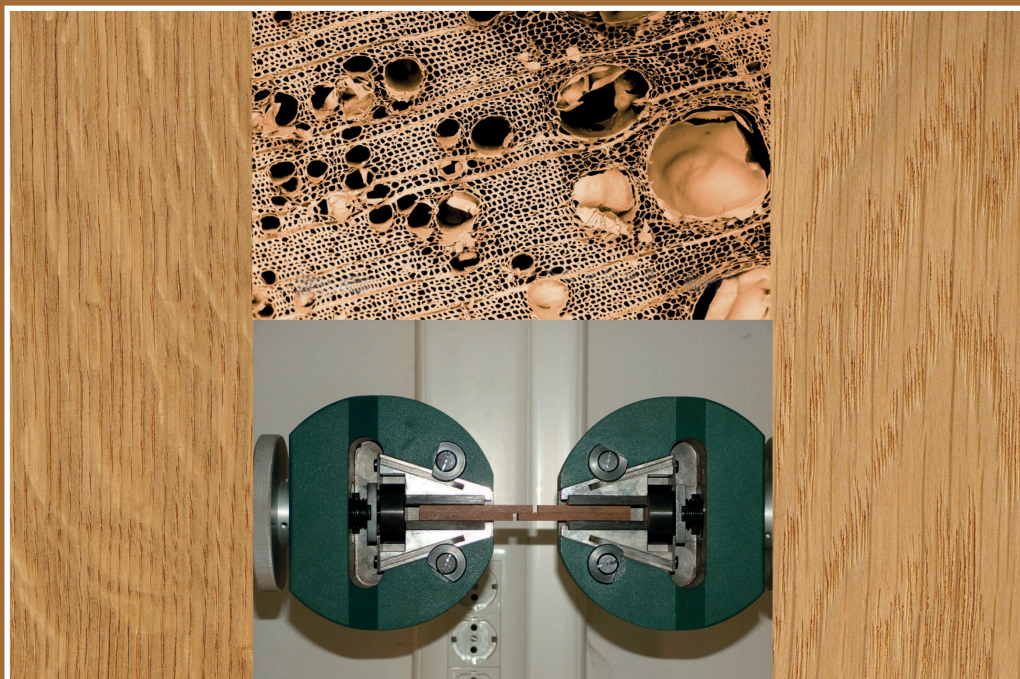


A faanyagtudományok története Magyarországon



Az MTA Erdészeti Tudományos Bizottságának
tanulmánykötete III.



2024

Az MTA Erdészeti Tudományos Bizottságának
tanulmánykötete III.

**A faanyagtudományok története
Magyarországon**

Az MTA Erdészeti Tudományos Bizottságának
tanulmánykötete III.

A faanyagtudományok története Magyarországon

Szerkesztette:

NÉMETH RÓBERT



SOPRONI EGYETEM KIADÓ
Sopron, 2024

A kiadvány a Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományok Osztálya Erdészeti Tudományos Bizottságának kezdeményezésére és irányításával valósult meg.



Jelen kiadvány a Soproni Egyetem Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kara anyagi támogatásával jött létre.

Az egyes fejezeteket lektorálta:
Németh Róbert

Kiadó:
Soproni Egyetem Kiadó

Felelős kiadó:
Prof. Dr. Fábián Attila, a Soproni Egyetem rektora



Creative Commons license: CC BY-NC-SA 4.0 DEED



Nevezd meg! - Ne add el! - Így add tovább! 4.0 Nemzetközi
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International

Borítókép:
Báder Mátyás, Bak Miklós, Németh Róbert

ISBN 978-963-334-512-2 (nyomtatott)
ISBN 978-963-334-513-9 (pdf)
DOI szám: <https://doi.org/10.35511/978-963-334-513-9>

Nyomdai kivitelezés:



INFORM
Kiadó & Nyomda
1149 Budapest, Angol u. 34.
www.informstudio.hu

Budapest, 2024/10

TARTALOM

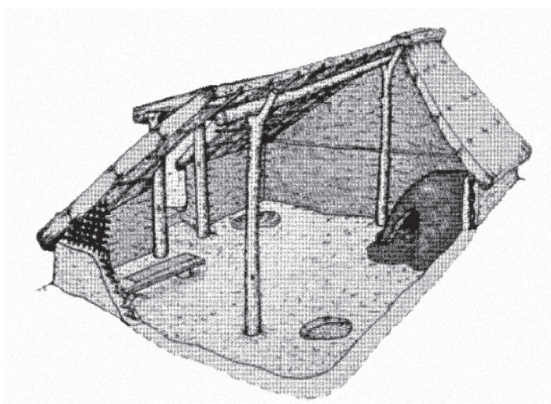
<i>Beköszöntő</i>	6
<i>Előszó</i>	7
Faanatómia	8
Faanyagvizsgálatok	17
Roncsolásmentes faanyagvizsgálatok	29
Faanyagok szárítása és modifikálása	39
Faalapú kompozitok	54
A faanyag színe és színváltozásai	79
A fa mechanikai megmunkálása	90
A fa, mint építőanyag	132
Faanyag ökomérlege	151
Faenergetika	157
Faanyagok ragasztása és felületkezelése	168
Fejezetek a fakémia magyarországi történetéből	202
Faanyagvédelem	233
<i>A kötet szerzői</i>	251

A FA, MINT ÉPÍTŐANYAG

Kánnár Antal, Andor Krisztián és Bellovics Bertalan

Bevezetés, történeti áttekintés

Az emberiség évezredek óta használja a környezetében megtalálható anyagokat, azokkal épít hajlékot magának, segédeszközként használja azokat különböző tevékenységei elvégzéséhez. Ezen anyagok közül kiemelkedik a fa és a faanyag, mely sokoldalú felhasználhatóságával, természetes szépségével mind a mai napig az ember hétköznapijainak és ünnepeinek szerves része.



Szkíta kori veremház rekonstrukciója (Sinkovics 2005)



Jurta (Czifra 2021)

Egyszerűbb faépítményekkel az ősi és a mai természeti népeknél is gyakran találkozhatunk sátrak, egyszerűbb faházak formájában, de megemlíthetjük a honfoglaló magyarok jurtaíit ill. mai legeltetéssel foglalkozó népek jurtaíit, melyek mint ősi, de mai is alkalmazható mobil építmények mintául szolgálhatnak mai fejlesztésekhez is. Manapság jurta hotelek is várják az ökológikus szemléletű vendégeket.

A fával építés egy következő máig alkalmazott módja a fa rönkökből kialakított kevés megmunkálást alkalmazó rönkházak vagy másnéven boronafalás házak építése.



*Tradicionális kanadai rönkház
(www.hir.malepiteszet/gyonyoru-tradionalis-kanadai-ronkhaz/619907)*



Oval olimpiai stadion Richmond – Richmond_Olympic_Oval)

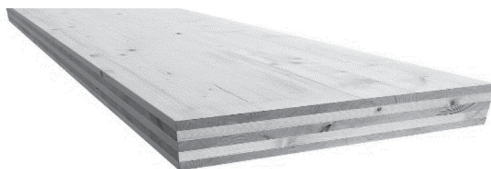
A fával építés új korszaka Otto Hetzer weimari ács találmányával kezdődött el, aki kidolgozta a rétegelt ragasztott fatartók szabványát 1906-ban. Az így ragasztással és hossz-toldással kialakított tartószerkezetekkel, már nagy fesztávolságú tetőszerkezetek váltak megépíthetővé. A technológia lehetővé teszi íves kialakítású tartók gyártását is, így esztétikus fakupolák, különleges alakú faépítmények, fahidak létrehozását is.



*Fahíd Sneek Hollandia Kanada (tartók fesztávolsága 93,9 m)
(www.accoya.com/uk/project/accoya)*

A faszervezetek kis önsúlya és nagy szilárdsága, a faanyag mint megújuló alapanyag környezettudatos felhasználhatósága a rétegelt ragasztott faszervezetek széles körű elterjedéséhez vezetett. Előnyös tulajdonságaihoz sorolható még, hogy megfelelő keresztmetszeti méretek esetén megfelelő tűzállósági értékkel rendelkezik az épület állékonyságának, előírások szerinti megőrzésében, minden egyéb kezelés nélkül. A hatékony és hosszútávú működésükhöz azonban elengedhetetlen a jó minőségű, minősített szilárdságú alapanyag használata, a technológiai feyelem betartása, ezen belül szerkezeti ragasztó használata, valamint a körületekintő tervezés és kivitelezés egyaránt. Az RR tartószerkezetek elterjedésével azonban hosszabb működést követően tartószerkezeti problémák is felléptek. Ezek egyik oka tervezési és kivitelezési tervek be nem tartásából következik, másik része a tartók időbeni viselkedésének nem megfelelő ismerete, a klimatikus hatásokból ébredő sajátfeszültségek számításokból való kihagyása okozza.

A több emeletes modern faépületek felépítését az ún. CLT tömörfa lapok gyártása teszi lehetővé, mely a rétegeltlemezzel gyártáshoz hasonlóan, egymásra merőleges rostirányú deszkalapokat ragasztanak össze. Ezzel a technológiával a faanyag keresztirányú gyenge szilárdsági tulajdonságait küszöböljük ki és egy közel homogén szilárdsági tulajdonságokkal bíró faelemet kapunk, mely faépületek falainak, födémjeinek kialakítását teszi lehetővé.



CLT lap (Fotó: Hantos Zoltán, 2016)



CLT technológiával épült házak Franciaországban (<https://www.construction21.org/articles/h/lensoleillee-efficient-building-of-the-green-building-solutions-awards-2014.html>)

A fenti rövid történeti összefoglaló alapján elmondhatjuk, hogy a fa, mint építőanyag az emberiség életében mindig jelen volt, jelen van és jövőben is várhatóan meghatározó jelentőségű lesz a fenntartható életmód kialakításában.

A faanyag mechanikai tulajdonságainak kutatása a SOE és jogelőd intézményeiben

A faanyag építőmérnöki gyakorlatban való, számításokkal alátámasztott felhasználásának elengedhetetlen követelménye, a faanyag mechanikai tulajdonságainak minél pontosabb ismerete. A faanyagos több évszázados tapasztalati úton való alkalmazásához, a XIX. század előre haladtával egyre inkább méréseken és modellszámításokon alapuló méretezési eljárások társultak. Ezen ismeretek oktatásának nyomai 1808-tól Az Erdészeti Tanintézet óraserkezetében a Mechanika tárgy megjelenésétől eredeztethető. A tárgy szerepe és jelentősége egyre nőtt. A kezdeti heti két elméleti órát 1846-tól a Bányászati és Erdészeti Akadémián heti 5 óra, 1922-től a főiskola Sopronba kerülését követően az óraszám heti 5 elmélet és 4 gyakorlatra nőtt, majd 1962-től egészen napjainkig heti két óra elmélet és 2 gyakorlat a jellemző faipari szakon három szemeszteren át Statika, Szilárdságtan és Mozcástan tárgyak keretében, míg az erdómérnökök Statika és Szilárdságtan oktatásban részesülnek 2 szemeszteren át. A fa, mint építőanyag tulajdonságainak tárgyalása elsősorban a szilárdságtan tárgyban szerepelnek.

A faanyag tudományos igényű kutatása Sopronban 1962-től az önálló Mechanika Tanszék megalakulásával kezdődött meg. Az intézet vezetésével Dr. Rónai Ferencet bízták meg, aki egészen 1991-ig vezette azt.

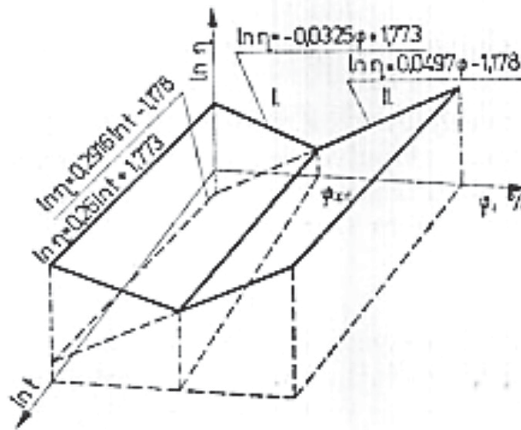
Az intézet a faanyag szilárdsági vizsgálataival mellett, ekkor kezdett a fa reológiai viselkedésének kutatásába. A reológia az anyag hosszú idejű viselkedését kutatja és hosszú idejű vizsgálatok alapján modelleket épít, melyek az alakváltozások és szilárdsági tulajdonságok időbeni változásának minél pontosabb leírását célozzák.

Mint ismeretes az anyagok az időben fáradnak szilárdságuk csökken. Faanyag mint viszko-elasztikus anyag, alakváltozása a kezdeti rugalmas alakváltozást követően az idő-

ben növekszik, ezen folyamatot nevezzük kúszásnak. A feszültségek oldaláról vizsgálva a hosszú idejű viselkedést az tapasztaljuk, hogy a kezdeti feszültségcsúcsok az időben leépülnek, ezen folyamatot relaxációnak nevezzük. Rónai és munkatársai ezen viselkedést kutatták faanyag esetén és jelentős eredményeket értek el. Ezen vizsgálatok eredményeit és a faszervezetek tervezési kérdéseit A fa tartószerkezetek című könyvben foglalták össze 1982-ben (Rónai & Somfalvi 1982). A kötet társszerzője Somfalvi György okleveles faipari mérnök és vasbeton szakmérnök volt.

A könyv 4. fejezete tárgyalja a faanyagok mechanikai tulajdonságait és az azokat befolyásoló különböző paramétereket, mint nedvességtartalom, rostiránnyal bezárt szög, terhelés módja.

Ezen fejezet legterjedelmesebb része foglalkozik a terhelés időtartamának hatásával, így a fenn említett reológiai tulajdonságokkal. Példaként az alábbiakban a kutatási munka egyik fő eredményét mutatjuk be az ún. alakváltozási felületet, mely az idő és a terhelési tényező függvényében mutatja be kúszási jelenséget.



Az erdeifenyő alakváltozási felülete hajlítás esetén φ - $\ln \eta$ - $\ln t$ rendszerben
(Rónai & Somfalvi 1982)

ahol:

- η – a kúszásfüggvény logaritmikus léptékben
- φ – a terhelési állandó, mely a tartós teher okozta legnagyobb feszültség és a pillanatnyi statikus hajlítószilárdság hányadosa
- $\ln t$ – az idő logaritmikus skálán

A függvények alapján a hosszú idejű alakváltozás előre jelezhető. A következő táblázatban különböző terhelési időtartamokhoz tartozó lehajlás értékeket mutatjuk be a kezdeti rugalmas lehajlás függvényében.

Látható, hogy egy 50 éves tervezési időtartam esetén a kezdeti rugalmas lehajlás kétszerese várható 40%-os terhelési tényező esetén. Ezen kimutatott kúszási folyamatok

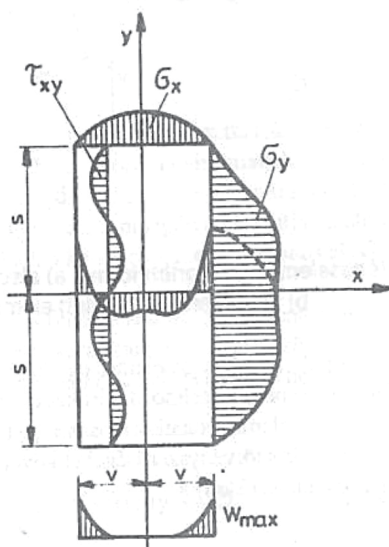
eredménye például a régi tetőkön látható hullámos jelleg, amit részben a szarufák részben a tetőléc kúszása okoz.

A könyv második fele a faanyag tartó szerkezeti tervezését, kapcsolatok kialakítását méretezését mutatja be példákkal Somfalvi György munkája által.

A lehajlás y_0 kezdeti értékeknél erdeifenyőre, $\phi=20\%$ -os és $\phi=40\%$ -os terhelési tényező valamint $t_k=1, 5, 10, 25, 50$ és 70 év esetén

t_k	$\log t_k$	$\eta(t_k, \phi_{20})$	$y(t_k, \phi_{20})$	$\eta(t_k, \phi_{40})$	$y(t_k, \phi_{40})$
1 h	0	2,951	$1,0295y_0$	2,24	$1,022y_0$
1 év	3,9425	30,261	$1,3026y_0$	31,59	$1,3159y_0$
5 év	4,6414	47,534	$1,4753y_0$	50,51	$1,5051y_0$
10 év	4,9425	56,885	$1,5688y_0$	61,83	$1,6183y_0$
25 év	5,3404	72,196	$1,7220y_0$	80,75	$1,8075y_0$
50 év	5,6414	86,497	$1,8650y_0$	98,86	$1,9886y_0$
70 év	5,7876	94,406	$1,9441y_0$	109,05	$2,0905y_0$

A már említett és újabb kutatási eredmények összefoglalása az 1994-ben megjelent A Faipari Műveletek Elmélete szakkönyvben jelent meg Sitkei György szerkesztésében (Sitkei 1994). A könyv 8. fejezetében Rónai összefoglalja a faanyag anyagszerkezeti jellemzőit, szerkezeti fa szilárdsági minősítésének folyamatát, vízfelvétellel és leadással kapcsolatos dagadási és zsugorodási feszültségeinek számításai módszerét.

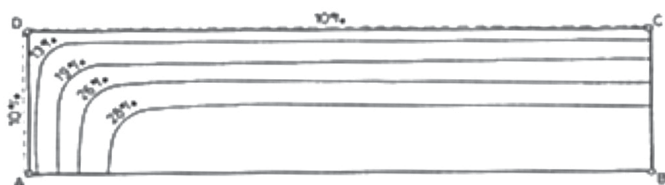


Zsugorodási feszültségek eloszlása fűrészáruban (Sitkei 1994)

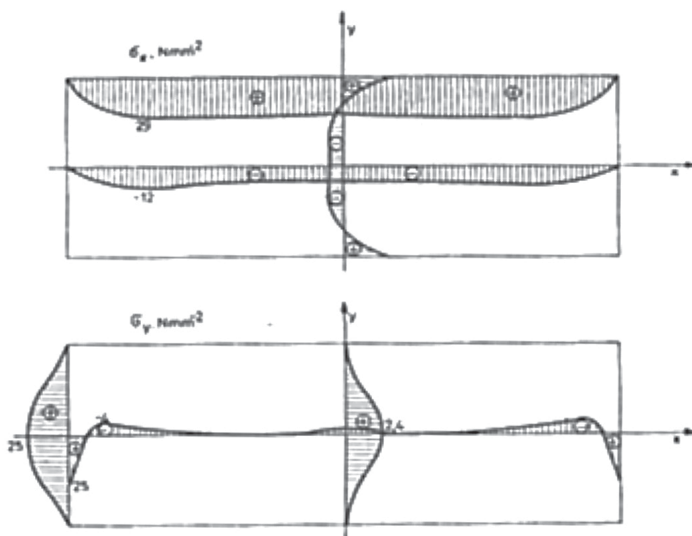
Az ábra egy 40×200 mm-es palló 10%-os nedvességtartalom csökkenés esetén mutatja a belső feszültségeket. $\sigma_x=0,3 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_y=1,5 \text{ N/mm}^2$, T_{xy} a nagyobb normál feszültség 10%-ára tehető.

A könyv jelen fejezete még a rostirány anyagjellemzőkre gyakorolt hatását, a fa mint ortotrop anyag (tulajdonságai irányfüggőek, jellemző főirányai egymásra merőlegesek) rugalmasságtani anyagegyenleteit mutatja be. Érinti továbbá a mérés, a fa törésmechanikájának, valamint a már említett időtartam függő mechanikai tulajdonságainak leírását a kúszási és relaxációs folyamatokat is.

A könyv 9-10. fejezete Fodor Tamás munkája nyomán ismerteti a faanyag visko-elasztikus anyagtörvényének meghatározását, azaz a kúszási és feszültségrelaxációs folyamatok matematikai leírását és számítását. Az elméleti ismereteket követően az anyagegyenlethez szükséges kísérleti adatok meghatározásának módszerét mutatja be nyomóvizsgálatok segítségével. A könyv 10. fejezetében a zsugorodási feszültségek számítását mutatja be hőmérsékletváltozás, majd nedvességtartalom változás következtében.



A száradó fűrészáru jelzett keresztmetszetének nedvességi eloszlása 10 óra elteltével



A száradó keresztmetszet σ_x és σ_y feszültségének eloszlása 10 óra elteltével

Száradó 6000×240×60 mm-es palló nedvességtartalmának és feszültségeinek eloszlása 10 óra száradást követően (Sitkei 1994)

A Mechanika tanszék vezetését 1991-től Dr. Szalai József vette át. Szalai vezetésével a faanyag anizotróp szilárdsági tulajdonságainak elméleti leírása és gyakorlati mérésekkel való igazolása lett az egyik fő kutatási irányvonal az intézetben. Mint ismeretes a faanyag ortogonálisan anizotróp anyag, ami azt jelenti, hogy a három jellemző főirányában (rostirány, sugárirány, húr irány) mechanikai tulajdonságai lényegesen különböznek és ezen irányok egymásra merőlegesek. Egy általános irányban a főirányokban érvényes mechanikai tulajdonságokból, adott irányban jellemző mechanikai jellemző (pl. rugalmassági modulus, szilárdság) matematikai úton kifejezhető. A témában elért eredmények A Faanyag és Faalapú Anyagok Anizotróp Rugalmasság- és Szilárdságtana könyvben kerültek publikálásra 1994-ben, Szalai József munkájaként (Szalai 1994). A munka egyik jelentős eredménye, hogy az általános Hooke törvény (1. képlet) – mely kapcsolatot teremt a feszültség és alakváltozási jellemzők között- faanyagra jellemző alakíthatósági mátrixának elemeit, kihasználva az ortotróp anyagok szimmetria tulajdonságait, sikerült kifejezni olyan rugalmas állandókkal, melyek a gyakorlati mérésekkel megbízhatóan mérhetők. Több olyan rugalmas állandó van, például a harántnyúlási tényezők vagy más néven Poisson tényezők a különböző síkokban, amik nem vagy csak pontatlanul meghatározhatók. Az így kialakult alakíthatósági mátrixban ezek a fő irányokban mért illetve a 45°-os irányhoz tartozó rugalmassági modulusokkal kifejezhetők.

$$\varepsilon_i = S_{ij} \delta_j \quad (1)$$

ahol: ε_i – az alakváltozások (megnyúlások és szögváltozások)
 δ_i – a feszültségek (normál- és nyírófeszültségek)

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix},$$

Az alakíthatósági mátrix elemei rugalmas állandókkal kifejezve (Szalai 1994)

S_{ij} – az alakíthatósági mátrix

ahol: E – rugalmassági modulusz a Rost (L),sugár (R) ill. tangenciális (T) irányokban
 G – nyírórugalmassági modulusz a három fő síkban
 ν – Poisson tényező a különböző síkokon

$$[s_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{1}{2} \left(\frac{4}{E_{LR}^{(45)}} - \frac{1}{E_L} - \frac{1}{E_R} - \frac{1}{G_{LR}} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{4}{E_{LT}^{(45)}} - \frac{1}{E_L} - \frac{1}{E_T} - \frac{1}{G_{LT}} \right) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{4}{E_{LR}^{(45)}} - \frac{1}{E_L} - \frac{1}{E_R} - \frac{1}{G_{LR}} \right) & \frac{1}{E_R} & \frac{1}{2} \left(\frac{4}{E_{RT}^{(45)}} - \frac{1}{E_R} - \frac{1}{E_T} - \frac{1}{G_{RT}} \right) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{4}{E_{LT}^{(45)}} - \frac{1}{E_L} - \frac{1}{E_T} - \frac{1}{G_{LT}} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{4}{E_{RT}^{(45)}} - \frac{1}{E_R} - \frac{1}{E_T} - \frac{1}{G_{RT}} \right) & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix}$$

*Az alakváltozási mátrix elemei mérés technikailag jól meghatározható elemekkel kifejezve
(Szalai 1994)*

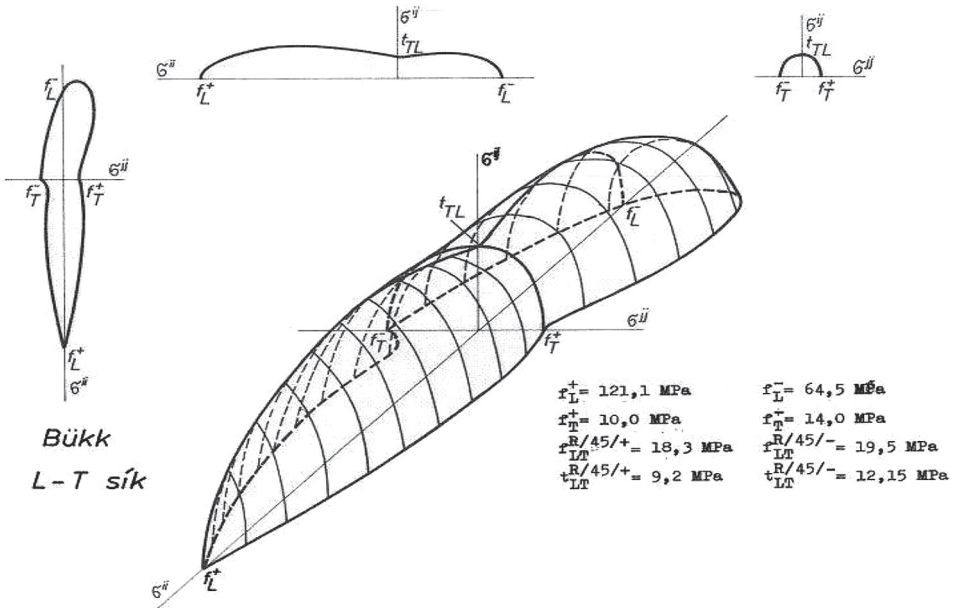
ahol: pl. $E_{LT}^{(45)}$ – az LT síkon rostiránnyal 45° -ot bezáró irányban mért rugalmassági modulusz

Az így felírt alakíthatósági mátrix elemi mérésekkel meghatározhatók (ill. ezen mátrix inverze a merevségi mátrix is képezhető), így a Hooke törvény alapján a feszültségek vagy alakváltozások számíthatók egymásból.

A munka másik nagy eredménye, hogy a faanyag szilárdsági anizotrópiájának leírására vizsgált meglévő szilárdsági kritériumokat az alapján, hogy melyik közelíti leginkább a mérésekkel is igazolható viselkedést. Szilárdságon az anyag maximális teherbíró képességét értjük adott igénybevétellel vagy különböző igénybevételek együttes kombinációjával szemben.

A fa, mint anizotróp anyag esetén a tönkremenetellel kapcsolatos feltételt szilárdsági kritériumnak nevezzük és egy olyan polinom összefüggést értünk alatta, mely megadja, hogy a ténylegesen ható feszültségállapot határállapot-e, azaz fennállása esetén tönkremegy-e az anyag. Szalai a különböző, elsősorban plasztikus anyagokra kidolgozott tönkremeneteli kritériumokat vizsgálja (Tsai-WU, Mises-Hill) és megállapítja, hogy az anizotróp fa esetén ezek nem pontos, esetenként elméletileg hibás eredményt adnak faanyag esetén. Bemutat ugyanakkor egy harmadik Askenázi-féle kritériumot, mely a korábbi másodfokú polinomok helyett egy összetettebb negyed fokú polinomot használ. A szerző kimutatta, hogy ezen szilárdsági kritérium sokkal jobban, a mérésekkel összhangban írja le a faanyag különböző irányokban mérhető szilárdsági viselkedését. Az Askenázi elmélet segítségével síkbeli feszültségállapot esetén néhány szilárdsági érték mérése után ábrázolható az adott anyag szilárdsági felülete, mely szemlélteti a szilárdság irányfüggését adott anyag esetén.

A munka eredményeként tehát lehetővé vált a faanyag anizotróp viselkedésének mérésekkel alátámasztott elméleti leírása, mely a gyakorlati számítások pontosabb megalapozását szolgálhatja.



Bükk szilárdsági diagrammja L-R síkban (Szalai 1994)

ahol: f^+ ill. f^- adott irányban a húzó- ill. nyomó szilárdság; $t^{(45)}$ adott síkban 45°-os rostlefutás mellett húzó vagy nyomóvizsgálat alapján képzett nyírószilárdság

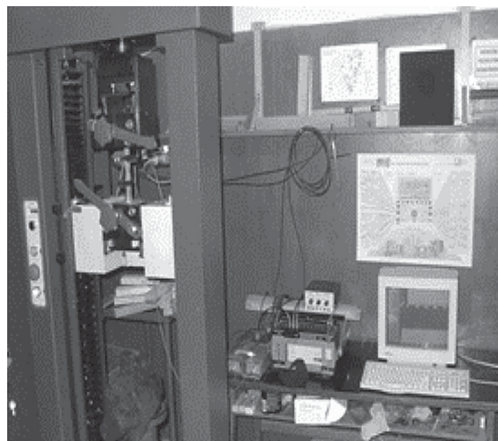
A fával építés népszerűsítésének ill. mérnöki alkalmazásainak egy újabb mérföld köve a 2000-ben Dr. Wittmann Gyula szerkesztésében megjelent Mérnöki Faszervezetek I. kötet (Wittmann 2000). A könyv első fejezetei részletesen tárgyalják az alkalmazható fa- és faalapú anyagokat ezek szilárdsági osztályozásának lehetőségeit, valamint az alkalmazható ragasztó és felületkezelő és egyéb segédanyagait. Bemutatja a hagyományos faszervezeti kapcsolatok mellett a modern mérnöki kapcsolatokat pl. szeglemezes kapcsolatokat, majd a faanyagú tartószerkezeteket taglalja a rétegelt ragasztott tartóktól kezdve a szeglemezes rácsos tartókon át a térrácsszerkezetekig. A könyv második fele a faházak szerkezeti elemeinek építési technikai részleteibe nyújt betekintést, végül a gyártási folyamatokat mutatja be különböző tartószerkezet-típusok esetén.

2001-ben követte az első kötetet A mérnöki Faszervezetek II. kötet, mely részletesen tárgyalja a faszervezetek alapozási kérdéseit Dr. Koszta Miklós illetve Bárti Károly munkája nyomán (Wittmann 2001). A könyv második fele a faszervezetek méretezését és gyártását befolyásoló sajátosságok kerülnek bemutatásra Dr. Szalai József nyomán. Itt a már korábban bemutatott elméleti eredmények felhasználásával, méréseken nyugvó technikai szilárdságok, anizotrópia felületek is bemutatásra kerülnek. A kötet végén a rétegelt ragasztott tartók gyártási és klimatikus feszültségei kerülnek bemutatásra, melyek kedvezőtlen esetben a tartók delaminálódásához, így idő előtti tönkremeneteléhez vezetnek.

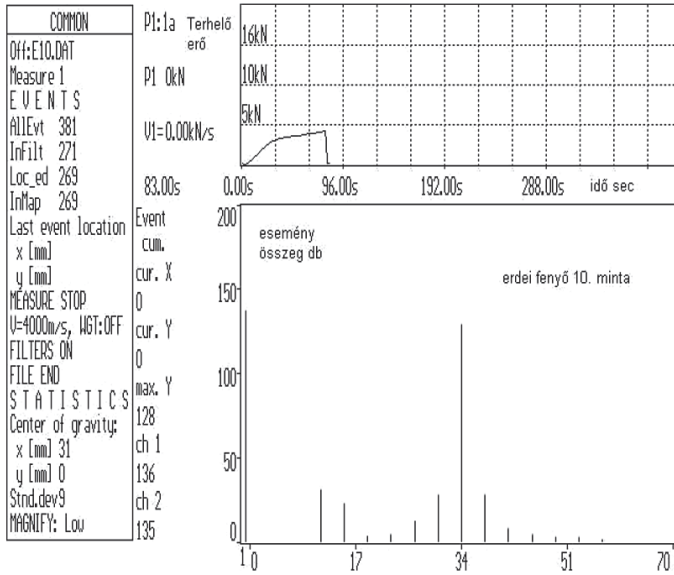
A faanyag anizotróp viselkedésének kutatásai mellett 1996-tól egy ígéretes új kutatási terület a faanyag akusztikus emissziós tulajdonságainak vizsgálata vette kezdetét Kánnár Antal doktori munkája révén. Az akusztikus emisszió (továbbiakban AE) jelenségén a szilárd testben tárolt energia felszabadulása közben (repedés, törés) keletkező rugalmas hullámokat értjük. Az AE tehát nem más, mint anyaghang, „beszéd”. Minden anyag más-más nyelven „beszél”, nekünk ezt a „nyelvet” kell megértenünk, feldolgoznunk az anyaggal kapcsolatos vizsgálatok során. A mérések során a megfelelően kialakított, közepén másodlagosan is gyengített próbatesteket anyagvizsgáló gépben általában húzással tönkre tesszük, miközben a ráerősített piezoelektromos érzékelők segítségével detektáljuk a tönkremenetel során keletkező ultrahang tartományú eseményeket. Ezen jelek fizikai tulajdonságainak, mennyiségének és eloszlásának elemzésével értékes következtetéseket vonhatunk le a fa tönkremeneteli folyamataival, törési természetével kapcsolatban. A kísérletek tanúsága szerint faanyag esetén a 20–250 kHz tartományt kell megjelölni az akusztikus emisszió frekvencia tartományaként.

A vizsgálatok során kimutattuk, hogy fémekkel ellentétben a faanyag bár rövid időn belül mutatja, néhány hónap elteltével nem mutatja az ún. Kaiser effektust, azaz, hogy korábbi terhelési szint alatt is akusztikusan aktívvá válik. A terhelési előtörténete (nagy hőteher vagy szélteher maximuma) így nem kimutatható egy újabb terhelési ciklusban.

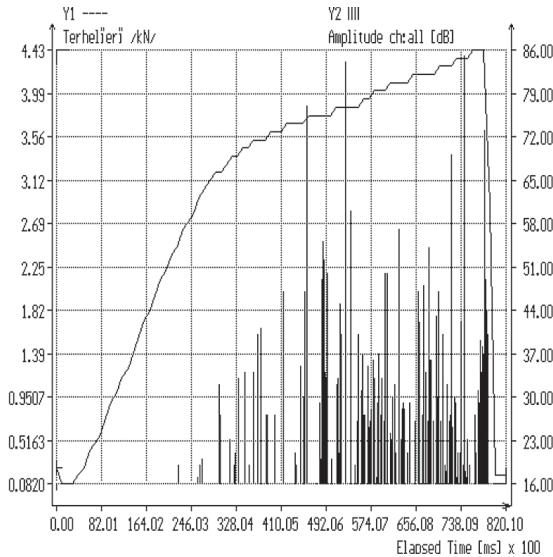
A vizsgálati módszer lehetővé teszi, hogy meghatározzuk a tönkremeneteli események keletkezési helyét a két érzékelő közti gyengített keresztmetszetben. Azt találtuk, hogy a faanyag terhelése során a mikro-tönkremenetek véletlenszerűen keletkeznek az egész terhelt térfogatban az egyes fa részek adott pillanatban kialakult feszültségi állapotának kritikus kereszt-metszeteiben.



*Az akusztikus emissziós mérőrendszer (bal), az érzékelők rögzítése gumigyűrű segítségével (jobb)
(Fotó: Kánnár Antal, 2014)*



Erdei fenyő akusztikus minta emissziója bűzás során (Kánnár 2014)

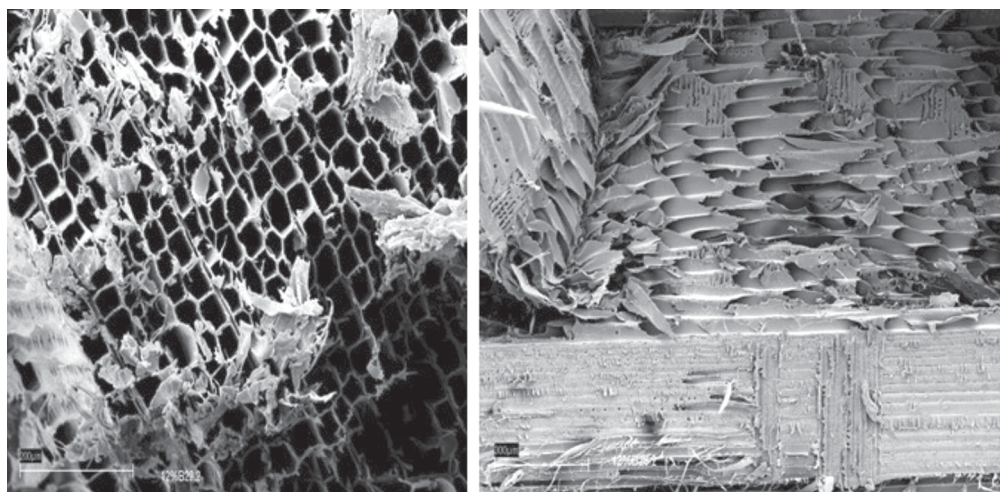


Erdeifenyő hibahely lokalizációs térképe (Kánnár 2014)

A fa tehát nem csak a kritikus (leggyengébb) keresztmetszetben megy tönkre, hanem az egész terhelő térfogat is jelentős mértékben tönkremegy. A faanyag esetén az akusztikus aktivitás, azaz a tönkremeneteli folyamatok kezdete a törőterhelés 80–90%-nál kezdődik csupán, mely a fa rideg törési természetére utal.

Az akusztikus emissziós vizsgálatokkal párhuzamosan a tönkrementeli felületek elektronmikroszkópos vizsgálatait is lefolytattuk, a tönkrementeli folyamatok minél alaposabb megismerése céljából.

Az elvégzett nagyszámú vizsgálat alapján a húzás során létrejött töréskép szakadá-
sos vagy nyírási jellegű. 12% nedvességtartalom mellett létrejött szakadás jellegű törési
felület nagymértékben hasonló az abszolút száraz lucfenyő törési felületéhez. A sejtek
nagy része sejt falon átmenő rideg jellegű töréssel ment tönkre, míg helyenként tracheida
kötegek kihúzódását figyelhetjük meg. Ezek oldalfelületein nyírási tönkrementel kö-
vetkezett be. A nedvességtartalom növekedése nem okozott tehát változást a szakadásos
jellegű törési felületen.



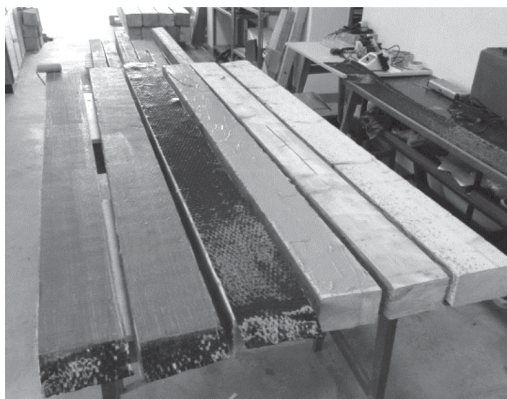
12% nedvességtartalom mellett létrejött szakadásos (bal) és nyírási jellegű (jobb) törési felület húzás során (Fotó: Kánnár Antal, 2014)

A törési felületek vizsgálata tehát alátámasztja a szakirodalmi megállapításokat mi-
szerint a faanyag törése rideg jellegű. A vizsgálatok alapján az abszolút száraz faanyagra
vonatkoztatott megállapításokat kiterjeszthetjük a nagyobb nedvesség-tartalmú minták-
ra is. Sikert tehát alátámasztani – a mikro-tönkrementeli folyamatokra vonatkozóan
– azt a feltevést miszerint a nedvességtartalom növekedésével a faanyag tulajdonságai fo-
lyamatosan, de nem alapvetően változnak (James 1961). A nedvességtartalom növekedése
tehát alapvetően nem változtatja meg a faanyag mikro-tönkrementeli folyamatainak
jellegét a faanyag rideg módon törnek.

Mindezen ismeretek összefoglalása A faanyag mikro- és makro- tönkrementeli fo-
lyamatai című könyvben jelent meg Kánnár Antal szerzői munkája nyomán 2014-ben
(Kánnár 2014). A kötetben helyet kaptak az iparában alkalmazott rétegelt ragasztott fa
tartószerkezetekben előforduló tönkrementeli folyamatokkal kapcsolatos országos fel-
mérési eredményei és a tervezést segítő ajánlások. Az ipar részéről a Bartal és Rabb Kft.
vett részt az ipari adatgyűjtésben és a tervezői ajánlások megfogalmazásában.

Az alapkutatásokon túl alkalmazott kutatások is folynak az intézetben Dr. Andor Krisztián vezetésével, aki 2000-től tagja az intézetnek és 2012-től vezeti azt. Az általa végzett kutatások témája a faanyag szénszálalás megerősítésének vizsgálata.

Jelentős igény mutatkozik ugyanis fafödémek megerősítési módszerek vizsgálatára a betonnak, mint építőanyagnak az előnyös tulajdonságai (formázhatóság, nagy szilárdság, önthetőség, tartósság, hőtároló-képesség, vegyi ellenálló-képesség) ellenére fennálló környezetvédelmi aggályok és a fával nem jó egységet alkotó tulajdonságai (jelentős többletsúly, nedves technológia) miatt, amire a szálerősítéses technológia megoldást jelenthet.



Szénszállal erősített fagerendák (Fotó: Anon.)

A szénszálalás megerősítés technológiáját valós méretű gerendákon kísérleteztük ki. Épület átalakítása során felszabaduló bontott gerendák szolgáltatták a kísérleti próbatesteket, melyek egy részét megerősítettük, a másik része referenciamintaként szolgált. A laboratóriumi vizsgálatok során 4-pontos hajlítást végeztünk 3 próbatestcsoporton, mely során a törőerőt és a lehajlítást mértük.

A kutatás során bebizonyosodott, hogy a szénszálalás technológiával lehetséges megerősíteni fafödémeket. A szénszálalás technológiának számos előnyét sikerült igazolni:

- anyaghatékonyság,
- könnyű alkalmazhatóság
- előnyös viselkedés

A vizsgálatok igazolták, hogy a megerősített tartószerkezet merevsége 8%-kal növekedett, mely során a használhatósági kritériumok teljesültek, a szilárdságnövekedés mértéke a teherbírási követelményeknek történő megfeleléshez elegendőnek bizonyult. A megerősített faszervezeti elemek törőterheinek szórása lényegesen kisebb volt, mint a referenciaminták törőterheinél, így a szénszálalás technológiával megerősített gerendák biztonságosabb építőanyagként számíthatnak.

Nem utolsó sorban a szénszálalás megerősítés technológiának az ökológiai lábnyoma nagyságrendekkel kisebb, mint a betontechnológiával történő megerősítésé, technológiai eljárása lényegesen egyszerűbb. (Andor et al. 2015)

Szénszálerősítésű fagerenda vizsgálatok teherbírás növekedési eredményei

Csoport	Fa (referencia)*	0,5R	R	Rr	0,5Rl	Rld
Megerősítés módja	Nincs	Egy rtg sikawrap fél gerenda- szélességben	Egy rtg sikawrap teljes gerenda- szélességben	2 Rtg sikawrap teljes gerenda- szélességben	Egy rtg sika lamella fél gerenda- szélességben	Egy rtg sika lamella teljes gerenda- szélességben
Mintaszám (db)	17	8	20	8	10	10
Átlagos törőerő mértéke (kn)*	19,7	27,5	30,5	30,9	29,7	35
Szórás (kn)	6,6	5,9	5,7	3,8	4,8	4
Teherbírás növe- kedés referenciá- hoz képest (%)	–	39	55	57	51	77

Előbbi kutatási projekthez kapcsolódóan Bellovics Bertalan egyetemi tanársegéd, aki 2019-től tagja az intézetnek, mechanikai modellt épít végeelem módszerrel, a szén és kenderszálerősített fatartó mechanikai modellezése céljából.

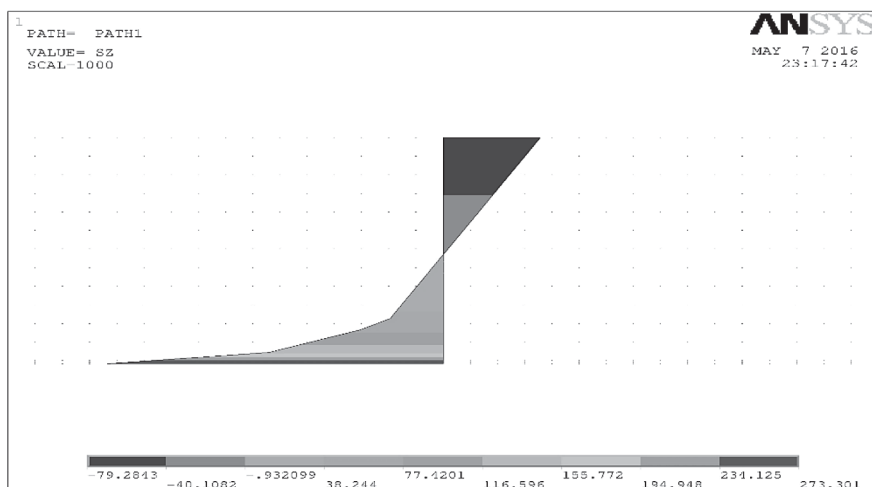
A házépítésben már régóta alkalmazzák a faanyagot. Elsősorban födémek készítéséhez. Ezek az úgynevezett fafödémek mind a mai napig tartószerkezeti szerepet töltenek be a ma is álló régi házakban, épületekben. A mai kor elvárásai gyakran megnövekedett teherbírási igényt támasztanak ezekkel a födémekkel szemben. Ezeknek az új elvárásoknak történő megfeleltetés legtöbbször vasbetonszerkezettel történő megerősítés révén teljesíthető.

Mivel a beton korunk egyik legkörnyezetszennyezőbb építőanyaga, míg a fa egy biológiailag megújuló építőanyag, paradox e tekintetben a két összetevő kényszerű kombinálása. Korunk egyik praktikus és divatos új szerkezeti anyaga, a szénszál, megfelelő technológiával adoptálható a faanyagra is. Erre vonatkozó számos kutatás a jelentős teherbírás-növekedésre bizonyítékot szolgáltatott (Borosnyói 2013; Bellovics 2016). A régi fafödémek utólagos megerősítési lehetőségét is ebben látjuk, kiváltva ezzel a betontechnológiás megerősítést.

Amennyiben a szénszálat sikerülne helyettesíteni egy természetes, hasonló szerkezetű anyaggal, akkor egy teljesen természetes anyagú megerősített faszerkezethez jutunk.

Mivel intézetünk már régebb óta foglalkozik faszerkezeti elemek megerősítésével, így a laborméréseken kívül elkezdődött az említett szerkezetek végeelem-módszerrel történő modellezése. Erre egyrészt azért volt szükség, hogy a belső feszültségi és alakváltozási viszonyok ismeretében egy jól alkalmazható számítási eljárást dolgozzunk ki, másrészt a kompozit termék rugalmassági modulusának kiszámítására teherhordási irányban. A laborméréshez készült próbatetek szolgáltatták a viszonyítási alapot, hogy minél realisabb végeelem-modellt tudjunk készíteni (Borosnyói 2013).

A modellezés első fázisa során tehát az belső igénybevételek (feszültség és nyúlás) kerültek összehasonlításra a labormérések eredményeivel. Az összehasonlításra azért volt szükség, hogy meg tudjuk ítélni, hogy a végeelem szimulációval kapott nyúlás és feszültség értékek mennyire közelítenek a laborban mért eredményekhez. A levont következtetéseket meghatározta egyrészt a labormérésekhez külön készült elemzés, a mérési módszerek másrészt a modellezéshez használt eljárás. Az összehasonlításból kiderült, hogy a sima fagerenda jó közelítéssel volt modellezhető, mind a feszültség, mind a nyúlási adatok kevés eltérést mutattak egymáshoz képest. A megerősített próbatetek esetében a belső feszültség eloszlást nem tudtuk mérni, csak közelítő módon számolni, ezen számítások viszont nem adták vissza a várható képet. Így itt nem volt összehasonlításra alap, csak a végeelem-program által számolt adatokra tudtunk hagyatkozni.



Szálerősítésű fagerenda feszültségviszonyai FEM modell alapján

A fajlagos alakváltozások tekintetében azonban voltak kirívó eltérések. Ezek mérése a laborban nyúlásmérő bélyegekkel történt, aminek nagy hátránya, hogy csak síkbeli alakváltozást mérnek, így ezek belső eloszlását csak becsléssel tudtuk következtetni. Ezzel a módszerrel nem lehetett egyértelműen megállapítani, hogy a modellel, vagy a méréssel lett volna a fő probléma. Minden összevetve a modell jelenlegi állapotában alkalmasnak tűnt a további mérésekhez. Azonban a végeelem modellből történő rugalmassági modulusok meghatározása során kiderült, hogy az eddig használt lineáris anyagmodell a megerősített próbatetek esetén nem adja vissza a laborban mért eredményeket, hiszen jelentős eltérések vannak az adatok között. A következő lépés tehát egy nemlineáris anyagmodell kidolgozása lesz, melynek során összehasonlításra kerülnek a labor és a szimuláció által létrehozott terhelés-lehajlás grafikonok.(Bellovics 2016)

Összefoglalás

Jelen írásunkban röviden igyekeztünk felvázolni a Mechanika intézet elmúlt 60 évének főbb kutatási eredményeit, a teljesség igénye nélkül. Mind a mechanika mint tudományág szerteágazó tudományterületei, mind a faanyag mint biológiai anyag sokszínűsége és összetettsége, mind a múltban, mind a jelenben és természetesen a jövőben is sok érdekes kutatási témát szolgáltatott és szolgáltat a kutatók számára. A jelen és jövő kutató nemzedékeire sok munka vár tehát, hogy ezen nemes és szép anyagot minél pontosabban megismerje, a jelen és jövő új vizsgálati módszereivel anyagtulajdonságait egyre mélyrehatóbban feltárja és még eddig fel nem fedezett új alkalmazási területeken, új módokon használja a fát mint építőanyagot.

Irodalom

- Andor K., Lengyel A., Polgár R., Fodor T. & Karácsonyi Z. 2015: Experimental and statistical analysis of spruce timber beams reinforced with CFRP fabric. *Construction and Building Materials* 99: 200–207.
- Andor K. & Bellovics B. 2020: Analysis of modulus of elasticity of spruce beams under bending with and without fibre reinforcement. *WOOD RESEARCH* 65(1): 101–110.
- Bejő L., Láng E., Szalai J., Kovács Zs. & Divós F. 2003: Lombos fafajok ortotrop szilárdsága és rugalmassága. II. rész: kísérleti eredmények és következtetések. *Faipar*. LI. Évf. 2003/4: 8–16.
- Bejő L., Láng E., Szalai J., Kovács Zs. & Divós, F. 2003: Lombos fafajok ortotrop szilárdsága és rugalmassága. I. rész: elméleti alapok, kísérleti módszerek. *Faipar*. LI. Évf. 2003/2: 19–25.
- Bellovics B. 2016: Szénszál erősítésű fagerenda modellezése. Diplomamunka. Soproni Egyetem.
- Borosnyói A. 2013: Betonszerkezetek korrózióállóságának biztosítása innovatív, szálerősítésű polimer (FRP) anyagokkal. *Építőanyag* 65 (1)
- Czifra Sz. 2021: A szkíta kori építészet rejtélyei. <https://mnm.hu/hu/cikk/szkita-kori-epiteszet-rejtelyei>
- Dr. Wittmann Gyula (2000): Mérnöki faszervezetek I. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó 2000. 411. o.
- Hantos Z. 2016. CLT/XLT A keresztrétegelt falemez. *Magyar asztalos*. 2016 Szeptember: 18–20
- James W.L. 1961: Effect of temperature and moisture content on internal friction and speed of sound in Douglas fir. *Forest Product Journal* (9): 383–390.
- Kánnár A. & Szalai J. 2011: Theoretical and experimental investigations of damage development of glulam beams. The 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium 2011. szept 14–16. Sopron Hungary. *Proceedings* 367–374.
- Kánnár A. & Szalai J. 2002: Réteges felépítésű faszervezeti elemek klíma-változás során bekövetkező vetemedésének és sajátfeszültségeinek számítása. 2. rész: Az elméleti levezetések eredményeinek alkalmazása. *Faipar* L. évf. 2002/4: 7–12.
- Kánnár A. 2014: Evaluation of glulam beams' performance in special environmental conditions. *Wood Research* Vol. 59(5): 803–812.
- Kánnár A. 2014: A faanyag mikro- és makro- tönkremeneteli folyamatai. Szerzői kiadás 2014. 152 o.

- Lang E.M., Bejő L., Szalai J., Kovács Zs. & Andersin R.B. 2002: Orthotropic Strength and Elasticity of Hardwoods in Relation to Composite Manufacture. Part II. Orthotropy of Compression Strength and Elasticity. *Wood and Fiber Science*. 34(2): 350–365.
- Molnár S. & Bariska Mihály 2002: Magyarország ipari fá. Szaktudás Kiadó Ház. 210 o.
- Rónai Ferenc & Somfalvi György (1982): Fa tartószerkezetek. Műszaki Könyvkiadó. 372 o.
- Sinkovics I. 2005: A magyarság magánélete. <https://www.arcanum.com/hu/online-kiadvanyok/Domanovszky-domanovszky-magyar-muvelodestortenet-1/elso-kotet-osmuveltseg-es-kozepkori-kultura-4A/sinkovics-istvan-a-magyarsag-maganelete-25B/>
- Sitkei György 1994: A faipari műveletek elmélete. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 539 o.
- Szalai J., Niemz P., Andor K., Bariska M. & Howald M. 2004: Untersuchungen zum Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf das Bruchverhalten von Fichte bei Zugbelastung in Faserrichtung. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*. 155(1): 1–5.
- Szalai József (1994): A faanyag és faalapú anyagok anizotróp rugalmasság- és szilárdságtana. *Erdészeti és Faipari Egyetem*, 398 o.
- Szalai J. & Kánnár A. 2002: Réteges felépítésű faszervezeti elemek klímaváltozás során bekövetkező vetemedésének és sajátfeszültségeinek számítása. 1. rész: elméleti összefoglaló. *Faipar L. évf. 1: 19–23*.
- Szalai J. 2003: A természetes faanyag szilárdsági felületének jellemzői. *Építés- Építészettudomány XXXI (1-2): 43–59*.
- Szalai J. 2004: Technische Festigkeiten der Pannonia Pappel (*Populus x euramericana* cv. Pannonia) und der Zerreiche (*Quercus cerris* L.). *Acta Silv. Lign. Hung.* Vol. 1: 1–9.
- Szalai J. 2008: Festigkeitstheorien von anisotropen Stoffen mit sprödem Bruchverhalten. Teil 1: Vergleich und Beurteilung der anisotropen Festigkeitskriterien auf Grund von theoretischen Überlegungen. *Acta Silv. Lign. Hung.*, Vol. 4: 61–79.
- Wittmann Gyula (2001): Mérnöki faszervezetek II. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, 262 o.
- Heavy-traffic Accoya Glulam Bridge at Sneek, the Netherlands; <https://www.accoya.com/uk/project/accoya-wood-used-for-heavy-traffic-road-bridges/>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Richmond_Olympic_Oval
- <https://hir.ma/epiteszet/gyonyoru-traditionalis-kanadai-ronkhaz/619907>
- <https://www.construction21.org/articles/h/lensoleillee-efficient-building-of-the-green-building-solutions-awards-2014.html>

Wood as a building material

For thousands of years, humanity has used the materials in its environment to build shelters and as tools to carry out its activities. Among these materials, wood and timber stand out, and their versatility and natural beauty have made them an integral part of everyday life and celebrations. The Institute of Mechanical Engineering has been carrying out research for about 60 years on the definition of models and their constants to better describe the elastic behaviour of wood as a building material. The main research areas have been as it follows: Definition of rheological models and properties of wood. Determination of the own stresses due to temperature and moisture content variation.

Determination of the elastic properties of wood as an anisotropic material, and experimental verification of the material law of anisotropic behaviour. Acoustic emission material tests to investigate the damage processes of wood and to determine the nature of fracture. Strength testing of carbon fibre reinforced wood elements and assessment of their practical applicability.