



**DEBRECENI EGYETEM
MŰSZAKI KAR
GÉPÉSZMÉRNÖKI TANSZÉK**

UNIVERSITY OF DEBRECEN
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL
ENGINEERING

**BÉFOGÓ SZERSZÁM
TERVEZÉSE ELASZTOMER
ANYAGOK TISZTA NYÍRÓ
TERHELÉSÉRE**

DIPLOMATERV

Nagy Norbert

Termeléstámogató specializáció

Debrecen

2026

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	V
1 Bevezető.....	1
2 Elastomerek viselkedésének vizsgálata.....	3
2.1 Alapvető jellemzői a guminak.....	4
2.2 Rugalmas anyagmodellek.....	4
2.2.1 Hiperelasztikus anyagmodell.....	5
2.2.2 Arruda-Boyce.....	5
2.2.3 Neo-Hooke.....	6
2.2.4 Saint Venant–Kirchhoff model.....	6
2.2.5 Ogden.....	6
2.2.6 Yeoh.....	7
2.2.7 Mooney-Rivlin.....	7
2.3 Hiperelasztikus anyagparaméterek illesztése.....	7
2.4 Tiszta nyírás bemutatása.....	8
2.5 Görbeillesztés.....	9
2.6 Treloar adatsor.....	10
2.7 Mérnöki vagy valós nyúlás és feszültség.....	11
2.8 Adathalmazra illesztett modellek.....	12
3 Funkció vizsgálat a befogóval szemben.....	16
3.1 A szerszám interfész vizsgálata.....	16
4 Szimuláció előkészítése.....	19
4.1 Próbatest geometria kialakítása.....	19
4.2 Hálózás.....	21
4.3 Háló konvergencia vizsgálat.....	23
4.4 Hálókonzvergálási mutató.....	24
4.5 Szimuláció.....	25
4.5.1 Peremfeltételek.....	26
4.6 Szimuláció eredménye.....	28

5	Próbatest befogási javaslatok	31
5.1	Ragasztott vagy vulkanizált megoldás	31
5.2	Hengeres befogás	31
5.3	Négyzetes befogás.....	32
5.4	Feltekert befogás	32
5.5	Szorítás.....	33
6	Befogással kapcsolatos számítások.....	35
7	Megfogó tervezése	37
7.1	Munkahenger kiválasztása	37
7.2	Konstrukció bemutatása	39
7.2.1	Befogó csap.....	39
7.2.2	Alaptest	40
7.2.3	Hátlap és a munkahenger	40
7.2.4	Megvezető szárok.....	42
7.2.5	Előlap	42
7.2.6	Készre szerelés	44
7.3	Súrlódási tényező növelésének lehetőségei	46
8	Konstrukció validálása	47
9	Összefoglalás.....	53
	Irodalomjegyzék.....	55

1 Bevezető

Az elasztomerek anyagok a modern ipar kiemelten fontos szerkezeti anyagai, amelyek mechanikai tulajdonságaiknak köszönhetően számos műszaki alkalmazásban megjelennek. Viselkedésük pontos leírása azonban egy összetett feladat, mivel a fémes anyagokhoz képest erősen nem-lineáris, időben függő és nagy alakváltozású deformációt mutatnak. A mérnöki tervezéshez és anyagparaméter meghatározáshoz elengedhetetlen egy olyan kísérleti elrendezés kialakítása, ami egy jól definiált terhelési állapotot hoz létre és ez az állapot megismételhető.

Diplomamunkám célja egy olyan befogó berendezés tervezése, amely elasztomerek tisztán nyíró igénybevétel melletti vizsgálatát teszi lehetővé. Tisztán nyíró igénybevétel létrehozása nehéz feladat, mivel a próbatest rögzítése, súrlódási viszonyok és a határfeltételek pontatlansága másodlagos feszültségkomponensek megjelenését okozhatja.

A Debreceni Egyetem Műszaki Karán eddig is sokszor vizsgáltak hiperelasztikus anyagokat. Eddig csak nyomó és húzó vizsgálatokat lehetett végezni, hiszen ahhoz állt rendelkezésre a gyári szerszám. Tiszta nyíró vizsgálatához azonban nem létezik a forgalomban vizsgáló szerszám, pedig fontos anyagparaméterek ismerhetünk meg egy-egy sikeres vizsgálat után.

A dolgozatomban tüzetesen meg fogom vizsgálni mik is azok az elasztomerek és hogyan lehet a viselkedésüket megfelelően modellezni. Feltárom a különböző anyagmodelleket és azok tulajdonságait, hogy későbbiekben sikeres szimulációt tudjak készíteni az Ansys segítségével

A fejlesztési folyamat részeként különböző befogási módokat kerülnek majd kialakításra és értékelésre a vevővel, jelenleg a Debreceni Egyetem Műszaki Karával közösen meghatározott és összeszedett követelmények mentén. Ennek megfelelően részletekbe menően fogom bemutatni a Instron 68TM10-es nyúlásmérő berendezés kapcsolódó felületeit, hiszen az első követelmény többek között az volt, hogy a jelenlegi géppel is kompatibilis legyen a megfogó. A különböző kialakítások összehasonlítása lehetővé teszi számomra az optimális befogás mód kiválasztását, amelyet később le is fogunk gyártatni. A tervezési

folyamatok támogatására végeelem szimulációk kerülnek alkalmazásra. A numerikus szimulációkat az Ansys szoftver segítségével fogom elvégezni.

A program használatában már korábban szereztem jártasságot amikor elvégeztem a Végeelem szimulációs szakmérnöki képzést itt a karon. A program lehetőséget biztosít a komplex anyagmodellek és a nagy deformációk figyelembevételére. A befogó geometria modellezéséhez az Autodesk Inventor program lesz segítségemre. Egyszerű, gyors és rugalmas eszközt biztosít a továbbiakban számomra a különböző szerszám változatok modellezésére. A dolgozatom végén az elkészült konstrukciót is végeelem vizsgálat alá fogom vonni.

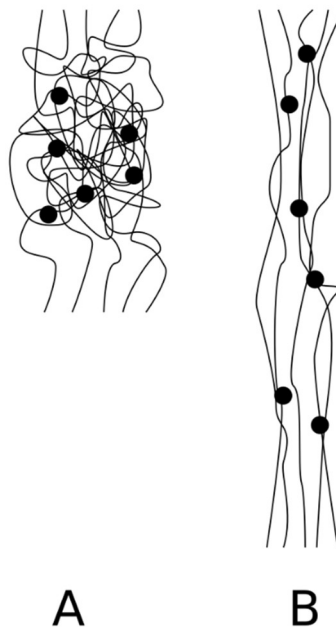
A diplomamunkám célja tehát nem csupán egy konkrét szerszám tervezése, hanem egy módszertan kidolgozása, amely segíti a hiperelasztikus anyagok tiszta nyíró vizsgálatának pontosabb megértését. Az elvégzett szimulációk és a tervezésből levont következtetések remélhetőleg hozzájárulnak a jövőbeli kísérleti vizsgálatok fejlesztéséhez, valamint az elasztomer anyagok viselkedésének mélyebb megértéséhez.

2 Elasztomerek viselkedésének vizsgálata

Ebben a fejezetben be szeretném mutatni, hogy mik is azok az elasztomerek és milyen tulajdonságokkal rendelkeznek. Bemutatom az egyik legismertebb elasztomert és a gumit a továbbiakban. Fontos megértenünk, hogy ezeknek az anyagoknak a szimulációja bonyolultabb egy sima acélhoz képest hiszen itt nem használható a Hooke törvény, hanem specializált anyagmodelleket kell használnunk, amelyek képesek lekövetni a nagy alakváltozást.

Az elasztomerek anyagok 1850 óta használatosak a gépészetben. Az elasztomer egy viszkoelasztikus polimer, tehát viszkozitással és rugalmassággal egyaránt rendelkezik. Gyenge molekulák közötti erő és alacsony Young modulus jellemzi [1].

Az teszi különleges mérnöki anyaggá az elasztomert, hogy nagyon alacsony Young modulust párosítanak egy körülbelül kétezerszer nagyobb térfogati modulussal és azzal a képességgel, hogy szakadás előtt több száz százalékkal képesek rugalmas deformációra. A nagy deformációk azért következhetnek be, mert a hosszú láncú molekulaszervezet egy hálózatot épít, amely a deformációra, nem a molekula lánc megnyúlásával, hanem annak újra konfigurálásával válaszol [1].



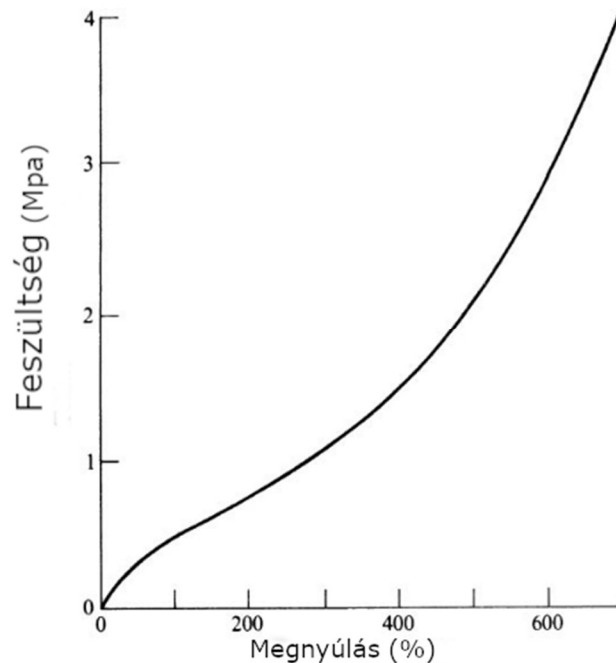
2.1 ábra Elasztomer molekulák átrendeződése húzás során

(A) alap állapot, (B) húzás során [2].

2.1 Alapvető jellemzői a guminak

A gumiként ismert anyag, pontosabban India gumi, a *Hevea Braziliensis* fából nyerték ki, latex formájában. A jelenleg is használt gumi kifejezést nem csak az természetes gumira használhatjuk, hanem válogatás nélkül bármely olyan anyagra, amelynek mechanikai tulajdonságai jelentősen hasonlítanak a természetes gumiéhoz [3].

A nyilvánvalóbb és egyben legfontosabb tulajdonsága a gumi szerű anyagoknak, hogy relatív kis terhelés esetén is képesek nagy mértékű deformációra. A természetes gumi nyújthatósága általában 500% és 1000% közé esik [3].



2.2 ábra Gumi terhelés-nyúlás diagramm [3].

A görbe jól megfigyelhető, hogy nem lineáris, ebből következik, hogy nem tudjuk a Hooke-törvényt felhasználni, ennek következtében, nem tudunk a Young modulushoz egy határozott értéket rendelni kivéve a kis kezdeti deformáció szakaszában.

2.2 Rugalmas anyagmodellek

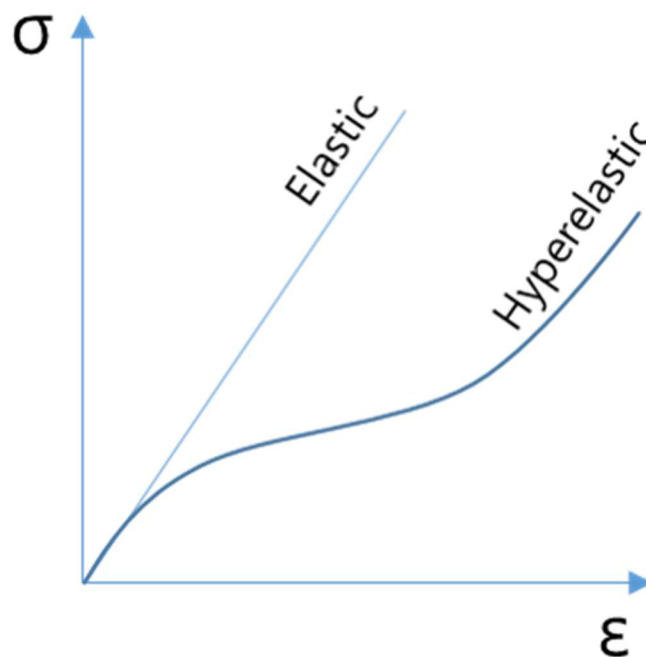
Rugalmas anyagmodellek azt írják le, hogy az anyag, hogyan deformálódik terhelés hatására, és hogyan tér vissza eredeti alakjára amikor a terhelést

megszűntetjük. Ezek a modellek az egyszerű lineáris elasztikus anyagmodellektől, ahol a terhelés arányos a deformációval, terjednek egészen a hiperelasztikus anyagmodellekig, amelyek a gumihoz hasonló anyagok nagy deformációt képesek leírni.

2.2.1 Hiperelasztikus anyagmodell

Viselkedését az egységnyi deformált anyagban tárolt energia írja le. Olyan anyagok esetén használjuk, amelyek nagy alakváltozásnak vannak kitéve, mint a gumiszerű anyagok [4].

A gumiszerű anyagokra szintén jellemző, hogy alakváltozás közben csak kis vagy teljesen elhanyagolható térfogatváltozás következik be, közel összenyomhatatlan az anyag [4].



2.3 ábra Hiperelasztikus és elasztikus görbék összehasonlítása a feszültség-nyúlás koordináta rendszerben[5]

2.2.2 Arruda-Boyce

A kontinuum mechanikában az Arruda-Boyce modell egy hiperelasztikus modell, amelyet gumi és más polimer anyagok mechanikai viselkedésének leírására használnak [6].

Ez a modell egy olyan anyag statisztikai mechanikáján alapul, amelynek egy köbös reprezentatív térfogateleme nyolc láncot tartalmaz átlós irányok mentén. Az anyagot összenyomhatatlannak kell feltételezni [6].

Többségben polimerek vizsgálatára használjuk, ahol definiálnunk kell egy nyúlási korlátot, általában 300%-os nyúlásig alkalmazható. Végtelen nyúlási korlát esetén a Neo-Hooke modellel megegyező értéket fog adni [4].

2.2.3 Neo-Hooke

Ez az általánosan használt modellek közül a legegyszerűbb és legelterjedtebb. Az anyag állapotát a deformációs energiapotenciál írja le, amiből a feszültség állapot levezethető [7]. Ha az anyagot összenyomhatatlannak feltételezzük akkor az alakváltozási energia sűrűség függvényével lehet a modellt leírni.

$$W = \frac{\mu}{2} (\bar{I}_1 - 3) \quad (2.1)$$

A Neo-Hooke modell nagy alakváltozású deformációnál nem túl pontos. Mégis sokszor használják végeelem szimulációk során. Egyszerű használni mivel csak két bemeneti paramétere van, és ha az anyagot összenyomhatatlannak tekintjük akkor csak egyre lesz szükségünk, ami a kezdeti nyírási modulus. Mivel csak egy adat szükséges, így nem kell sok vizsgálatot lefuttatnunk [8].

2.2.4 Saint Venant–Kirchhoff model

A legegyszerűbb hiperelasztikus anyagmodell, amely a lineárisan rugalmas viselkedést terjeszti ki a nagy elfordulások tartományára miközben kis alakváltozásokat feltételez [4].

2.2.5 Ogden

Az Ogden anyagmodell Raymond William Ogden 1972-ben fejlesztett ki, hiperelasztikus anyagok, mint gumik, polimerek vagy biológia szövetek nemlineáris feszültség-nyúlás viselkedésének leírására [9].

Az Ogden modell, más hasonló hiperelasztikus anyagmodellekhez képest azt feltételezi, hogy az anyag viselkedése nyúlási-energiasűrűség függvényével írható le, amelyből a feszültség-nyúlás összefüggések levezethetőek. Az Ogden egy olyan fenomenológiai anyagmodell, amely a főnyúlások segítségével írja le az energiafüggvényt, ami azt eredményezi, hogy pontosabban írja le az alakváltozásokat akár 700%-ig [4].

2.2.6 Yeoh

A Yeoh modellt szokták redukált polinomiális rendszernek is nevezni, hiszen csak az első alakváltozási invariánsra alapul. Majdnem összenyomhatatlan nemlineárisan viselkedő rugalmas anyagoknál használatos [4].

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{30}(\bar{I}_1 - 3)^3 \quad (2.3)$$

A 2.3-as képletben, az \bar{I}_1 az első skalár invariáns a C_{10} ; C_{20} ; C_{30} pedig az anyagi állandók [10].

2.2.7 Mooney-Rivlin

A Mooney-Rivlin modellek népszerűek a nem összenyomható anyagok, mint a gumi, nagy alakváltozása, nemlineáris viselkedésének modellezésénél. Fontos tisztázni, hogy a modell nem nyújt különösebb betekintést az anyag viselkedésébe, csupán különböző polinomok görbeillesztései a mérési adatokra [11].

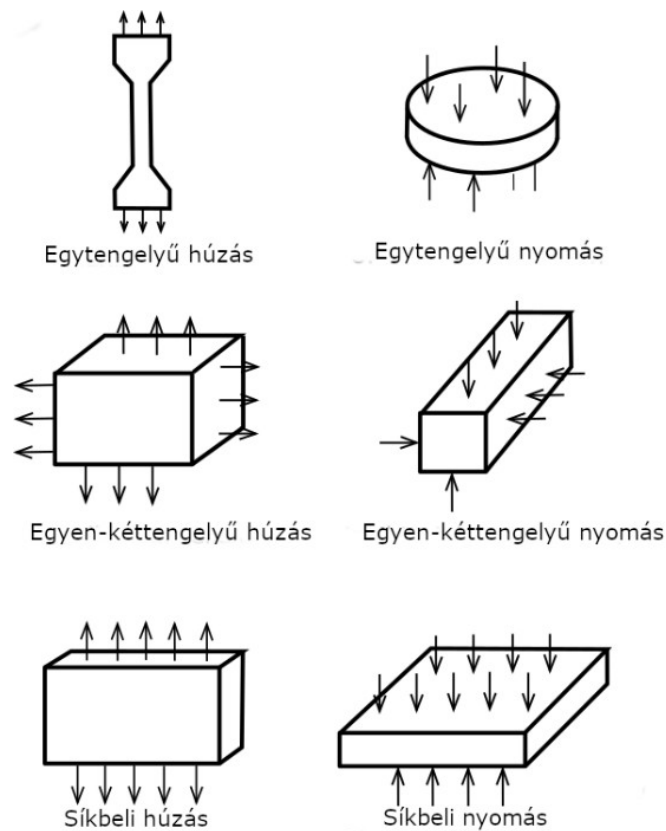
2.3 Hiperelasztikus anyagparaméterek illesztése

Az anyagmodell a terhelés és a rá adott válasz közötti matematikai kapcsolatot írja le, ehhez viszont szükség van helyesen megadott anyagparaméterekre, amelyekkel hűen tudja tükrözni a valóságos anyagi viselkedést. Ezek a paraméterek azonban függhetnek a környezet tulajdonságaitól, mint a hőmérséklet vagy az idő [4].

Az anyagmodellek meghatározásához használhatunk mikroszintű vizsgálatot (mikromechanikai modell) vagy makromechanikai vizsgálatot (fenomenológia modell) [4].

Mechanikai anyagmodell létrehozásához az alábbi vizsgálatokból származó adatokat használhatjuk fel:

- Egytengelyű húzás/nyomás
- Egyen-kéttengelyű (Equibiaxial) húzás/nyomás
- Egyszerű nyírás
- Tiszta nyírás
- Nyíró modulus
- Térfogati modulus
- Poisson-tényező [4]

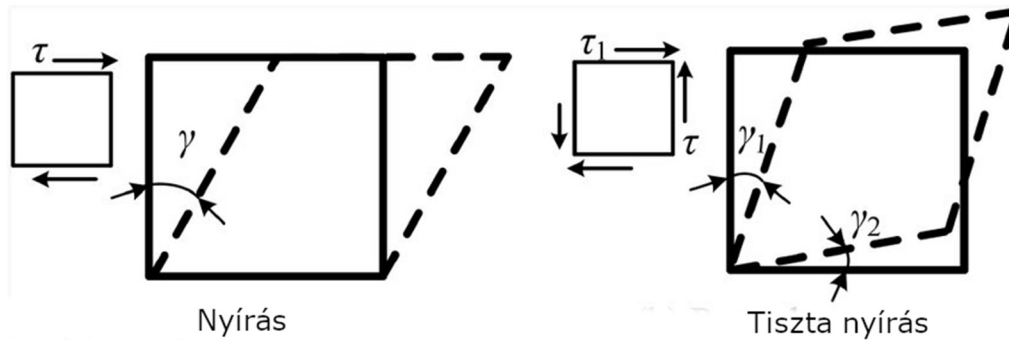


2.4 ábra Különböző terhelési állapotot okozó anyagvizsgálatok és az alkalmazott próbatestek [12]

2.4 Tiszta nyírás bemutatása

Mechanikában és geológiában a tiszta nyírás egy test háromdimenziós, homogén lapítása [13]. Ez egy rotációmentes alakváltozás, amely során a test egy irányba megnyúlik, amíg erre merőlegesen rövidül. Gumi esetén vagy hasonló hiperelasztikus anyagoknál gyakran használják ezt a féle vizsgálatot anyagi jellemzők meghatározására [14].

A tiszta nyírás abban különbözik az egyszerű nyírástól, hogy a tiszta nyírás nem jár a merev test forgásával [15].



2.11 ábra Nyírás és tiszta nyírás különbsége [16]

A tiszta nyíró vizsgálat a szakítóvizsgálat egy speciális esete, ahol a próbatest hosszúsága nagyságrendekkel nagyobb, mint szélessége, így megakadályozva azt, hogy az elasztomer próbadarab hosszabb oldalának irányába összehúzódjon [17].

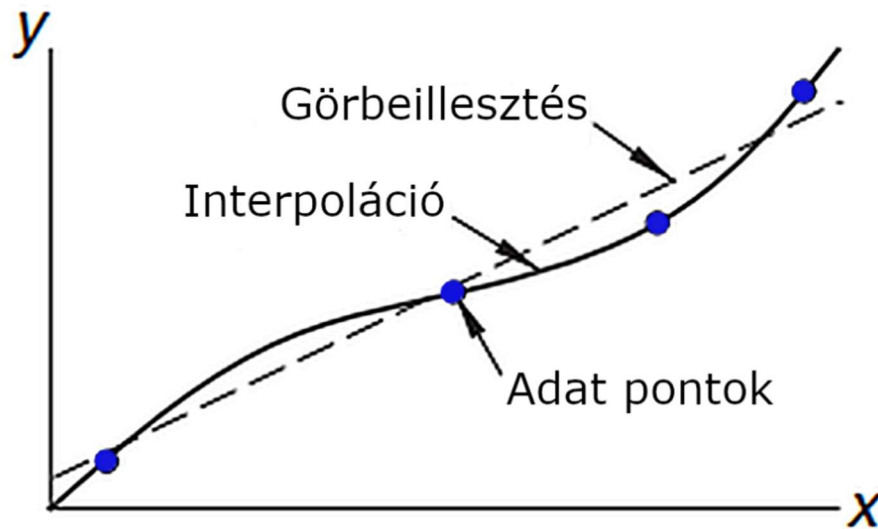
2.5 Görbeillesztés

A *curve fitting* azaz a görbeillesztés egy olyan matematika függvény vagy görbe létrehozásának a folyamata, amely a legjobb illeszkedik egy adatsorhoz. A folyamat magába foglalja az interpolációt, ahol az adatokhoz való pontos illeszkedés szükséges, vagy a simítást, ahol egy „sima” függvényt konstruál, amely megközelítőleg illeszkedik az adatokhoz.

A legpontosabb illeszkedést az adatsorra legtöbbször a legkisebb négyzetek módszerével valósítják meg, hogy az adatoktól való eltérés minimális legyen [18].

A görbeillesztést olyan adatokra használjuk, amelyek valamilyen szórást vagy zajt tartalmaznak, amik a mérési hibáknak köszönhető [19].

Diszkrét adatsorok gyakran szerepelnek műszaki számításokban. Az adatok forrása lehet kísérleti megfigyelés vagy éppen numerikus számítás. Fontos különbséget tenni az interpoláció és a görbeillesztés között. Az interpoláció során egy görbét rajzolunk az adatpontokon keresztül és ennek során implicit módon feltételezzük, hogy az adatpontok pontosak és elkülönültek [19].



2.5 ábra Interpoláció és a görbeillesztés különbsége [19].

2.6 Treloar adatsor

A Treloar adatsor hiperelasztikus anyagokkal kapcsolatos kutatások egyik leggyakrabban hivatkozott kísérleti adatainak halmaza. Az adatsort L.R.G. Treloar készítette 1943-ban és vulkanizált gumi vizsgálatainak adatai szerepelnek benne [20].

A legfőbb sajátossága az adatsornak az, hogy nagy nyúlási tartományt tár fel, ami rendkívül alkalmassá teszi nemlineáris, nagydeformáció lekövetésére alkalmas anyagmodellek tanulmányozására. Fontossága ennek az adatsornak megkérdőjelezhetetlen hiszen, a gumianyagok mechanikai válasza erősen nem lineáris, így olyan anyagmodellek mint a Neo-Hooke, Mooney-Rivlin paramétereit ezen megbízhatóan lehet illeszteni. Ezenfelül sok kutatásban előkerül ez az adatsor mint egy referencia, sokan használják így az anyagmodellek összehasonlíthatóak.

2.1 táblázat Treloar gumi adatsor [21].

Egytengelyű húzás		Kéttengelyű húzás		Síkbeli nyírás	
Mérsőki feszültség [MPa]	Mérsőki nyúlás [-]	Mérsőki feszültség [MPa]	Mérsőki nyúlás [-]	Mérsőki feszültség [MPa]	Mérsőki nyúlás [-]
0	0	0	0	0	0
0,11856	0,14778	0,02154	0,09218	0,02508	0,06629
0,22981	0,23537	0,06521	0,15424	0,10184	0,16491
0,35287	0,3171	0,11705	0,23623	0,18318	0,24824
0,57527	0,41275	0,14171	0,25298	0,29055	0,335
0,82603	0,49784	0,20187	0,32622	0,41959	0,42686
1,15247	0,6004	0,29766	0,43002	0,83457	0,58525
1,41741	0,68196	0,44027	0,51224	1,35377	0,75221
1,99461	0,8661	0,68717	0,649	1,92931	0,93112
2,57183	1,06544	0,95336	0,77124	2,43104	1,10317
3,01189	1,24856	1,49137	0,96215	2,88929	1,27518
3,75483	1,6056	2,03474	1,23163	3,31263	1,45566
4,32044	1,97103	2,43814	1,44891	3,64068	1,61227
4,74887	2,3062	2,76462	1,70846	3,94254	1,77565
5,13008	2,70808	3,03347	1,9475		
5,41191	3,04926	3,26662	2,19821		
5,6134	3,43731	3,44766	2,40548		
5,84795	3,79023				
6,02103	4,14791				
6,14917	4,49628				
6,26552	4,87506				
6,3606	5,25622				
6,44856	5,62217				
6,59373	6,34827				

2.7 Mérsőki vagy valós nyúlás és feszültség

Mind a két módszer az anyag deformációját írja le, de más megközelítéssel. A mérsőki nyúlás egy egyszerűbb megközelítése a problémának, ott ugyanis a próbatest hosszának a megváltozását az eredeti méretekhez viszonyítjuk [22].

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.2)$$

A valós nyúlás esetén azonban ez egy kicsit bonyolultabb, ugyanis ott a változást a mindenkor aktuális hosszhoz viszonyítjuk [22].

$$\varepsilon_v = \ln \left(1 + \frac{\Delta L}{L} \right) \quad (2.3)$$

A 2.4 képletben jól látszik a valódi és a mérnöki nyúlás közti összefüggés.




$$\varepsilon_v = \ln (1 + \varepsilon_m) \quad (2.4)$$

Az Ansys szoftvernél hiperelasztikus anyagok szimulációjához, mérnöki nyúlás és feszültség értékeket kell megadnunk. Ezzel szemben azonban végeredményként valósi nyúlási értékeket és feszültséget kapunk. Ezért van az, hogy a bevitt adatsoron szereplő nyúlás értékek eltérnek a szimuláció végén kapott értékektől [23].




2.8 Adathalmazra illesztett modellek

A Treloar adathalmazhoz már tudtam hiperelasztikus anyagmodelleket illeszteni. Az adatsorban három oszlop található, egy szimpla húzás, kéttengelyű húzás és tiszta nyírás. Ehhez a három adathoz magabiztosan lehetett modellt illeszteni.

Az Ansys szoftver beépített Curve-fitting parancsát használtam. Első lépésként az adatokat be kellett illesztenem a megfelelő táblázatba. A *Hyperelastic Experimental Data* fülön kiválasztottam a *Uniaxial Test Data*, a *Biaxial Test Data* és a *Shear Test Data* táblázatokat.

Table of Properties Row 2: Uniaxial Test Data					
	A		B	C	
1	Temperature (C) 		1	Strain (mm mm ⁻¹) 	Stress (MPa) 
2	20		2	0	0
*			3	0,11856	0,14778
			4	0,22981	0,23537
			5	0,35287	0,3171
			6	0,57527	0,41275
			7	0,82603	0,49784
			8	1,1525	0,6004
			9	1,4174	0,68196
			10	1,9946	0,8661
			11	2,5718	1,0654
			12	3,0119	1,2486
			13	3,7548	1,6056
			14	4,3204	1,971
			15	4,7489	2,3062
			16	5,1301	2,7081
			17	5,4119	3,0493
			18	5,6134	3,4373
			19	5,848	3,7902
			20	6,021	4,1479
			21	6,1492	4,4963
			22	6,2655	4,8751
			23	6,3606	5,2562
			24	6,4486	5,6222
			25	6,5937	6,3483
			*		

2.6 ábra Egytengelyű húzás eredményei beillesztve

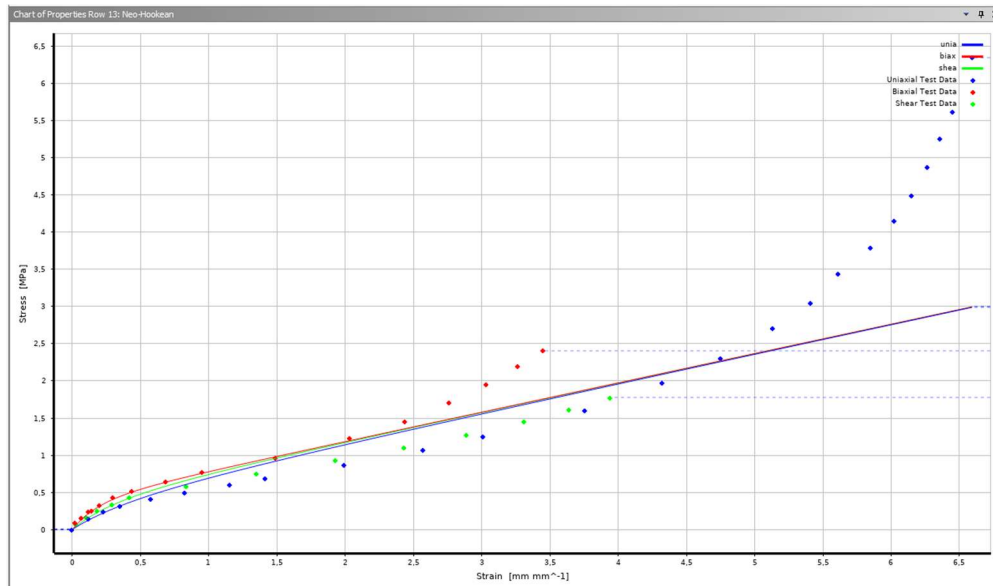
Table of Properties Row 5: Biaxial Test Data					
	A		B	C	
1	Temperature (C) 		1	Strain (mm mm ⁻¹) 	Stress (MPa) 
2	20		2	0	0
*			3	0,02154	0,09218
			4	0,06521	0,15424
			5	0,11705	0,23623
			6	0,14171	0,25298
			7	0,20187	0,32622
			8	0,29766	0,43002
			9	0,44027	0,51224
			10	0,68717	0,649
			11	0,95336	0,77124
			12	1,4914	0,96215
			13	2,0347	1,2316
			14	2,4381	1,4489
			15	2,7646	1,7085
			16	3,0335	1,9475
			17	3,2666	2,1982
			18	3,4477	2,4055
			*		

2.7 ábra Egyen-kéttengelyű húzás eredményei beillesztve

Table of Properties Row 9: Shear Test Data				
	A	B	C	
1	Temperature (C) $\frac{\text{C}}{\text{C}}$	1	Strain (mm mm ⁻¹) $\frac{\text{mm}}{\text{mm}}$	Stress (MPa) $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
2	20	2	0	0
*		3	0,02508	0,06629
		4	0,10184	0,16491
		5	0,18318	0,24824
		6	0,29055	0,335
		7	0,41959	0,42686
		8	0,83457	0,58525
		9	1,3538	0,75221
		10	1,9293	0,93112
		11	2,431	1,1032
		12	2,8893	1,2752
		13	3,3126	1,4557
		14	3,6407	1,6123
		15	3,9425	1,7757
		*		

2.8 ábra Nyírási adatok beillesztve

Az alábbi adatok alapján több anyagmodellre is illesztettem görbét. Ezek közül az első a Neo-Hooke hiszen az egyik legismertebb és legegyszerűbb. Jól látható, hogy a modell csak a kezdeti megnyúlást tudja helyesen lekövetni, vagy erősen eltér az adatsortól.



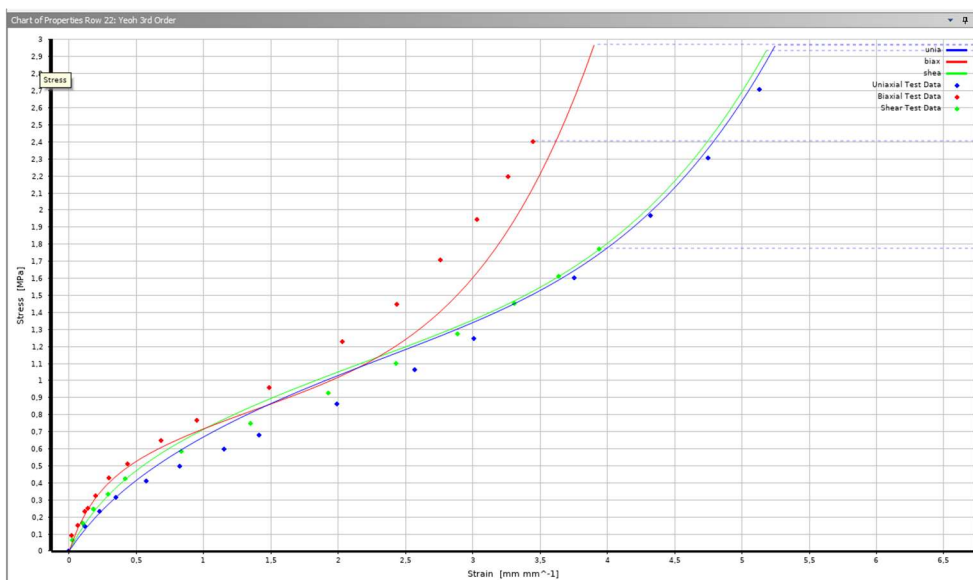
2.9 ábra A mérési eredményekre illesztett Neo-Hooke modell

2.10 ábra A görbeillesztésből megkapott Neo-Hooke anyagi állandók

Neo-Hooke anyagi állandók	Érték
Kezdeti nyírómodulusz	0,39081 [MPa]
Összenyomhatatlansági paraméter D1	0 [1/MPa]

Ezek után illesztettem egy olyan modellre, amely jobban képes lekövetni az adatsort. Ez a Yeoh 3rd, harmadrendű modell volt.

A Yeoh modell 1 helyett 3 paramétert tartalmaz, több szabadságfokkal rendelkezik így szélesebb alakváltozási tartományt képes lekövetni.



2.10 ábra Mérési eredmények a Yeoh harmadrendű modellre illesztve

Az anyagmodell illesztése után megkaptam azt a 3 anyagi állandót, amik segítségével felírható a harmadfokú polinomiális képlet az első skalár invariánsal [10].

2.2 táblázat Yeoh modellt leíró anyagparaméterek az görbe illesztésből

Yeoh anyagi állandók	Érték
C10	0,19878 [MPa]
C20	-0,0020085 [MPa]
C30	0,000046808 [MPa]
Összenyomhatatlansági paraméter D1	0 [1/MPa]
Összenyomhatatlansági paraméter D2	0 [1/MPa]
Összenyomhatatlansági paraméter D3	0 [1/MPa]

3 Funkció vizsgálat a befogóval szemben

A sikeres vizsgálat egyik legfontosabb része a befogó szerszám, amely megfelelő módon megtartja a próbatestet. A legfőbb feladata, hogy megakadályozza a próbatest elfordulását vagy valamelyik irányba való elcsúszását, ezzel biztosítva azt, hogy valóban csak nyírófeszültség alakul ki. A mérés jellegéből adódik, hogy nem akarunk káros elhajlásokat vagy nem egysíkú terhelést, amivel összetett igénybevételek ébrednének a próbatesten.

Mivel egy gumi próbatestet vizsgálunk, így egyértelmű, hogy húzás hatására vastagság irányú kontrakció fog fellépni. Ezt is le kell követnie a befogónak és úgy, hogy ne csípje össze a próbatest ezzel esetleg elrontani a mérési eredményeket, és a csökkenő anyagvastagság ellenére is állandó szorítást biztosítson.

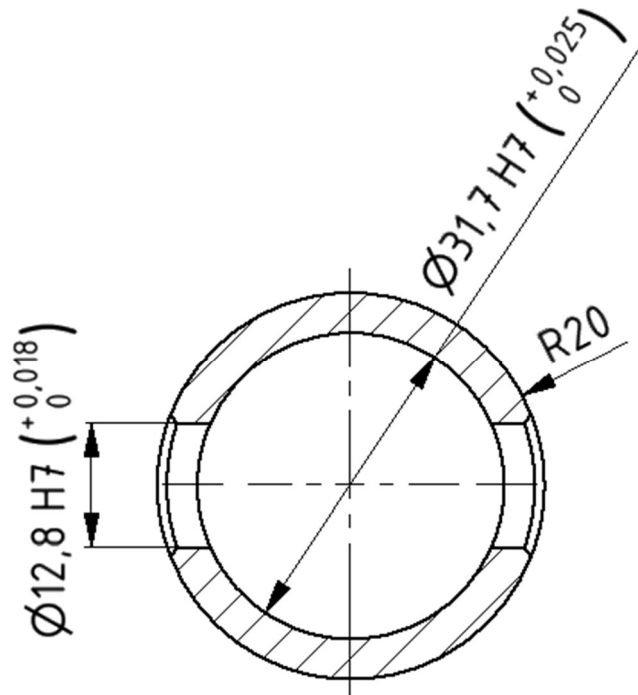
Ha ezek a paraméterek mind teljesülnek, akkor lesz a mérésünk megbízható és reprodukálható.

Befogóval szembeni követelmények:

- Homogén erőeloszlás biztosítása
- Csúszásmentes befogás
- Különböző méretű próbatest vizsgálatához is megfelelő legyen
- Kompatibilis legyen INSTRON 68TM-10 géppel
- Biztonságosan viselje el a fellépő erőket

3.1 A szerszám interfész vizsgálata

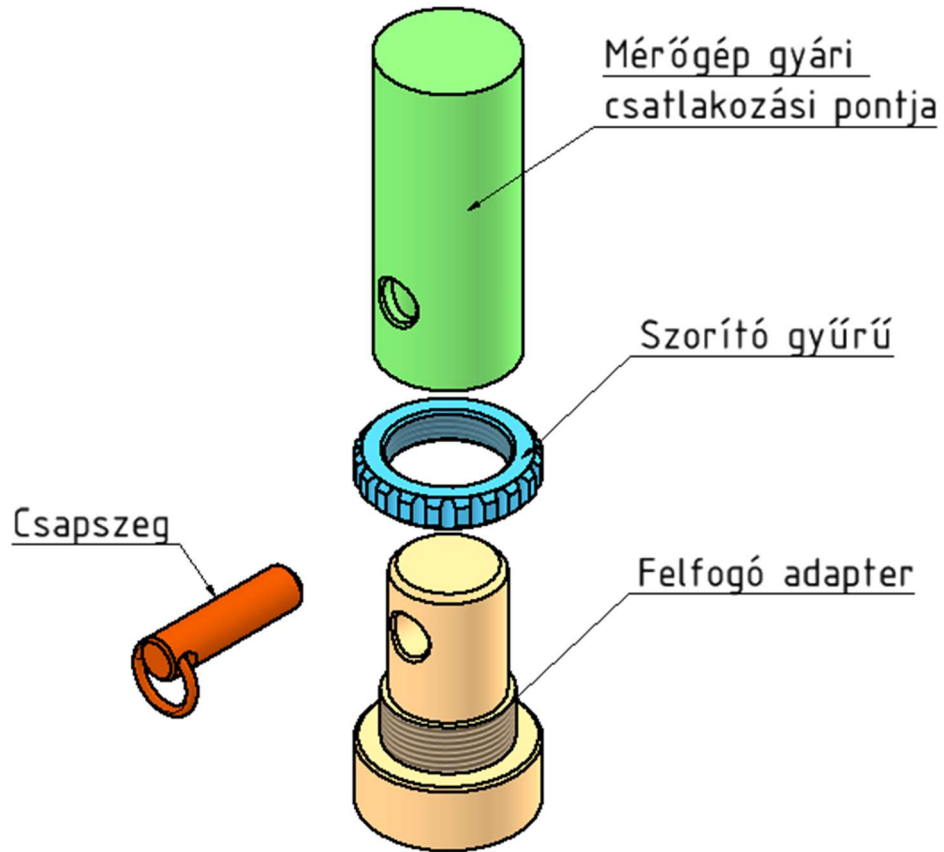
Ha bármilyen berendezést, szerszámot vagy gépet tervezünk első lépésként érdemes megvizsgálni, hogy az adott eszköz hova fog beépülni, és hogyan fog csatlakozni esetlegesen más gépekhez. Én is így kezdtem neki a tervezésnek. Szerencsére a gép csatlakozó pontját korábbi tanulmányaim során már felmértem és ez látható a 7.1-es ábrán.



3.1 ábra Csatlakozási felület az Instron 68TM-10-es mérőgépen

A géphez alaptól járt egy kalibráló tábla felfogó eszköz, amelyet jobban megvizsgálva rájöttem, hogy annak a rögzítési mechanikáját én is fel tudnám használni ennél a kapcsoló felületnél. El is készítettem hozzá az alkatrészek modelljét és összeállítását, amely látható a 3.2-es ábrán.

A zölddel jelölt alkatrész a gép csatlakozó pontja, ebbe helyezük bele a narancsszínű felfogó adaptert. A két alkatrészt össze pozicionálva be tudjuk illeszteni a piros csapszeget majd a kék szorító gyűrűvel elő lehet feszíteni a kapcsolatot. Ezek után az elmozdulás minden irányba meg van kötve.



3.2 ábra Géptesthez rögzítésre szolgáló mechanika vázlata

Ezzel a megfogással könnyen és gyorsan tudjuk a berendezést le vagy felszerelni a gépre megismételhető módon.

4 Szimuláció előkészítése

A következő lépésben elkezdtem felépíteni a szimulációt. Minden egyes szimulációnak az alapja a helyes peremfeltételek megállapítása ugyanis ezek lesznek azok a paraméterek, amelyek a szimulációnk eredményeit hitelessé fogják tenni.

4.1 Próbatest geometria kialakítása

A méréseket egy Instron 68TM-10 mérőgépen fogom végezni, ami fel van szerelve egy AVE 2 optikai nyúlásmérő kamerával. Mivel ez a berendezés érhető el a karon így a szimulációt is ehhez kellett hangoljam, hogy az eredményeket később össze tudjam hasonlítani.



4.1 ábra Instron 68TM-10 egytengelyű anyagvizsgáló gép [24]

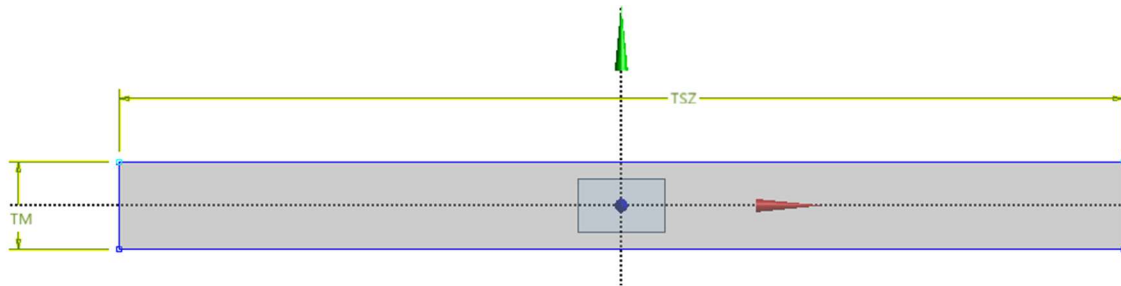
Az ilyen optikai nyúlásmérő berendezéseknek az egyik főbb jellemzője a látószög. Az elérhető nyúlásmérőnek a lencse fókusztávolsága 16 [mm] és ez alapján van a látószög is meghatározva. Ez az én esetemben függőleges irányban 240 [mm] amíg kereszt irányban 33 [mm] [25].



4.2 ábra Instron AVE2 optikai biaxiális nyúlásmérő [26]

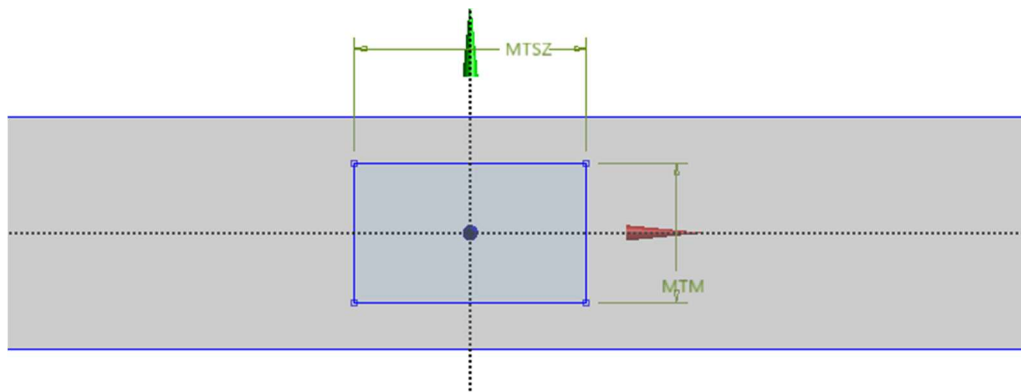
A másik kritérium, amit figyelembe kell venni az maga a próbatest méretei és elérhetősége. Az elérhető CEAST stancoló kivágó képes az ISO 37 Type 1-es próbatest kivágására, éppen ezért ennek a típusnak a méretei alapul hiszen a legtöbb esetben az alapanyag gyártók ehhez a mérethez készítenek olyan szalagot, amiből ki lehet vágni a próbatestet. A szabvány a minimum hossz méretet 115 [mm]-ben határozza meg. Az anyag vastagsága pedig 2 [mm] [27].

Ezeknek a paramétereknek a figyelembevételével elkészítettem a próbatestet és a vizsgált terület modelljét az Ansys DesingModeler segítségével



4.1 ábra A szimulációhoz használt teljes próbatest parametrizált méretei

Az ábrán 2 darab téglalap látható. A szürke reprezentálja a kivágott gumilapot amíg a kék a mért területet. A teljes terület két méret határozza meg. A szélessége az az elérhető gumiszalag szélességén alapul, ami 115 [mm], ezen nem is érdemes a továbbiakban sem változtatni. A magassága ennél egy kicsit komplikáltabb. Az AVE 2 optikai nyúlásmérő berendezés minimum jeltávja 6 [mm] éppen ezért számoltam rá, 2-2 [mm]-t oldalanként megfogásnak, így lett a kiinduló legkisebb magasság 10 [mm].



4.2 ábra A mért terület parametrizált vázlata

A mért terület méreteit a látószög határozza meg. A mért terület szélessége „MTSZ” paraméterrel van eljelölve és a kiinduló értéke 10 [mm]. A mért területe magassága „MTM” a minimum jeltávval összhangban 6 [mm].

4.2 Hálózás

A szimulációm erősen nem lineáris tulajdonságai miatt, el kellett végezzek pár beállítást az a hálózás előtt. Az első, hogy a *Physics Preference-t Nonlinear Mechanical*-ra az az nem lineáris mechanikus típusra állítottam. Ezt követően a

Element Order-t állítottam *Linear*-ra az az lineárisra. Ezzel meghatároztam a globális hálózasi beállítást.

Lineáris elemrend esetén, a szoftver nem generál középső csomópontokat a hálózás során [28].

Miután az Ansys az általunk megadott lokális és globális paraméterek segítségével létrehozza a hálót azt nekünk ellenőrizni is szükséges. Kezdeti elemméretnek én 0,5 [mm]-t választottam meg. Így vastagság mentén 4 db elem található.

Az ellenőrzéshez két darab mutató használtam, az egyik az Element Quality a másik pedig a Skewness. Mind a két minőségi szám 0 és 1 között vesz fel értéket ezzel reprezentálva azt, hogy a legenerált hálónk mennyire közelít az elméleti tökéleteshez.

Az Element Quality 1 értéke azt jelöli, hogy a háló egy eleme tökéletes kocka, amíg, ha ez 0 akkor annak ez elemnek 0 a térfogata vagy negatív térfogata van.

8.1 táblázat Elem minőség a hálózott testen

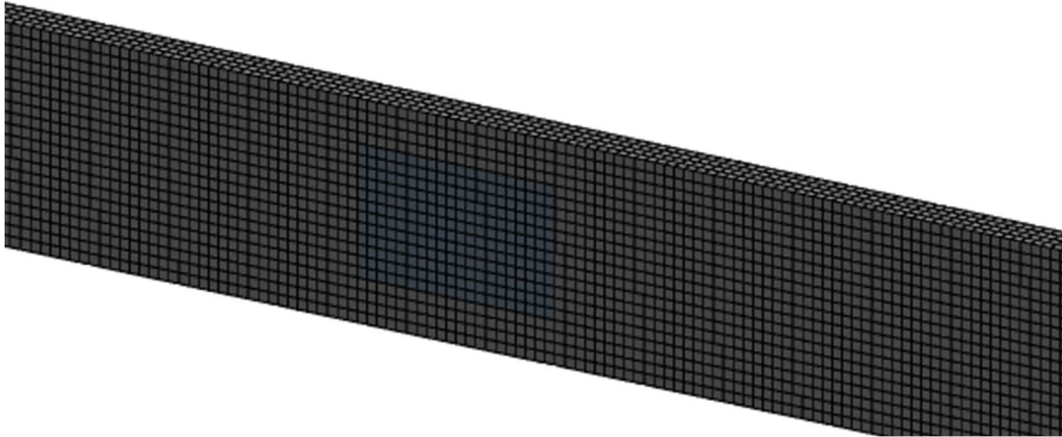
Mesh Metric	Element Quality
Min	1
Max	1
Average	1
Standard Deviation	1,01E-07

A Skewness mutató meghatározza, hogy az legenerált elem mennyire közelít az ideális egyenlő oldalú vagy egyenlőszögű elemhez vagy felülethez.

8.2 táblázat Skewness értéke a hálózott testen

Mesh Metric	Skewness
Min	1,31E-10
Max	7,13E-04
Average	9,52E-07
Standard Deviation	2,20E-05

Ezek alapján a testen elkészített háló, megfelelő lesz a szimuláció lefuttatásához.



4.3 ábra Elkészített háló

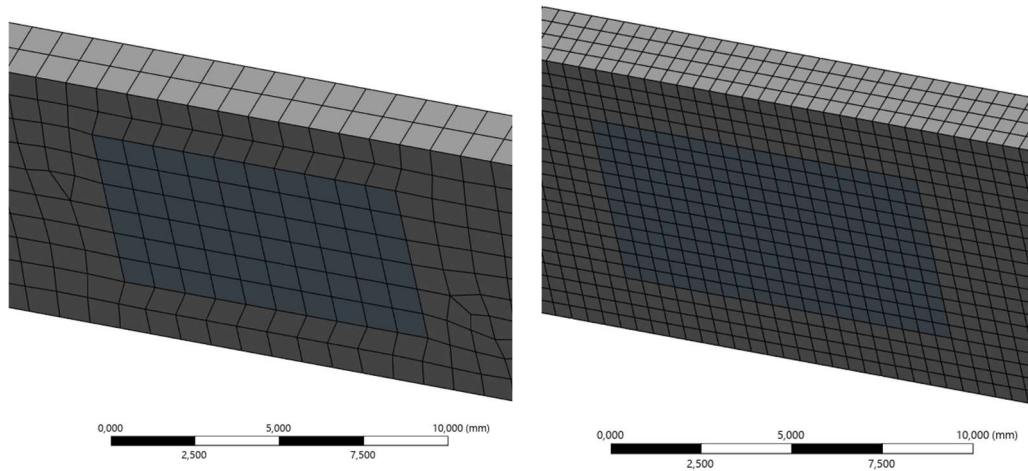
4.3 Háló konvergencia vizsgálat

A GCI (Grid Convergence Index) egy olyan folyamat, amely során megbizonyosodunk arról, hogy ha a háló elemek méretét módosítjuk, ezzel eloszlásukat akkor az eredmény független lesz ezektől a változásoktól [29].

A vizsgálatot úgy érdemes elvégezni, hogy ha már sikerült egy látszólag helyes hálózást létrehozni akkor körülbelül az elemek méretét egy nagyságrenddel kisebbre majd nagyobbra vesszük és így is lefuttatjuk a vizsgálatot. Azt várjuk el a rendszertől, hogy a változtatások ellenére se változzanak meg az eredmények, vagy ha változnak is akkor minimális mértékben.

A GCI legtöbbször áramlástan szimulációknál volt használatos azonban egyre több területen nyújtanak hasznos segítséget. Ahogy a szimulációk során finomítjuk a hálót, a diszkretizációs hibákban térben és időben is aszimptotikusan a nullához kell közelítenie [30].

Ki kell választanunk egy vizsgálat paraméter, amelyre majd a számítás el tudjuk végezni, ez az én esetemben az „X” és „Y” irányban való nyúlás a mért tartományban.



4.4 ábra Vizsgált hálók

A 4.4 ábrán jól látható a háló sűrítésének folyamata, ahol egyre kisebb elemeket használtam. Az elemek mérete 1 [mm] és 0,25 [mm] között változtak. A végleges szimulációhoz a középső 0.5 [mm]-es hálót használtam.

4.4 Hálókonzvergálási mutató

A három hálózás során kapott X irányú elmozdulások maximumát vettem alapul a számításomhoz. Ezek alapján tudtam először kiszámolni a relatív eltérések értékét [31].

Amelyek a durva hálózás esetén 0,021538 amíg a finomabb hálónál 0,019357.

4.1 táblázat Vizsgált értékek különböző hálósűrűségek esetén

	Szimulációs értéke		
	X min	X max	X ave.
Fine (Finom)	-1,5292E-03	-4,2708E-04	-1,0351E-03
Medium (Közepes)	-1,5264E-03	-4,3551E-04	-1,0244E-03
Coarse (Durva)	-1,4944E-03	-4,4489E-04	-1,0125E-03

$$F_{durva} = \left| \frac{-0,00044489 - (-0,00043551)}{-0,00043551} \right| = 0,021538 \quad (4.1)$$

$$F_{finom} = \left| \frac{-0,00042708 - (-0,00043551)}{-0,00043551} \right| = 0,019357 \quad (4.2)$$

Ez után ki tudtam számolni a konvergálási indexet [31]. A konvergálási index 0,15405 lett pontosan.

$$p = \left| \frac{\ln \left(\frac{-0,00042708 - (-0,00043551)}{-0,00043551 - (-0,00044489)} \right)}{\ln(2)} \right| = 0,15405 \quad (4.3)$$

Ezek után már csak a konvergálási mutatót (továbbiakban: *GCI*) kellett kiszámítanom. A képletben lévő 1,25-ös szorzó egy biztonsági tényező. Akkor lesz megfelelő a szimulációnk, ha a finomabb vagy másképpen sűrűbb hálózathoz tartozó *GCI* érték kisebb, mint a durva hálózathoz számolt érték. Az én esetemben ez igaz, így kijelenthetem, hogy a szimulációm a hálózástól független, a háló sűrítése nem fok nagyságrendi eltérést okozni a szimuláció során.

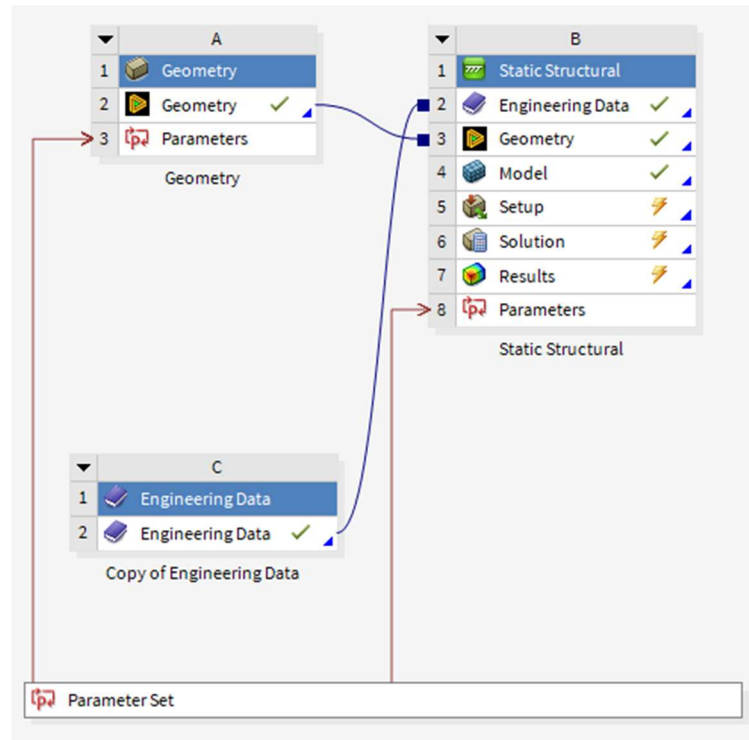
$$GCI_{finom} = \left| \frac{0,019357 * 1,25}{2^{0,15405} - 1} \right| = 0,21472 \quad (4.4)$$

$$GCI_{durva} = \left| \frac{0,021538 * 1,25}{2^{0,15405} - 1} \right| = 0,23891 \quad (4.5)$$

4.5 Szimuláció

Az Ansys számos lehetőséget ad arra, hogy kiválasszuk a megfelelő vizsgálati környezetet. Az én esetemben mivel hiperelasztikus anyagmodellekkel dolgozok így a Static Structural (Statikus Szerkezeti) környezetet választottam. Ez a vizsgálati módszer bizonyos határokon belül tökéletes az ilyen anyagmodellek vizsgálatára. A modellemben lassú a deformáció és nincs időbeni függés, nem viszkoelasztikus az anyagom.

A Static Structural meghatározza az elmozdulásokat, feszültségeket, nyúlásokat vagy az erőket a vizsgált alkatrészben vagy szerkezetekben, amelyet olyan terhelések okoznak, amelyek nem eredményeznek jelentős tehetetlenségi vagy csillapítási hatásokat. Állandó terhelési és válaszfeltételeket feltételez [32].



4.5 ábra Szimuláció felépítése Ansys-on belül

A 4.5 ábrán látható ahogyan felépítettem a szimulációt. Először is a Component Systemen belül található Geometry modul használtam, amiben felépítettem a 3D-s modellem, amin a szimulációt le fogom futtatni.

Ezt követően a 3D-s modelletem felhasználva felépítettem a szimulációs környezetet. Utoljára pedig beillesztettem az anyagmodelletem tartalmazó *Engineering Data*-t.

4.5.1 Peremfeltételek

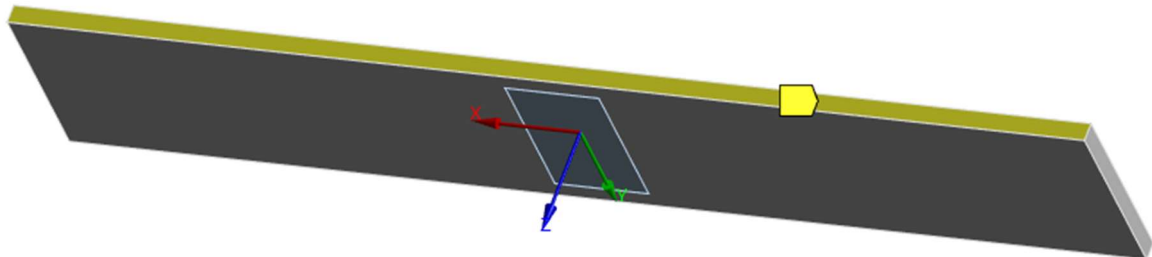
A peremfeltételek meghatározásánál figyelembe kell venni, hogyan fog az vizsgált alkatrész elmozdulni. Én 3 darab *Displacement* típusú kényszerrel definiáltam az a lehetséges elmozdulásokat.

Az elsővel kényszer megakadályozza, hogy a próbatest alsó síkja X, illetve Y irányban elmozduljon, de a Z irányú elmozdulást nem köti meg.

B: Static Structural

Displacement
Time: 1, s
2026. 05. 05. 21:08:53

Displacement
Components: 0,,0,,Free mm



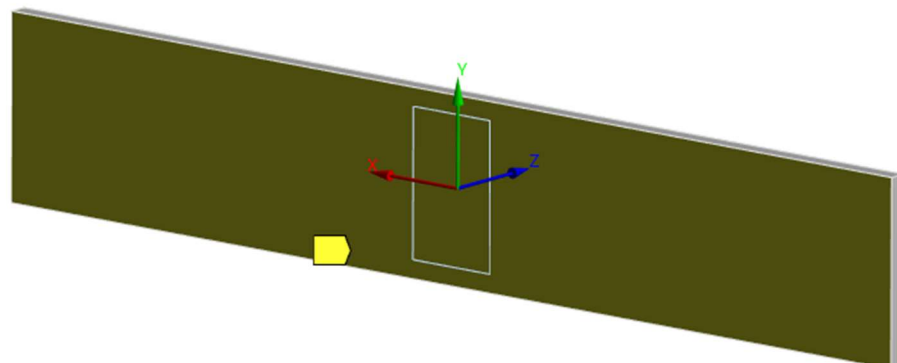
4.6 ábra Displacement_1 a testen

A második kényszer a próbatest hátsó síkját köti meg olyan módon, hogy az Z irányban ne tudjon kilépni a síkból. Ezzel tulajdonképpen egy oldalra lehet a megnyúlás miatti átmérő kontrakciót helyezni.

B: Static Structural

Displacement 2
Time: 1, s
2026. 05. 05. 21:09:06


Displacement 2
Components: Free;Free;0, mm

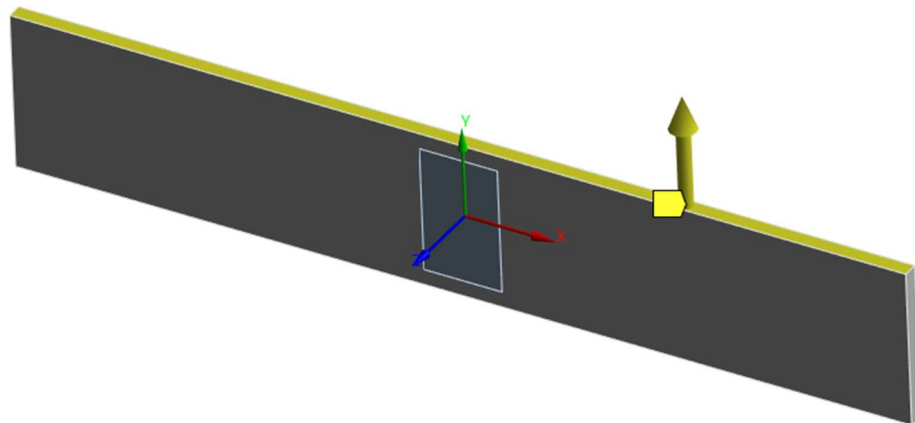


4.7 ábra Displacement_2 a testen

A harmadik kényszer meg az Y irányú elmozdulás mértékét. Ezt az értéket parametrizáltam is és a mindenkori teljes próbatest magasság ötszörösének adtam meg. A 4.8-as ábrán a teljes magasság 20 [mm] így az a teljes elmozdulás 100 [mm] lett.

B: Static Structural
Displacement 3
Time: 1, s
2026. 05. 05. 21:08:23

 Displacement 3
Components: 0,;100,;Free mm



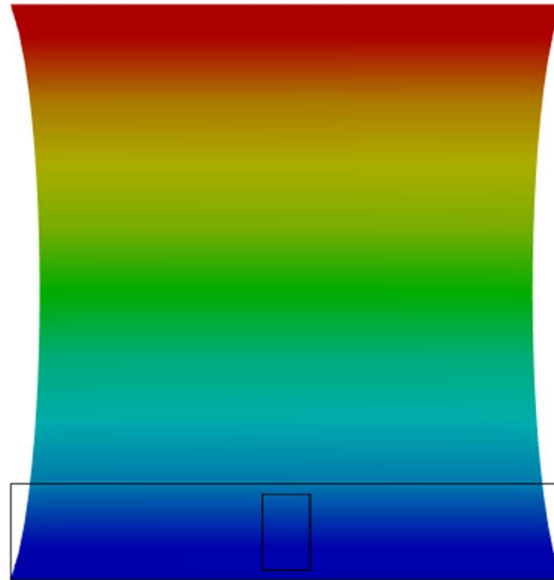
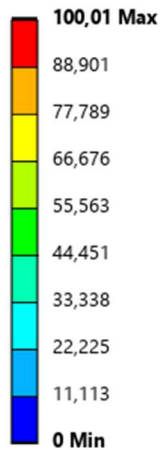
4.8 ábra Displacement_3 a testen

4.6 Szimuláció eredménye

A szimuláció eredményeként jól látszik, mi is a különbség egy egyszerű egytengelyű húzás és a tiszta nyíró vizsgálat között. A kereszt irányú alakváltozás elhanyagolható.

B: Static Structural

Total Deformation - End Time
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
2026. 05. 05. 21:35:48

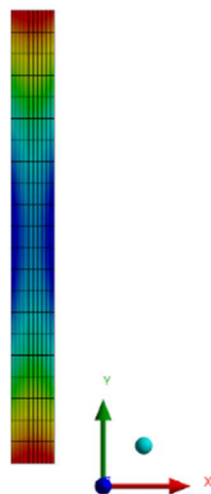
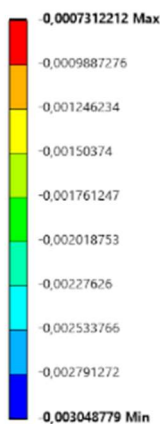


4.9 ábra Szimulációs eredmény 100 [mm] távolságra való húzásnál és a kiinduló geometria

A könnyebb megértés érdekében a megnyúlt test mellett megjelenítettem az eredeti kiinduló geometriát is, ami látszik, hogy a próbatest szélessége többszöröse a magasságnak.

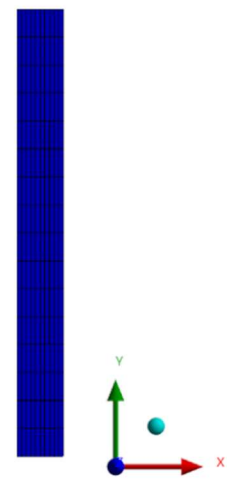
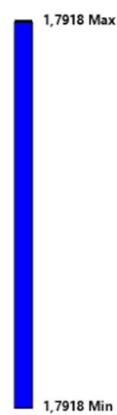
B: Static Structural

X Axis - Normal Elastic Strain - Solid - End Time
Type: Normal Elastic Strain(X Axis)
Unit: mm/mm
Global Coordinate System
Time: 1 s
2026. 05. 05. 0:19:22



B: Static Structural

Y Axis - Normal Elastic Strain - Solid - End Time
Type: Normal Elastic Strain(Y Axis)
Unit: mm/mm
Global Coordinate System
Time: 1 s
2026. 05. 05. 21:54:55



4.10 ábra Vizsgált zóna valós nyúlása X irányban és Y irányban

A lefutott szimulációból, jól látszik az X irányú kontrakció a mért területen. A mért terület jelen esetben 16 [mm] magas volt és 10 [mm] széles. A próbatest geometria láthatólag a várt módon viselkedik és meggátolja a nagy keresztirányú kontrakciót. A mért teljes szélességre (továbbiakban: MTSZ) számítva ez a keresztirányú valós megrövidülés megközelítőleg 0,073 %. A teljes próbatest szélességre (TSZ) vetítve ez mindössze 0,0064 %. Így figyelembe véve azt, hogy a próbatestet a magasság ötszörösére lett húzva, amely esetben 100 [mm] volt, ez a keresztirányú kontrakció elhanyagolható.

4.2 táblázat Különböző próbatest magasságokhoz csatolt X irányú nyúlás és az Y irányú normál feszültség

Próbatest magasság	Húzás	X irányú nyúlás	Y irányú normál feszültség
20 [mm]	100 [mm]	-0,00073122 [-]	16,165 [MPa]
25 [mm]	125 [mm]	-0,00067269 [-]	37,292 [MPa]
30 [mm]	150 [mm]	-0,00062884 [-]	88,1 [MPa]
35 [mm]	175 [mm]	-0,00057367 [-]	197,96 [MPa]
40 [mm]	200 [mm]	-0,00051804 [-]	413,86 [MPa]

5 Próbatest befogási javaslatok

Ahogy már említettem, egy sikeres vizsgálat egyik alapja, a próbatest helyes befogása. A korábban felvett követelményeknek megfelelően, elkészítettem pár darab befogási javaslatot. A továbbiakban ezeket vizsgálom meg, hogy milyen sikerességgel teljesítik a követelményjegyzékben felvett kritériumokat.

5.1 Ragasztott vagy vulkanizált megoldás

Első befogási javaslatként elkészítettem egy ragasztott befogást. Az 5.1-es ábrán az elképzelésem alapján a gumi próbatest lapot fel lehetne ragasztani/vulkanizálni egy fémlemezre, amelyet egy megfogóhoz csatlakoztatnánk. Ebben az esetben a ragasztás lenne gyengepont húzás során. Fontos lehet olyan ragasztót találni, amely rugalmas marad és nem keményedik fel teljesen. Erre a célra az egyik ilyen alkalmas anyag lehet a cián-akrilát vagy hétköznapiabban nevével ismert pillanatragasztó [33].

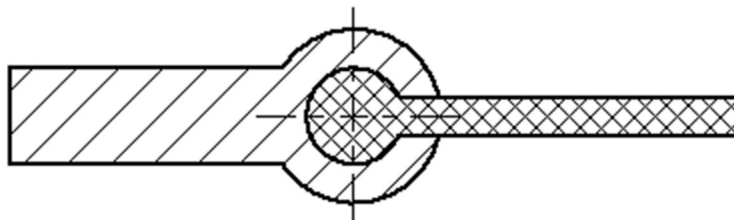
Ebben a befogási esetben a vastagság irányú kontrakciót nem lehetséges lekövetni.



5.1 ábra Ragasztott befogása tervezete

5.2 Hengeres befogás

Ez a befogási mód rögzítés szempontjából nem erővel záró, hanem alakzáró. Érdeemes volt elgondolkozni ezen a módszeren is, hiszen elsőre úgy tűnik, hogy nagyobb felületen képes a próbatestet tartani.



5.2 ábra Hengeres befogás

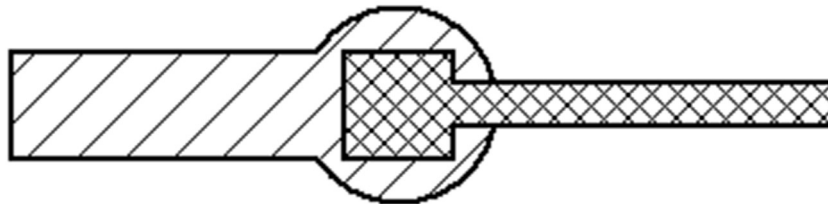
Ami igaz is, azonban kicsit jobban ránézve rájöhettünk a hátrányaira is. Ez a befogó se képes a húzás során fellépő vastagságmenti méretcsökkenést lekövetni. A másik szempont pedig az, hogy hiába lehetne gyorsan próbatest cserélni esetleg a vizsgálatok során, ez egyedi próbatestet igényelne az alakja miatt. A befogó alakja is indokolná a különlegesebb gyártási folyamatokat, mint például a húzal vagy szikra forgácsolást.

Utoljára pedig ebben az esetben hajlamos lett volna a próbatest a kicsúszásra a befogóból.

A továbbiakban ennek a befogási módnak a vizsgálatát nem folytattam, ugyanis, jobb, mint az elődje, mégse teljesít minden követelményt.

5.3 Négyzetes befogás

Habár elsőre ez a módszer és az előző hasonlóknak tűnhet azonban itt az volt az elgondolásom, hogy itt a szögletes alak miatt talán könnyebb lenne megakadályozni a próbatest kicsúszását. Azonban rá kellett jönnöm, hogy ez a kialakítás is feleslegesen bonyolítaná mind a befogószerzám mind a próbadarab legyártását.



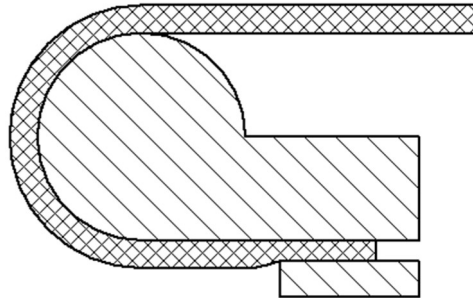
5.3 ábra Négyzetes befogás

5.4 Feltekert befogás

helyét eltolni a vizsgált területtől még jobban és próbáltam csökkenteni a befogó erőt is. Éppen ezek miatt próbálkoztam egy íves megoldással. Itt a befogás helye egyértelműen látszik, hogy távolabb kerül a vizsgálati helytől, azonban ehhez nagyobb, magasabb gumi próbatestre is lett volna szükség. A befogó erő csökkentésére pedig a súrlódást, vagyis pontosabban a kötelsúrlódást kívántam felhasználni.

A kötelsúrlódás jelensége azt írja le nekünk, hogy egy kötélen két végén különböző nagyságú erők ébredhetnek miközben ez a kötélen egy hengeres felületen fekszik fel vagy éppen önmagán csomó esetén. A kötelet ilyenkor elemei részekre bontjuk és darabonként írjuk fel az egyensúly feltételeit. A végső célunk ezzel meghatározni

azt, hogy a kötélen két végén ébredő erőknek mekkora lehet a maximális különbsége mielőtt a kötélen megcsúszna. Ez az erőkülönbség nagyjában függ az átfogási szögtől [34].

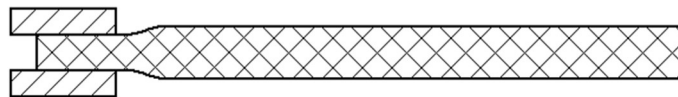


5.4 ábra Feltekert befogás

Ennél a megfogási módnál az volt az elgondolásom, hogy jó lenne a befogás

Ezt a kialakítást is elvettem, ugyanis hiába a szorítás egyszerűen megoldható lett volna, a befogó alkatrészeinek komplex kialakítása nehezítette volna a gyártásukat és a gépre való rögzítést.

5.5 Szorítás



5.5 ábra Kétpofás szorítás vázlata

Lehetett volna talán ez az első módszer, amit vizsgálók, ugyanis ez hathat a legegyszerűbbnek. Két pofa, legyen egy álló és egy mozgó közé beszorítjuk a próbatestet. Ez a felépítés a mozgó pofa miatt, több és bonyolultabb alkatrészt feltételez, mint az előzők, de ez egy nagyon fontos problémáját a kísérletnek meg is tudja oldani.

Itt nem okoz problémát az átmérő változásának lekövetése és talán ez a legfontosabb kritérium, aminek meg kell felelnünk. A lényeg, hogy tudjuk a folyamatos egyenletes szorítóerőt biztosítani. Erre több megoldási módszert is alkalmazhatunk.

Az egyik legkézenfekvőbb megoldás lehet, hogy a két pofát rugók segítségével közelítjük egymáshoz. Ez lenne az olcsóbb és egyszerűbb megoldás azonban ez is

magában hordoz pár problémát. Mindegy, hogy nyomó vagy húzó rugót használunk, mind a két típushoz hozzá lehetne igazítani a konstrukciót, a beállított nyomóerőt minden egyes próbadarab cserénél, le kellene küzdenünk, vagy be kellene építeni, egy szerkezetet, amivel a berendezést feszteleníteni tudnánk. Ez tovább bonyolítaná a berendezést. Ezeken felül, csak a rugók cseréjével tudnánk megoldani a nyomóerő szabályozását.

Ezzel szemben szerintem egy kézenfekvőbb megoldás lehetne egy pneumatikus munkahenger használata. A gép közelében a laborban rendelkezésre áll a megfelelően előkészített nagynyomású sűrített levegő így a hálózat kiépítéssel már nem kellene foglalkozni. Egy pneumatikus munkahengerrel képesek lennénk állítani a szorítóerőt a nyomás függvényében és a nyomás elvételével kézzel könnyen nyithatóvá válna a két pofa így egyszerű lenne a próbatestek cseréje.

6 Befogással kapcsolatos számítások

A szorításos módszer esetén csak a gumi és az acél lapok közti súrlódásra számíthatunk, hogy megtartsa a próbatestet húzás közben.

A súrlódás az az erő, amely ellenáll a szilárd felületek vagy folyadékrétegek és egymáson csúszó vagy dörzsölődő anyagelemek egymáshoz viszonyított mozgásának [35]. A súrlódással, mint mérnöki jelenséggel és annak kutatásával a tribológia foglalkozik.

$$F_s \leq F_n * \mu_0 \text{ [N]} \quad (6.1)$$

A súrlódási együttható a tribológia területéről származó mértékegység nélküli fizikai mennyiség, amely két tárgy közötti súrlódást jellemzi. Ez az együttható a súrlódás során fellépő erőt a tárgyakat egymásnak szorító erőhöz viszonyítva határozza meg[36].

A súrlódási együtthatót rengeteg tényező befolyásolhatja. Ezek lehetnek a :

- anyagminőség
- felületi minőség
- igénybevétel [37].

Az érintkező felületek között sokféle súrlódási állapotot tudunk meg tudunk különböztetni. Ezek a :

- száraz súrlódás
- határréteg súrlódás
- vegyes súrlódás
- folyadéksúrlódás[37].

6.1 táblázat Gumi tipikus súrlódási együtthatói [38]

Anyagok		Súrlódási együttható, μ_0
Gumi	Gumi	1,15
Gumi	Aszfalt	0,9
Gumi	Beton	1,0
Gumi	Szerszámacél	0,86

A szorító erő meghatározásához egy olyan húzás vettem alapul, ahol a próbatestet a magasságának ötszörösére húztam. Itt a reakció erőt leolvastva 619 [N]-t kaptam. A fentebb látható képletbe behelyettesítve könnyen kiszámolható a szükséges szorítóerő.

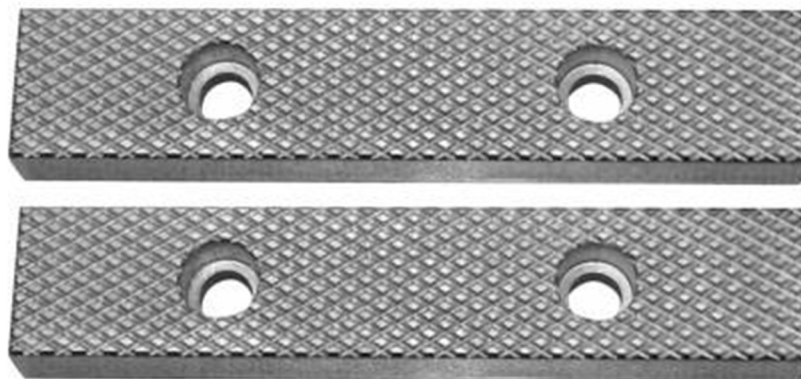
$$F_s \leq F_n * \mu_0 * 2 \text{ [N]} \quad (6.2)$$

$$619 \leq F_n * 0,86 * 2 \text{ [N]} \quad (6.3)$$

$$F_n = \frac{619}{0,86 * 2} = 359,8 \text{ [N]} \quad (6.4)$$

A számításból is látható, hogy a 2 befogóra szétosztva egyáltalán nem kell nagy erőt kifejtenuünk, ahhoz, hogy meg tudjuk fogni a próbadarabot. Ennyi erő kifejtésére már a kisebb profilú pneumatikus munkahengerek is képesek, főleg figyelembe véve azt, hogy a gépen 6,2 [Bar] levegőnyomás elérhető.

A 10.1-es táblázatból is jól látható, hogy a gumi és fém között súrlódási tényező rendkívül magas. Ez az eredmény valószínűleg egy sima felületi acélnál igaz, de a megfogóm esetében több módon is tudjuk növelni ez az együtthatót. A megfogó felületén a satu pofájához hasonló keresztben mart felületet lenne érdemes létrehozni.



6.1 ábra Satu pofák mart felülettel [39].

7 Megfogó tervezése

A korábban már tárgyalt koncepciók és számítás alapján elkezdtem megtervezni a megfogót. Az első lépés az anyagválasztás. A megfogónak könnyűnek kell lennie és ellen kell állnia a korróziónak. Ezért nem is lehetne jobb választás, mint az alumínium. Rengeteg alumínium ötvözetet ismerünk, mindegyik más és más tulajdonságokkal rendelkezik. A számomra alkalmas ötvözet a gyakran használt AlMgSi vagy más néven EN AW 6060.

Ez az összetételű alumínium közepes szilárdságú, jól hegeszthető, jó a légköri és tengervíz-korrózióállósága, kiválóan forgácsolható és emellett könnyen lehet eloxálni [40], [41].

A lentebbi táblázatba összegyűjtöttem a mechanikai tulajdonságait, amely segít majd a tervezés menetében.

7.1 táblázat EN AW 6060 mechanikai tulajdonságai


EN AW 6060	
Mechanikai tulajdonságok	
Sűrűség	2,710 [g/cm ³]
Young modulus	70 [GPa]
Szakítószilárdság	140-230 [MPa]
Folyáshatár	70-180 [MPa]
Hőtágulási tényező	23,4 [μm/m-K]
Olvadáspont	610 [°C]

7.1 Munkahenger kiválasztása

Miután már megvolt az alap befogó koncepció elkezdtem a munkahengert kiválasztani. Az adott, hogy ahogy már említettem a laborban 6.2 [bar] sűrített levegő érhető el. Az tökéletes, ugyanis a legtöbb gyártó 6 [Bar] nyomásnál adja meg a szorítóerőt előre és hátrahúzás során. A keresést a FESTO weboldalán kezdtem, ugyanis ezekkel a munkahengerrel van már tapasztalatom, és keresőjük megkönnyítette a munkám.

Minden tervezési feladatnál, mindegy mit készítünk fel kell vegyünk egy biztonsági tényezőt valamely paraméterünkre. Ahogy kiszámoltam, egy befogónak megközelítőleg 360 [N] erőt kell produkálnia, azonban minden bizonnyal ez a szám kisebb lesz a valóságban ugyanis a pofák felülete érdesítve lesz. Biztonsági tényezőnek a 3-at láttam előnyösnek. Így megkaptam azt, hogy 1080 [N] szorítóerőre lesz szükségem a próbadarab megfogására.

Ezek alapján választottam egy ADN-50-20-A-P-A típusú kompakt, kettős működtetésű dugattyúrudas hengert, a rúd végén külső menettel [42].



✦ Kompakt henger

ADN-50-20-A-P-A
536313
GTIN 4052568171162

Működési mód	kettős működtetésű
Dugattyú Ø	50 mm
Elméleti erő 0,6 MPa-nál (6 bar, 87 psi), előre	1178 N
Löklet	20 mm
Csillapítás	elasztikus csillapítógyűrűk/-lapok mindkét oldalon

7.1 ábra A tervezéshez használt ADN-50-20-A-P-A munkahenger [42]

Ez a munkahenger 6 [bar] nyomásnál elméletileg képes előremenetben kifejteni 1178 [N] erőt, amíg visszahúzásnál ennél egy kicsit kevesebbet a munkahenger kialakításából adódóan 1057 [N]-t [42].

Ez jól láthatóan kevesebb mint az előbb meghatározott 1080 [N] azonban nagy biztonsággal állíthatóm, egy megfelelő lesz a megfogóhoz, ugyanis az elérhető nyomás is nagyobb lesz, mint az előírt, és ha még így is kevésnek bizonyul akkor egy nyomásfokozó beépítésével akár 12 [bar] rendszernyomást is el tudunk érni, ami már ennek a hengernek sok is, hiszen az üzemi nyomás felső határa 10 [bar].

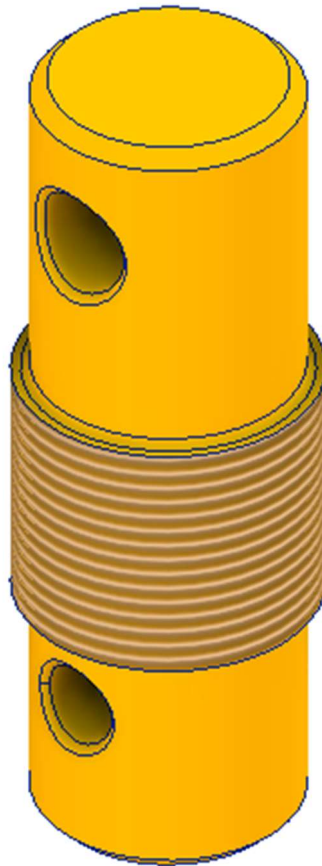
Emellett a megfogó felülete játssza a legnagyobb szerepet a megfogásnál, amelynek a felülete érdesítve vagy marva lesz.

7.2 Konstrukció bemutatása

Ebben a fejezetben szeretném bemutatni az alkatrészeket, azok tulajdonságait, kapcsolódási módjaikat a többi részhez, illetve a tervezés során felmerülő gondokat és megfontolásokat.

7.2.1 Befogó csap

A befogó csap alkotja a berendezés alapját, ez csatlakozik a mérőgép felső, illetve alsó keresztszánjába. Az alapját a gyári kialakítás adta, azonban több módosítást is végre kellett rajta hajtanom, hogy az én berendezésemmel is kompatibilis legyen.

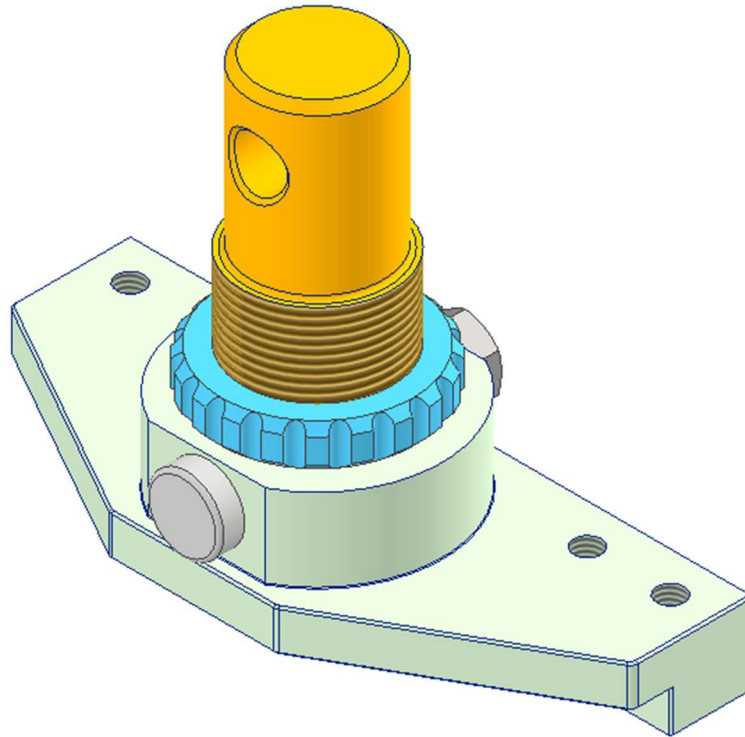


7.2 Ábra Befogó csap modellje két oldalon hengeres felfekvő felületekkel

Úgy terveztem ezt a darabot, hogy nagyrészen egyszerűen esztergán el lehessen készíteni. A rajta található M36x2-es menet segítségével feszítjük fel a csapot a géptestbe és szorítjuk fel az alaptestet is.

7.2.2 Alaptest

Ezután jött az alaptest. Ezt az alkatrészt kell felszerelni a befogó csap alsó illesztett hengeres részére, majd ezután egy csapszeggel biztosítani kell és egy a géphez rendelkezésre állóval előfeszíteni, hogy az esetleges illesztése játékot ki tudjuk küszöbölni.

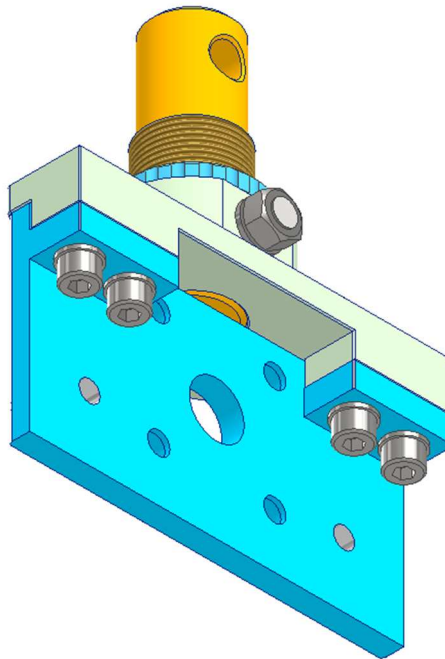


7.3 ábra Alaptest felszerelve a befogó csapra

Az alaptesten látható még 4 darab M8-as normál menetemelkedésű menet, amelyekre fel kell szerelni a hátlapot.

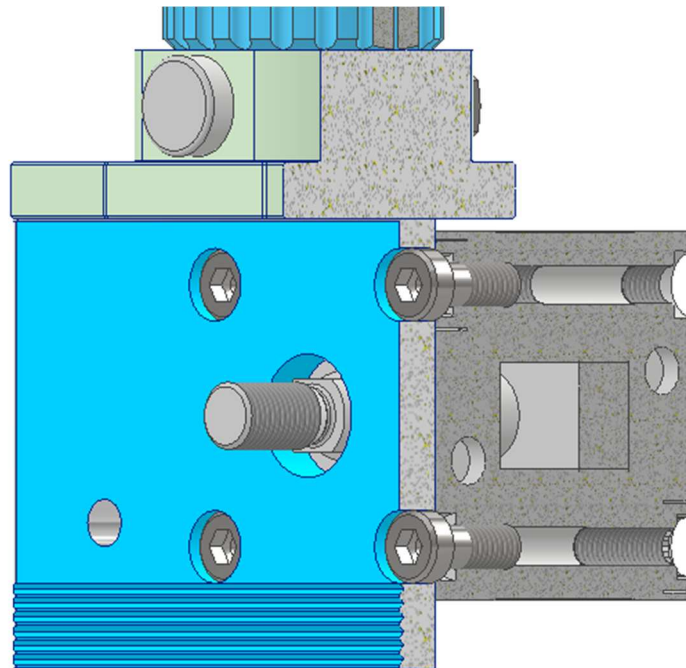
7.2.3 Hátlap és a munkahenger

Az eddigi összeállításra felkerül a hátlap 4 darab M8x30-as csavar segítségével. Az kialakítás alapja az volt, hogy egy csavar, esetemben négy, húzásnak jobban ellenáll, mint nyírásnak, éppen ezért alulról illeszkedik fel a hátlap. A 4 csavar alatt pedig rugós alátét található, hogy megakadályozzák a csavarok lelazulását.



7.4 ábra Felszerelt hátlap az alaptestre

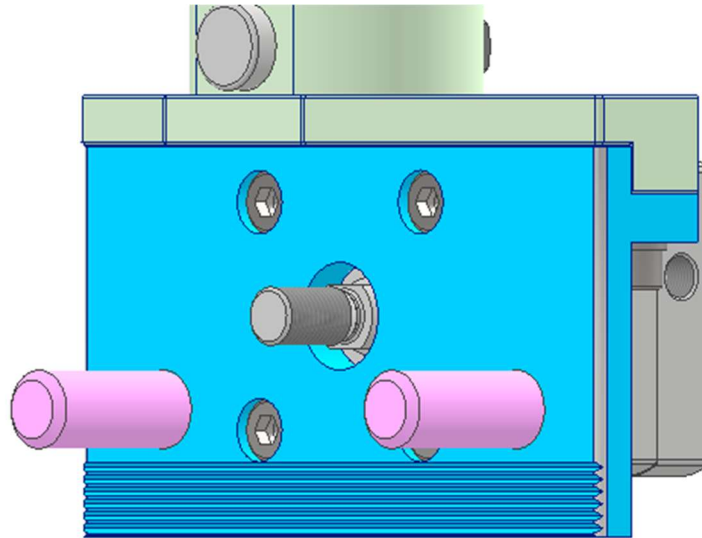
Ezeket követte a pneumatikus munkahenger felszerelése. Olyan elrendezésben került fel, hogy a munkahenger visszahúzás során fog szorítani. Így nem volt szükségem további megtámasztásra vagy alkatrészekre, egyenes a hátlapra tudtam felszerelni. A felszereléshez 4 darab alacsony hengeresfejű csavart használtam.



7.5 ábra Munkahenger felszerelve a hátlapra 4 csavarral

7.2.4 Megvezető szárok

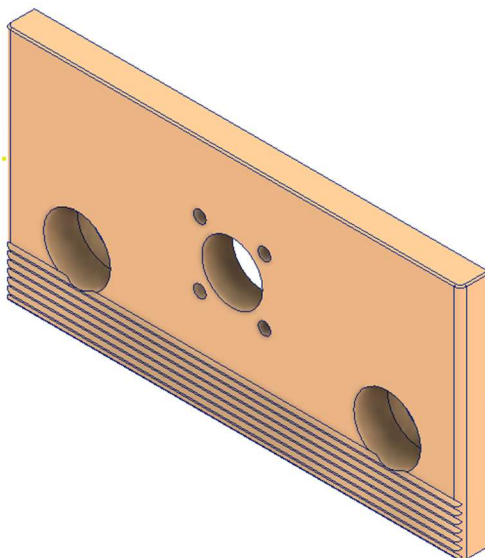
Az utolsó elem, ami felszerelésre került a hátlapra az két darab megvezető csap. Szerepük az, hogy párhuzamosan tartsák az elő és a hátlapot ezzel egyenletes befogást biztosítsanak.



7.6 ábra Megvezető szárok felszerelve.

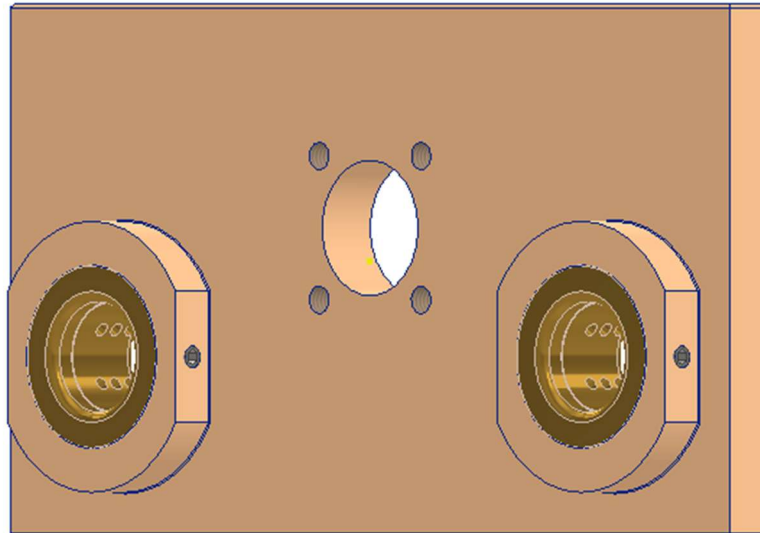
7.2.5 Előlap

A következő elem, ami a működőképes befogónkhoz kellene fog az az előlap. Az előlap fogja teljessé tenni a berendezést, ez fog mozgó pofaként viselkedni és szorítja majd a gumilapot a hátlaphoz.



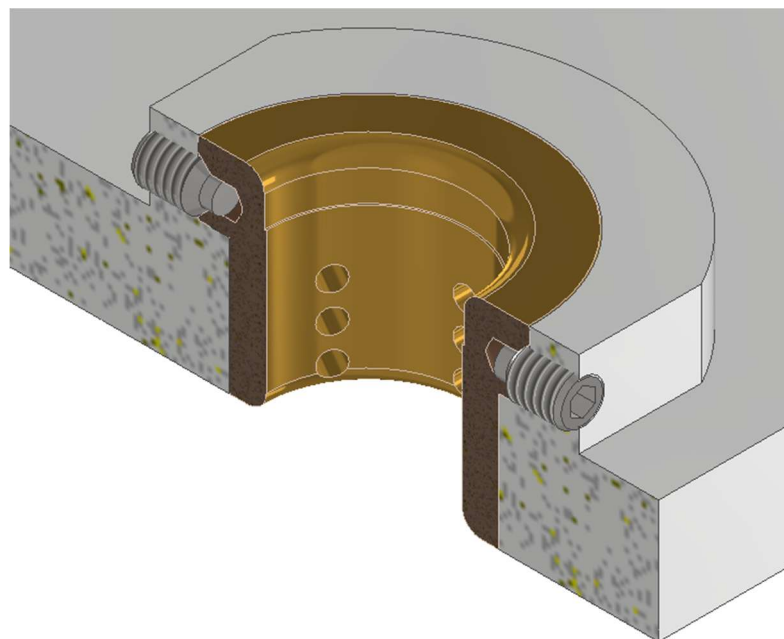
7.7 ábra Mozgó előlap

Erre az előlapra kerül beszerelésre a két darab karbantartásmentes vállas bronzpersely. A bronzba ágyazott grafit betétek miatt valósul meg az önkenés, és így nagy valószínűséggel a befogó élettartama alatt nem kell majd őket cserélni [43].



7.8 ábra Beszerelt bronz perselyek az előlapba

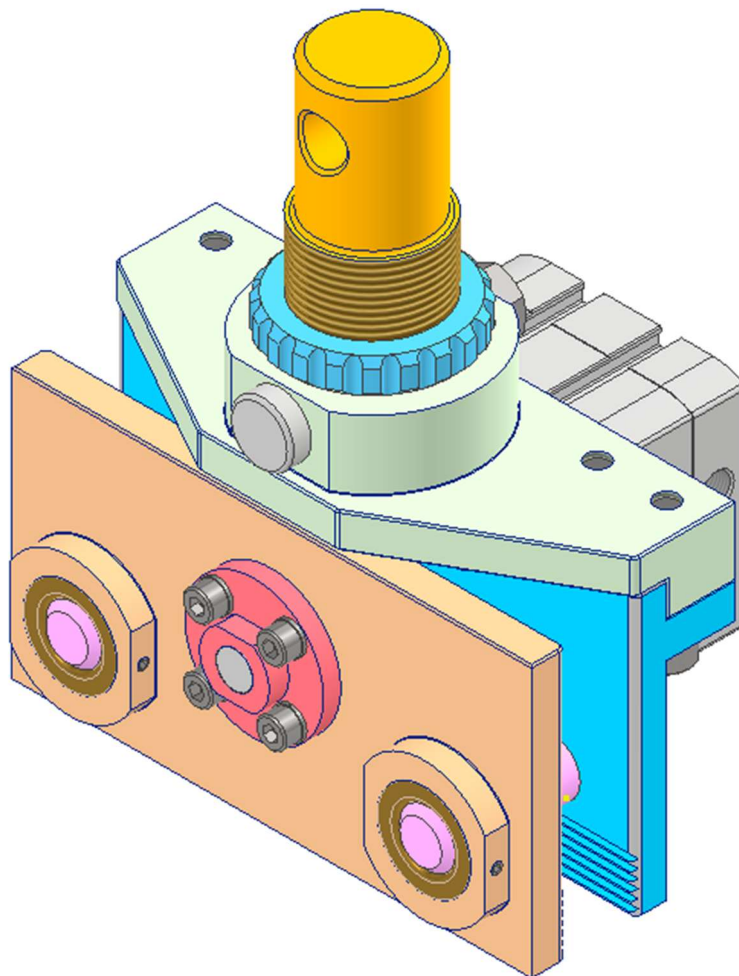
A bronz perselyeket rögzíteni is kell, hogy tengely irányba ne csusszannak ki, erre a célra 4 darab DIN 915-ös szabványnak megfelelő M4-es menetű hernyócsavart választottam.



7.9 ábra Biztosított bronz persely

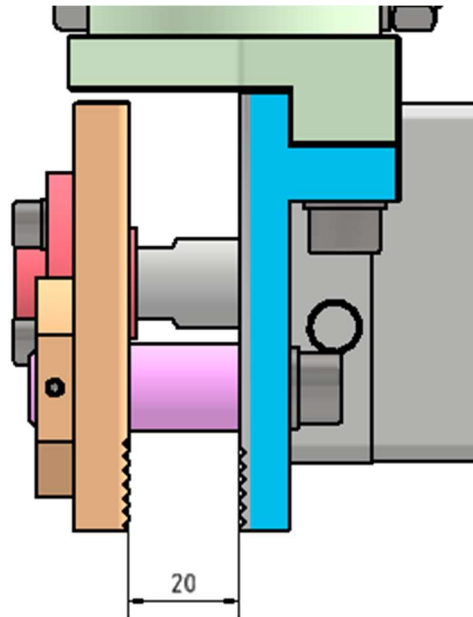
7.2.6 Készre szerelés

Utolsó lépésként rögzítjük az előlapot a hátlaphoz és magához a munkahengerhez. Ez volt talán a legnehezebb része a tervezésnek, hiszen figyelni kellett arra, hogy szerelhető maradjon a megfogó. Éppen ezért választottam olyan munkahengert, aminek külső menet van a végén. Terveztem egy olyan anyát, amit fel tudunk a munkahenger tengelyére ütközésig csavarni. A további pozicionálásra nem kellett gondolni hiszen a munkahenger tengelye szabadon elfordítható, így az anyán látható 4 darab furaton keresztül lehet rögzíteni az előlapot.



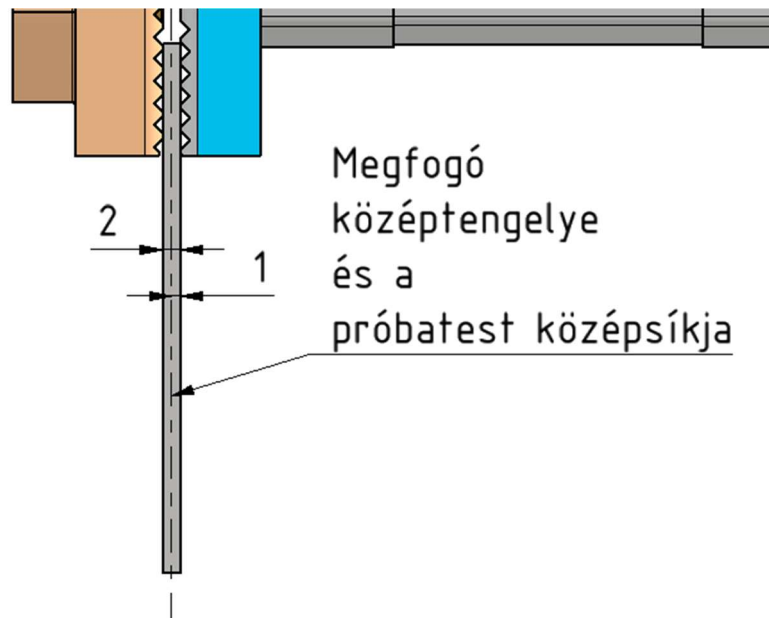
7.10 ábra Készre szerelt megfogó

A 11.10-es ábrán látható a készre szerelt végleges megfogó. Összesen 11 darabból áll, és tömege közelíti a 2,2 [kg]-t. Ekkora tömegnél a fel és leszerelés nem fog gondot okozni a kezelőnek.



7.11 ábra Befogó pofájának maximum távolsága

A munkahenger választásom miatt a maximális pofa távolság jelenleg 20 [mm] amely első körben a felhasználásnál bőségesen elég lesz. A későbbiekben pedig, ha kevésnek bizonyul akkor, egy ugyan ilyen házméretű de nagyobb lökettel rendelkező munkahengerrel lehet ezt bővíteni.

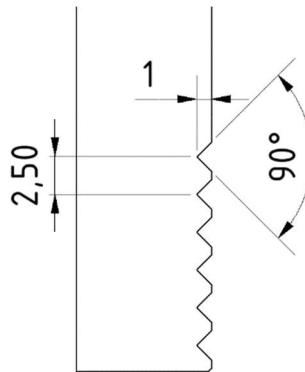


7.12 ábra Hátlap eltolás mértéke

A 7.12-es ábrán, látható a, hogy a befogó és ezzel együtt a gép függőleges tengelye egy vonalba esik a próbatest középsíkjával. Ezt úgy értem el, hogy a hátlap 1 [mm]-el el van tolva a munkahenger felé.

7.3 Súrlódási tényező növelésének lehetőségei

A súrlódási tényező több tényezőtől függ. A képletből adódóan jól látszik, hogy ha neveljük a súrlódási tényezőt akkor csökkeni fog a szükséges szorítóerő is. Több módja van a tényező növelésének az egyik legegyszerűbb a felület érdesítése. Illetve ezek mellett kiemelten fontos, hogy a felületek tiszták és zsír mentesek legyenek ezzel is növelve a tapadást a két felület között.



7.12 ábra Felület horony marással

E mellett érdemes lehetne még kísérletek folytatni azzal, hogy a felületet esetleg sörétezzük vagy szemcse szórjuk.

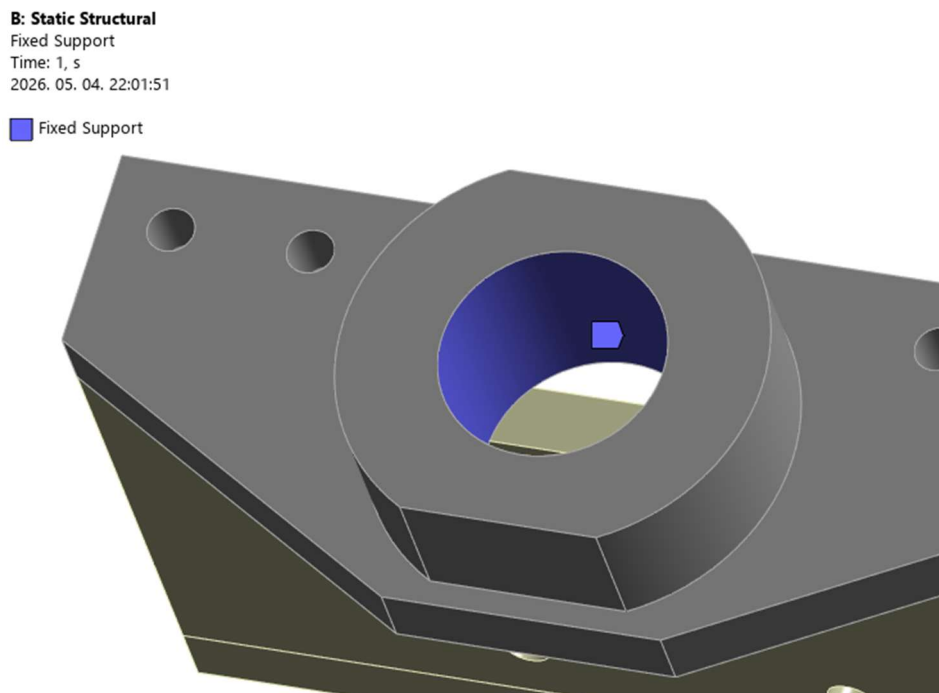
8 Konstrukció validálása

Most, hogy a befogó konstrukciója készen lett a következő lépésként meg kellett vizsgálni, hogy nem fog-e túlzottan lehajlani a befogó. Erre készítettem egy szimulációt Ansys-on belül felhasználva a Static Structural környezetet. Ahogy már korábban említettem a legtöbb alkatrész EN AW 6060 alumínium ötvözetből készül, így ezt be is tallóztam az *Engineering Data* fülön. A háló elkészülte utána először a megfogást vettem fel.

8.1 ábra Szimulációhoz használt *Aluminum alloy* mechanikai tulajdonságai

<i>Aluminum alloy</i> tulajdonságai	
Sűrűség	2,77 [g/cm ³]
Young modulus	71 [GPa]
Poisson tényező	0,33
Szakítószilárdság	280 [MPa]

Ez az anyag egy lineárisan rugalmas, izotróp anyagmodellel alapul. Azaz a Hooke törvényen alapul és minden irányban azonos tulajdonságokkal rendelkezi.



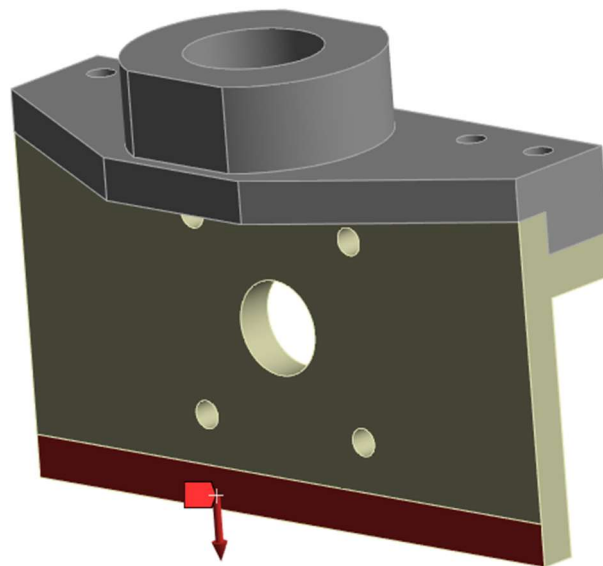
8.1 ábra Fixed Support elhelyezése a furatban

Azért választottam ezt a felületet mert valójában itt a furat nem mozdulhat már el, szóval a szimulációhoz ez is megfelelt. Felvettem az erőt is, ami az előzetes szimuláció értéke kétszeres biztonsági tényezővel véve, ami 1240 [N] lett. A hátlapot a Ansys SpaceClaim-en belül készítettem elő a szimulációhoz. Az eszköztárban található Split paranccsal a hátlap alsó élétől 10 [mm]-re kettő választottam a felületet. Megközelítőleg ekkora felületen fog a gumilap is érintkezni a hátlappal így oda volt érdemes az erőt is helyezni.

B: Static Structural

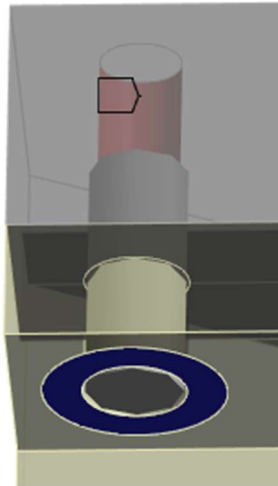
Force
Time: 2, s
2026. 05. 04. 22:02:47

Force: 1240, N
Components: 0,;-1240,;0,



8.2 ábra Húzóerő elhelyezése a hátlapon a megfogás helyén

A szimuláció pontosságának érdekében a felületek között *frictionless* az az csúszásmentes kapcsolatot definiáltam. Ez a kapcsolat megengedi, hogy a felületek egymáson elcsúszanak szabadon, és elváljanak egymástól azonban nem engedélyezi, hogy a két test penetrációját. A pontosság további növelésért a csavarokat *beam* elemekkel helyettesítettem. Ezek az elemek lehetővé tették, hogy szimulálni tudjam a csavarok előfeszítését. Ebből az elemből összesen 4 darabot definiáltam.



8.3 ábra Beam elem definiálva az előlap és az alaptest között

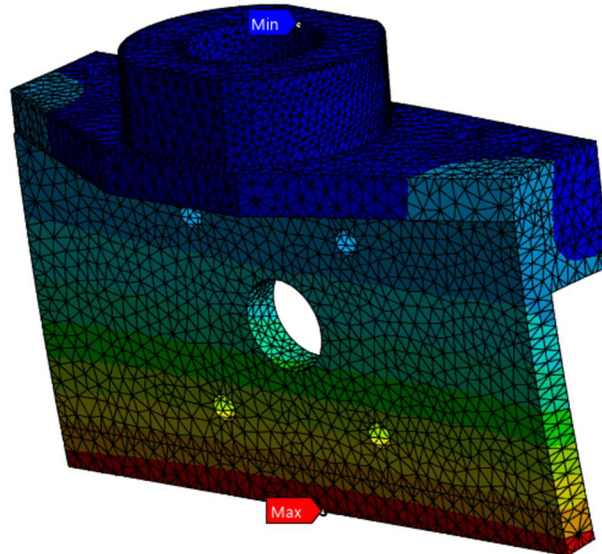
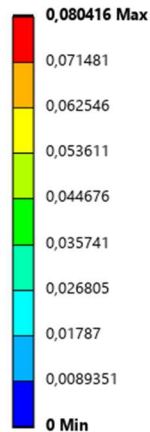
Az elemek elhelyezéséhez az alaptestben lévő menetek hengeres felületét használtam fel és a hátlapon felrajzolt 15 [mm] átmérőjű köröket, amik az alátét által lefedett területnek felelnek meg. Ahhoz, hogy a csavar előfeszítést meg tudjam adni három időlépésre kellett a szimulációt bontsam. Az első lépésben így hatott a csavarok előfeszítő ereje, a másodikban hagyni kell, hogy az előfeszítés hasson a testre és kontakt alakuljanak ki, a harmadikban pedig hatott a húzóerő.

8.1 táblázat Időlépésenként fellépő erők a befogó szimulációja során

Időlépés	Előfeszítés	Húzóerő
1.	4000 [N]	0
2.	Lock	0
3.	Lock	1240 [N]

A csavar előfeszítés megadásánál ügyelni kell arra, hogy a második és harmadik időlépésben a státusza *Lock* azaz zárt legyen ugyanis, azt szeretnénk, hogy a terhelés ráadásának pillanatában is jelen legyen. Egy M8-as 8.8-as anyagminőségű csavar maximálisan 19 [kN] előfeszítő erőt képes előállítani, így még közel se vagyunk a csavar elméleti határához [44].

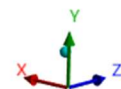
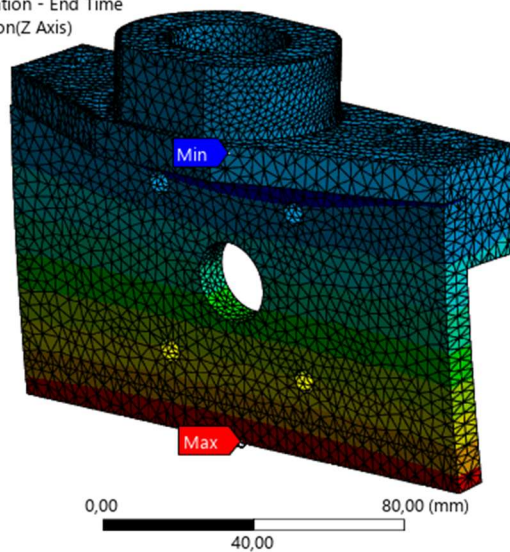
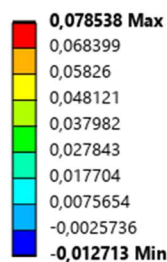
B: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 2 s
2026. 05. 04. 22:06:44



8.4 ábra Szimuláció eredménye a teljes deformáció kiértékelésével

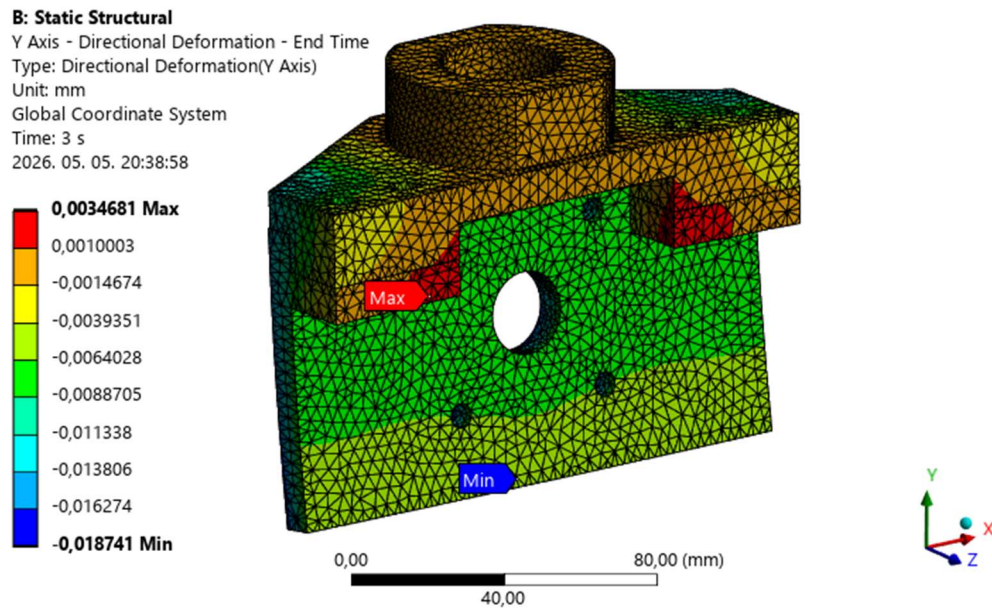
A lekért *Total Deformation* azaz teljes deformáció, jól látható a 8.4-es ábrán. A legnagyobb elmozdulás a várható módon a hátlap alján fog fellépni. Ezt az eredményt azonban érdemes irányok szerint elosztani. Ezt a *Solution* fülön belül található *Directional Deformation* használatával tudtam megtenni. Kettőt illesztettem be, egyet Y irányú elmozdulás figyelemmel kísérésére egyet pedig a Z irányúra.

B: Static Structural
Z Axis - Directional Deformation - End Time
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 3 s
2026. 05. 05. 20:30:39



8.5 ábra Z irányú elmozdulás a befogó hátlapján

Az Z irányú eltérés a hátlapon jelenik meg a legtávolabbi ponttól a befogástól, azaz a végén. Nem lényegesen, de kisebb értéket mutat, mint a teljes deformációs kép. Ez az elmozdulás a valós szimuláció során nem fog eltérést okozni, ugyanis ott a próbatest nyúlása lesz mérve nem pedig a két befogó egymáshoz viszonyított elmozdulása.



8.6 ábra Y irányú elmozdulás a befogó hátlapján

Az Y irányú elmozdulás azon egy teljesen más helyre került fel a modellen, mégpedig oda, ahol a hátlapot és az alaptestet összecsavarozzuk. Ennek az elmozdulásnak nagy része a csavarok előfeszítéséből adódik. A 4 darab csavar előfeszítése után ugyanis itt a hátlap felfogató felülete zömül, így Y irányban pozitív elmozdulás fogunk látni azon a két belső sarkon.

A megfogót megvizsgáltam feszültség szempontjából is, ami látható a 8.7-es ábrán. A legnagyobb feszültség összeszorított felületeken jelentkezik. A feszültség csúcsa 51,508 [MPa] ami az esetben egy ötvözött alumíniumnak, mint az EN AW 6060 nem fog különösebb gondot okozni.

B: Static Structural

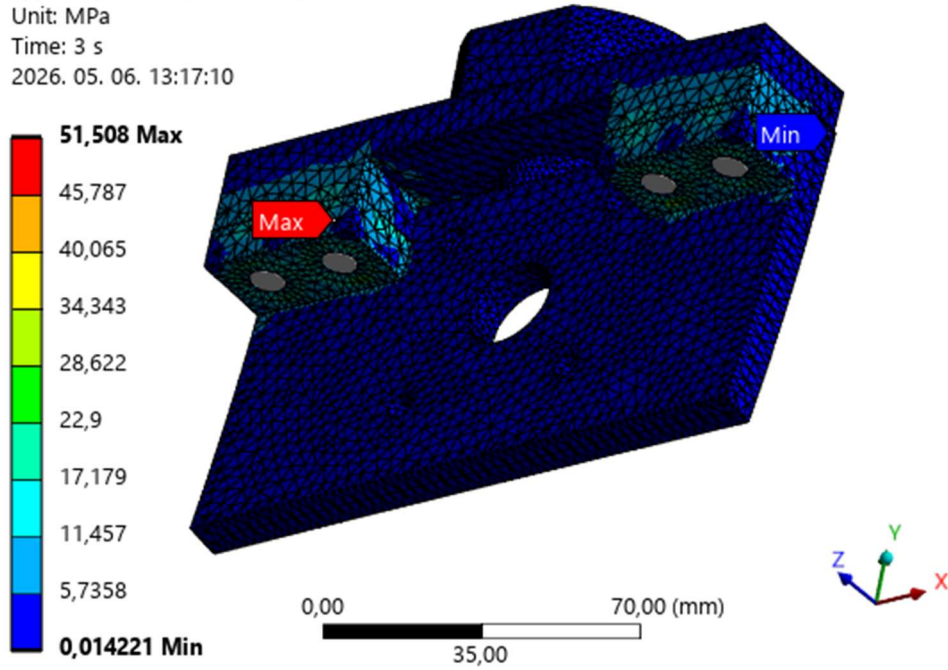
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 3 s

2026. 05. 06. 13:17:10



8.7 ábra Feszültség eloszlás a megfogón

9 Összefoglalás

Diplomamunkám témája az volt, hogy egy működőképes, egyszerű, a követelményeknek megfelelő konstrukcióval álljak elő, amely képes lesz hiperelasztikus anyagok tiszta nyíró vizsgálatát elősegíteni azzal, hogy stabil, megismételhető módon befogja a próbatestnek szánt gumilapot. Ilyen berendezés nincs jelenleg a piacon forgalomban, így kénytelen voltam az egészet magamnak felépíteni.

Először tisztába kellett jönnöm azzal, hogy milyen anyagmodellek léteznek és hogy pontosan mi is az a tiszta nyírás. Miután ezeket végig tanulmányoztam készítettem egy szimulációt is, hogy lássam működés közben ezt a jelenséget. Nem tudtam volna elvégezni a szimulációt L.R.G. Treloar munkássága nélkül ugyanis az ő adatsorát használtam fel az anyagmodell illesztésénél.

Az adatsorban található adatokkal több anyagmodellt is illesztettem. Első körben az adatokra a Neo-Hooke modellt próbáltam rá azonban ez csak kis mértékű deformációig tudta az alakváltozást lekövetni. Ezt követően egy olyan modellt kerestem, amely képes nagyobb szintű alakváltozás lekövetésére és ez a Yeoh lett. Miután láttam, hogy ez sokkal jobban le tudja követni a változást kinyertem az anyagi állandókat a szimulációból. Végül ezzel az anyagmodellel készült el a szimuláció.

Ezt követően elkezdtem előkészíteni a szimulációt és meghatároztam a próbaest geometriáját. Az alak és a méretek a meglévő berendezésekhez az Instron 68TM-10-hez és az Instron Ave 2 optikai nyúlásmérő gépéhez igazodnak. A próbatestről először készítettem egy 3D modellt majd a további előkészítés során kivágtam belőle a vizsgálandó területet és ennek magasságát és szélességét parametrizáltam is. Elkészítettem a hálót a próbatestre majd, hogy megbizonyosodjak, hogy a szimulációm stabilitásáról elvégeztem egy háló konvergencia vizsgálat, amin a modell később megfelelt. A szimuláció következő lépéseként elhelyeztem a modellen a különböző megfogásokat, peremfeltételeket, amelyekkel lekötöttem a modell egyes szabadságfokait és beállítottam a nyújtás mértékét.

A szimulációk futtatása vette talán a legtöbb időt igénybe. Az első, amit kiértékeltem az a teljes testre ható elmozdulás. Már ezen is tisztán látszott, hogy a geometria az oldalak aránya miatt a vártként teljesít, tehát a több százszázalékos hosszirányú nyújtás mellett is közel 0%-os keresztirányú alakváltozás ébred a próbatesten. Öt különböző próbatest magasságot és öt hozzátartozó nyújtást futtatam le és ezeken vizsgáltam meg először az X irányú nyúlást majd később a Y

irányú normál feszültséget is. Az X irányú nyúlás minden esetben közel nulla volt, míg az Y irányú normál feszültség drasztikusan nő minden egyes méretlépéssel.

Ezt követően megvizsgáltam milyen módon is tudnám befogni a próbateetet. Több megoldással próbálkoztam amíg el nem jutottam egy olyanhoz, amely kielégítette az összes követelményt. Végül egy kétpofás pneumatikus szorításon alapuló befogást választottam ugyanis a gép környezetében kiépítésre került sűrített levegős ellátás. Ezt követte egy hosszas gondolkodás ugyanis ötlet és az alap elgondolás megvolt azonban ezt meg is kellett valósítani és összhangba kellett hozni az Instron 68TM-10-es mérőgép csatlakozó felületeivel.

A végeredmény végül 11 darabnál és közel 2,2 [kg]-nál nyert végső formát. A design egyszerű, egy álló és egy mozgó pofából áll, és az ezeket összeszorító pneumatikus munkahengerből. A befogó könnyen használható, megismételhető és egyenletes erőeloszlású befogást tesz lehetővé, ahogy azt akartam. A befogó utolsó sorban megfelelt egy statikus vizsgálatnak is ezzel az eszközt késznek és használhatónak titulálom.

Irodalomjegyzék

- [1] Sadhan k. D. & Jim R. W., “Rubber Technologist’s Handbook,” *Rapra Publishers*, pp. 1–598, 2001, Megtekintve: Dec. 04, 2025. [Online]. Elérhető: https://books.google.com/books/about/Rubber_Technologist_s_Handbook.html?id=2rxFOm68Ui8C
- [2] “Elastomer Polymer Natural rubber Plastic Elasticity, plastic polymer, angle, white png | PNGEgg.” Megtekintve: May 03, 2026. [Online]. Elérhető: <https://www.pngegg.com/en/png-cpuqt>
- [3] L.R.G. Treloar, “The Physics of Rubber Elasticity,” 1975.
- [4] “2. fejezet - A végeelem rendszerek működésének alapjai.” Megtekintve: Dec. 02, 2025. [Online]. Elérhető: https://mogi.bme.hu/TAMOP/vegeselem_modszerek/math-ch02.html#ch-II.4.3.2
- [5] “What is the difference between a hyperelastic material and an elastic material in RecurDyn?” Megtekintve: Dec. 03, 2025. [Online]. Elérhető: <https://support.functionbay.com/en/faq/single/87/difference-hyperelastic-material-elastic-material-recurdyn>
- [6] E. M. Arruda and M. C. Boyce, “A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 41, no. 2, pp. 389–412, Feb. 1993, doi: 10.1016/0022-5096(93)90013-6.
- [7] “Energy Functional Hyperelasticity-Lesson 2”.
- [8] “Neo-Hookean hyperelastic model for nonlinear finite element analysis | by WELSIM | Quantify the Uncertain | Medium.” Megtekintve: Dec. 03, 2025. [Online]. Elérhető: <https://getwelsim.medium.com/neo-hookean-hyperelastic-model-for-nonlinear-finite-element-analysis-16ac996aa507>
- [9] R. W. Ogden, “Large Deformation Isotropic Elasticity: On the Correlation of Theory and Experiment for Compressible Rubberlike Solids,” *Source: Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 328, no. 1575, pp. 567–583, 1972, Megtekintve: Dec. 07, 2025. [Online]. Elérhető: <https://www.jstor.org/stable/78172>

- [10] Dr. Huri Dávid, “VÉGESELEMES RENDSZERHEZ KAPCSOLT OPTIMALIZÁLÓ ELJÁRÁS FEJLESZTÉSE GUMIÜTKÖZŐ TERVEZÉSHEZ.”
- [11] “Mooney-Rivlin.” Megtekintve: May 01, 2026. [Online]. Elérhető: <https://www.continuummechanics.org/mooneyrivlin.html>
- [12] “Hyper-elasticity - Welsim Documentation.” Megtekintve: Dec. 07, 2025. [Online]. Elérhető: https://docs.welsim.com/mateditor/mat_theory_hyper-elasticity/
- [13] “Definition and Mathematics of Pure Shear.” Megtekintve: Dec. 10, 2025. [Online]. Elérhető: https://earth.sdsu.edu/visualstructure/vss/htm_hlp/pure_s.htm
- [14] O. H. Yeoh, “Analysis of deformation and fracture of ‘pure shear’ rubber testpiece,” *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, vol. 30, no. 8, pp. 389–397, 2001, doi: 10.1179/146580101101541787.
- [15] “Fatigue Life Characterization and Simulation for Rubber How Does Pure Shear Compare to Simple Shear? Analysis,” 2012, Megtekintve: Dec. 10, 2025. [Online]. Elérhető: www.endurica.com
- [16] Z. Ma, H. Zhao, H. Cheng, S. Lu, and L. Zhang, “Decomposition method based on a modified Arcan fixture and its application in an in situ combined load tester,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 12, Dec. 2014, doi: 10.1088/0957-0233/25/12/127001.
- [17] “Pure Shear - an overview | ScienceDirect Topics.” Megtekintve: May 01, 2026. [Online]. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pure-shear>
- [18] “Curve Fitting - an overview | ScienceDirect Topics.” Megtekintve: May 01, 2026. [Online]. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/curve-fitting>
- [19] J. Kiusalaas, “Numerical Methods in Engineering with MATLAB®,” *Numerical Methods in Engineering with MATLAB®*, Aug. 2005, doi: 10.1017/CBO9780511614682.
- [20] L. R. G. Treloar, “Stress-strain data for vulcanised rubber under various types of deformation,” *Transactions of the Faraday Society*, vol. 40, pp. 59–70, 1944, doi: 10.1039/TF9444000059.
- [21] “OS-V: 0800 Hyperelastic Material Verification.” Megtekintve: Dec. 07, 2025. [Online]. Elérhető:

- https://2025.help.altair.com/2025/hwsolvers/os/topics/solvers/os/materials_hyperelastic_verification_r.htm
- [22] “Engineering Strain and True Strain Mechanical Strain in Deformation Analysis-Lesson 3”.
- [23] “For a simulation using hyperelastic materials, when I compare my ANSYS (MAPDL or Workbench Mechanical) Stress/Strain output graph to my input Stress/Strain graph, they do not match. Why? | Ansys Knowledge.” Megtekintve: May 05, 2026. [Online]. Elérhető: <https://innovationspace.ansys.com/knowledge/forums/topic/for-a-simulation-using-hyperelastic-materials-when-i-compare-my-ansys-mapdl-or-workbench-mechanical-stress-strain-output-graph-to-my-input-stress-strain-graph-they-do-not-match-why/>
- [24] Instron, “Model 68TM-10 Dual Column Table Model Preinstallation Manual,” 2020, Megtekintve: May 01, 2026. [Online]. Elérhető: www.instron.com
- [25] Ave, “A REVOLUTION IN STRAIN MEASUREMENT Non-Contacting Video Extensometer,” 2024. [Online]. Elérhető: www.instron.com
- [26] Instron, “Instron Video Extensometer AVE2 and SVE2 Operator’s Guide,” 2017, Megtekintve: May 01, 2026. [Online]. Elérhető: www.instron.com
- [27] Iso, “ISO 37:2017,” 2017. [Online]. Elérhető: www.iso.org
- [28] “Element Order.” Megtekintve: May 05, 2026. [Online]. Elérhető: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v252/en/wb_msh/ds_solid_element_midside_nodes.html
- [29] “Grid Convergence and Mesh Quality for CFD.” Megtekintve: Apr. 18, 2024. [Online]. Elérhető: <https://www.linkedin.com/advice/0/how-do-you-assess-grid-convergence-mesh-quality-your-cfd-solution>
- [30] “Examining Spatial (Grid) Convergence.” Megtekintve: Mar. 17, 2026. [Online]. Elérhető: <https://www.grc.nasa.gov/www/wind/valid/tutorial/spatconv.html>
- [31] P. J. Boache, “Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies,” 1994. [Online]. Elérhető: http://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article-pdf/116/3/405/5531128/405_1.pdf

- [32] “Static Structural.” Megtekintve: Mar. 18, 2026. [Online]. Elérhető: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v252/en/wb2_help/wb2h_structstaticAN.html%23wb2h_structstaticAN
- [33] “The Best Glue for Rubber: Your Guide to Rubber Bonding | Gluegun.com.” Megtekintve: Mar. 29, 2026. [Online]. Elérhető: https://www.gluegun.com/blogs/tips-tutorials/the-complete-guide-to-bonding-rubber?srsltid=AfmBOoqJofwxHXKPOf-_BjPWertCiJH1vCJG_gZjn_6q4VOq9JpvJTHX
- [34] Csernák Gábor, “Statika,” Oct. 2022.
- [35] “What is friction? | Live Science.” Megtekintve: Apr. 14, 2026. [Online]. Elérhető: <https://www.livescience.com/37161-what-is-friction.html>
- [36] “MISUMI - Friction and friction coefficient.” Megtekintve: Apr. 18, 2026. [Online]. Elérhető: <https://uk.misumi-ec.com/en/techblog/general-info/friction-and-friction-coefficient-determination-of-friction-values-of-materials/>
- [37] “6. fejezet - Súrlódás modellek és kompenzációja.” Megtekintve: Apr. 18, 2026. [Online]. Elérhető: <https://mogi.bme.hu/TAMOP/robotalkalmazasok/ch06.html#ch-6.2.1>
- [38] “Rubber Friction Coefficient - Power Rubber.” Megtekintve: Apr. 18, 2026. [Online]. Elérhető: https://powerrubber.com/en/blog/rubber-friction-coefficient?srsltid=AfmBOoo4XAZvorFLxsII_yFM5wmaRJSvr7NellYUr2JR2Cgg8FFc7Igs
- [39] “Cserepofák 150mm műhelysatuhoz 21mm.” Megtekintve: Apr. 18, 2026. [Online]. Elérhető: <https://www.szerszamia.hu/termek/cserepofak-150mm-muhelysatuhoz-21mm/CR-KEN5673660K>
- [40] “Színesfém minőségek.” Megtekintve: Apr. 19, 2026. [Online]. Elérhető: <https://ferropont.hu/hasznos-infok/szinesfem-minosegek>
- [41] thyssenkrupp, “Mechanical properties at room temperature (extruded rod/bar and tube)”, Megtekintve: Apr. 19, 2026. [Online]. Elérhető: https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/_legacy/UCPthyssenkruppBAMXUK/assets.files/material-data-sheets/aluminium/aluminium-6060.pdf
- [42] “Kompakt henger ADN-50-20-A-P-A | Festo HU.” Megtekintve: Apr. 28, 2026. [Online]. Elérhető: <https://www.festo.com/hu/hu/a/536313/?q=adn-50-20%7E%3AsortByCoreRangeAndNewProductAndProductSeriesSequence>

- [43] “Vezetőperselyek vállal, bronz, karbantartásmentes | norelem HU.”
Megtekintve: Apr. 29, 2026. [Online]. Elérhető:
https://www.norelem.hu/hu/Term%3%A9kek+%3%A1ttekint%3%A9se/Rendszerek-%3%A9s-komponensek-a-g%3%A9p--%3%A9s-berendez%3%A9sgy%3%A1rt%3%A1shoz/23000/Sikl%3%B3csap%3%A1gyak/Vezet%5%91perselyek-v%3%A1llal-bronz-karbantart%3%A1smentes/p/agid.30635?q=%3A%3AallowedBaseStoresForProducts%3AN_3000_10_10_hu
- [44] Bossard, “Preload and tightening torques,” 2026, Megtekintve: May 04, 2026. [Online]. Elérhető:
https://assets.eu.ctfassets.net/0vp0u5uh75zd/3S40LEUM235Qk3rJk2phR1/c715f9f45232756c12b59aa681c7fede/060_074_Preload_tightening_torque_s_Fastening_EN_01_2025.pdf