pontoknak a szórása is megadható, mely szórás a viszonylag nagyméretű mintának köszönhetően látható módon elfogadhatóan kicsi. Pontos mérési eredmények a mellékletben találhatóak.

### 3.10.1.4. Maradó alakváltozás és rugalmassági modulus a hossz tengely mentén

A hossz tengely mentén több helyen meghatározott maradó alakváltozást és rugalmassági modulusot tömörítésenként közös diagramban ábrázolva a következő, 3.34. ábra tartalmazza.



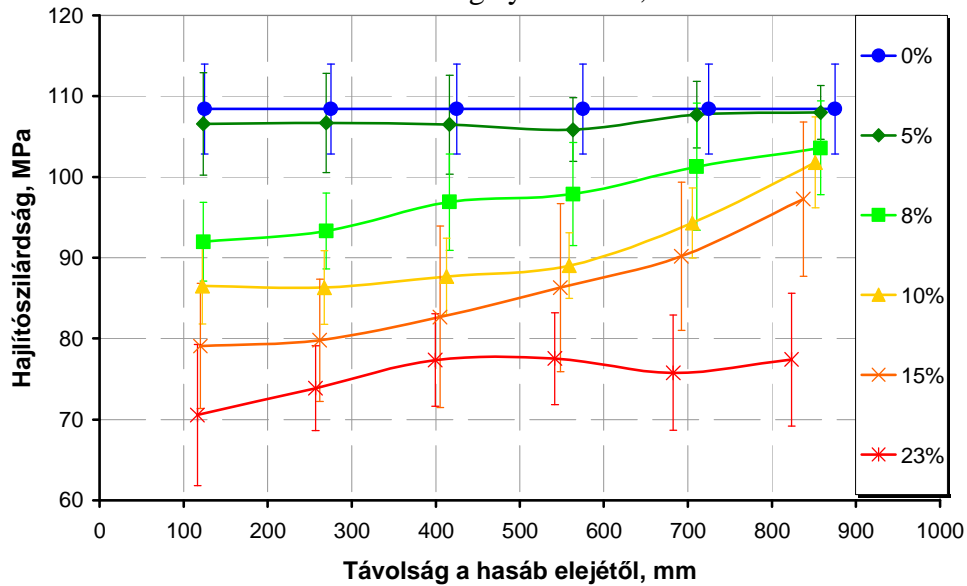
3.34. ábra.

A maradó alakváltozás, a statikus, és a hang terjedési sebességéből megállapított rugalmassági modulus a rúd elejétől mért távolság függvényében, különböző tömörítési szinteknél

A hossz tengely mentén a kétféle rugalmassági modulus tendenciája teljesen azonos, és ellentétes a maradó alakváltozás értékeit mutató görbével, azonban a hangterjedési sebességből meghatározott rugalmassági modulus jobban követi a maradó alakváltozás tendenciáját (ellentétesen) minden tömörítési szinten.

### 3.10.1.5. Statikus hajlítószilárdság eredményei hárompontos hajlító vizsgálat alapján

A következő, 3.35. ábrában a hárompontos hajlító vizsgálatnál megállapított hajlítószilárdság értékének változása látható a rúd hossz tengelye mentén, a hat tömörítési szint esetében.



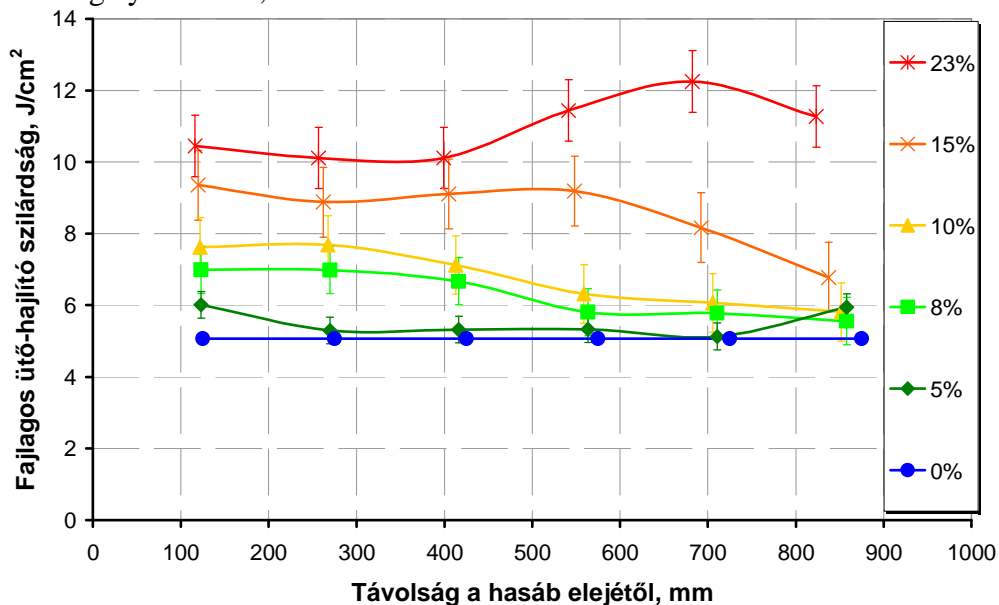
3.35. ábra.

Hárompontos hajlító vizsgálatnál megállapított hajlítószilárdság változása a hossz tengely mentén, a különböző tömörítettségű minták esetében

A diagramban látható görbék tendenciája nagymértékű azonosságot mutat a statikus és a hangterjedési sebességéből meghatározott dinamikus rugalmassági modulusok hossz tengely menti változásának tendenciájához.

### 3.10.1.6. Dinamikus ütés-hajlító vizsgálat

A következő, 3.26. ábrában a fajlagos ütés-hajlító szilárdság értékének változása látható a hasáb hossz tengelye mentén, a hat tömörítési fok esetében.

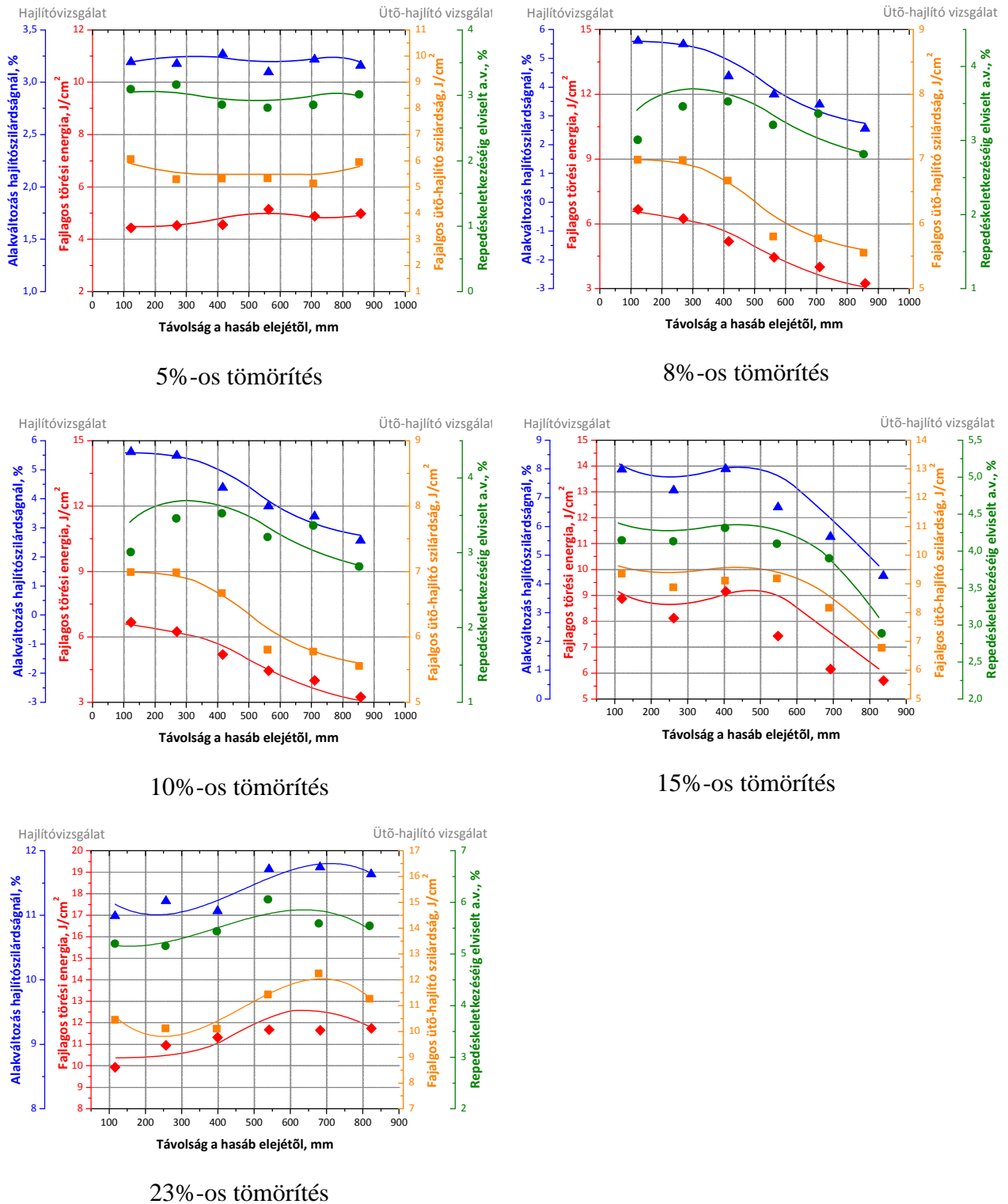


3.36. ábra.

A fajlagos ütés-hajlító szilárdság értékének változása a hasáb hossz tengelye mentén, a különböző tömörítettségű minták esetében

A pontos mérési eredmények mérésenként a mellékletben található.

A következő, 3.37. ábrában látható diagramokban a statikus rugalmassági modulus, a hajlítószilárdság, a hajlítószilárdsághoz tartozó alakváltozás és a törésig elnyelt energia látható tömörítésként, a rúd elejétől mért távolság függvényében.



3.37. ábra.

A statikus rugalmassági modulus, a hajlítószilárdság, a hajlítószilárdsághoz tartozó alakváltozás és a fajlagos törési energia a hasáb elejétől mért távolság függvényében, különböző tömörítési szinteknél

A 3.37. ábra diagramjai alapján megállapítható, hogy az 5% tömörítés esetén az ábrázolt jellemzők nagyjából egyenletesnek tekinthetők a hossz tengely mentén. A többi tömörítési szinten a hárompontos hajlító vizsgálattal és az ütő-hajlító vizsgálattal meghatározott jellemzők azonos hossz tengely menti eloszlást mutatnak. Adott tömörítési szinten a hajlítószilárdsághoz tartozó alakváltozás és a repedéskeletkezéshez tartozó alakváltozás (kék és zöld görbék), továbbá a fajlagos törési energia és a fajlagos ütő-hajlító szilárdság (piros és narancssárga görbék) páronként azonos jelleget mutatnak a mintadarab elejétől mért távolság függvényében.

### 3.10.2. Inhomogenitás a keresztmetszetben

A hossz tengely menti homogenitás vizsgálata után a keresztmetszetben is ellenőrizni akartam a tömörítés homogenitását. Ennek érdekében a hasábok feldarabolása során nagy gondot fordítottunk rá, hogy a vizsgálatok után az egyes mintadarabok helye egyértelműen beazonosítható legyen. A mintadarabok jelölései tartalmazták a tömörítés mértékét, helyét a hossz tengely mentén és a keresztmetszetben is. A hárompontos hajlítás esetén végeztem el mind a harminc vizsgálatot a keresztmetszetben. Az inhomogenitás megjelenítésére a rugalmassági modulus eloszlását választottam és háromféle ábrázolást használtam.

A legegyszerűbb – és talán leglátványosabb – a térbeli ábrázolás, ahol a keresztmetszet szélessége és vastagsága alkotja az alapsíkot, melyre merőlegesen a magasság jelöli a rugalmassági modulus nagyságát.

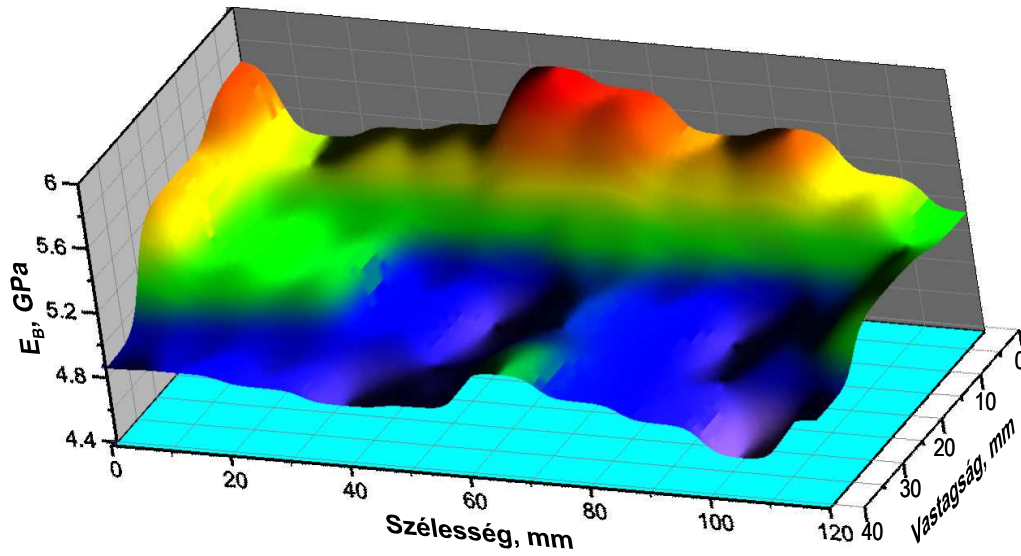
A második ábrázolásmód ennek a projekciója, vagyis az alapsíkra vett vetülete.

A harmadik, mikor a projekción három szintet ábrázolok. A zöld terület a keresztmetszetre jellemző átlag körüli, a szürke az átlag alatti, a piros az átlag feletti rugalmassági modulusal rendelkező területeket jelöli.

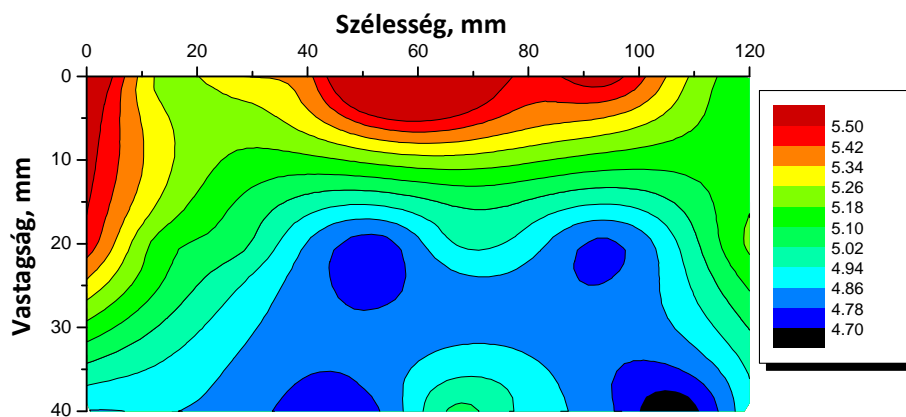
A rugalmassági modulus eloszlása a 15%-os tömörítettségű mintadarab elejétől kb. 425 mm távolságra lévő keresztmetszeten (a harmadik szakasz közepén) a következő 3.38. ábrában látható. A többi eloszlástérkép a mellékletben található, a projekciókat (helytakarékosságból) a diszsertációhoz készített digitális melléklet tartalmazza.

Az előzőekben láthattuk, hogy a maradó alakváltozás növekedésével csökken a rugalmassági modulus, vagyis ahol a rugalmassági modulus nagy, azon a területen kisebb maradó alakváltozást szenvedett az anyag, és fordítva, ahol kicsi (az eloszlástérképen árok) ott nagyobb.

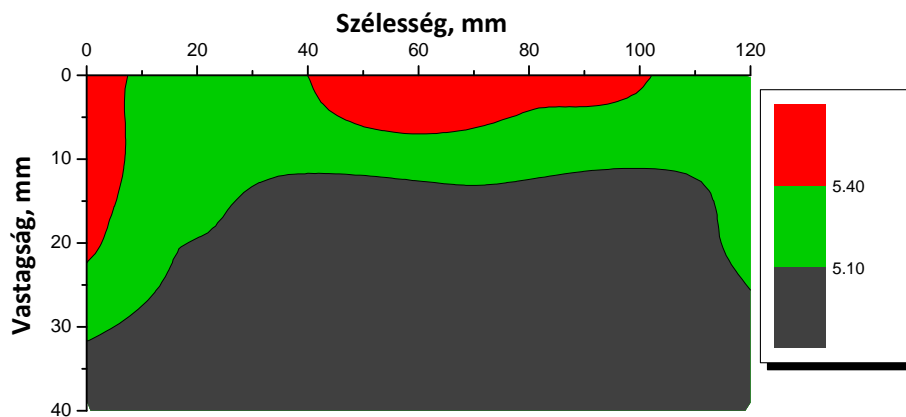
Az eloszlástérképeket és projekciókat figyelve észrevehető, hogy az átlagtól nagyobb rugalmassági modulusal rendelkező területek (a kisebb maradó alakváltozást szenvedett részek), a hasábok szélein, különösen (az ábrázolás szerint) a felső szélén található. Ez magyarázható azzal, hogy az autoklávban gőzölt faanyagot a tömörítő berendezésbe téve, az acélfelellettel érintkezik és kismértékben visszahűl. A visszahűlt részek a tömörítés megszüntetése után nem tartják meg annyira a rájuk kényszerített formát.



a.)  
eloszlástérkép



b.)  
projekció I.



c.)  
projekció II.

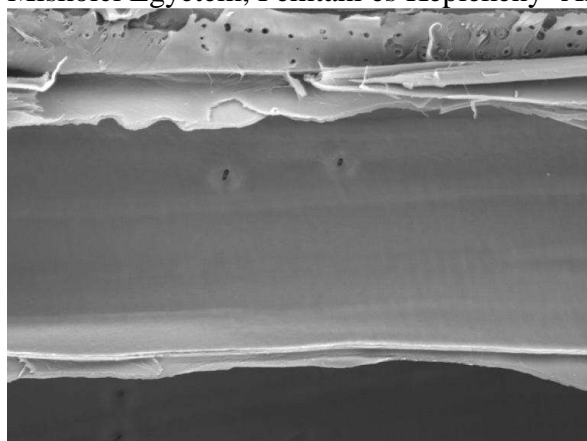
**3.38. ábra.**

A rugalmassági modulus keresztmetszetben való eloszlásának ábrázolásai, a 15%-os tömörítettességű hasáb elejétől kb. 425 mm távolságra lévő keresztmetszeten (a harmadik szakasz közepén)

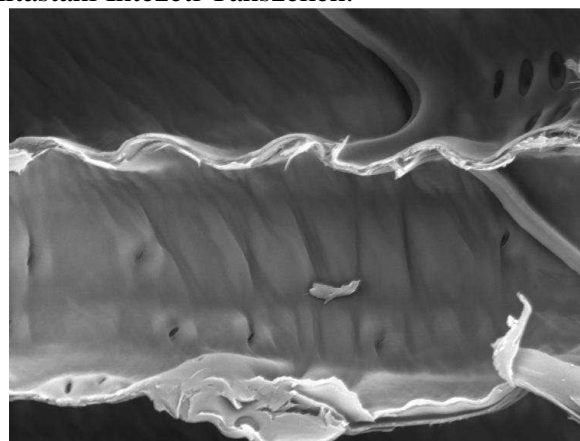
### 3.11. Mikroszerkezet vizsgálat

A tömörített faanyag vizsgálatának megkezdésekor célom volt, hogy felfedjem a rostirányú tömörítés hatására az anyag szerkezetében keletkező változásokat, amik a tulajdonságok ily nagymérvű megváltozását okozzák. Ez volt az oka, hogy vizsgálataim céljából a bükköt választottam, melynek szabályos szerkezetén a tömörítés hatása könnyebben felfedezhető.

Egy szerencsés vizsgálat során, 2005. nyarán sikerült olyan felvételt készíteni, amin egyértelműen látható volt egy nedvességszállító csatorna, melynek fala hullámos volt. A következő, 3.39. ábrában látható ez a korai felvétel és egy ugyanakkor készített felvétel tömörítetlen bükkéről. A felvételeket, az ábrákon szereplő dátumok alapján 2005. július 12-én készítettük a Miskolci Egyetem, Fémteni és Képlékeny- Alakítástani Intézeti Tanszékén.



a.) Tömörítetlen

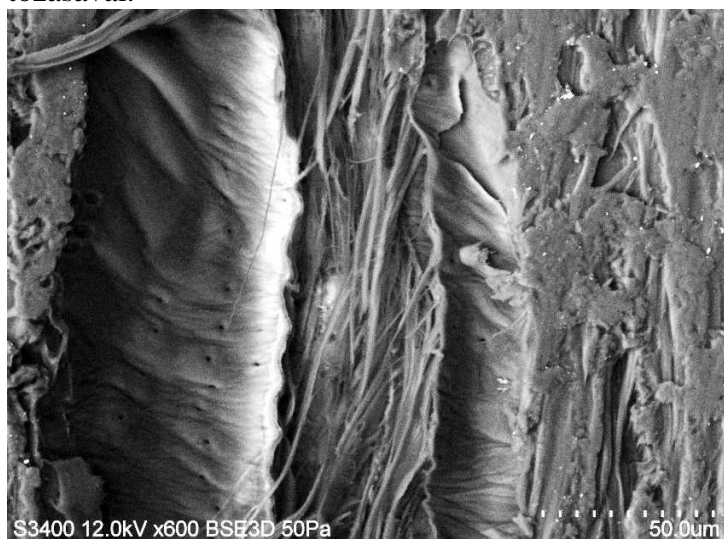


b.) Tömörített

#### 3.39. ábra.

Bükkfa nedvességszállító edényéről készített SEM felvételek (2005. július 12.)

A felvétel alapján egyértelművé vált, hogy a makroszkópikus alakváltozás a bükk mikroszerkezetében változásokat idéz elő, a sejtfalakat harmónikaszerűen összegyűri, ami egyértelműen összefüggésbe hozható a makroszkópikus tulajdonságok nagymértékű megváltozásával.



#### 3.40. ábra.

Bükkfa nedvességszállító edényéről készített SEM felvétel (2009. augusztus 17.)

A 3.40. ábrában látható SEM felvételt Sopronban a Nyugat-Magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Karán készítette Dr. Fehér Sándor.



A szakirodalomban 2006-tól felfedezhetők olyan publikációk, melyek a balsafa (*Ochroma pyramidale*) rostirányú összeroppantása közben végbemenő folyamatokat vizsgálják. Ezek némelyikében található az előző ábrákban (3.39, 3.40. ábra.) bemutatott, harmonikaszerű gyűrődéshez hasonló, de a bükkfa rostirányú tömörítésének hatásáról nem található semmilyen utalás.

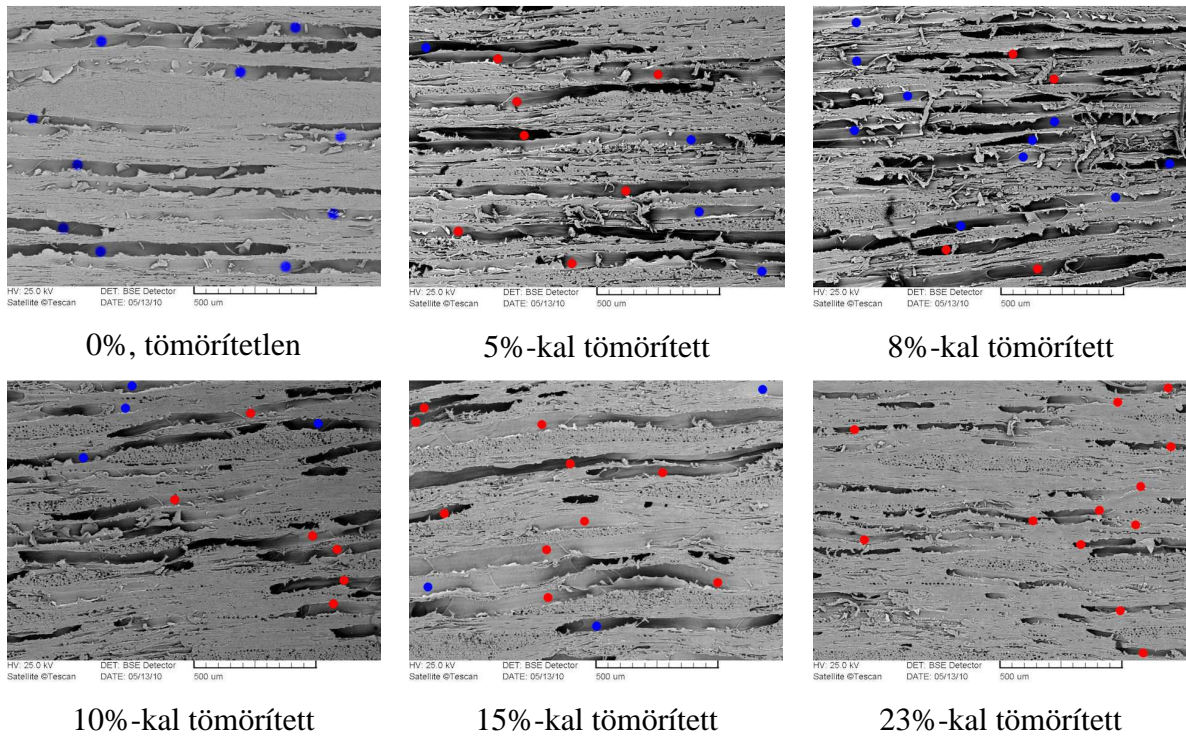
### **3.11.1. Minta előkészítés mikroszerkezet vizsgálat előtt**

A mikroszerkezet vizsgálatokat pásztázó elektron mikroszkóp segítségével végeztem. A vizsgálatokat minden esetben gondos minta előkészítés előzte meg [100, 101, 102, 103].

Először az anatómiai irányoknak megfelelő kb. 10 mm oldalhosszúságú kockákat vágtam ki. Majd a vizsgálandó felületet biológiai metszetek készítésére szolgáló siklócsapágyas, szánkás mikrotróm segítségével alakítottam ki úgy, hogy 20  $\mu\text{m}$  vékonyságú rétegeket választottam le a kocka felületéről mindaddig, míg a keletkezett felület megfelelő nem lett. (A vizsgálatok során nem a metszeteket, hanem a kockát vizsgáltuk.) A mikrotróm késének a különböző dőlésszögei (élszög, hátszög), ill. a szánka mozgatásának sebessége a keletkezett felületet döntően meghatározza, megfelelő felület kialakításához nagyfokú gyakorlat szükséges.

A rostirányú tömörítés hatása sugár és húrirányban figyelhető meg leginkább, én a SEM vizsgálatok során húrmetszeteket vizsgáltam, mert a bükk esetében a bélsugár tükrök rendkívül hangsúlyosak.

A minták felületét vizsgálat előtt arannyal be kellett vonni, hogy vizsgálhatók legyenek az elektron mikroszkópban, ami a fa rendkívül porózus szerkezetét figyelembe véve, nagyon nehéz feladat. A minták arannyal való bevonását Dr. Marossy Kálmán végezte. A pásztázó elektron mikroszkópos vizsgálatokat az ME, MAK, Fémtani és Képlékeny-Alakítástani Intézeti Tanszékén Kovács Árpád végezte. Tömörítésenként két kocka egy-egy előkészített felületét, és felületenként öt-öt (vagyis összesen 60) látóteret vizsgáltam azonos nagyításban. A következő ábrában található hat SEM felvétel tömörítési szintenként mutat be egy-egy látóteret.

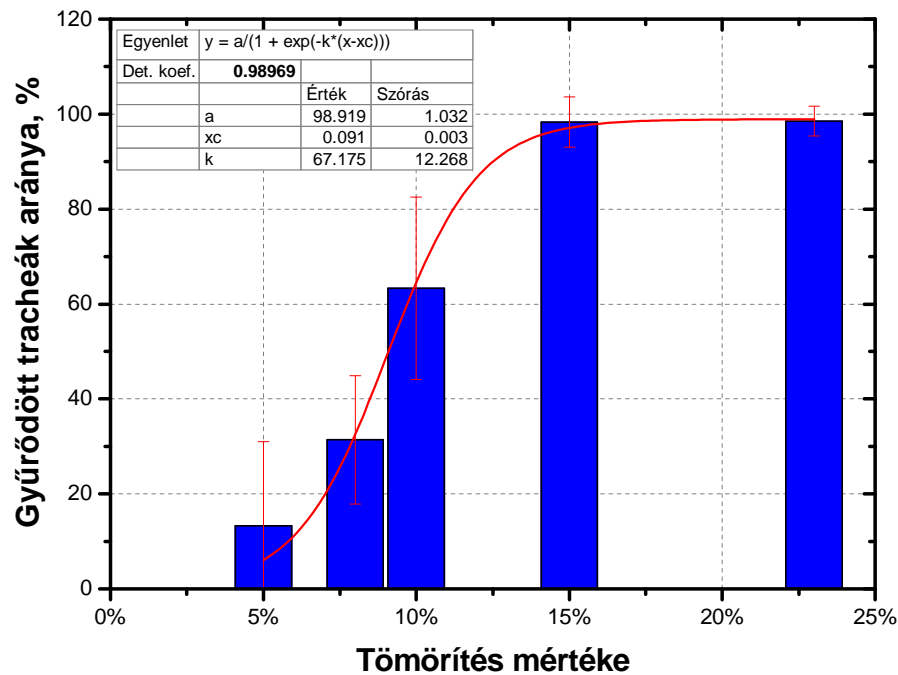


**3.41. ábra.**

Bükkfa nedvességszállító edényéről készített SEM felvételek a gyűrődött piros, a sértetlen edények kék színnel vannak jelölve

Jól megfigyelhető, hogy a gyűrődött tracheák aránya a felvételeken a tömörítés mértékének növelésével egyre több.

A mérési eredmények alapján készített összesítő diagram a következő ábrában található.



**3.42. ábra.**

A SEM vizsgálattal megállapított gyűrődött tracheák aránya a tömörítés mértékének függvényében

A tendencia egyértelműen megfigyelhető, hogy a tömörítés mértékének növelésével az egy látótérben lévő roncsolódott edények száma a látótérben lévő összes edényhez képest növekszik. Az eredmények statisztikai kiértékelését a következő táblázat tartalmazza.

**3.6. táblázat. Az egy látótérben lévő roncsolódott edények száma a látótérben lévő összes edényhez képest**

Tömörítés mértéke	Összes edény száma a látótérben, db	Roncsolódott edények száma a látótérben, db	Sértetlen edények száma a látótérben, db	Roncsolódott edények átlaga a látótérben, %	Szórás, %	Valószínűségi változó., %
0%	-	-	-	-	-	-
5%	10,40	1,30	9,10	13,26	17,73	1,34
8%	11,50	3,50	8,00	31,37	13,49	0,43
10%	11,00	7,11	3,89	63,30	19,22	0,30
15%	11,80	11,60	0,20	98,33	5,27	0,05
23%	12,00	11,80	0,20	98,52	3,13	0,03

## 4. A MINIMÁLIS HAJLÍTÁSI SUGÁR MEGHATÁROZÁSA

Faanyagok minimális hajlítási sugara a feldolgozás szempontjából rendkívül fontos paraméter. Megmutatja, hogy a faanyag milyen mértékben hajlítható, hogy adott vastagság esetén, mekkora az a legkisebb görbületi sugár, melyet a fa látható károsodás nélkül még képes elviselni.

Adott faanyag hajlításakor fellépő alakváltozás a hajlítási sugártól függ. Ha a hajlításhoz szükséges alakváltozást a faanyag nem képes elviselni, a külső íven a rostok elszakadnak. A tömörítés ellenére – kis hajlítási sugár esetén – előfordul, hogy a húzott zónában rostszakadás lép fel. A belső íven a faanyag nagyobb deformációkat is képes elviselni, szemmel látható „gyűrődések” nélkül. Hajlításnál az alkatrészben fellépő húzó- és nyomófeszültségeket húzó-szalaggal lehet befolyásolni. A szalagot hajlítás előtt a hajlítandó ív külső oldalára helyezik fix, vagy állítható bütü szorító segítségével. A szalag megakadályozza a külső ív túlzott megnyúlását.

A fa hajlíthatóságát több tényező befolyásolja: fafaj, anyagminőség, alkatrészméret, keresztmetszet alakja, tömörítési fok, a hajlításnál alkalmazott sablon és szerszám stb.. A megengedhető legkisebb hajlítási sugarat elméleti úton úgy határozzák meg, hogy a külső anyagrétegben sem engednek meg nagyobb érintőirányú nyúlást, mint a szakítópróbatest szakadásának helyén fellépő effektív nyúlás. Számítások helyett azonban a gyakorlatban minden esetben meghatározzák az adott fa hajlíthatóságát, a faanyag sablonra történő ráhajlításával.

A minimális hajlítási sugár meghatározásának eszközeit, módját, valamint a sikeres és sikertelen hajlítás eredményét a 4.1. ábra illusztrálja.



Adott vastagságú, 20 mm szélességű fa-  
anyag ráhajlítása a sablonra



Sikeres hajlítás



Sikeres hajlítás



Sikertelen hajlítás

#### 4.1. ábra.

#### A minimális hajlítási sugár meghatározása

A fa hajlíthatósága a  $h/R$  viszonyzámmal jellemezhető,  
ahol,

$h$  := a hajlítandó anyag vastagsága,

$R$  := a minimális hajlítási sugár, amelynél a fa még biztonságosan (törés-mentesen)  
hajlítható.

A következő táblázat irodalmi adatokat tartalmaz a minimális hajlítási sugárról és a  $h/R$ -ről különböző fafajok esetén hajlító-szalaggal és nélkül. A megadott értékek minden esetben 1 hüvelyk (azaz 2,54 cm) vastag anyagon lettek meghatározva, 100°C-os gőzölést követően (a Thonet-eljárásnak megfelelő körülmények között).

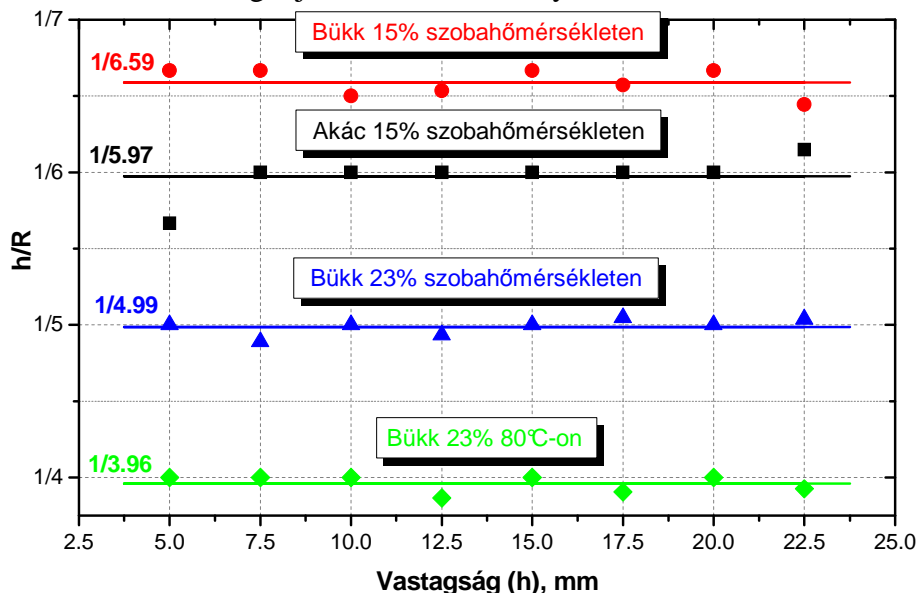
#### 4.1. táblázat. Irodalmi adatok a minimális hajlítási sugárról és a $h/R$ -ről különböző fafajok esetén hajlító-szalaggal és nélkül

Fafaj	Szalag nélkül		Szalaggal	
	R, cm	$h/R$	R, cm	$h/R$
Lucfenyő	-	-	76,2	1/30
Erdei fenyő	71,3	1/28	35,5	1/14
Bükk	37	1/15	10,3	1/4
Eper	80,3	1/30	30,5	1/12

A minimális hajlítási sugarat két fafaj, az akác és a bükk esetében határoztuk meg.

Akác esetén a tömörítés 15%-os volt és szobahőmérsékleten határoztuk meg a  $h/R$  viszonyt. Bükk esetén 15 és 23% volt a tömörítés, és 15% esetén szobahőmérsékleten, 23% esetén szobahőmérsékleten, és 80 °C-ra melegített állapotban is meghatároztuk a  $h/R$  viszonyt. A vizsgálat lényege, hogy a Thonet-eljárásnak megfelelő hőmérsékleten határozzuk meg a 23%-

ban tömörített faanyag minimális hajlítási sugarát. Ennek segítségével ellenőrizhetővé válik, hogy lehet-e tovább csökkenteni a minimális hajlítási sugarat a faanyag előzetes melegítésével, illetve össze lehet hasonlítani, hogy a tömörített és a tömörítetlen faanyag hajlítható-e jobban 80°C-on. A hajlított pálcák szélessége 20 mm volt, nyolcféle vastagság esetében határoztuk meg a minimális hajlítási sugarat, és minden esetben háromszor megismételtük a kísérletet. A következő, 4.2. ábra foglalja össze az eredményeket.



4.2. ábra.

A h/R viszony a vastagság függvényében

A hajlítások részletes eredményeit a melléklet tartalmazza. A következő táblázatban a vizsgálatok átlaga van feltüntetve.

4.2. táblázat. A mért  $R_{min}$  és h/R vizsgálatok eredményei

h, mm	15%-ban tömörített akác szobahőmérsékleten		15%-ban tömörített bükk szobahőmérsékleten		23%-ban tömörített bükk szobahőmérsékleten		23%-ban tömörített bükk 80°C-on	
	$R_{min}$ , mm	h/R	$R_{min}$ , mm	h/R	$R_{min}$ , mm	h/R	$R_{min}$ , mm	h/R
22,5	138,3	1 / 6,15	145,0	1 / 6,44	113,3	1 / 5,04	88,3	1 / 3,93
20	120,0	1 / 6,00	133,3	1 / 6,67	100,0	1 / 5,00	80,0	1 / 4,00
17,5	105,0	1 / 6,00	115,0	1 / 6,57	88,3	1 / 5,05	68,3	1 / 3,90
15	90,0	1 / 6,00	100,0	1 / 6,67	75,0	1 / 5,00	60,0	1 / 4,00
12,5	75,0	1 / 6,00	81,7	1 / 6,53	61,7	1 / 4,93	48,3	1 / 3,87
10	60,0	1 / 6,00	65,0	1 / 6,50	50,0	1 / 5,00	40,0	1 / 4,00
7,5	45,0	1 / 6,00	50,0	1 / 6,67	36,7	1 / 4,89	30,0	1 / 4,00
5	28,3	1 / 5,67	33,3	1 / 6,67	25,0	1 / 5,00	20,0	1 / 4,00
h/R átlag	$\frac{1}{5,97} \approx \frac{1}{6}$		$\frac{1}{6,59} \approx \frac{1}{6,6}$		$\frac{1}{4,99} \approx \frac{1}{5}$		$\frac{1}{3,96} \approx \frac{1}{4}$	

A minimális hajlítási sugár meghatározásához alkalmazott tömörített „hasábok” nedvességtartalma igen fontos a hibamentes hajlítás miatt, ezért minden esetben meghatároztuk a faanyag nedvességtartalmát 25, különböző helyről vett kb.  $10 \times 10$  mm -es kis kockákon. A hasábok – hajlítás előtti – nedvességtartalmát a 4.3. táblázat tartalmazza.

**4.3. táblázat. A mintadarabok nedvességtartalma közvetlenül a hajlítás előtt**

	Nettó nedvességtartalom
15%-ban tömörített akác szobahőmérsékleten	22,6 %
15%-ban tömörített bükk szobahőmérsékleten	21,2 %
23%-ban tömörített bükk szobahőmérsékleten	18,8 %
23%-ban tömörített bükk 80°C-on	17,1 %

**4.1.1. Eredmények, következtetések**

- Az irodalomban talált adatok alapján a bükk h/R aránya hajlító-szalag nélkül 1/15, szalaggal, 100°C-on 1/4, ami megegyezik a 23%-ban tömörített bükk 80°C-on, szalag nélkül megállapított h/R arányával, és nem sokkal előzi meg a szobahőmérsékleten (ezen a tömörítettségi szinten) megállapított értéket. Ez azt jelenti, hogy a tömörített faanyag formára hajlítása egyszerűbb eszközökkel, és akár szobahőmérsékleten is elvégezhető.
- A tömörítés mértékének növelésével javítható a h/R viszony.
- Az akác kismértékben hajlíthatóbb, mint a bükk (azonos tömörítettség esetén).

## 5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

1. Kimutattam, hogy az azonos módon a disszertációban ismertetett technológiával és paraméterekkel, rostirányban tömörített bükk (*Fagus Sylvatica* L.) faanyag (a továbbiakban: rostirányban tömörített bükk) statikus és dinamikus rostirányú rugalmassági modulusai, a vizsgált tömörítési szinteken (0%, 5%, 8%, 10%, 15%, illetve 23%), a rostirányú tömörítés hatására lecsökkennek. A 23%-os rostirányú tömörítés hatására a statikus hárompontos hajlító vizsgálattal, a hangterjedési sebességből illetve a longitudinális, és a hajlító, sajátrezgésekből megállapított rugalmassági modulusok mindegyike közel 70%-kal, a torziós sajátrezgésekből meghatározott rugalmassági modulus közel 27%-kal csökkennek le.
2. A rostirányú tömörítés a rostirányban tömörített bükk hangterjedési sebesség alapján meghatározott sugár- és húrirányú rugalmassági modulusait szignifikánsan nem változtatja meg.
3. A rostirányban tömörített bükk esetén a longitudinális hullámok logaritmikus dekrementuma ( $\Lambda$ ) az alábbi egyenlet szerint növekszik a tömörítés mértékének ( $\epsilon$ ) növelésével:
 
$$\Lambda = 0,024 \pm 0,007 + 0,056 \pm 0,292 \cdot \epsilon + 3,897 \pm 3,384 \cdot \epsilon^2 - 12,168 \pm 9,928 \cdot \epsilon^3$$
 A determinációs koefficiens: 0,932.  
 A 23%-os tömörítés a logaritmikus dekrementumot közel négyszeresére növelte meg. Ez egyértelműen bizonyítja, hogy a rostirányú tömörítés hatására a bükk faanyag egyre inkább viszkoelasztikus viselkedést mutat.
4. A rostirányban tömörített bükk hajlító rezgések sajátfrekvenciáiból az Euler-egyenlettel illetve az ASTM szabvány által rögzített képlettel meghatározott rugalmassági modulusai között eltérés tapasztalható. Az eltérés nagysága a tömörítés mértékének növelésével növekszik, 23%-os tömörítés esetén a különbség eléri a 1,2%-ot.
5. A rostirányban tömörített bükk a tömörítés mértékének növelésével egyre szívósabb jelleget mutat. Ezt bizonyítják az ütés-hajlító vizsgálattal megállapított fajlagos ütmunka értékek és a vizsgálat után a mintadarabok vizuális értékelése, a mintadarabok töretei. A 23%-os rostirányú tömörítés hatására a fajlagos ütmunka kétszeresére nőtt ( $w_{0\%} = 5,07 \pm 0,41 \text{ J cm}^{-2}$ ;  $w_{23\%} = 10,94 \pm 1,62 \text{ J cm}^{-2}$ ).



6. A rostirányban tömörített bükk repedés keletkezéséig elviselt alakváltozása a rostirányú tömörítés mértékének növelésével a vizsgált tömörítési szinteken növekszik. Ezt egyértelműen bizonyítják a hárompontos hajlító és az ütő-hajlító vizsgálatok során megállapított repedéskeletkezéshez tartozó alakváltozás értékek és a felvett hajlítódigramok lefutása is. A 23%-os rostirányú tömörítés hatására repedéskeletkezésig elviselt alakváltozás hárompontos hajlító vizsgálat esetén közel ötszörösére ( $\epsilon_{B0\%} = 2,1 \pm 0,2 \%$ ;  $\epsilon_{B23\%} = 11,4 \pm 0,34 \%$ ), ütő-hajlító vizsgálatnál közel kétszörösére ( $\epsilon_{w0\%} = 2,83 \pm 0,39 \%$ ;  $\epsilon_{w23\%} = 5,5 \pm 0,54 \%$ ) nőtt.
7. Egy újfajta eljárást dolgoztam ki a bükk faanyag rostirányú makroszkópikus tömörítésének mikroszkópikus szerkezetre gyakorolt hatásának kvantitatív jellemzésére. A rostirányban tömörített bükk faanyagból húrmetszetű preparátumokat készítettem, melyekről azonos nagyítású, pásztázó elektronmikroszkóppal készített felvételek segítségével vizsgáltam az egy látótérben felfedezhető gyűrődött falú tracheák arányát a látótérben lévő összes tracheák számához képest. A vizsgálatok alapján megállapítható volt, hogy az általam vizsgált tömörítési szinteken, az azonos látótérben látható gyűrődött tracheák aránya növekedett (0%; 13%; 63%; 98%; 99%) a tömörítés mértékének növelésével.
8. Azonos szélességű különböző vastagágú mintadarabokon végzett vizsgálataimból megállapítom, hogy a bükk 15 és 23%-os rostirányú tömörítése jelentősen javítja a h/R értéket. Irodalmi adatok alapján a bükk h/R értéke 1/15. A 15%-ban tömörített bükk h/R értéke 1/6, 23%-os tömörítés esetén 1/5.

## 6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik munkámban és a disszertáció elkészítésében segítettek.

Dr. Bárczy Pál professzor úrnak, aki témavezetőmként immár másfél évtizede irányít az egykristály növesztéstől, tribológián át a cellás anyagokig. Formálja gondolkodásomat és mélyíti ismereteimet az anyagtudomány területén, mérhetetlenül egyszerűen rámutatva addig érthetetlen összefüggésekre.

Szeretném megköszönni Dr. Szabó Imre professzor úrnak, hogy bevezetett a faanyag világába, és megismerkedhettem a soproni Nyugat-Magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Karának több oktatójával, akik sok hasznos tanáccsal láttak el a faanyagok vizsgálatával kapcsolatban, továbbá az atyai terelgetést, mellyel már lassan hét éve megtisztel.

A Miskolci Egyetem Polimermérnöki Tanszék (előtte Műanyagok Tanszéke, még korábban Nemfémek Anyagok Tanszéke) tagjainak, az Anyagtudományi Intézet és a Mechanikai Technológiai Tanszék munkatársainak, hogy segítséget nyújtottak vizsgálataim során.

És legvégül családomnak, kik töretlenül támogattak és bíztak bennem eddigi pályám során.

## 7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Alexander von Vegesack: Thonet, Cser Kiadó, Budapest, ISBN 978-963-9759-77-0 (2009)
- [2] J. M. Dinwoodie: Wood: Nature's Cellular Polymeric Fibre-composite, The Institute of Metals, ISBN 0-901462-35-7, (1989)
- [3] Szabó, I.; Kuzsella, L.: Faanyagok alkalmazástechnikája, Miskolci Egyetemi Kiadó, egyetemi jegyzet, (2009)
- [4] Sok ezer éves történet II. Fahajlítás a kezdetektől napjainkig, Magyar Asztalos és Faipar, 2007/2. pp:118-119. Forrás: Xylon International 2006. május-június
- [5] Kuzsella, L.; Szabó, I.: A tömörített faanyag és kárpitosipari alkalmazása, Magyar Asztalos és Faipar, 2007/8. Az Országos Asztalos- és faipari Szövetség Fóruma, pp: 94-95., (2008)
- [6] Kuzsella László, Szabó Imre: The effects of the compression on the mechanical properties of wood materials, Trans Tech Publications, Materials Science Forum, Vols. 537-538 pp. 41-46. (2007)
- [7] Ashby, M. F.; Jones, D. R. H.: Engineering Materials 2, An Introduction to Microstructures, Processing and Design, International Series on Materials Science and Technology, Volume 39. Pergamon Press, ISBN 0-08-032532-7, (1992)
- [8] Molnár, S.: Faanyagismeret, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, ISBN 963 9553 17 4, (2004)
- [9] Andre Da Silva, Stelios Kyriakides; Compressive response and failure of balsa wood, International Journal of Solids and Structures 44 pp. 8685–8717, (2007)
- [10] M. Vural, G. Ravichandran: Dynamic response and energy dissipation characteristics of balsa wood: experiment and analysis, International Journal of Solids and Structures 40, 2147–2170, (2003)
- [11] Szabvány: Faanyagvizsgálatok, Rugalmassági együttható meghatározása statikus hajlítással, MSZ 6786/15-84, K19.
- [12] Szabvány: Faszerkezetek. Szerkezeti fa és rétegelt-ragasztott fa. Egyes fizikai és mechanikai tulajdonságok meghatározása. MSZ EN 408, (1998)
- [13] Szabvány: Faszerkezetek. Vizsgálati módszerek. A fa alapanyagú lemezek mechanikai tulajdonságainak meghatározása. MSZ EN 789, (2000)
- [14] Joó, B.: A lucfenyő dinamikus rugalmassági modulusa alacsony frekvencián, Faipar, LIII. évf. 2005/2. pp:6-10., (2005)
- [15] Divós, P.; Divós, F.: Akusztikus tomográfia élő fák vizsgálatára, Faipar, 2005. LIII. évf. 1. szám, pp: 3-8. (2005)

- 
- [16] Bucur, V.: Acoustics of wood, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN-13 978-3-540-26123-0, (2006)
- [17] Summersclaes, J.: Non-destructive testing of fibre-reinforced plastics composites, Volume 1.; Elsevier Applied Science London, New York, ISBN 1-85166-093-3, (1987)
- [18] Babos K., Filló, Z., Somkuti, E.: Haszonfák, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, ISBN 963 10 2582 9, (1979)
- [19] Németh K: Faanyagkémia Kémiai szerkezet, reakciók, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, ISBN 963 356 217 1 (1997)
- [20] Kettunen, P. O.: WOOD Structure and Properties, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, ISBN 0-87849-487-1, (2006)
- [21] Szalai J.: A faanyag és faalapú anyagok anizotróp rugalmasság- és szilárdságtana, I rész: A mechanikai tulajdonságok anizotrópiája, Erdészeti és Faipari Egyetem Sopron, Hillebrand Nyomda Kft., (1994)
- [22] Bárczy Pál: Anyagszerkezet, ME, Egyetemi tankönyvkiadó, (2010)
- [23] Molnár S., Bariska M.: Magyarország ipari fái, Wood species of Hungary, Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, ISBN 963 9422 53 3, (2002)
- [24] Sentance, Bryan: A fa és az ember, Cser Kiadó, Budapest, ISBN 963 9560 26 X, (2004)
- [25] Perstorper, M.: Quality of structural timber, end-user requirements and performance control, Chalmers University of Technology, Division of Steel and Timber Structures, Göteborg, Sweden, ISSN 0534-0411, (1994)
- [26] Gibson, L. J.: Biomechanics of cellular solids, Journal of biomechanics 38, pp: 377-399, (2005)
- [27] Bagyinszki Gy, Kovács M.: Gépipari alapanyagok és félkész gyártmányok, Anyagismeret, Nemzeti Tankönyvkiadó, ISBN 978 963 275 079 8, 6. kiadás, (2010)
- [28] Sitkei, Gy.: A faipari műveletek elmélete, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó Kft. Budapest, ISBN 963 356 079 9, (1994)
- [29] Jósvay, L.: A faszobrász mesterség, Műszaki Könyvkiadó Budapest, ISBN 963 16 1991 5, (2005)
- [30] K.Götz: Die innere Optimierung der Bäume als Vorbild für technische Faserverbunde eine, lokale Approximation, Von der Fakultät der Universität Karlsruhe, Dissertation, (2000)
- [31] Aiden Walker: A faanyagok enciklopédiája, CSER Kiadó, ISBN 963 7418 67 9, Budapest (2006)
- [32] M.F. Ashby, H. Shercliff, D. Cebon: Materials Engineering, Science, Processing and Design, Elsevier Linacre House, Jordan Hill, ISBN-13: 978-0-7506-8391-3, Oxford, (2007)
- [33] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley: Metal Foam, Butterworth-Heinemann, Oxford, (2000)
- [34] H.P. Degischer, B. Kriszt (Eds.): Handbook of Cellular Metals, Wiley-VCH, Weinheim, ISBN 3-527-30339-1, (2002)
- [35] Weatherwax RC, Tarkow H: Density of wood substance: importance of penetration and adsorption compression of the displacement fluid. Forest Prod J 18(7): 44–6 (1968)
- [36] Easterling KE, Harrysson R, Gibsons LJ, Ashby MF: On the mechanics of balsa and other woods. Proc R Soc A383 31–41 (1982)
-

- [37] Easterling KE, Walker JCF, Nakada R: Understanding corewood in some softwoods: a selective review. *International Forestry Review* 251–9 (1999)
- [38] Cowdrey DR, Preston RD: Elasticity and microfibrillar angle in the wood of sitka spruce. *Proc Roy Soc. B* 166 245–72 (1966)
- [39] Cave ID: The anisotropic elasticity of the plant cell wall, *Wood Science and Technology* 2, 268-278 (1968)
- [40] B.K. Via, C.L. So, T.F. Shupe, L.H. Groom, J. Wikaira: Mechanical response of longleaf pine to variation in microfibril angle, chemistry associated wavelengths, density, and radial position, *Composites: Part A* 40, 60–66, (2009)
- [41] W. Gindla, T. Schöberl: The significance of the elastic modulus of wood cell walls obtained from nanoindentation measurements, *Composites: Part A* 35, 1345–1349 (2004)
- [42] Hai Qing, Leon Mishnaevsky Jr.: 3D multiscale micromechanical model of wood: From annual rings to microfibrils, *International Journal of Solids and Structures* 47 1253–1267 (2010)
- [43] Molnár Sándor: *Hazai fafajok: A bükkfa*, Magyar Asztalos és Faipar, 2010. március
- [44] Bálint Gyula: *Beépített faanyagok korhadása és védelme*, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, (1956)
- [45] Budó, Á.: *Kísérleti fizika I.* Nemzeti Tankönyvkiadó, 1970. ISBN 963 18 5966 5
- [46] Divós, F.; Mészáros, K.: Root decay detection by stress wave technique, In *Proc. 1.<sup>st</sup> European Symposium on Nondestructive Testing*, Sopron (1994)
- [47] Divós, F.: *Nondestructive Testing of Wood – A new course offered by the University of West Hungary*, Sopron, Faipar, LII. évf. 2004/4. pp:14-19. (2004)
- [48] Randall F. Barron: *Industrial Noise Control and Acoustics*, Marcel Dekker, Inc, ISBN: 0-8247-0701-X, (2003)
- [49] Robert J. Ross, Roy F. Pellerin: *Non destructive Testing for Assessing Wood Members in Structures*, United States Department of Agriculture, General Technical Report FPL-GTR-70 (1994)
- [50] W. S. Slaughter, N. A. Fleck; *Viskoelastic Microbuckling of Fibre Composites*, *Transaction of the ASME*, Vol. 60, 802-806, (1993)
- [51] Jugo, I. – Ozarska, B.: *Nondestructive evaluation of properties of reconstituted wood products used in Australia*. 8<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, (1996)
- [52] Rayleigh, L.: *Theory of Sound*. Vol. 1, 2<sup>nd</sup> edition, Macmillan, New York, (1945)
- [53] Tanaka, T. – Nagao, H. – Nakai, T.: *Nondestructive evaluation of bending and tensile strength by longitudinal and transverse vibration of lumber*. *Proc. 8<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, Conferences and Institutes, Washington State University, Pullman, USA, (1991)
- [54] Heinrich Kuttruff: *Acoustics, An Introduction*, Taylor & Francis, ISBN 0-203-97089-6, (2007)
- [55] Daniel R. Raichel: *The Science and Application of Acoustics*, second edition, Springer Science+Business Media, Inc. ISBN-10: 0-387-26062-5, (2006)
- [56] B. Lüthi: *Physical Acoustics in the Solid State*, ISBN 3-540-22910-8, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2005)
- [57] Thomas D. Rossing: *Springer Handbook of Acoustics*, Springer Science+Business Media, LLC New York, ISBN: 978-0-387-30446-5, (2007)

- 
- [58] B. Lüthi: *Physical Acoustics in the Solid State*, ISBN 3-540-22910-8, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2005)
- [59] Pellerin, R. F.; Ross, R. J.: *Nondestructiv Evaluation of Wood*; Forest Products Society, Madison WI; ISBN 1-892529-26-2, (2002)
- [60] Ohlsson, S.; Perstorper, M.: *Elastic wood properties from dynamic tests and computer modeling*, Chalmers University of Technology, Division of Steel and Timber Structures, Göteborg, Sweden, ISSN 0534-0411, pp: Ila-1 — Ila-14. (1994)
- [61] Hearnmon R.F.S.: *Vibration testing of wood*. *Forest Products Journal* 16: 29-40. (1966)
- [62] Nakao T. et al.: *Experimental study of flexural vibration of wooden beams by Levison beam theory*. *Journal of Vibration and Acoustics* 117: 378-379. (1995)
- [63] Perstorper, M.: *Strength and stiffness prediction of timber using conventional and dynamic methodes*. *Proc. First European Symposium on Nondestructive evaluation of Wood*, University of Sopron, Sopron, Hungary, (1994)
- [64] Tor Erik Vigran: *Building Acoustics*, Taylor & Francis, ISBN 0-203-93131-9, (2008)
- [65] Luiz A. Targa, Adriano W. Ballarin, Marco A. M. Biaggioni: *Avaliação Do Módulo De Elasticidade Da Madeira Com Uso De Método Não-Destrutivo De Vibração Transversal*, *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v.25, n.2, p.291-299, maio/ago. (2005)
- [66] Mark Kahrs, Karlheinz Brandenburg: *Applications of digital signal processing*, Kluwer Academic Pulishers, ISBN 0-7923-8130-0, (2002)
- [67] David M. Howard, Jamie A. S. Angus: *Acoustics and Psychoacoustics*, Elsevier, ISBN-13: 978-0-24-051995-1, (2006)
- [68] P. Filippi, D. Habault, J. P. Lefebvre, A. Bergassoli: *Acoustics, Basic physics, theorie and methods*, Academic Press, ISBN 0-12-256190-2, (1999)
- [69] Julian FV Vincent: *Structure of wood*, *Current Chemistry, Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 3, Issue 3, ISSN 1359-0286, pp. 228-231. (1998)
- [70] Bruno Clair, Tancrede Alméras, Hiroyuki Yamamoto, Takashi Okuyama, Junji Sugiyama: *Mechanical Behavior of Cellulose Microfibrils in Tension Wood, in Relation with Maturation Stress Generation*, *Biophysical Journal* Volume 91 August 2006. pp. 1128–1135 (2006)
- [71] Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders: *Fundamentals of Acoustics*, Fourth Edition, John Wiley & Sons Inc. ISBN 0-471-84789-5, (2000)
- [72] Frank Fahy: *Foundations of Engineering Acoustics*, Elsevier Ltd. ISBN 0-12-247665-4, (2001)
- [73] Marshall Long: *Architectural Acoustics*, Elsevier, ISBN 13: 978-0-12-455551-8, (2006)
- [74] Peter Damaske: *Acoustics and Hearing*, ISBN 978-3-540-78227-8, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2008)
- [75] Timoshenko S., Young D.H.: *Vibration problems in engineering*. 3<sup>rd</sup> edition, Van Nostrand, New York, (1954)
- [76] Perstorper, M.: *Dynamic modal tests of timber-evaluation according to Euler and Timoshenko theory*, Chalmers University of Technology, Division of Steel and Timber Structures, Göteborg, Sweden, ISSN 0534-0411, pp: Iib-1 — Iib-21, (1994)
- [77] Yingcheng Hu: *Nondestructive Testing of Mechanical Parameters for Wood-based Materials*, 17<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct. 2008, Shanghai, China, (2008)
-

- [78] F. Alton Everest: *Master Handbook of Acoustics*, Fourth Edition, The McGraw-Hill Companies, 9-78-007139974-6, ISBN 0-07-136097-2, (2001)
- [79] Michael Bruneau: *Fundamentals of Acoustics*, ISTE Ltd, ISBN-13: 978-1-905209-25-5, (2006)
- [80] David Havelock, Sonoko Kuwano, Michael Vorländer: *Handbook of Signal Processing in Acoustics*, Volume 1. Springer Science+Business Media, LLC, ISBN: 978-0-387-77698-9, (2008)
- [81] Szabvány: Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio for advanced ceramics by sonic resonance, ASTM C 1198-96.
- [82] Szabvány: Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio for advanced ceramics by impulse excitation of vibration, ASTM C 1259-98
- [83] M. Behzad, A. Ebrahimi, M. Heydari, M. Madhoushi, S. M. Hashemi: The use of longitudinal vibration technique to assess wood soft rot, pp. 1-16.
- [84] Thomas S. Huang Teuvo Kohonen Manfred R. Schroeder: *Psychoacoustics, Facts and Models*, ISBN-10 3-540-23159-5 Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1990-1999, (2007)
- [85] Faul, B.: TDK dolgozat: A fa tömörítettségének hatása a hajlító szilárdságra és a rugalmassági modulusra, Konzulensek: Szabó, I.; Kuzsella, L. Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar, (2005)
- [86] Klinger, R. – Perstorper, M., Johansson: Stiffness in structural timber - effect according to position in the stem. Proc. IUFRO S5.02 Timber Engineering Meeting, Laboratoire de Rheologie du Bois de Bordeaux, Bordeaux, France, (1992)
- [87] Czél György, Kollár Mariann: *Anyagvizsgálati praktikum*, Sunplant Kft. ISBN 978-963-06-4216-3, (2008)
- [88] Szabvány: MSZ EN 310: Fa alapanyagú lemezek. A hajlítoszilárdság és a hajlítási rugalmassági tényező meghatározása. (1999)
- [89] Ian Smith, Eris Landis, Meng Gong: *Fracture and fatigue in wood*, John Wiley and Sons Ltd. ISBN 0-471-48708-2, (2003)  
<http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471487082.html>
- [90] Côté WA, Hanna RB: Ultrastructural characteristics of wood fracture surface, *Wood and Fiber Science* 15(2): 135-163, (1983)
- [91] Kosei Ando, Yoshihiko Hirashima, Mina Sugihara, Sakiko Hirao, Yasutshi Sasaki: Microscopic processes of shearing fracture of old wood, examined using the acoustic emission technique, *Journal of Wood Sciences*, 52: 483-489, The Japan Wood Research Society, (2006)
- [92] G. Kifetew, F. Thuvander, L. Berglund, H. Lindberg: The effect of drying on wood fracture surfaces from specimens loaded in wet condition, *Wood Science and Technology*. 32, 83-94. Springer-Verlag, (1998)
- [93] P. M. Jelf, N. A. Fleck: Compressive Failure Mechanism in Unidirectional Composites, *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, 2706-2726 pp. 1-20 (1992)
- [94] MSZ 6786-7:1977: Faanyagvizsgálatok. Faanyagok ütéshajlítoszilárdságának meghatározása.
- [95] Tisza Miklós: *Anyagvizsgálat*, Miskolci Egyetemi Kiadó, ISBN 963 661 452 0, (2008)
- [96] Marosné Berkes Mária, Kaulics Nikoletta, Lenkeyné Bíró Gyöngyvér, Arató Péter: SiAlON kerámiák mechanikai viselkedésének jellemzése műszerezett ütővizsgálattal, *Anyagvizsgálók Lapja* 2004/4

- 
- [97] M. S. Vinod, Sunil B. J, Vinay Nayaka, Raghavendra Shenoy, M. S. Murali, A. Nafidi: Fractography of compression failed carbon fiber reinforced plastic composite laminates, *Journal of Mechanical Engineering Research* Vol. 2 (1), pp. 001-009, February (2010)
- [98] M. Vural, G. Ravichandran: Dynamic response and energy dissipation characteristics of balsa wood: experiment and analysis, *International Journal of Solids and Structures* 40 (2003) pp. 2147–2170, (2003)
- [99] Ferenc Divós, Toshinari Tanaka: Relation Between Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Wood, *Acta Silv. Lign. Hung.*, Vol. 1, 105-110, (2005)
- [100] M. Vural, G. Ravichandran: Microstructural aspects and modeling of failure in naturally occurring porous composites, *Mechanics of Materials*, Vol. 35, Issues 3-6, March-June, pp. 523-536, (2003)
- [101] V. S. Slaughter, N. A. Fleck: Viscoelastic Mikrobukling of Fibre Composites, *Transactions of the ASME, Dez.* Vol. 60. pp. 802-806, (1993)
- [102] Bucur, V.: *Nondestructive Characterization and imaging of Wood*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-43840-8, (2003)
- [103] P. Trtik, J. Dual, D. Keunecke, D. Mannes, P. Niemz, P. Stähli, A. Kaestner, A. Groso, M. Stampanoni: 3D imaging of microstructure of spruce wood, *Journal of Structural Biology* 159, pp. 46–55, (2007)



## M 1. Előkísérletek

Azoknak a tömörítéseknek a rövid képes bemutatása, melyeknél jelen voltam.

### M 1.1. Első tömörítés. 2005. 12. 28.

Számomra ekkor nem a tömörítés volt a fontos, hanem, hogy megtanuljam kezelni és programozni a tömörítő berendezés szabályozó PLC-jét, a berendezés szabályozó rendszerének dán kidolgozójától.

Bükk faanyagot tömörítettünk.

A tömörített mintadarabok mérete  $40 \times 80 \times 1000$  mm volt.



A tömörítő berendezés és az egyik dán konstruktöre (bal oldalt)

### M 1.2. Második tömörítés. 2006. 05. 05.

Bükk és tölgy faanyagot tömörítettünk, 5, 10, 15, és 20% mértékben.

A tömörített mintadarabok mérete  $40 \times 80 \times 1000$  mm volt.



Tömörítés 2006. májusában

Közvetlenül a tömörítés után, egy Buda melletti asztalosműhelyben fel is darabolták nekünk  $10 \times 10$ -es mintadarabokra.

A feldarabolt és becsomagolt mintadarabok a Miskolci Egyetemen C/2-es épület, 4-hajó, déli tömb, műhelycsarnok folyosóján a következő ábrán láthatók.



A második tömörítés feldarabolt bükk mintadarabjai

### M 1.3. Harmadik tömörítés 2007. 07. 28.

Ennek a tömörítésnek a mintadarabjait vizsgálták Sándor Balázs és Tóth István diplomamunkájuk készítése során.

Sajnos a tömörítésről nem készültek felvételek.

Bükk és tölgy faanyagot tömörítettünk, 5, 10, 15% mértékben.

A tömörített mintadarabok mérete 40×80×1000 mm volt.



A 3. tömörítés mintadarabjai az ultrahangos vizsgálat után, jól láthatók a 10 mm-es beosztások a hossz tengely mentén (az ábra Sándor Balázs diplomavédéséből való)

Ezen tömörítés mintadarabjain tudtam először kimérni, hogy a tömörítés a hossz tengely mentén nem egyenletes.

### M 1.4. Negyedik tömörítés 2008. 06. 04.

Kétféle faanyagot tömörítettem, bükköt és akácot.

#### M 1.4.1. Bükk tömörítése

Tömörítés mértéke 5, 10, 15 és 20%.

A tömörített mintadarabok mérete 40×40×1300 mm volt.



4/1. 5% Tömörítés előtt



4/2. 10% Tömörítés után



4/3. 15% Tömörítés előtt



4/4. 20% Tömörítés után



A befóliázott négyféle tömörített bükkfaanyag és a tömörítetlen (bal szélén)

A fóliába becsomagolt faanyagot 2009. 02. 03-án csomagoltam ki.



A kicsomagolás után a mintadarabok elejét egy vonalba hozva



A mintadarabok végeinél jól látható a maradó alakváltozás

### M 1.4.2. Akác tömörítése

Az első próbálkozás akác tömörítésére. Frissen kivágott akácfaanyagot tömörítettünk, melyet az NyME, Faipari Mérnöki Karáról kaptunk.

Tömörítés mértéke 15%.

A tömörített mintadarabok mérete 60×80×1300 mm volt.

3/1 - 3/2

COMPIWOOD TÖMÖRÍTÉSI KÍSÉRŐLAP

Rendelési szám:	Dátum:	Oldal:	1
Név:	Készítő:	Időóra:	BE 10 1,530

FAFAJTA: 4/130		BEÁLLÍTÁSOK		MÉGHJÓZÁS:	
Szélesség (mm): 60	Íróbélés (mm): 1,5	Tömörítés fok(%):	15		
Magasság (mm): 80	Felső nyomaték (bar): 110	Tömörítési hossz (mm):			
Hosszúság (mm): 1,300	Olajnyomás (bar): 110	Nyomaték (bar):			
Nedvesség tart(%):	Tömörítési seb. (mm/min): 1,50				

Tömörítés utáni méretváltozások:	1	2	3	4	5
	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15

Tömörítés utáni eredmények:	Hossz tömörítés előtti (mm):	
	Hossz tömörítés utáni (mm):	
Megjegyzések:	Tömörítési fok(%):	
	Tömörítési hossz (mm):	

Compiwood Products Kft. 1078 Budapest, Hernád u.40.II./21. Tel.: 06 1 351-9670, Mobil: 06 209 720-752

Tömörítési kísérőlap



Tömörítés után

Nem sikerült tömörítés. Túl nedves volt még a faanyag, a gyors, digitális műszer alapján 32% nedvességtartalmú.

### M 1.5. 5. tömörítés. 2008. 06. 19. akác, nyár

#### M 1.5.1. Akác tömörítése

Tömörítés mértéke 7,5; 11,25 és 15%.

A tömörített mintadarabok mérete 60×80×1300 mm volt.



5/1. akác 7,5% Tömörítés után



5/2. akác 11,25% Tömörítés után



5/3. akác 15% Tömörítés után

Az akác mostani mindhárom tömörítése tökéletesen sikerült. A nedvességtartalom most 20-25% között változott.

### **M 1.5.2. Nyár tömörítése**

Tömörítés mértéke 7,5; 11 és 15%.

A tömörített mintadarabok mérete 60×80×1300 mm volt.



5/4. nyár 7,5% Tömörítés után



5/5. nyár 11% Tömörítés után



5/6. nyár 15% Tömörítés után

A nyár tömörítése nem sikerült. Még a legkisebb, 5%-os tömörítés esetén is jól láthatóan gyűrődött az anyag. A továbbiakban nem próbálkozunk nyár faanyag tömörítésével.

### **M 1.6. 6. tömörítés. 2009. 08. 07.**

Ezt a tömörítést a disszertáció alapjául szolgáló mintadarabok előállításáért végeztem. Az összes addigi tapasztalatomat felhasználtam már a mintadarabok méreteinek meghatározásánál és előkészítésénél egyaránt.

A méreteket úgy határoztam meg, hogy a rezonanciavizsgálatok is elvégezhetők legyenek a mintadarabokon.

A tömörített mintadarabok mérete 40×120×1000 mm volt.



A tömörítés előtt álló felmáglyázott faanyag



Méretre vágás tömörítés előtt

Tömörítés mértéke 5; 8, 10; 15 és 23%.

Az előzetes tömörítések alapján megfigyelhető volt, hogy az 5% tömörítés nem változtatta meg a tulajdonságokat. Ezért az 5 és 10%-os tömörítés közé iktattam egy 8%-os tömörítést is, hogy egy köztes szintnél is ellenőrizhető legyen a tömörítés hatása a mechanikai tulajdonságokra.



5/1. Tömörítés mértéke 5%



5/2. Tömörítés mértéke 8%



5/3. Tömörítés mértéke 10%



5/4. Tömörítés mértéke 15%



5/5. Tömörítés mértéke 23%



5/6. Tömörítés mértéke 23%



A szabályozó PLC-n a tömörítési paraméterek beállítása

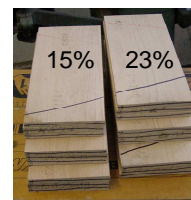
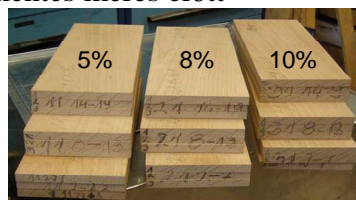


A faanyagok becsomagolva itthon





Mintadarabok roncsolásmentes mérés előtt



Mintadarabok rétegekre vágva

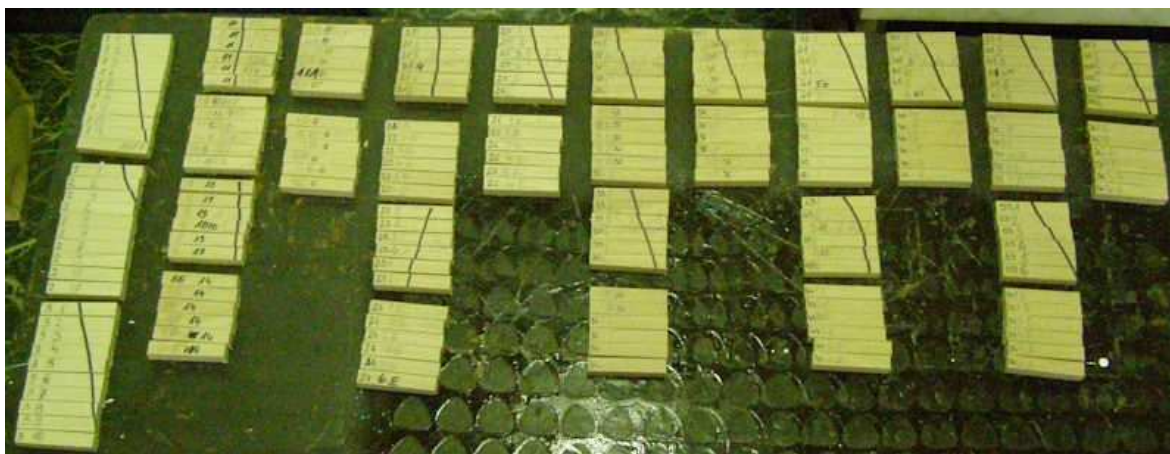


Mintadarabok pálcákra vágva hajlításhoz

Mintadarabok felvágása a Tanszéki műhelyben Márkus Zoltán segítségével



Pálcára vágott mintadarabok hajlító vizsgálat előtt (930 db)



Mintadarabok ütő-hajlító vizsgálat előtt (180 db)



Mintadarabok a roncsolásos vizsgálatok után

---

## M 2. Vizsgálati eredmények

Vizsgálatok kiértékelése során használt statisztikai mérőszámok

- Átlag := a mért eredmények számtani középértéke  
Szórás (S) := szórás, átlagos négyzetes eltérés, mértékegysége a jellemzett mennyiség egységével megegyezik  
Vált. (V) := változékonysági együttható, relatív szórás, %  
Hiba (P) := hiba, a 0,95 valószínűségnek megfelelő pontossági mutató, relatív átlaghiba, %

A következő öt táblázatban a tömörített mintadarabok (tömörítésenként két rúd) tömörítés utáni méreteik, maradó alakváltozásuk, keresztmetszetük, és ezek statisztikai kiértékelése található a hossz tengely mentén, húsz helyen mérve (50 mm-enként).

	Rúd	Szakasz sorszáma	Hossz töm. után, mm	Maradó a.v., %	Szélesség, mm	Vastagság, mm	Kereszt-metszet, mm <sup>2</sup>	
		Tömörítés mértéke 5%	1. rúd	1	49,80	0,40	116,26	38,90
2	49,66			0,68	116,30	38,75	4506,63	
3	49,83			0,34	116,54	38,87	4529,91	
4	49,81			0,38	116,75	39,06	4560,26	
5	49,38			1,24	117,04	39,16	4583,29	
6	49,99			0,02	117,39	39,20	4601,69	
7	49,26			1,48	117,32	39,28	4608,33	
8	49,80			0,40	117,52	39,32	4620,89	
9	49,71			0,58	117,41	39,48	4635,35	
10	50,00			0,00	117,43	39,54	4643,18	
11	49,13			1,74	117,47	39,59	4650,64	
12	49,74			0,52	117,30	39,67	4653,29	
13	49,87			0,26	117,11	39,77	4657,46	
14	49,33			1,34	117,35	39,73	4662,32	
15	50,00			0,00	116,87	39,82	4653,76	
16	49,59			0,82	116,84	39,78	4647,90	
17	49,88			0,24	117,10	39,70	4648,87	
18	49,88			0,24	116,54	39,72	4628,97	
19	49,70			0,60	116,41	39,80	4633,12	
20	49,48			1,04	116,04	39,66	4602,15	
	<b>Átlag</b>		<b>49,70</b>	<b>0,59</b>	<b>117,00</b>	<b>39,43</b>	<b>4613,07</b>	
	Szórás, %		0,26	0,51	0,42	0,35	49,42	
	Vált., %		0,52	86,25	0,36	0,89	1,07	
	Hiba, %		0,23	38,57	0,16	0,40	0,48	
	2. rúd		1	49,70	0,60	117,77	39,95	4704,91
			2	49,50	1,00	117,20	38,96	4566,11
		3	49,60	0,80	117,61	38,86	4570,32	
		4	49,79	0,42	117,80	38,83	4574,17	
		5	49,95	0,10	117,79	38,81	4571,43	
		6	49,94	0,11	118,43	38,92	4609,30	
		7	49,58	0,84	118,15	38,93	4599,58	
		8	49,93	0,14	117,84	39,02	4598,12	
		9	49,70	0,60	118,04	39,02	4605,92	
		10	49,62	0,76	117,72	39,07	4599,32	
		11	49,63	0,74	117,60	39,06	4593,46	
		12	49,93	0,14	117,41	39,12	4593,08	
		13	49,69	0,62	117,38	39,15	4595,43	
		14	49,79	0,41	117,15	39,24	4596,97	
		15	49,32	1,37	117,06	39,37	4608,65	
		16	49,95	0,10	116,97	39,44	4613,30	
		17	49,96	0,07	116,85	39,59	4626,09	
		18	49,57	0,87	116,46	39,70	4623,46	
		19	49,90	0,20	116,25	39,66	4610,48	
		20	50,00	0,00	116,08	39,66	4603,73	
	<b>Átlag</b>	<b>47,26</b>	<b>2,42</b>	<b>111,58</b>	<b>37,25</b>	<b>4373,03</b>		
	Szórás, %	11,07	8,52	26,23	8,68	1029,60		
	Vált., %	23,43	351,47	23,51	23,30	23,54		
	Hiba, %	10,48	157,18	10,51	10,42	10,53		
	Össz.	<b>Átlag</b>	<b>49,72</b>	<b>0,56</b>	<b>117,16</b>	<b>39,33</b>	<b>4607,86</b>	
		<b>Szórás, %</b>	<b>0,22</b>	<b>0,45</b>	<b>0,59</b>	<b>0,36</b>	<b>39,59</b>	
		<b>Vált., %</b>	<b>0,45</b>	<b>80,65</b>	<b>0,50</b>	<b>0,91</b>	<b>0,86</b>	
		<b>Hiba, %</b>	<b>0,14</b>	<b>25,51</b>	<b>0,16</b>	<b>0,29</b>	<b>0,27</b>	

	Rúd	Szakasz sorszáma	Hossz töm. után, mm	Maradó a.v., %	Szélesség, mm	Vastagság, mm	Kereszt-metszet, mm <sup>2</sup>
		Tömörítés mértéke 8%	1. rúd	1	50,00	0,00	115,54
2	48,75			2,50	116,07	39,93	4634,68
3	48,97			2,06	116,64	40,17	4685,43
4	48,71			2,58	117,15	40,23	4712,94
5	49,21			1,58	117,49	40,17	4719,57
6	48,75			2,50	117,74	40,05	4715,49
7	48,70			2,60	117,97	40,20	4742,39
8	48,70			2,61	118,17	40,10	4738,62
9	48,96			2,08	118,18	40,07	4735,47
10	49,12			1,77	118,10	40,08	4733,45
11	49,06			1,88	117,87	39,96	4710,09
12	48,97			2,06	117,75	40,10	4721,78
13	48,97			2,06	117,44	40,04	4702,30
14	48,97			2,06	117,39	40,16	4714,38
15	49,18			1,64	117,17	40,29	4720,78
16	49,20			1,60	116,96	40,24	4706,47
17	49,22			1,57	116,95	40,26	4708,41
18	48,91			2,19	116,79	40,28	4704,30
19	49,02			1,96	116,82	40,33	4711,35
20	49,87			0,26	116,81	40,48	4728,47
<b>Átlag</b>	<b>49,06</b>		<b>1,88</b>	<b>117,25</b>	<b>40,15</b>	<b>4708,05</b>	
Szórás, %	0,35		0,69	0,70	0,14	31,80	
Vált., %	0,70		36,80	0,60	0,35	0,68	
Hiba, %	0,31		16,46	0,27	0,16	0,30	
2. rúd	1		49,9	0,2	116,25	40,35	4690,6875
	2	48,85	2,30	116,19	40,40	4694,08	
	3	48,98	2,04	116,70	40,30	4703,01	
	4	49,19	1,62	117,02	40,30	4715,91	
	5	49,25	1,50	117,38	40,21	4719,85	
	6	48,65	2,70	117,71	40,20	4731,94	
	7	48,57	2,87	118,07	40,25	4752,32	
	8	48,61	2,78	118,18	40,32	4765,02	
	9	49,20	1,60	118,22	40,28	4761,90	
	10	48,96	2,09	118,36	40,30	4769,91	
	11	48,87	2,26	118,16	40,37	4770,12	
	12	48,85	2,30	118,06	40,25	4751,92	
	13	49,18	1,64	117,65	40,31	4742,47	
	14	49,13	1,75	117,50	40,32	4737,60	
	15	49,07	1,86	117,33	40,21	4717,84	
	16	49,45	1,11	117,22	40,23	4715,76	
	17	49,55	0,90	117,17	40,30	4721,95	
	18	49,05	1,90	116,78	40,18	4692,22	
	19	49,49	1,02	116,58	40,11	4676,02	
	20	49,87	0,26	116,29	40,01	4652,76	
<b>Átlag</b>	<b>49,13</b>	<b>1,73</b>	<b>117,34</b>	<b>40,26</b>	<b>4724,16</b>		
Szórás, %	0,38	0,75	0,71	0,09	32,89		
Vált., %	0,76	43,27	0,60	0,23	0,70		
Hiba, %	0,34	19,35	0,27	0,10	0,31		
Össz.	<b>Átlag</b>	<b>49,10</b>	<b>1,81</b>	<b>117,30</b>	<b>40,21</b>	<b>4716,11</b>	
	<b>Szórás, %</b>	<b>0,36</b>	<b>0,72</b>	<b>0,70</b>	<b>0,13</b>	<b>32,96</b>	
	<b>Vált., %</b>	<b>0,73</b>	<b>39,63</b>	<b>0,60</b>	<b>0,32</b>	<b>0,70</b>	
	<b>Hiba, %</b>	<b>0,23</b>	<b>12,53</b>	<b>0,19</b>	<b>0,10</b>	<b>0,22</b>	

	Rúd	Szakasz sorszáma	Hossz töm. után, mm	Maradó a.v., %	Szélesség, mm	Vastagság, mm	Kereszt-metszet, mm <sup>2</sup>
		Tömörítés mértéke 10%	1. rúd	1	49,51	0,98	116,91
2	48,44			3,12	116,36	40,30	4689,31
3	48,50			3,00	116,88	40,27	4706,76
4	48,20			3,60	117,24	40,28	4722,43
5	48,48			3,04	117,85	40,30	4749,36
6	48,42			3,16	118,06	40,30	4757,82
7	48,39			3,22	118,25	40,29	4764,29
8	48,48			3,04	118,26	40,36	4772,97
9	48,63			2,75	118,21	40,27	4760,32
10	48,68			2,64	118,14	40,30	4761,04
11	48,75			2,51	118,03	40,27	4753,07
12	48,80			2,40	117,79	40,30	4746,94
13	48,90			2,21	117,66	40,32	4744,05
14	48,79			2,42	117,48	40,32	4736,79
15	48,66			2,68	117,13	40,29	4719,17
16	49,02			1,97	116,88	40,22	4700,91
17	49,03			1,94	116,63	40,36	4707,19
18	48,81			2,38	116,77	40,41	4718,68
19	48,61			2,78	116,78	40,51	4730,76
20	50,00			0,00	116,87	40,56	4740,25
	<b>Átlag</b>		<b>48,75</b>	<b>2,49</b>	<b>117,41</b>	<b>40,33</b>	<b>4734,91</b>
	Szórás, %		0,41	0,82	0,63	0,08	23,84
	Vált., %		0,84	32,99	0,54	0,20	0,50
	Hiba, %		0,38	14,75	0,24	0,09	0,23
	2. rúd		1	49,9	0,2	116,75	40,05
		2	48,25	3,50	117,33	40,26	4723,71
		3	48,84	2,32	117,63	40,36	4747,55
		4	48,48	3,04	117,65	40,47	4761,30
		5	48,79	2,42	117,80	40,32	4749,70
		6	48,45	3,10	117,71	40,37	4751,95
		7	48,48	3,04	117,93	40,35	4758,48
		8	48,52	2,97	117,65	40,32	4743,65
		9	48,58	2,84	117,66	40,32	4744,05
		10	48,63	2,75	117,71	40,29	4742,54
		11	48,65	2,71	117,72	40,49	4766,48
		12	48,75	2,49	117,62	40,27	4736,56
		13	48,97	2,06	117,44	40,26	4728,13
		14	48,87	2,27	117,32	40,28	4725,65
		15	48,87	2,27	117,33	40,29	4727,23
		16	48,93	2,14	117,13	40,21	4709,80
		17	49,03	1,94	117,09	40,25	4712,87
		18	48,87	2,27	117,13	40,19	4707,45
		19	48,88	2,25	116,61	40,08	4673,73
		20	49,00	2,00	116,75	39,84	4651,32
	<b>Átlag</b>	<b>48,79</b>	<b>2,43</b>	<b>117,40</b>	<b>40,26</b>	<b>4726,90</b>	
	Szórás, %	0,34	0,68	0,38	0,15	31,00	
	Vált., %	0,69	27,90	0,32	0,36	0,66	
	Hiba, %	0,31	12,48	0,15	0,16	0,29	
	Össz.	<b>Átlag</b>	<b>48,77</b>	<b>2,46</b>	<b>117,40</b>	<b>40,30</b>	<b>4730,91</b>
		<b>Szórás, %</b>	<b>0,37</b>	<b>0,74</b>	<b>0,51</b>	<b>0,12</b>	<b>27,60</b>
		<b>Vált., %</b>	<b>0,76</b>	<b>30,25</b>	<b>0,44</b>	<b>0,30</b>	<b>0,58</b>
		<b>Hiba, %</b>	<b>0,24</b>	<b>9,57</b>	<b>0,14</b>	<b>0,09</b>	<b>0,18</b>

	Rúd	Szakasz sorszáma	Hossz töm. után, mm	Maradó a.v., %	Szélesség, mm	Vastagság, mm	Kereszt-metszet, mm <sup>2</sup>
		Tömörítés mértéke 15%	1. rúd	1	48,86	2,28	117,33
2	47,02			5,96	117,04	40,48	4737,78
3	47,42			5,16	117,43	40,54	4760,61
4	47,27			5,46	118,00	40,56	4786,08
5	47,85			4,30	118,42	40,47	4792,46
6	47,49			5,02	118,34	40,46	4788,04
7	47,63			4,75	118,52	40,43	4791,76
8	47,64			4,72	118,62	40,55	4810,04
9	47,63			4,74	118,63	40,57	4812,82
10	47,52			4,96	118,74	40,59	4819,66
11	47,58			4,84	118,78	40,76	4841,47
12	48,04			3,92	118,94	40,56	4824,21
13	48,05			3,90	119,02	40,56	4827,45
14	48,06			3,88	118,99	40,60	4830,99
15	47,92			4,16	118,86	40,60	4825,72
16	48,58			2,84	118,65	40,61	4818,38
17	48,58			2,84	118,38	40,79	4828,72
18	48,50			3,00	117,75	40,61	4781,83
19	48,66			2,68	117,22	40,60	4759,13
20	49,05			1,90	117,05	40,56	4747,55
<b>Átlag</b>	<b>47,97</b>			<b>4,07</b>	<b>118,24</b>	<b>40,57</b>	<b>4797,24</b>
Szórás, %	0,57		1,14	0,68	0,09	31,27	
Vált., %	1,18		27,92	0,58	0,21	0,65	
Hiba, %	0,53		12,49	0,26	0,10	0,29	
2. rúd	1		48,125	3,75	118,22	40,98	4844,6556
	2	46,80	6,40	118,78	40,66	4829,59	
	3	47,00	6,00	118,40	40,60	4807,04	
	4	48,30	3,40	118,86	40,54	4818,58	
	5	48,07	3,86	119,10	40,48	4821,17	
	6	47,90	4,20	119,55	40,46	4836,99	
	7	47,58	4,84	119,61	40,49	4843,01	
	8	48,10	3,80	119,44	40,55	4843,29	
	9	47,48	5,04	119,89	40,55	4861,54	
	10	48,03	3,94	120,23	40,57	4877,73	
	11	48,08	3,84	119,36	40,57	4842,44	
	12	48,03	3,94	118,84	40,53	4816,59	
	13	47,71	4,58	118,60	40,55	4809,23	
	14	48,69	2,62	118,77	40,41	4799,50	
	15	48,34	3,32	118,25	40,44	4782,03	
	16	48,43	3,14	117,66	40,46	4760,52	
	17	48,90	2,20	117,61	40,36	4746,74	
	18	49,20	1,60	117,21	40,35	4729,42	
	19	47,90	4,20	116,57	40,28	4695,44	
	20	48,85	2,31	117,26	40,22	4716,20	
	<b>Átlag</b>	<b>48,08</b>	<b>3,85</b>	<b>118,61</b>	<b>40,50</b>	<b>4804,09</b>	
Szórás, %	0,60	1,19	0,97	0,16	50,32		
Vált., %	1,24	30,96	0,82	0,39	1,05		
Hiba, %	0,55	13,85	0,37	0,17	0,47		
Össz.	<b>Átlag</b>	<b>48,02</b>	<b>3,96</b>	<b>118,42</b>	<b>40,54</b>	<b>4800,66</b>	
	<b>Szórás, %</b>	<b>0,58</b>	<b>1,15</b>	<b>0,85</b>	<b>0,13</b>	<b>41,50</b>	
	<b>Vált., %</b>	<b>1,20</b>	<b>29,16</b>	<b>0,72</b>	<b>0,32</b>	<b>0,86</b>	
	<b>Hiba, %</b>	<b>0,38</b>	<b>9,22</b>	<b>0,23</b>	<b>0,10</b>	<b>0,27</b>	

	Rúd	Szakasz sorszáma	Hossz töm. után, mm	Maradó a.v., %	Szélesség, mm	Vastagság, mm	Kereszt-metszet, mm <sup>2</sup>
		Tömörítés mértéke 23%	1. rúd	1	47,12	5,77	118,50
2	46,74			6,53	118,17	41,16	4863,88
3	46,01			7,98	118,66	41,26	4895,91
4	45,76			8,48	119,19	41,40	4934,47
5	47,67			4,67	119,44	41,46	4951,98
6	47,36			5,28	119,67	41,42	4956,73
7	47,56			4,89	119,81	41,52	4974,51
8	47,52			4,97	119,91	41,58	4985,86
9	47,43			5,14	119,96	41,48	4975,94
10	47,35			5,31	120,07	41,12	4937,28
11	47,48			5,05	120,14	41,19	4948,57
12	47,35			5,31	119,74	41,01	4910,54
13	47,30			5,41	119,67	40,97	4902,88
14	46,76			6,48	119,57	40,57	4850,95
15	46,80			6,40	119,33	41,07	4900,88
16	46,08			7,85	119,09	40,59	4833,86
17	47,51			4,99	118,86	40,55	4819,77
18	47,71			4,59	118,56	40,72	4827,76
19	47,30			5,41	118,64	40,81	4841,70
20	46,65			6,71	118,74	41,29	4902,77
	<b>Átlag</b>		<b>47,07</b>	<b>5,86</b>	<b>119,29</b>	<b>41,11</b>	<b>4903,56</b>
	Szórás, %		0,58	1,15	0,60	0,33	53,61
	Vált., %		1,22	19,66	0,50	0,80	1,09
	Hiba, %		0,55	8,79	0,22	0,36	0,49
	2. rúd		1	47,125	5,75	119,4	40,82
		2	46,81	6,38	118,76	40,91	4858,47
		3	46,24	7,53	118,97	41,37	4921,79
		4	47,32	5,37	119,14	40,88	4870,44
		5	46,70	6,60	119,04	40,79	4855,64
		6	47,42	5,17	119,37	40,80	4870,30
		7	47,24	5,53	119,37	40,95	4888,20
		8	47,16	5,68	119,35	40,81	4870,67
		9	47,33	5,35	119,33	40,96	4887,76
		10	47,25	5,51	119,38	40,78	4868,32
		11	47,90	4,20	119,34	40,78	4866,69
		12	47,51	4,98	119,19	40,90	4874,87
		13	47,57	4,86	118,89	40,90	4862,60
		14	46,96	6,08	119,26	40,87	4874,16
		15	47,07	5,86	118,80	40,86	4854,17
		16	46,65	6,70	118,60	40,93	4854,30
		17	47,36	5,29	118,56	40,79	4836,06
		18	47,33	5,35	118,22	40,75	4817,47
		19	47,34	5,32	117,76	40,53	4772,81
		20	46,78	6,44	118,27	40,53	4793,48
	<b>Átlag</b>	<b>47,15</b>	<b>5,70</b>	<b>118,95</b>	<b>40,85</b>	<b>4858,61</b>	
	Szórás, %	0,38	0,75	0,47	0,17	33,17	
	Vált., %	0,80	13,25	0,39	0,41	0,68	
	Hiba, %	0,36	5,93	0,18	0,19	0,31	
	Össz.	<b>Átlag</b>	<b>47,11</b>	<b>5,78</b>	<b>119,12</b>	<b>40,98</b>	<b>4881,08</b>
		<b>Szórás, %</b>	<b>0,48</b>	<b>0,96</b>	<b>0,56</b>	<b>0,29</b>	<b>49,54</b>
		<b>Vált., %</b>	<b>1,02</b>	<b>16,70</b>	<b>0,47</b>	<b>0,71</b>	<b>1,01</b>
		<b>Hiba, %</b>	<b>0,32</b>	<b>5,28</b>	<b>0,15</b>	<b>0,22</b>	<b>0,32</b>



## Rostirányú ultrahangos vizsgálatok eredményei

Tömörítés mértéke	Szakasz	v, m/s	E <sub>du</sub> , GPa	Átlag	Szórás	Vált., %	Hiba, %
0%	1	5250,08	19,059	<b>19,29</b>	0,575	2,98	2,43
	2	5250,08	19,059				
	3	5440,50	20,466				
	4	5250,08	19,059				
	5	5250,08	19,059				
	6	5250,08	19,059				
5%	1	4883,71	16,374	<b>16,72</b>	1,396	8,35	6,82
	2	5026,21	17,373				
	3	4890,58	16,553				
	4	4865,40	16,379				
	5	5212,28	18,941				
	6	4588,74	14,688				
8%	1	3641,63	8,997	<b>9,72</b>	0,752	7,74	6,32
	2	3647,35	9,108				
	3	3695,79	9,358				
	4	3797,17	9,898				
	5	3806,21	9,924				
	6	4007,84	11,034				
10%	1	3246,25	7,359	<b>8,86</b>	1,466	16,55	13,51
	2	3249,39	7,430				
	3	3494,95	8,080				
	4	3687,46	9,419				
	5	3735,11	9,875				
	6	3935,45	10,980				
15%	1	2794,35	5,402	<b>6,70</b>	1,256	18,75	15,31
	2	2905,03	5,895				
	3	2992,69	6,271				
	4	3075,59	6,625				
	5	3162,34	7,002				
	6	3579,69	8,997				
23%	1	2420,87	4,043	<b>4,35</b>	0,269	6,17	5,04
	2	2407,92	4,051				
	3	2531,27	4,539				
	4	2550,84	4,685				
	5	2440,62	4,294				
	6	2490,78	4,512				

### Sugár-, és húrirányú ultrahangos vizsgálatok eredményei

1-  $(E_{dUR} / E_{dUT}) \cdot 100\%$ : A sugár-, és húrirányú rugalmassági modulus közötti százalékos eltérés.

Az értékek 25 ... 33% között vannak, ami megegyezik az irodalomban található értékkel.

Tömörítés mértéke	Szakasz sorszáma	$E_{dUR}$ , GPa	$E_{dUT}$ , GPa	1- $(E_{dUR} / E_{dUT})$ , %
0%	1	1,698	1,005	40,826
	2	1,702	1,026	39,699
	3	1,456	1,048	28,018
	4	1,699	1,026	39,597
	5	1,570	1,048	33,228
	6	1,694	1,025	39,494
	7	1,577	1,047	33,591
	8	1,573	1,046	33,524
	9	1,575	1,046	33,591
	10	1,573	1,046	33,535
	11	1,455	1,025	29,546
	12	1,457	1,024	29,726
	13	1,463	1,024	30,036
	14	1,457	1,027	29,557
	15	1,455	1,001	31,203
	16	1,457	1,044	28,374
	17	1,562	0,997	36,174
	18	1,449	1,023	29,439
	19	1,452	0,998	31,240
	20	1,356	0,979	27,824
	<b>Átlag</b>	<b>1,53</b>	<b>1,03</b>	<b>32,91</b>
	<b>Szórás, %</b>	0,10	0,02	4,22
	<b>Vált., %</b>	6,75	1,98	12,82
	<b>Hiba, %</b>	2,74	0,75	5,06

Tömörítés mértéke	Szakasz sorszáma	$E_{dUR}$ , GPa	$E_{dUT}$ , GPa	$1 - (E_{dUR} / E_{dUT})$ , %
5%	1	1,425	1,073	24,712
	2	1,414	1,074	24,076
	3	1,534	1,078	29,741
	4	1,549	1,106	28,646
	5	1,447	1,138	21,363
	6	1,450	1,170	19,289
	7	1,456	1,118	23,166
	8	1,583	1,263	20,218
	9	1,596	1,260	21,011
	10	1,484	1,103	25,656
	11	1,383	1,179	14,785
	12	1,611	1,175	27,032
	13	1,501	1,172	21,960
	14	1,628	1,185	27,190
	15	1,919	1,288	32,914
	16	1,513	1,287	14,968
	17	1,508	1,181	21,698
	18	1,628	1,144	29,726
	19	1,635	1,167	28,604
	20	1,905	1,160	39,124
	<b>Átlag</b>	<b>1,56</b>	<b>1,17</b>	<b>24,79</b>
	<b>Szórás, %</b>	0,14	0,07	5,87
	<b>Vált., %</b>	9,18	5,72	23,69
	<b>Hiba, %</b>	2,79	2,38	7,59
8%	1	1,287	0,983	23,634
	2	1,600	1,080	32,514
	3	1,752	1,165	33,474
	4	1,506	1,230	18,328
	5	1,634	1,141	30,167
	6	1,757	1,146	34,771
	7	1,770	1,126	36,409
	8	1,511	1,106	26,804
	9	1,509	1,181	21,713
	10	1,628	1,180	27,539
	11	1,504	1,127	25,061
	12	1,633	1,175	28,039
	13	1,510	1,169	22,574
	14	1,409	1,115	20,857
	15	1,525	1,161	23,883
	16	1,319	1,132	14,203
	17	1,324	1,110	16,156
	18	1,325	1,017	23,284
	19	1,329	0,996	25,005
	20	1,338	0,996	25,573
	<b>Átlag</b>	<b>1,51</b>	<b>1,12</b>	<b>25,50</b>
	<b>Szórás, %</b>	0,16	0,07	5,96
	<b>Vált., %</b>	10,40	6,22	23,36
	<b>Hiba, %</b>	3,49	1,68	8,45

Tömörítés mértéke	Szakasz sorszáma	$E_{dUR}$ , GPa	$E_{dUT}$ , GPa	$1 - (E_{dUR} / E_{dUT})$ , %
10%	1	1,351	1,058	21,733
	2	1,678	1,117	33,416
	3	1,675	1,103	34,159
	4	1,676	1,212	27,700
	5	1,691	1,234	27,018
	6	1,568	1,296	17,342
	7	1,828	1,242	32,031
	8	1,804	1,279	29,105
	9	1,796	1,221	32,010
	10	1,663	1,276	23,248
	11	1,662	1,218	26,686
	12	1,543	1,213	21,376
	13	1,666	1,184	28,931
	14	1,702	1,233	27,547
	15	1,576	1,226	22,216
	16	1,832	1,194	34,838
	17	1,848	1,164	36,975
	18	1,588	1,071	32,553
	19	1,861	1,194	35,878
	20	1,488	1,073	27,876
	<b>Átlag</b>	<b>1,67</b>	<b>1,19</b>	<b>28,63</b>
	<b>Szórás, %</b>	0,13	0,07	5,43
	<b>Vált., %</b>	7,88	5,97	18,95
	<b>Hiba, %</b>	2,46	1,90	5,98
15%	1	1,185	0,881	25,687
	2	1,348	0,860	36,232
	3	1,560	0,935	40,038
	4	1,045	0,944	9,645
	5	1,271	0,999	21,376
	6	1,360	0,998	26,593
	7	1,566	1,065	32,023
	8	1,369	0,947	30,828
	9	1,281	1,026	19,875
	10	1,282	1,071	16,429
	11	1,293	1,050	18,770
	12	1,581	1,032	34,727
	13	1,704	1,054	38,135
	14	1,372	1,012	26,295
	15	1,583	1,030	34,943
	16	1,708	0,911	46,648
	17	1,728	0,910	47,358
	18	1,588	0,900	43,335
	19	1,712	0,875	48,888
	20	1,584	0,889	43,868
	<b>Átlag</b>	<b>1,46</b>	<b>0,97</b>	<b>32,08</b>
	<b>Szórás, %</b>	0,20	0,07	11,29
	<b>Vált., %</b>	13,68	7,36	35,18
	<b>Hiba, %</b>	4,20	1,85	11,26

Tömörítés mértéke	Szakasz sorszáma	$E_{dUR}$ , GPa	$E_{dUT}$ , GPa	$1 - (E_{dUR} / E_{dUT})$ , %
23%	1	1,588	1,030	35,183
	2	1,870	0,983	47,438
	3	1,879	1,054	43,910
	4	1,892	1,042	44,943
	5	1,647	1,128	31,528
	6	1,247	1,109	11,115
	7	1,253	1,111	11,336
	8	1,196	1,129	5,639
	9	1,190	1,179	0,979
	10	1,170	1,207	-3,154
	11	1,271	1,255	1,274
	12	1,183	1,194	-0,933
	13	1,934	1,273	34,169
	14	1,755	1,273	27,507
	15	2,111	1,187	43,778
	16	2,062	1,133	45,060
	17	2,076	1,163	43,991
	18	2,094	1,109	47,016
	19	1,938	1,088	43,861
	20	1,834	1,090	40,583
	<b>Átlag</b>	<b>1,66</b>	<b>1,14</b>	<b>27,76</b>
	<b>Szórás, %</b>	0,36	0,08	19,06
	<b>Vált., %</b>	21,68	7,05	68,65
	<b>Hiba, %</b>	5,34	1,67	15,79

## Hárompontos hajlítóvizsgálat eredményei

Tömörítetlen bükk hárompontos hajlítóvizsgálata során **harminc darab** mintadarabot vizsgáltam. A mérési eredmények statisztikai kiértékelése a következő táblázatban található.

Töm. m.	Szakasz		Modulus, GPa	R <sub>mh</sub> , MPa	Hajl.szil. alakv., %	Alakv. törésnél, %	Fajlagos törési energia, J·cm <sup>-2</sup>
0%	1	Átlag	11,67	107,83	2,06	3,22	2,62
		Szórás	0,32	5,56	0,19	0,30	0,27
		Vált., %	2,78	5,16	9,43	9,48	10,18
		Hiba, %	1,02	1,88	3,44	3,46	3,72

## 5%-os tömörítés

A vizsgálatok előtt az 1m-es mintadarabok, 6 db, közel 160 mm-es szakaszokra lett vágva. Az egyes szakaszok három rétegre lettek vágva, és rétegenként 10 db hajlító mintadarab lett kimunkálva. (A részletes szabásterv a disszertációban található.) A táblázatban szakaszonként közlöm az eredményeket, tehát **minden adat 30 mérés** eredményét tükrözi.

Töm. m.	Szakasz		Modulus, GPa	R <sub>mh</sub> , MPa	Hajl.szil. alakv., %	Alakv. törésnél, %	Fajlagos törési energia, J·cm <sup>-2</sup>
5%	1	<b>Átlag</b>	<b>10,06</b>	<b>106,57</b>	<b>3,19</b>	<b>5,63</b>	<b>4,44</b>
		Szórás	1,02	6,35	0,29	0,84	0,80
		Vált., %	10,18	5,95	9,13	14,86	18,05
		Hiba, %	3,72	2,17	3,33	5,43	6,59
	2	<b>Átlag</b>	<b>10,55</b>	<b>106,70</b>	<b>3,18</b>	<b>5,90</b>	<b>4,52</b>
		Szórás	0,88	6,15	0,32	0,82	0,84
		Vált., %	8,37	5,76	10,14	13,92	18,61
		Hiba, %	3,06	2,10	3,70	5,08	6,79
	3	<b>Átlag</b>	<b>10,36</b>	<b>106,48</b>	<b>3,27</b>	<b>5,94</b>	<b>4,56</b>
		Szórás	0,82	6,13	0,30	0,72	0,76
		Vált., %	7,93	5,76	9,05	12,08	16,76
		Hiba, %	2,90	2,10	3,30	4,41	6,12
	4	<b>Átlag</b>	<b>10,27</b>	<b>105,86</b>	<b>3,10</b>	<b>6,84</b>	<b>5,15</b>
		Szórás	0,44	3,95	0,32	1,01	0,83
		Vált., %	4,26	3,73	10,31	14,70	16,14
		Hiba, %	1,56	1,36	3,77	5,37	5,89
	5	<b>Átlag</b>	<b>10,62</b>	<b>107,70</b>	<b>3,22</b>	<b>6,42</b>	<b>4,88</b>
		Szórás	0,48	4,12	0,31	0,76	0,65
		Vált., %	4,56	3,82	9,78	11,78	13,26
		Hiba, %	1,66	1,40	3,57	4,30	4,84
	6	<b>Átlag</b>	<b>10,55</b>	<b>107,99</b>	<b>3,16</b>	<b>6,34</b>	<b>4,98</b>
		Szórás	0,39	3,31	0,24	0,61	0,57
		Vált., %	3,70	3,06	7,73	9,70	11,53
		Hiba, %	1,35	1,12	2,82	3,54	4,21
Össz.	<b>Átlag</b>	<b>10,40</b>	<b>106,88</b>	<b>3,19</b>	<b>6,18</b>	<b>4,89</b>	
	<b>Szórás</b>	<b>0,73</b>	<b>5,13</b>	<b>0,30</b>	<b>0,89</b>	<b>0,81</b>	
	<b>Vált., %</b>	<b>7,05</b>	<b>4,80</b>	<b>9,41</b>	<b>14,34</b>	<b>16,57</b>	
	<b>Hiba, %</b>	<b>1,05</b>	<b>0,72</b>	<b>1,40</b>	<b>2,14</b>	<b>2,47</b>	

## 8%-os tömörítés

Töm. m.	Szakasz		Modulus, GPa	R <sub>mh</sub> , MPa	Hajl.szil. alakv., %	Alakv. törésnél, %	Fajlagos törési energia, J·cm <sup>-2</sup>
8%	1	<b>Átlag</b>	<b>7,52</b>	<b>92,00</b>	<b>5,61</b>	<b>8,64</b>	<b>6,67</b>
		Szórás	0,44	4,88	0,36	0,67	0,48
		Vált., %	5,87	5,30	6,39	7,73	7,22
		Hiba, %	2,14	1,94	2,33	2,82	2,64
	2	<b>Átlag</b>	<b>7,54</b>	<b>93,30</b>	<b>5,49</b>	<b>7,58</b>	<b>6,24</b>
		Szórás	0,46	4,69	0,35	0,61	0,57
		Vált., %	6,14	5,03	6,35	8,00	9,11
		Hiba, %	2,24	1,84	2,32	2,92	3,33
	3	<b>Átlag</b>	<b>7,68</b>	<b>96,90</b>	<b>4,38</b>	<b>6,41</b>	<b>5,19</b>
		Szórás	0,33	5,96	0,41	0,61	0,66
		Vált., %	4,28	6,15	9,30	9,56	12,74
		Hiba, %	1,56	2,25	3,40	3,49	4,65
	4	<b>Átlag</b>	<b>7,96</b>	<b>97,90</b>	<b>3,75</b>	<b>5,52</b>	<b>4,45</b>
		Szórás	0,48	6,36	0,28	0,79	0,63
		Vált., %	6,08	6,49	7,48	14,37	14,15
		Hiba, %	2,22	2,37	2,73	5,25	5,17
	5	<b>Átlag</b>	<b>8,04</b>	<b>101,30</b>	<b>3,40</b>	<b>4,70</b>	<b>4,00</b>
		Szórás	0,57	7,87	0,27	0,59	0,51
		Vált., %	7,13	7,77	8,09	12,55	12,69
		Hiba, %	2,60	2,84	2,95	4,58	4,63
	6	<b>Átlag</b>	<b>8,61</b>	<b>103,60</b>	<b>2,56</b>	<b>3,62</b>	<b>3,24</b>
		Szórás	0,41	5,79	0,23	0,39	0,40
		Vált., %	4,76	5,59	8,93	10,81	12,41
		Hiba, %	1,74	2,04	3,26	3,95	4,53
	Össz.	<b>Átlag</b>	<b>7,89</b>	<b>97,50</b>	<b>4,20</b>	<b>6,08</b>	<b>5,14</b>
		<b>Szórás</b>	<b>0,59</b>	<b>7,21</b>	<b>1,14</b>	<b>1,80</b>	<b>1,38</b>
		<b>Vált., %</b>	<b>7,44</b>	<b>7,39</b>	<b>27,28</b>	<b>29,67</b>	<b>26,91</b>
		<b>Hiba, %</b>	<b>1,11</b>	<b>1,10</b>	<b>4,07</b>	<b>4,42</b>	<b>4,01</b>



## 10%-os tömörítés

Töm. m.	Szakasz		Modulus, GPa	R <sub>mh</sub> , MPa	Hajl.szil. alakv., %	Alakv. törésnél, %	Fajlagos törési energia, J·cm <sup>-2</sup>
10%	1	<b>Átlag</b>	<b>6,39</b>	<b>86,51</b>	<b>4,52</b>	<b>7,66</b>	<b>5,17</b>
		Szórás	0,60	4,69	0,30	1,26	0,77
		Vált., %	9,44	5,43	6,63	16,45	14,90
		Hiba, %	3,45	1,98	2,42	6,01	5,44
	2	<b>Átlag</b>	<b>6,42</b>	<b>86,34</b>	<b>4,54</b>	<b>6,94</b>	<b>5,62</b>
		Szórás	0,77	4,55	0,61	1,19	1,32
		Vált., %	11,99	5,26	13,53	17,19	23,50
		Hiba, %	4,38	1,92	4,94	6,28	8,58
	3	<b>Átlag</b>	<b>6,33</b>	<b>87,69</b>	<b>5,14</b>	<b>7,59</b>	<b>5,62</b>
		Szórás	0,90	4,73	0,48	1,08	1,28
		Vált., %	14,28	5,40	9,28	14,28	22,84
		Hiba, %	5,21	1,97	3,39	5,22	8,34
	4	<b>Átlag</b>	<b>6,64</b>	<b>89,04</b>	<b>4,35</b>	<b>6,64</b>	<b>4,71</b>
		Szórás	0,79	4,05	0,55	1,09	1,15
		Vált., %	11,92	4,55	12,54	16,46	24,37
		Hiba, %	4,35	1,66	4,58	6,01	8,90
	5	<b>Átlag</b>	<b>7,07</b>	<b>94,32</b>	<b>4,24</b>	<b>6,60</b>	<b>4,80</b>
		Szórás	0,73	4,34	0,53	1,23	1,25
		Vált., %	10,26	4,60	12,41	18,69	25,97
		Hiba, %	3,75	1,68	4,53	6,83	9,48
6	<b>Átlag</b>	<b>7,80</b>	<b>101,82</b>	<b>3,49</b>	<b>5,36</b>	<b>3,91</b>	
	Szórás	0,85	5,62	0,35	0,82	0,85	
	Vált., %	10,87	5,52	10,14	15,29	21,84	
	Hiba, %	3,97	2,02	3,70	5,58	7,97	
Össz.	<b>Átlag</b>	<b>6,77</b>	<b>90,95</b>	<b>4,38</b>	<b>6,80</b>	<b>4,97</b>	
	<b>Szórás</b>	<b>0,93</b>	<b>7,23</b>	<b>0,68</b>	<b>1,35</b>	<b>1,26</b>	
	<b>Vált., %</b>	<b>13,72</b>	<b>7,95</b>	<b>15,56</b>	<b>19,84</b>	<b>25,30</b>	
	<b>Hiba, %</b>	<b>2,04</b>	<b>1,19</b>	<b>2,32</b>	<b>2,96</b>	<b>3,77</b>	

## 15%-os tömörítés

Töm. m.	Szakasz		Modulus, GPa	R <sub>mh</sub> , MPa	Hajl.szil. alakv., %	Alakv. törésnél, %	Fajlagos törési energia, J·cm <sup>-2</sup>
15%	1	<b>Átlag</b>	<b>4,77</b>	<b>79,10</b>	<b>7,98</b>	<b>15,81</b>	<b>8,88</b>
		Szórás	0,25	7,73	0,70	1,69	1,03
		Vált., %	5,31	9,78	8,79	10,72	11,61
		Hiba, %	1,94	3,57	3,21	3,91	4,24
	2	<b>Átlag</b>	<b>4,83</b>	<b>79,80</b>	<b>7,26</b>	<b>14,55</b>	<b>8,12</b>
		Szórás	0,38	7,57	0,51	1,78	0,84
		Vált., %	7,81	9,49	7,07	12,25	10,32
		Hiba, %	2,85	3,47	2,58	4,47	3,77
	3	<b>Átlag</b>	<b>5,10</b>	<b>82,70</b>	<b>7,99</b>	<b>15,97</b>	<b>9,16</b>
		Szórás	0,33	11,20	0,49	2,10	0,90
		Vált., %	6,38	13,55	6,15	13,13	9,83
		Hiba, %	2,33	4,95	2,25	4,80	3,59
	4	<b>Átlag</b>	<b>5,28</b>	<b>86,33</b>	<b>6,66</b>	<b>12,66</b>	<b>7,43</b>
		Szórás	0,29	10,40	0,41	1,66	0,70
		Vált., %	5,56	12,04	6,21	13,11	9,43
		Hiba, %	2,03	4,40	2,27	4,79	3,44
	5	<b>Átlag</b>	<b>6,02</b>	<b>90,20</b>	<b>5,64</b>	<b>9,41</b>	<b>6,16</b>
		Szórás	0,31	9,19	0,45	1,29	0,69
		Vált., %	5,13	10,19	8,06	13,73	11,27
		Hiba, %	1,87	3,72	2,94	5,02	4,12
	6	<b>Átlag</b>	<b>7,40</b>	<b>97,28</b>	<b>4,28</b>	<b>8,57</b>	<b>5,71</b>
		Szórás	0,46	9,54	0,41	1,76	0,76
		Vált., %	6,23	9,80	9,53	20,53	13,36
		Hiba, %	2,28	3,58	3,48	7,50	4,88
	Össz.	<b>Átlag</b>	<b>5,56</b>	<b>85,90</b>	<b>6,64</b>	<b>12,83</b>	<b>7,93</b>
		<b>Szórás</b>	<b>0,98</b>	<b>11,22</b>	<b>1,42</b>	<b>3,40</b>	<b>1,61</b>
		<b>Vált., %</b>	<b>17,58</b>	<b>13,06</b>	<b>21,42</b>	<b>26,51</b>	<b>20,26</b>
		<b>Hiba, %</b>	<b>2,62</b>	<b>1,95</b>	<b>3,19</b>	<b>3,95</b>	<b>3,02</b>

## 23%-os tömörítés

Töm. m.	Szakasz		Modulus, GPa	R <sub>mh</sub> , MPa	Hajl.szil. alakv., %	Alakv. törésnél, %	Fajlagos törési energia, J·cm <sup>-2</sup>
23%	1	<b>Átlag</b>	<b>3,57</b>	<b>70,55</b>	<b>10,99</b>	<b>15,06</b>	<b>10,44</b>
		Szórás	0,43	8,75	1,51	2,81	2,67
		Vált., %	12,03	12,40	13,73	18,68	25,63
		Hiba, %	4,39	4,53	5,01	6,82	9,36
	2	<b>Átlag</b>	<b>3,56</b>	<b>73,86</b>	<b>11,22</b>	<b>16,32</b>	<b>11,31</b>
		Szórás	0,41	5,26	0,82	0,27	1,42
		Vált., %	11,47	7,12	7,30	1,67	12,54
		Hiba, %	4,19	2,60	2,67	0,61	4,58
	3	<b>Átlag</b>	<b>3,64</b>	<b>77,36</b>	<b>11,07</b>	<b>16,46</b>	<b>11,90</b>
		Szórás	0,43	5,73	0,61	0,22	1,47
		Vált., %	11,70	7,41	5,52	1,34	12,33
		Hiba, %	4,27	2,71	2,02	0,49	4,50
	4	<b>Átlag</b>	<b>3,62</b>	<b>77,54</b>	<b>11,71</b>	<b>16,58</b>	<b>12,34</b>
		Szórás	0,40	5,68	0,72	0,10	1,39
		Vált., %	11,18	7,33	6,17	0,62	11,23
		Hiba, %	4,08	2,67	2,25	0,23	4,10
	5	<b>Átlag</b>	<b>3,52</b>	<b>75,78</b>	<b>11,74</b>	<b>17,11</b>	<b>12,21</b>
		Szórás	0,47	7,12	1,03	1,61	2,06
		Vált., %	13,35	9,40	8,80	9,38	16,87
		Hiba, %	4,88	3,43	3,21	3,43	6,16
	6	<b>Átlag</b>	<b>3,58</b>	<b>77,41</b>	<b>11,64</b>	<b>17,34</b>	<b>12,41</b>
		Szórás	0,48	8,24	1,35	1,83	2,26
		Vált., %	13,45	10,64	11,58	10,57	18,22
		Hiba, %	4,91	3,89	4,23	3,86	6,65
	Össz.	<b>Átlag</b>	<b>3,58</b>	<b>75,42</b>	<b>11,40</b>	<b>16,48</b>	<b>11,77</b>
		<b>Szórás</b>	<b>0,43</b>	<b>7,29</b>	<b>1,09</b>	<b>1,67</b>	<b>2,04</b>
		<b>Vált., %</b>	<b>12,10</b>	<b>9,66</b>	<b>9,56</b>	<b>10,15</b>	<b>17,32</b>
		<b>Hiba, %</b>	<b>1,80</b>	<b>1,44</b>	<b>1,43</b>	<b>1,51</b>	<b>2,58</b>

## Ütő-hajlító vizsgálat eredményei

### 0%-os tömörítés

Tömörítetlen bükk ütő-hajlító vizsgálatára harminc darab mintadarabot vizsgáltam. Ebből húsz vizsgálat során volt adatgyűjtés – tehát a táblázatban minden adat **10 mérés** eredményét tükrözi. A mérési eredmények statisztikai kiértékelése a következő táblázatban található.

	Szakasz		Repedéskeletkezésig elviselt alakváltozás, %	Repedéskeletkezéshez tartozó feszültség, MPa	Fajlagos ütő-hajlító szilárdság, J·cm <sup>-2</sup>
0%	1	<b>Átlag</b>	<b>2,86</b>	<b>147,30</b>	<b>5,32</b>
		Szórás	0,31	14,41	0,32
		Vált., %	10,93	9,78	6,03
		Hiba, %	6,91	6,19	3,82
	2	<b>Átlag</b>	<b>2,80</b>	<b>145,15</b>	<b>5,02</b>
		Szórás	0,48	5,84	0,38
		Vált., %	17,05	4,03	7,59
		Hiba, %	10,78	2,55	4,80
	<b>Össz.</b>	<b>Átlag</b>	<b>2,83</b>	<b>146,22</b>	<b>5,07</b>
		<b>Szórás</b>	<b>0,39</b>	<b>10,76</b>	<b>0,41</b>
		<b>Vált., %</b>	<b>13,92</b>	<b>7,36</b>	<b>8,02</b>
		<b>Hiba, %</b>	<b>6,22</b>	<b>3,29</b>	<b>2,93</b>

A tömörített mintadarabok esetében szakaszonként hat darabot vizsgáltam – tehát minden adat **hat mérés** eredményét tükrözi

5%-os tömörítés

	Szakasz		Repedéskeletkezésig elviselt alakváltozás, %	Repedéskeletkezéshez tartozó feszültség, MPa	Fajlagos ütőhajlító szilárdság, J·cm <sup>-2</sup>
5%	1	<b>Átlag</b>	<b>3,09</b>	<b>161,67</b>	<b>6,06</b>
		Szórás	0,34	2,66	0,72
		Vált., %	0,11	0,02	11,94
		Hiba, %	9,07	1,34	9,75
	2	<b>Átlag</b>	<b>3,16</b>	<b>162,02</b>	<b>5,30</b>
		Szórás	0,16	2,97	0,50
		Vált., %	0,05	0,02	9,40
		Hiba, %	4,02	1,50	7,67
	3	<b>Átlag</b>	<b>2,86</b>	<b>157,36</b>	<b>5,32</b>
		Szórás	0,18	2,30	0,54
		Vált., %	0,06	0,01	10,19
		Hiba, %	5,14	1,19	8,32
	4	<b>Átlag</b>	<b>2,81</b>	<b>152,98</b>	<b>5,33</b>
		Szórás	0,27	2,59	0,62
		Vált., %	0,09	0,02	11,69
		Hiba, %	7,74	1,38	9,54
	5	<b>Átlag</b>	<b>2,85</b>	<b>160,14</b>	<b>5,13</b>
		Szórás	0,21	3,68	0,53
		Vált., %	0,07	0,02	10,25
		Hiba, %	5,96	1,38	8,37
	6	<b>Átlag</b>	<b>3,01</b>	<b>162,33</b>	<b>5,95</b>
		Szórás	0,11	5,04	0,52
		Vált., %	0,04	0,03	8,68
		Hiba, %	3,01	2,53	7,08
	<b>Össz.</b>	<b>Átlag</b>	<b>2,97</b>	<b>159,42</b>	<b>6,06</b>
		<b>Szórás</b>	<b>0,25</b>	<b>4,58</b>	<b>0,72</b>
		<b>Vált., %</b>	<b>8,36</b>	<b>2,87</b>	<b>8,52</b>
		<b>Hiba, %</b>	<b>2,79</b>	<b>0,96</b>	<b>5,39</b>

	Szakasz		Repedéskeletkezésig elviselt alakváltozás, %	Repedéskeletkezéshez tartozó feszültség, MPa	Fajlagos ütő- hajlító szilárdság, J·cm <sup>-2</sup>
8%	1	<b>Átlag</b>	<b>3,01</b>	<b>143,14</b>	<b>6,99</b>
		Szórás	0,27	14,43	0,49
		Vált., %	0,09	0,10	7,08
		Hiba, %	7,33	8,23	5,78
	2	<b>Átlag</b>	<b>3,46</b>	<b>140,25</b>	<b>6,99</b>
		Szórás	0,29	12,78	0,75
		Vált., %	0,08	0,09	10,67
		Hiba, %	6,92	7,44	8,71
	3	<b>Átlag</b>	<b>3,53</b>	<b>137,03</b>	<b>6,67</b>
		Szórás	0,55	13,21	0,68
		Vált., %	0,16	0,10	10,26
		Hiba, %	12,75	7,87	8,38
	4	<b>Átlag</b>	<b>3,21</b>	<b>147,27</b>	<b>5,80</b>
		Szórás	0,41	9,53	0,60
		Vált., %	0,13	0,06	10,41
		Hiba, %	10,32	5,28	8,50
	5	<b>Átlag</b>	<b>3,36</b>	<b>135,84</b>	<b>5,77</b>
		Szórás	0,36	11,91	0,72
		Vált., %	0,11	0,09	12,52
		Hiba, %	8,68	7,16	10,22
6	<b>Átlag</b>	<b>2,82</b>	<b>136,67</b>	<b>5,56</b>	
	Szórás	0,28	12,26	0,57	
	Vált., %	0,10	0,09	13,44	
	Hiba, %	8,01	7,32	10,97	
<b>Össz.</b>	<b>Átlag</b>	<b>3,23</b>	<b>140,03</b>	<b>6,30</b>	
	<b>Szórás</b>	<b>0,43</b>	<b>12,24</b>	<b>0,85</b>	
	<b>Vált., %</b>	<b>13,27</b>	<b>8,74</b>	<b>13,51</b>	
	<b>Hiba, %</b>	<b>4,42</b>	<b>2,91</b>	<b>4,50</b>	

	Szakasz		Repedéskeletkezésig elviselt alakváltozás, %	Repedéskeletkezéshez tartozó feszültség, MPa	Fajlagos ütő- hajlító szilárdság, J·cm <sup>-2</sup>
10%	1	<b>Átlag</b>	<b>3,81</b>	<b>140,71</b>	<b>7,63</b>
		Szórás	0,37	10,37	0,46
		Vált., %	0,10	0,07	6,08
		Hiba, %	7,88	6,02	4,96
	2	<b>Átlag</b>	<b>4,07</b>	<b>139,65</b>	<b>7,69</b>
		Szórás	0,27	8,28	0,47
		Vált., %	0,07	0,06	6,06
		Hiba, %	5,45	4,84	4,95
	3	<b>Átlag</b>	<b>3,76</b>	<b>132,34</b>	<b>7,12</b>
		Szórás	0,34	7,16	0,64
		Vált., %	0,09	0,05	9,05
		Hiba, %	7,43	4,42	7,39
	4	<b>Átlag</b>	<b>3,36</b>	<b>143,62</b>	<b>6,32</b>
		Szórás	0,19	6,24	0,71
		Vált., %	0,06	0,04	11,28
		Hiba, %	4,62	3,55	9,21
	5	<b>Átlag</b>	<b>2,88</b>	<b>130,92</b>	<b>6,07</b>
		Szórás	0,21	6,69	0,57
		Vált., %	0,07	0,05	9,33
		Hiba, %	5,87	4,17	7,62
	6	<b>Átlag</b>	<b>2,72</b>	<b>144,47</b>	<b>5,81</b>
		Szórás	0,18	5,85	0,78
		Vált., %	0,07	0,04	13,44
		Hiba, %	5,44	3,30	10,97
	Össz.	<b>Átlag</b>	<b>3,43</b>	<b>138,62</b>	<b>6,77</b>
		<b>Szórás</b>	<b>0,56</b>	<b>8,79</b>	<b>0,95</b>
		<b>Vált., %</b>	<b>16,32</b>	<b>6,34</b>	<b>13,97</b>
		<b>Hiba, %</b>	<b>5,44</b>	<b>2,11</b>	<b>4,66</b>

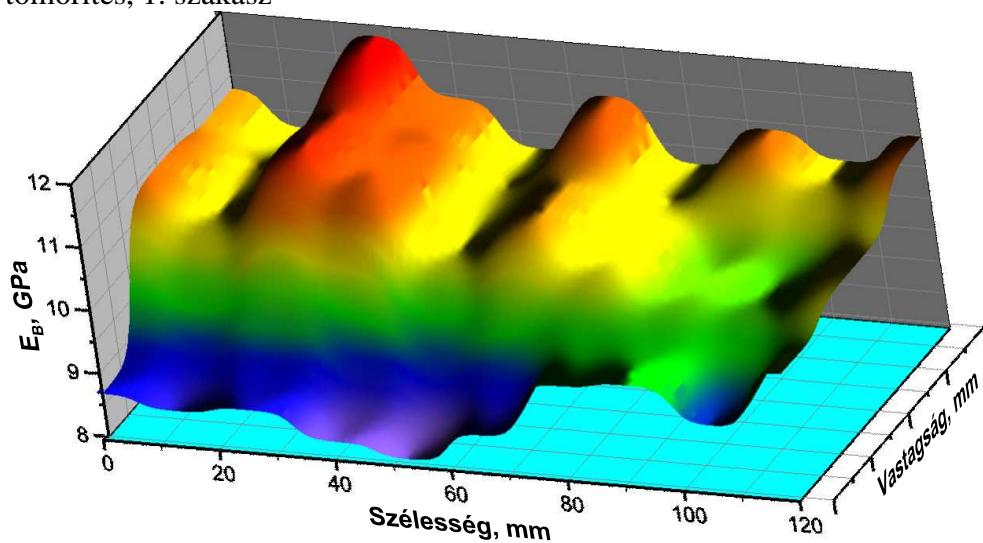
	Szakasz		Repedéskeletkezésig elviselt alakváltozás, %	Repedéskeletkezéshez tartozó feszültség, MPa	Fajlagos ütő- hajlító szilárdság, J·cm <sup>-2</sup>
15%	1	<b>Átlag</b>	<b>4,15</b>	<b>136,31</b>	<b>9,35</b>
		Szórás	0,52	6,71	0,91
		Vált., %	0,13	0,00	9,73
		Hiba, %	10,22	0,00	7,95
	2	<b>Átlag</b>	<b>4,13</b>	<b>132,91</b>	<b>8,88</b>
		Szórás	0,33	7,30	1,54
		Vált., %	0,08	0,05	17,33
		Hiba, %	6,50	4,49	14,15
	3	<b>Átlag</b>	<b>4,31</b>	<b>136,10</b>	<b>9,11</b>
		Szórás	0,39	4,13	0,54
		Vált., %	0,09	0,00	5,98
		Hiba, %	7,31	0,00	4,88
	4	<b>Átlag</b>	<b>4,10</b>	<b>134,85</b>	<b>9,19</b>
		Szórás	0,41	4,86	0,48
		Vált., %	0,10	0,00	5,21
		Hiba, %	8,14	0,00	4,26
	5	<b>Átlag</b>	<b>3,90</b>	<b>135,41</b>	<b>8,17</b>
		Szórás	0,27	7,00	0,81
		Vált., %	0,07	0,04	9,96
		Hiba, %	5,58	2,95	8,13
6	<b>Átlag</b>	<b>2,89</b>	<b>127,48</b>	<b>6,78</b>	
	Szórás	0,11	11,86	0,65	
	Vált., %	0,04	0,09	9,62	
	Hiba, %	3,56	8,32	7,85	
<b>Össz.</b>	<b>Átlag</b>	<b>3,94</b>	<b>134,02</b>	<b>8,58</b>	
	<b>Szórás</b>	<b>0,57</b>	<b>7,27</b>	<b>1,23</b>	
	<b>Vált., %</b>	<b>14,36</b>	<b>5,42</b>	<b>14,28</b>	
	<b>Hiba, %</b>	<b>4,86</b>	<b>1,83</b>	<b>4,76</b>	



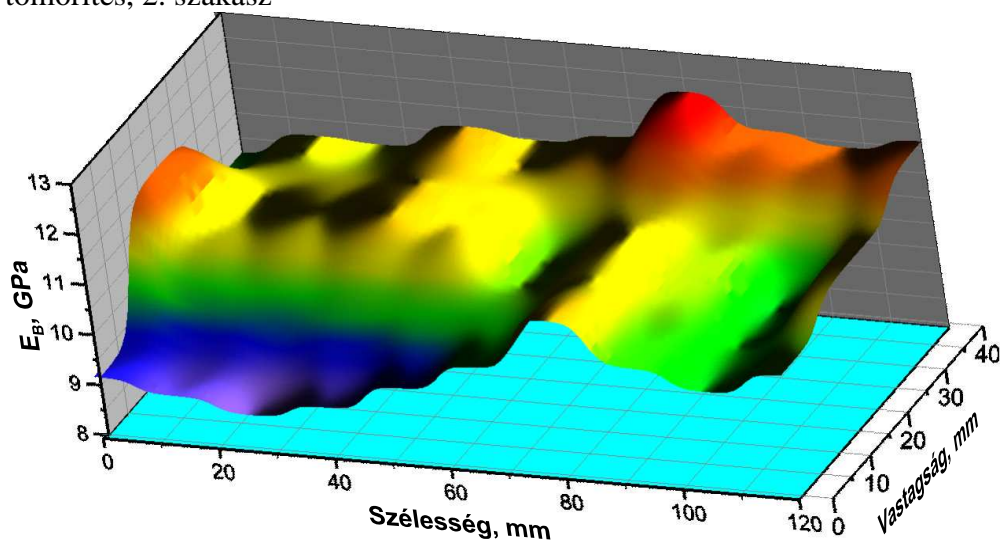
	Szakasz		Repedéskeletkezésig elviselt alakváltozás, %	Repedéskeletkezéshez tartozó feszültség, MPa	Fajlagos ütő- hajlító szilárdság, J·cm <sup>-2</sup>
23%	1	<b>Átlag</b>	<b>5,20</b>	<b>128,35</b>	<b>10,45</b>
		Szórás	0,53	7,05	1,74
		Vált., %	0,10	0,05	16,62
		Hiba, %	8,27	4,49	13,57
	2	<b>Átlag</b>	<b>5,15</b>	<b>129,17</b>	<b>10,11</b>
		Szórás	0,57	4,67	1,47
		Vált., %	0,11	0,04	14,50
		Hiba, %	9,07	2,95	11,84
	3	<b>Átlag</b>	<b>5,44</b>	<b>117,47</b>	<b>10,11</b>
		Szórás	0,29	8,37	1,42
		Vált., %	0,05	0,07	14,02
		Hiba, %	4,41	5,82	11,45
	4	<b>Átlag</b>	<b>6,06</b>	<b>122,82</b>	<b>11,44</b>
		Szórás	0,66	3,71	1,62
		Vált., %	0,11	0,03	14,18
		Hiba, %	8,84	2,47	11,58
	5	<b>Átlag</b>	<b>5,59</b>	<b>135,03</b>	<b>12,25</b>
		Szórás	0,38	5,37	1,69
		Vált., %	0,07	0,04	13,83
		Hiba, %	6,07	3,56	11,29
	6	<b>Átlag</b>	<b>5,55</b>	<b>140,25</b>	<b>11,27</b>
		Szórás	0,38	8,30	1,07
		Vált., %	0,07	0,06	9,53
		Hiba, %	5,60	4,83	7,78
	Össz.	<b>Átlag</b>	<b>5,50</b>	<b>128,67</b>	<b>10,94</b>
		<b>Szórás</b>	<b>0,54</b>	<b>9,71</b>	<b>1,61</b>
		<b>Vált., %</b>	<b>9,92</b>	<b>7,54</b>	<b>14,76</b>
		<b>Hiba, %</b>	<b>3,35</b>	<b>2,55</b>	<b>4,92</b>

### M 3. A rugalmassági modulus keresztmetszetben való eloszlása

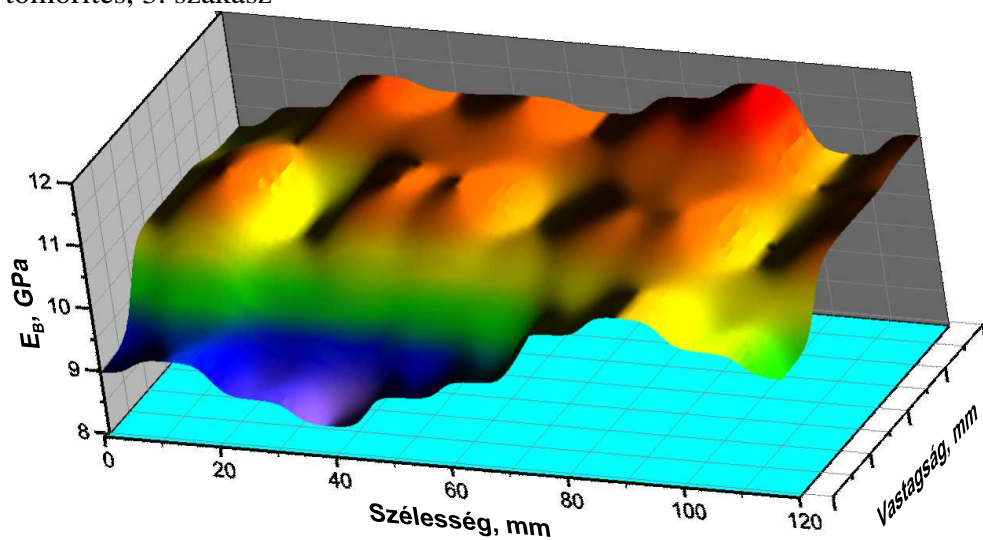
5%-os tömörítés, 1. szakasz



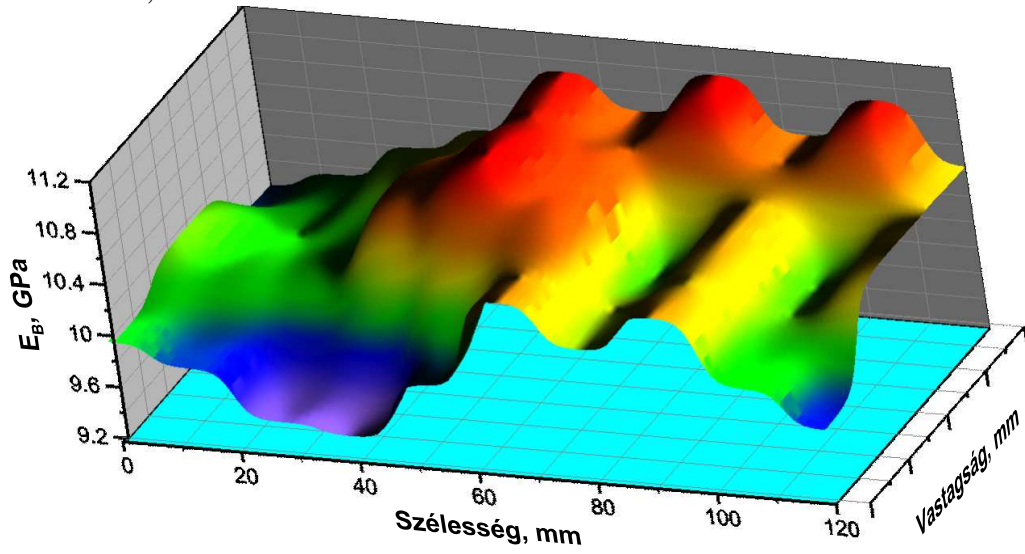
5%-os tömörítés, 2. szakasz



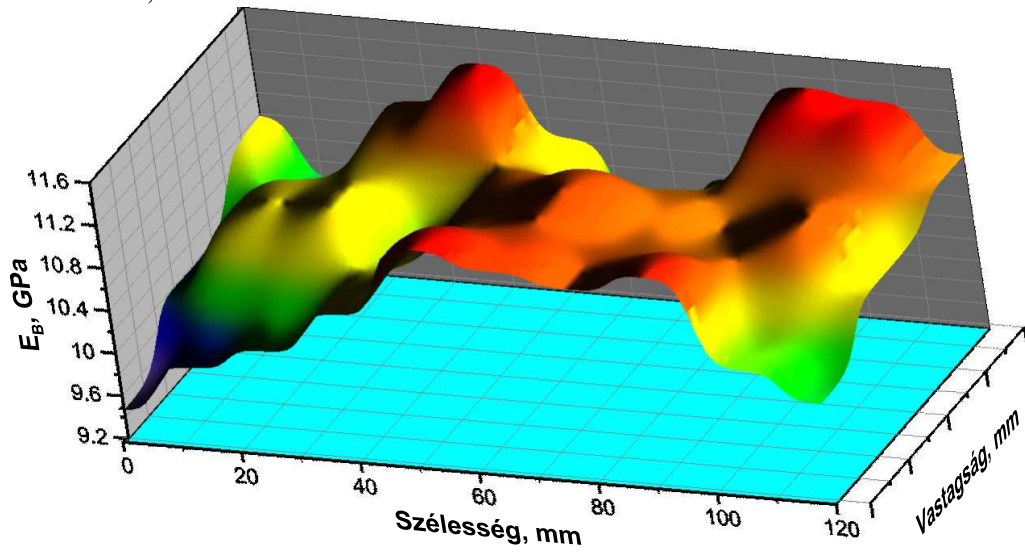
5%-os tömörítés, 3. szakasz



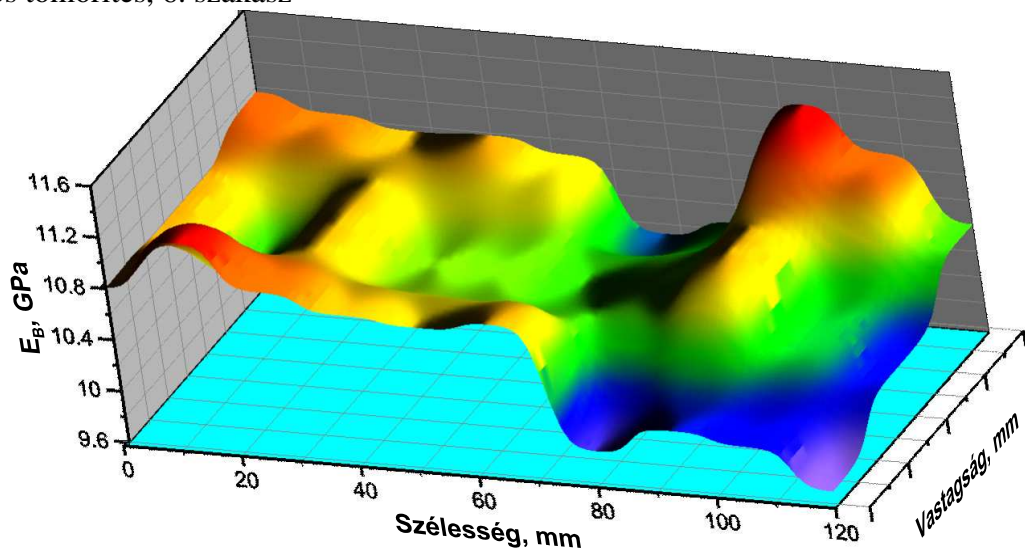
5%-os tömörítés, 4. szakasz



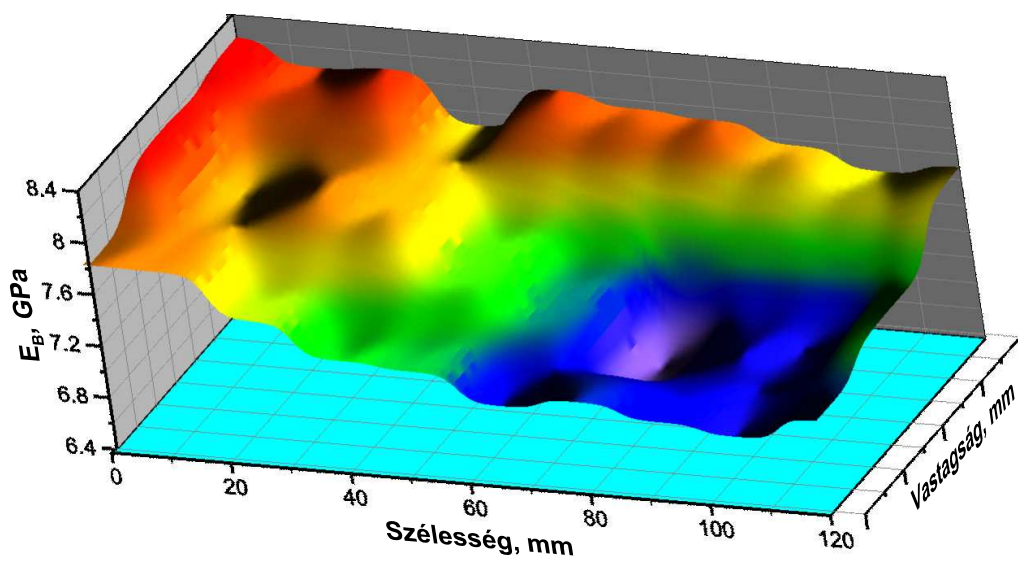
5%-os tömörítés, 5. szakasz



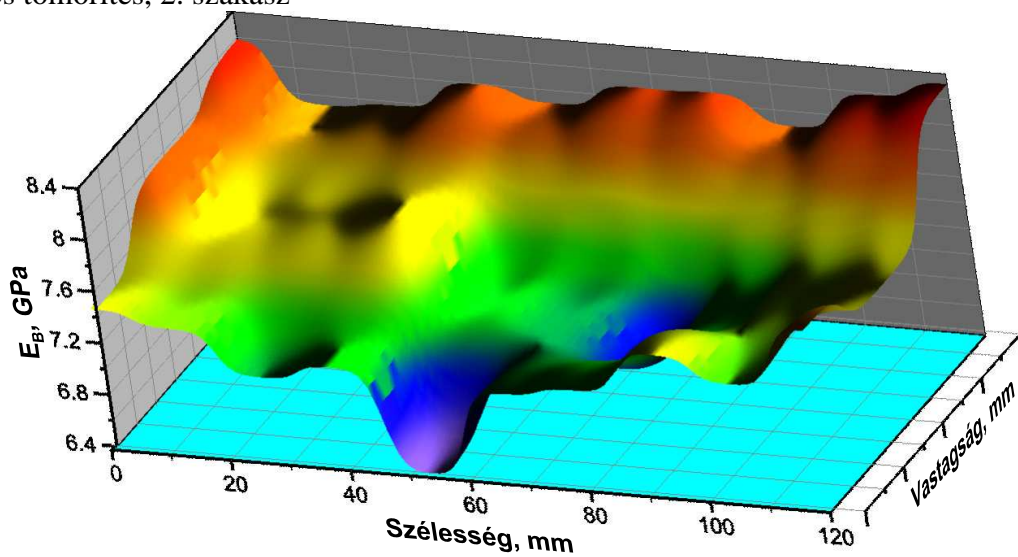
5%-os tömörítés, 6. szakasz



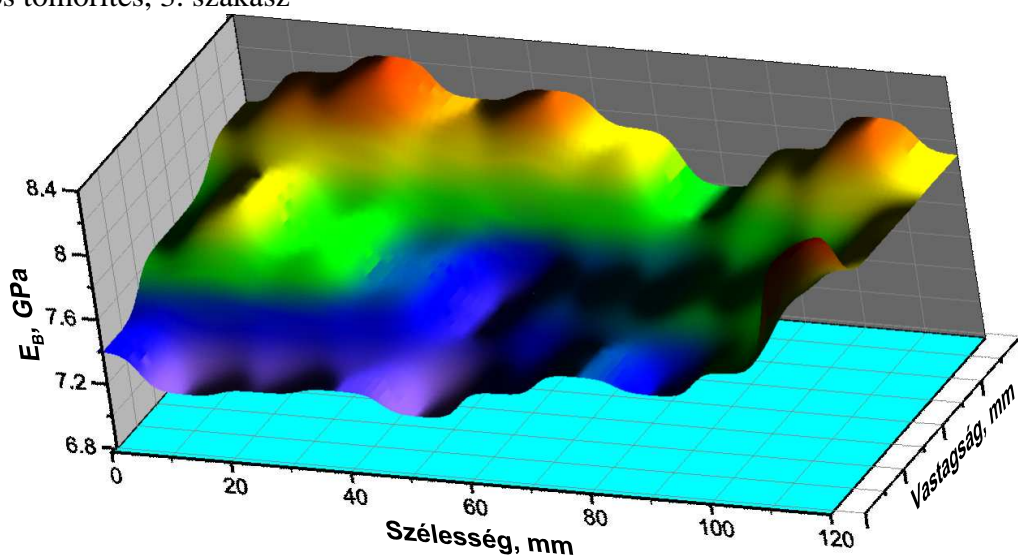
8%-os tömörítés, 1. szakasz



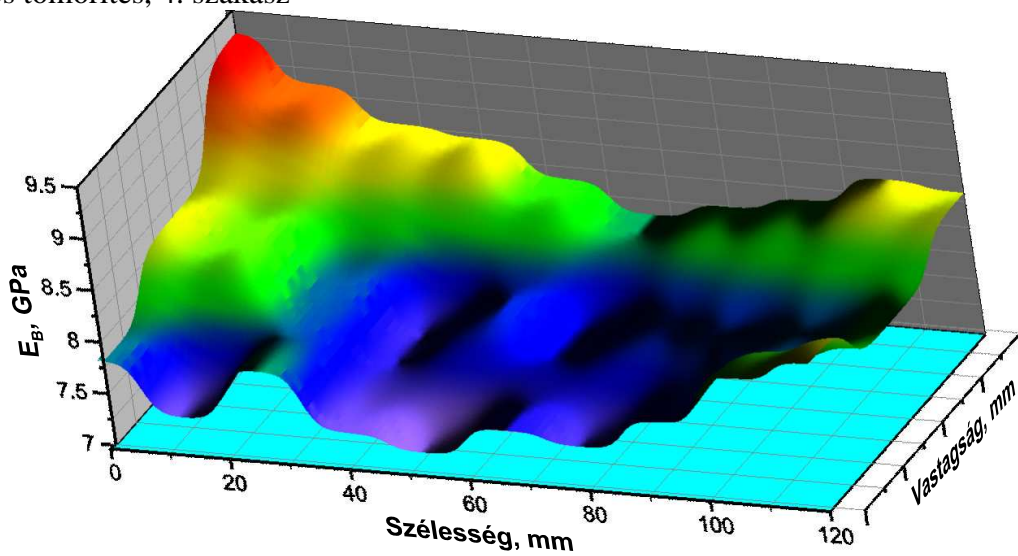
8%-os tömörítés, 2. szakasz



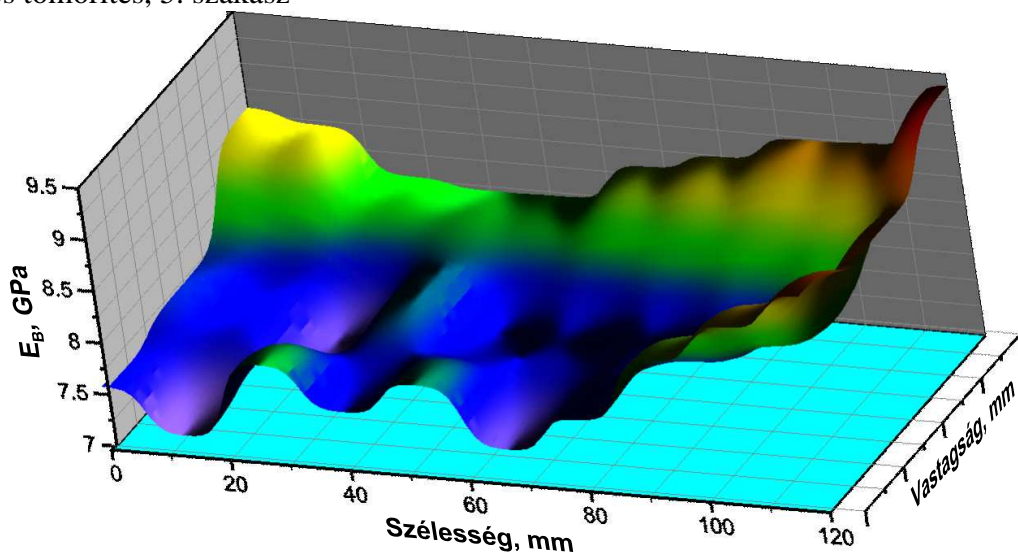
8%-os tömörítés, 3. szakasz



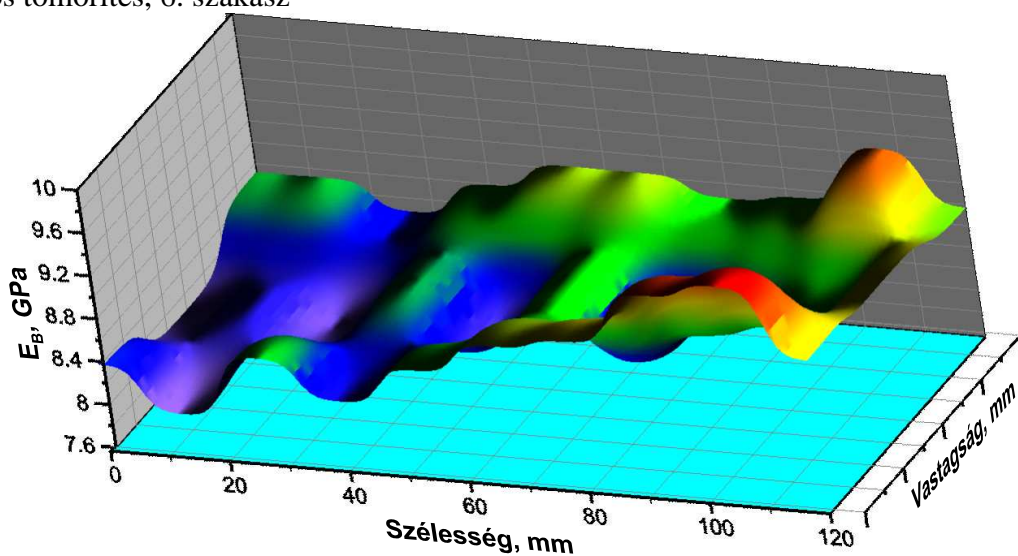
8%-os tömörítés, 4. szakasz



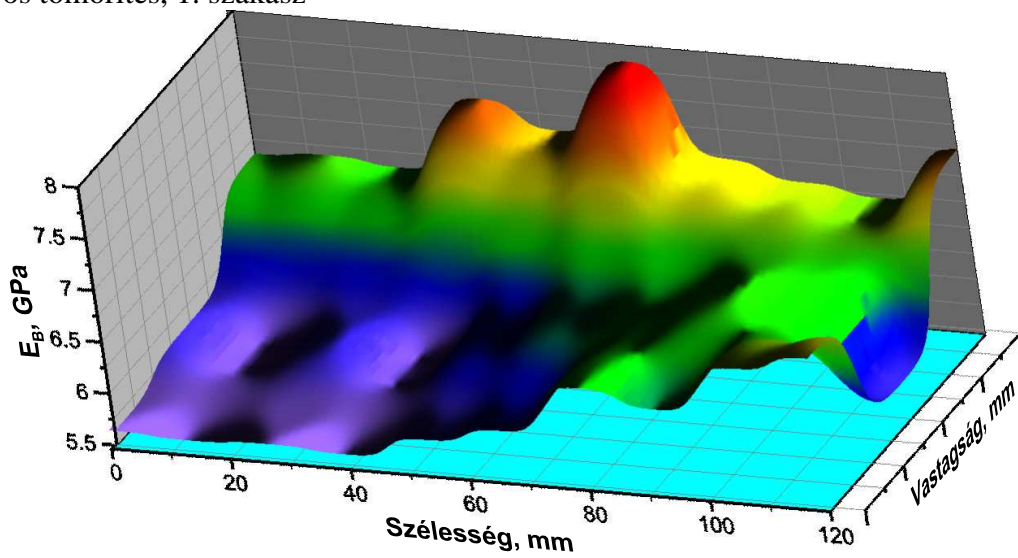
8%-os tömörítés, 5. szakasz



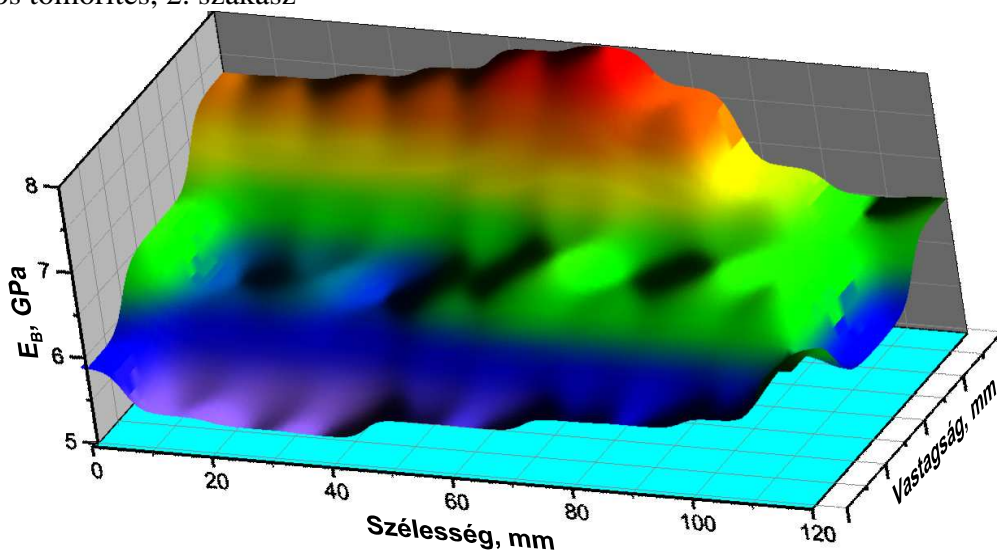
8%-os tömörítés, 6. szakasz



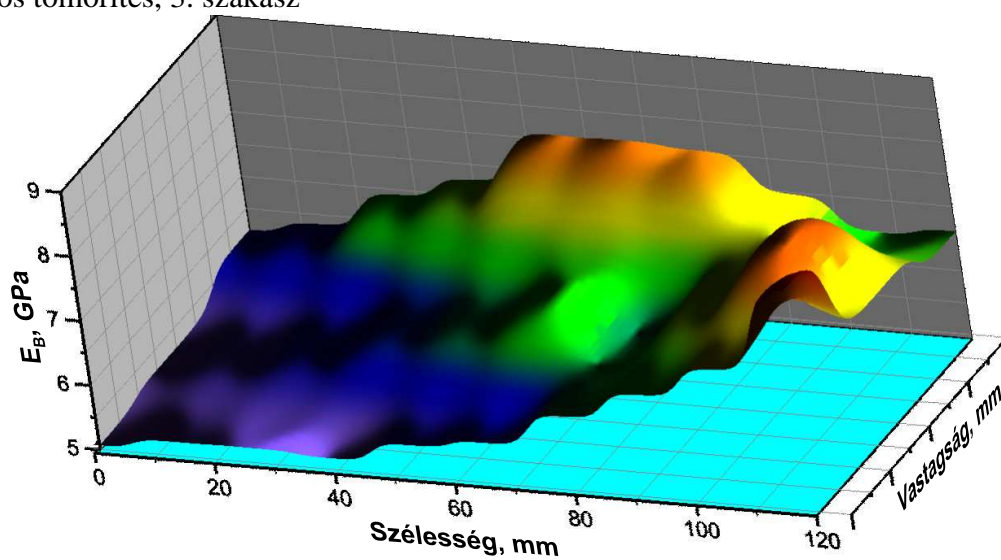
10%-os tömörítés, 1. szakasz



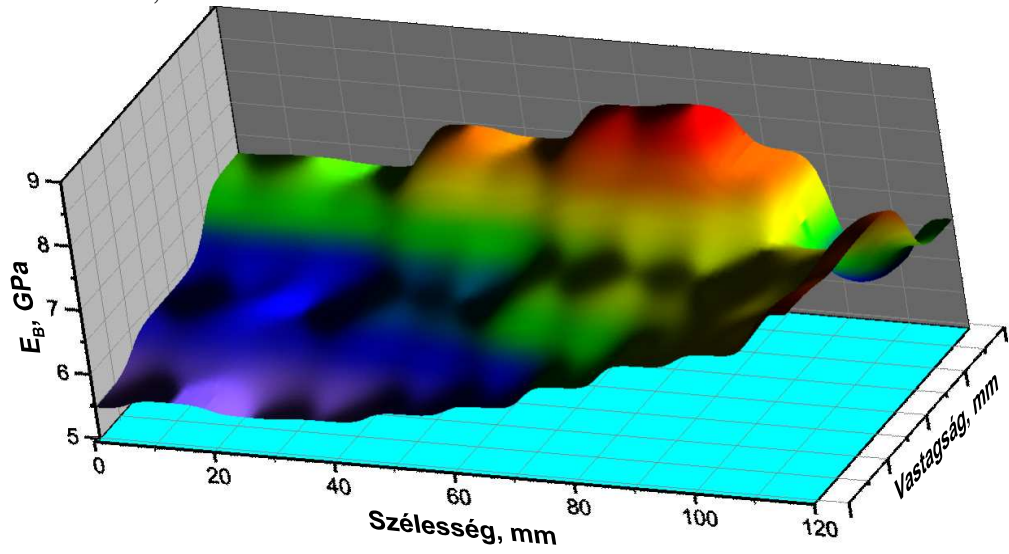
10%-os tömörítés, 2. szakasz



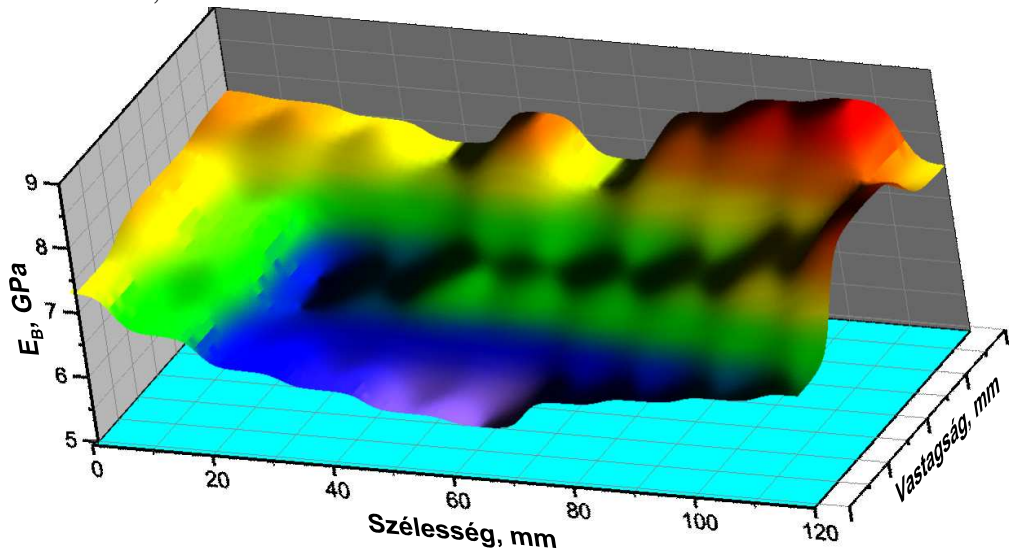
10%-os tömörítés, 3. szakasz



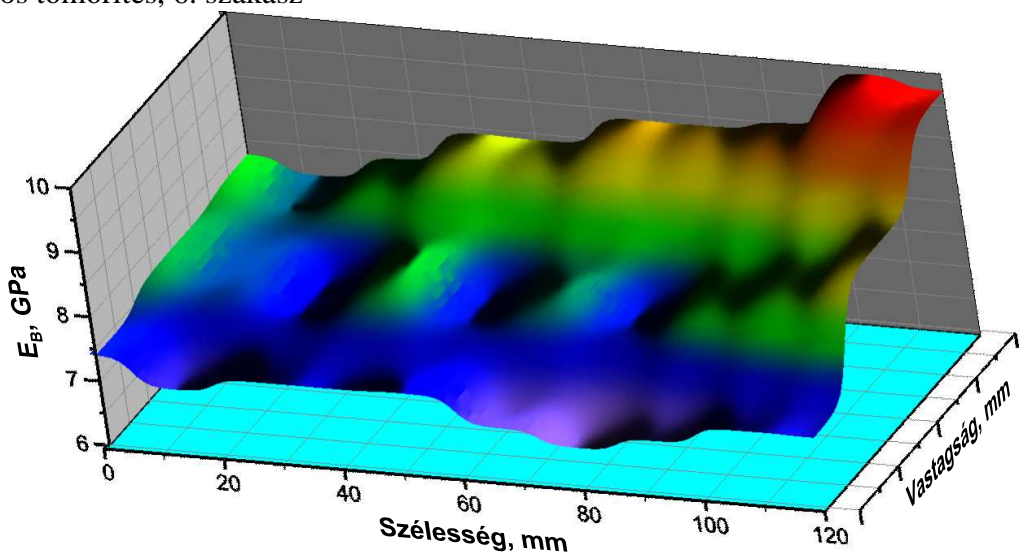
10%-os tömörítés, 4. szakasz



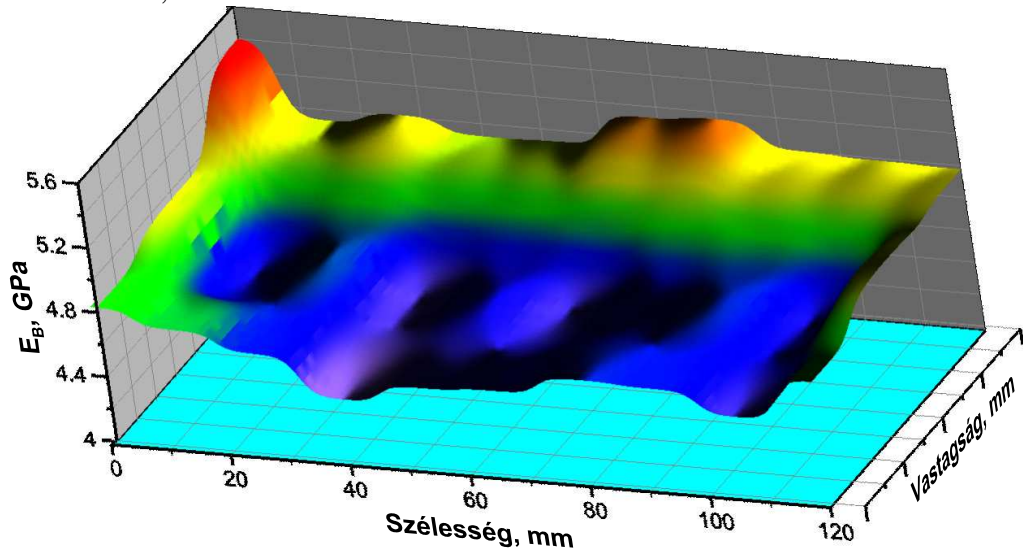
10%-os tömörítés, 5. szakasz



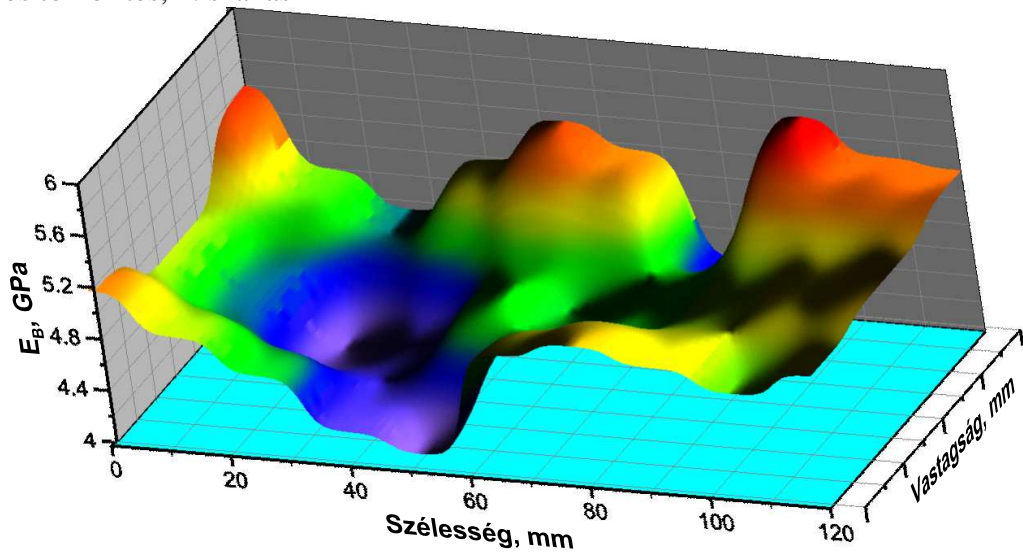
10%-os tömörítés, 6. szakasz



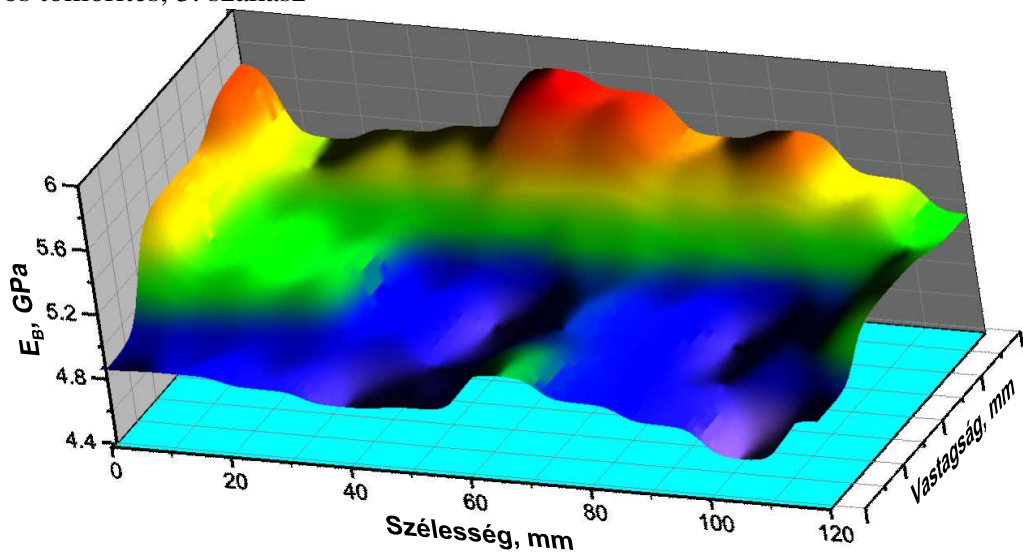
15%-os tömörítés, 1. szakasz



15%-os tömörítés, 2. szakasz

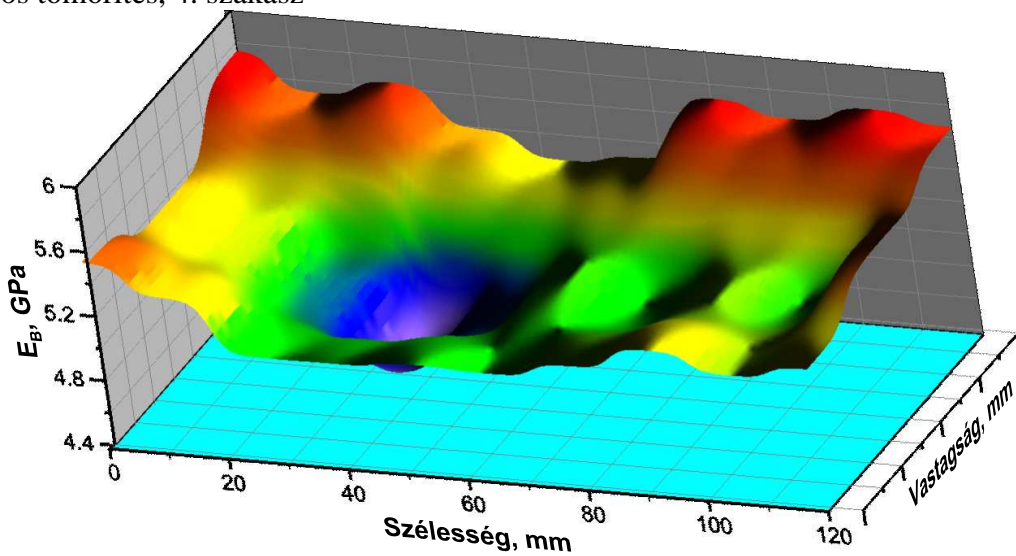


15%-os tömörítés, 3. szakasz

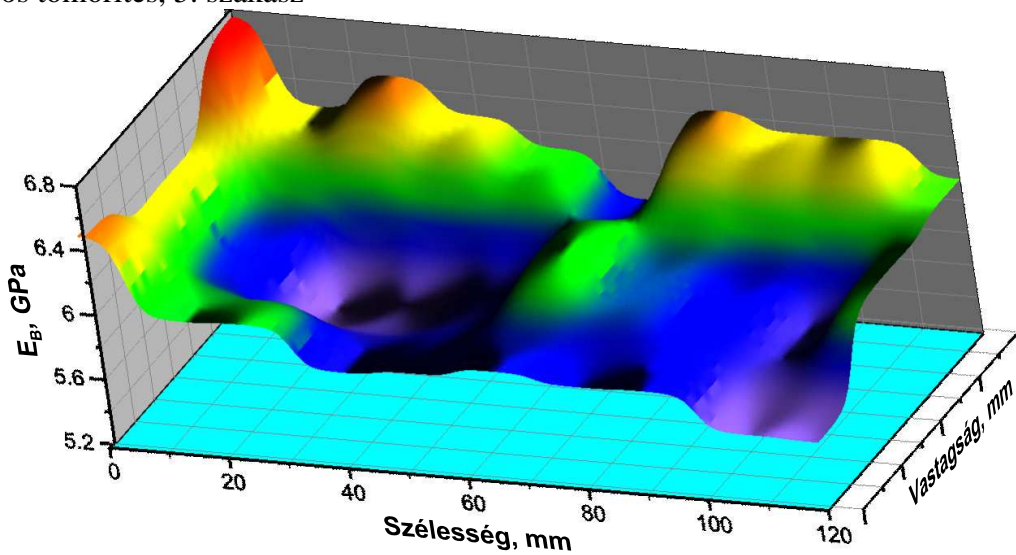




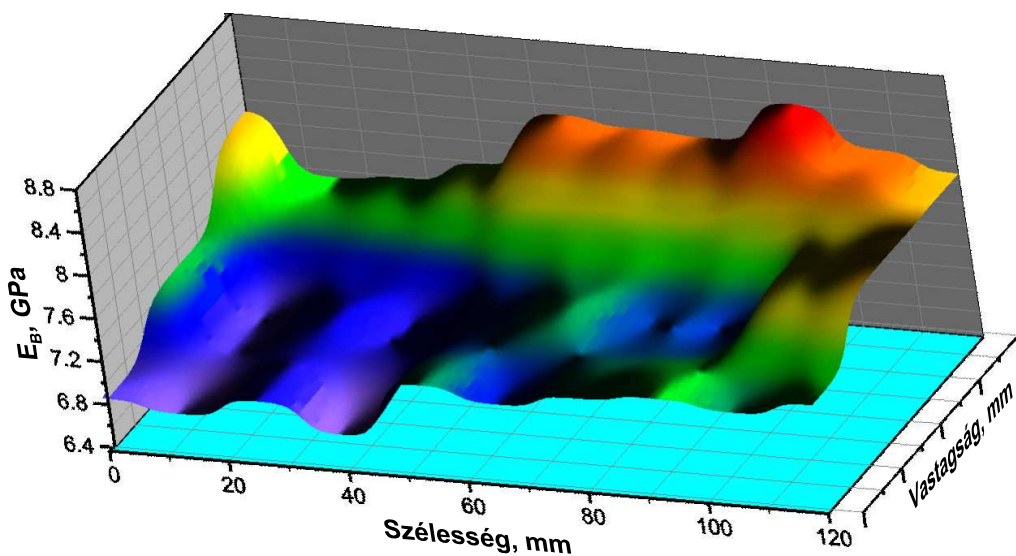
15%-os tömörítés, 4. szakasz



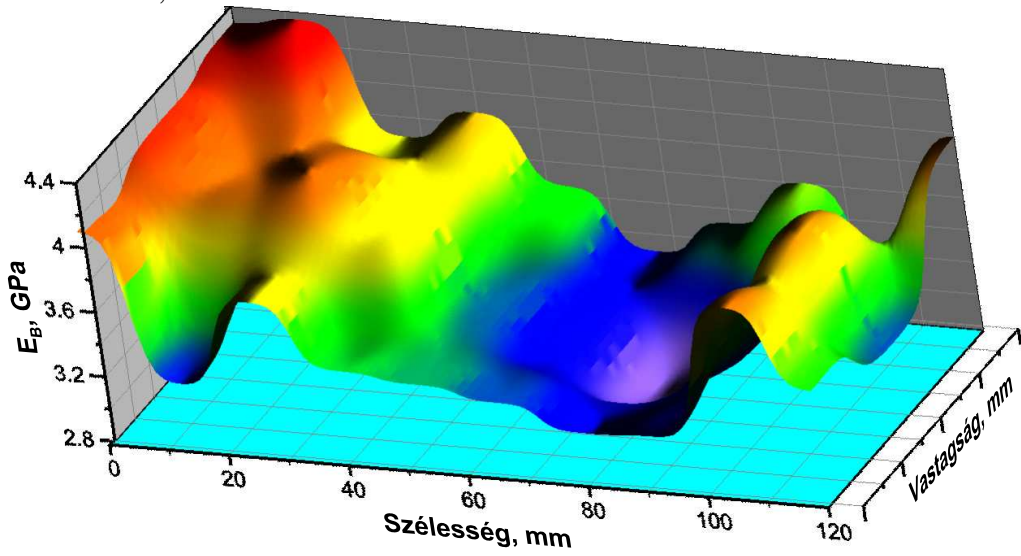
15%-os tömörítés, 5. szakasz



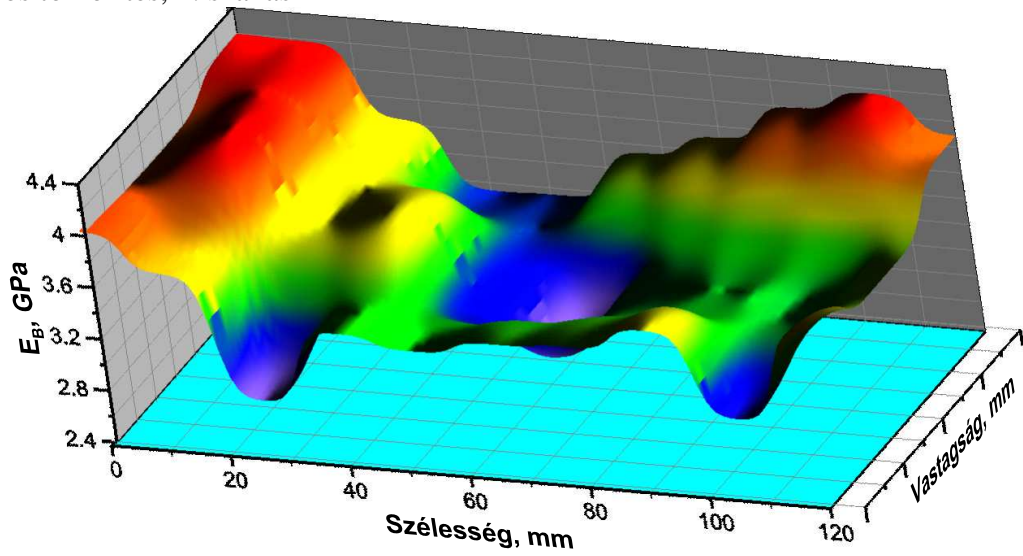
15%-os tömörítés, 6. szakasz



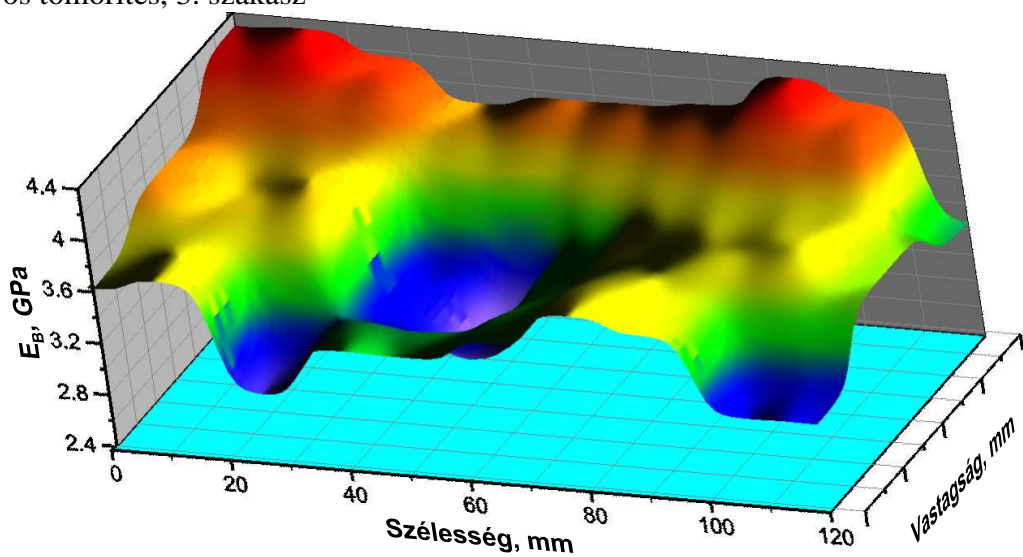
23%-os tömörítés, 1. szakasz



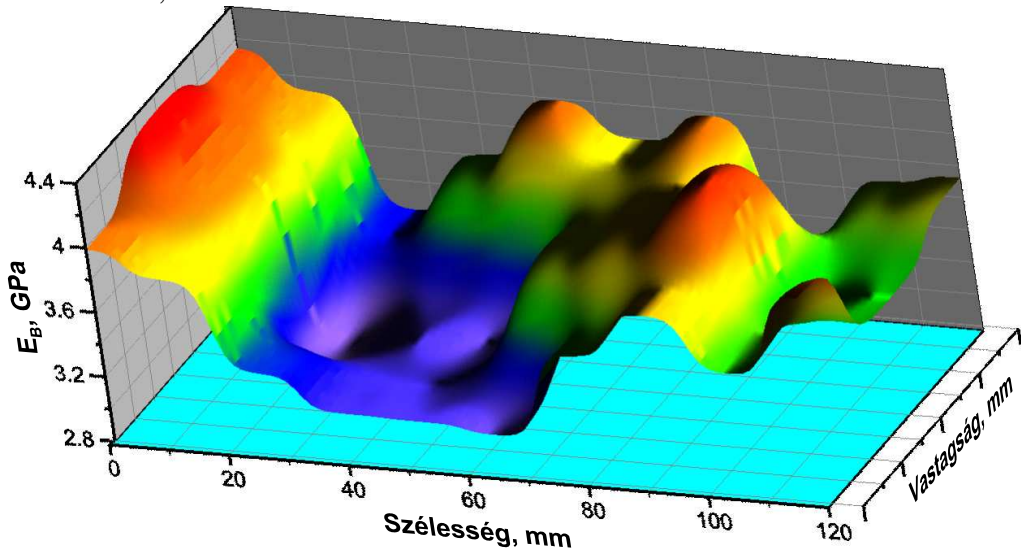
23%-os tömörítés, 2. szakasz



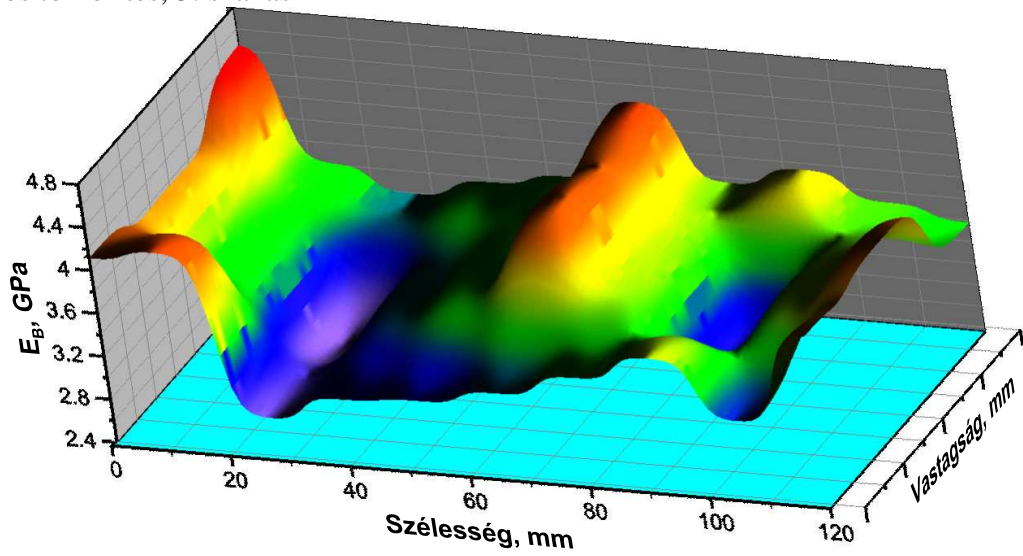
23%-os tömörítés, 3. szakasz



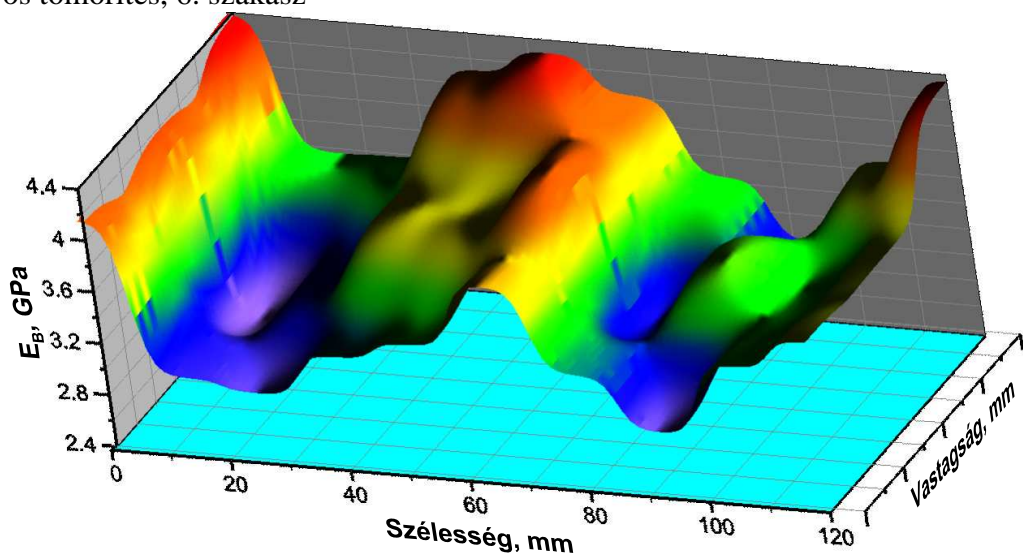
23%-os tömörítés, 4. szakasz



23%-os tömörítés, 5. szakasz



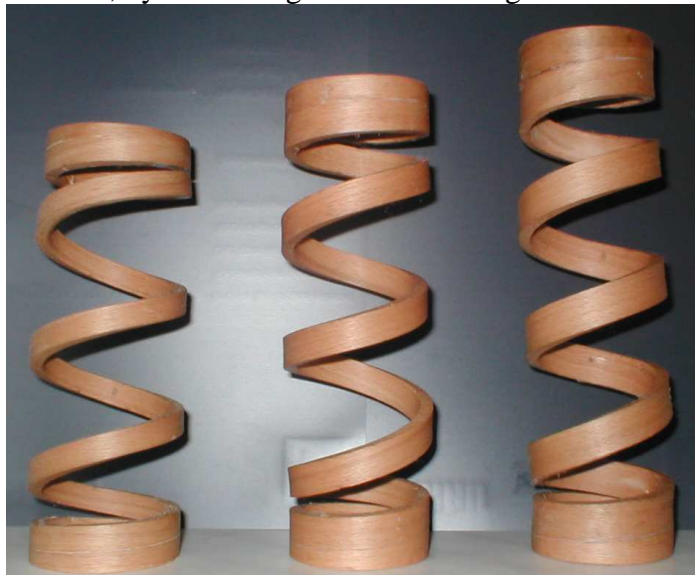
23%-os tömörítés, 6. szakasz



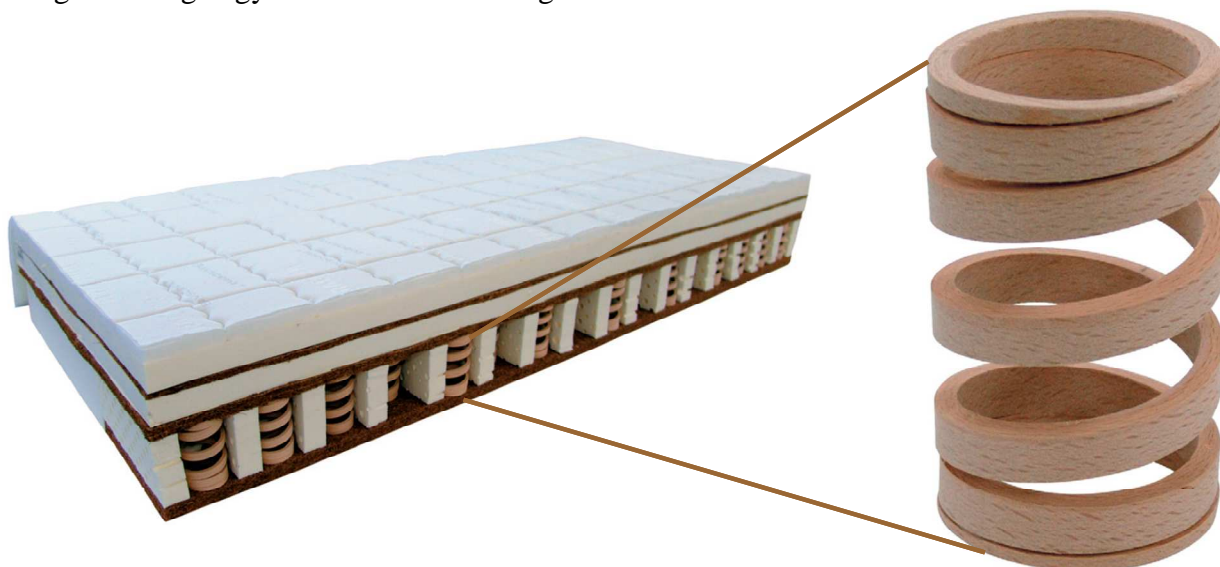
## M 4. Tömörítettfából előállított termékek

### M 4.1. Rugók

Négyszög keresztmetszetű, nyomott hengeres fa-csavarrugó



A hengeres farugó egyik alkalmazása a farugós biomatrac



Négyszög keresztmetszetű, nyomott kúpos fa-csavarrugó



Csuklós elliptikus lemez farugók



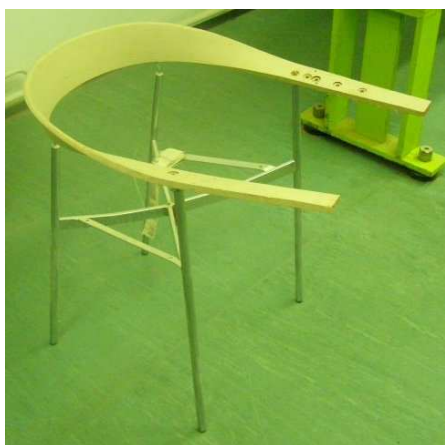
## M 4.2. Székek

Japán szék



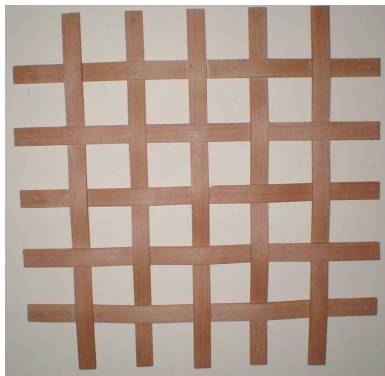


Karosszék támlája

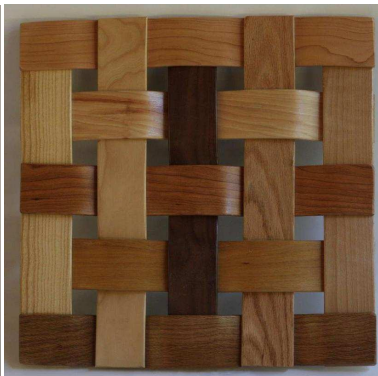


Farács, szék ülőrésze

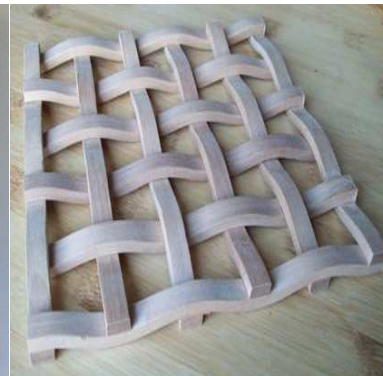
általunk bükkfából  
készített farács



különböző fából  
készített farács



különböző fából  
készített farács



### M 4.3. Közlekedés

csónak



kormánykerék



## M 4.4. Építészet

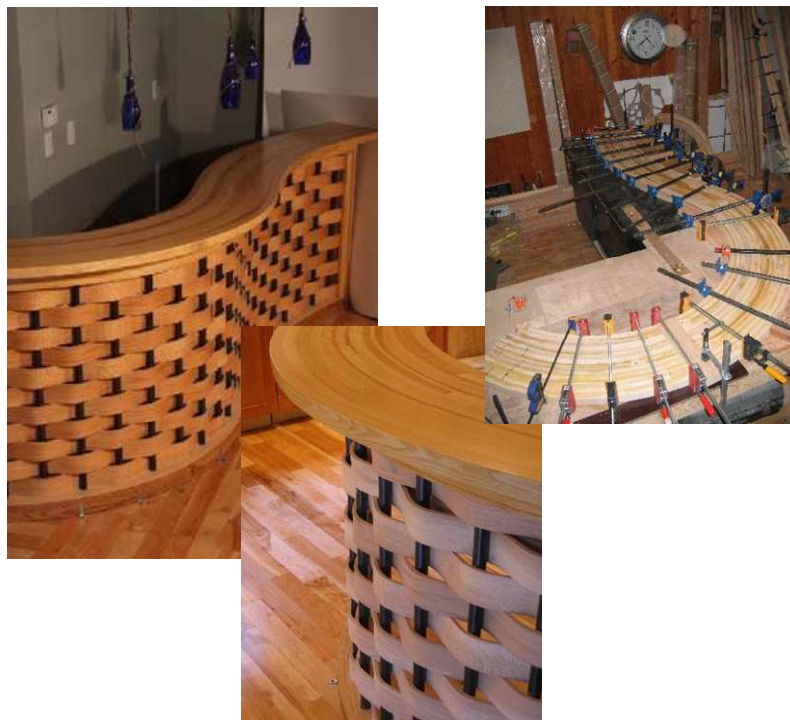
kerítés



oszlopok



konyhasziget





## M 4.5. Hangszer

dob



banjo



ukulele, hawaii gitár

