

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Hidak és Szerkezetek Tanszék

VÉKONYFALÚ NYOMOTT RÁCSRÚD KÍSÉRLETI ÉS VÉGESELEMES VIZSGÁLATA



Csőhevederes szállítószalag, Pápua Új Guinea

Készítette: Gósi Levente (BDBCUS)

Konzulens: Dr. Joó Attila László

Dr. Völgyi István

2014/2015 I. félév

Tartalomjegyzék

1.	Tanulmány	3
1.1.	A berendezés bemutatása	3
1.2.	A berendezés tartószerkezetének a bemutatása	5
1.3.	A tartószerkezetet érő hatások áttekintése	6
1.4.	A végelelemes vizsgálat eredményei	8
2.	A kísérletek előkészítése.....	11
2.1.	A kísérleti elrendezés.....	11
2.2.	Közelítő számítások	12
2.3.	Közelítő végelelemes modellek	14
3.	Kísérletek	16
3.1.	A méréseknél alkalmazott berendezések, eszközök	16
3.2.	A szállított elemek	17
3.3.	Imperfekciómérés.....	18
3.4.	Az imperfekciók forrása.....	19
3.5.	Az első kísérletsorozat – 2014 április 15-25.	21
3.5.1.	Előkészítés	21
3.5.2.	Imperfekciók.....	22
3.5.3.	Anyagvizsgálat	22
3.5.4.	A kísérlet eredményei.....	23
3.5.5.	A második méréshez felhasznált mérőműszerek	24
3.5.6.	A második mérés eredményei	25
3.5.7.	A tönkrement próbatestek maradó alakváltozásai	26
3.5.8.	A közelítő héjelelemes modell és az 1. kísérlet összehasonlítása	28
3.6.	A második kísérletsorozat – 2014 szeptember 8-12.	31
3.6.1.	Előkészítés	31
3.6.2.	Mérők kalibrálása	31
3.6.3.	A kísérletek eredményei	32
4.	A részletes végelelemes modell.....	36
4.1.	Változtatható paraméterek és azok jelentősége:.....	36
4.2.	Alkalmazott elemtípusok.....	38
4.3.	Geometria.....	39
4.4.	Befogási viszonyok:.....	41
4.5.	Vizsgálatok.....	41
4.6.	Analízis és verifikáció:.....	45
5.	Konklúzió	49

1. Tanulmány

1.1. A berendezés bemutatása

A gumihevederes szállítószalagok széles körben elterjedt, igen hatékony anyagszállító berendezések. A jól ismert vályús szalagok előnyei közé sorolják a megbízhatóságot, a könnyű beszerezhetőséget és az alacsony működési költségeket, azonban csak korlátozottan képesek alkalmazkodni a nehéz terepviszonyokhoz. Ezek a szállítószalagok tipikusan több ezer méter sugarú ívek mentén fordíthatóak, de a tervezők általában törekednek az egyenes vonalvezetés tartására.

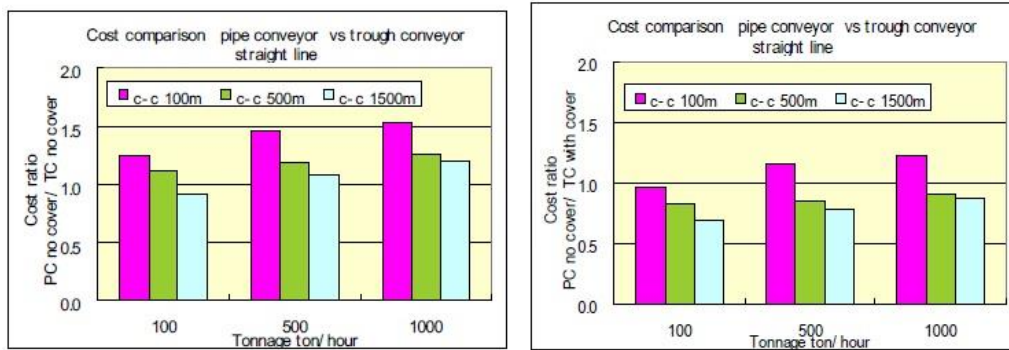
A csőhevederes szállítószalagoknál ezt a problémát orvosolják úgy, hogy a hevedert a feladási és a leadási pontok között cső keresztmetszetűre hajlítják és lehetővé teszik, hogy a heveder szabadon elfordulhasson a görgőkön. Ezzel az alkalmazható minimális ívsugar több ezerről néhány száz méterre csökken, ez jelentős szabadságot és könnyebbé teszi a vonalvezetés tervezését. Mivel ez a sugártartomány beleesik a közutak tipikus ívsugarainak tartományába, csőhevederes szállítószalagok könnyen telepíthetőek meglévő közutak mellé, a szabadabb vonalvezetés lehetővé teheti komolyabb területkiszármazási viták elkerülését.

További előnyként említhető a szabadabb magassági vonalvezetés. A hagyományos szállítószalagoknál 18°-os emelkedésnél már előfordulhat, hogy a nagyobb anyagdarabok visszagurulnak, ezzel kárt okozhatnak. A csőhevederes szállítószalag maximális emelkedési szöge 27° (35° egyes gyártók szerint ⁽²⁾), a hagyományos rendszerek korlátjának másfélszerese. Ez tovább könnyíti a nehéz terephez való alkalmazkodást és lehetővé teszi potenciálisan kevesebb alátámasztás, könnyebb acélszerkezet alkalmazását.

A környezet védelme szempontjából nagyon előnyös a kiporzásmentes, zárt hevedervezetés. A vályús szalagot külön burkolattal kell ellátni, ha azt szeretnénk, hogy a szél ne kaphasson bele a szállított anyagba és a nyílt visszafutó ági hevedervezetés miatt még ezzel együtt is elkerülhetetlen, hogy a szállítószalag környezetében évek alatt esetleg nagyobb anyagkupacok is felhalmozódjanak. A csőhevederes szállítószalag teljesen zárt, a visszafutó ágon is, a heveder anyaggal érintkező része az átadási pontokat leszámítva soha sincsen szabadon. Különleges hevederfordító berendezések beépítésével lehetővé tehető az anyagszállítás a visszafutó ágon is.

Mivel a heveder cső keresztmetszetűre van alakítva a pálya mentén a szerkezet sokkal keskenyebb lehet, ezáltal a telepítés könnyebbé válhat meglévő hídszerkezetekre vagy alagutakba.

Mindezen előnyök mellett elmondható, hogy a csőhevederes szállítószalag a hagyományos vályús szalagnál az egységnyi hosszúságra jutó költségeket tekintve mind tervezési, építési és – ha szigorúan vesszük – üzemeltetési költségek terén egy drágább szerkezet. A cső keresztmetszetűre hajtott heveder a merevségének függvényében nagyobb nyomást gyakorol a görgőkre ezáltal növelve a gördülési- és a heveder alakításából származó ellenállást, a szükséges feszítőerőt és az energiafelhasználást. Hogy ezt kezelni tudjuk nagyobb teljesítményű motor, hajtómű és drágább heveder alkalmazása válik szükségessé, a nagyobb mennyiségű görgőről nem is beszélve. A mérnöki, tervezői munka is komplexebb és mivel nem léteznek nyíltan hozzáférhető szabványok a kellő hozzáértéssel és tapasztalattal rendelkező mérnökök száma is alacsony. A szállítószalag-típus versenyképességének megítélése mindent összevetve tehát egy komplex feladat. ⁽³⁾ Az 1. ábra a csőhevederes szállítószalagok és a vályús szalagok kezdeti bekerülési költségeit hasonlítja össze. Az ábrán látható, hogy a csőhevederes szállítószalag ára a burkolattal ellátott vályús szalagokéval már versenyképes.

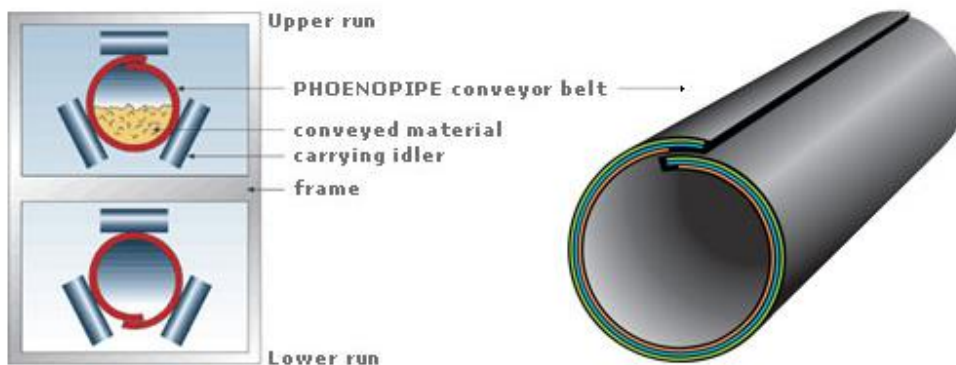


1. ábra: balra burkolatlan csőszalag és burkolatlan vályús szalag kezdeti bekerülési költségeinek aránya, jobbra ugyanez burkolt vályús szalaggal. ⁽⁸⁾

A technológiát először 1979-ben alkalmazták sikerrel Japánban. A fejlesztésért a Japan Pipe Conveyor Company (JPCC) volt a felelős, ez a cég lett az eredeti technológia licenszének tulajdonosa ⁽⁴⁾. Azóta a Bridgestone Corporation megszerezte a licenszek tulajdonjogát. A technológia 1984-ben jelent meg az amerikai piacon, a Krupp Robins cég égisze alatt ⁽¹⁾. A több, mint 900 megépült berendezés nagy része Japánban működik, az USA áll a második helyen.



PHOENOPIPE®



2. ábra: a leghosszabb csőhevederes szállítózsalag a világon, egyidejűleg kétirányú szállítással; a csőhevederes szállítózsalag általános keresztmetszete és hevedere ⁽⁵⁾

A legtöbb ilyen szállítózsalag néhány száz méter hosszúságú, de akadnak köztük jóval hosszabbak is. Mint ahogy az jellemző a vályús szállítózsalagra is, a kivitelezhető hosszúság az egyre több rendelkezésre álló tapasztalatnak és az újabb technológiai megoldásoknak (gépészet, hevederek fejlesztései) köszönhetően évről évre egyre nagyobb. A 3 km-nél hosszabb szalagok mára gyakorinak tekinthetők. Az általam ismert, jelenleg üzemelő leghosszabb szállítózsalag 8171 m hosszú, 16,4 km hosszúságú végtelenített, acélszál-

erősítésű gumihevederrel, ami a főágon magas hőmérsékletű cementklinkert szállít, a visszafutó ágon pedig szenet és mészkövet Lima utcái alatt ⁽⁵⁾. Napjainkban 10 km-nél hosszabb pályák tervezése is folyamatban van ⁽³⁾. Általános trendként feltételezhető, hogy a hosszak tovább fognak növekedni, hasonlóan a vályús szalagokéhoz, abból a típusból már 20 km-t meghaladó hosszúságú pályák is léteznek.

1.2. A berendezés tartószerkezetének a bemutatása

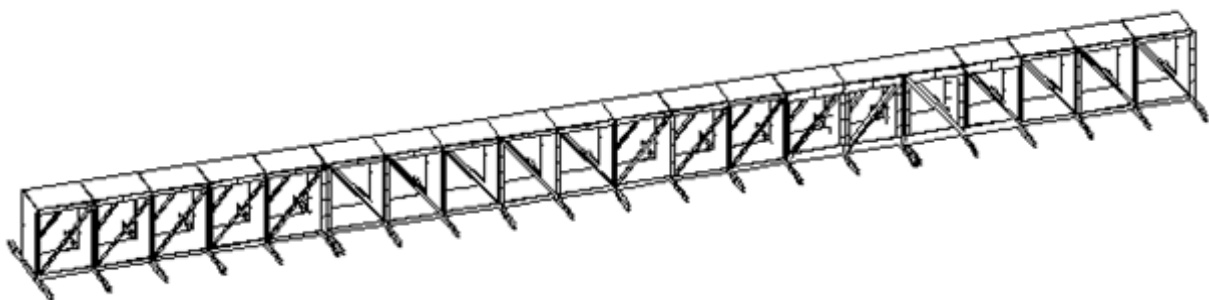
Kisebb alátámasztási távolságokhoz minden gyártónál rendelkezésre állnak típusszerkezetek, amik közül válogathatnak, ezeket nem szükséges egyedileg méretezni. Ezek a szerkezetek többnyire melegen hengerelt profilokból állnak, IPE vagy UPN gerendákból, ezekre rögzítik a görgőtartó bakokat. A hagyományos szállítószalagoknál a hevedervezetési kötöttségek miatt ritka az az eset, amikor egy szállítószalag közeli alátámasztási pontokkal, talajhoz közel tervezhető a teljes hosszban. Ha nagyobb távolság áthidalása válik szükségessé, a szállítószalagok vázszerkezete többnyire önhordó, térbeli rácsos tartó. Ezeknek a kialakítására is léteznek típustervek, de a méretezésük mindig egyedileg történik. Elképzelhető olyan megoldás is, ahol több szállítószalag osztozik egy tartószerkezeten.

A csőhevederes szállítószalag tartószerkezete is hasonló elvek szerint áll össze. Ez a berendezés képes követni a talaj egyenetlenségeit, ezért gyakrabban van lehetőség a komolyabb tartószerkezet mellőzésére, de az anyagszállítás növekvő energiaigénye miatt itt sem mindig célszerű a domborzatot követve kialakítani a pályát. Ez a tulajdonság inkább meglévő alagutakba történő telepítés során válik hasznossá. Kis szélessége miatt könnyebben telepíthető közös tartószerkezetre is, ha arra van igény.



3. ábra: egy csőhevederes szállítószalag szerkezete (BEUMER) ⁽⁶⁾

A tanulmányban az önhordó tartószerkezetet vizsgálatára koncentrálok. A szerkezet ebben az esetben is térbeli rácsos tartó, oszlopos rácsozással. A tartómagasság a funkció miatt jóval magasabb, mint a hagyományos szállítószalag-vázak esetében. Szükség szerint ott is van lehetőség szerkezetmagasításra, de itt a hevedervezetés miatt megkívánt magasság már akkora, hogy ritkán van szükség ennek a további növelésére.



4. ábra: egyszerűsített vázszerkezet ⁽¹³⁾

Az alsó övek egyenlőtlen szárú szögacélokból vannak kialakítva. Ez a kialakítás megakadályozza a minimális mennyiségű kihulló anyag felhalmozódását. A felső övek hajlított lemezből készülnek, ennek a tartószerkezeti mellett burkoló funkciója is van. Az alsó övek között és a tartószerkezet oldalsíkjain a ferde, húzott rácsrudak szögacélokból készülnek. A szerkezet legnehezebben kezelhető elemei a nyomott rácsrúdként, térbeli merevítőként és görgőtartóként is funkcionáló áttört, hidegen alakított elemek. A szerkezethez kezelőjárda is rögzíthető.

A szerkezet moduláris felépítésű, hegesztett alkatrészeket csak a modulok csatlakozó felületein tartalmaz. Háromféle modul készül, egy a támaszok fölé, három nyomott elemmel, egy általános modul, 2-2 nyomott elemmel és egy fordítomodul a támaszok közepére egy nyomott elemmel.



5. ábra: a támasz fölötti háromelemes modul jobbra, kételemes pályamenti modulok balra, összeszerelés közben, ferde rácsrudak nélkül. ⁽¹³⁾

1.3. A tartószerkezetet érő hatások áttekintése

A gépészeti méretezésnél a legfontosabb kiindulási adatok az elvárt szállítási teljesítmény, a leküzdendő szintkülönbség, a távolság és az emelkedési szögek. Ha ezek megvannak, számítható a szükséges hevederszélesség (csőátmérő), a hajtás teljesítménye és a feszítőerő nagysága a hajtódob nyomatékának átadásához. Az egyes teherrészletek értékeinek nagyságrendi szemléltetésére egy általam korábban méretezett szállítószalag-váz adatait alkalmazva mutatok be egy számpéldát.

A méretezett szerkezet a 3B Hungária KFT első ilyen szállítószalagja, kísérletként épült fel a cég hátsó udvarában. A kísérlet célja a méretezéshez alkalmazott elméleti háttér tisztázása, a méretezéskor kapott áramfelvétel és a tényleges áramfelvétel összehasonlítása valamint tapasztalatok szerzése a tartószerkezet gyárthatósága és szerelhetősége terén. A kísérleti szerkezet 51 m hosszú, a maximális támaszköz 12,5 m, az ez alapján felvett modulméret 2480 mm. A tartó szélességét gazdaságossági alapon határoztuk meg úgy, hogy az elemek kivágása után lehetőleg minél kevesebb hulladék keletkezzen, így 600 mm-re adódott. A tartómagasság 1300 mm.

A heveder vastagságát a szükséges feszítőerő és az anyag koptató hatása alapján lehet meghatározni. A szélességét a kívánt csőátmérő és a heveder éleinek a szükséges átfedése alapján határoztuk meg. A szükséges átfedésre léteznek ajánlások, amik egyes gyártók honlapján hozzáférhetőek (pl. Trellex Flexopipe

heveder prospektusában ⁽⁷⁾), ennek a heveder görgőtámok közti kinyílásának korlátozása szempontjából van jelentősége. A mi esetünkben a vastagság 10 mm, a hevederszélesség 1000 mm, amiből 280 mm átmérőjű csövet hajtottunk, 105 mm átfedéssel az éleknél.

Heveder: $\rho_{\text{hev}} := 1.4 \frac{\text{to}}{\text{m}^3}$ $B_{\text{hev}} := 1000\text{mm}$ $t_{\text{hev}} := 10\text{mm}$ $D_{b2} := 280\text{mm}$

Szállított anyag: $\rho_a := 1.9 \frac{\text{to}}{\text{m}^3}$

Állandó terhek: $\gamma_g := 1.35$

Tartószerkezet várható önsúlya: $g_{\text{sze}} := 200 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$

Heveder önsúlya: $g_{\text{hev}} := \rho_{\text{hev}} \cdot B_{\text{hev}} \cdot t_{\text{hev}} = 14 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$

Görgők önsúlya ($\varnothing 89 \times 180$): $g_{g1} := 2.3\text{kg}$ $g_g := g_{g1} \cdot 6 = 13.8\text{kg}$

Kezelőjárda önsúlya: $g_{\text{kez}} := 61 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$

Kétoldali kezelőjárdát alkalmaztunk ($B=590\text{mm}$).

Állandó terhek összesen: $g_k := g_{\text{sze}} + g_{\text{hev}} + g_g \cdot \frac{2}{1.24\text{m}} + g_{\text{kez}} \cdot 2 = 358.258 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$

Hasznos terhek: $\gamma_q := 1.5$

Szállított anyag súlya: $q_a := \rho_a \cdot \left(\frac{D_b}{2} \right)^2 \cdot \pi = 116.993 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$

Hasznos teher a kezelőjárdán: $q_h := 1.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ $Q_h := 2\text{kN}$

Hóteher: Normál terepviszonyok: $C_e := 1$

Hőmérsékleti tényező: $C_t := 1.0$

Alaki tényező (vízszintes felület): $\mu_1 := 0.8$

Hóteher karakterisztikus értéke Magyarországon:

$$s_k := 1.25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad S := \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Szélteher: Helyszíntényező alapértéke (közelítés): $c_{ez} := 2.2$

Átlagos torlónyomás (Magyarországon): $q_b := 0.25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Szélnyomás: $q_p := q_b \cdot c_{ez} = 0.55 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Felületi tényezők:

Szél támadta oldal: $c_{pe1} := 0.8$ $q_p \cdot c_{pe1} = 0.44 \text{ kPa}$

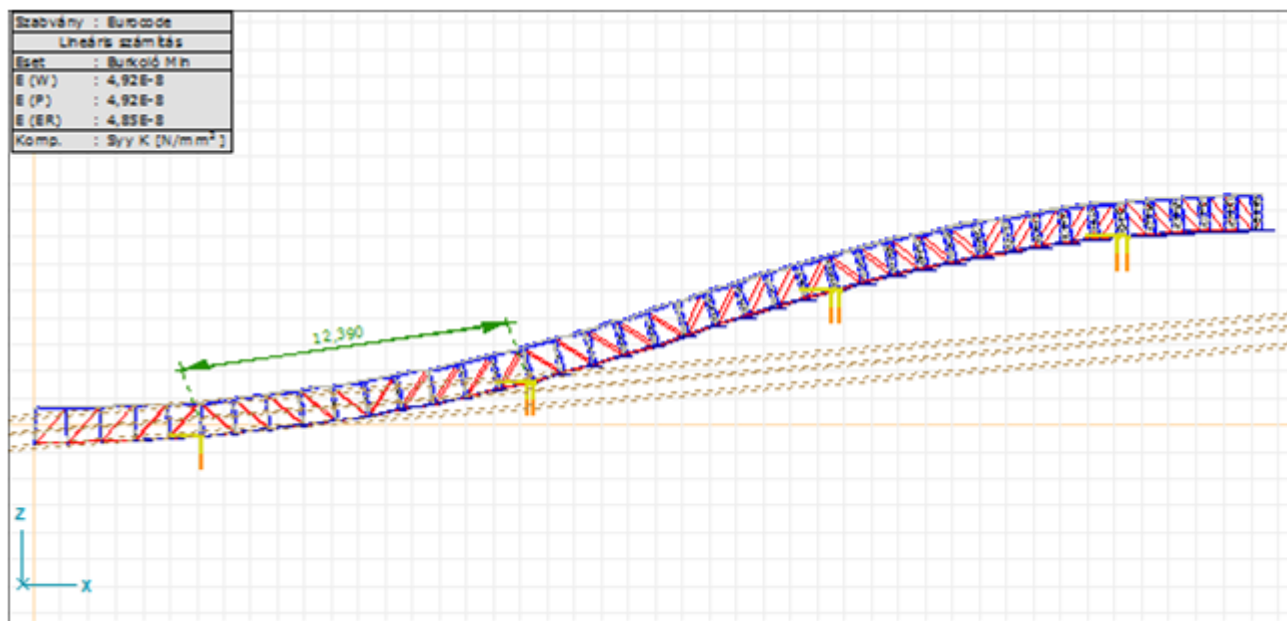
Szél védett oldal: $c_{pe2} := -0.5$ $q_p \cdot c_{pe2} = -0.275 \text{ kPa}$

Felső burkolat: $c_{pe3} := -0.8$ $q_p \cdot c_{pe3} = -0.44 \text{ kPa}$

A hasznos terheknél „telt szelvényű” anyagszállítást feltételeztem, a gyakorlatban is ez a jellemző, mert nem lehet tudni, hogy a helyszínen mennyire fogják a névleges teljesítménye fölött üzemeltetni a szállítószalagot. Erre a megnövelt terhelésre halmozódik a biztonsági tényező. A hajtóműveket is ezen elvek szerint méretezik. A kezelőjárda hasznos terhelése fiktív adat, viszonylag alacsony a korábbi munkák adataihoz képest. Mivel a szabványban a kezelőjárda-terhelésre nincs ajánlás, ezt az adatot a megrendelő szokta előírni. Ebben az esetben megegyeztünk egy reálisnak tűnő alapértékben.

1.4. A végelelemes vizsgálat eredményei

A kísérleti szerkezet méretezéséhez elkészült a szerkezet térbeli rúdszerkezeti modellje Axis VM programmal. A függőleges elemek és a felső övként szolgáló lemezelemeket héjelemekkel modelleztem, a lehajtott élek bordákként, a szerkezet többi része pedig rúdelemekkel könnyen kezelhető volt.



6. ábra: rúdszerkezeti modell, előlnézet



7. ábra: rúdszerkezeti modell, felülnézet

A modellt közvetlenül a rúdelemek méretezésére és a reakcióerők kinyerésére használtam fel. Megkaptam a függőleges elemek körülbelüli feszültségeloszlását, de a modell túlságosan elnagyolt volt ahhoz, hogy a kapott eredményeket fel lehessen használni méretezésre. Az azonban kiderült, hogy csak a támasz környékén lévő elemekre kell koncentrálni, a többiben a feszültségek a modell alapján szinte jelentéktelenek. Az alkalmazandó legkisebb lemezvastagságot a vizsgálat előtt 4 mm-ben határoztuk meg.

A végeselemes modellből kapott tervezési reakcióerőkkel végrehajtottunk egy ellenőrző kísérletet a cég szerelőcsarnokában. A kísérlet célja az volt, hogy ellenőrizzük, hogy a támasz fölötti elemek valóban elviselik-e a reakcióerőket.

A kísérleti elrendezés (8. ábra) tartalmazott egy terhelőkeretet, egy erőmérő cellát, egy 20 t teherbírású hidraulikus sajtót, egy teherelosztó gerendát, néhány biztonsági elemet és magát a próbatestet. A sajtó a gerendához volt rögzítve, az erőmérő cella pedig a terhelőkerethez. A gerenda szabadon csúszhatott a terhelőkeret vezető szögacéljai között.

A sajtót nem a gerenda közepére helyeztem el, hogy ne egyenlően ossza el a terhelést, ezzel követve a modell szintén aszimmetrikus reakcióerő-eloszlását. Mérőberendezéseket az erőmérő cellán kívül nem használtam.

A tönkremenetel jellegére vonatkozóan a hipotézis a következő volt: a kísérletet megelőzően, úgy gondoltam, hogy az élek kihajlásával lecsökken a 4. km. osztályú elem gyenge tengely körüli inerciája, a tönkremenetel pedig ennek a közvetlen következményeként fog bekövetkezni. A kísérlet során ennek a tönkremeneteli módnak a jeleit igyekeztem keresni, a kísérlet végeztével úgy véltem, hogy láttam is az előjeleit, de igazolni mérések hiányában nem tudtam. További tanulság volt, hogy a próbatest nagyon érzékeny az erőbevezetés kialakítására. Ennek szerencsére gyakorlati jelentősége a szerkezet kialakítása miatt kevés van, de a tanszéki kísérlet megtervezésére ez a tapasztalat nagy hatással volt.

A próbatestet nem tettük tönkre, sem a teherelosztó gerenda, sem a sajtó nem volt erre alkalmas. A terhelés során 145 kN-ig terheltük, ami valamelyest meghaladja modellből nyert reakcióerőt. A próbatest 4 mm-es lemezből készült, a próbaterhelés után magabiztosan építettük be a 6 mm-es lemezt a támasz fölé a kísérleti szerkezetbe.



8. ábra: az ellenőrző kísérleti elrendezés ⁽¹³⁾

Mint ahogy az a fentiekből érezhető, a méretezés során igyekeztem biztosra menni. A kísérleti szerkezet rövid, a fókusz a gépészeti elemek kialakításán volt, nekem pedig gyorsan kellett dolgoznom és nem is volt nagy jelentősége az alkalmazott lemeztavastagságoknak. A kísérlet arra volt elég, hogy megnyugtassam magam a szerkezet teherbírását illetően.

Nem sokkal ezután a cég készített egy csőhevederes szállítószalagot, aminek az előzetes méretezését én végeztem, a végleges méreteket azonban tervezői jogosultsággal rendelkező statikusnak kellett megadnia, így csináltattunk független statikát is. Ők a lemezelemeket egyszerű rúdvázsal modellezték, kiszámolták az effektív keresztmetszeteket és ez alapján szögacél profilú rúdelemekkel helyettesítették a lemezek hajlított

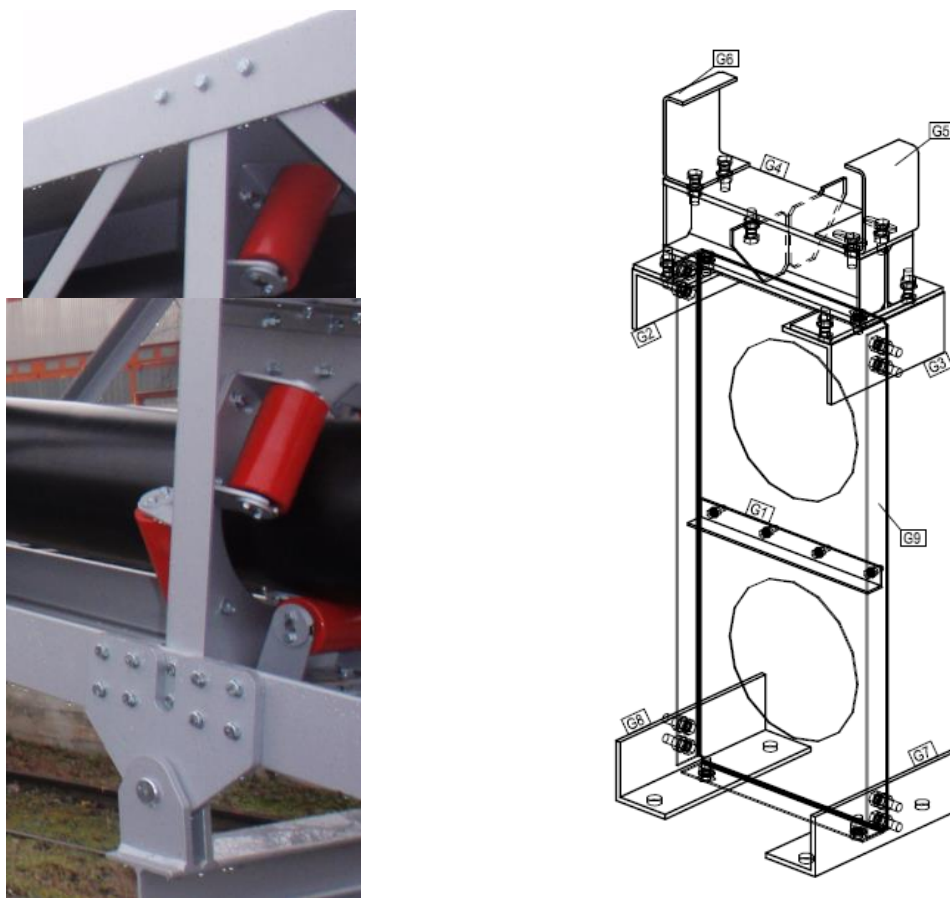
éleit, az elv szerint a teherviselésből kieső részeket pedig teljesen elhanyagolták. A számítás eredményeként sokkal nagyobb lemezvastagságok jöttek ki a támaszok környékére, mint amire számítottunk, pedig a szerkezet tartómagassága és támaszközei megegyeztek a kísérleti szerkezettel. Ebből vált nyilvánvalóvá, hogy ezzel a kérdéssel kell foglalkozni, mert az elemek működésének a megértésével és tartalékainak kihasználásával egy hosszú szerkezet esetében rendkívül sok anyagot és pénzt meg lehet takarítani, versenyképesebb szerkezeteket lehet alkotni.

2. A kísérletek előkészítése

2.1. A kísérleti elrendezés

Bár a végelelemes technika rohamosan fejlődik úgy vélem, hogy a jövőben sem lesz elkerülhető a kísérletezés a szerkezettervezésben. Az új technológiák, szerkezeti elemek megfelelőségét lehetetlen kizárólag véges elemes futtatással igazolni, legalább néhány fizikailag is elvégzett kísérlettel alá kell támasztani a futtatások eredményeit. Egy kísérlet végrehajtása és kiértékelése viszont csak a legutolsó lépés a hosszú időt felemésztő folyamatban. Bármiről is legyen szó, a siker kulcsa a gondos előkészítés.

Első lépésként meg kellett alkotni azt a kísérleti elrendezést, ami hűen tükrözi a vizsgált elem szerkezetben való viselkedését. A támasz fölötti elem viszonylag nagy nyomásnak van kitéve, ezt a nyomást pedig a sarkainál a szögacél övekre szerelt füleken és a szögacélon keresztül a sarkain koncentrálni veszi fel. A terhelést a ferde kötőknek szintén a sarkainál adja át (9. ábra). A fentiek alapján én is olyan elrendezést alakítottam ki, amiben a vizsgált elem a sarkain koncentrálni kapja a terhelést.



9. ábra: a támasz és a ferde kötő csatlakozás kialakítása, valamint a kísérleti elrendezés

Az alsó csukló biztosítja azt, hogy az elem a terhelést normálerő formájában, nyomaték nélkül kapja. Az alsó öv és a felső öv a ferde kötőkkel biztosítják azt, hogy a függőleges elem alsó és felső keresztmetszetei ne

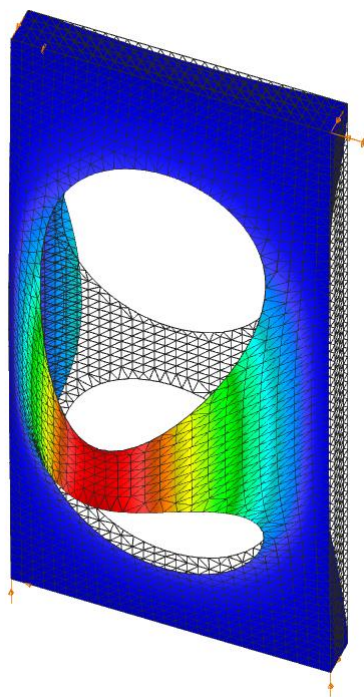
tudjanak elfordulni. A kísérleti elrendezésben az alsó befogás elfordulásmentessége a hosszú felfekvés miatt egyértelműen teljesül. A teherelosztó gerenda közepére egy hosszú, egytengelyű csuklót helyeztünk (ez a mellékelt ábrán nem látszik, a gerenda közepén lévő bordák funkciója a csukló alsó lemezének a megtámasztása, ld. 1. rajzi melléklet), ami a terhelés két oldal közti egyenletes elosztása mellett biztosítja azt, hogy a teherelosztó gerenda se tudjon elfordulni a hossz tengelye körül. A próbatestet a terhelés megkezdése előtt igyekeztünk tökéletesen függőleges helyzetbe állítani, így minimalizáltuk a ferdeségből adódó járulékos nyomatékokat.

2.2. Közelítő számítások

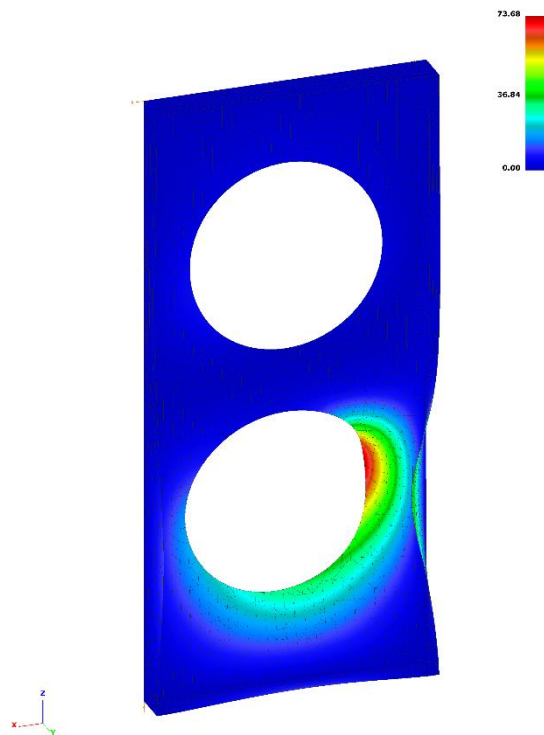
Mivel az első kísérlet elvégzésekor nem tettük tönkre a próbatestet, a tönkremenetel módjáról nem voltak pontos adataim, csak a kísérlet tanulságaként kialakult feltételezéseim. A kísérleti összeállítás tervezésekor ezek alapján határoztam meg egyszerű, kézi számítással a várható maximális terhelést, ezek alapján választottunk terhelő berendezést, méreteztem a kapcsolatokat és a teherelosztó gerendát.

Az egyik ilyen feltételezés az volt, hogy az elem úgy fog viselkedni, mintha lyukgyengítés nélküli 4. km. osztályú C szelvény lenne és gyenge tengely körüli kihajlással fog tönkremenni úgy, hogy a keresztmetszet az élek korábbi kihajlása miatt torzul, így csökkentve a „hatékony” gyenge tengely körüli inerciát, ezáltal a kihajlással szembeni ellenállást. Ehhez a tönkremeneteli módhoz (a torzulás figyelmen kívül hagyásával) 320 kN-os maximális teher tartozott a kézi számítás szerint (lásd. 1. sz. számítási melléklet)

A fenti eredmény ellenőrzésére létrehoztam egy Consteel modellet, ebben csak a lemezelemet modelleztem (3. ábra). A kapott első sajátalak jellegében az első feltevéshez volt hasonló, csak sokkal alacsonyabb teherszinten jelentkezett. Az élek a várthoz képest az ellenkező irányba mozdultak és a hajlítási él nem alakváltozott, a középső lemezmező követte a keresztmetszet elfordulását (10. ábra). A Consteel modell merevített esetben a gyengített rész elcsavarodó kihajlását vetítette előre, magasabb teherszinten (kb. 200 kN, 11. ábra). A kísérlet tervezése szempontjából úgy döntöttünk, hogy az első feltételezés kézi számítását felhasználva tervezzük meg az összeállítást, mert az adta a legnagyobb teherértéket. A magas várható teherbírást az is alátámasztotta, hogy a korábban elvégzett kísérlet során az elemet a szimmetriatengelytől eltoltan terhelve 16 t-s teherszinten (ez a szimmetriatengelyben terhelve úgy 20 tonnának felel meg) a tönkremenetelnek még szinte semmi jelét nem láttuk.



10. ábra: első stabilitásvesztési sajátalak; teherszorzó=3.51, teher=140.4 kN



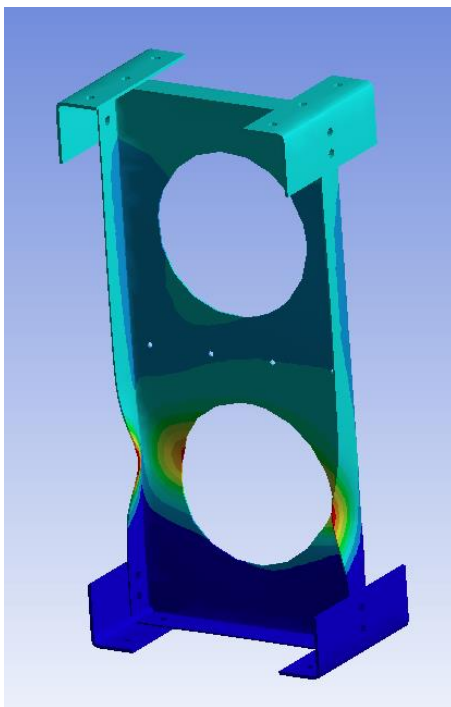
11. ábra: első stabilitásvesztési sajátalak a középső merevítő beépítése esetén

Az előzetes számítások és modellek alapján nem következtettem az erőbevezetés jelentőségére, úgy gondoltam, hogy mivel a horpadási sajátalakok nem a sarkok környékén jelentkeztek elég, ha az erőátadást a valóságoshoz képest a csavarméreték megnövelésével átalakítom, hogy kizárjam a csavar nyírási és az anyag palástnyomási tönkremenetelét. Fontos volt, hogy a vizsgált elemről kaphassunk képet és a kísérleti elrendezés egyéb elemei ne befolyásolják a kísérlet kimenetelét, ezért a sarokelemeket is vastagabbra terveztem, mint a valóságos. Fontos volt, hogy a vizsgált elem legyen az elrendezés leggyengébb tagja. A teherelosztó gerendát a 320 kN-os maximális terhelésre méreteztem. Nem lett volna szerencsés, ha pl. a gerenda gerince beroppan vagy a merevítetlen gerinc nyírásra tönkremegy a próbatest tönkremenetele előtt, ezért minden lehetséges tönkremeneteli módot ellenőriztem. A gerenda mérete végül HEB180-ra adódott, a sarokelemek lemezvastagságai lv12-re és M20-as csavarokat alkalmaztam (lásd. 1. rajzi melléklet).

Nem is a magas teherbírás, sokkal inkább az elrendezés nagy méretei miatt választottuk a **WPM-600**-as 600 tonnás hidraulikus terhelő berendezést. A gép egy állítható magasságú keretből és egy nagyteljesítményű hidraulikus munkahenger által emelt rögzítő hornyokkal ellátott alsó elemből áll. A géphez tartozik egy erőmérő, ami a munkahengerben lévő folyadék nyomását méri és alakítja át erővé.

Ekkora várható terhelésnél fontos a biztonság – a teherelosztó gerendát fülekkel rögzítettük a berendezés felső terhelőlapjához és a gép saját M33-as csavarjaival a hidraulikus munkahengerek által emelt alsó részhez. Az is felmerült, hogy a próbatestek méretét lecsökkentjük; nem valós méreteket használunk, hanem valamilyen lépték szerint csökkentetteket. Ez a várható alacsonyabb teherbírás miatt sokkal biztonságosabb megoldás lett volna, kisebb gépet is alkalmazhattunk volna. Az elsődleges célunk az volt, hogy a valós szerkezet viselkedéséről alkossunk képet, erre lehetőségünk is volt, rendelkezésre álltak az 1:1-es méretű próbatestek és kiegészítő alkatrészek, előre láthatólag a 600 tonnás terhelő berendezésen is volt szabad kapacitás, így ezt a lehetőséget elvetettük. Úgy ítéltük, hogy a biztonsági elemek beépítésével és a csavarok túlméretezésével nincs okunk attól félni, hogy esetleg a kísérlet során személyi sérülés történik.

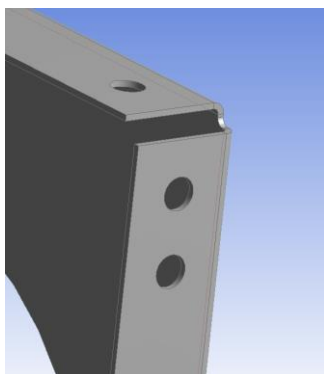
2.3. Közelítő végelelemes modellek



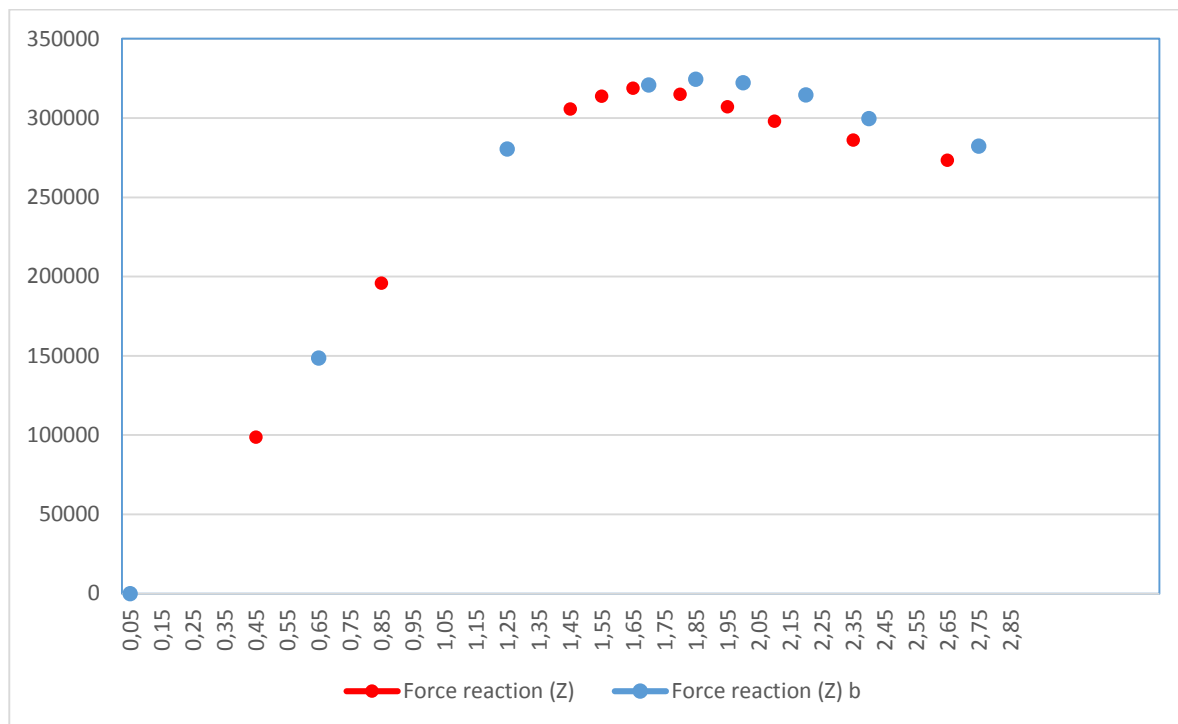
12. ábra: testelelemes Ansys Workbench modell tönkremenetele

Az elemek megrendelése után (lásd. 1. sz. rajzi melléklet), de még a kísérletek előtt elkészült kettő anyagilag nemlineáris Ansys modell (a *Végelelem módszeren alapuló szerkezettervezés* tárgy keretében, 12. ábra), egy testelelemes és egy héjelelemes, az ezek által szolgáltatott adatok alátámasztották a terhelés meghatározásával kapcsolatos korábbi óvatosságunkat. A testelelemes modell a kézi számításhoz hasonló eredményt adott, 320 kN-os maximális teherbírást, míg a héjelelemes 280 kN körüli értéket. Mindkét modell a 11. ábra szerinti módon ment tönkre, vagyis a gyengített nyomott szögacélszerű szakaszok elcsavarodásával bekövetkező tönkremenetelt vetített előre.

A testelelemes modell Ansys Workbench-ben készült. Kezdetben csak a próbatestet tartalmazta (13. ábra), a teher a függőleges él felső furatain és a vízszintes él felületén volt megadva előírt elmozdulásként. Megpróbáltam a valós helyzetet modellezni, de ezzel a geometriával nem sikerült úgy beállítani a peremfeltételeket, hogy a megoldás konvergáljon. Attól kezdve volt használható, hogy a modellbe beillesztettem a sarokelemeket és a felületeket bonded contact-tal kötöttem össze. A modell így jól konvergált, nagy elmozdulások esetén is kaptam értékelhető eredményeket. A célom ezzel a modellel a várható teherbírást korábbi meghatározásának numerikus ellenőrzése volt. A tönkremeneteli mód ugyan nem egyezett a várttal, de a teherbírást szinte pontosan megegyezett a kézi számítással így abba is hagytam a modell fejlesztését és áttértem a héjelelemes APDL modellre.

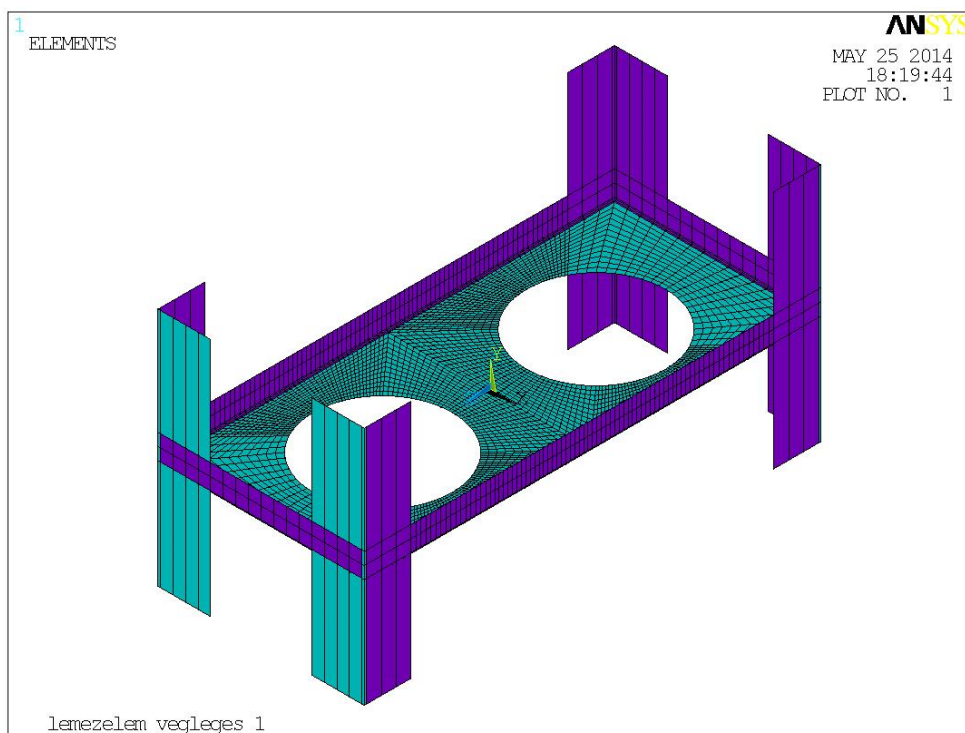


13. ábra: a sarok kezdeti kialakítása.



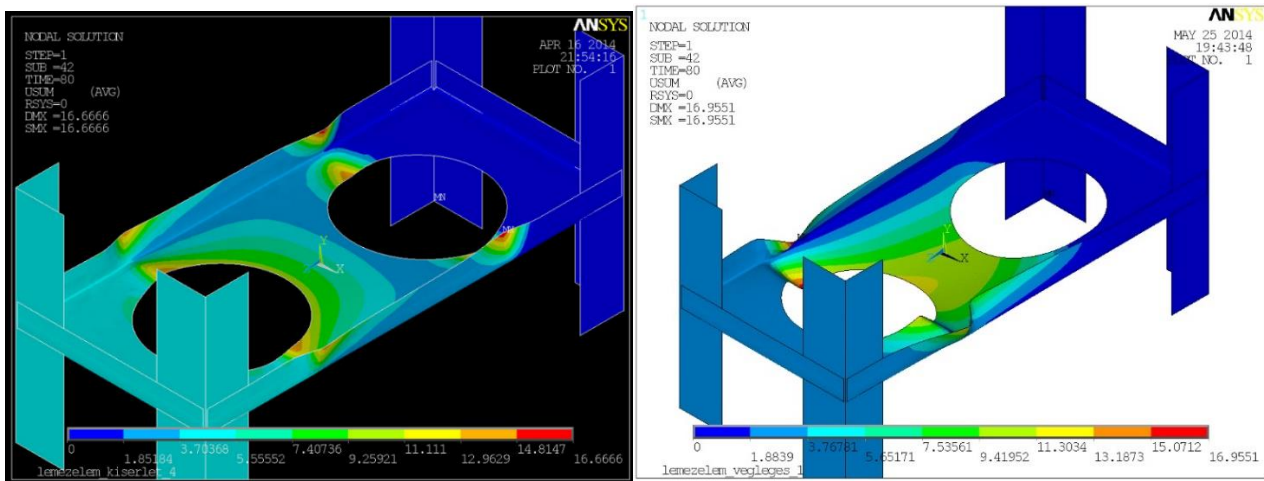
14. ábra: az Ansys Workbench modell erő-elmozdulás ábrái (piros = merevítés nélküli esetben, kék = merevített esetben)

A közelítő héjelemes modell fejlesztése már csak a kísérletek befejezése után fejeződött be. Ez a modell is azzal a szemlélettel készült, hogy a sarokelemek környezete és az erőbevezetés kialakítása nem fontos, ennek megfelelően a sarkok környezete meglehetősen elnagyolt. A sarkoknál nincsenek kontaktelemek, a sarokrész egy közös lemez, megnövelt vastagsággal. A vastagság értéke megegyezik a próbatest névleges vastagságának és a sarokelem vastagságának az összegével. A véges elemes hálón ez jól látszik (15. ábra).



15. ábra: a véges elemes háló

A hálózat más szisztéma szerint került felvételre, láthatóan teljesen szimmetrikus. A geometriai nemlinearitást nem tartalmazó modell tönkremenetelét nézve (16. ábra) láthatjuk, hogy az is teljesen szimmetrikus, nem úgy, mint a 12. ábrán látható testelemes modell tönkremenetele. Az a modell sem tartalmazott geometriai nemlinearitást, a hálózata viszont a Workbench automatikus szabad hálózásával készült, így lett a geometriailag teljesen szimmetrikus szerkezet helyenként gyengébb, máshol erősebb.



16. ábra: Tönkrement alakok geometriailag perfekt és imperfekt esetben. Utóbbi nagyítva.

A héjelemes modell már tartalmazott geometriai imperfekciókat is, ezek nagyságrendjét az imperfekcióvizsgálat adta (lásd. később), alakját pedig a lemezhorpadás-vizsgálatból kapott első sajátalak. A geometria és a háló tökéletesen szimmetrikus volta miatt a geometriai imperfekció határozta meg a tönkremenetel helyét.

3. Kísérletek

Az előkészítés során eldöntöttük, hogy négy vizsgálatot hajtunk végre. Kettőt még tavasszal, a Kísérleti Szerkezetanalízis tárgy keretében, ebből egyet be is mutattunk a csoportnak, kettőt pedig nyár végén vagy ősszel. A próbatesteken megérkezésük után imperfekcióvizsgálatot végeztünk, mérőműszereket kalibráltunk, majd összeállítottuk a kísérletet és végrehajtottuk. A két alkalomra csak a labormunkát számolva körülbelül egy-egy hét jutott. Az első kísérletsorozatnál Koloh Norbert hallgatótársam segédkezett a labormunkák során, a második alkalommal egyedül dolgoztam.

A továbbiakban ismertetem a méréseknél alkalmazott műszereket, berendezéseket, majd kitérek az imperfekciók okaira ennél az elemtípusnál.

3.1. A méréseknél alkalmazott berendezések, eszközök

WPM 600 terhelő berendezés:

600 tonna teherbírású, hidraulikus munkahengerrel működtetett berendezés. Áll egy állítható magasságú keretből és egy a munkahenger által emelt alsó részből, amire a próbatestek rögzíthetőek. A munkahengerben lévő olaj nyomása mérhető, ez van átalakítva erővé és megjelenítve a gép óráján. A mért erő skálázható, a mi esetünkben 60 tonnára volt állítva a méréshatár. A terhelőlap és a keret között beépített gömbcsukló található, erre azt mondták, hogy igazán nagy terheléseknél viselkedik csak valódi gömbcsuklóként. Ezt egy acéllemezzel ki lehet iktatni, mi így is tettünk.

A gépet a próbatest méretei miatt választottuk, nem a teherbírása miatt, a mért erő skálázásával tökéletesen alkalmasnak bizonyult a feladatra.

Induktív adók:

A műszer a tekercsben lévő vasmag elmozdulása által indukált áramot közli jelként, amit a mérőátalakító elmozdulássá alakít. Minden műszernek saját vasmagja van, ezért ezeket célszerűen együtt kell tárolni. Minden műszer egyéni karakterisztikával rendelkezik. A laborban néhány műszerhez meg volt adva ez a karakterisztika, de néhányat kalibrálni kellett a mérés előtt. Az adott karakterisztikájú műszereket is ellenőriztük egy adott vastagságú próbatesttel, mielőtt megkezdtük a mérést.

Zsinóros induktív adókat használtunk a függőleges elmozdulások mérésére, tapintó induktív adókat a vízszintes elmozdulásokhoz. A második méréssorozatnál használtunk egy zsinóros adót csigával vízszintes elmozdulás méréséhez. A mérések műszerezettségét lásd még a 2. sz. rajzi mellékletben.

Nyúlásmérő bélyeges úadók:

Az elmozdulást egy rugó segítségével a beépített nyúlásmérő bélyeg megnyúlásává alakítják, ami a bélyeg ellenállás-változásaként mérhető. Érdekes műszer, nagy előnye, hogy mivel nyúlásmérő bélyeget tartalmaz, a mérésnél használt MGC-re nagyobb számban köthető, nem úgy, mint az induktív adó, aminek a száma limitált, maximum négy használható egyszerre. Ha több induktív adót szeretnénk használni, akkor a SPIDER-t kell alkalmazni, ami viszont nem praktikus sok nyúlásmérő bélyeg használata esetén.

Nyúlásmérő bélyegek:

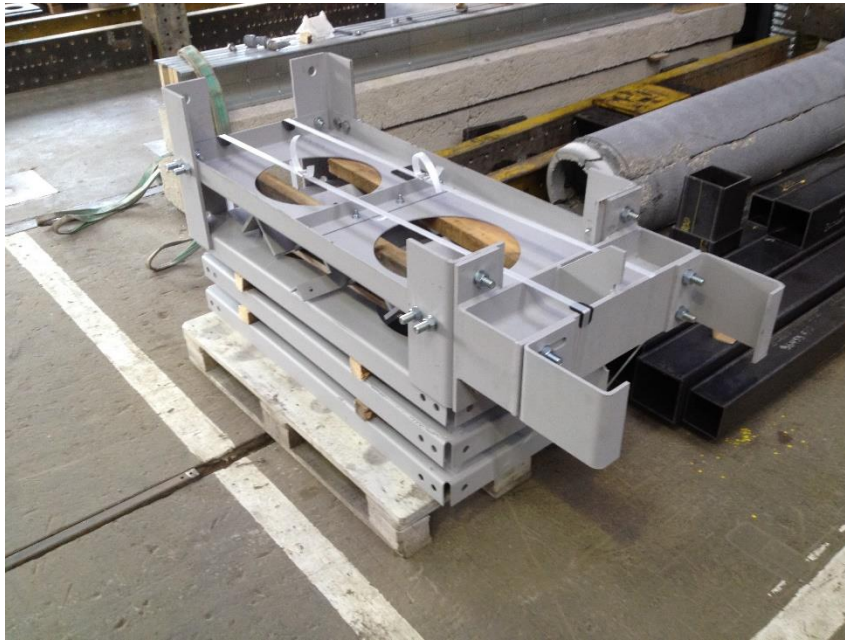
A négy kísérleten összesen 38 db KMT-LIAS-06-3-350-5EL típusú mérőellenállást használtam el. Ez egyirányú nyúlás mérésére alkalmas, 350 Ω ellenállású, rendelkezik a bekötéshez szükséges lábakkal. A rögzítéshez LOCTITE pillanatragasztót használtunk.

Imperfekciómérés műszerei:

A hagyományos eszközökön kívül (tolómérő, mérőszalag, szögmérő) használtunk egy különleges lemezimperfekciómérő eszközt, egy lemezszkennert. Motoros, be kell állítani az útját és ezen az úton végighaladva egy induktív adó segítségével méri a lemez egyenetlenségeit. A műszer a megtett utat is regisztrálja, a vezetőgerendára ragasztott mágneses szalag segítségével, a szalag mentén az érzékelő regisztrálja az elmozdulást. Nem tud különbséget tenni a negatív és a pozitív elmozdulás között. A műszer érzékenységet elsősorban az induktív adó érzékenysége határozza meg, a pontosságot viszont a műszer alkatrészei jelentősen ronthatják. Hibaforrás lehet a vezetőgerenda kardossága, a kerék egyenetlen gördülése, a szerelvény enyhe lötyögése.

3.2. A szállított elemek

A megrendelt próbatesteket és kiegészítő elemeket a 3B Hungária KFT gyártotta le Zalaegerszegen, majd futárral küldték Budapestre, a Szerkezetvizsgáló Laboratóriumba. A szállítmányt 2014 április 15-én vettem át a laboratórium nevében. A csomag tartalmazott 4 db próbatestet (130 kg), 1 db teherelosztó gerendát (45 kg), 8 db sarokelemet (92 kg), 2 db merevítőt a próbatest közepére (4 kg) és a 2 db biztonsági rögzítőlemezt (8 kg). A teherelosztó gerenda kivételével minden elemből kettőt rendeltem, hogy legyen tartalék a kiegészítő elemekből is, ha esetleg valami rosszul sikerülne. A csomag tartalmazott még 5 db szakítóvizsgálat elvégzéséhez használható lapos próbatestet.

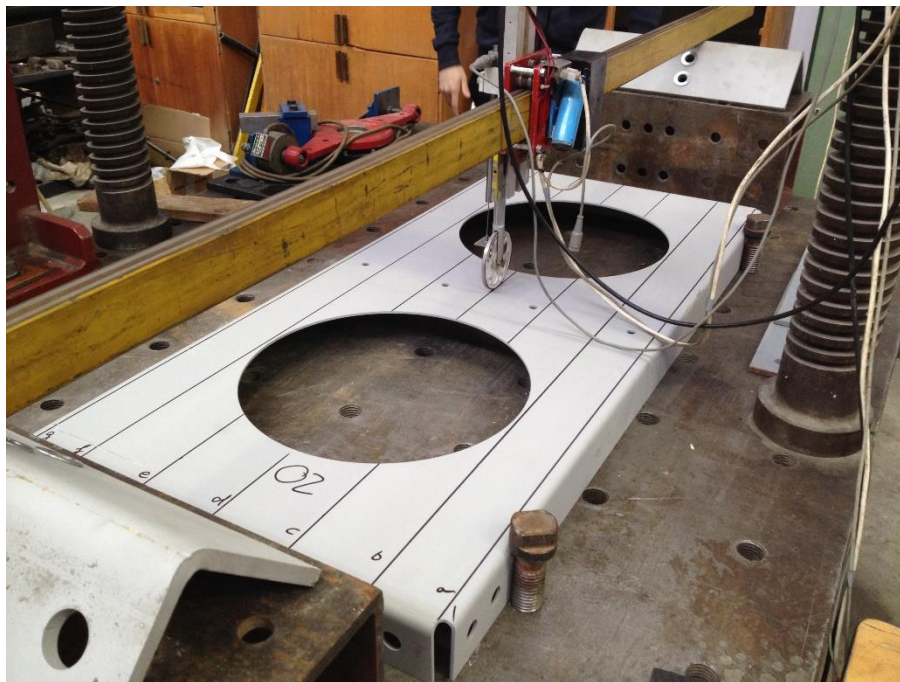


17. ábra: a szállítmány

3.3. Imperfekciómérés

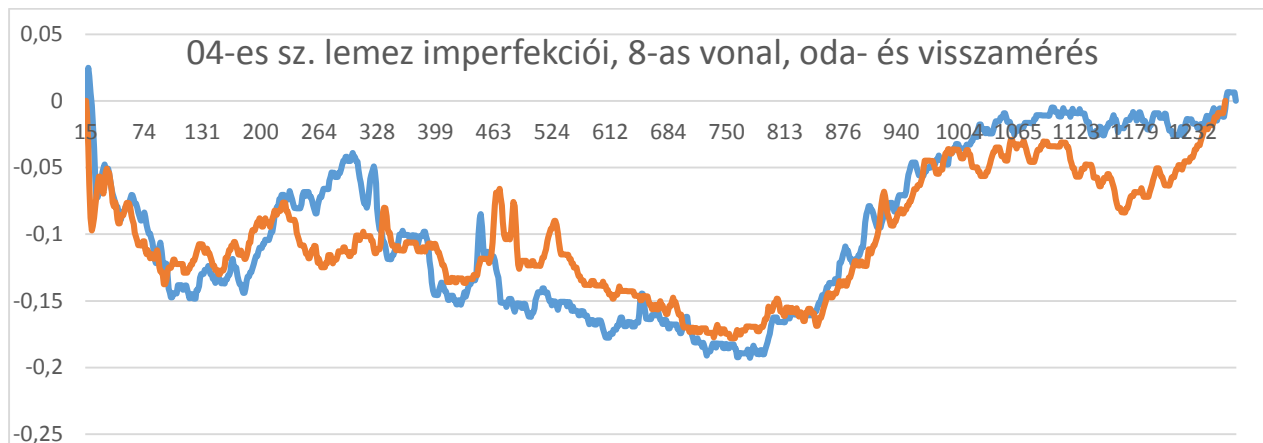
Az első kísérletsorozatra való felkészülés során megmértük mind a négy próbatest imperfekcióit a fent említett lemezszkennerrel. A próbatest felszínén hét, az élein két-két vonalat határoztunk meg, amin végigvezettük a műszert. Az eszköz távvezérléssel üzemelt, két fokozatban volt képes haladni. A lassabb fokozatot használtuk arra, hogy felvezessük a mérő kerekét a próbatestre a mérés elején, a gyorsabb fokozatban vittük végig a műszert a kijelölt pályán.

A kocsi elmozdulását a rúd oldalán elhelyezett mágnesszalag segítségével regisztráltuk, impulzusban, az induktív adó jelét pedig a mérés során azonnal átalakítottuk mm-re és abban került regisztrálásra. Az útdát kalibrációja ismert volt, de a mérés előtt ellenőriztük az erre a célra biztosított befogó szerkezet és mérőhasábok segítségével.



18. ábra: imperfekciómérés

Minden esetben hajtottunk végre oda- és visszamérést is. A 19. ábrán láthatjuk egy él oda- és visszamérését és a kettő közti eltérést. Láthatjuk, hogy a tendencia jól egyezik mindkét esetben, egy-két ponton azonban fedezhetünk fel jelentősebb eltérést. Az oda- és visszamérések összehasonlítása után arra jutottam, hogy a nekünk szükséges tizedmilliméteres pontossággal az adatok felhasználhatóak. Az imperfekciók a modellkalibrációhoz lesznek fontosak. A közelítő modellhez csak a nagyságrendet használtam fel, a részletes modellhez viszont igyekeztem a formát is figyelembe venni.



19. ábra: lemezimperfekció-mérés adatsora; kék az oda-, piros a visszamérés.

A mérésnél hibaforrás lehet a pálya megtámasztási pontjainak különböző magassága. Ezt úgy küszöböltem ki, hogy a lemez szélein felvett mérési pontokra egyenest illesztettem és a mért pontok egyenestől vett távolságát számoltam. Az ábrán ez a távolság látható, értelemszerűen az ábra két végpontja 0. A pálya kardosságát ezzel a módszerrel nem lehet kiküszöbölni. Mivel a számítás után kapott értékek nagyságrendje 1 mm alatt maradt és nem fedeztem fel kardosságra utaló jeleket a diagramokon (nem láttam nagyon hasonló íveket a diagramok átnézésekor) feltételezhető, hogy a kardosság által okozott hiba a mért értékek nagyságrendje alatti, ami egy ilyen műszertől egyrészt elvárható, másrészt egy ilyen hosszúságú rúd készítésénél igen szép teljesítmény.

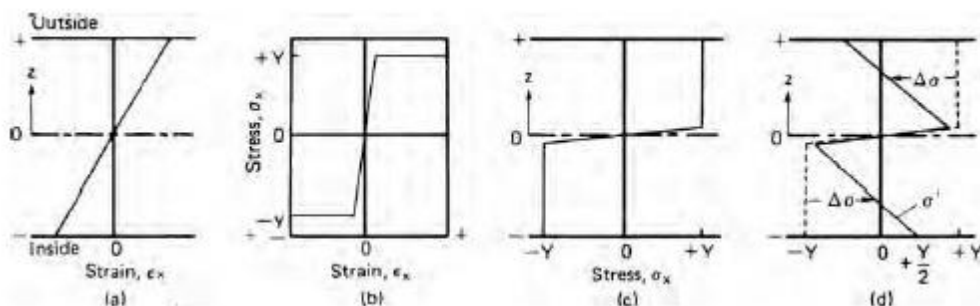
3.4. Az imperfekciók forrása

A próbatestek tervezése után a kiterített elemről ú.n. terítékrajzot hoztam létre. Ez .dxf formátumra konvertálva, 1:1 méretarányúra nagyítva és körvonalakra lecsupaszítva közvetlenül felhasználható CnC vezérelt lézervágó programozására. Alapbeállításként a lézer pontosan a teríték körvonalán megy végig, így a tényleges lemez mérethez képest néhány századmilliméter nagyságrendű hibát produkál, ennyivel kisebb lesz a kivágott elem a terven szereplőnél. Ez a hiba nem számottevő.

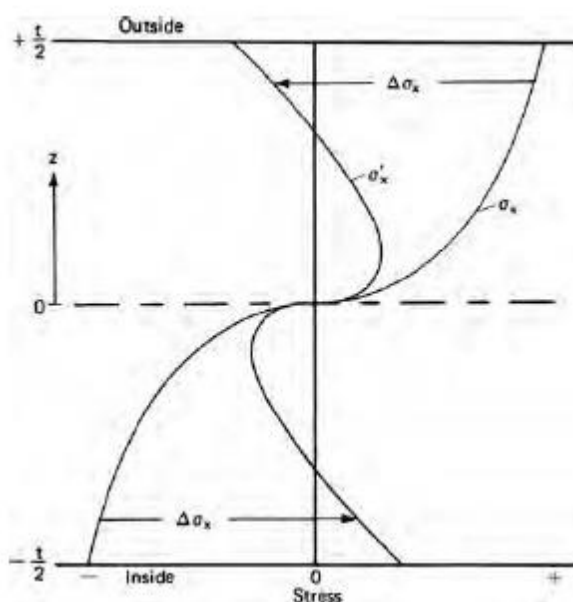
Sokkal számottevőbbek a lemez hengerlési imperfekciói. A hengerlő berendezések idővel kopnak, ezáltal a hengerműből változó vastagságú lemezek kerülhetnek ki. Ezt a változékonyságot szabályozzák, gyártási tűrésekkel. Az EN 10029 szabvány szerint a lemezek osztályokba vannak sorolva, a tűrések osztályonként változnak. A valós lemezvastagság minden esetben egy 1.2mm-es intervallumon belül mozog, az osztályok azt szabályozzák, hogy az intervallum a névleges mérethez képest hol helyezkedik el. Például 4 mm-es lemez esetén a „C” osztály azt jelenti, hogy a lemez a névleges méretnél kisebb semmiképpen sem lehet, viszont az 1.2mm-rel nagyobb vastagság még elfogadott, a „D” osztálynál pedig a névleges mérethez képesti eltérés $\pm 0.6\text{mm}$. Egy táblán belül is lehetnek eltérések a lemezvastagságban, egy táblán belül a maximális megengedett vastagságkülönbség esetében 0.9mm⁽⁹⁾.

További lehetséges imperfekciókat vizsgáltunk az elemekben az élhajlítás során. A hengerlési imperfekciók nem „veszélyesek”, mivel a hengerlés során a magas hőmérséklet és az anyag újrakristályosodása miatt az anyagban nem halmozódnak fel számottevő belső feszültségek, a hidegalakítással azonban nem ez a helyzet. A művelet során az anyagot hidegen, képlékeny deformációval alakítják. A képlékeny alakítás során

a fém mechanikai tulajdonságai megváltoznak. Megnő a folyáshatár, nő a szilárdság, a keménység, azonban a szívósság csökken, az anyag ridegedik ⁽¹⁰⁾. A 20. ábrán az acél feszültségeit követhetjük nyomon a vastagság mentén, élhajlítás során, tökéletesen rugalmas – képlékeny anyagmodell esetén. Az a) ábrán láthatjuk a lineáris alakváltozást, a b) ábra a feszültség és az alakváltozás viszonyát mutatja, a c) ábrán látható a feszültségeloszlás és a d) ábra mutatja a tehermentesítés (visszarugózás) után maradó feszültségeket ⁽¹¹⁾. A 21. ábrán ugyanezt láthatjuk, csak rugalmas – felkeményedő anyagmodell esetén.



20. ábra: feszültség- és nyúláseloszlás a vastagság mentén ⁽¹¹⁾



21. ábra: alakítás alatti és tehermentesítés utáni feszültség a vastagság mentén ⁽¹¹⁾

Az élhajlítás során, különösen kis sugarú alakításnál megfigyelhető a rövidülés jelensége ⁽¹¹⁾. Alakítás során a vastagság mentén az egyik szálban húzó- a másikban nyomófeszültségek ébrednek. Ez azt jelenti, hogy létezik egy szál, ahol a feszültségek nullák maradnak, vagyis egy semleges szál, ahol nincs hosszváltozás. Ez a semleges szál élhajlítás során befelé tolódik, vagyis az anyag a művelet során rövidül. Ennek elsősorban két oka van. Az egyik az, hogy a nyomott belső részen a Poisson-tényező miatt az anyag vastagodik, a külső szélső szálon pedig vékonyodik. A másik oka az, hogy a megmunkálás során nagyobbak a valós nyomófeszültségek, mint a húzások.

Ez a rövidülés 4 mm-es lemeznél és 90 °-os hajlításnál már jelentős, a lemez vastagságát és a hajlítás szögét növelve pedig egyre jelentősebb, a cm-es nagyságrendet is könnyen eléri. A rövidülés nagysága függ az élhajlító gép típusától és a prizma állapotától is, a lemez vastagságától pedig hatványozottan, tehát sokat számít, hogy 4 mm-es lemezt hajlítunk, vagy még az elfogadott gyártási tűréson belül eső 4.2 mm-eset. Ahhoz, hogy a rövidülést figyelembe vegyük, az élhajlított munkadarab terítékének nagyobbak kell lennie, mint a rövidülés nélküli teríték, hogy mennyivel, azt az élhajlító programozó technológia határozza meg.

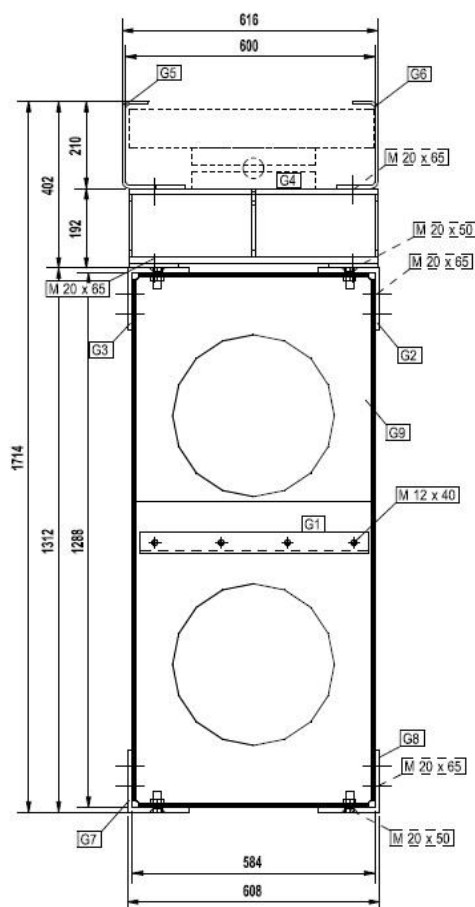
A maradó feszültségek és a változó anyagjellemzők is komoly változásokat eredményeznek a szerkezet viselkedésében. A hajlítási irányú maradó feszültségekről találtam forrást, azt pedig feltételezhetjük, hogy a hajlítási élen belül síkbeli alakváltozási állapot van. Hogy a hajlítási irányra merőleges irányba milyen feszültségek maradnak az anyagban, arról nem találtam forrást, valamint arra sem, hogy ezek a feszültségek milyen messzire érvényesülnek a hajlítási éltől, ezt a jelenséget azonban mindenképpen érdemes lenne tovább vizsgálni. Ezek a feszültségek a velük egy irányba ható terhelés miatt közvetlenül is hatással vannak a próbatest viselkedésére.

3.5. Az első kísérletsorozat – 2014 április 15-25.

3.5.1. Előkészítés

A szállítmány átvétele után megkezdjük az imperfekciómérést. A kézi mérést csak a 01-es. és a 04-es próbatesteken végeztük el, a lemezskennerrel viszont az összes próbatestet végigmértük.

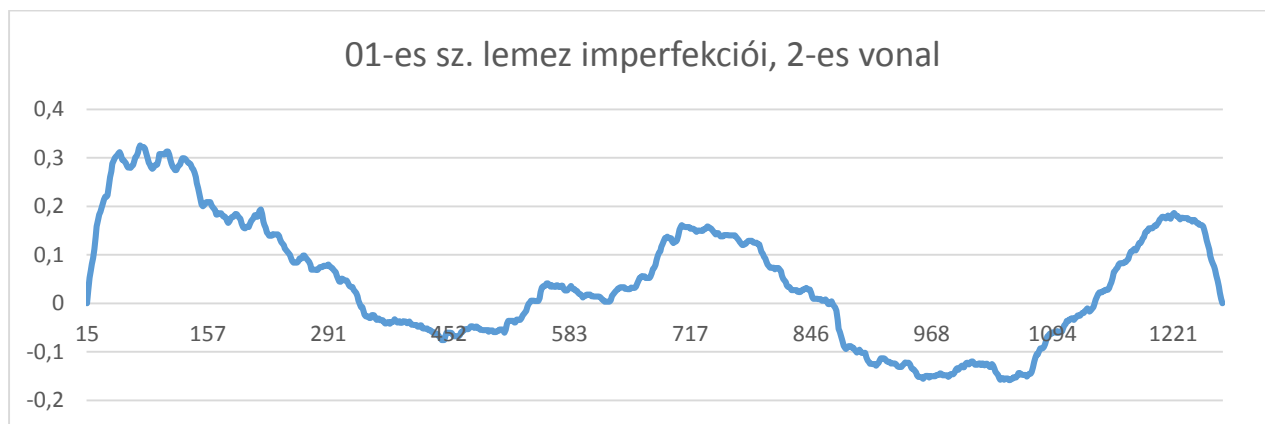
Az imperfekciómérés után előkészítettük a 4. sz. próbatestet a kísérletre. Az első méréshez négy db induktív adót és két db bélyeges úradót használtunk. Két induktív adóval mértük a függőleges elmozdulásokat a próbatest felső élének két szélén, két induktív adóval és két bélyeges adóval pedig vízszintes elmozdulásokat mértünk. A kísérlethez felhasználtunk még 10 db nyúlásmérő bélyeget. A bélyegeket vízszintes értelemben szimmetrikusan osztottuk el a próbatesten, viszont több került az aljára, mint a tetejére. Az alján és a tetején is az általunk gyengének vélt keresztmetszeteket bélyegeztük fel, az úradókat is ezekhez illesztettük. A próbatest viselkedése várhatóan teljesen szimmetrikus, a bélyegekkal és a függőleges úradókkal ezt kívántuk igazolni, a vízszintes úradókkal viszont csak az egyik oldalra koncentráltunk (ld. 2. sz. rajzi melléklet)



22. ábra: a vizsgálati elrendezés rajza és fényképe

3.5.2. Imperfekciók

A 01-es próbatest imperfekciói a szkanner adatai alapján 0.3 mm-es, a 04-esé 0.4mm-es nagyságrendben mozogtak. Általánosságban elmondható, hogy a próbatestek az áttörések közelében az áttöréseknek megfelelően deformálódtak, vagyis az élhajlítás jobban „elhúzta” a lemezt a hajlítás irányába, míg máshol a gyengítetlen lemez láthatóan jobban ellentartott. A jelenséget a 22. ábra szemlélteti.



23. ábra: 01-es sz. lemez imperfekciói áttörés melletti vonalon mérve; jól kivehető az áttörések helye a diagramon.

A 04-es próbatest átlagosan 4,15 mm vastag, a 01-es 4,28 mm. A 01-es próbatesten belül jelentős szórásot mértünk, a legalacsonyabb mért vastagság 4,17 mm, a legnagyobb pedig 4,44 mm, a próbatest alján és tetején mértünk nagyobb vastagságot. A 01-es próbatest átlagos szélessége 583 mm, átlagos magassága 1287 mm, az él mérete pedig az egyik oldalon 75,5 mm, a másikon pedig 77 mm. A 04-es próbatest sokkal pontosabbra sikerült, az élei egységesen nagyobbak 1-1 mm-rel a névlegesnél, a magassága pontosan a névleges érték, a szélessége pedig mindenhol egységesen 1 mm-rel nagyobb.

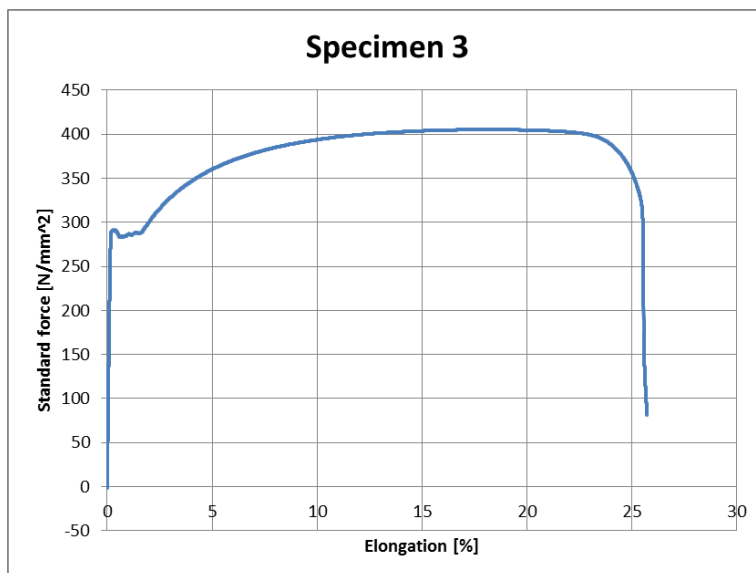
A végelelemes modellben az imperfekciókat helyenként átlagértéken, helyenként minimumértéken fogom figyelembe venni, mert a modell nem teszi lehetővé az élenként történő állítást. Mivel tönkremenetel szempontjából valószínűleg a kisebbik él lesz a mértékadó, ennek az élnek az átlagos méretét használom, vastagságnál viszont a teljes próbatesten mért vastagságok átlaga lesz a bemenő adat.

Mértük még az él hajlítási szögét, ez szinte mindenhol 1 °-kal kevesebb a névlegesnél. Ennek az oka valószínűleg az anyagminőség. A gyártás utáni tehermentesítéskori visszarugózást is számolják, ezt pedig az anyag névleges folyáshatárával és szakítószilárdságával teszik. Az anyagvizsgálatnál kiderült (ld. később), hogy a névlegesnél körülbelül egy osztállyal nagyobb az acél folyáshatára.

3.5.3. Anyagvizsgálat

A próbatestek mellé kaptunk 5 db szilárdságvizsgálathoz használható próbapálcát is. Mint ahogy fentebb már leírtam, ezeket megvizsgálva (24. ábra) jóval magasabb szilárdsági értékeket kaptunk, mint amiket a kezdeti modellezés során figyelembe vettünk.

Az anyagvizsgálatoknál nagyon fontos a megfelelő terhelési sebesség meghatározása. A szabvány külön előírást ad a folyás előtti és a folyás utáni terhelési sebességre. Végeztünk számításokat, próbáltuk beállítani a rendszert a megfelelő sebességre, de nem sikerült, így végül a gépkezelő által javasolt megszokott terhelési sebességet használtuk. Ezen a rendszer működött. Mivel nem volt nagy különbség a szabvány által javasolt és az alkalmazott sebesség között, nagy hibát nem vétettünk.

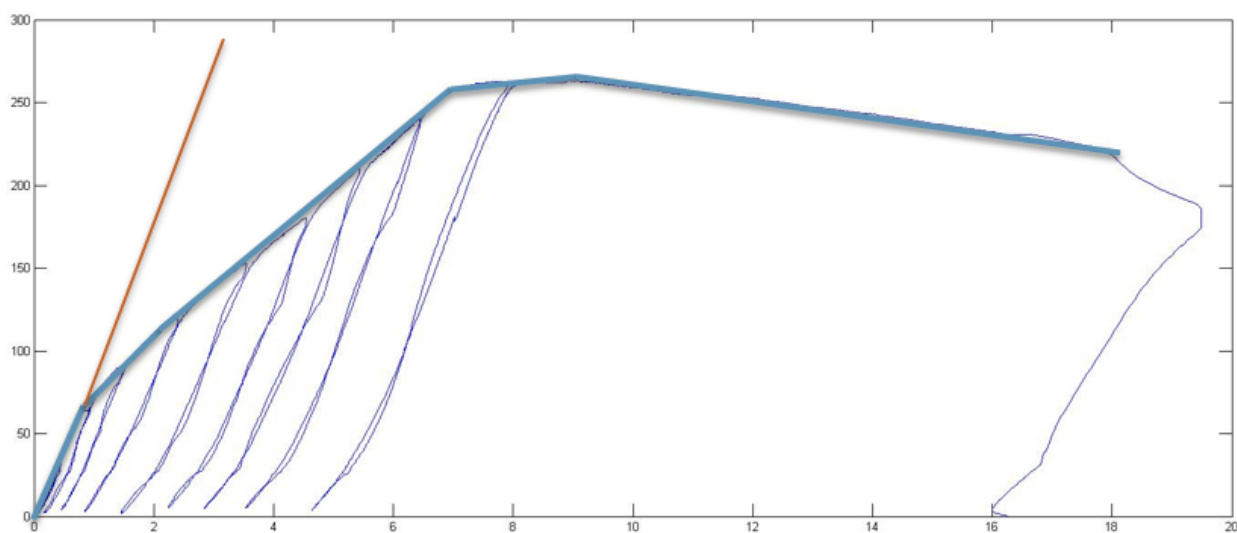


24. ábra: a 3. próbatest szakítóvizsgálatának eredménye

3.5.4. A kísérlet eredményei

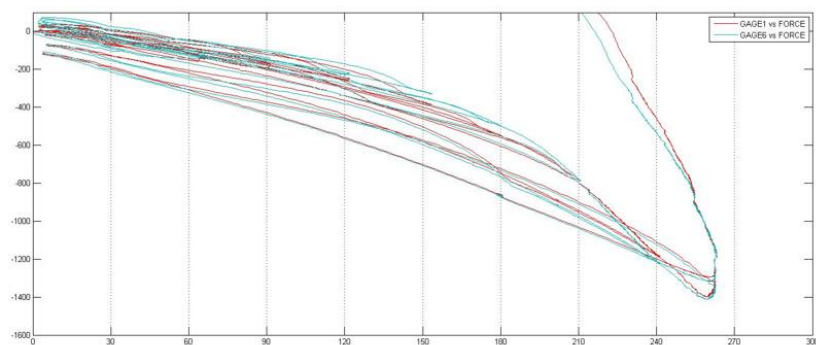
Az első kísérletet április 22-én végeztük. A terhelést teherlépcsőnként engedjük a próbatestre, minden teherlépcső után tehermentesítéssel. Egy teherlépcső 30 kN volt. A kísérlet végén sikerült pontosan a tönkremenetelkor tehermentesíteni. A mérés során nem vettem észre a műszereknél rendellenes működést.

A tönkremenetelhez tartozó terhelés 263 kN. A szerkezet 60 kN környékén már lágyabban viselkedik, 60 kN-ig sem olyan a merevsége, mint a közelítő modelleké. A töréspont oka ekkor még nem nyilvánvaló, a modell pontosítása szükséges a jelenség megértéséhez. A kísérlet előkészítésekor hasonló görbéket vártam a csavarok hatásától, ezért arra gyanakodtam, hogy a töréspontot a meghúzott csavarok megcsúszása és a nyírási teherviselés kialakulása okozza. Ez a rész mindkét közelítő modellben elnagyolt.

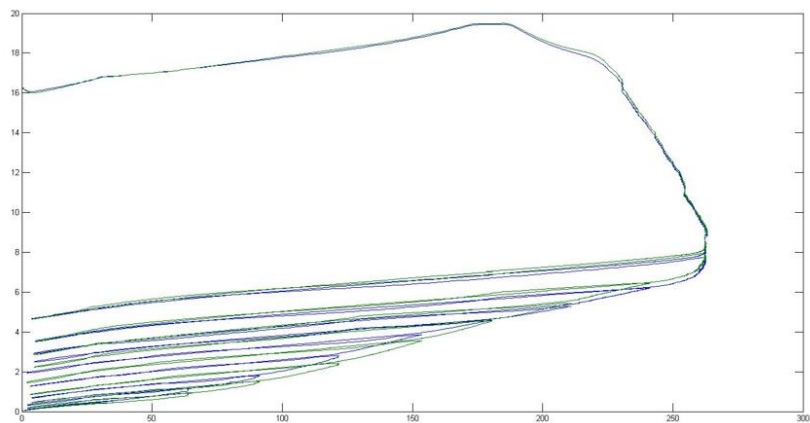


25. ábra: az első kísérlet erő-elmozdulás diagramja

A kísérlet során beláttunk egy fontos dolgot: a szerkezet szimmetrikusan viselkedik, a beépített csukló jól és biztonságosan osztja el a terhelést a próbatest két oldala között. Ezt illusztrálja a 24. és a 25. ábra. Ennek következményeként a második mérés műszereit koncentrálnhattuk az egyik oldalra, ott több pontot vehettünk fel, míg a másik oldalon csak ellenőrzőpontokra volt szükség.



26. ábra: a GAGE1 és a GAGE6 egymással szemben lévő nyúlásmérő bélyegek adatsorai



27. ábra: a két függőleges elmozdulásmérő adatsora; szinte tökéletes fedésben vannak tönkremenetel utáni állapotban is

A mérésben hibaforrás lehetett, hogy a függőleges elmozdulásokat a deformálódó élen mértük. Először azt hittem, hogy az él deformációja okozza a nagy elmozdulásbeli különbséget a modellek és a mért értékek között és mérési hibáról van szó.



28. ábra: a deformálódott alsó él; a mérési pontokat tartalmazó felső élen valamivel kisebb, de ilyen jellegű deformáció figyelhető meg.

3.5.5. A második méréshez felhasznált mérőműszerek

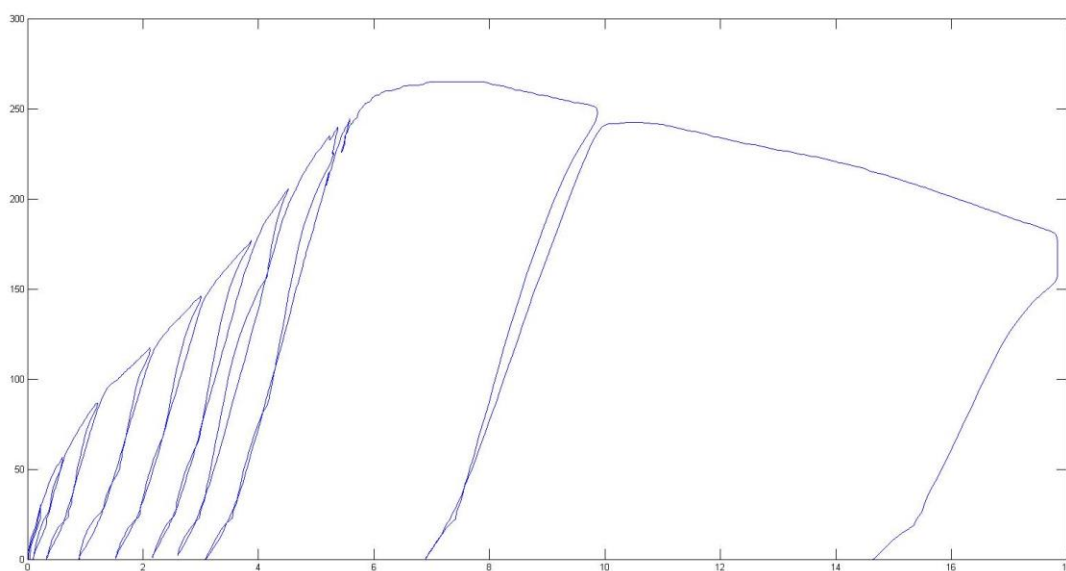
A kísérletek összehasonlíthatósága érdekében meghagytunk néhány ellenőrző pontot, amik közősek a próbatesteken. Ennél a mérésnél beszereltük a vízszintes merevítő szögacélt a lemez közepére. Az ellenőrző

pontok a következők (ld. 2. sz. *rajzi melléklet*): a GAGE1, GAGE6 és a GAGE10 jelű bélyegek, valamint az 1V, 2V, 3V, 4V jelű vízszintes elmozdulásmérők. Ezúttal csak egy induktív adót használtunk a függőleges elmozdulás mérésére, a mért pontot pedig áttettük a gerenda közepére (ld. 2. sz. *rajzi melléklet*).

Ennek a mérésnek az alapelve az volt, hogy minél kevesebb fogyóeszközt használjunk fel, ezért került a próbatestre csak négy bélyeg. A Kar nagylelkű támogatásának köszönhetően az ezt követő két mérés során volt lehetőségem több bélyeg használatára.

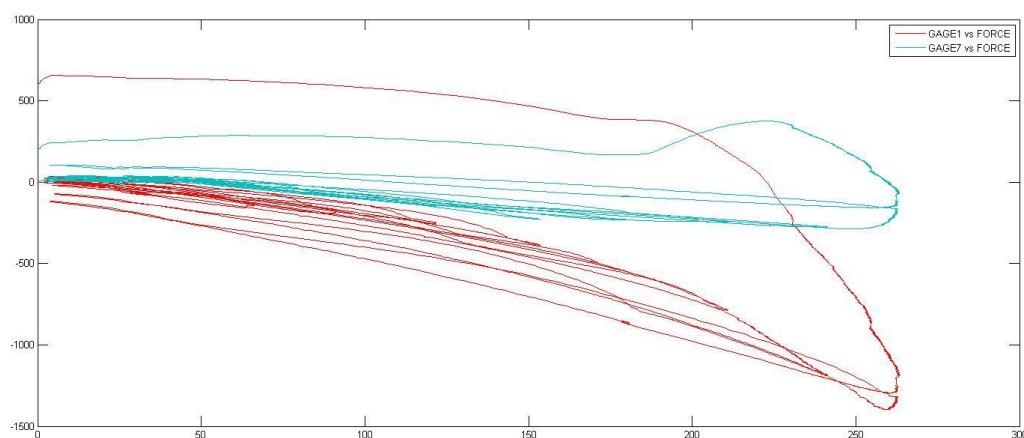
3.5.6. A második mérés eredményei

A második mérés erő-elmozdulás ábrájából (9. ábra) azt szűrhetjük le, hogy a merevségváltozás alacsony terhelésnél ugyanúgy jelen van a rendszerben, és ezúttal biztosak lehetünk benne, hogy nem a vízszintes élek deformációja által bevitt mérési hibát látjuk, hanem tényleg a sarkok maradó alakváltozásait. A maximális terheléshez tartozó alakváltozás 2.5-3 mm-rel az első mérésnél kapott érték alatt marad, de még mindig jóval meghaladja a közelítő modellek értékeit. A 2.5-3 mm-es különbség lehet az élek deformációja. A mért értékek még korrigálhatóak a teherelosztó gerenda lehajlásaival, ez a terhelésfüggő elmozdulási érték számítható. A mért teherbírás 265 kN.



29. ábra: a második mérés erő-elmozdulás ábrája

A közös mérőműszerek közül sajnos a V2 jelű adatsora elveszett egy a mérés beállítása során elkövetett figyelmetlenség miatt, a többi adatsor összevethető, hasonló jellegű és nagyságrendű. A bélyegek adatsorai alapján mindkét mérés során a próbatest alja szenvedett nagyobb alakváltozásokat, ezt a 29. ábra szemlélteti. Ez sok mindennel magyarázható, szerintem a legfontosabb az lehet, hogy az alsó befogás sokkal merevebb a felsőnél, így a felső részen a próbatest alakváltozásai nincsenek olyan mértékben gátolva, mint lent. Az alsó befogás néhány nagyságrenddel merevebb, ez a merevségkülönbség pedig elég ahhoz, hogy lent annyi többlet-igénybevétel keletkezzen, hogy garantálható legyen a próbatest alsó keresztmetszetének a tönkremenetele. A további kísérletek során két lehetőségünk lesz: vagy megpróbáljuk valahogy eltüntetni ezt a különbséget, hogy minél jobban megközelítsük a szerkezet valós viselkedését, vagy kihasználjuk és ezután is az alsó keresztmetszeteket műszerezzük fel jobban. Az utóbbi esetben a véges elemes modelleket a kísérleti eredmények visszaadására kell majd beállítani, ennek az a hátránya, hogy a valós szerkezeti viszonyok közötti vélhetően valamivel nagyobb teherbírás igazolására nem lesznek közvetlen kísérleti eredményeink. Ez valószínűleg esetünkben nem olyan nagy probléma, mert a kísérlet nem csak ebben tér el a valós szerkezet viselkedésétől.



30. ábra: a GAGE 1 (piros) és GAGE 7 (cián) bélyeg adatsorai, GAGE 1 az alsó gyengített keresztmetszetben, GAGE 7 pedig a felsőben helyezkedik el.

3.5.7. A tönkrement próbatestek maradó alakváltozásai

Az első esetben nem volt beszerelve a merevítő elem, a másodikban be volt. Talán ezzel magyarázható az, amit láthattunk a kísérletek végén. A tönkremenetel az első esetben nem ott következett be, ahol azt a modellek alapján vártuk. Ez abból a szempontból volt rossz, hogy a műszerezéssel nem találtuk el a tönkremenetel helyét. Mint megtudtam, az erőbevezetés minden kísérletnél kritikus részlet, esetünkben is itt vettük észre az első maradó alakváltozásokat és a terhelés tönkremenetel utáni folytatásával is ez a rész deformálódott tovább (29. ábra).



31. ábra: az első próbatest tönkremenetele; a másik oldalon szimmetrikusan ugyanez látható. Éles szemmel kiszúrható, hogy a próbatest sarkánál a festék egy nagyjából 30°-os szögben emelkedő vonal mentén felgyűrődött, ez a sarok jelentős mértékű képlékeny alakváltozására, feszültségkoncentrációra utal.

A második esetben a gyenge keresztmetszet és az erőbevezetés környezete együtt deformálódtak, tehát mondhatjuk, hogy a két keresztmetszet nagyjából egyszerre ment tönkre (30. ábra). Az utóbbit előbb észrevettük, deformációi valószínűleg elősegítették az előbbi tönkremenetelét is – ez azért lehetséges, mert néhány tized mm-es függőleges elmozdulásig a tönkremenetel után a próbatest tartja a terhelést (ld. 9. ábra) és csak utána kezdi el ejteni, a tönkrement rész deformációi lehettek akkorák, hogy másodrendű hatásokat okoztak a gyengített keresztmetszetben, ezek a másodrendű hatások a tartott terheléssel együtt

valószínűleg akkorák voltak, hogy a keresztmetszet tönkremenetelét okozták. Ezeket a hatásokat növelhette a merevítés is. Nem engedte a középső lemezmező deformációját, így gátolta az élek elfordulását is, növelve az erő külpontosságát.



32. ábra: a második próbatest tönkremenetele. Látható, hogy a gyenge keresztmetszet is jelentősen deformálódott.



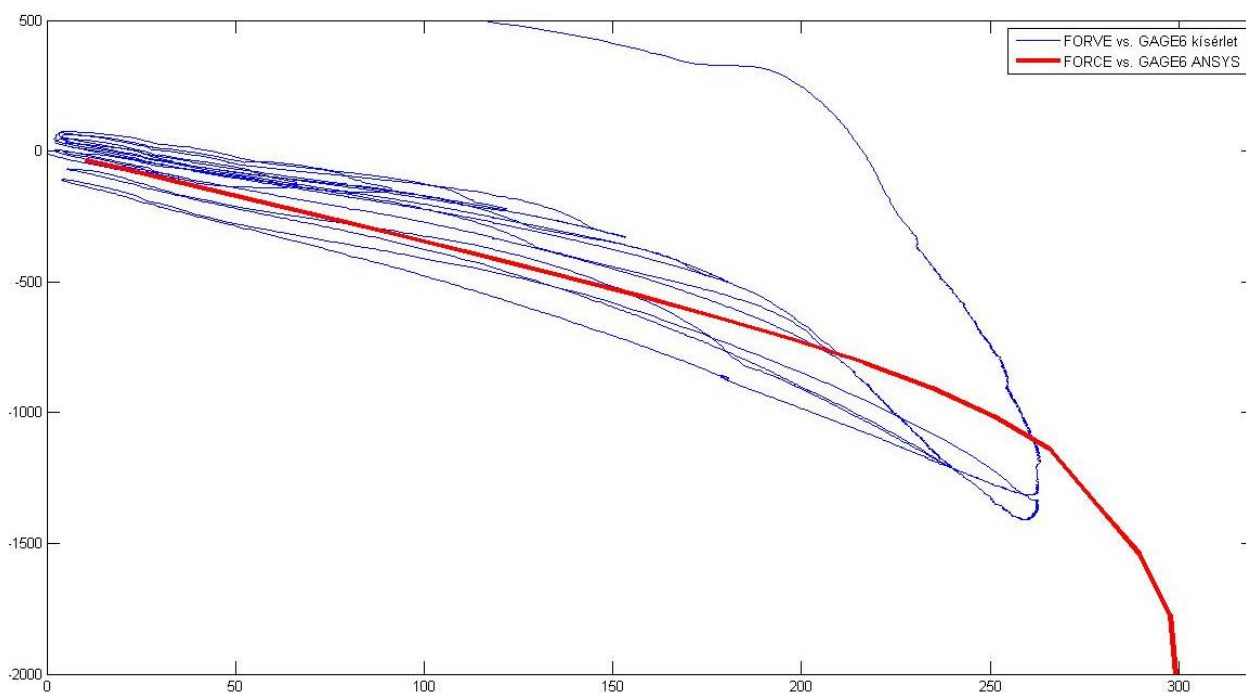
33. ábra: a 2. próbatest tönkremenetel után oldalról.

A fenti ábrákon még észrevehető, hogy az alsó élek is deformálódtak. Látszik, hogy ahol nincs rögzítés, ott az él, követve a lemez alakváltozásait, felemelkedik, a rögzített helyen pedig a hajlítás mentén deformálódik. A 31. ábrán látható a próbatest oldalról. Észrevehető, hogy a merevített lemezrész szinte deformációmentes. Az első esetben láttunk maradó alakváltozást ezen a részen is. Mindkét kísérletről elmondható, hogy a felső rész maradó alakváltozása alig észrevehető.

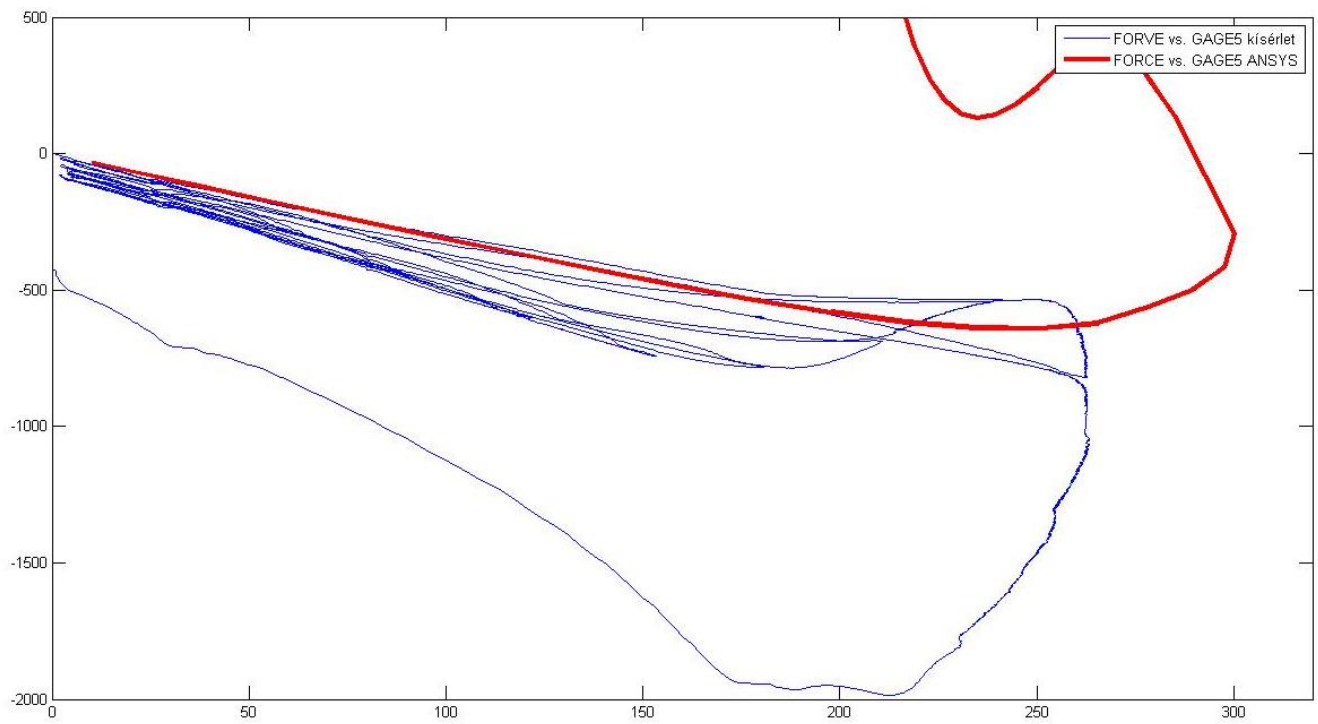
3.5.8. A közelítő héjeleemes modell és az 1. kísérlet összehasonlítása

Bár a sarokkialakítás elnagyolt, azért el lehet mondani, hogy a modell nem szolgáltatott rossz eredményeket. Az erő-elmozdulás diagram ugyan nagyon messze áll a valóságtól, de a szerkezet mért pontjainak a viselkedése a tönkremenetelig hasonló nagyságrendben mozog, a görbék is hasonló jellegűek, ha nem az elmozdulást használjuk összevetési alapként az x tengelyen, hanem az erőt.

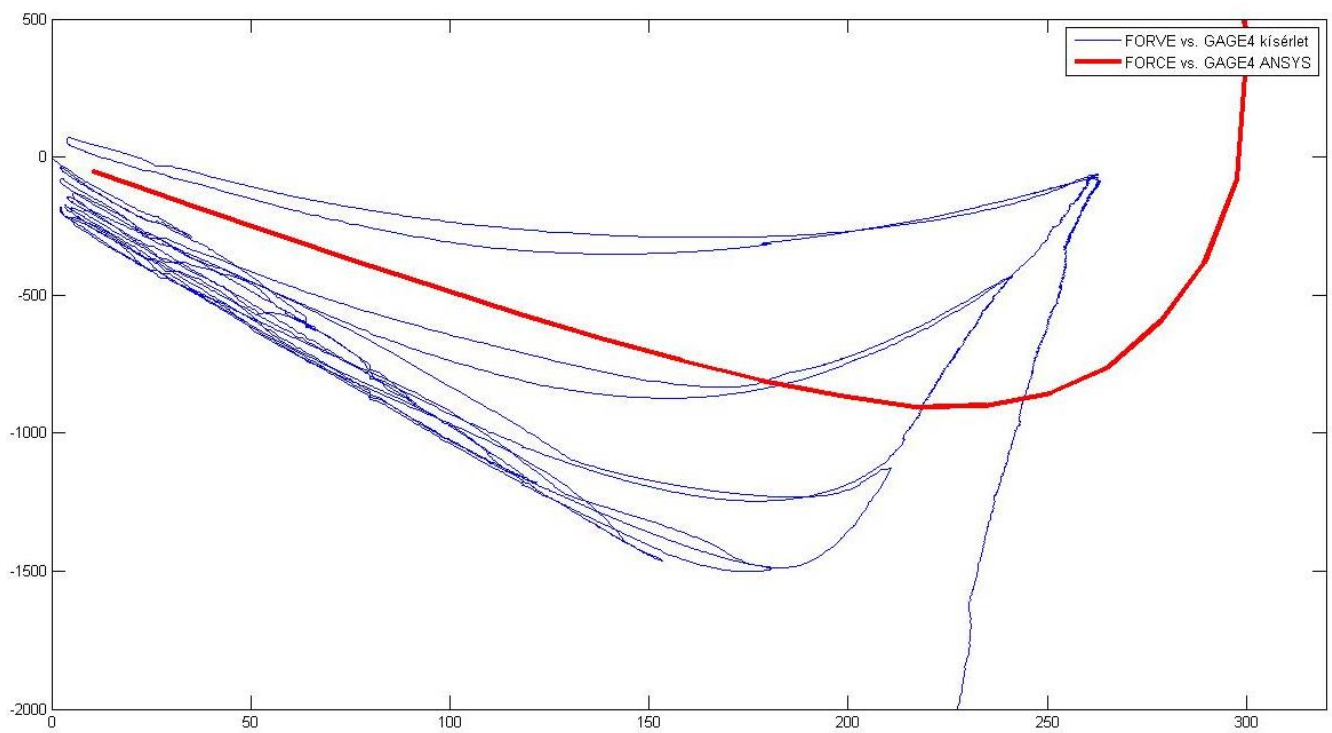
A görbéken itt már észrevehető, hogy a valóságban az egyik stabilitásvesztési alak hamarabb jelenik meg, mint ahogy azt a modell előre vetíti. 170 kN környékén mindegyik bélyeg változást mutat, a görbék meredeksége minden esetben csökken, vagy növekszik. A modell görbéiben is jelentkezik ez a meredekség-változás, de jóval magasabb teherszinten. Ez magyarázható azzal, hogy a modell nem veszi figyelembe az élhajlítás okozta maradó feszültségeket és az anyagjellemzők változását. Ez a probléma a részletes modellnél is jelen van, ezzel a jövőben mindenképpen érdemes lenne foglalkozni.



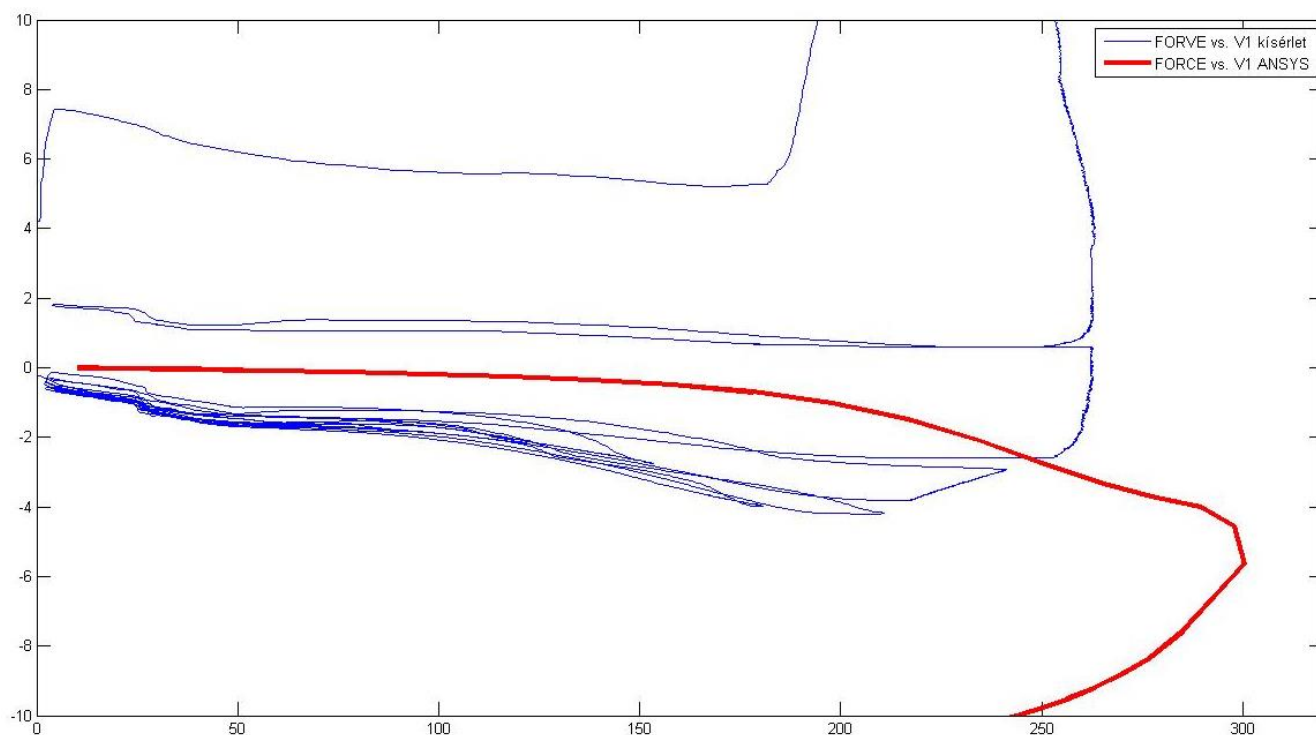
34. ábra: GAGE 6 mérési pont nyúlásai valós és véges elemes esetben



35. ábra: GAGE 5 mérési pont nyúlásai valós és véges elemes esetben

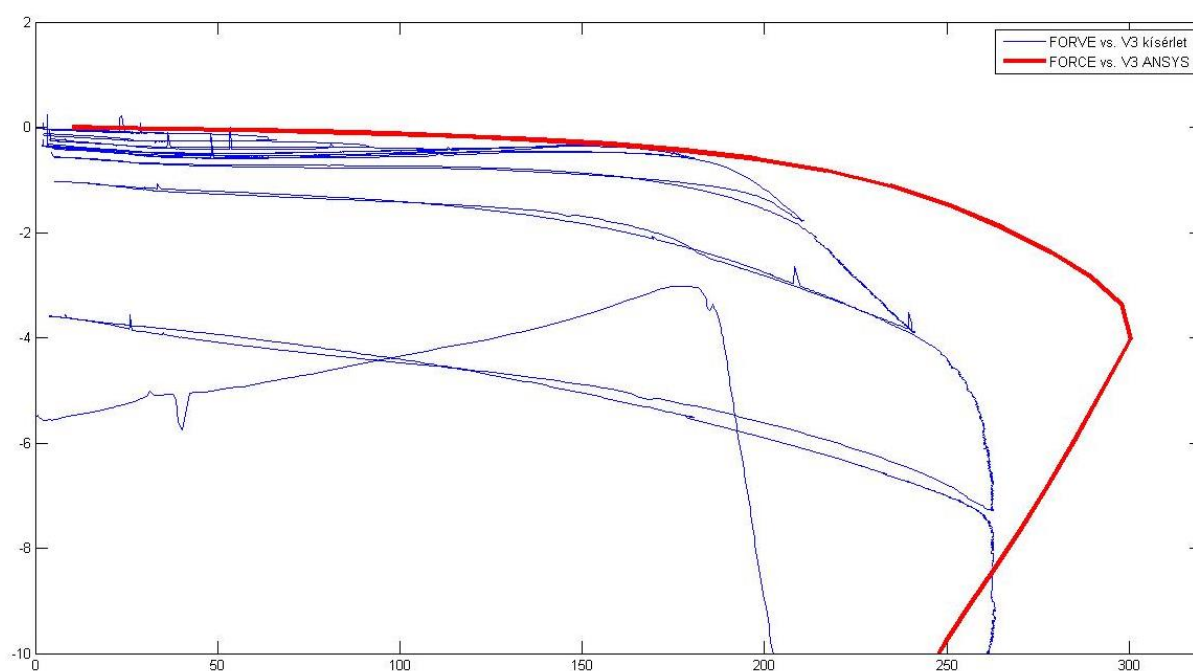


36. ábra GAGE 4 mérési pont nyúlásai valós és véges elemes esetben



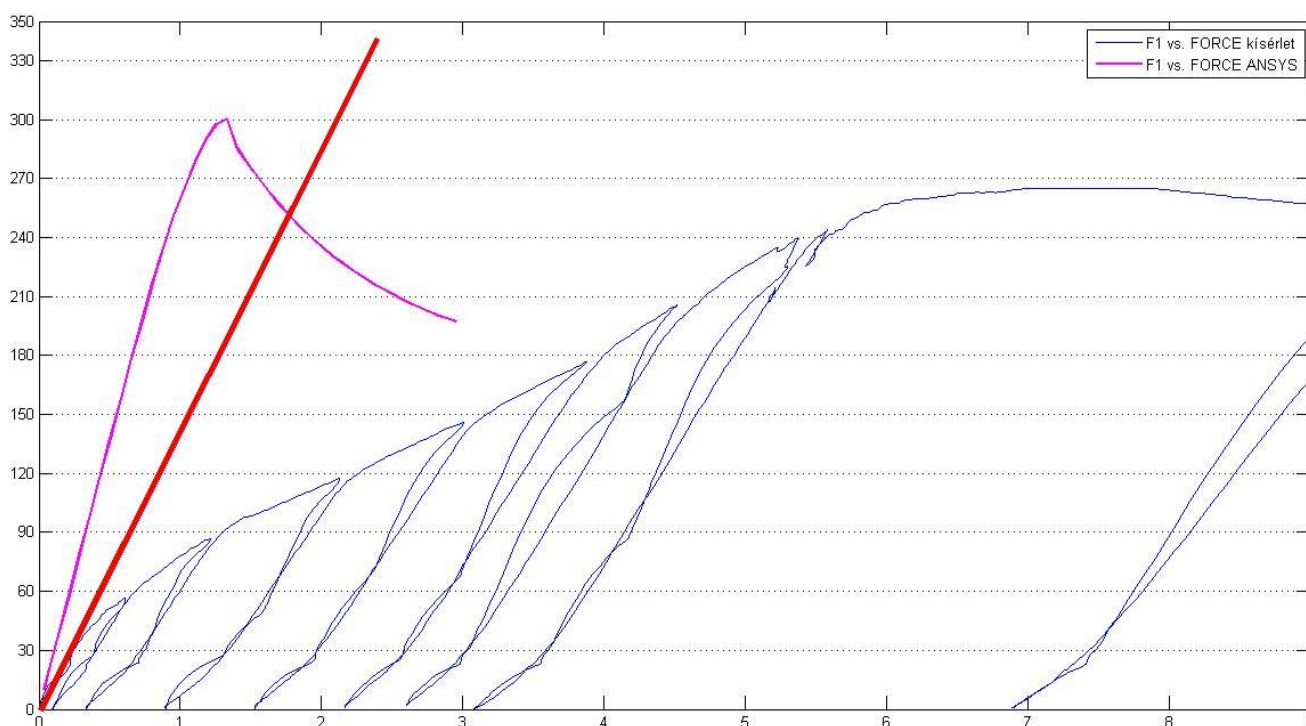
37. ábra: V1 mérési pont elmozdulásai valós és véges elemes esetben

A merevítetlen lemezmező középpontja (V1) rugalmasan is szinte teljes mértékben az imperfekcióknak megfelelően deformálódott. A kísérlet során figyeltük, hogy alacsonyabb terhelésnél az élek félszínusz alakban kezdtek el kihajlani, majd nagyobb terhelésnél már teljes szinusz alakjuk volt. Teherszintenként sorban kialakultak az adott teherszintnek megfelelő lemezhorpadási alakok. Ez a jelenség a V1 pont elmozdulásain viszonylag jól nyomon követhető, látható, hogy a valós eset grafikonja igencsak határozatlan. A véges elemes modell grafikonja azonban nem ilyen. A figyelembe vett 3. horpadási sajátalak a V1 pontban nem tartalmaz imperfekciót, alacsony teherszinten ezért nem mozdult el a modell mérési pontja. A V3 pont elmozdulásai se annyira „valószerűek”, de a görbék jellege itt is elég hasonló.



38. ábra: V3 mérési pont elmozdulásai valós és véges elemes esetben

Végezetül, csak reprezentatív jelleggel beillesztem a közelítő véges elemes modell és a valós erő-elmozdulás diagram korrelációját:



39. ábra: Erő – függőleges elmozdulás ábrák. Magenta a modellből, kék a kísérletből, a piros vonal a kísérleti ábra töréspont előtti szakaszának az érintője.

3.6. A második kísérletsorozat – 2014 szeptember 8-12.

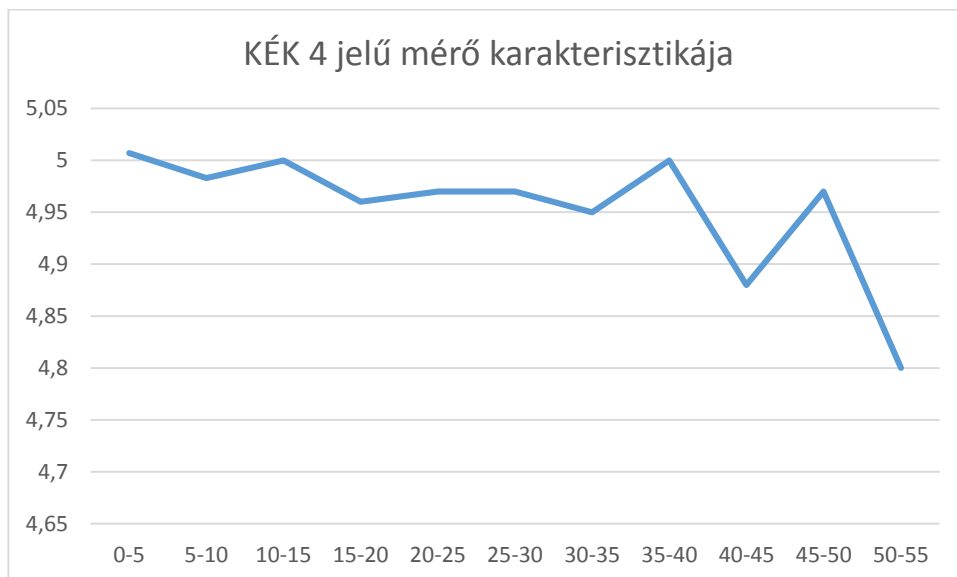
3.6.1. Előkészítés

A második kísérletsorozat is imperfekcióméréssel kezdődött. A 02 és a 03 sz. próbatestek maradtak meg, Ezek valószínűleg egy táblából lettek kivágva, mert az imperfekcióik nagyon hasonlóak voltak. Mindkét próbatest valamivel vastagabb volt az alján (átl. 4.26mm) és a többi vastagságban sem volt akkora szórás, mint amekkorát a 01 sz. próbatesten mértünk. Az imperfekciómérés után előkészítettem a kísérletet. Mivel már több bélyeg állt a rendelkezésemre, mint tavasszal, szabadabban bántam velük. Már tudtam, hogy a próbatestek az erőbevezetésnél fognak tönkremenni, még pedig várhatóan az alsónál, így arra a területre koncentráltam. Kihasználtam a szimmetrikus viselkedést is és csak az egyik sarokra koncentráltam. A GAGE1, GAGE6 és GAGE10 jelű kontrollbélyegeket meghagytam az előző mérésekkel való összehasonlíthatóság miatt, valamint hagytam közös elmozdulásmérési pontokat is.

3.6.2. Mérők kalibrálása

Az előző alkalommal a bélyeges mérőket nem kalibráltuk pontosan, csak annyit csináltunk, hogy a mérési tartomány két pontját megmértük, tolómérővel lemértük pontosan a mérési tartományt és a két végponton mért értékek között lineárisan interpoláltunk. Most pontosan kalibráltam az údadókat. Meghatároztam azt a mérési tartományt, ahol a bélyeges údadók lineárisan mérnek. Ez a tartomány minden údadónál máshová esett, de párba tudtam őket rendezni megfelelően. Az údadók karakterisztikáját a 40. ábra szemlélteti.

Az induktív adókat ezúttal is ellenőriztem a befogó szerkezeten, mérőhasábokkal.



40. ábra: KÉK 4 jelű mérő karakterisztikája; x tengelyen a mérési tartomány szakaszai, y tengelyen a mért elmozdulás érték 5 mm-en. Látható, hogy a tartomány 15 és 35 mm közé eső szakaszán a mérés lineáris, így a kalibrációt azon a szakaszon végeztem és a méréskor is erre a szakaszra illesztettem a mérő nullpontját.

3.6.3. A kísérletek eredményei

Az első kísérletet szeptember 11-én hajtottuk végre. Egy sajnálatos malőr miatt ennek a kísérletnek az eredményeit nem tudtam felhasználni, mert az előkészítéskor elfelejtettem kiiktatni a terhelőberendezés gömbcsuklóját. A próbatest így képes volt elcsavarodni a hossz tengelye körül és jóval alacsonyabb teher szinten tönkrement, mint a többi. A beépített biztonsági rögzítők meggátolták a túl nagy elmozdulásokat így az egytengelyű csukló nem esett le a helyéről, esetleg veszélyeztetve a műszereket. Ilyen tönkremeneteli mód a valóságban sajnos nem fordulhat elő. Az eset mindenesetre nagyon tanulságos volt.

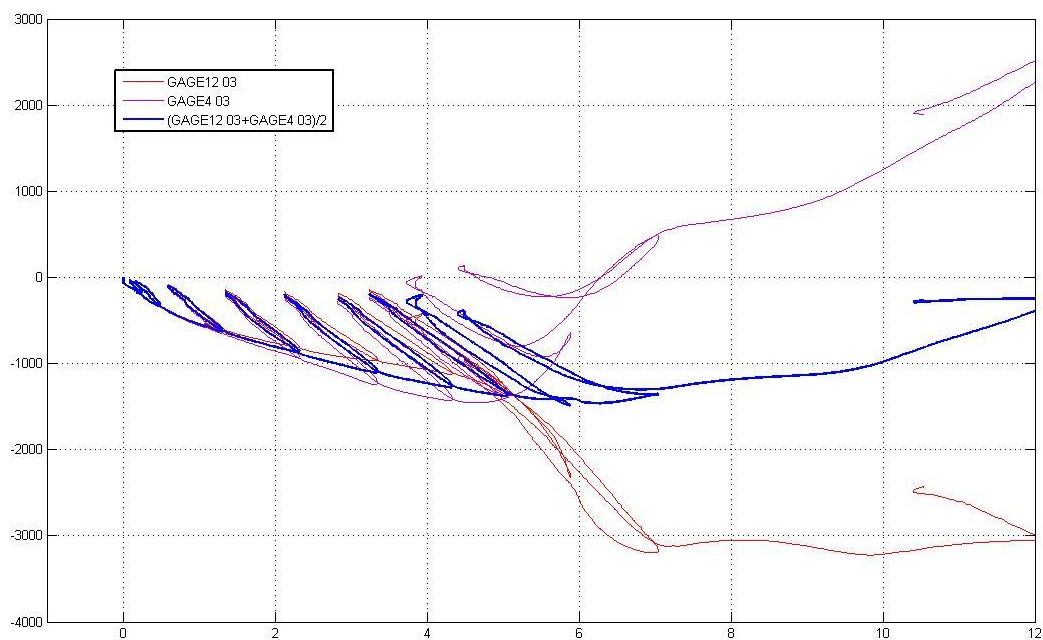
A második kísérletet másnap végre tudtuk hajtani. Az összeállítás már rutinosan, gyorsan ment, a tönkremenetel ott következett be, ahol vártuk, az alsó erőbevezetési pontnál.

Bizonyos helyekre két bélyeget ragasztottam, egyet a külső, egyet a belső szélső szálra. Ha a vastagság mentén a nyúlást lineárisnak feltételezzük és a két mért pont átlagát ábrázoljuk, megkapjuk a lemez középfelületén „mérhető” nyúlást. Ez valamivel több információt nyújt, mint a szélső szál nyúlása önmagában. A GAGE4 és a GAGE12 adatsorainak átlagolásából például láthatjuk, hogy az áttörés közvetlen környezetében lévő lemezrész valóban elkezdni ejteni a feszültséget, jóval hamarabb, mint ahogy a tönkremenetel bekövetkezik, vagyis a negyedik keresztmetszeti osztály miatt a hasznos keresztmetszeti területből kieső lemezrész valóban kihorpad (41. ábra). Az ábrán az is látszik, hogy a horpadás megindulása (a görbék szétválása) utáni szakaszon a lemezrész azért még vesz fel némi terhelést.

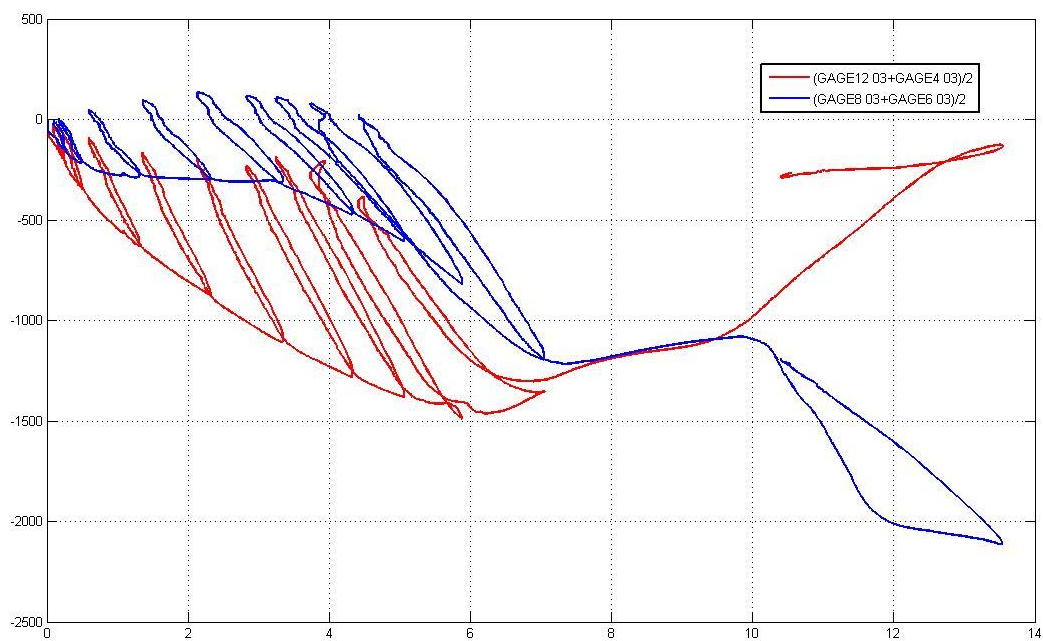
A 42. ábra ezzel párhuzamosan a GAGE6 és GAGE8 mérők átlagolt adatait mutatja. Az utolsó tehermentesítéssel nagyjából sikerült eltalálni a maximális teherbírást, a mérő az újrateherheléskor már csak minimálisan emelkedett. Ha az erő-elmozdulás ábrával összevetjük (43. ábra) láthatjuk, hogy a teherbírás maximumánál már mindkét átlagfeszültség erősen leszállóágban van.

A 43. ábrát tovább elemezve és tudván azt, hogy az első kísérlet elmozdulása hibás érték, mivel a mérési pontok a vízszintes élen voltak, ennek deformációi is hozzáadódtak a mért értékhez. Ha korrigálnám, jó egyezést mutatna a 2. kísérlet ábrájával (kék). Ebből arra lehet következtetni, hogy a vízszintes merevítő elemnek viszonylag kevés hatása van a próbatestek viselkedésére. Ezt támasztja alá a 44. ábra is, V3 pont elmozdulásaival. A 44. ábrából látszik, hogy az első kísérletnél valamivel hamarabb jelentkezett az első

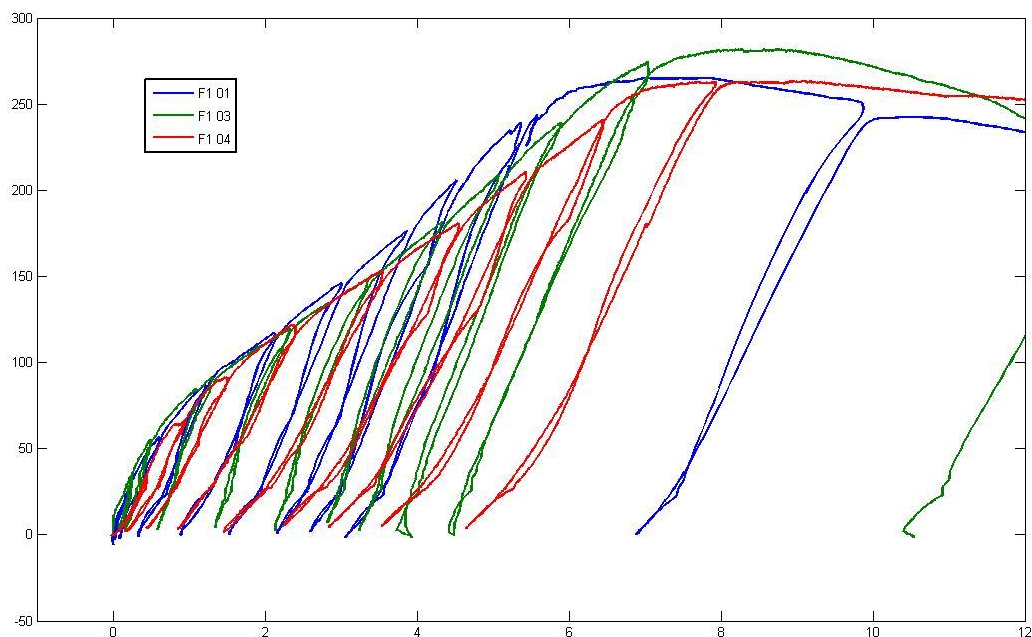
horpadási jelenség, de mivel önmagában ez nem egy végzetes stabilitásvesztési forma, ez közvetlenül nem felelős az alacsonyabb teherbírásért. Ennek az okát ezért az imperfekciókban kell keresni, és láthatjuk is, hogy az először vizsgált 04-es próbatest volt a legvékonyabb, az átlagosan 4,15 mm-es vastagságával.



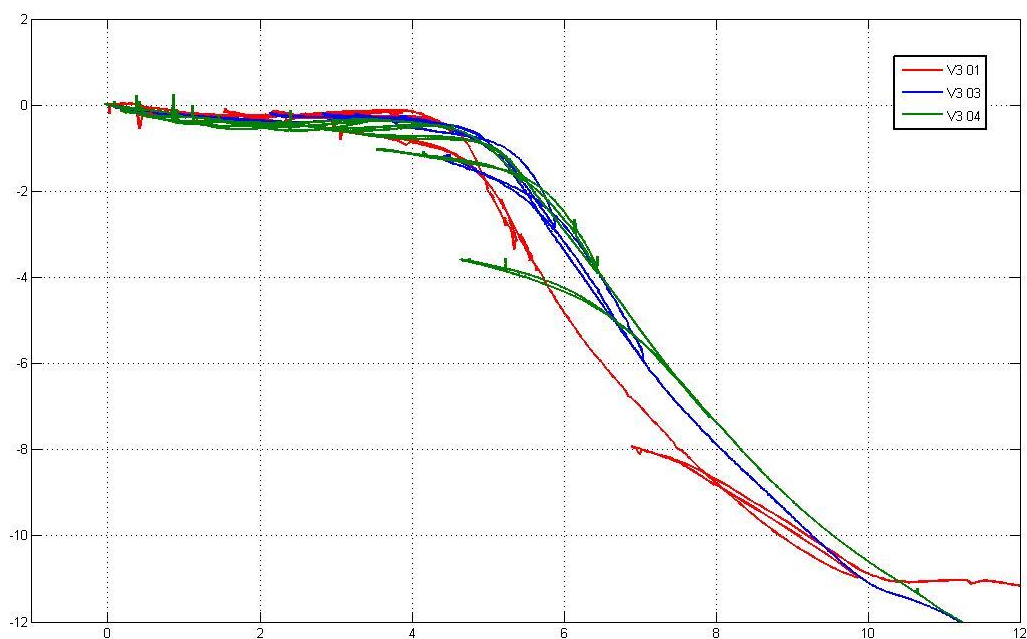
41. ábra: GAGE4 és GAGE12 nyúlásmérő bélyegek adatsorai és azok átlaga



42. ábra: az áttörés melletti átlagnyúlás (piros) az élen mérhető átlagnyúlás (kék) mellett.



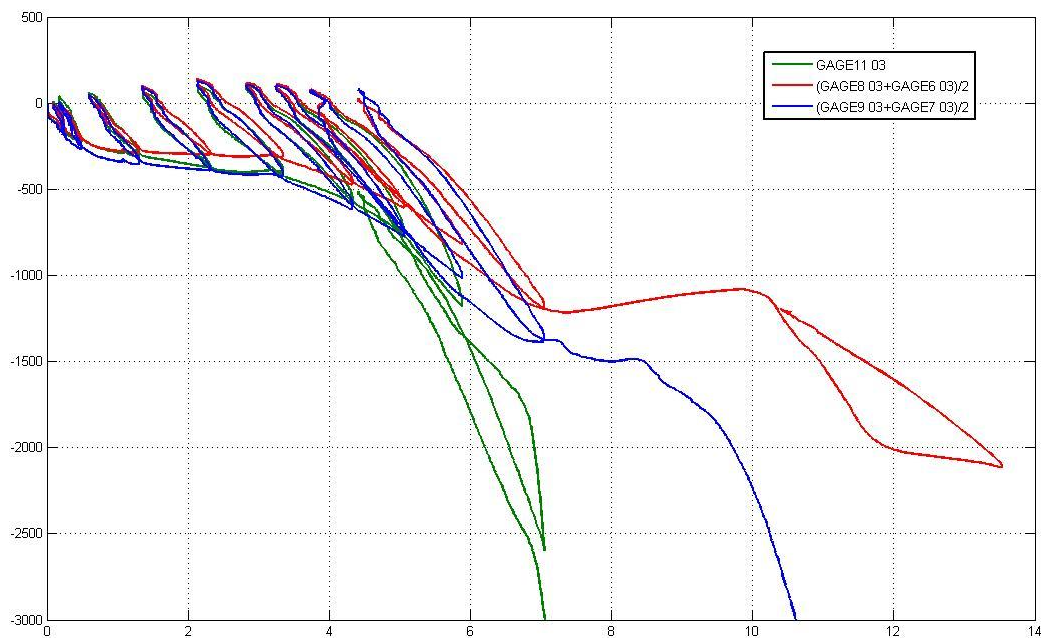
43. ábra: a három kísérlet közös erő-elmozdulás ábrája. A negyedik kísérlet adta a legnagyobb teherbírást (zöld), az ehhez tartozó körülbelül 8 mm-es elmozdulással.



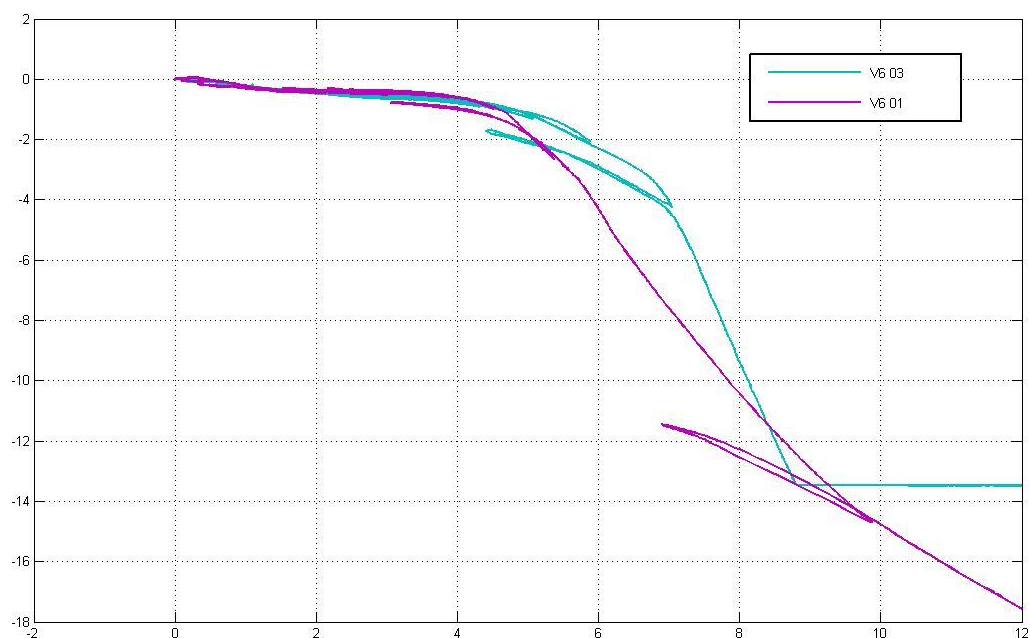
44. ábra: a három kísérlet közös V3 mérési pontjának a vízszintes elmozdulásábrái

A 45. ábra is érdekes jelenséget mutat. Az ábrán az él mérési pontjainak az átlagos nyúlásait láthatjuk, a csavarsor felé haladva. A csavarsorhoz legközelebb, a furat szélétől 1 cm-re van a GAGE11 jelű pont (az ábrán zöld görbe). Látható, hogy a kezdeti hirtelen emelkedés után a feszültség hosszú ideig mindhárom pontban stagnál egészen addig, amíg az áttöréshez közeli lemezrész el nem kezd horpadni. A horpadás megindulásával egy időben a csavarhoz legközelebbi mérési pontban a nyúlás megugrik, egy idő után a nyúlásmérő bélyeg tönkre is megy, körülbelül 7,5 mm-es elmozdulás után nem mér semmit, a mérő szerint

7 mm-nél a mérési pontban a nyúlás túllépi az anyag folyásához tartozó értéket. A tönkremenetel helye ekkor még nem deformálódik látványosan, de a V6 mérési pontban is megjelennek az első jelentősebb maradó alakváltozások (46. ábra), tehát a tönkremenetel kezdete szinte egybeesik a GAGE11 pontban lévő lemezrész megfolyásával.



45. ábra: az él mérési pontjainak bélyegadatsorai



46. ábra: V6 mérési pont vízszintes elmozdulás adatsorai 01 és 03 próbatesteknél

4. A részletes véges elemes modell

A közelítő modellek megfelelőek voltak arra, hogy megtervezzem a segítségükkel a kísérletet, viszont a továbbhaladáshoz szükségem van egy kalibrálható, részletes modellre is. Úgy gondoltam, hogy az erőbevezetés megfelelő kialakításával megkaphatom azt a modellt, amire szükségem van.

Az Ansys Mechanical 14.0 programot használtam a modellépítésre, itt is a paraméteres, parancssor alapú szerkesztést preferáltam. A programot részprogramokra bontottam, így könnyebben nyomon tudtam követni az egyes beépülő elemeket és szabadon változtathattam azokat. Írtam egy főprogramot a paramétereknek, ez behívja az összes alprogramot, vagyis az anyagmodellt, a geometriát, a hálógenerátort, a kényszerdefiniálót, a lineáris megoldót, a nemlineáris megoldót, majd a kiértékelőt, végül az eredménykiíró alprogramot. Ez a struktúra nagyban megkönnyítette a programozást, ha valahol hibát vettem észre, pontosan tudtam, hogy hol keressem a megfelelő parancsot.

4.1. Változtatható paraméterek és azok jelentősége:

Próbatest lemezzvastagsága

A laborban végzett mérések alapján a lemezzvastagság pontosan beállítható. A modellben próbatesten belül ez az érték állandó, ezért a mért értékek átlagát alkalmazom. A vastagságot a próbatest szélei mentén több helyen is megmértem.

Kiegészítő elemek lemezzvastagsága

A befogó sarokelemek nem végtelen merevek, ezért ezzel szabályozható a sarokelemek merevsége. A modell verifikálása során nem változtattam ezt az értéket, a valós 12 mm-es vastagságra van állítva.

Próbatest befoglaló méretei

A laborvizsgálat alapján felmért pontos méreteket alkalmazom itt is. A próbatest geometriáját bármekkorára felvehetem, a kapcsolódó elemek pontosan követik a próbatest méretváltozásait.

Kivágások, csavarok, furatok átmérő

A fő áttörések méretei természetesen mért értékek, a próbatesthez tartoznak. A kivágások a lézervágás precizitása miatt pontosan a névleges méretűre adódtak. A csavarok és a furatok átmérője névleges méretek. A csavarok még mindig közelítő kialakítása miatt a modell viselkedésére ezek az értékek nincsenek érdemben vizsgálható hatással.

Furatok helyzete

A mért és a névleges értékek között nincs különbség, de ezt az értéket is paraméteresen adtam meg az elején.

Mérési pontok elhelyezkedése

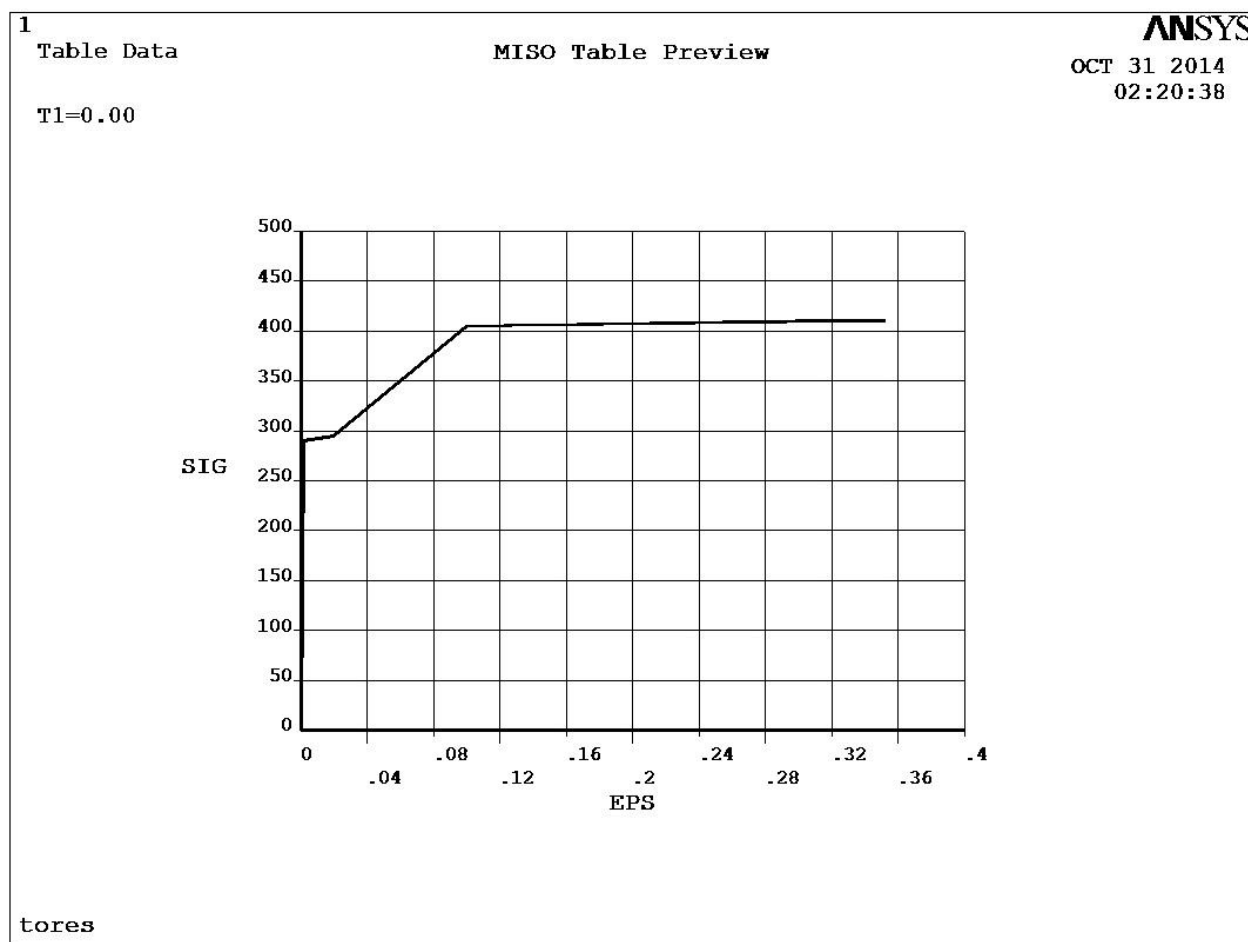
A modellből automatikusan kinyerhető adatok az őszi vizsgálatokkor felszerelt mérők adatai, vagyis a 12 db bélyeg, a 8 db vízszintes elmozdulásmérő adatai, a függőleges elmozdulás és a reakcióerő. Fontos, hogy a vizsgálni kívánt ponton legyen csomópont, ezért ezek a paraméterek a hálózásra is hatással vannak.

Összenyomás mértéke

A vizsgálatok során 10 mm-es elmozdulási tartományt vizsgáltam. A valós összeállítás tönkremenetele a 7-8 mm-es tartományban következett be, a végelelemes modellnek pedig nem feltétlen célja a tönkremenetel utáni viselkedés nyomon követése, a tönkremenetel után fellépő konvergenciagondok miatt pedig érdemes ezt az értéket a tönkremenetel környékére beállítani.

Anyagjellemzők

A modellhez a próbatestekhez mellékelt 5 db lapos próbatest szakítóvizsgálatakor nyert értékeket alkalmaztam. A vizsgálat eredményeit 4 ponttal közelítettem, a pontok közt lineáris összefüggéssel. Izotróp felkeményedő anyagot vettem fel. Az acél valójában inkább kinematikus felkeményedő anyag, de ennek csak ciklikus terhelésnél van jelentősége, az én esetemben a kettő egyenértékű, sőt, a Basic Analysis Guide szerint ⁽¹²⁾ ez az anyagmodell sokkal előnyösebben viselkedik nagy elmozdulásokkal járó (NLGEOM,ON) vizsgálatok esetén.



47. ábra: anyagmodell; multilineáris, izotróp felkeményedő.

Poisson-tényező

Szakirodalmi adatot használtam, 0,3-ra vettem fel a modellben.

Súrlódási tényező (acél-acél)

Szakirodalmi adatok szerint 0,1-es értékre vettem fel.

Téher helyzete a gerendán

A kísérleti elrendezésben a téher középén helyezkedik el. A szél és az íves pályakialakítás miatt azonban jelentős lehet az eredő téher külpontossága, ezért lehetőséget biztosítottam külpontosság beállítására. A hatását még nem vizsgáltam.

Imperfekció

A két modell (a merevített és a merevítetlen) más és más imperfekciófelvételi módot használ. A merevítetlen esetén fontos a középső lemezmező alakja, itt az imperfekciót három részre bontottam.

Kerestem egy globális jellegű sajátalakot a lemez imperfekciójának és két másikat az élek imperfekcióinak, amik valamennyire követik a mért értékek jellegét. A merevített esetben kettébontottam az áttört részt is, ebben az esetben az imperfekció felvételénél nem a középső lemezrészre koncentráltam, hanem az áttörések szélein mérhető értékekre. Az imperfekció nagysága próbatestenként és részenként változik, a kalibrációhoz igyekeztem a lehető legpontosabban felvenni a próbatestek tényleges imperfekcióit. Az első sajátalakot is felhasználtam, globális imperfekcióként, ahol megfelelően alacsony nagyságrendben tudtam, ott felhasználtam a kalibrációhoz. A végső állapotban ezt a sajátalakot nem használtam.

Az imperfekciók megadásához meg kell adni a tényleges imperfekció-nagyságrendet mm-ben és az előállításához felhasználandó sajátalakot.

Feszítőerő a csavarokban

Hatása nem áll közel a valóságoshoz, ugyanis nem működtet nyomást az összekapcsolt elemek felületei között, csak a csavar „emlékszik” a benne ébredő húzófeszültségekre. Bár messze áll a valóságtól, jelentősen befolyásolja a modell konvergenciáját és kis mértékben a teherbírást. Minél nagyobb a feszítőerő a modell teherbírása annál alacsonyabb. Ezt is a modell kalibrálására használtam.

Próbatest anyagának Young-modulusa

A szakirodalomban helyenként 210000, néhol 200000 MPa szerepel, a mérés során 220000 MPa körüli értéket mértünk. A végső állapotban a modellben a szakirodalmi 210000 MPa-s érték szerepel.

Csavar anyagának Young-modulusa

Ez az érték úgy állítottam be, hogy a két összekapcsolt felület képes legyen a megfelelő mértékű elcsúszásra, ugyanakkor a csavarok képesek legyenek közvetíteni a megfelelő mértékű terhelést az éleknek. A kalibráció során egy 2500 MPa nagyságú, teljesen fiktív értéket alkalmaztam, végeztem futtatást 210000 MPa-s értékkel is.

Végtelen merev anyagok

Végtelen merev anyagot csak egy helyen használtam, a furatok anyaga lett ilyen, hogy biztosítsam a megfelelő viselkedést a csavarban ébredő feszítőerővel szemben.

Elemméretek

Paraméterként ötféle elemméretet adtam meg, egyet a próbatest általános részeinek, egyet a próbatest sarkainak egy harmadikat a sarokelemeknek egyet a gerendaelemeknek, beleértve a csavarokat is és az utolsót a végtelen merev „furatoknak”. Általánosan 12 mm-es elemeket alkalmaztam. Ebben a mérettartományban az elemméret változtatásának már nem volt szinte semmi hatása a lineáris vizsgálatokra és a horpadási sajátalakok szorzótényezőire, ezért feltételeztem, hogy kellően pontos eredményeket kapok. A sarok környéki hálózatsűrűség a nemlineáris vizsgálat végső teherbírását azonban jelentősen befolyásolja. Mivel a csavarok modellezése nem pontos, ezért ezt az elemméretet is kalibrációra használtam fel. A túl finom hálózat ezekkel a modellezési megoldásokkal nem volt képes kellően megközelíteni a próbatestek teherbírását.

4.2. Alkalmazott elemtípusok

SHELL181

Minden héjelemet ezzel az elemtípussal építettem fel. Egyszerű, 4 csomópontú héjelem. Képes a feszültség miatti merevségváltozás követésére (PSTRES,ON). A fentebb említett szakirodalom ⁽¹²⁾ javasolja, hogy nyomott héjak horpadásvizsgálatánál és nemlineáris számításánál a jobb konvergencia miatt állítsuk a KEYOPT 3-at 2-re, a horpadási sajátalakok teljes integrálással való megkereséséhez, de én ezzel rosszabb konvergenciát értem el, ezért ezt a beállítást nem használtam.

BEAM188

A teherelosztó gerenda és a csavarok készültek ilyen elemekből. Az elemtípus alkalmas a csavarás okozta normál feszültségek követésére, ezt a lehetőséget a vizsgálat során kikapcsoltam. Nem számítottam nagy mértékű csavarásra egyik elemben sem, a vizsgálatnak nem célja a jelenség megfigyelése. A gerenda hosszú, karcsú elemek modellezésénél sokkal merevebben viselkedik a valóságonál (Timoshenko- elmélet miatt), ebben a modellben ettől a jelenségtől nem kell félni, ezért ez az elem alkalmazható. Alacsonyabb rendű gerendaelem, teljesen kompatibilis az általam használt SHELL181 alacsony rendű héjelemekkel.

MESH200

Automata hálózatgenerálást segítő véges elem, a héjelemek hálózásánál használtam.

CONTA173

Felület-felület kontaktelem. A legtöbb helyen elcsúszni képes kapcsolatokat hoztam létre a segítségével, a súrlódási tényező értékét pedig a szakirodalom szerinti 0,1 értékre vettem fel. A próbatest a teher egy részét a felső élen veszi fel, a maradékot a csavarokon keresztül, a súrlódási tényező is befolyásolja, hogy ezek milyen arányban oszlanak meg. A függőleges részekben jelentős súrlódás csak a furatok végtelen merev elemeinél figyelhető meg.

Mivel a csavarok merevségét szabadon változtattam szükség volt arra, hogy a kieső normál irányú merevséget máshogy pótoljam, ezért a furatok elemeinél no-separation kontaktpárokat hoztam létre. Ezek képesek az egymáson való elcsúszásra, ám egymástól képtelenek eltávolodni. A csavar által megengedett elmozdulást a kontaktközött értelmezett elcsúszási távolsággként tudtam megmérni. A no-separation contactoknál nagy jelentőséggel bírt a kontaktfelület mérete. Minél nagyobb felületen fogom meg a próbatestet a csavar normálirányába, annál nagyobb lesz az erőbevezetés teherbírása. Ilyen módon lehetőség van arra, hogy annyira megnöveljem a zóna teherbírását, hogy előbb jelentkezik a közelítő modelleknél megismert tönkremeneteli mód, a 280 kN-t meghaladó teherbírással.

Ezeknél az elemeknél bekapcsoltam a lemezvastagság figyelését, így a kontaktpárok zárt helyzetben jöttek létre, nem volt szükség állításra. Korábban próbálkoztam a SECOFFSET paranccsal, hogy a shell elemeket így állítsam a pontos helyzetükbe. Ez egy igen előnytelen megoldás kontaktelemelek alkalmazása esetén, senkinek sem javaslom, jelentősen meghamisítja az eredményeket.

TARGE170

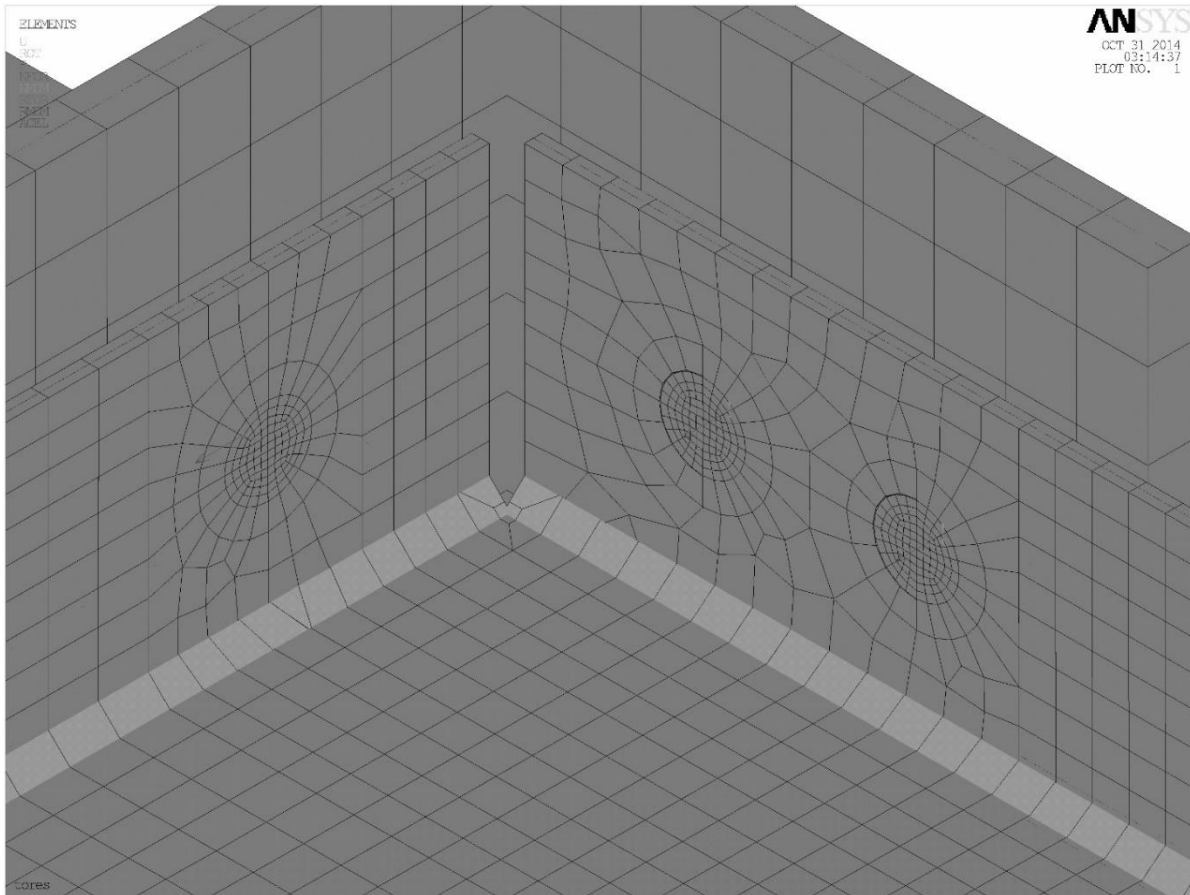
A CONTA173 elemek párja. A kettőt együtt kell definiálni, közös „real constant”-tal. A modellemben a contact és a target elemek is átveszik az alattuk lévő elemek merevségét, képesek az alakváltozásra.

4.3. Geometria

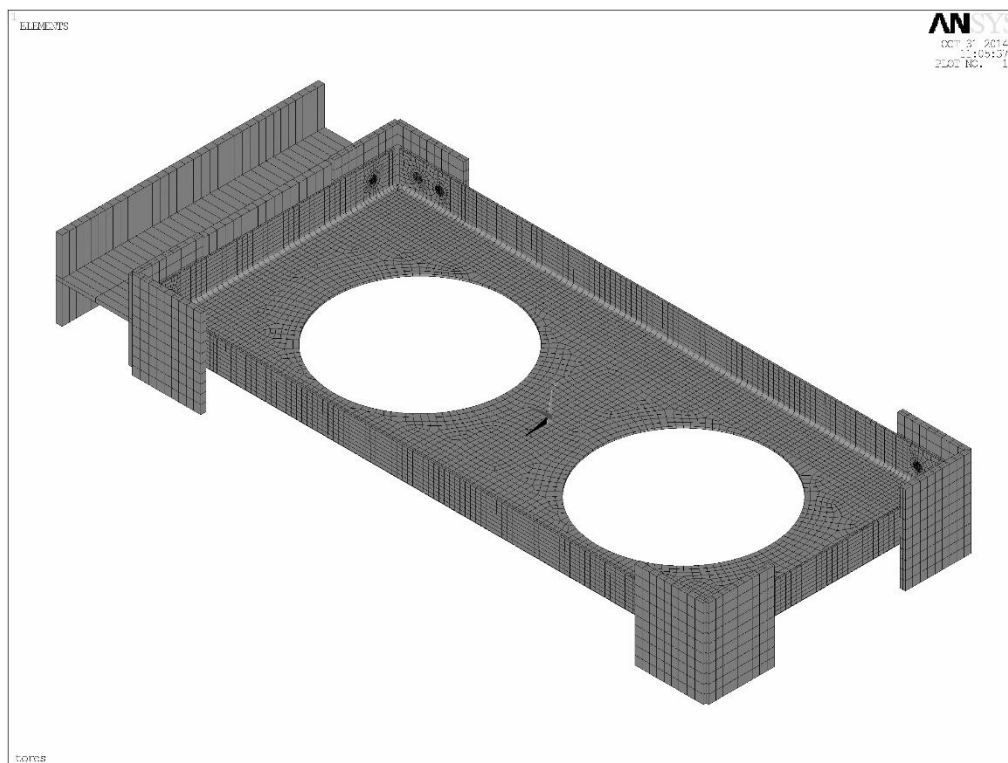
A modell tartalmaz egy próbatestet, aminek a méretei szabadon állíthatóak, a mért értékeknek megfelelően. Az egyszerűség kedvéért minden méretnek egy értéket adtam meg, így a modell teljesen szabályos és szimmetrikus. A megadott méret kiválasztása szempontjából a tönkremenetel helyén mért érték a legfontosabb, ezért a lemezvastagságot, az él méretét, a teljes szélességet igyekeztem az azon a helyen mért értéken megadni.

A sarokelemek a modellben csak teherátadó szerephez jutnak, jelentőségük nem olyan nagy, így azokat névleges méretekkel vettem fel. A sarokelemeket a próbatesthez csavarokkal és kontaktelemelekkel kapcsoltam. A csavarokat gerendaelemekkel (BEAM188) modelleztem, egyik végpontjuk a sarokelemhez, másik végpontjuk a próbatesthez kapcsolódik mereven, közös csomóponton keresztül. A kontaktelemeleket többnyire az alapértelmezett beállításokkal vettem fel, ez azt jelenti, hogy képesek elcsúszásra és szétnyílásra. A 48. ábrán éles szemmel kiszűrhető, hogy a vízszintes csavarok az anyagi folytonosság megszakítása miatt nem képesek húzóerő továbbítására a furat „húzott” részére. Ez a megoldás azért volt

szükséges, mert egyébként a fellépő húzás miatt a csavarok nem voltak képesek akkora feszültséget létrehozni az él felső részén, hogy a tönkremenetelkor észlelt horpadási jelenség létrejöjjön.



48. ábra: a csavarok környezetének modellezése



49. ábra: a hálózott modell

A csavarokat hálózatgenerálásnál két részre osztottam, a középen létrejövő csomópont a feszítőerő megadásánál volt segítségemre.

A modell tartalmazza a teherelosztó gerendát is. A gerenda hozzáadásától azt reméltem, hogy a befogási viszonyok különbözősége miatt a próbatest az alján fog tönkremenni, ezzel igazolva a kísérletekkor tapasztaltakkal kapcsolatos feltevésemet. A modell adatainak kiértékelésével már látható, hogy ez a jelenség nem ilyen egyszerű. A jelenség oka valóban a befogási viszonyokban keresendő, de a befogás csavarómerevségében. Az alsó az tökéletesen merev elcsavarodás szempontjából, a felső viszont pontosan olyan merev, mint a HEB180-as gerenda. Vízmértékkel szinte lehetetlen tökéletesen függőlegessé tenni a kísérlet előtt a próbatestet, valószínűleg nem is sikerült és vittünk a rendszerbe valamekkora másodrendű hatást, amit a próbatest próbált kiegyensúlyozni dőléssel. Ez a gerenda létező merevsége miatt nagyobb mértékben sikerült fent, mint lent, a meggátolt elcsavarodás pedig lent többlet-igénybevételként jelentkezett.

4.4. Befogási viszonyok:

A próbatest a sarokelemekhez teljesen szimmetrikusan van kapcsolva, az alsó és a felső kapcsolatok között nincs semmi különbség. A modell alul a sarokelemeneken keresztül van befogva, felül pedig a gerenda egy pontján egytengelyű csuklós kapcsolattal, ahogy a kísérletkor kialakítottuk. A valós befogási viszonyoktól a gyorsabb futtatás miatt a kalibráció során eltértem, de a végső állapot a valóságot tükrözi.

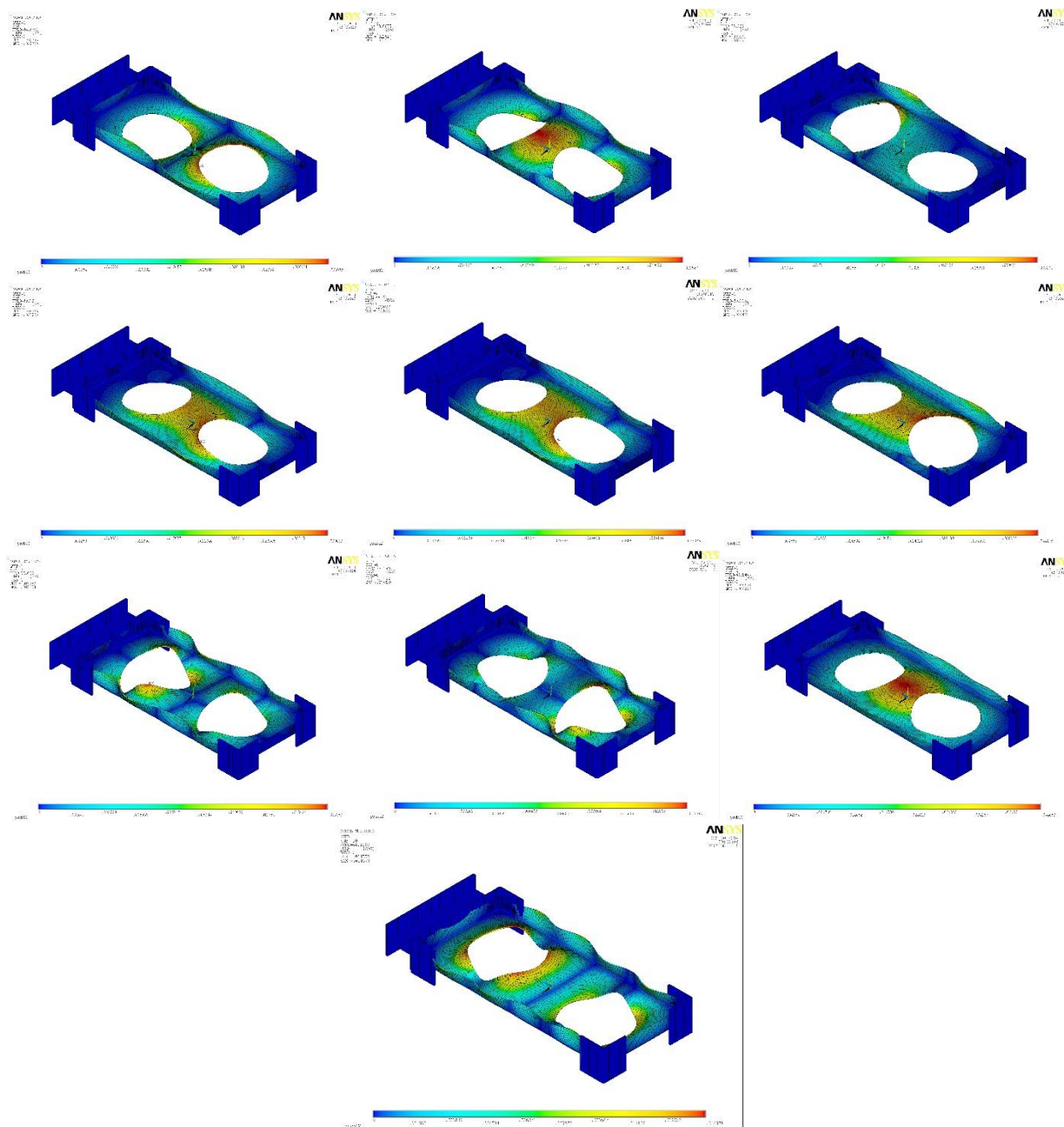
A lineáris vizsgálatoknál a talp elmozdulása 0 és erő jellegű teher működik a gerenda középpontjára. A gerendát megfogtam a középpontján tengelyirányba (x irány), az y irányú elmozdulását és az x tengely körüli elcsavarodását a gerenda hossza mentén meggátoltam a gyorsabb futás érdekében, a magassági z tengely menti elmozdulást pedig szabadon hagytam.

A nemlineáris vizsgálatnál a kényszereket a valós befogási viszonyok szerint vettem fel. A kiértékelés során a reakcióerőket a gerenda középső, megtámasztott csomópontjáról olvastam le, az elmozdulásokat pedig az előírt függőleges elmozdulással rendelkező talppontok egyikéről.

4.5. Vizsgálatok

Lineáris vizsgálat

Két részből áll, az első rész egy lineáris statikai vizsgálat, a valóságtól valamelyest eltérő kényszerekkel. A kiindulási terhelés erő jellegű, 10 kN, a gerenda középpontjára hat.



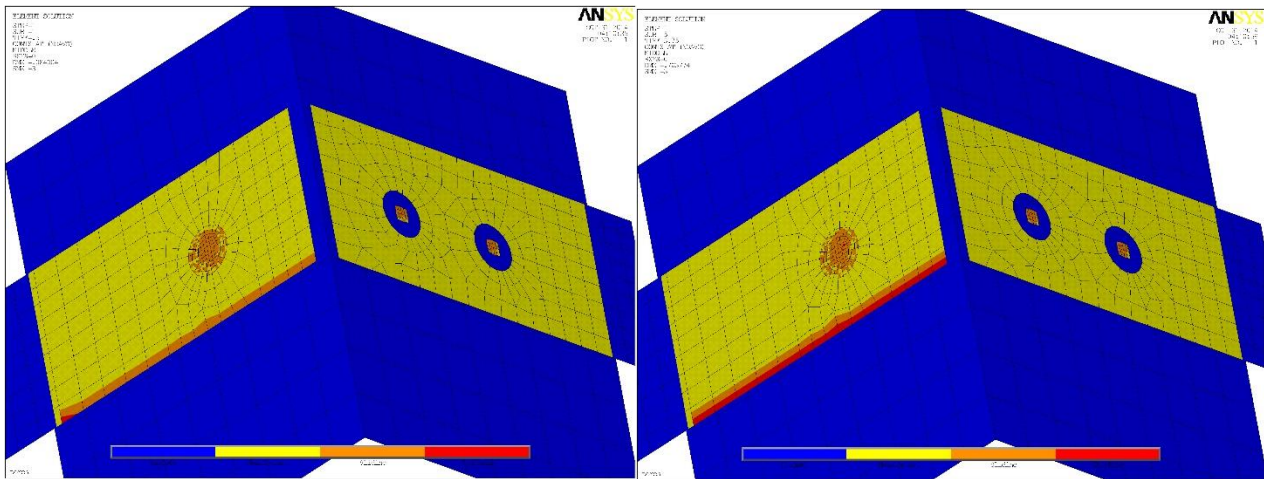
50. ábra: az első 10 horpadási sajátalak merevítetlen esetben; az első alak szorzótényezője 23,61, vagyis a kritikus teher 236,1 kN (2500 MPa merevségű csavarok esetén).

A második része egy horpadási sajátalakvizsgálat. Az első 10 sajátalakot (50. ábra) kérem le és ezeknek a segítségével adom meg az anyagilag és geometriailag nemlineáris vizsgálathoz az imperfekciót. A kényszerekben az eltérés oka a gyorsabb futás és a szebb sajátalakok kinyerése.

A vizsgálat végén frissítem a modellgeometriát a paramétereknél definiált mértékben, definiálom a csavarokban létrehozandó feszítőerőt és kezdődik a nemlineáris vizsgálat.

Nemlineáris vizsgálat

Ez is két részből áll, az első részben a modellen működtetem a feszítőerőt és a gravitációt. A rész időtartama 1 másodperc. A számítás végén a program hosszváltozás formájában fixálja a csavarban létrehozott feszítőerőt és a továbbiakban eszerint kezeli. Ennek sajnos az az eredménye, hogy a csavarban magában a program megőrzi a létrejött feszültséget, de a kontaktelemek között ez nem eredményez nyomóerőt, így ezzel a módszerrel a csavar felületeket összeszorító funkcióját nem tudtam modellezni.



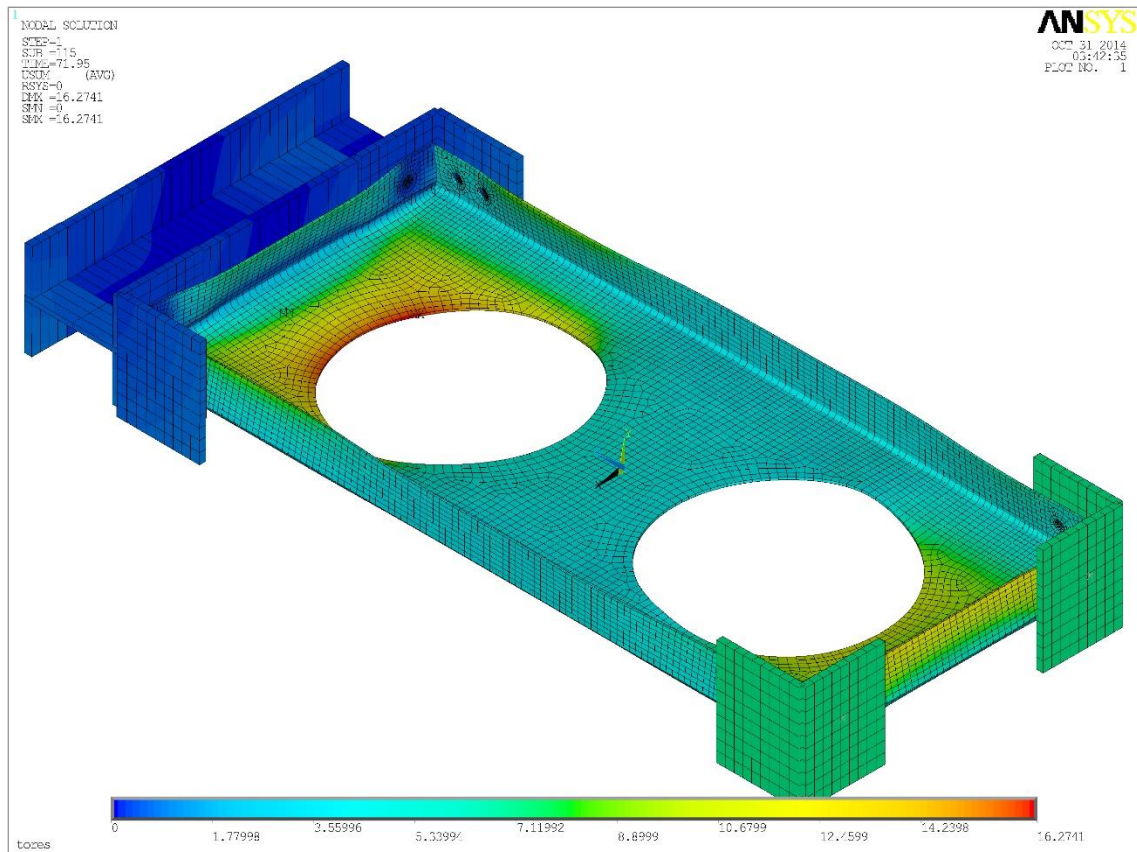
51. ábra: a kontaktelelemek státusza a vizsgálat elején; balra a legelső substep, jobbra az ötödik. Látható, hogy a kezdetben súrlódó kontakt a felső élen hamar átvált tapadóvá a kontaktfelületek között megnövekvő nyomófeszültség miatt. A csavar kontaktjai (teljes méretű fent, csökkentett méretű az éleken) no-separation kontaktok az elejétől kezdve.

A számítás második felében működtetem a modellre a beállított 10 mm-es elmozdulást kinematikus teherként, 100 másodperces időtartamban, maximum 1 másodperces lépcsőkben, vagyis az iterációknál maximum 0,1mm-es elmozdulást kezelhet a program egyszerre. Ez úgy tűnhet, hogy lelassítja a számítást, mert a számítás első részében nagyobb lépésekben is lehetne haladni, de mivel szinte minden iteráció konvergál és a számítás végén is összességében jóval kevesebb iterációra van szükség, azt tapasztaltam, hogy gyorsabb így.

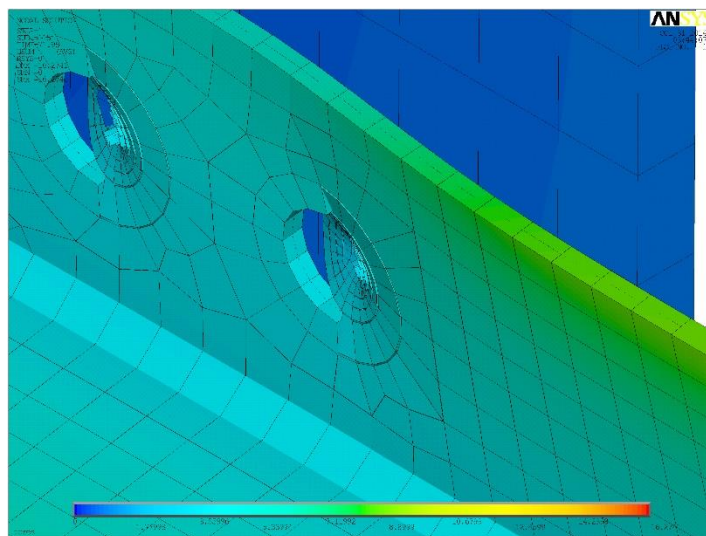
A számítás nagyjából 20 percet vesz igénybe. Az első teherlépcsőnél viszonylag nehezen, 20 iterációból konvergál. Ha nincs a csavarokban feszítőerő, a számítás az első teherlépcsőben abszolút nem konvergál, a sokadik visszavágás után sem. Az első lépcső után a számítás során a csavarok merevségének függvényében egy ideig (60-80 másodpercig) nem történik semmi. A tönkremenetel előtt valamivel elkezd ingadozni a konvergencia. A tönkremenetel utáni, posztkritikus viselkedést a modell korábban képes volt kezelni, a végleges beállításokkal azonban nem, a számítás egy darabig még futtatható, de egy idő után manuálisan célszerű leállítani.

A számításhoz az első teherlépcső bizonytalansága miatt megnöveltem az egy sorozatban végrehajtott iterációk maximális számát és kikapcsoltam a konvergenciahiba miatti leállást. Ha esetleg az első teherlépcső nem konvergálna, visszavágja a méretét a minimálisig, ha az se konvergál, akkor is továbbviszi a számítást és a lineáris szakaszban megtalálja a konvergenciát. A korábbi modellverzióknál futás közben is szükség volt erre, azok esetenként több óráig is futottak, végül az előírt elmozdulás elérése előtt ezekkel a beállításokkal is leálltak. Azokat a hibákat, amik ezt a jelenséget okozták szerencsére sikerült kijavítanom és sikerült egy kellően stabil modellt létrehoznom.

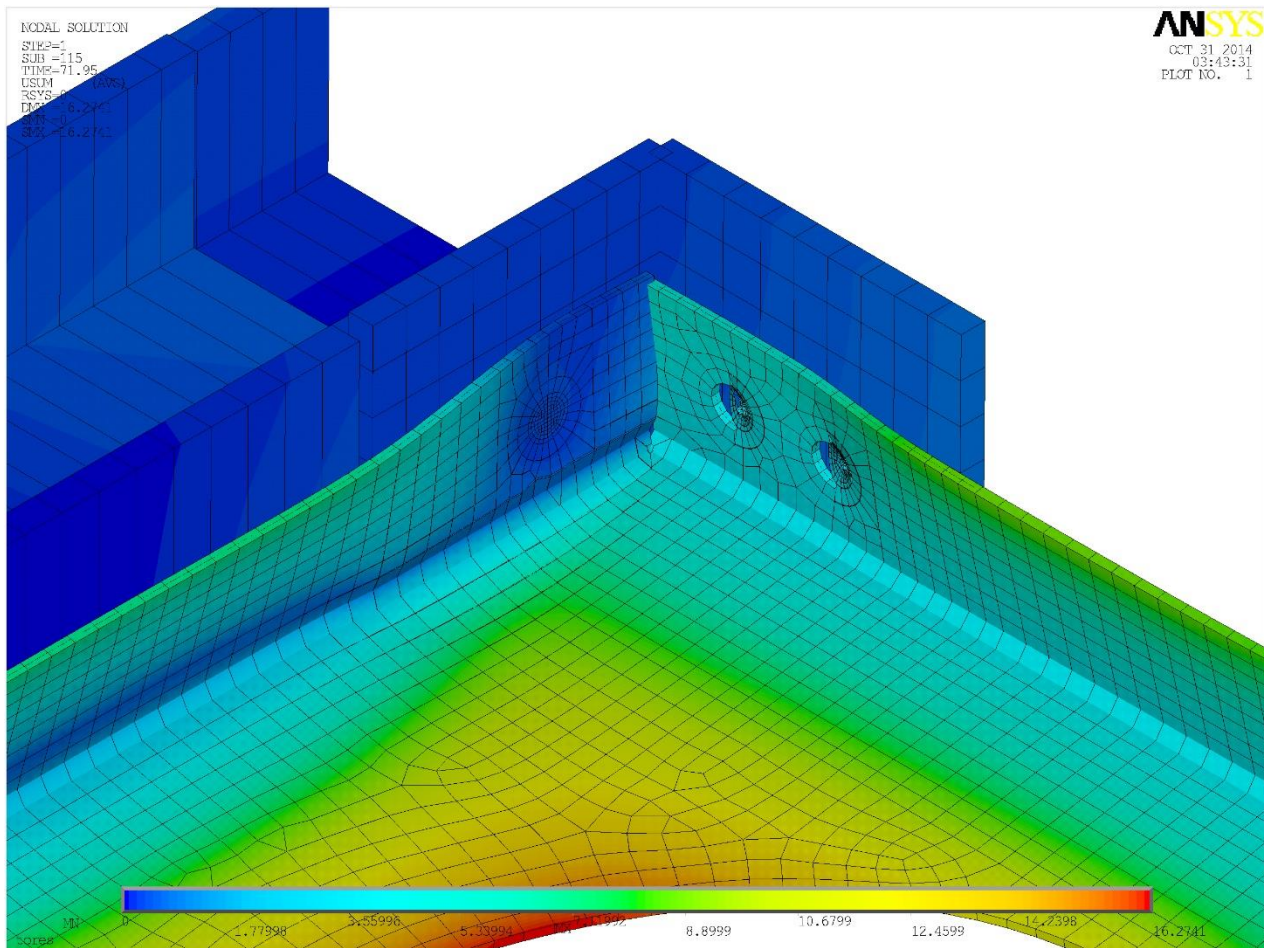
Korábban, a modell optimalizálása előtt használtam a STABILIZE parancsot a nemlineáris vizsgálathoz. Ez nagyon hasznosnak bizonyult, hasonló héjelemes modellek esetén az Ansys rosszul kondicionált modell esetén is képes így konvergenciát elérni. Úgy vettem észre, hogy az alapértéken a megoldás pontosságára nincs jelentős hatással, sőt, talán még modellverifikációra is fel lehet használni a stabilizálás mértékét. Én a modellem optimalizálása után már nem használtam ezt a parancsot, nem volt rá szükség.



52. ábra: a tönkrement szerkezet alakja; a tönkremenetel fent látható, nagyított alakváltozások.



53. ábra: a csavarok viselkedése tönkremenetelkor, nagyított alakváltozások.



54. ábra: a sarok környékének deformációja tönkremenetelkor, nagyított alakváltozások.

4.6. Analízis és verifikáció:

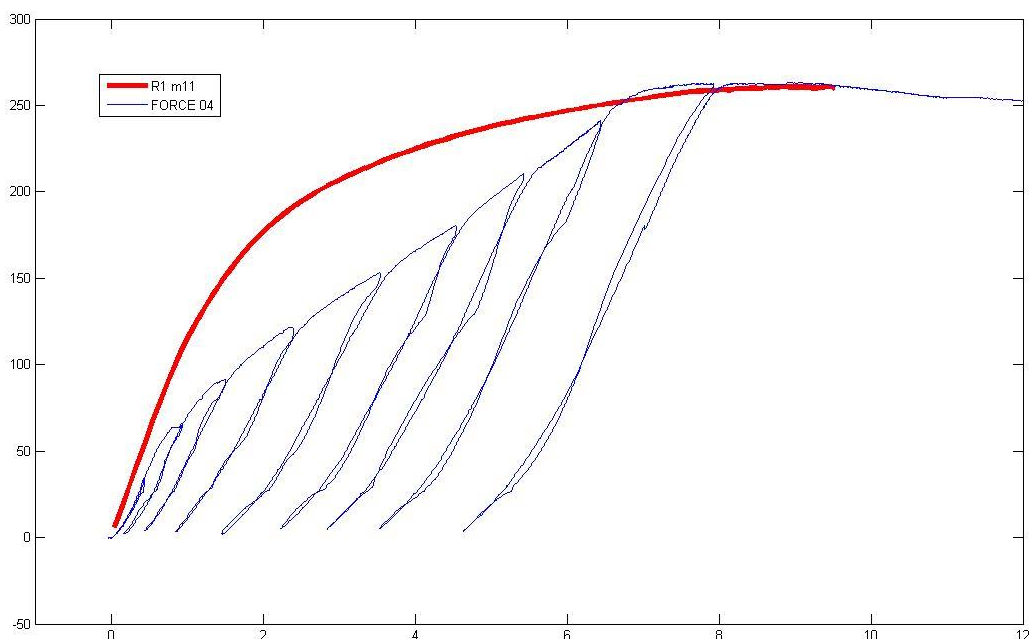
A mérési pontok adatait mátrixokba rendeztem és kiexportáltam programon kívül kezelhető formátumba, ezeket használtam fel a modellverifikációra. Első sorban az erő-elmozdulás diagramot próbáltam kiértékelni, a többi adatot csak ellenőrzésre használtam.

Modellverifikációra a változtatható paraméterek közül csak a csavarok merevségét használtam fel, valamint a kontaktelemelek definiálásánál módosítottam a függőleges éleken a csavarok no-separation kontaktelemeinek a méretét. A verifikáció során világossá vált, hogy ez a jellemző van a legnagyobb hatással a modell teherbírására. Ha a kontaktfelület elég nagy, teljes egészében meggátolja a kísérleteknél tapasztalt tönkremenetelt és a modell az első sajátalak szerint megy tönkre. Ebből talán levonhatunk néhány tanulságot: normál szilárdságú acélból készült széles, merev alátétek alkalmazása esetén vajon tényleg nő-e a szerkezeti elem teherbírása? Ha a bekötéseknél hosszabb lehajtott éleket alakítunk ki és több csavarral rögzítjük a nyomott rácsrudat, akkor úgy érzem, hogy minden bizonnyal.

A modellverifikációt a 04-es próbatest erő-elmozdulás görbéje alapján végeztem (55. ábra). Ezt a próbatestet merevítés nélkül vizsgáltam, így a modellt is merevítés nélküli esetben verifikáltam. Az alapelvem az volt, hogy verifikálom erre az esetre, aztán átirom a 03-as próbatest imperfekcióit és beillesztem a helyére a merevítő elemet, majd ellenőrzöm, hogy a módosított modell visszaadja-e a 03-as próbatest eredményeit.

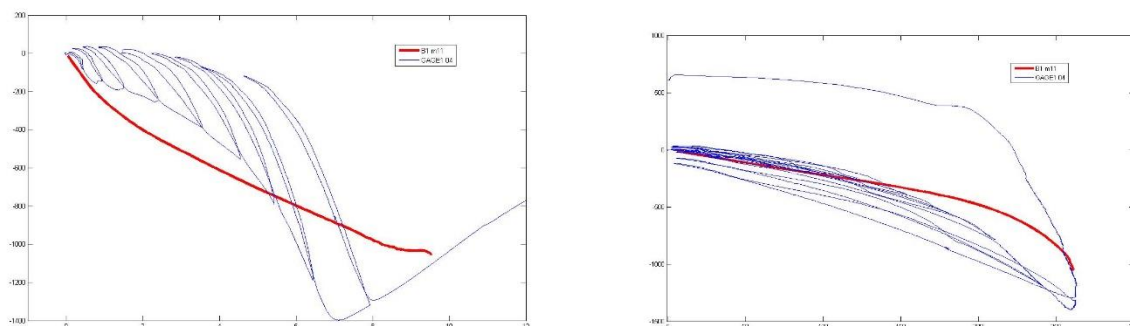
A 04-es próbatest maximális teherbírása 263,21 kN, a modellé 261,036 kN, az eltérés 0,8%. Az 54. ábrán jól látszik az eltérés a valós és a véges elemes modell között. A görbe kezdeti meredeksége tekinthető hasonlóknak, de a görbe további szakaszán a görbék nincsenek átfedésben. Ennek az oka valószínűleg a 3.4-

es fejezetben már említett hidegalakítás után maradó feszültség, amit a modell nem vesz számításba. Ezzel a jelenséggel érdemes lenne foglalkozni a továbbiakban.

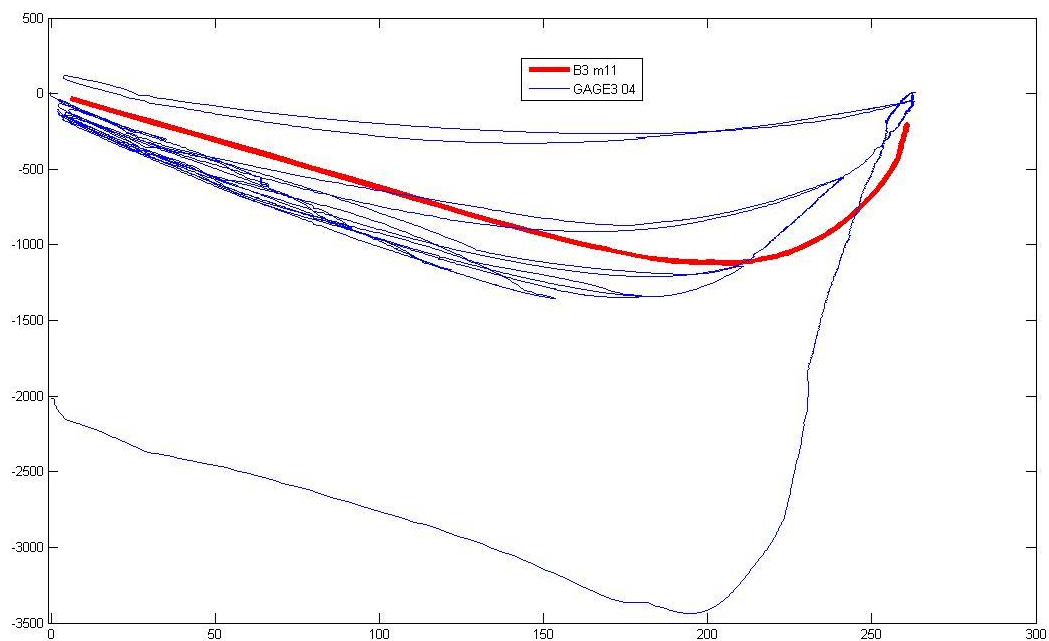


55. ábra: a verifikált modell erő-elmozdulás ábrája a 04-es próbatestéhez képest

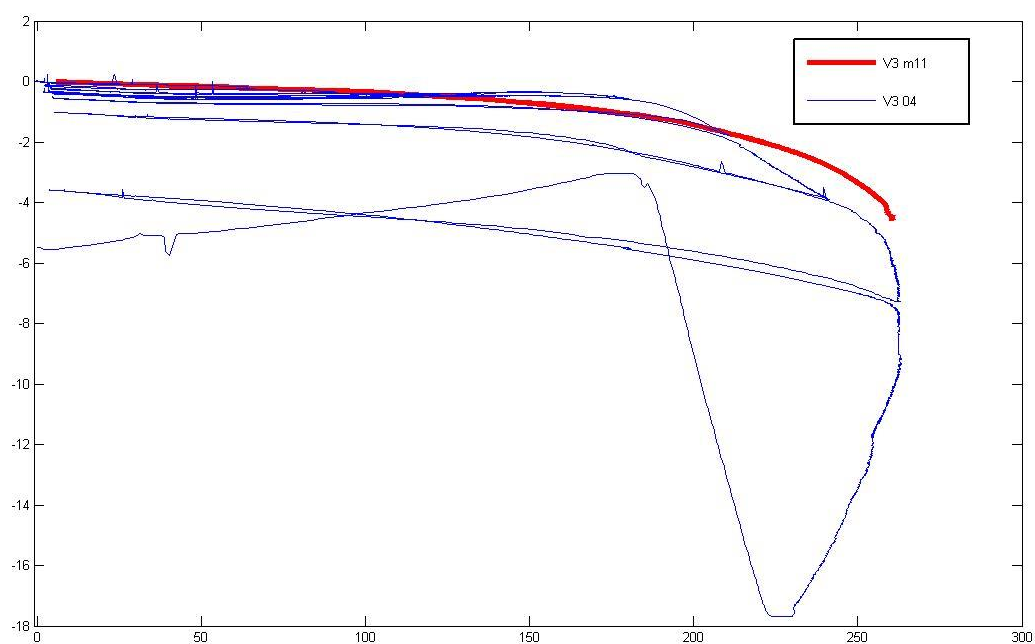
Az 56. ábra balra GAGE1 mérési pont bélyegadatait ábrázolja a függőleges elmozduláshoz képest, jobbra pedig ugyanazt, a reakcióerőhöz képest. A reakcióerőhöz képesti ábrázolás szerintem többet elmond a modell viselkedéséről, mint az elmozduláshoz képesti, ezért a továbbiakban így fogom ábrázolni a grafikonokat. Az erő szerinti ábrázolásból látszik, hogy ugyanaz a folyamat lezajlik a modellben is, mint a valóságban, csak magasabb teherszinten. Ezzel az ábrával például párba lehet állítani a GAGE3 ábráját (57. ábra). Mindkét ábrán jól látszik, hogy a középső, 4. km. osztály miatt a teherviselésből kieső lemezzakasz valóban kiesik a teherviselésből, ugyanekkor az él többletterhet kénytelen felvenni. Ez a jelenség a valóságban 180 kN környékén jelentkezik, a modellben pedig 210 kN környékén.



56. ábra: balra GAGE1 és B1 a függőleges elmozdulás szerint, jobbra az erő szerint

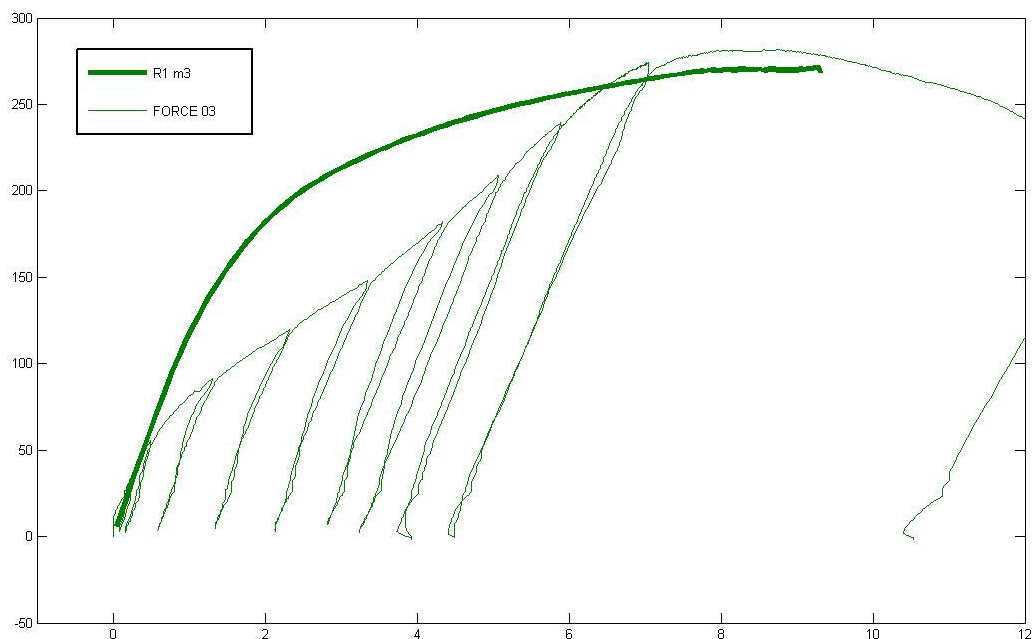


57. ábra: GAGE3 mérési pont, B3 adatsor az erőhöz képest.



58. ábra: V3 mérési pont vízszintes elmozdulásai az erőhöz képest

A verifikált modell imperfekcióinak átalakítása és a szögacél merevítő modellezése után a következő erő-elmozdulás diagramot kapjuk:



59. ábra: a módosított modell erő-elmozdulás ábrája a 03-as próbatest ábrájához képest.

A maximális teherbírás ebben az esetben a modell szerint 271,429 kN, a 03-as próbatest ezzel szemben 281,474 kN-nál ment tönkre. Az eltérés immár 3,7 %. Ahogy korábban már megjegyeztem, a szögacél merevítőnek nincs nagy jelentősége a teherbírás szempontjából, az imperfekcióknak annál több. Lehet, hogy a kalibráció alapjául szolgáló próbatest pont a tönkremenetel helyén volt a legvékonyabb, a 03-as ellenőrző próbatest pedig ott a legvastagabb. Lehet, hogy a 03-as próbatestet sokkal egyenesebben sikerült beállítani a terhelés előtt. Nem tudni, hogy pontosan mi okozza az eltérést.

A modell másodlagos jellemzői (bélyegadatok, elmozdulási adatok, a reakcióerőhöz képest nézve) jó egyezést mutatnak a valós viselkedéssel, úgy gondolom, hogy ezt a modellt tudom használni a későbbiekben megoldandó feladatokhoz. A gyártáskor kialakuló maradó feszültségek kezelése még megoldásra vár, bár a kérdés fontossága kétséges.

5. Konklúzió

Nekem mindig fontos volt, hogy tanuljak abból, amit csinálok. Ez a feladat minden szempontból nagyon tanulságos volt, mind modellépítési tapasztalatok, mind laboratóriumi munka terén. Még télen elindultam egy feltételezéssel, egy képpel az elem viselkedését illetően, ez a kép rengeteget formálódott, kiegészült új információkkal, sok fontos kérdésben a feltételezések helyét fokozatosan átvette az ismeret.

A közel 9 hónap alatt létrehoztam számos közelítő modellt a vizsgált szerkezeti elem viselkedésének megismerésére, elvégeztem négy kísérletet a Szerkezetvizsgáló Laboratóriumban, a kísérletekhez készítettem részletes héjelemes modellt és ezt verifikáltam a kísérletek adatsoraival. A modellen természetesen még van mit finomítani, figyelembe vehetném az acél felkeményedését és az élhajlítás munkafolyamata után maradó belső feszültségeket. Ehhez célszerű lenne megalkotni egy új modellt, az élhajlítás procedúrájának a vizsgálatára.

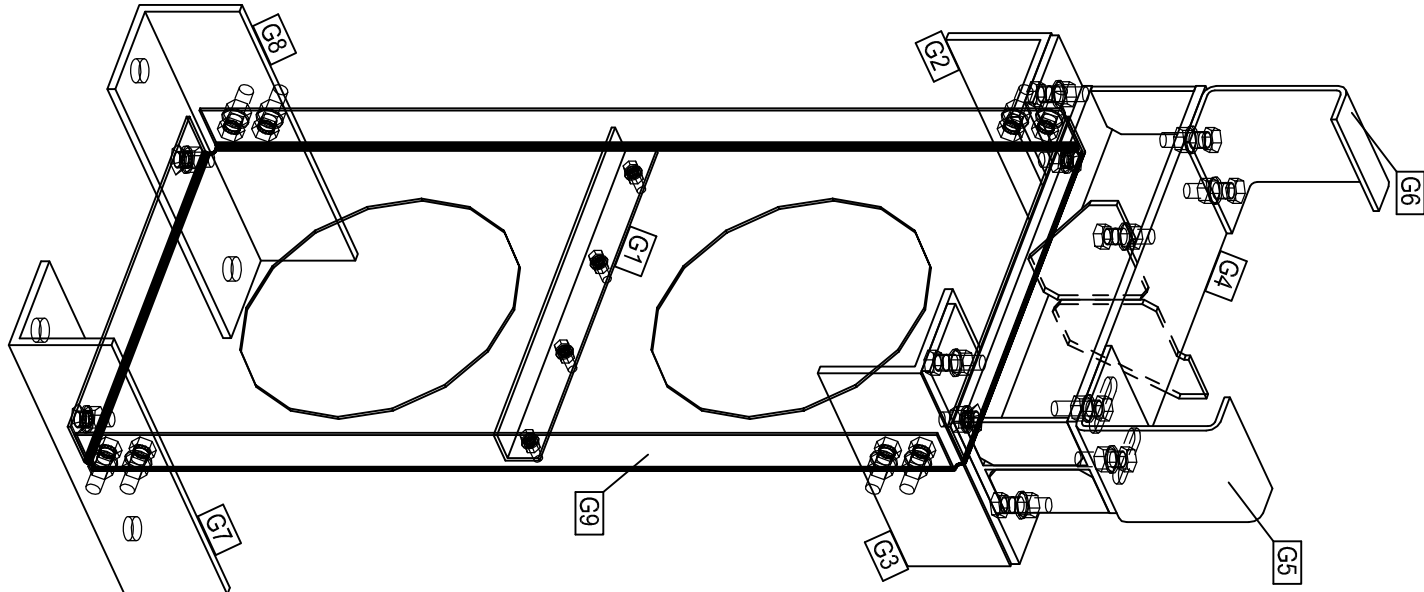
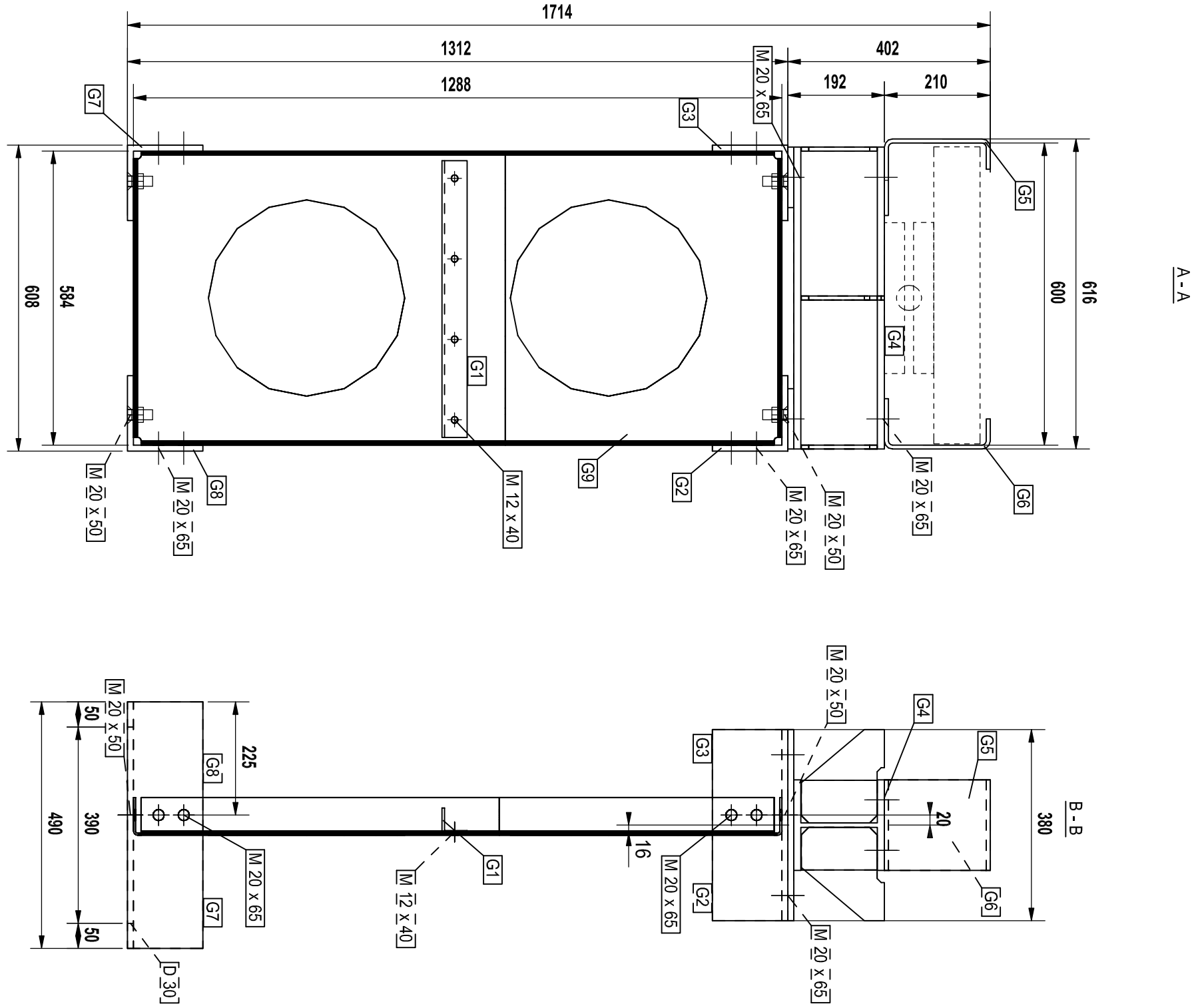
A verifikált modell a próbatest teherbírását jól közelíti, végeredményben visszaadja a tönkremenetelkori függőleges elmozdulást is. Tisztában vagyok vele, hogy vannak benne hiányosságok és közelítések, például a csavar megoldása és az a tény, hogy a merevségét verifikálásra használtam fel nem teszi alkalmassá a modellt arra, hogy más csavarátmérők szerkezeti teherbírásra gyakorolt hatását vizsgáljam.

Jelen vizsgálat nem foglalkozik a tartószerkezeti elemet érő különleges hatásokkal, például azzal, ahogy a heveder a görgőkön keresztül a saját merevsége és a szállított anyag súlya által hajlítja a nagy terhelésnél horpadó lemezrész, vagy a vízszintes terhelések (például szélhatás) hatásaival a nyomóerővel szembeni ellenállásra. Ezekkel mindenképpen foglalkozok a későbbiekben.

Szeretném továbbá azt is megvizsgálni, hogy a fent bemutatott kísérletek milyen formában használhatóak fel tényleges szerkezeti elemek méretezésére, a kapott teherbírás mekkora része vehető figyelembe szabvány szerinti tervezés során. Szeretnék kidolgozni egy méretezési eljárást a vizsgált elemekre. Ehhez valószínűségelméleti számítások szükségesek, ahhoz pedig egy leegyszerűsített modellt lenne célszerű megalkotni, amit gyorsan lehet futtatni, nem feltétlenül az Ansys program segítségével.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- (1) <http://www.ckit.co.za/secure/conveyor/papers/pipe/pipea.html>
- (2) <http://www.phoenix-conveyorbelts.com/>
- (3) http://blog.sina.com.cn/s/blog_4b6691e10101l0c3.html
- (4) <http://www.pipeconveyor.com/Papers/Applications/Applications.htm>
- (5) <http://www.phoenix-conveyorbelts.com/pages/press-themes/press/>
- (6) http://www.beumergroup.com/uploads/tx_bbbrochures/
- (7) <http://www.metso.com/miningandconstruction/>
- (8) A. Imai: Pipe Conveyor Development Benchmark and Future Trend
- (9) Dr. Iványi Miklós – Táblázatok Acélszerkezetek Méretezéséhez Az Eurocode 3 Szerint – 2004
- (10) Dr. Kiss Gy., Dr. Pálfi J., Dr. Tóth L. – Szerkezeti Anyagok Technológiája II. – 1994
- (11) William F. Hosford, Robert M. Caddell – Metal Forming Mechanics and Metallurgy – 2007
- (12) ANSYS Basic Analysis Guide – 2009
- (13) 3B Hungária KFT-nél szerzett munkatapasztalat 2012-2013



Gyátrmány lista			Összesen		17 db gyátrmány		Össztétel:		9,74 m ²		Össztömeg:		278,0 kg	
G1	2	Mérvítő	L50*5	550	G1-0	0,11	2	4						
G2	2	Sarokelem	L150*12	380	G2-0	0,22	10	20						
G3	2	Sarokelem	L150*12	380	G3-0	0,22	10	20						
G4	1	Gerenda	HEB180	600	G4-0	1,04	45	45						
G5	1	Rögzítőlemez	PL8*180	152	G5-0	0,15	4	4						
G6	1	Rögzítőlemez	PL8*180	100	G6-0	0,13	4	4						
G7	2	Sarokelem	L150*12	490	G7-0	0,29	13	26						
G8	2	Sarokelem	L150*12	490	G8-0	0,29	13	26						
G8	4	Nyomott rácsrúd	PL4*1425	721	G9-0	1,54	32	129						
Tétel	Darab	Megnevezés	Profil	Rajzszám	Szabványszám	Tétel	Tömeg/Darab	Össztömeg	Megjegyzés					

Csavar lista		
16	M20*65	DIN 931
4	M20*50	DIN 7991
4	M12*40	DIN 931
20	Anyag M20.0	DIN 934
4	Anyag M12.0	DIN 934
20	Alátét 20.0	DIN 125
4	Alátét 12.0	DIN 125
Darab	Méret	Szabványszám

Módosítások		Szabványszám:		Anyag:	
Tervező:	Gáspár László				
Rajzoló:					
Ellenőrző:					
Megjegyzések:		Méretek:			
Méretarány:	Dátum:	Felület:		Össztömeg:	
1:10	24.03.2014				

ELRENDEZÉSI RAJZ

Laborvizsgálat

A jelölés méretei: alak- és helyzetjelölések az ISO 2768-2 szerint.

A megjelölt szerkezetek jelölésén tüntetett az MSZ 12180-1 szerinti, ami teljesen meggyezik a DIN 8870 1. részével.

Rajzszám:

3Bhungária

ANYAGVIZSGÁLTATÁS ÉS ANYAGVIZSGÁLTATÁS RENDEZÉSEK

TERVEZÉS ÉS GYÁRTÁS

3B Hungária Kft.

H-8900 Zalaegerszeg

Wissacska Gyula u.13.

Tel.: +36 92/549-0033

Fax.: +36 92/549-021

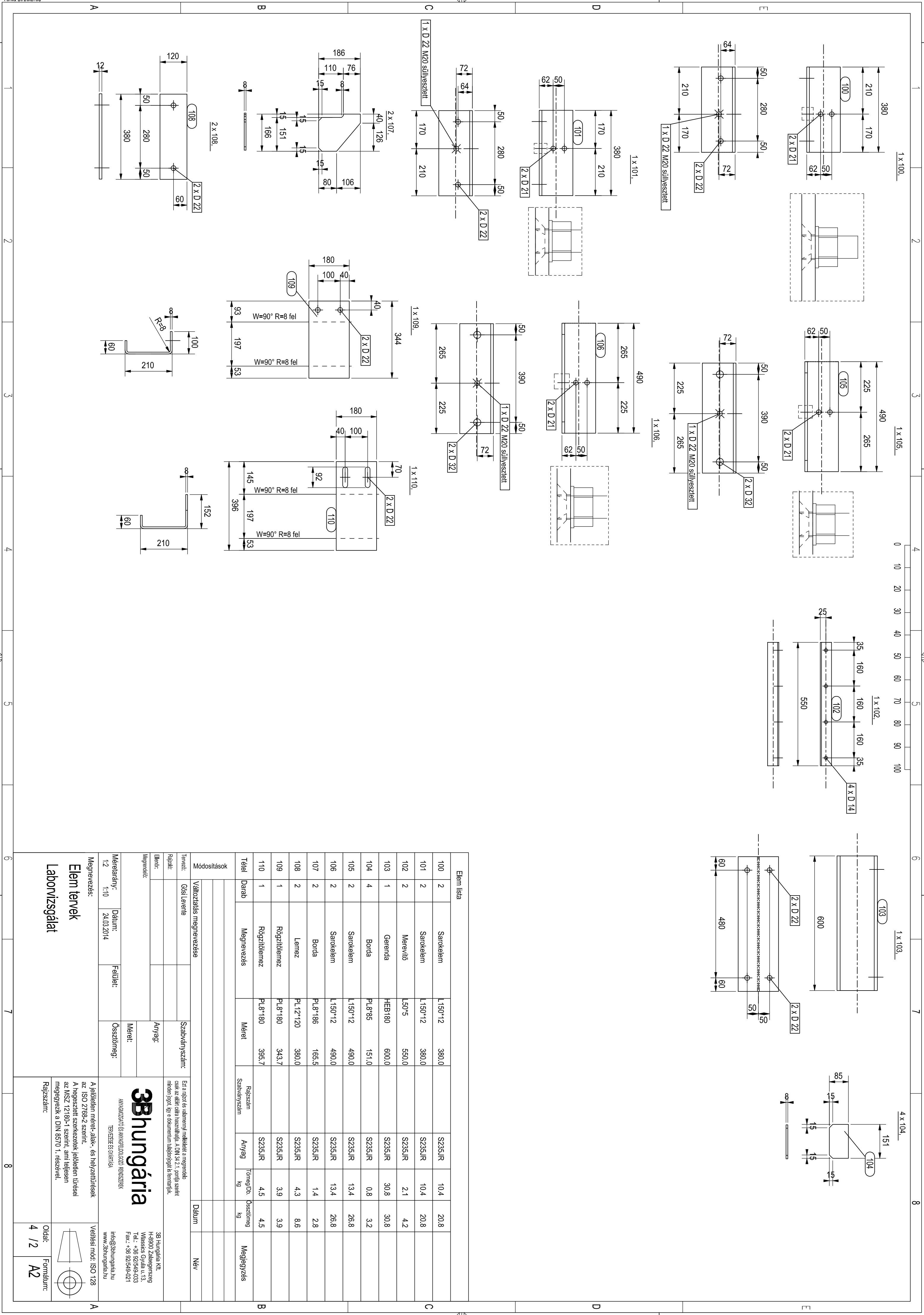
info@3bhungaria.hu

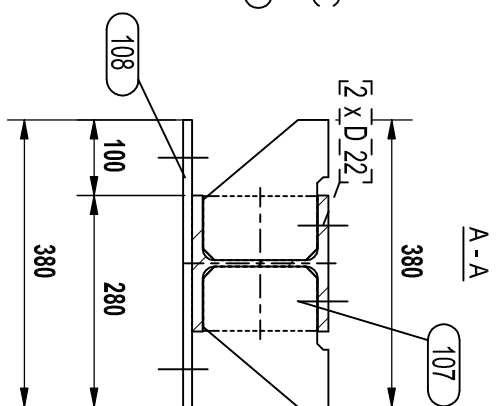
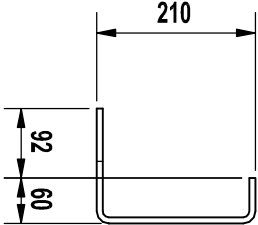
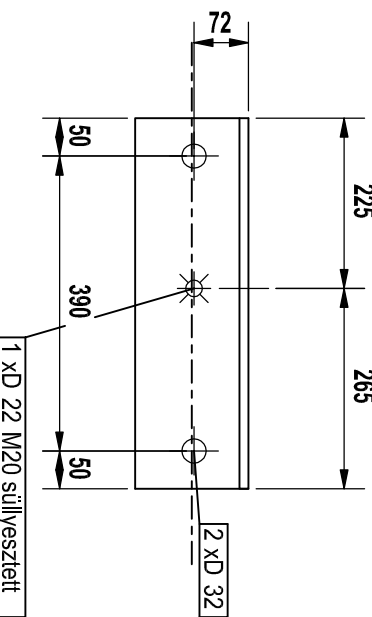
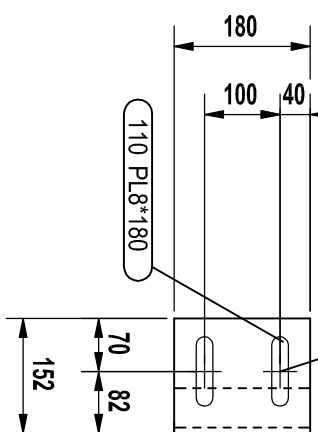
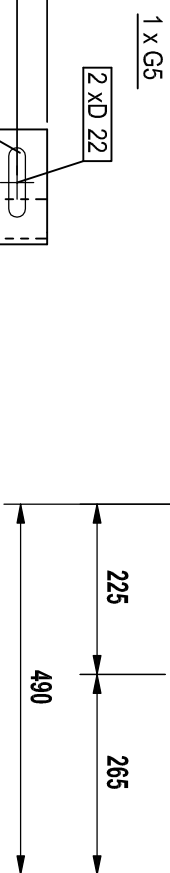
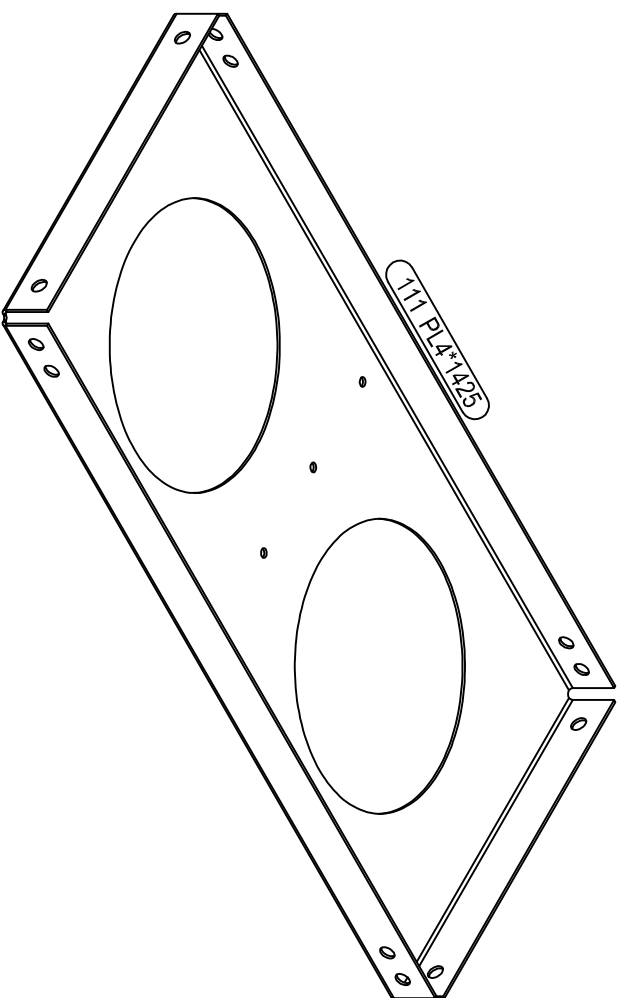
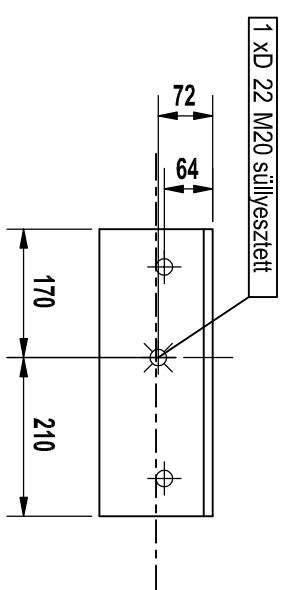
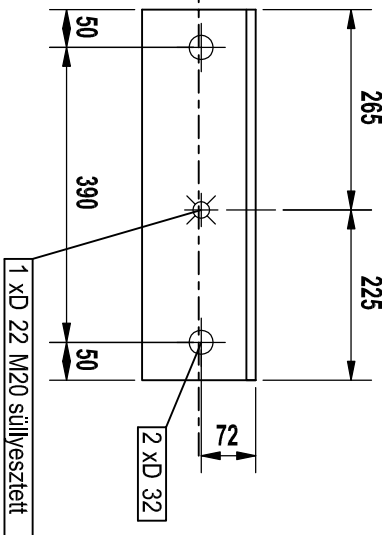
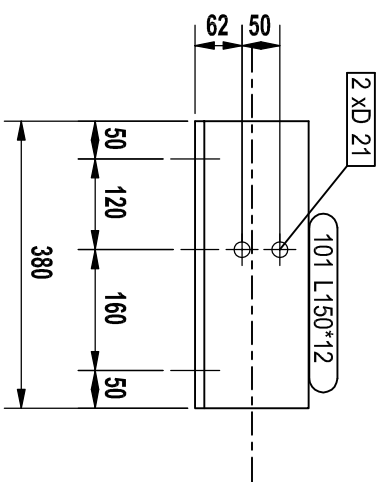
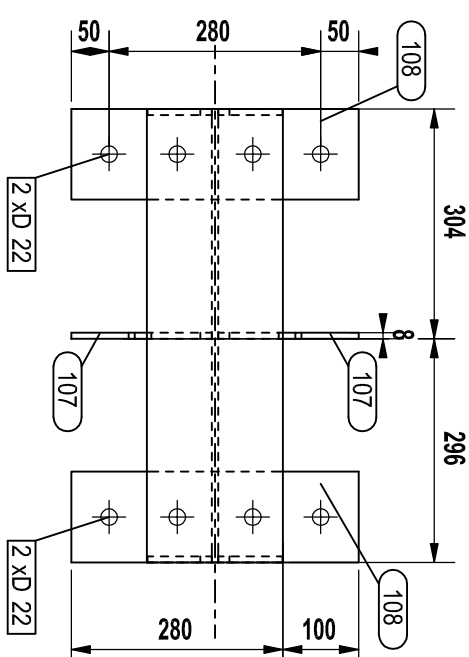
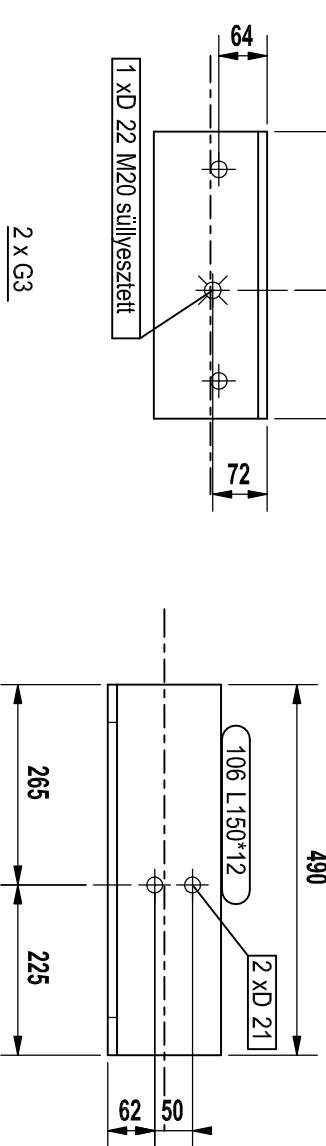
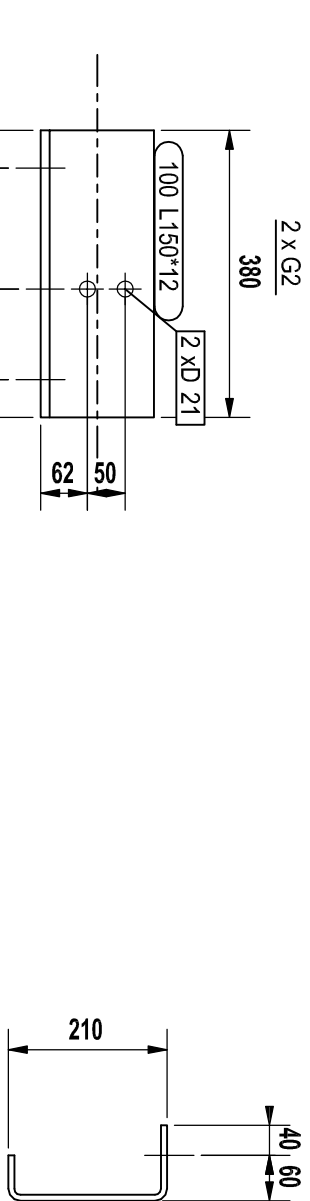
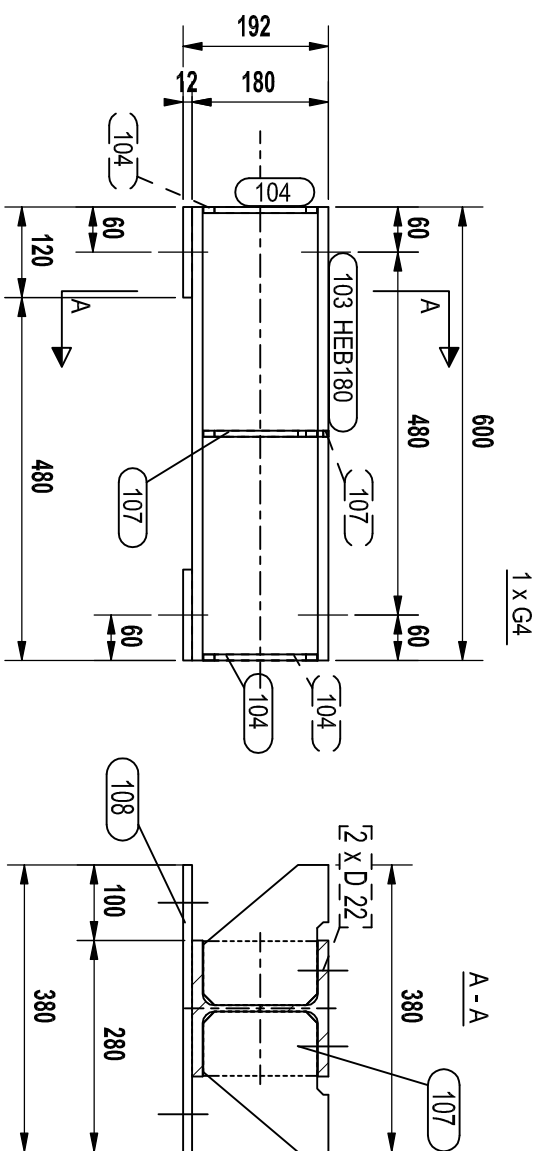
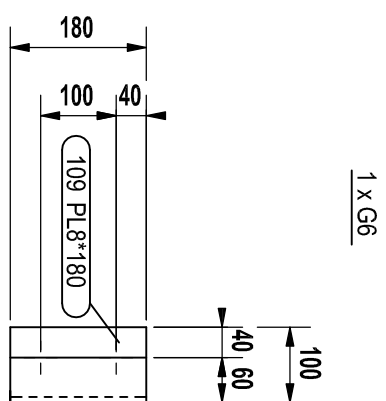
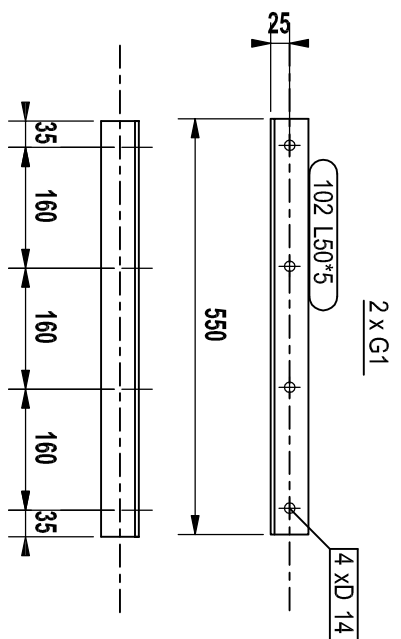
www.3bhungaria.hu

Verifikációs mód: ISO 128

Oldal: 4 / 1

Formátum: A2



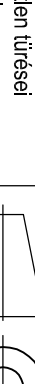


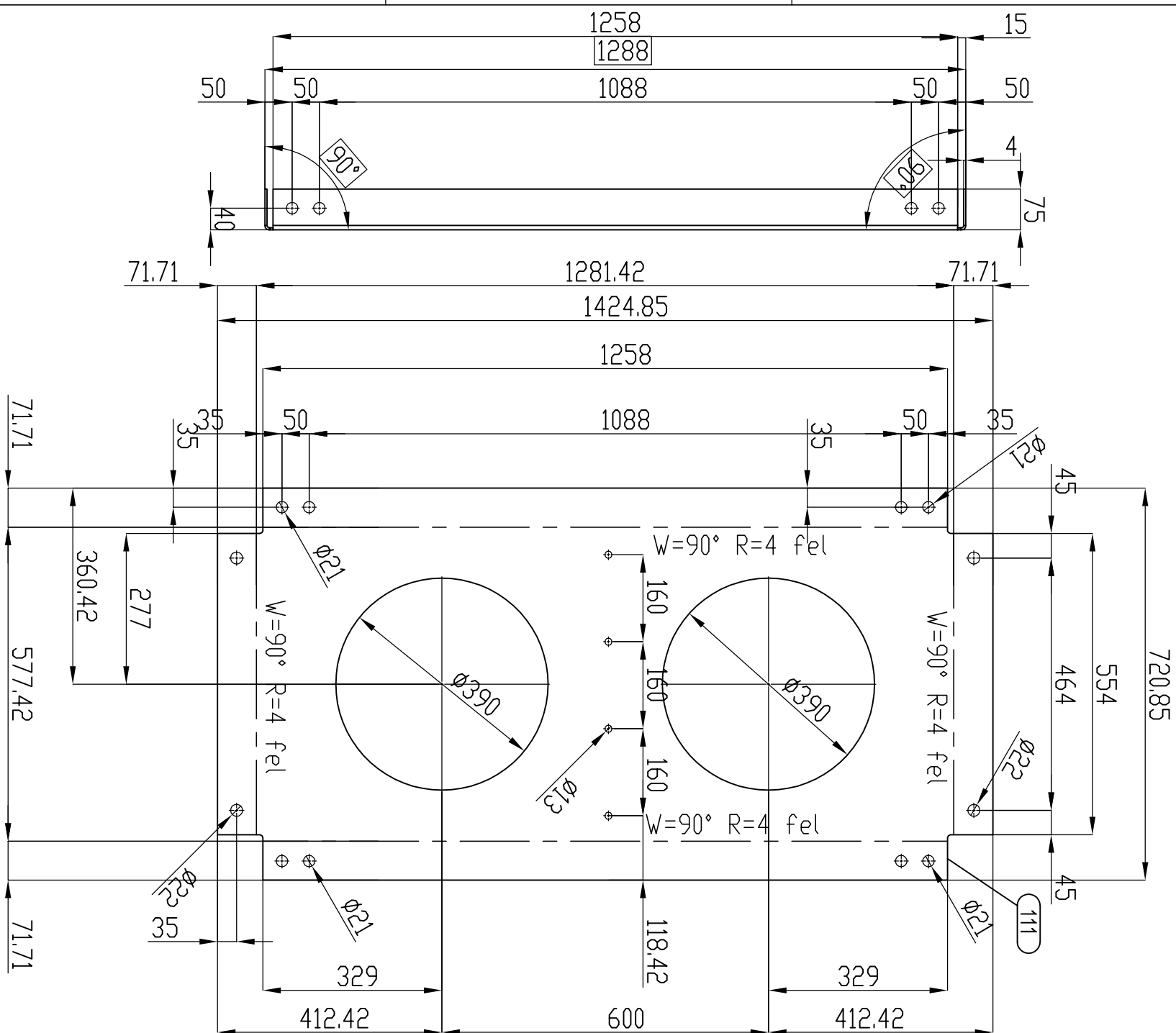
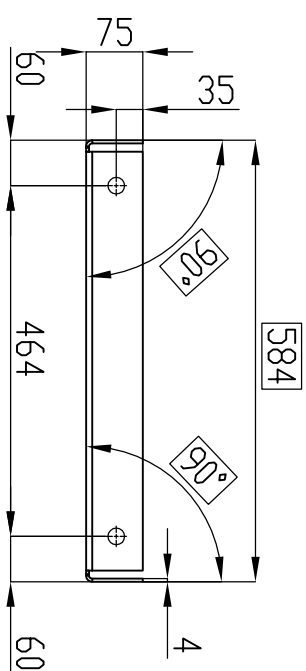
FW		BW		Symbol	Bezeichnung	Halsbreite (mm)	Fugenform	Winkel α (mm)	c	s
Eckstoss	T-stoss	Stumpfstoss								
				≡	Lehnt	48 ± 4		60 °	±	± 4
Kehlnaht	WVA-Kehlnaht m. Kehlnaht	Kehlnaht	V-A-Kehlnaht		Va-Kehlnaht	5-8		60 °	±	± 4
---	ab 8	bis 6	ab 10					60 °	2	± 4
								60 °	2	± 4
---	50 °	---	60 °					60 °	2	± 4
± 0,7	± 0,7	± 0,7	± 0,4					60 °	2	± 4

		FW		BW	
		T-stoß		Stumpfstoß	
Eckstoß					
Symbol	Bedeutung	Symbol	Bedeutung	Symbol	Bedeutung
	Doppelkehlant		Doppel-T-Kehlnaht		Doppel-V-Kehlnaht
—	—	ab 8	ab 6	ab 8	bis 6
—	—	50°	—	60°	—
—	—	2	—	2	—
an 0,5	an 0,5	an 0,5	an 0,5	an 0,5	an 0,5

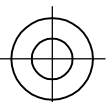
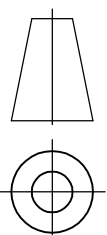
G1	2	Merevítő	L50*5	550	0.11	2	4	
G2	2	Sarokelem	L150*12	380	0.22	10	20	
G3	2	Sarokelem	L150*12	380	0.22	10	20	
G4	1	Gerenda	HEB180	600	1.04	45	45	
G5	1	Rögzítőlemez	PL8*180	152	0.15	4	4	
G6	1	Rögzítőlemez	PL8*180	100	0.13	4	4	
G7	2	Sarokelem	L150*12	490	0.29	13	26	
G8	2	Sarokelem	L150*12	490	0.29	13	26	
G9	4	Nyomott rácsrúd	PL4*1425	721	1.54	32	129	
Téfel	Darab	Megnevezés	Profil	Rögzítési Szabványszám	Térlet m ²	TömegDb. kg	Össztömeg kg	Megjegyzés

Módosítások					
Változtatás megnevezése			Dátum	Név	
Tervező:	Gósi Levente	Szabvány/szám:	Ezt a rajbot és szakmerőny mellékletek a megrendelő csak az adott célra használhatja. A DIN 94.2-1, pontja szerint minden rajbot, tipp e dokumentum változatjaitól is leírhatók.		
Rajzolók:					
Ellenőr:		Anyag:			
Megrendelő:		Méret:			
Méretarány:	Dátum: 24.03.2014	Felület:	ANNAQUOZSINÓ ÉS ANGYELDOLGÓZ REBŐCSEREK TÉNYEZÉS ÉS GYÁRTÁSA 3Bhungária 3B Hungaria Kft. H-8900 Zalaparkszög Wlassics Gyula u.13 Tel.: +36 92/549-033 Fax.: +36 92/549-021 info@3bhungaria.hu www.3bhungaria.hu		
1:10					

Megnevezés:		A jelöletlen méret-alk- és helyzetűtűrések az ISO 2768-2 szerint.		Vetítési mód: ISO 128	
Gyártmány tervek		A megasztelt szerkezetek jelöletlen tűrései az MSZ 12 180-1 szerint, ami teljesen megegyezik a DIN 8570 1. részével.			
Laborvizsgálat		Rajzszám:		Oldal: 4 / 4	
				Formátum: A2	

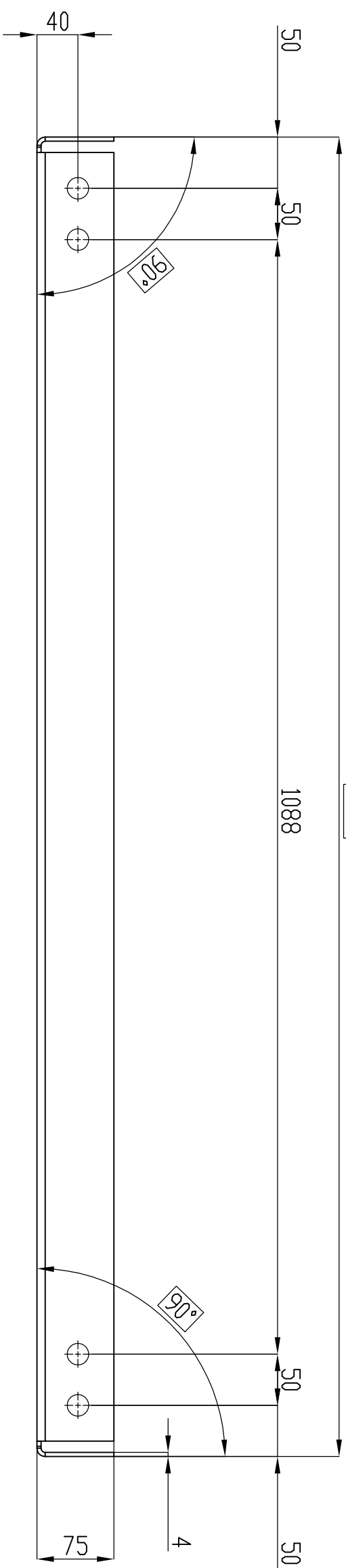


Elem lista										
111	4	Nyomott rácsrúd	PL*1425	721		Rajzszám	S235JR	32.3	129.0	
Tétel	Darab	Megnevezés	Méret			Szabványszám	Anyag	Tömeg/Db. kg	Össztömeg kg	Megjegyzés
Módosítások										
Változtatás megnevezése										
Tervező:	Gósi Levente		Szabványszám:							
Rajzoló:			Ezt a rajzot és valamennyi mellékletét a megrendelő csak az elbír célja használhatja. A DIN 34 2.1. pontja szerint minden jogot, így e dokumentum tulajdonjogát is fenntartjuk.							
Ellenőr:										
Megrendelő:										
			Anyag:		3Bhungária ANYAGMÉRŐ ÉS ANYAGFELMÉRŐ RENDSZEREK TERVEZÉSE ÉS GYÁRTÁSA 3B Hungária Kft. H-8900 Zalaegerszeg Wlassics Gyula u.13. Tel.: +36 92/549-033 Fax.: +36 92/549-021 info@3bhungaria.hu www.3bhungaria.hu					
		Méret:								
		Össztömeg:								
Méretarány:	1:10	Dátum:	24.03.2014	Felület:						
Megnevezés:										
Elem tervek						A jelölten méret-, alak-, és helyzetűtirések az ISO 2768-2 szerint. A hegesztett szerkezetek jelölten türései az MSZ 12180-1 szerint, ami teljesen megegyezik a DIN 8570 1. részével.				
Laborvizsgálat						Rajzszám:		Oldal:		Formátum:
								4 / 3		A3



A második mérés műszerezettsége

1288

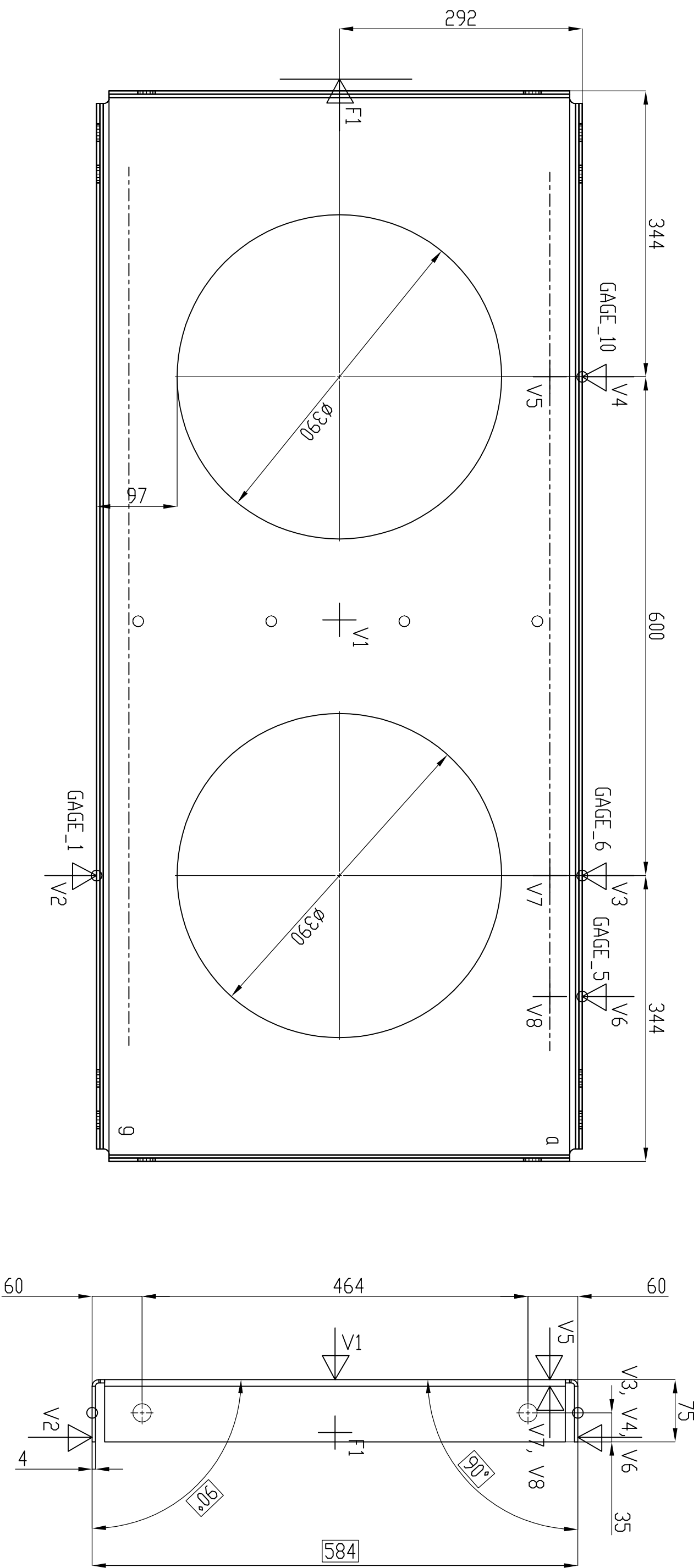


gáge = nyúlásmérő bélyeg

V = vízszintes elmozdulás mérése

H = függőleges elmozdulás mérése

-irány  +irány



gáge = nyúlásmérő bélyeg

esse

H = fuggőleges elmozdulás mértéke

