

Tönkremenetel előrejelzés egyenes rétegelt-ragasztott fa tartóknál

Major Balázs, 1. fmh., MSc.

2012.

Tönkremenetel előrejelzés egyenes rétegelt-ragasztott fa tartóknál

Dolgozatot írta: Major Balázs, 1. fmh., MSc.

Témavezető: Tóth Árpád doktorandusz

Tönkremenetel előrejelzés egyenes rétegelt-ragasztott fa tartóknál

Konzulens: Tóth Árpád doktorandusz

Készítette: Major Balázs, 1. fmh., MSc.

Sopron, 2012. 03. 29.

A dolgozat elkészítése a TALENTUM – Hallgatói tehetséggondozás feltételrendszerének fejlesztése a Nyugat-magyarországi Egyetemen c. TÁMOP – 4.2.2. B – 10/1 – 2010 – 0018 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Tartalomjegyzék:

1)	A faszerkezetek:	5
a)	A szerkezeti célra alkalmas fafajok:	5
b)	A szerkezeti alkalmazást befolyásoló fizikai tényezők:	6
c)	A rétegelt ragasztott fatartószerkezetek tulajdonságai:	7
d)	A rétegelt ragasztott fatartók alkalmazási területe:	8
2)	Tönkrement rétegelt-ragasztott tartós épületek Európában:	8
3)	A tartók tönkremenetelének okai:	12
4)	Ohm törvénye és az ellenállás:	14
5)	Tartók tönkremenetelének előrejelzési lehetősége:	16
a)	Eddigi technológiák:	16
b)	Új megoldás - Tartó deformáció mérés beépített nyúlásmérővel:	18
6)	Mérések:	19
a)	Az 1. kísérlet:	19
b)	A 2. kísérlet:	20
7)	Eredmények:	29
8)	Tapasztalatok:	29
9)	További kutatási javaslatok, lehetőségek:	30
10)	Köszönetnyilvánítás:	31
11)	Irodalomjegyzék:	32
12)	Melléklet:	33

1) A faszerkezetek:

A faszerkezetek lényegében egyidősnek tekinthetők az emberiséggel, már a kőkorszaktól kezdve találkozhatunk velük. Folyamatosan fejlődtek, erősödtek szépültek, átalakultak, lássuk tehát a modern faszerkezeteket.

A faszerkezetek hagyományosan főként természetes faanyag felhasználásával készülnek, de előállításuk során ma már a természetes faanyag mellett más faalapú anyagok és egyéb szerkezeti elemek (pl.: acél anyagú kapcsolóelemek), bevonatok is alkalmazást nyernek. A faszerkezetek alapanyagai lehetnek:

- szerkezeti faanyagok
- faalapú agglomerált lemezek
- egyéb faalapú ragasztott szerkezeti elemek
- nem faalapú szerkezeti anyagok
- egyéb (nem szerkezeti) anyagok

A szerkezeti faanyagok lehetnek az alapanyag állapotától, megmunkáltságának fokától függően:

- természetes állapotú szerkezeti állapotú szerkezeti faanyagok
- ragasztott faválasztékok.

a) A szerkezeti célra alkalmas fafajok:

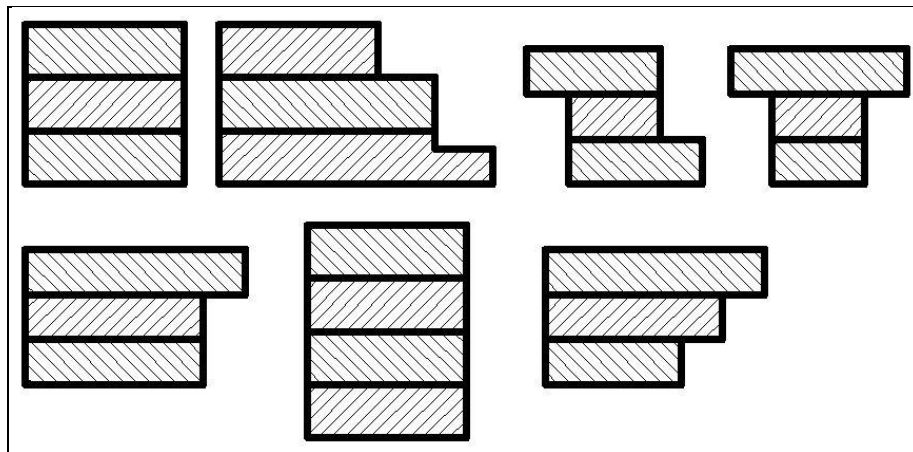
Elvileg egyik fafaj sem zárható ki a szerkezeti alkalmazás területéről, mégsem használják valamennyi fafajt ezen a területen. Ennek gazdaságossági szempontok, szerkezeti jellemzők és követelmények szabnak határt. A leginkább használatos fafajok a következők:

- luc-, jegenye-, duglasz- és *erdeifenyő*, tölgy és esetleg az akác
- speciális célokra a vörösfenyő
- valamint megfelelő faanyagvédelmi eljárások mellett megfelelő lehet a bükk, nyár és az éger.

A faszerkezeti célra alkalmazott faanyagokkal szemben magas elvárásokat támasztanak, ezek fizikai és mechanikai sajátosságok valamint speciális jellemzők (megmunkálhatóság, telíthetőség, ragaszthatóság, stb.). Köztudott, hogy a fenyőfélék alaki, méreti, fizikai és mechanikai tulajdonságai, valamint szöveti felépítésük, megmunkálhatóságuk alapján szerkezeti célra történő alkalmazásukkor jobban kedvelt fafajok.

b) A szerkezeti alkalmazást befolyásoló fizikai tényezők:

- térfogati sűrűség (A térfogati sűrűség a fafajra jellemző tulajdonság, a $0,40 \text{ g/cm}^3$ alatti térfogati sűrűségű fajok szerkezeti célú alkalmazása műszaki és technikai szempontok alapján nem kívánatos és gazdaságossága is vitatható)
- nedvességtartalom (Az anyag szerkezeti alkalmazása szempontjából fontos, mert szilárdsági eltéréseket, méretváltozásokat repedéseket és gombainfekció lehetőségét hordozza magában. A szerkezeti faanyagok nedvességtartamát a beépítés helyén várható átlagos egyensúlyi fanedvesség alapján határozzuk meg.)
- Dagadás, zsugorodás (A fellépő méretváltozások értéke az anatómiai irány függvényében jelentős eltérést mutat, fellépése a szerkezetekben rendkívül kellemetlen, sőt veszélyes lehet.)
- hő okozta méretváltozások (Általános esetben a hatása ellentétes az eközben fellépő zsugorodással, így elhanyagolható és számolni sem szükséges vele.)
- a fa égési sajátosságai (Ilyen szempontból a faanyag előnyös szerkezeti anyag, mert rossz hővezető ezért nehezen melegszik át, így hosszabb ideig megőrzi teherbíró képességét, továbbá a tűz hatására képződött faszén réteg pedig még jobban növeli ezt a szigetelő tulajdonságot. Ezáltal segíti a teherbírás megtartását és növeli a mentés lehetséges időtartamát.)
- egyéb épületfizikai tulajdonságok



1. ábra: Rétegelt-ragasztott épületasztalos-ipari elemek szelvény kialakítása

(WITTMANN, 2000)

A rétegelt ragasztott épületasztalos-ipari anyagok négyszög, esetleg profil (L, T) szelvény kerülnek kialakításra (1. ábra). A profil szelvény gazdaságosabb. Szokásos fajok: erdei-, luc-, vörös-, duglászfenyő és tölgy. A szelvény mérete (a későbbi megmunkálási veszteségekre is tekintettel) az ajtó- és ablakszerkezeti elemek méreteihez igazodik és legalább három rétegből épül fel!

Keresztmetszeti kialakítása szimmetrikus az elemek vastagsága illetve rétegfelépítése, fafaj (vegyes fafajú elem esetén) és a faanyag struktúrája (évgűrűk, korai-késői pászta stb. helyzete) tekintetében egyaránt.

(WITTMANN, 2000)

c) A rétegelt ragasztott fatartószerkezetek tulajdonságai:

a) Keresztmetszet, szilárdság:

Legfontosabb előnyös tulajdonságuk, hogy vékony keresztmetszetű anyag felhasználásával tetszőleges nagyságú keresztmetszetet lehet előállítani. A tartókeresztmetszet szélessége általában állandó és nem haladja meg a 200mm-t. Szélességében változó keresztmetszetű rétegelt ragasztott fatartót – különösen íves alakút – körülményes gyártástechnológiája miatt nem igen készítenek. Változtatható viszont a keresztmetszet magassága, így egyenszilárdságú tartók is kialakíthatók. A réteges felépítés egyben a tartó szilárdságának növekedéséhez is vezet. Ennek oka, hogy a rétegek fahibái egyenletesen oszlanak el és területük a nagy keresztmetszethez képest elhanyagolható.

b) Fesztávolság:

20-60 m-es fesztávok az átlagosak, de a 100-200 m-es távolságok is könnyen kivitelezhetők. 20-30 m-es fesztáv felett bármely más szerkezethez képest olcsóbb, szerelésük, kivitelezésük egyszerűbb. A távtartók hosszát – a hossztoldás korlátlan lehetősége miatt – csak a szállíthatóság befolyásolja.

c) Szerkezeti súly:

Ezen tartók önsúlya lényegesen kisebb, mint az acél vagy a vasbetonszerkezeteké. Azonos teherbírású szerkezeteket összehasonlítva megláthatjuk, hogy acél esetén 2-szer, vasbeton esetén 5-8-szor nehezebb, mint a fatartó.

d) Korrózióállóság:

A faszerkezet igen jól ellenáll a savak, lúgok gőzeinek, mert a fa anyagának vázát alkotó cellulóz kémiaiilag igen stabil. A faanyag külső felületét korrozív közegben vékony, oxidálódott réteg vonja be, ami elszigeteli a belső részt és a felületen adszorbeálja a vegyi anyagokat. A faanyag alacsony hővezető-képessége magas légnedvességű térben is megakadályozza a páralecsapódást.

e) Előregyártás, megmunkálhatóság:

Iparosított a gyártásuk, mely lehetővé teszi az elemek pontos elkészítését és a vázszerkezet helyszíni szerelését. A fa a könnyen megmunkálható anyagok közé sorolható, így a gyártás energiaigénye alacsony.

f) Fajlagos anyagfelhasználás:

Anyagfelhasználásuk meglehetősen alacsony:

- 25-30 m-es fesztávoknál $0,025 \text{ m}^3/\text{m}^2$ lefedett terület,
- nagyobb fesztávoknál $0,04\text{-}0,05 \text{ m}^3/\text{m}^2$ lefedett terület.

Ez azt jelenti, hogy 100 ezer m^3 rétegelt ragasztott fatartó 2-4 millió m^2 terület lefedésére elegendő.

d) A rétegelt ragasztott fatartók alkalmazási területe:

A rétegelt ragasztott faszerkezetű épületek felhasználási területe szinte korlátlan.

Nézzük tehát a legfontosabb területeket:

a) Mezőgazdaság:

- állattartási épületek
- műtrágya-, gabonaraktárak
- gépműhelyek, nyitott gépszínek

b) Ipar:

- tűz- és robbanásveszélyes ipari csarnokok
- üzemanyagraktárak
- vegyianyagraktárak
- galvanizáló üzemek
- faipari üzemek, raktárak
- textilgyárak épületei

c) Kulturális- és sportlétesítmények:

- oktatási intézmények tornatermei
- tömegsportolási lehetőségeket biztosító nagy fesztávú csarnokok
- fedett uszodák
- termálfürdők
- kultúrházak hangversenytermek

(SZALAI, 1985)

2) Tönkrement rétegelt-ragasztott tartós épületek Európában:

Több esetről tudunk, olyan épületek összedőléséről, ahol a rétegelt-ragasztott szerkezet tönkremenetele, hibája miatt történt akár halálesettel járó baleset. 1999. december 3-án, a svájci Dachauban a Nemzeti Szakképzési Iskola 3-as számú tornatermének tetőszerkezete összeomlott. A teljes tönkremenetel előtt félórával még 24 gyerek és egy tanár

volt a csarnokban, akkor hagyták el a csarnokot mikor a tető elkezdett recsegni és szálkák, fadarabok hullottak a tanulók közé.



2. ábra: Az iskola tornatermének beszakadt tetőszerkezete (Forrás: <http://www.konrad-fischer-info.de/DA02.JPG>)



3. ábra: A közeli fényképeken jól látszik, hogy a hosszoldásoknál a ragasztóanyag teljesen funkcióját veszítette, az ékcsapos hosszoldás gyakorlatilag nem működött (Forrás: <http://www.konrad-fischer-info.de/DA09.JPG>; <http://www.konrad-fischer-info.de/DA13.JPG>)

Az átvizsgálás során megállapították, hogy tervezési hiba történt: az egyik keresztartó az évek során előre nem látott és a tervekbe bele nem vett plusz terheket kapott. A cikk szerint még közel 40 ilyen technológiával készült épület van Bajorország szerte.
(Forrás: <http://www.konrad-fischer-info.de/212bau2a.htm>)

Az egyik ilyen eset 2006. január 2-án történt Bad Reihenhall városában, ahol is a szokatlanul nagy havazás miatt a tetőkre négyzetméterenként 120 kg hó hullott rövid idő alatt. Az 1971-72-ben épült épület tetőszerkezetét 48 m hosszú és 287 cm magas dobozos szerkezetű RR tartók alkották. A felső és alsó tartóelem rétegelt ragasztott volt, az oldalsó kötőpárok pedig keresztszálalás rétegelléssel lettek előállítva, melyek 16 méteres darabokból álltak, amiket ékcsapos hosszoldással illesztetek össze.

A Zeit Online német internetes újság szerint 2003-ban ellenőrizték az épületet, statikailag és épületgépészeti szempontból is. A statikus elmulasztotta a tartók közelebbi vizsgálatát, roncsolás mentes tartó vizsgálatra pedig egyáltalán nem került sor. A tragédia utáni vizsgálatoknál repedéseket és nedvesedett foltokat is találtak a tartókon. A hivatalos baleseti kivizsgálás során megállapításra került, hogy a tervezőmérnök figyelmen kívül hagyta a faanyag és a ragasztó fáradását tervezéskor. A balesetet 2 hiba együttes jelentkezése hozta létre: a felhasznált ragasztó a belső tér magasabb páratartalma miatt szilárdság csökkenést produkált, valamint a tartót alulméretezték.

A baleset során 15 halálos áldozat volt, túlnyomó részt gyerekek és 6-an sérültek meg. (TÓTH, 2008; ZEIT ONLINE, 2010)



4. ábra: A Bad Reihenhall-ban összedőlt jégpálya

Forrás: <http://www.zeit.de/gesellschaft/zeitgeschehen/2010-01/bgh-eissporthalle-bad-reichenhall->

A második ilyen eset Salzburgban történt, szintén a hóteher alatt szakadt le, személyi sérülés nélkül éjjel 2005 decemberében egy tekepálya tetőszerkezete. Elősegítette a

tönkremenetelt a tartók faanyagának rossz osztályozása és hogy a lamellákban sok volt a szálkifutás. 4 db tartó szakadt le, de elővigyázatossági okokból mindet kicserélték.

(TÓTH, 2008)

A közelmúltban, 2012. február 25-én a tapolcai rendezvénycsarnok tetőszerkezetének egyik gerendája teljes hosszában megrepedt. A 2000 m²-es csarnokot 2003-ban adták át, a födémet 8 db egyenként 36 m hosszú RR tartó tartja. Utólagos megerősítéssel a tartók I-tartó jellegűek lettek. A tartó lamelláinak vastagsága 35 mm, ami a gyakorlatban megengedett legnagyobb érték. A szerkezetet a LignumEurópa Kft. gyártotta. A csarnok D-i oldala felől számozva a 3. tartó sérült meg. A tönkremenetel pillanatában közel 500-an tartózkodtak az épületben, de szerencsére személyi sérülés nem történt.

A 3-as tartó tönkremenetelét több tényező összejátszása okozta. Ezek közül szerepet játszott az, hogy a 12%-os nedvességtartalomra tervezett tartó nedvességtartalma 8,6%-ra lecsökkent, így ez jelentősen megnövelte a belső feszültségeket. Valamint a légtechnikai csövek részére készített áttörések helyén a mechanikai feszültségek szükségszerűen megnövekedtek, ezen kívül a beles faanyag jelenléte a tartó kiszáradása miatt tovább növelte a tartóban levő belső feszültséget (a beles anyag mechanikai tulajdonságai gyengébbek is).

(DIVÓS, SISMÁNDY KISS, 2012)



5. ábra: A tapolcai csarnok gerendájának tönkremenetele,

Fotó: Sismándy Kiss Ferenc



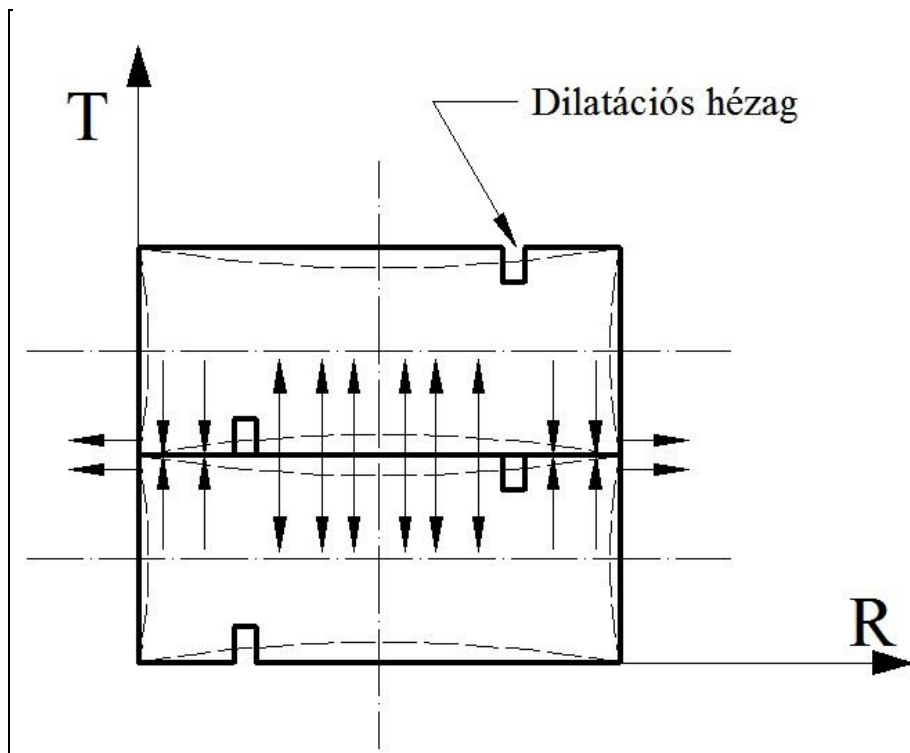
6. ábra: A tapolcai sportcsarnok és a tönkrement tartó alátámasztása,

Fotó: Sismándy Kiss Ferenc

3) A tartók tönkremenetelének okai:

Az egyik ilyen ok a túlterhelés, ez akkor következik be, ha a tartókra nehezedő plusz teher meghaladja a tervezéskor figyelembe vett maximálisan megengedett tömeget. Ez a tetőre nehezedő plusz tömeg lehet pl. hirtelen leesett nagymennyiségű hó vagy havas eső. Esetleg bekövetkezhet még tönkremenetel, ha a szerkezetet alulméretezték. Tönkremerhet a szerkezet, ha a tervezéskor rossz szerkezeti megoldást használtak. Elfáradás is okozhat balesetet, ez lehet a ragasztóanyag, a faanyag vagy a fém kapcsolóelemek tönkremenetele miatt.

A tönkremeneteleket okozhatják a klimatikus viszonyok, mint ahogy korábbi mérések is bizonyították. Pl., ha egy uszodában vagy a fentebb említett bad reinhalli fedett jégpályán, ha a klíma nappal és éjszaka különbözik, azt eredményezi, hogy a fatartók lamellái folyamatosan ciklikus igénybevételnek vannak kitéve. Ezen igénybevételek következtében a lamellák közötti ragasztóréteg elfáradhat, ami tönkremenetel kiindulási helyévé válhat. A 7. ábrán láthatunk egy ilyen feszültségi állapotot két lamella között.

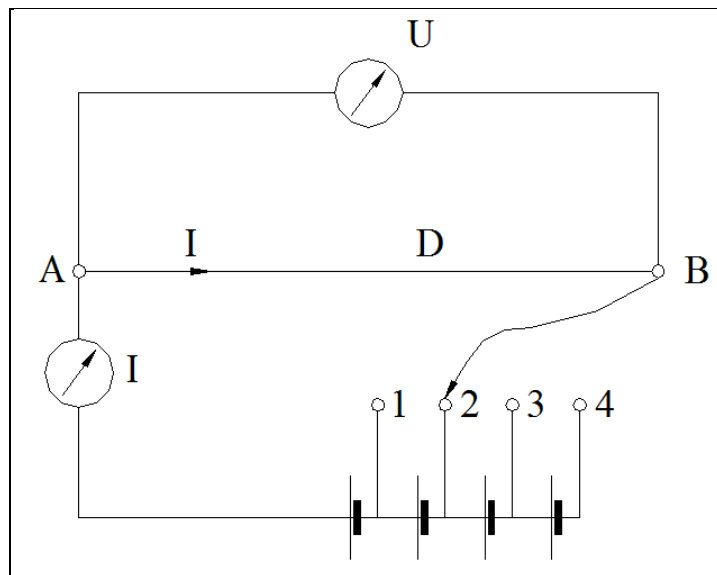


7. ábra: A deformációk és az ébredő húzó és nyomó erők dagadás során, a lamellákra be vannak rajzolva a nyíró igénybevételeket elhanyagolható mértékűvé csökkentő dilatációs hézagok

Tönkremenetelt okozhat a faanyag túlszáradása, ha a tartót úgy tervezték, hogy folyamatos klímán kell lennie, de pl. az épületbe nem szerelték be a klímaszabályozó berendezést.

4) Ohm törvénye és az ellenállás:

Ohm törvénye homogén vezetőre. Egy vezetőben pl. egy hosszú konstantán drótban – a két vége között létesített feszültség hatására áram folyik. Ezen áram erőssége (I) és a feszültség (U) közötti összefüggés ampermérő és elektrométer (voltmérő) segítségével a 8. ábrán látható.



8. ábra: A konstantán drótban folyó áram erőssége és a feszültség összefüggése
(BUDÓ, 1977)

Ha a D drót A és B pontjai közötti feszültséget az akkumulátorcellák számának változtatásával 2-szeresére, 3-szorosára, stb. növeljük, akkor, ha a drót állandó hőmérsékleten van, az ampermérő 2-szer, 3-szor nagyobb áramot jelez: I arányos U -val.

Tehát Ohm törvénye fémes vezetőkre: Egy homogén vezetőben (vezetőszakaszban) folyó áram erőssége – a hőmérséklet és más külső feltételek állandósága esetén – arányos a vezető két vége közötti feszültséggel:

$$I = \frac{U}{R}$$

vagy

$$I = G \cdot U$$

ahol:

R a vezetőre jellemző, az I áramerősségtől és az U feszültségtől függő állandó, a vezető ellenállása.

A $G = \frac{1}{R}$ a vezetőképesség vagy vezetés.

Definíció szerint egy vezető ellenállása a vezető két vége közötti U feszültségnek és az átfolyó áram I erősségének a hányadosa:

$$R = \frac{U}{I}; \left[\frac{1V}{1A} = 1\Omega \right]$$

Különböző hosszúságú, keresztmetszetű és anyagi minőségű vezetők ellenállásának mérése útján megállapíthatjuk, hogy egy lineáris vezető ellenállása arányos a hosszúsággal (l) és fordítottan arányos a keresztmetszettel (q):

$$R = \rho \cdot \frac{l}{q}$$

A ρ arányossági tényező vezető méreteitől független, az anyagi minőségre jellemző állandó, neve fajlagos (specifikus) ellenállás, $[\Omega m]$. Ez az 1m hosszú és 1 m² keresztmetszetű vezetőre vonatkozik. Mivel a vezetékek keresztmetszetét célszerűbb mm²-ben megadni, az

$$1\Omega \frac{mm^2}{m}$$

mértékegységet használják, ami egy 1m hosszú és 1 mm² keresztmetszetű vezető ellenállására vonatkozik. Ez pl. vörösréz esetében 0,017 Ω .

1. táblázat: Néhány anyag fajlagos ellenállása (BUDÓ, 1977)

Anyag:	Fajlagos ellenállás $[\Omega \frac{mm^2}{m}]$:
Ezüst	0,016
Vörösréz	0,017
Arany	0,023
Alumínium	0,032
Vas	0,09-0,15
Platina	0,11-0,14
Higany	0,958
Szén	50-100
Sárgaréz	0,07-0,09
Manganin	0,42
Konstantán	0,50
Üveg	$\approx 10^{17}$
Porcelán	$\approx 10^{18}$
Borostyánkő	$\approx 10^{22}$

Az ellenállás általában függ a hőmérséklettől, és pedig növekvő hőmérséklettel a fémek ellenállása nő, a széné, a félvezetőké és az elektrolitoké pedig általában csökken. Közöséges hőmérsékleten és nem nagy intervallumon a legtöbb fém ρ fajlagos ellenállásának relatív megváltozása közelítőleg arányos a hőmérséklet-változással.

Az ellenállást befolyásoló egyéb tényezők között felsorolhatjuk a minden oldalú nyomást, mely csökkenti az ellenállást és a vezetékeknél igen gyakran előforduló húzást, mely a keresztmetszet csökkenése miatt növeli az ellenállást.

(BUDÓ, 1977)

5) Tartók tönkremenetelének előrejelzési lehetősége:

A szerkezetek összedőlését és tönkremenetelét megelőzendő, több kísérletet hajtottak végre és több fajta kész eszközt építettek be. Többségük azért nem terjedt el, mert vagy nagyon bonyolult vagy nagyon drága a kivitelezésük.

a) Eddigi technológiák:

Az egyik ilyen fejlesztés a nagyfeszítávolságú csarnokszerkezetek deformációjának digitális képfeldolgozáson alapuló ellenőrzése. Ez a projekt (projekt száma: 20128035513) Németországban valósult meg a Münchener Műszaki Egyetem, Erdészeti Intézet Építőipar és Építőmérnöki Tanszék, a karlsruhei Főiskola, Műszaki és Gazdaságtudományi Kar és egyéb hatóságok részvételével. A projekt során az egyik gimnáziumba egy nagyfeszítávolságú tetőszerkezetre több kamerát telepítettek, melyek a számítástechnikának köszönhetően folyamatosan figyelték a tetőszerkezet mozgását. A mentett adatok alapján idő függvényében diagramokat lehet velük kirajzoltatni, a rendszer összeveti a meteorológiai adatok alapján akár hullott hó mennyiségét is az aktuális deformációval. Kritikus deformáció esetén mivel rá van csatlakoztatva a már meg lévő tűzjelző rendszerre, jelez a bennlévőknek. A kamerarendszer a napfény általi zavarok elkerülése érdekében, LED-ekkel és infravörös tartományban is képes működni. A központi szerver gyűjti az adatokat, az adatok és beállítások interneten keresztül is lekérhetők.

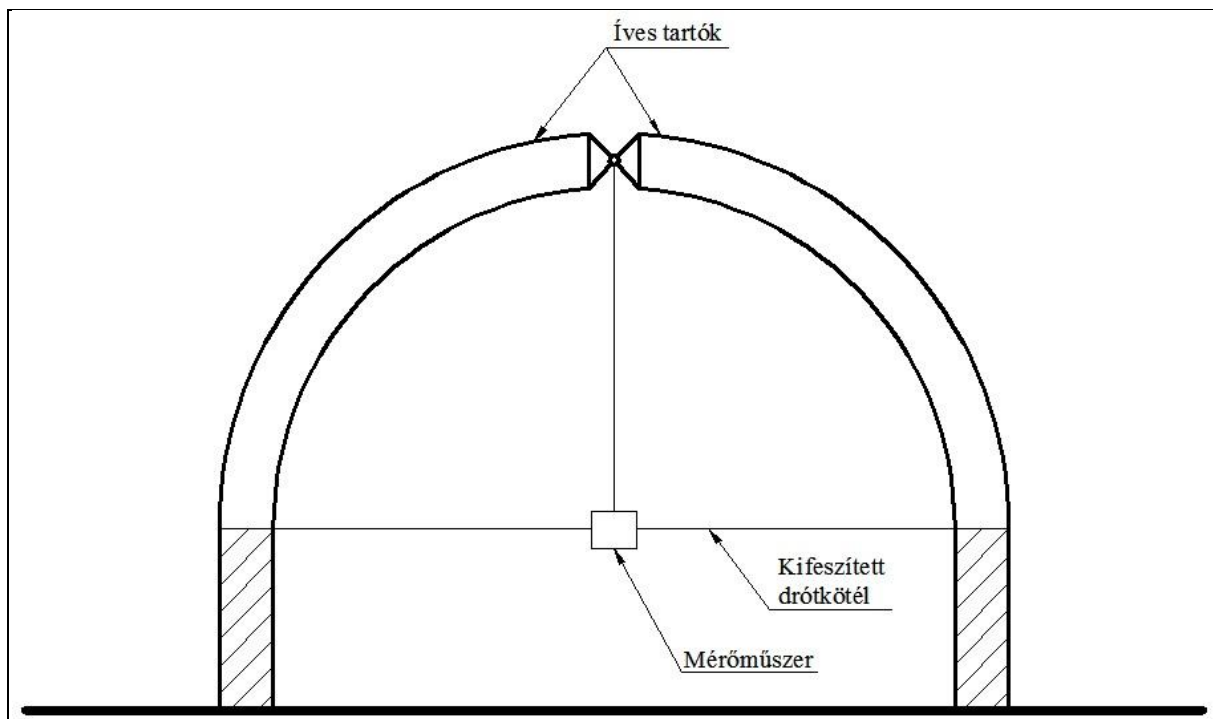
(Forrás: ©Fraunhofer IRB;

<http://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung/projekte.jsp?p=20128035513>)

A kamerás technológia előnye, hogy modern, interneten keresztül bárhol, bármikor elérhető a világban és nagyon pontos. Hátránya is van a rendszernek: drága, mert egy ilyen rendszer kiépítése sok eszközt, pontos beállítást és nagyteljesítményű szerver számítógépeket igényel, melyek folyamatosan üzemelnek és mérnek az év minden napjának minden másodpercében.

Létezik egy másik technológia is, amikor a tartók között drótköteleket feszítenek ki és közéjükre egy harmadik ponthoz fixen rögzített mérőműszert szerelnek. A műszer a

drótkötelek elmozdulását és feszességét figyeli, nagy kitérés vagy feszesség változás esetén jelez, riaszt. Egy ilyen műszer egyszerűsített ábráját látjuk a 9. ábrán.

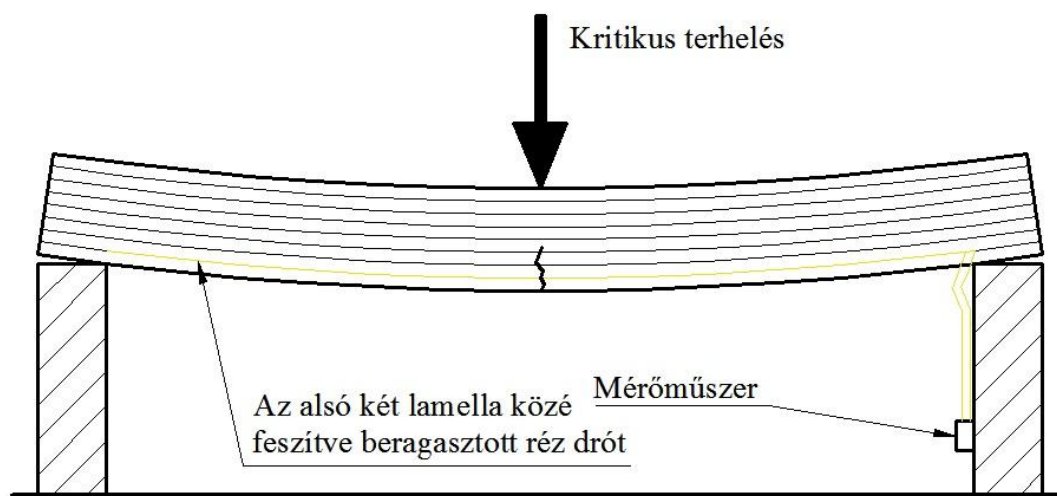


9. ábra: Íves tartóhoz készített belógás mérő és tönkremenetel előrejelző berendezés

Ezen rendszer előnye, hogy olcsóbb, viszont hátránya, hogy sérülékeny, bizonytalan, külső behatás esetén jelezhet a rendszer (nagyobb széllelés, vagy valamilyen tárgy), pl. az egyik ilyen szerkezet egy foci stadionba van beépítve Németországban, és az egyik eset alkalmával megrúgták labdával az érzékelőt, ami azonnal bejelzett és az épületet ki kellett üríteni.

b) Új megoldás - Tartó deformáció mérés beépített nyúlásmérővel:

Konzulensemmel új megoldást találtunk a problémára. Egyelőre csak egyenes tartók tönkremenetelének előrejelzésére alkalmas a technológia.

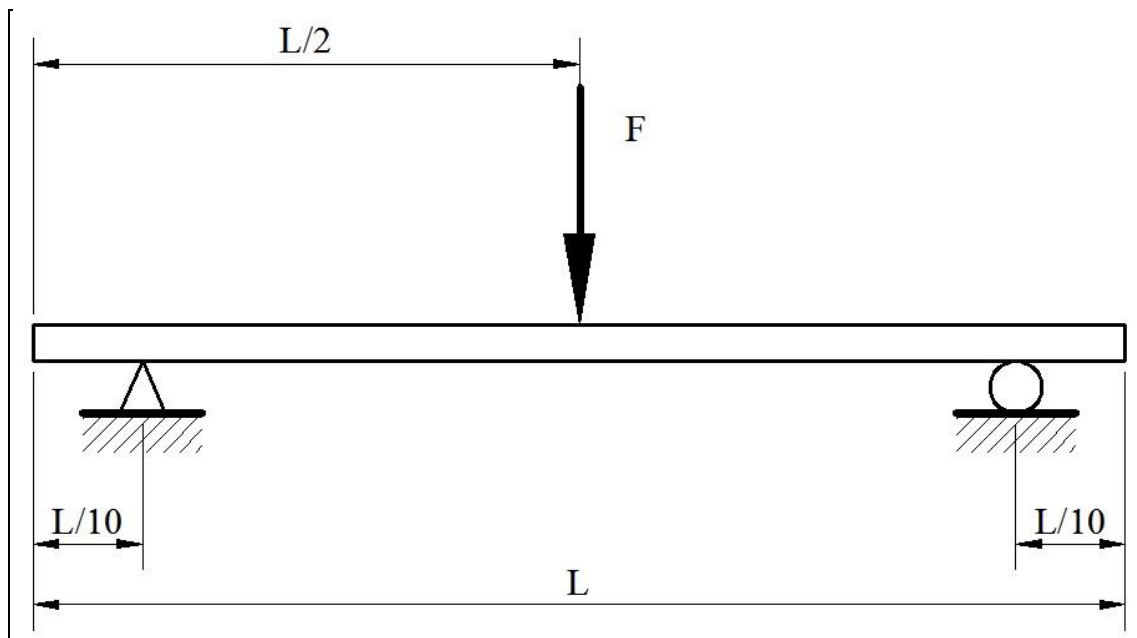


10. ábra: Kritikus terhelés esetén a beragasztott rézhuzal ellenállás változása alapján a műszer jelez. Tönkremenetelnél végtelen ellenállást mérünk a huzal elszakadása miatt

Elképzelésünk szerint az egyenes tartók alsó két lamellája közé, feszítve gyártáskor beragasztanak egy meghatározott ellenállással rendelkező, nagy nyúlás képességű és kis átmérőjű réz drótot. 3 pontos hajlítás esetén (11. ábra), a 10. ábrán látható módon hajlik meg, vagy esetleg megy tönkre a tartó. A gerenda lehajlása közben megnő az ívhossza, ezáltal a megfelelően beragasztott rézhuzalt nyújtja, ami ellenállás növekedést okoz. A feltételezésünk szerint a tartóban a réz szál hamarabb elszakad, mint a teljes tönkremenetel.

Egyrészt kilehetne mérni az egyes tartóknál az ehhez az ellenálláshoz tartozó lehajlást. Másrészt a mérnökök által tervezett tartók, maximálisan megengedett lehajlása $L/300$ – ahol az L a tartó hosszát jelenti – ebből kiindulva, mérésekkel adott rézhuzal típusra és hosszára vetítve meg lehetne határozni egy ellenállás értéket, ahol már a tartó lehajlása eléri ezt a kritikus ($L/300$ -as) lehajlást. Egy érzékelő az ellenállás alapján jelezne az épületben tartózkodóknak, hogy a tartószerkezet hamarosan összedől, vagy legalábbis valamilyen probléma van vele. Természetesen a tartó megrepedésekor, teljes tönkremenetelkor végtelen ellenállást mérhetünk, ha a drót elszakad.

Hasonló műszer alkalmazásával, sok régebbi halálos kimenetelű baleset megelőzhető lett volna.



11. ábra: Hajlítószilárdsági vizsgálat, 3-pontos terheléssel, F - terhelő erő (MOLNÁR, 2004)

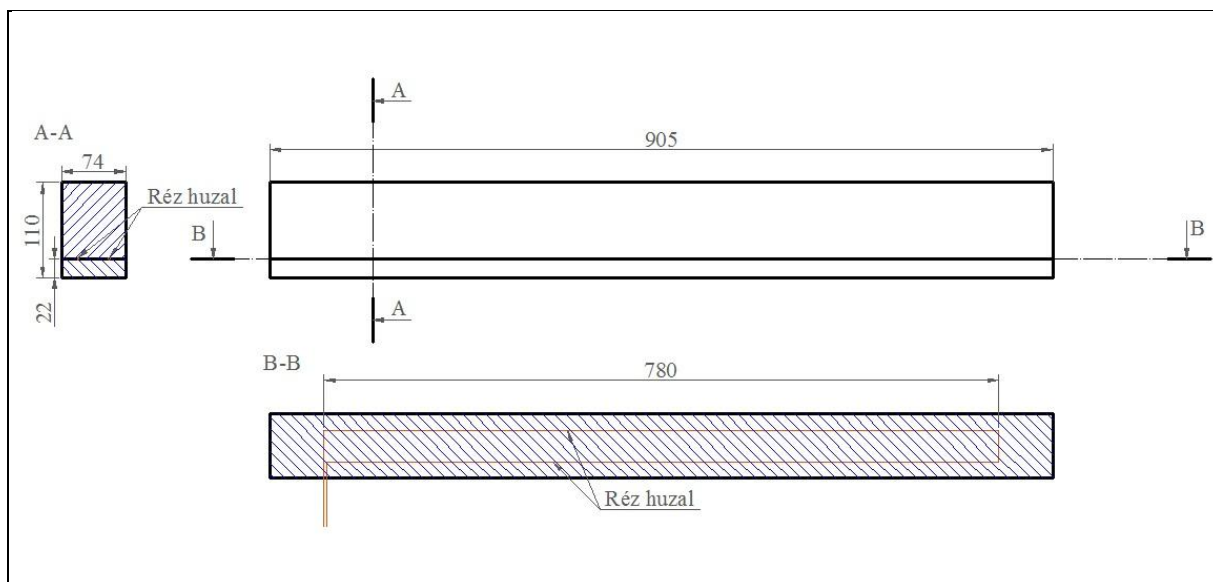
A rendszer előnyei: utólagosan is felszerelhető egy szerkezetre (vagy megfelelő ragasztóval vagy a régi tartó alá egy újabb lamella ragasztásával); a mérőszervek rejtett helyen van, a drótok megsérülése a kivezetéseket leszámítva a tartó tönkremenetelét jelenti; egyszerűen legyártható kivitelezhető és a központi mérőműszert leszámítva nem igényel drága műszereket.

6) Mérések:

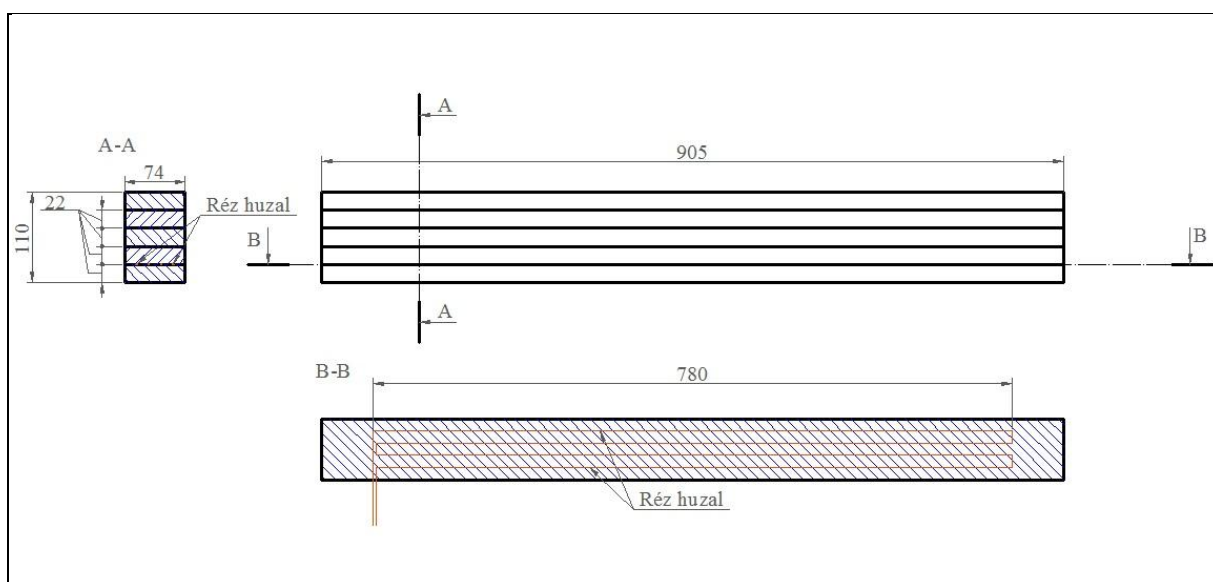
a) Az 1. kísérlet:

Biztató eredménnyel végződött az 1. kísérlet, melyet a 12. és 13. ábrán látható tartókkal végeztünk a Műszaki Mechanikai és Tartószerkezeti Intézet B épület alagsorában lévő törőgéppel. A próbatartók mérése során azt a megállapítást tettük, hogy a további mérések során nagyobb ellenállású és a hőmérsékleti viszonyokra kevésbé vagy egyáltalán nem érzékeny huzalra lesz szükségünk (az 1. kísérletnél réz drótot használtunk). Ahhoz, hogy a tartók a törőgép alatt minél tovább maradjanak egyben tönkremenetel nélkül és minél nagyobb lehajlás mellett mérhessünk ellenállást, hibakiejtett, hosszitoldott minimum 150 cm hosszú egyenes tartóra lesz szükségünk. Ezek mellett a 4-szeres hosszban beragasztott rézhuzal mérhetőbb eredményt ad, mert nagyobb ellenállási értéket kell mérni. A mérés során számszerű ellenállási érték feljegyzésére nem volt lehetőség, mert a tartók szálfifutás és egyéb konstrukciós hibák miatt hamar eltörtek, valamint kis lehajlást mutattak.

A 12. ábrán egy utólagos szerelést utánzó próbatestet láthatunk, ahol a huzalt utólag egy plusz lamellával erősítették fel a tartó gerendára, a 13. ábra egy olyan tartóra mutat példát, melybe gyárilag 4-szeres hosszúságban előfeszítve rézdrót van ragasztva.



12. ábra: Az 1. kísérlet I. számú próbateste, kétszeres hosszban beragasztott réz huzallal



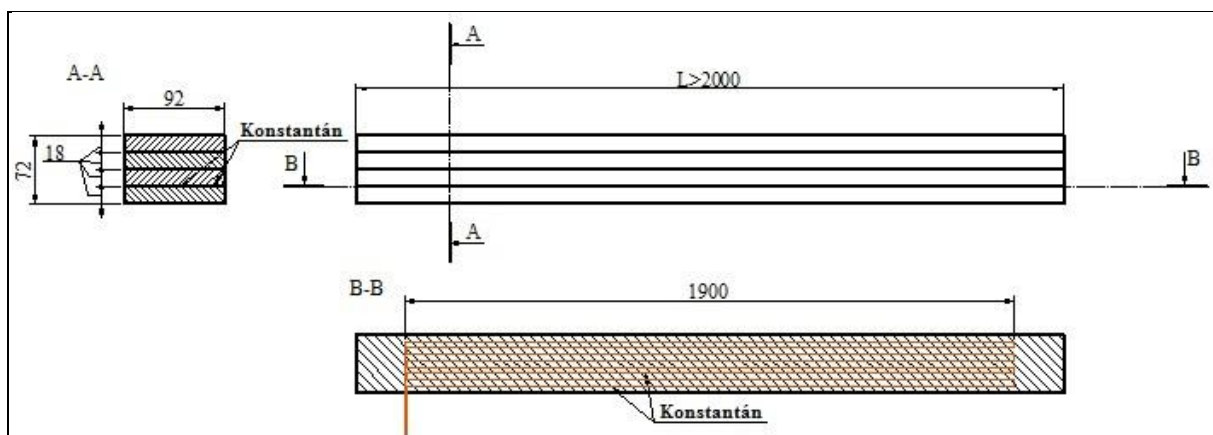
13. ábra: Az 1. kísérlet II. számú próbateste, 4-szeres hosszúságban beragasztott, feszített rézhuzallal

b) A 2. kísérlet:

Ezen alkalommal, a hibáinkból tanulva 10 db alkalmasabb próbatestet készítettünk a 14. ábrán látható paraméterekkel.

A próbatestek legyártására a Faipari Mérnöki Kar Tanüzemében került sor. A kb. 2 m hosszú Lucfenyő (*Picea abies*), szárított, gyalulatlan alapanyag először a STETON Fast 4S típusú 4 fejes gyalugépen négyszög keresztmetszetűre lett gyalulva. Majd a 20 cm széles deszkák egy ROJEK PK-300-as asztalos körfűrészben hosszában ketté lettek hasítva. Újra gyalulás következett a végső méretek kialakításához. Végül a deszkák egyik vége

derékszögben lett levágva, a tanműhely Stormab TR 450-es leszabó körfűrészével. A 4 rétegű egyenes tartók kialakításához Ponal Henkel Quality Standard ragasztót használtunk.



14. ábra: A 2. kísérlet próbatestei, 8-szoros hosszúságban beragasztott, feszített rézhuzallal

Ragasztás előtt az alsó két lamella közé 0,12 mm Ø-jű és 43,3 Ω/m ellenállású ISOTAN®/ Konstantán huzalt (15. ábra, ellenállás változása: 4. melléklet) ragasztottunk be, oly módon, hogy 190 cm távolságban tűzőgép kapocs segítségével feszítettük ki a huzalt (16. ábra). A ragasztást hidraulikus keretprésen végeztük (17. ábra).



15. ábra: A beragasztott, kívül textílréteggel bevont Konstantán huzal

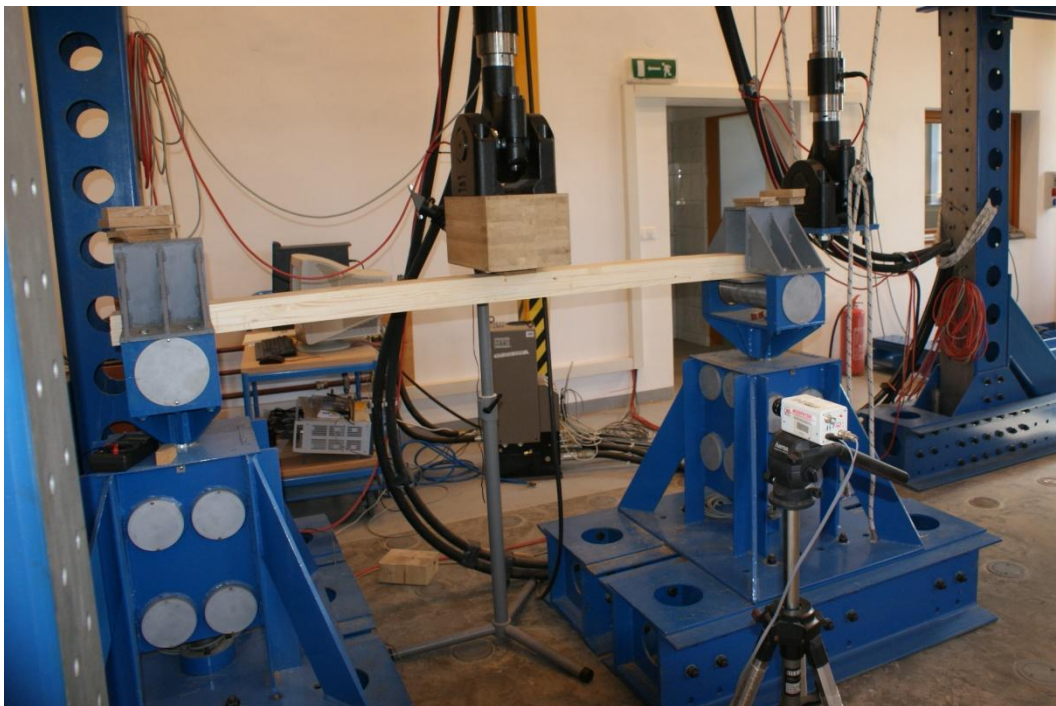


16. ábra: Az alsó lamellához 8-szoros hosszban tűzőkapcsokkal kifeszített Konstantán huzal

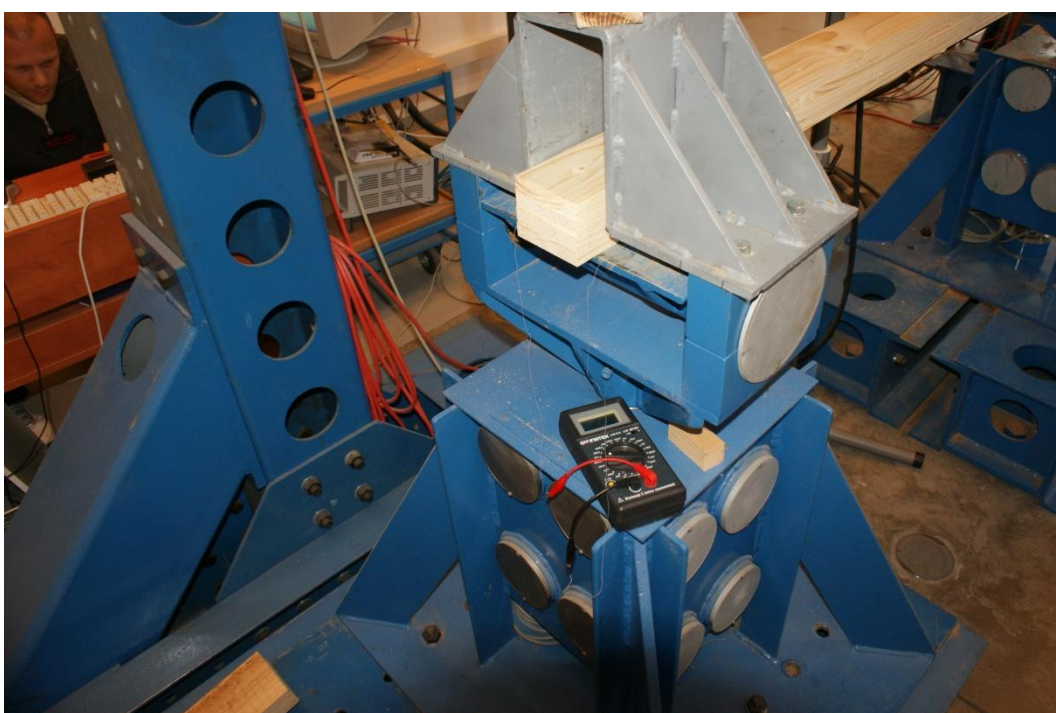


17. ábra: A ragasztási folyamat: ecsettel történő ragasztó felhordás és hidraulikus préselés

A kísérletet a Műszaki Mechanikai és Tartószerkezetek Intézet gerendatörő gépén végeztük, a kísérletről készült fényképek a 18.-20. ábrákon láthatók. A 3 pontos hajlítással, tönkremenetelig történő, roncsolásos mérés során Gwinstek LCR-814-es típusú multiméter segítségével mértük a beragasztott huzal ellenállását (19. ábra).



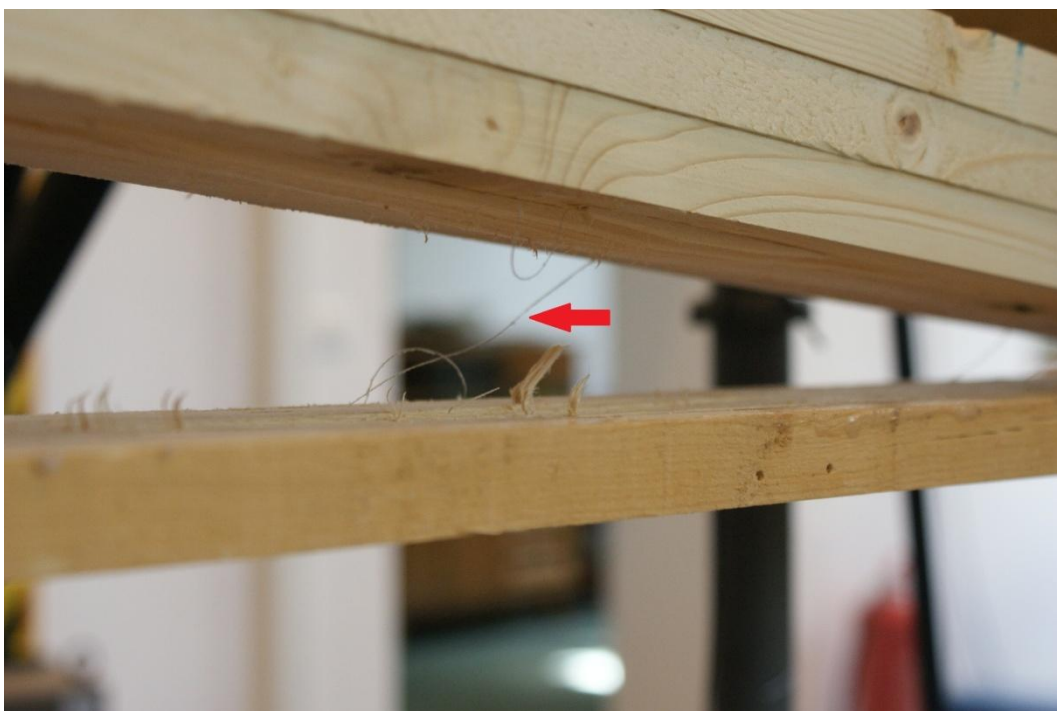
18. ábra: A 3 pontos hajlításra felszerelt gerendatörő gép, az alátámasztási köz 180 cm, a kép előterében a lehajlást vizsgáló kamera látható



19. ábra: A tartók végén kivezetett Konstantán huzalvégekre a képen látható Gwinstek LCR-814-es típusú ellenállásmérővel csatlakoztunk



20. ábra: A 7-es számú próbatest tönkremenetele (a nyomott övben ment tönkre a lamella előbb), a beragasztott huzal elszakadásával az ellenállási érték végtelen lett

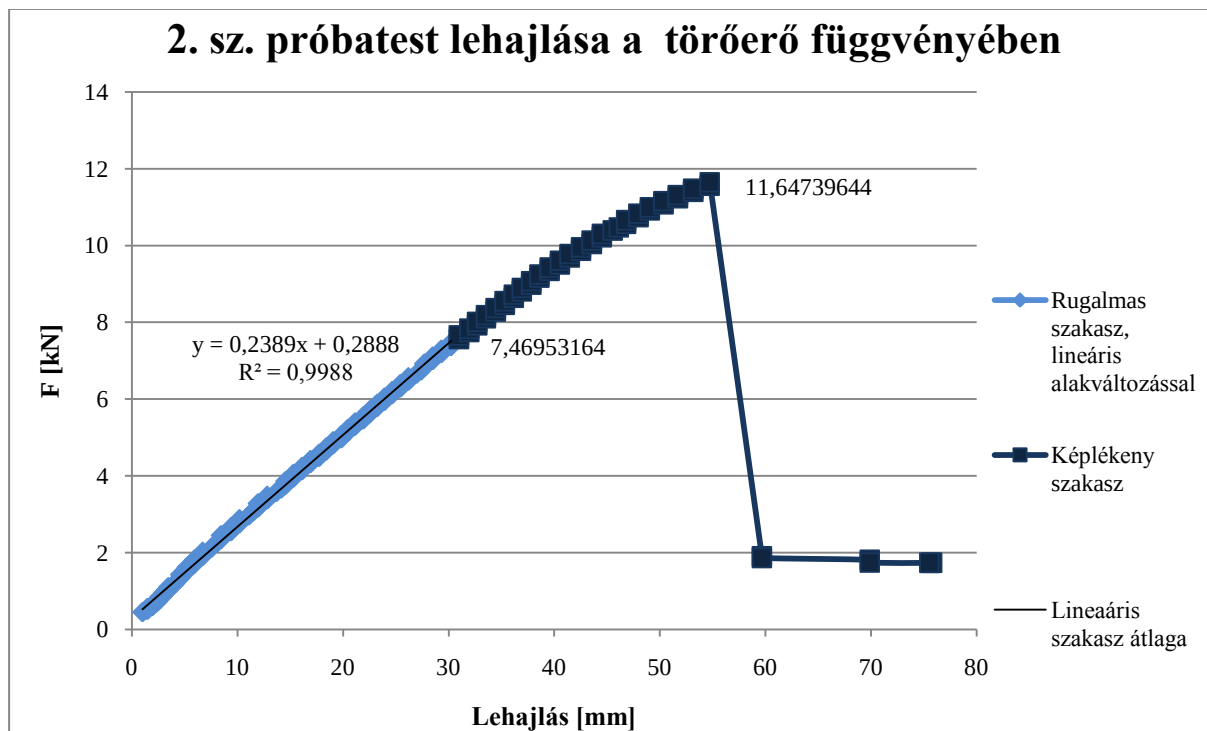


21. ábra: A 7-es számú próbatest tönkremenetele jól látszik, hogy a tönkremenetellel egy időben a beragasztott huzal elszakadt, így az ellenállási érték végtelen lett

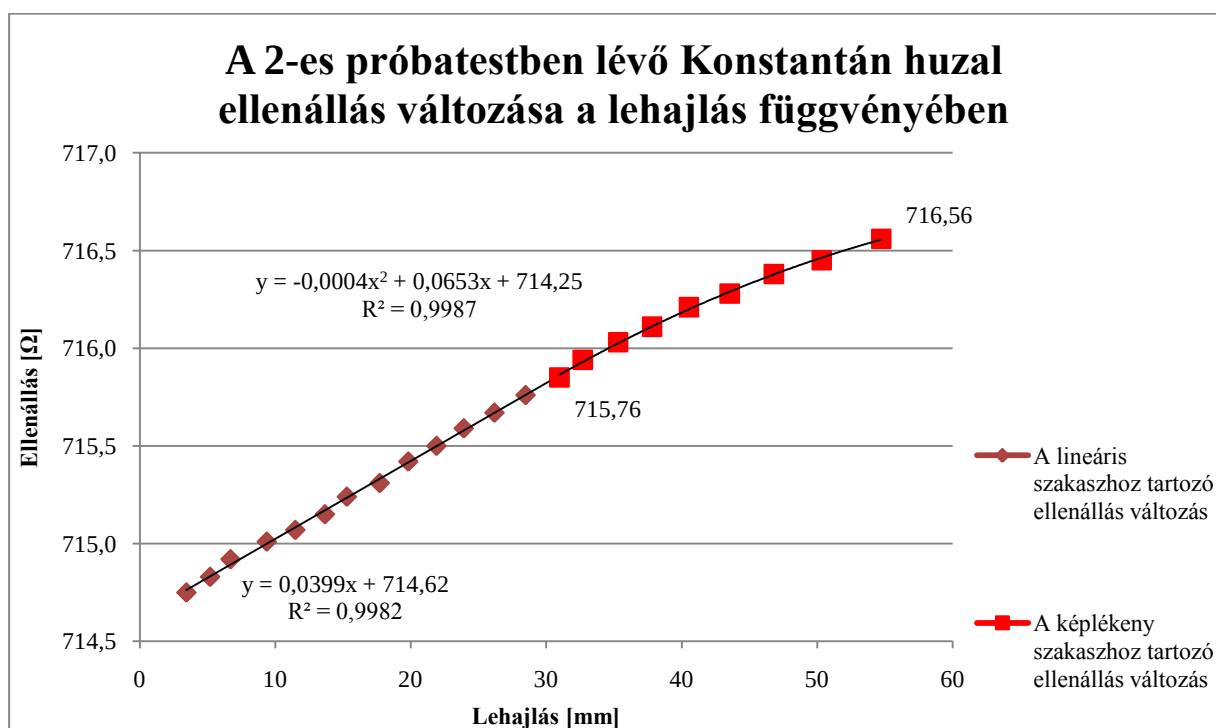


22. ábra: A 7-es számú próbatest tönkremenetelénél jól látszik, hogy a ragasztó feszesen tartja akkor is a huzalt, ha a beragasztáskor mégsem sikerül feszesre húzni

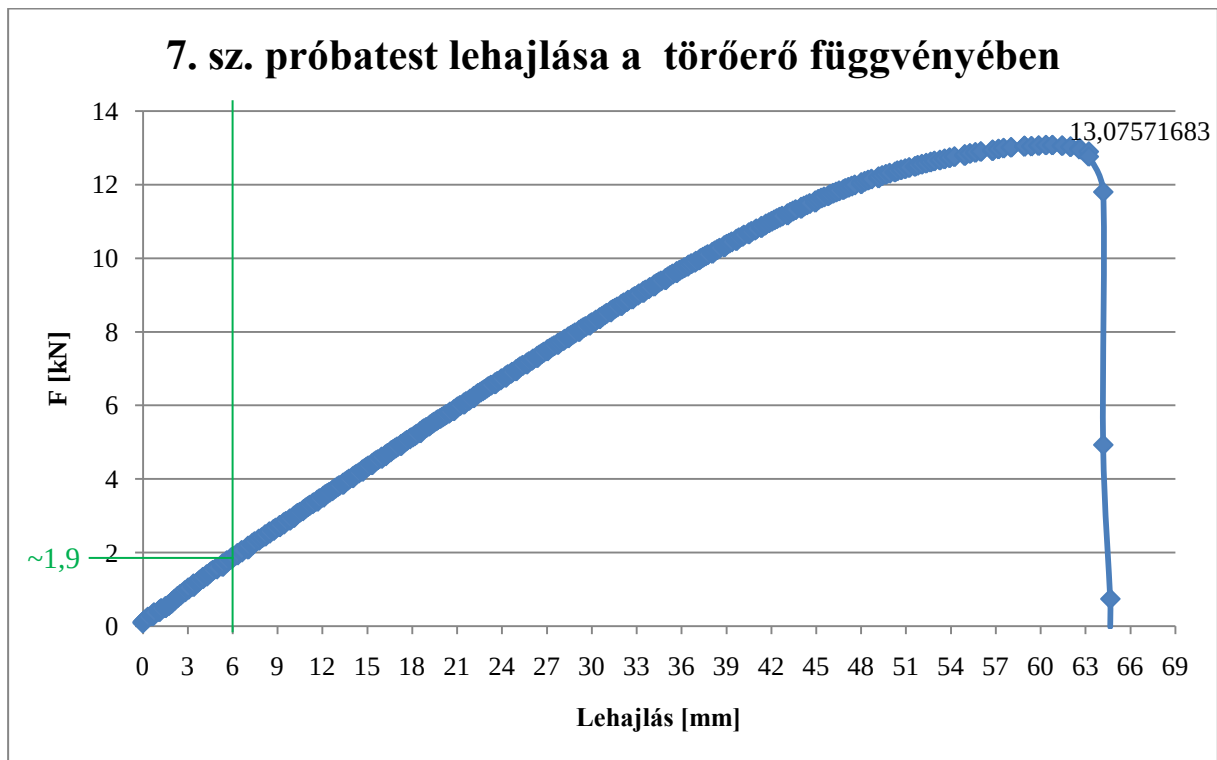
Néhány reprezentatívabb mérési eredmény diagramos formában a 2-es, 7-es és 10-es próbatestekről:



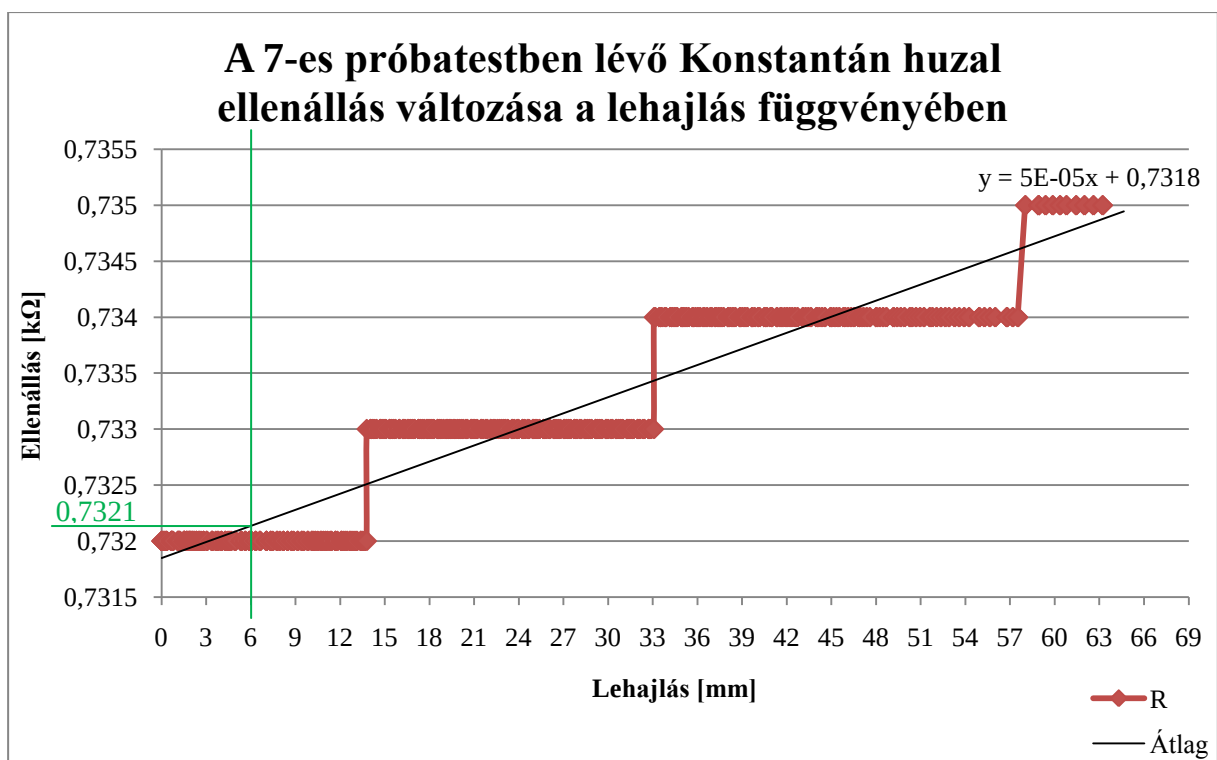
23. ábra: A 2-es számú próbatest tönkremenetele, az ábrán világos kékkel van jelölve a lineáris alakváltozással járó szakasz, sötétkézzel a képlékeny szakasz, a lineáris szakasz végpontja és a maximális törőerő



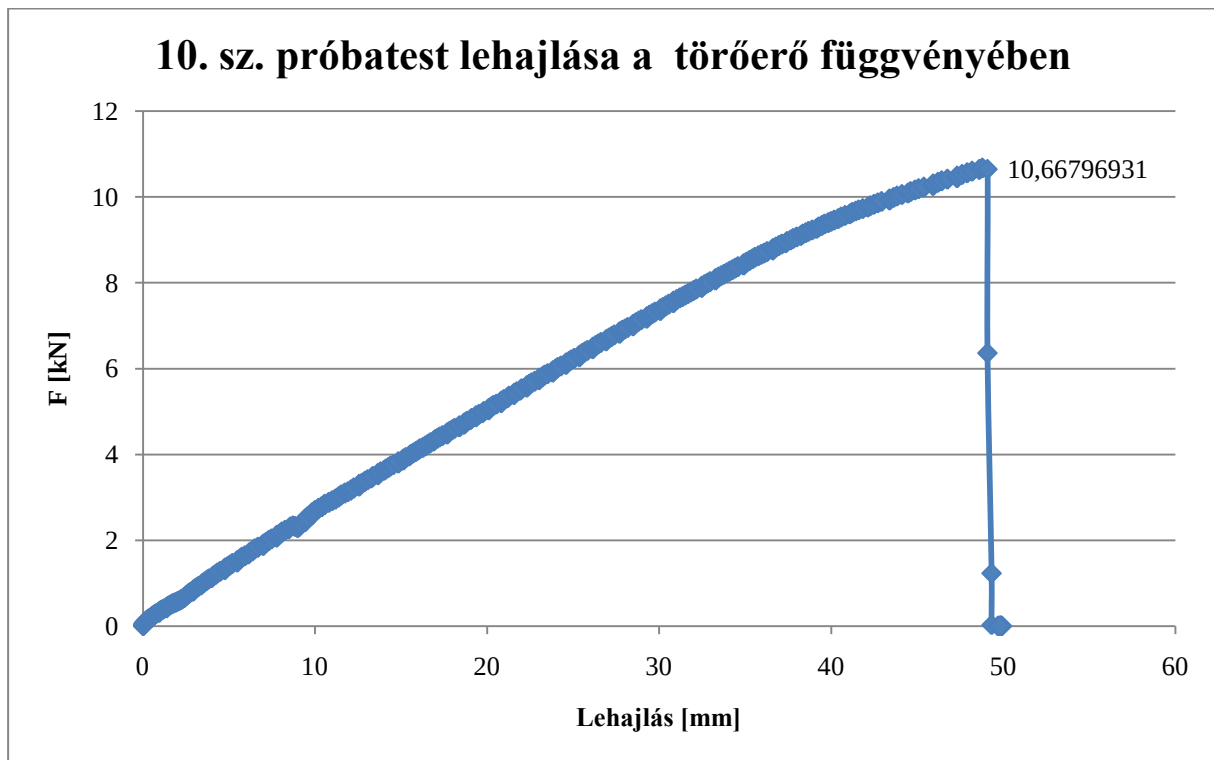
24. ábra: A 2-es próbatestben lévő Konstantán huzal ellenállás változása a lehajlás függvényében



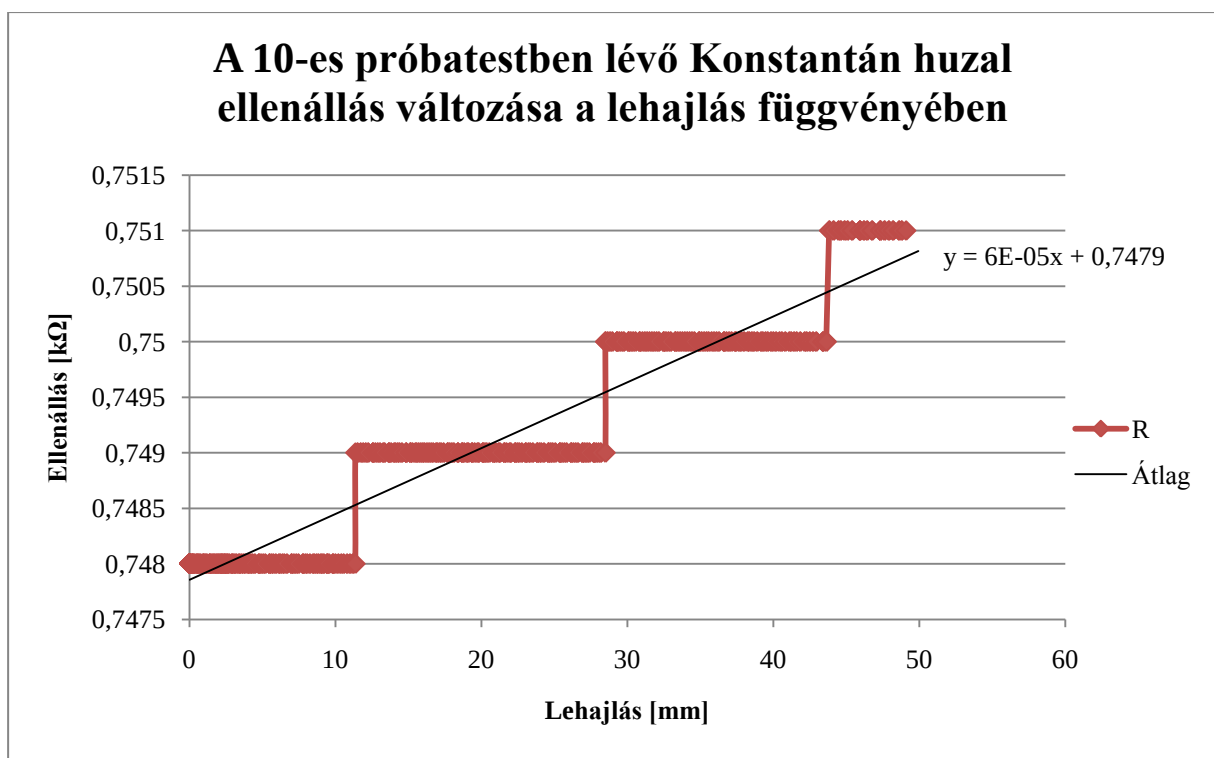
25. ábra: A 7-es számú próbatest tönkremenetele, az ábrán jelölve van a maximális törőerő



26. ábra: A 7-es próbatestben lévő Konstantán huzal ellenállás változása a lehajlás függvényében, a zöld egyenes jelöli az $L/300$ -as lehajlási értéket (6 mm)



27. ábra: A 10-es számú próbatest tönkremenetele, az ábrán jelölve van a maximális törőerő



28. ábra: A 10-es próbatestben lévő Konstantán huzal ellenállás változása a lehajlás függvényében

7) Eredmények:

A roncsolásos mérést követően a próbatestek átlagos nedvességtartalma $8,62 \pm 0,22$ % volt. A diagramokon látható, hogy a lehajlás függvényében a mért ellenállás lineárisan megnövekszik. Az ellenállás növekedése kismértékű, emiatt az alkalmazott ellenállásmérő mérési pontossága nem volt megfelelően nagy. Ebből kifolyólag az építőmérnökök által megadott L/300-as értékhez tartozó ellenállás a 7-es tartó (25., 26. ábra) estében a 26. ábra egyenlete alapján a következőképpen alakul:

Az L/300-as lehajlási értéket kb. 1,9 kN terhelésnél éri el a tartó, az ehhez tartozó ellenállási érték kiszámítása/ leolvasása a következőképpen alakul:

Ha 1800 mm-es alátámasztási közszel dolgoztunk, akkor ezt osztva 300-zal, az 6 mm. A 6 mm-es lehajlási értékhez tartozó ellenállás a 7-es tartóhoz tartozó egyenlet alapján:

$$\text{Ellenállás} = 5 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Lehajlás} + 0,7318$$

$$\text{Ellenállás} = 5 \cdot 10^{-5} \cdot 6 \text{ mm} + 0,7318$$

$$\underline{\text{Ellenállás} = 0,7321 \text{ k}\Omega}$$

Mivel az ellenállási értékünk alap állapotban (terhelés nélkül) 0,732 k Ω volt ez nagyon kis eltérés ezért lenne szükség pontosabb mérőműszerre vagy nagyobb ellenállás változású huzalra.

8) Tapasztalatok:

A 24. ábra alapján jól látszik, hogy a húzott övben elhelyezett Konstantán huzal a lehajlás, a ragasztó és a tűzőkapcsok előfeszítése által megnyúlik, ezáltal megnő az ellenállása, ez a 2-es tartó esetében pl. 2,03 Ω . Ezt igazolja a 2., 3. és 4. melléklet, melyben a növekvő terhelő erőhöz növekvő tendenciájú ellenállás is tartozik. Mivel az előző ábrákon a lehajlás a terhelő erő függvényében volt ábrázolva, megállapíthatjuk, hogy a lehajlás függvényében ábrázolt ellenállás egyenesen arányosan változik a lehajlással és a terhelő erővel is. A 2-es próbatesten mért eredmények alapján kijelenthetjük, hogy az ellenállás változása lineárisan növekszik a terhelő erő függvényében addig a pontig, amíg a próbatest alakváltozása a tönkremeneteli diagramon el nem éri a rugalmas szakasz végpontját. Ekkor az ellenállás változása a faanyag alakváltozásával azonos módon lelassul. Ez a pont a 2-es számú próbatestnél 715,76 Ω -nál és 7,469 kN törőerőnél van.

Sajnos az ellenállás változása nagyon kismértékű. Viszont ez a kismértékű változás növelhető a huzal keresztmetszetének csökkentésével, a lamellák közé beragasztott huzal hosszának (meneteinek) növelésével, vagy esetleg nyúlásra nagyobb ellenállás változású

huzal használatával. Ilyen kis ellenállás változás mellett csak sokkal precízebb mérőműszer pl. Wheatstone-hidas ellenállásmérő berendezés szükséges, azért mert az előzetesen fentebb meghatározott L/300-as lehajlási érték igen kicsiny ellenállás változást hoz létre.

A kísérlet során megállapítottam, hogy a tönkremenetel formájától függ a huzal elszakadása. Volt olyan eset is, mikor a 8-szorosan beragasztott huzal a teljes tönkremenetel után sem szakadt el. Így megállapítható, hogy a felhasznált huzal minőségétől is függ a drót tönkremenetele, tehát a fentebb tett feltételezés nem minden esetben helytálló.

Mindent összevetve a technológia használhatónak bizonyult, megfelelő alapanyagok és további kísérletek segítségével tökéletesíteni lehet.

9) További kutatási javaslatok, lehetőségek:

Kifejezetten rétegelt ragasztott tartókkal foglalkozó céggel vagy cégekkel felvenni a kapcsolatot és esetleg a támogatásuk mellett további közös fejlesztéseket és kísérleteket végezni a témában.

Egy már meglévő szerkezetre utólag felszerelni egy pontosabb rendszert és ott mérni adatokat a tartó mozgásáról valamint azokat elemezni.

Megvizsgálni a különböző szóba jöhető ellenálláshuzalokat és a követelményeknek a legmegfelelőbbet kiválasztani, legyen az a húzószilárdsági méréseknél tapasztalt legnagyobb rugalmas szakasz, keresztmetszet, egységnyi lehajlásra jutó legnagyobb megnyúlás, stb.

Kísérlettel megvizsgálni, hogy negatívan befolyásolják-e a technológiát a feszültséggyűjtő helyek (pl. tapolcai sportcsarnok tartóinál a légtechnikai csőrendszer áttörései, 5., 6. ábra), ha igen új szakaszos rendszer kikísérletezése.

A technológiát tovább lehetne fejleszteni/ gondolni íves tartók hasonló folyamatos diagnosztikájára, ellenőrzésére.

10) Köszönetnyilvánítás:

Végezetül köszönetet mondok Tóth Árpád doktorandusz hallgatónak dolgozatom elkészítésénél nyújtott támogatásáért, Bujdosó Antalnak, mindenki Tóni bácsijának az alapanyag szállítmányozásában nyújtott segítségével, valamint a tanműhely dolgozóinak a tartók gyártása során kapott támogatásért.

Sopron, 2012.04.15.

Major Balázs

1. éves Faipari Mérnök MSc. hallgató

11) Irodalomjegyzék:

- BUDÓ, Á. (1977): Kísérleti fizika, II. kötet, (Elektromosság- és mágnességtan), 4. kiadás, ISBN 963 17 0813 6, Tankönyvkiadó, Budapest
- DIVÓS, F. – SISMÁNDY KISS, F. (2012): Jelentés: A tapolcai rendezvénycsarnok rétegelt ragasztott fa tartóinak állapotvizsgálatáról, Készült a Bartal és Rabb Kft. megbízásából, Sopron
- ISABELLENHÜTTE HEUSLER GMBH & CO. KG (2012): ISOTAN®, Műszaki adatlap
- MOLNÁR, S. (2004): Faanyagismeret, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest
- SZALAI, J. (1985): Rétegelt ragasztott íves fatartók gyártása során, valamint klímaváltozás következtében fellépő saját feszültségeinek és alakváltozásának meghatározása, Kandidátusi értekezés, Sopron
- TÓTH, Á. (2008): Hibahelyek feltárása rétegelt-ragasztott tartóban akusztikus módszerekkel, Diplomamunka, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron
- WITTMANN, GY. (2000): Mérnöki faszerkezetek I., Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest
- Honlapok:
 - (ZEIT ONLINE, 2010): <http://www.zeit.de/gesellschaft/zeitgeschehen/2010-01/bgh-eissporthalle-bad-reichenhall->, cikk
 - <http://www.konrad-fischer-info.de/>
 - (©Fraunhofer IRB): Projekt száma: 20128035513
<http://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung/projekte.jsp?p=20128035513>

12) Melléklet:

1. melléklet: A több tartóban a бүтү felülettől távol, véletlenszerű helyen mért nedvességtartalmi értékek:

Mérés:	Több tartóban középtájon, véletlenszerű helyen mért nedvességtartalom [%]:
1.	8,9
2.	8,8
3.	8,7
4.	8,6
5.	8,7
6.	8,3
7.	8,5
8.	8,8
9.	8,9
10.	8,7
11.	8,8
12.	8,4
13.	8,6
14.	8,6
15.	8,1
Átlag:	8,62
Szórás:	0,22

2. melléklet: A tartóba feszítve beleragasztott Konstantán huzal ellenállásmérésekor mért értékek a terhelő erő függvényében I.:

Próbatest:	1.		3.		4.		5.		6.	
Mértékegység:	kN	kΩ	kN	kΩ	kN	kΩ	kN	kΩ	kN	kΩ
Eredmények:	0	0,717	0	0,738	0	0,728	0	0,739	0	0,727
	1	0,717	1	0,738	1	0,728	1	0,740	1	0,727
	2	0,717	2	0,738	2	0,728	2	0,740	2	0,727
	3	0,717	3	0,739	3	0,728	3	0,740	3	0,727
	4	0,718	4	0,739	4	0,728	4	0,740	4	0,728
	5	0,719	5	0,739	5	0,729	5	0,740	5	0,728
	6	0,719	6	0,739	6	0,729	6	0,740	6	0,728
	Tönkremenetel		7	0,739	7	0,729	7	0,740	7	0,728
			8	0,740	7,5	0,730	8	0,740	8	0,728
			9	0,740	Tönkremenetel		9	0,741	9	0,728
			10	0,740			10	0,741	10	0,729
			11	0,740			11	0,742	10,5	0,729
			12	0,740			Tönkremenetel		Tönkremenetel	
			13	0,741						

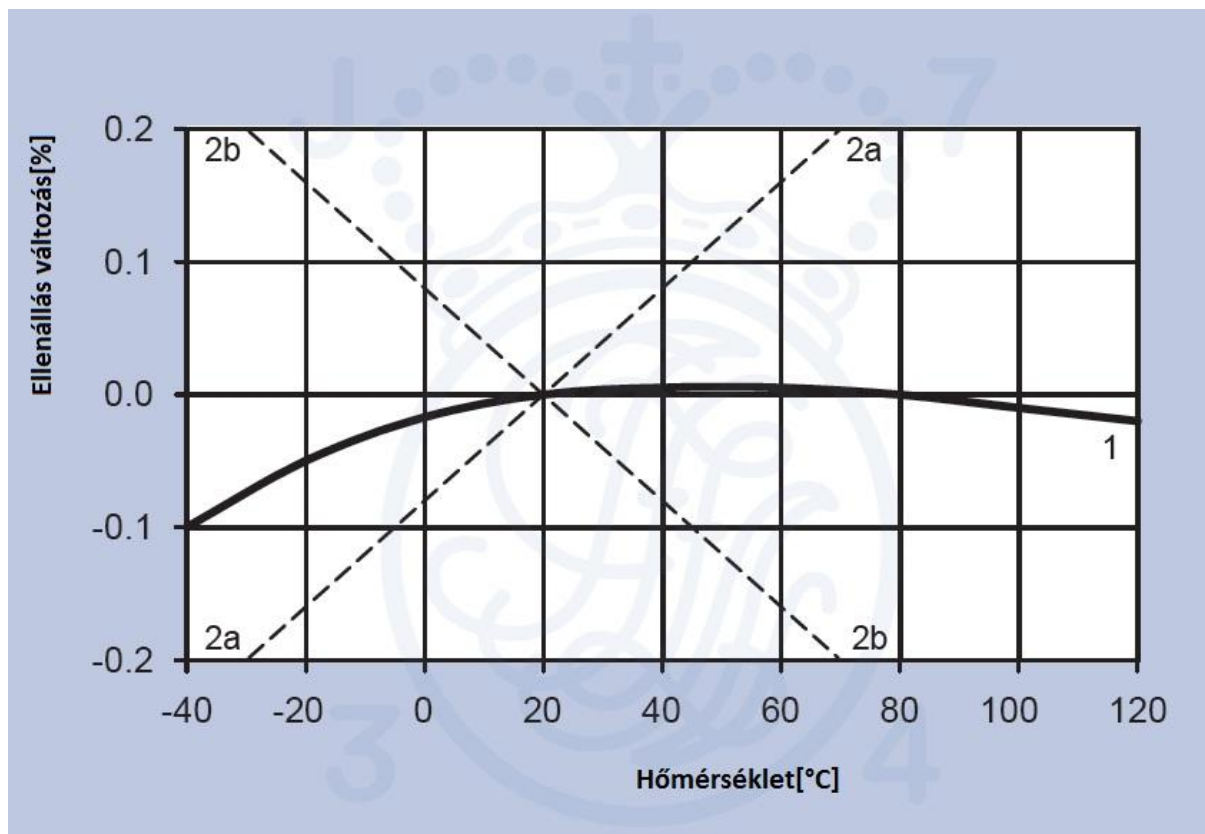
3. melléklet: A tartóba feszítve beleragasztott Konstantán huzal ellenállásmérésekor mért értékek a terhelő erő függvényében II.:

Próbatest:	7.		9.		10.		11.		12.	
Mértékegység:	kN	kΩ	kN	kΩ	kN	kΩ	kN	kΩ	kN	kΩ
Eredmények:	0	0,732	0	0,723	0	0,748	0	0,723	0	0,735
	1	0,732	1	0,724	1	0,748	1	0,723	1	0,736
	2	0,732	2	0,724	2	0,748	2	0,723	2	0,736
	3	0,732	3	0,724	3	0,749	3	0,723	3	0,736
	4	0,733	4	0,724	4	0,749	4	0,724	4	0,737
	5	0,733	5	0,724	5	0,749	5	0,724	5	0,737
	6	0,733	6	0,725	6	0,749	6	0,724	6	0,737
	7	0,733	7	0,725	7	0,750	7	0,724	7	0,737
	8	0,733	8	0,725	8	0,750	8	0,724	8	0,737
	9	0,734	9	0,726	9	0,750	9	0,725	9	0,738
	10	0,734	Tönkremenetel		10	0,751	10	0,725	Tönkremenetel	
	11	0,734			Tönkremenetel					
	12	0,734								
	13	0,735								

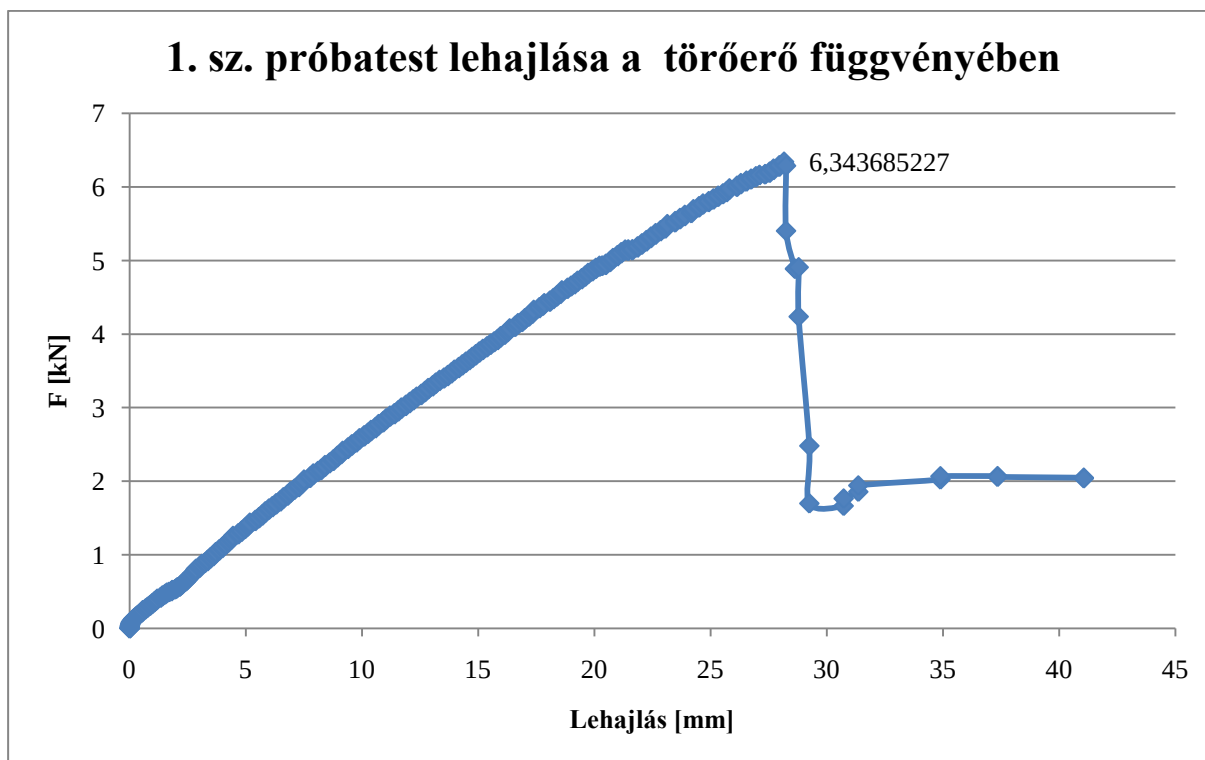
4. melléklet: A tartóba feszítve beleragasztott Konstantán huzal ellenállásmérésekor mért értékek a terhelő erő függvényében III.:

Próbatest:	2.	
Mértékegység:	kN	Ω
Eredmények:	0	714,530
	1	714,750
	1,5	714,830
	2	714,920
	2,5	715,010
	3	715,070
	3,5	715,150
	4	715,240
	4,5	715,310
	5	715,420
	5,5	715,500
	6	715,590
	6,5	715,670
	7	715,760
	7,5	715,850
	8	715,940
	8,5	716,030
	9	716,110
	9,5	716,210
	10	716,280
	10,5	716,380
	11	716,450
	11,5	716,560

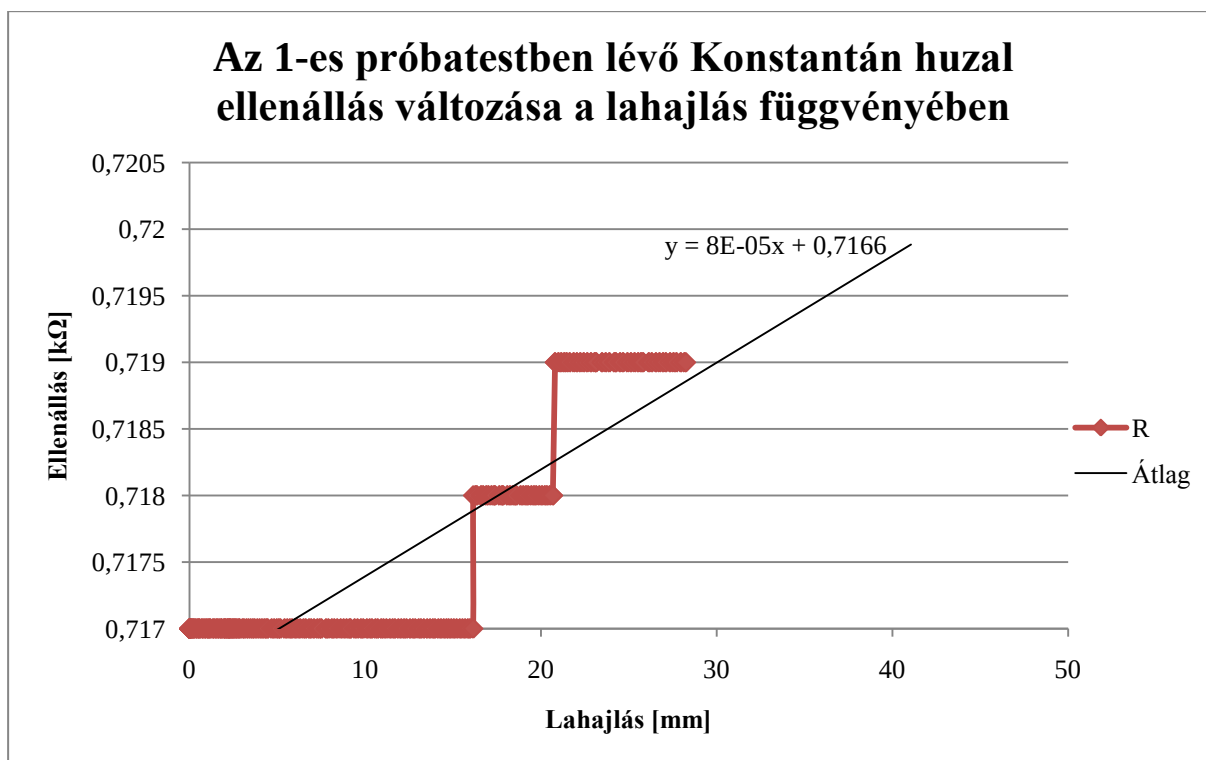
5. melléklet: A tartóba feszítve beleragasztott Konstantán/ ISOTAN® huzal ellenállás változása, a műszaki adatlapja alapján (ISABELLENHÜTTE HEUSLER GMBH & CO. KG, 2012)



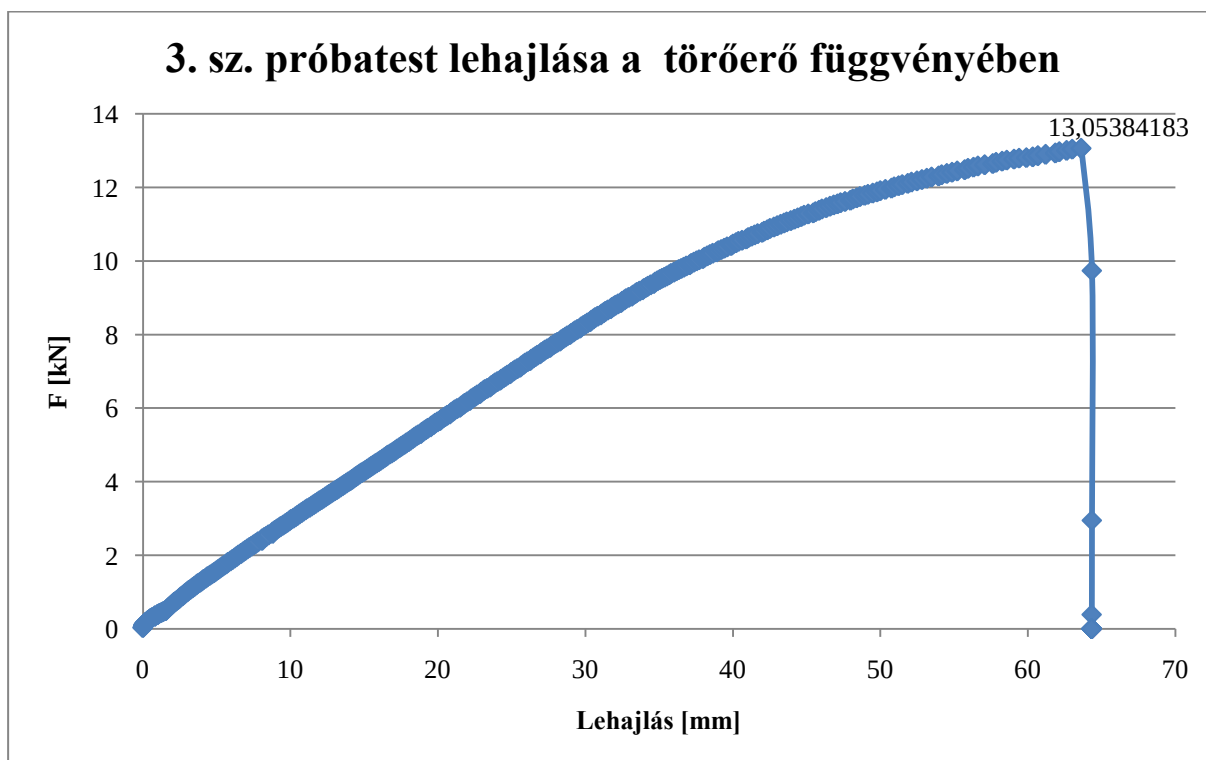
6. melléklet: Az 1-es számú próbatest tönkremenetele, az ábrán jelölve van a maximális törőerő



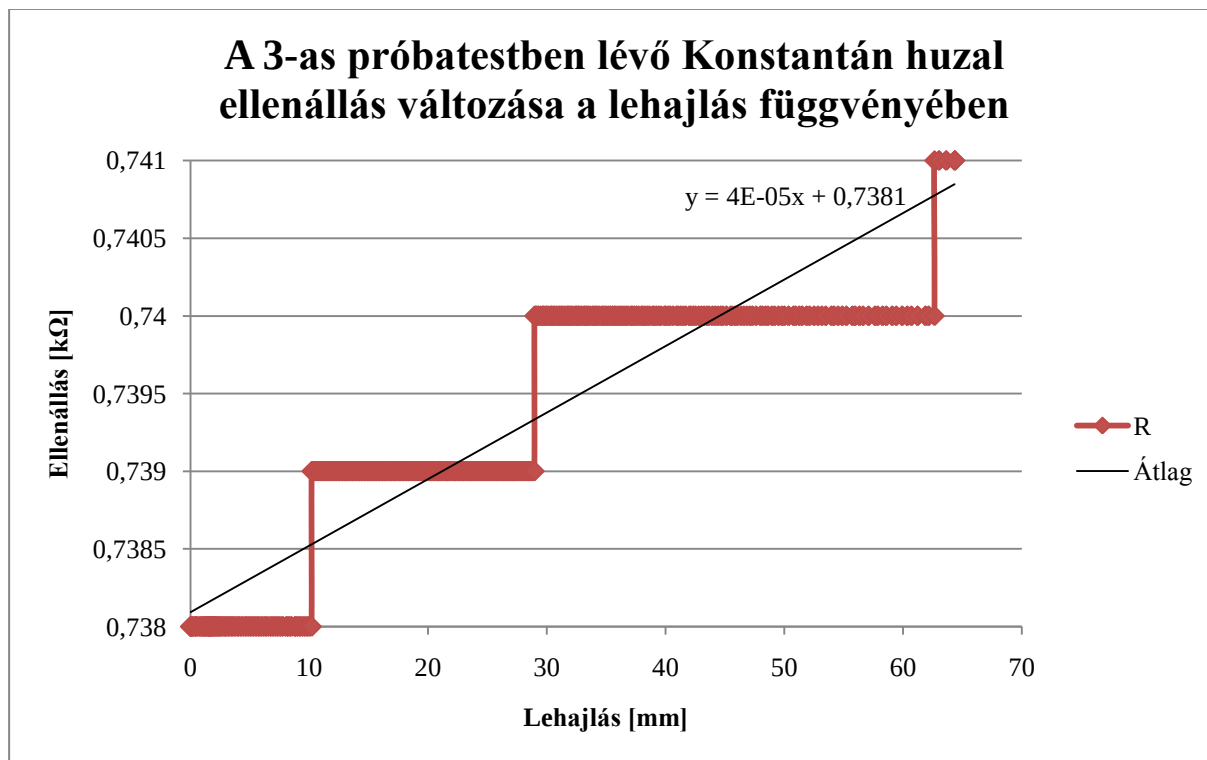
7. melléklet: Az 1-es próbatestben lévő Konstantán huzal ellenállás változása a lehajlás függvényében



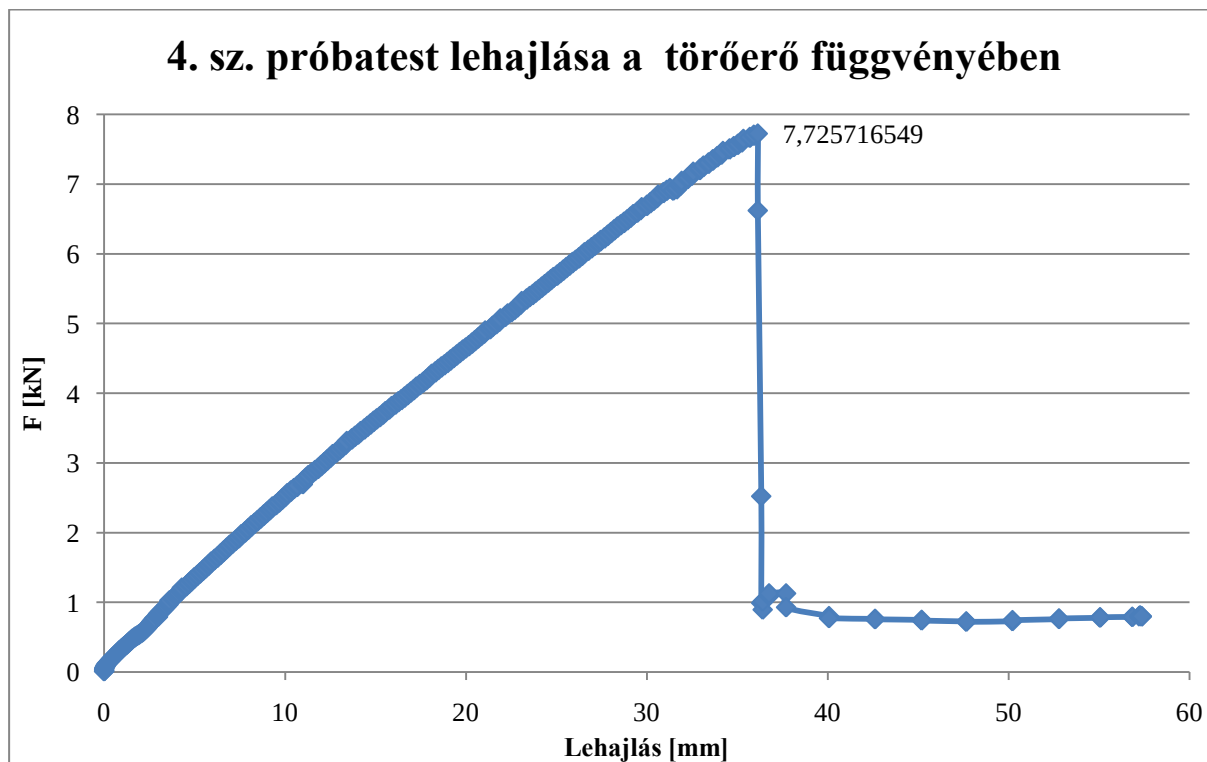
8. melléklet: A 3-es számú próbatest tönkremenetele, az ábrán jelölve van a maximális törőerő



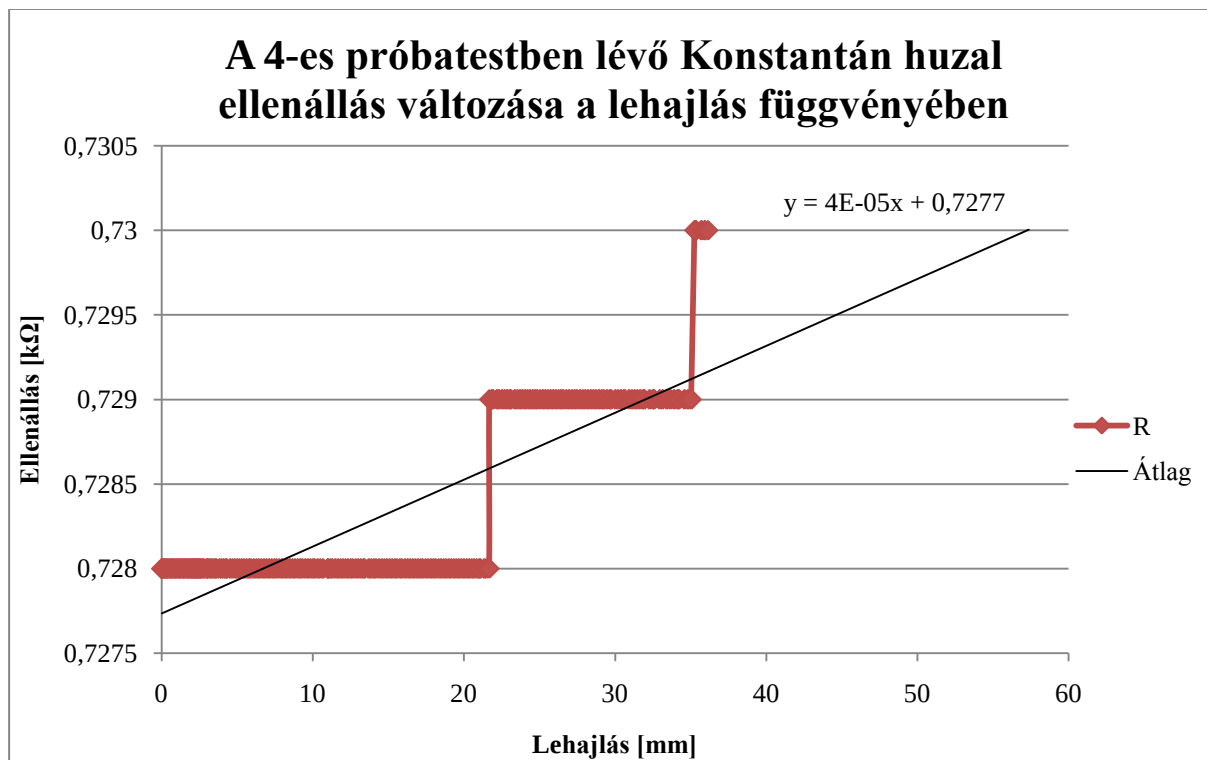
9. melléklet: A 3-as próbatestben lévő konstantán huzal ellenállás változása a lehajlás függvényében



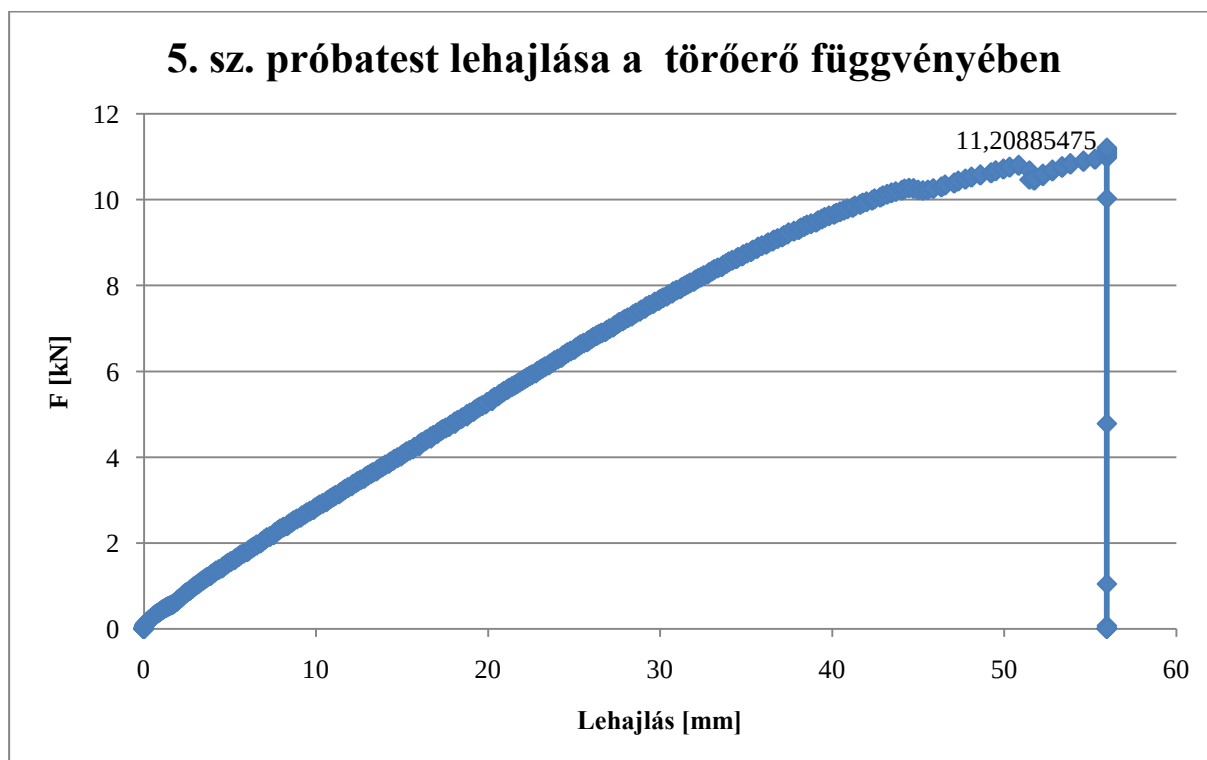
10. melléklet: A 4-es számú próbatest tönkremenetele, az ábrán jelölve van a maximális törőerő



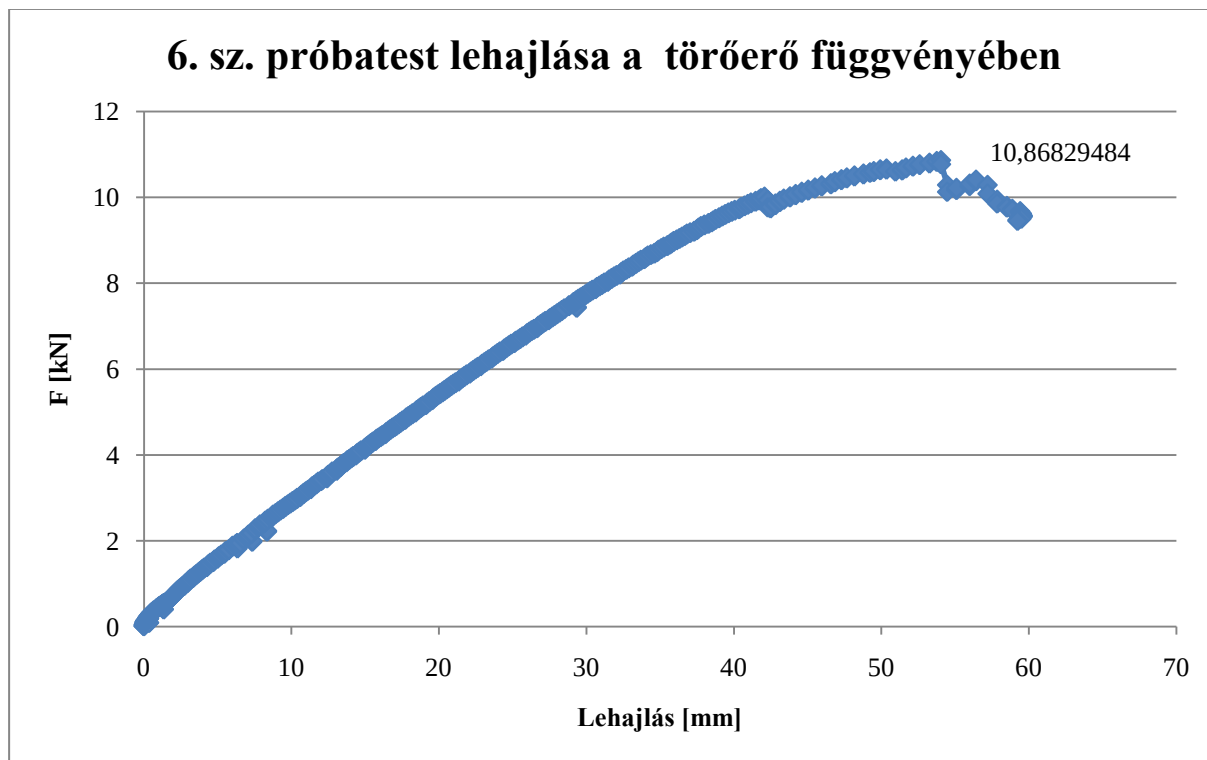
11. melléklet: A 4-es próbatestben lévő Konstantán huzal ellenállás változása a lehajlás függvényében



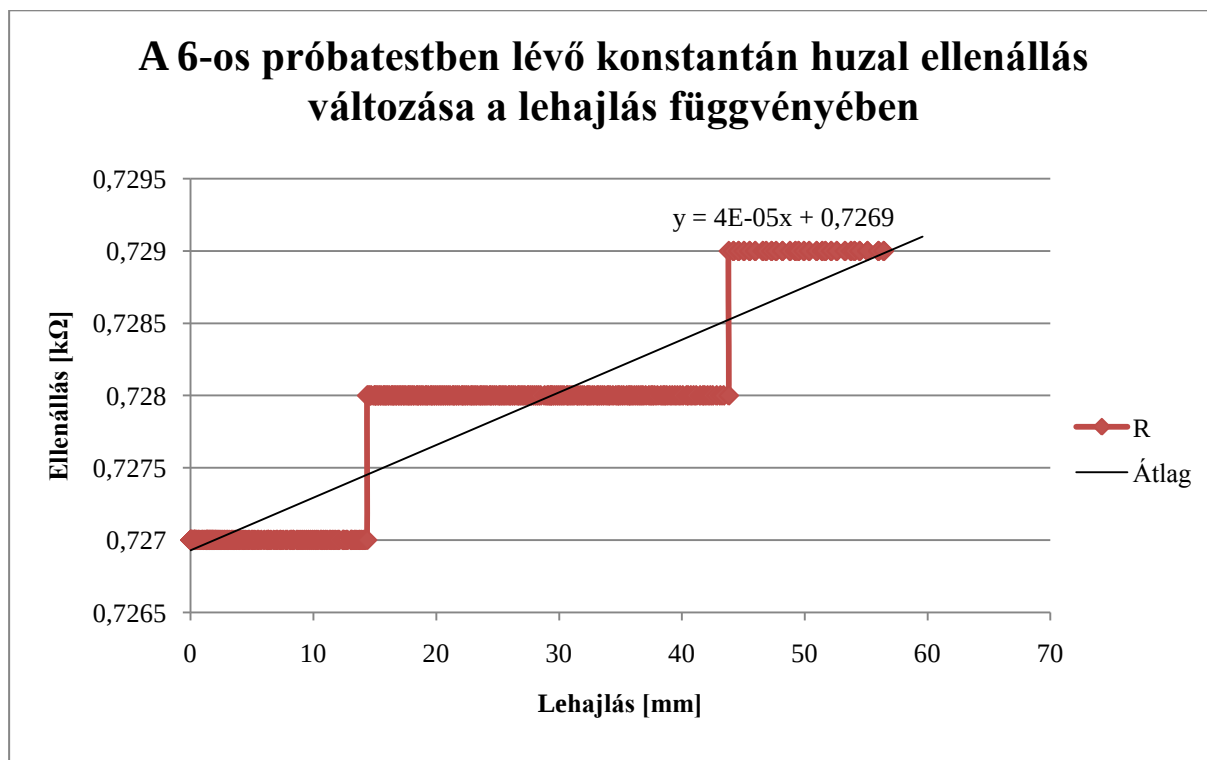
12. melléklet: Az 5-ös számú próbatest tönkremenetele, az ábrán jelölve van a maximális törőerő



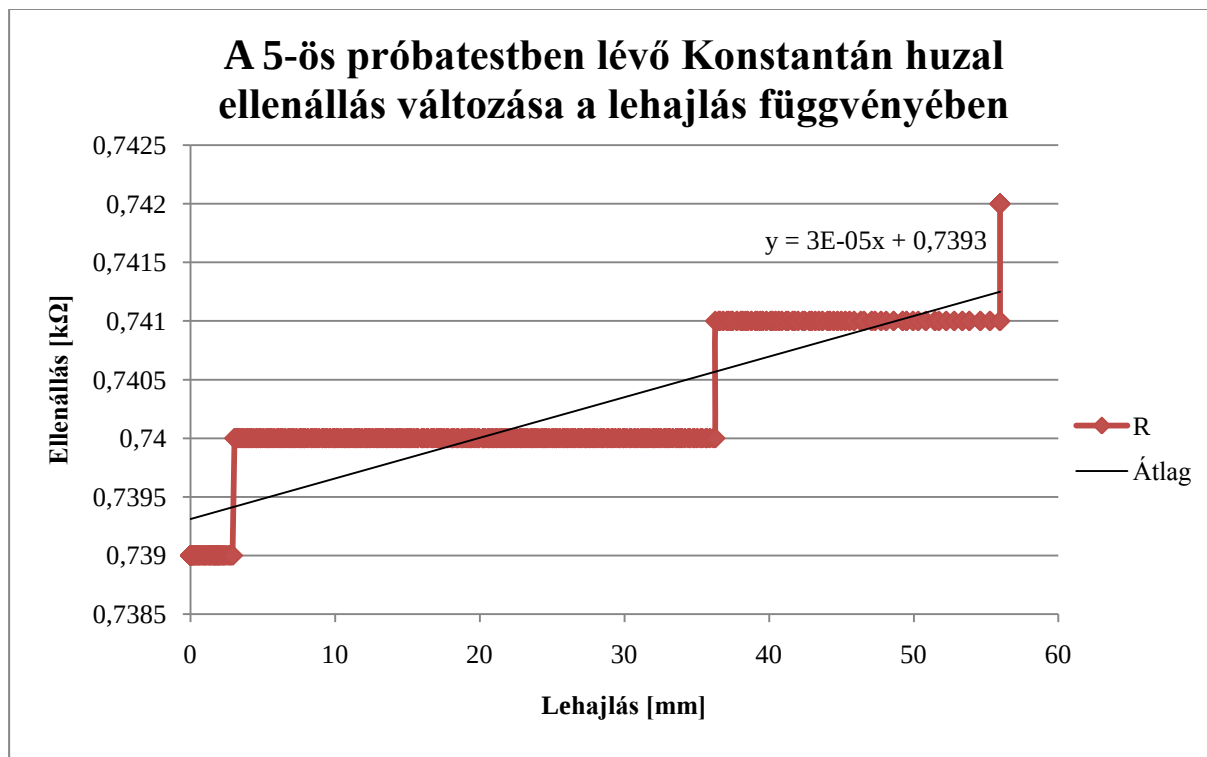
13. melléklet: A 6-os számú próbatest tönkremenetele, az ábrán jelölve van a maximális törőerő



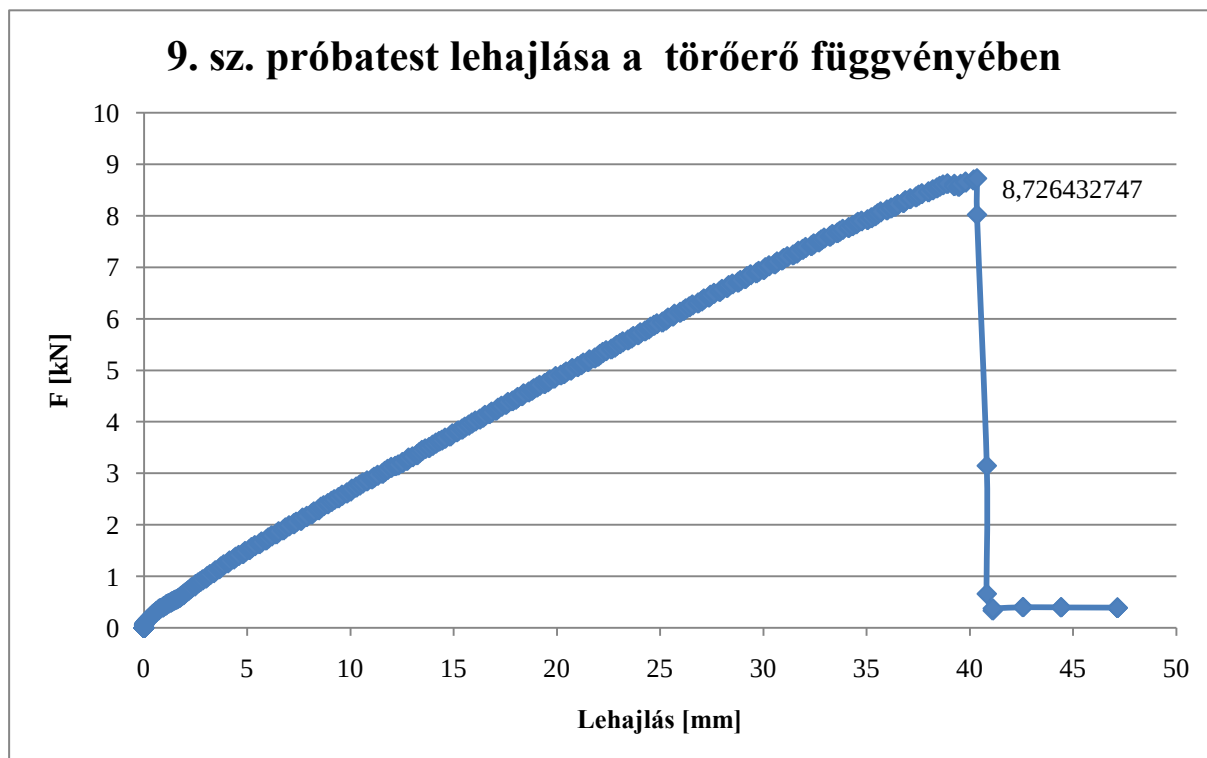
14. melléklet: A 6-os próbatestben lévő Konstantán huzal ellenállás változása a lehajlás függvényében



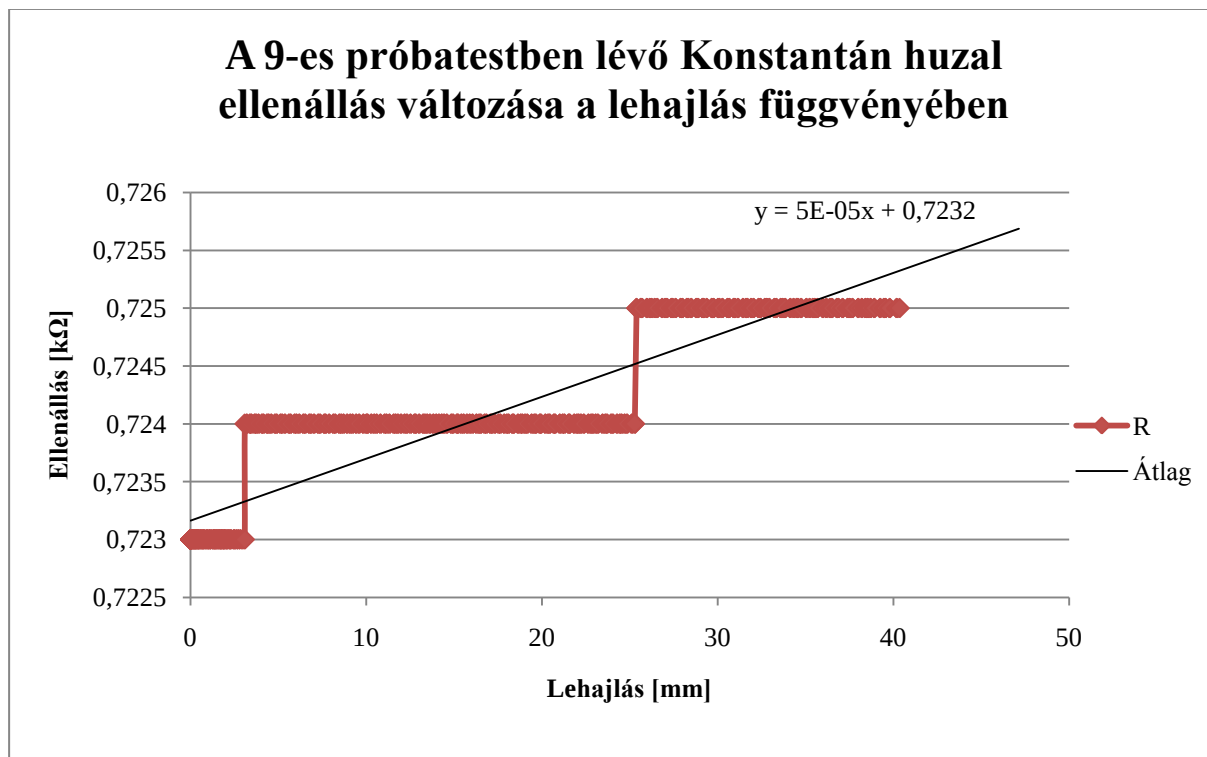
15. melléklet: Az 5-ös próbatestben lévő Konstantán huzal ellenállás változása a lehajlás függvényében



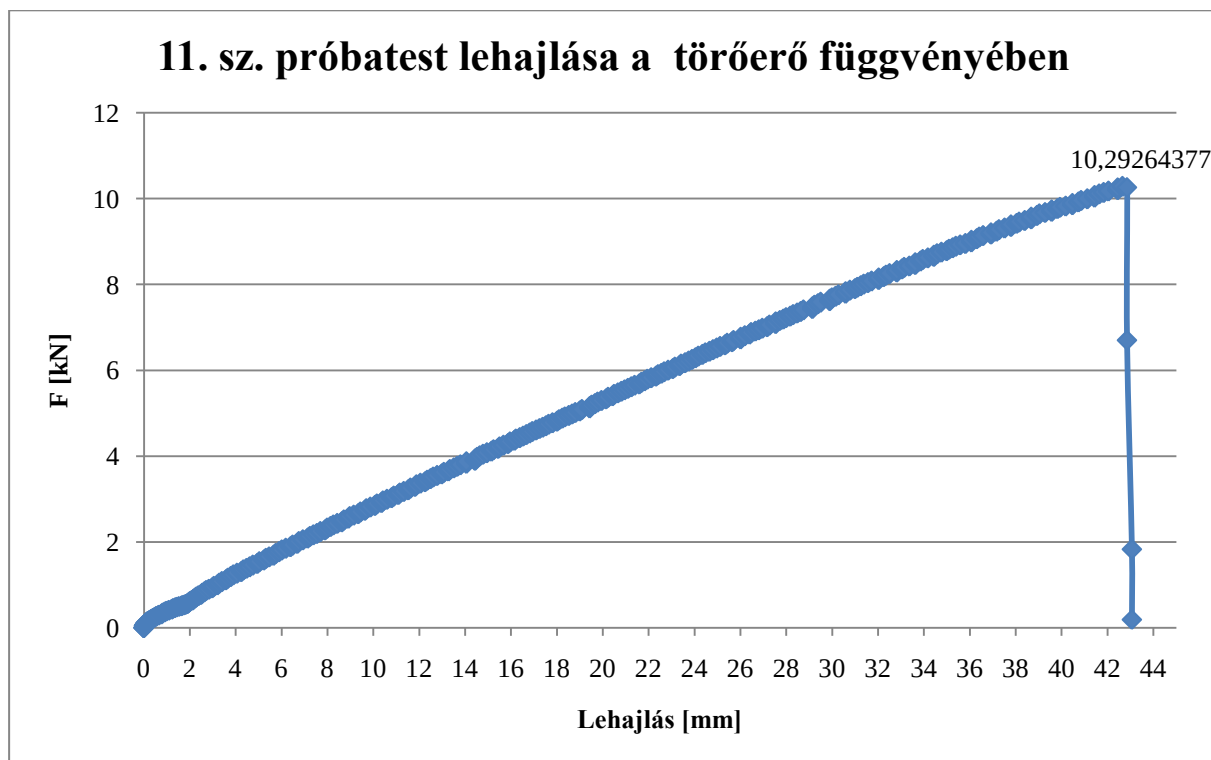
16. melléklet: A 9-es számú próbatest tönkremenetele, az ábrán jelölve van a maximális törőerő



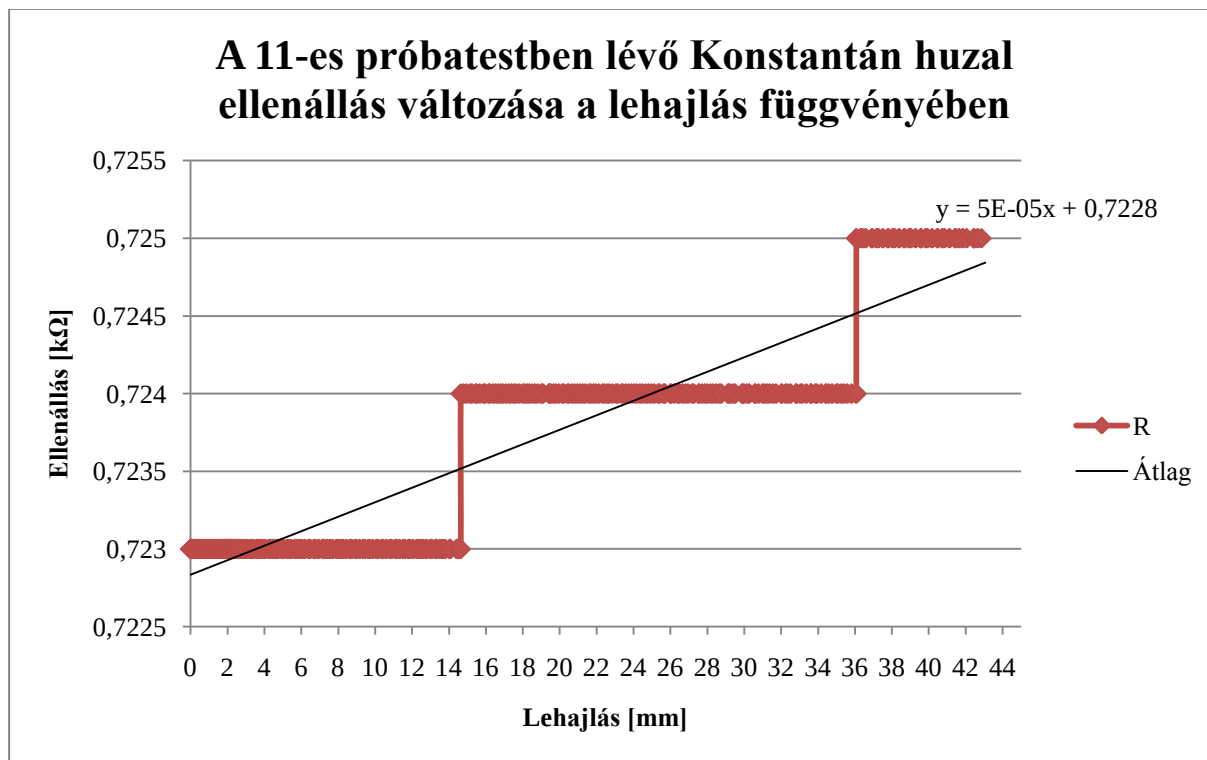
17. melléklet: A 9-es próbatestben lévő Konstantán huzal ellenállás változása a lehajlás függvényében



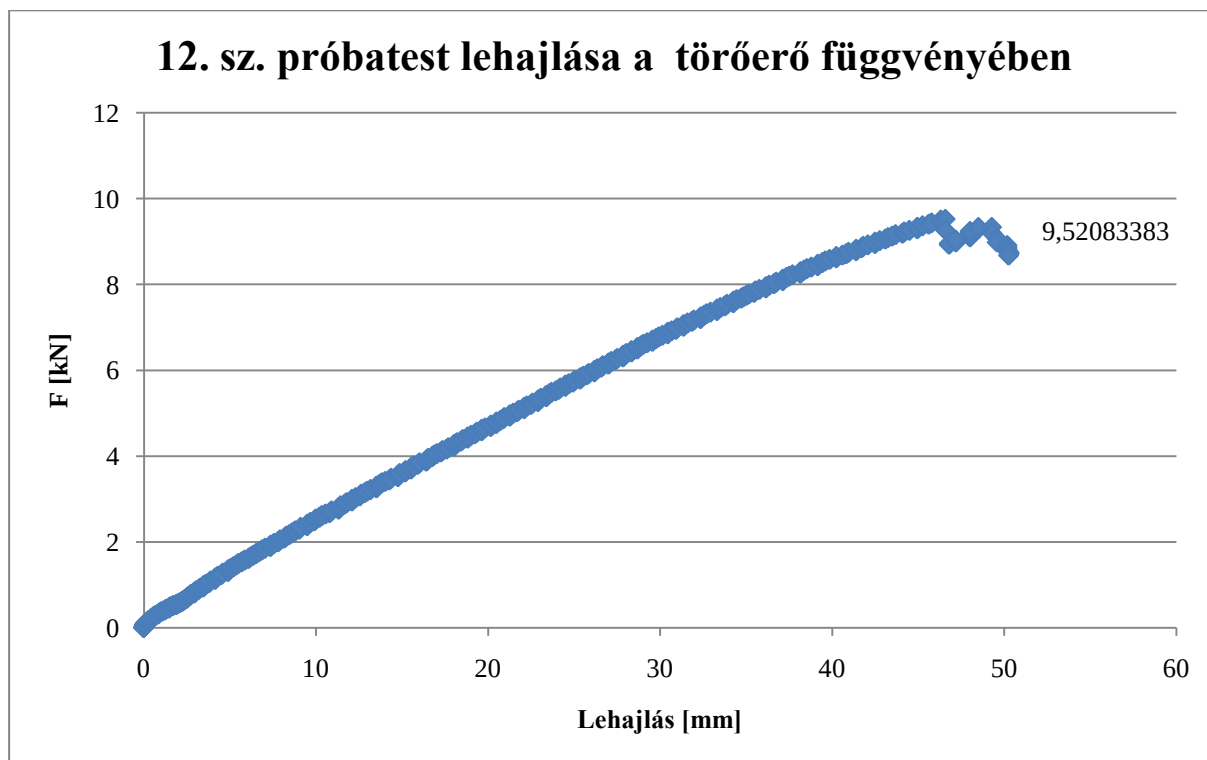
18. melléklet: A 11-es számú próbatest tönkremenetele, az ábrán jelölve van a maximális törőerő



19. melléklet: A 11-es próbatestben lévő Konstantán huzal ellenállás változása a lehajlás függvényében



20. melléklet: A 12-es számú próbatest tönkremenetele, az ábrán jelölve van a maximális törőerő



21. melléklet: A 12-es próbatestben lévő Konstantán huzal ellenállás változása a lehajlás függvényében

