

## Anyagvizsgálati mérési terv gumialkatrészek végeeselemes modellezéséhez

### Material test measurement plan for finite element modelling of rubber components

VARGA Tamás Antal<sup>1,2,3</sup>, Dr. FAZEKAS Bálint<sup>3,4</sup>, Dr. MANKOVITS Tamás<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Debreceni Egyetem Pekár Imre Gépészeti Tudományok Doktori Iskola, H-4028 Debrecen, Ótetető utca 2-4., <https://engphd.unideb.hu/>

<sup>2</sup> Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, H-4028 Debrecen, Ótetető utca 2-4., <https://mecheng.unideb.hu/>

<sup>3</sup> Robert Bosch Kft., H-1103 Budapest, Gyömrői út 104. <https://www.bosch.hu/>

<sup>4</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., <https://gt3.bme.hu/>

Email: [varga.tamas@eng.unideb.hu](mailto:varga.tamas@eng.unideb.hu), [fazekas.balint@gt3.bme.hu](mailto:fazekas.balint@gt3.bme.hu), [tamas.mankovits@eng.unideb.hu](mailto:tamas.mankovits@eng.unideb.hu)

#### Abstract

*The aim of the research is to develop a material testing measurement plan that provides a reliable basis for finite element modelling of rubber components. Rubber materials are capable of large deformations and have time- and temperature-dependent properties, therefore the determination of appropriate material parameters is a prerequisite for the accurate numerical simulation. The aim of the measurement plan is to identify the material properties and to determine the stiffness and damping coefficients for the hyperelastic, viscoelastic models.*

**Keywords:** material characterization, rubber, material testing, dynamic mechanical analysis, finite element method

#### Kivonat

*A kutatás célja egy olyan anyagvizsgálati mérési terv összeállítása, amely megbízható alapot biztosít gumialkatrészek végeeselemes modellezéséhez. A gumianyagok nagy deformációkra képesek, valamint idő- és hőmérsékletfüggő tulajdonságokkal rendelkeznek, ezért a pontos numerikus szimuláció elengedhetetlen feltétele a megfelelő anyagparaméterek meghatározása. A mérési terv célja a hiperelasztikus, viszkoelasztikus modellekhez szükséges anyagjellemzők azonosítása és merevségi és csillapítási tényező meghatározása.*

**Kulcsszavak:** anyagkarakterizálás, gumi, anyagvizsgálat, dinamikus mechanikai analízis, végeeselem módszer

## 1. BEVEZETÉS

A gépészetben széles körben alkalmaznak gumi- és gumiszzerű anyagokat (például tömitések, perselyek, felfüggesztő elemek), amelyek jellemzően a csatlakozó elemek tömitését, a gyártási toleranciákból adódó eltérések kompenzálását, valamint a rezgések csillapítását biztosítják [1]. Ez annak köszönhető, hogy ezen anyagok jelentős alakváltozások elviselésére képesek [2].

A gumianyagok viselkedését jelentősen befolyásolja a hőmérséklet, a terhelési sebesség, valamint az időfüggő jelenségek, például a kúszás és a relaxáció. Ennek következtében ezen anyagok végeeselemes szimulációja komplex feladat, amelyhez megfelelő ún. anyagkártya kialakítása szükséges, ami széleskörű laboratóriumi méréseket igényel.

A mérési terv elsődleges célja a hiperelasztikus (kvázi-egyensúlyi, nemlineáris alakváltozási) és a viszkoelasztikus (idő- és hőmérsékletfüggő, csillapítással járó) modellekhez szükséges anyagjellemzők, valamint a merevségi és csillapítási tényezők meghatározása. Ennek érdekében laboratóriumi méréseket végzünk egytengelyű húzó-, nyomó- és nyíróvizsgálatokkal, továbbá a dinamikus anyagtulajdonságok meghatározására dinamikus mechanikai analízist (DMA) alkalmazunk [3,4].

A mérési terv részét képezi a hőmérsékletfüggő vizsgálat is, mivel a gumialkatrészek mechanikai tulajdonságai a járműipari alkalmazás során jelentős mértékben változhatnak. Az ismertetett mérési terv hozzájárul ahhoz, hogy a végeelemes szimulációk nagyobb pontossággal írják le a valós viselkedést, ezáltal támogatva a termékfejlesztést, az élettartam-becslést és a szerkezetoptimalizálást.

A jelen publikáció nem kísérleti eredményeket mutat be, hanem ismerteti a mérési terv logikai felépítését, szabványos kapcsolódásait és a végeelem-módszerhez illeszkedő adatfeldolgozási és paraméterazonosítási keretrendszert [5].

## 2. ANYAG ÉS MÓDSZER

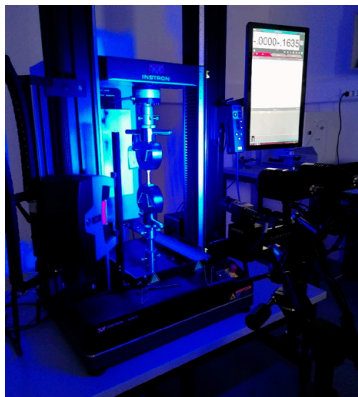
A vizsgálati alapanyagot 60 Shore A névleges keménységű természetes gumi (NR) képezi, amelyet előszeretettel alkalmaznak autóiipari alkatrészek csatlakozásainál rezgéscsillapításra és toleranciahibák kompenzálására. Az alkalmazási hőmérséklet-tartomány  $-40^{\circ}\text{C}$  és  $+125^{\circ}\text{C}$  közé esik, amelyre az anyag alkalmas.

A keménység ismerete hasznos kiindulási információ az anyag viselkedésének előzetes becsléséhez, azonban nem elegendő a végeelemes szimulációhoz szükséges anyagkártya meghatározásához. A szakirodalomban található közelítő összefüggések a benyomódásos keménység és a Young-modulus között, amelyek előzetes végeelemes vizsgálatokhoz alkalmazhatók [6]. Ezek segítségével megbecsülhetők a várható erők és deformációk, ami támogatja a megfelelő anyagvizsgáló berendezések kiválasztását [2,7].

A későbbi autóiipari alkatrészszimulációk során vizsgálni kívánjuk az alkatrészek szilárdságtani tulajdonságait, kifáradását, sajátfrekvenciáját, valamint a vibrációalapú kifáradást is. Ezen terhelések modellezéséhez a hiperelasztikus és viszkoelasztikus anyagparaméterek meghatározása elengedhetetlen.

A kvázi statikus vizsgálatokat egy Instron 68TM-10 típusú elektromechanikus egytengelyű anyagvizsgáló géppel tervezzük elvégezni, amely a Debreceni Egyetem Műszaki Karának Gépészmérnöki Tanszékén működő Műanyag- és Gumi Anyagvizsgáló Laboratóriumban található. A berendezés érintésmentes videoextenzométerrel és GOM ARAMIS optikai mozgás- és deformációmérő rendszerrel van felszerelve. Az anyagvizsgálathoz 500 N-os erőmérő cellát fogunk alkalmazni, és a hőmérséklet függő vizsgálatához egy Instron hőkamrát alkalmazunk, amely  $-75^{\circ}\text{C}$  és  $+350^{\circ}\text{C}$  között képes működni, amelynek belső mérete 660 mm x 240 mm x 230 mm.

A sajátfrekvencia elemzéshez és a vibráción alapuló kifáradás végeelem modellhez elengedhetetlen meghatározni a frekvenciafüggő csillapítási és merevségi tényezőket. Ezen értékeket egy Metravib DMA dinamikus mechanikai elemzőeszközzel fogjuk elvégezni, amely a Debreceni Egyetem Kémiai Intézetében található meg [8].



1a. ábra. Instron 68TM-10 típusú, elektromechanikus egytengelyű anyagvizsgáló GOM ARAMIS optikai mozgás mérő rendszerrel.



1b. ábra. Metravib DMA berendezés

## 3. KVÁZI STATIKUS VIZSGÁLATOK

A hiperelasztikus és viszkoelasztikus anyagtulajdonságok meghatározására kvázi statikus vizsgálatokat végzünk. Az anyagkártya előállításához elegendő lenne egy igénybevétel vizsgálata is, viszont a pontosabb modell előállításához három igénybevételt (húzó, nyomó, nyíró) kívánunk megvizsgálni laboratóriumi mérésekkel, amelyet a következőkben kívánunk bemutatni. A mérési típusoknál átlagosan 3 darab próbatestet kívánunk mérni.

### 3.1. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálat során figyelembe kívánjuk venni az alapanyagunk hőmérséklet függését, így ehhez hőkamrát is fogunk használni az anyagvizsgáló gépnél. A vizsgálat az ISO 37 szabványt követi, ISO 37 Type 1-es próbatestekkel 2 mm-es falvastagsággal [9]. A szakítóvizsgálatokhoz összesen 39 darab ISO 37 Type 1 próbatestre lesz szükségünk. Az alkalmazott előfeszítési erő nagysága minden esetben 0,5 N. A vizsgálatok során meg kívánjuk vizsgálni az alapanyag sebességfüggő (dinamikus) viselkedését különböző vizsgálati sebességek alkalmazásával, illetve ciklikus nyúlás alkalmazásával a Mullins hatást. A pontos vizsgálati paramétereket az 1. táblázat tartalmazza.

Szakítóvizsgálatok paraméterei

1. táblázat

Vizsgált paraméterek	Hőmérséklet függő vizsgálat	Sebességfüggő vizsgálat	Ciklikus nyúlás vizsgálat
Hőmérséklet tartomány	-40°C/20°C/80 °C/125°C	20°C	20°C
Vizsgálati sebesség	100 mm/min	1/10/100/500 mm/min	100 mm/min
Alkalmazott nyúlás ( $\epsilon$ )	-	-	0,1/0,2/0,5
Próbatest mennyiség	5x3=15 darab (ISO 37 Type 1)	4x3=12 darab (ISO 37 Type 1)	3 darab (ISO 37 Type 1)

Ezen kívül ennél a vizsgálati módszernél a feszültségrelaxációt is meg kívánjuk vizsgálni, amely a következő lépésekből fog felépülni a mérési sor ( $\epsilon=0,1/0,3/0,5$  fajlagos nyúlás mellett):

1. Előfeszítés 0,5 N erővel;
2. A legnagyobb vizsgálati sebességgel ( $v=500$  mm/min), a megadott nyúlás értékbe mozgatni;
3. 6 órán keresztül ott tartani, majd tehermentesítés.

A feszültségrelaxációhoz szükséges próbatest mennyiség: 3x3=9 darab (ISO 37 Type 1).

### 3.2. Nyomóvizsgálat

A nyomóvizsgálatot csak szobahőmérsékleten kívánjuk elvégezni, a hordósodás elkerülése céljából pedig teflon (PTFE) pasztát kívánunk alkalmazni az érintkező felületeken. A vizsgálat során  $\emptyset 12,5$  mm x 6 mm szabványos próbatesteket kívánunk használni az ISO 7743 szabványnak megfelelően [10-11].

A nyomóvizsgálatokhoz összesen 12 darab  $\emptyset 12,5$  mm x 6 mm próbatestre lesz szükségünk. Az alkalmazott előfeszítési erő nagysága minden esetben 10 N. A vizsgálatok során meg kívánjuk vizsgálni az alapanyag sebességfüggő és ciklikus nyúlás viselkedését. A tervezett vizsgálati paramétereket a 2. táblázat tartalmazza.

Nyomóvizsgálatok paraméterei

2. táblázat

Vizsgált paraméterek	Sebesség függő vizsgálat	Ciklikus nyúlás vizsgálat
Hőmérséklet tartomány	20°C	20°C
Vizsgálati sebesség	1/10/100 mm/min	100 mm/min
Alkalmazott nyúlás	-	0,1/0,3/0,5
Próbatest mennyiség	3x3=9 darab ( $\emptyset 12,5$ mm x 6 mm)	3 darab ( $\emptyset 12,5$ mm x 6 mm)

### 3.3. Nyíró vizsgálat

A nyíróvizsgálatot is csak szobahőmérsékleten kívánjuk elvégezni az ISO 1827 szabvány alapján [12]. A vizsgálat során három acéllemez közé kívánunk beragasztani epoxy-val összesen 2 darab 20 x 25 x 2 mm-es gumi próbatestet. A nyíróvizsgálatokhoz összesen 12 darab ragasztott próbatestre lesz szükségünk, amelyhez 36 darab 20 x 25 x 2 mm-es gumilapra lesz szükségünk.

Az alkalmazott előfeszítési erő nagysága minden esetben 5 N. A vizsgálatok során meg kívánjuk vizsgálni az alapanyag sebesség függő és ciklikus nyúlás viselkedését. A pontos vizsgálati paramétereket a 3. táblázat tartalmazza.

Vizsgált paraméterek	Sebesség függő vizsgálat	Ciklikus nyúlás vizsgálat
Hőmérséklet tartomány	20°C	20°C
Vizsgálati sebesség	1/10/100 mm/min	100 mm/min
Alkalmazott nyírás	-	0,2/0,4/0,8
Próbatest mennyiség	3x3=9 darab (18 darab 20 x 25 x 2 mm gumilap)	3 darab (6 darab 20 x 25 x 2 mm gumilap)

#### 4. DINAMIKUS MECHANIKAI VIZSGÁLATOK

A dinamikus mechanikai vizsgálatok eléggé komplexek és költségesek, úgyhogy ennek a mérési módnak a variációit leginkább az anyagiak befolyásolják. A vizsgálatokat lehetőség szerint húzó- és nyíró módban kívánjuk elvégezni, amennyiben lehetőség van rá még a nyomóvizsgálat és a három pontos hajlítás is érdekes lehet számunkra. A vizsgálatot -70°C és +165°C között kívánjuk elvégezni 0,5 Hz és 50Hz frekvencia tartományban. A mérések során meg kívánjuk határozni az üvegesedési hőmérsékletet is a termomechanikai elemzés (TMA) segítségével.

A méréseket két módszer alapján kívánjuk elvégezni:

- Frekvencia-sweep söprés, ahol mérés során a harmonikus gerjesztés amplitúdója állandó, változó hőmérséklettel.
- Amplitúdó-sweep söprés, ahol a frekvencia és a hőmérséklet állandó, viszont az amplitúdó változik. Ezen mérési eljárással kimutatható az ún. Payne-hatás, amelyet a kutatásunk során meg kívánunk vizsgálni.

#### 5. KÖVETKEZTETÉSEK

A bemutatott mérési terv komplex, több vizsgálatfajtából álló rendszer, amely lehetővé teszi a vizsgált gumipersely szilárdságtani, kifáradási és frekvenciafüggő tulajdonságainak átfogó jellemzését.

Az időtartományban végzett kvázi statikus mérésekkel (húzó, nyomó, nyíró vizsgálatok) a gumi alapanyag nemlineárisan rugalmas viselkedését vizsgáljuk, amelyek hiperelasztikus anyagmodellek kalibrálására alkalmasak. A ciklikus nyúlás vizsgálata során kívánjuk jellemezni a gumikra jellemző Mullins hatást. A dinamikus mechanikai vizsgálatok (DMA) során az alapanyag viszkoelasztikus viselkedését határozzuk meg, amely alkalmas a hőmérséklet és frekvencia függő viszkoelasztikus modell illesztéséhez, valamint a hőmérséklet-idő ekvivalencia elvének alkalmazására.

A mérési terv kidolgozása a kutatás alapvető lépése volt, mivel ennek segítségével meghatározhatóvá vált a szükséges vizsgálatok köre, a szükséges berendezések típusa, valamint a szükséges alapanyag-mennyiség. A mérésekhez kapcsolódó infrastruktúra a Debreceni Egyetemen rendelkezésre áll, így a mérési sorozat helyben elvégezhető.

A következő lépés a laboratóriumi mérések végrehajtása és az azokból származtatott anyagkártya létrehozása a végeleemes szimulációkhoz. A jövőbeni cél az anyagkártya validálása a laboratóriumi vizsgálatok alapján felépített végeleemes modellek segítségével.

#### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„A Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-KDP-2025 kódszámú Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program – Kooperatív Doktori Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.”



## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Sári-Barnác V.; Fazekas B.; Goda T. *Methods of Function Based Engineering of Automotive Safety Critical Sealing Systems*. Safety and Security Sciences Review, 2025, 7., 71, doi:10.12700/btsz.2025.7.2.71.
- [2] Kayacı S.; Kaya N. *Experimental and Constitutive Modelling of Viscoelastic Responses in Carbon Black-Filled Natural Rubber Under Cyclic and Relaxation Loading*. Polymers, 2025, 17, 3091, doi:10.3390/polym17233091.
- [3] Park S.-J. *Comparative Study on Hyperelastic Constitutive Models for the Static and Dynamic Behavior of Resilient Mounts*. Materials, 2025, 18, 311, doi:10.3390/ma18020311.
- [4] Zhao Z.; Meng W.; Yan B.; Liang H.; Geng Y.; Sun Z. *Study on the Dynamic Characteristics of Low-Frequency High-Stiffness Viscoelastic Damping Structures*. Materials, 2025, 18, 1446, doi:10.3390/ma18071446.
- [5] Kraus M.A.; Schuster M.; Kuntsche J.; Siebert G.; Schneider J. *Parameter Identification Methods for Visco- and Hyperelastic Material Models*. Glass Struct Eng, 2017, 2, 147–167, doi:10.1007/s40940-017-0042-9.
- [6] Randler R.; Kaelin R.; Bissig S.; Nejati M.; Amstutz C. *Material Models for Rubber Based on Indentation Hardness: Comparison between Theory and Simulation*. Polymer Testing, 2025, 152, 108996, doi:10.1016/j.polymertesting.2025.108996.
- [7] Labonte D.; Lenz A.-K.; Oyen M.L. *On the Relationship between Indentation Hardness and Modulus, and the Damage Resistance of Biological Materials*. Bioengineering, 2017.
- [8] Müller-Pabel M.; Rodríguez Agudo J.A.; Gude M. *Measuring and Understanding Cure-Dependent Viscoelastic Properties of Epoxy Resin: A Review*. Polymer Testing, 2022, 114, 107701, doi:10.1016/j.polymertesting.2022.107701.
- [9] ISO 37 szabvány: *Gumi, vulkanizált vagy hőre lágyuló - A húzófeszültség-nyúlási tulajdonságok meghatározása*, 2024.
- [10] Huri D. *Prediction Accuracy of Hyperelastic Material Models for Rubber Bumper under Compressive Load*. Polymers, 2024, 16, 2534, doi:10.3390/polym16172534.
- [11] ISO 7743 szabvány: *Vulkanizált vagy hőre lágyuló gumi. Nyomófeszültség-alakváltozási jellemzők meghatározása*, 2017.
- [12] ISO 1827 szabvány: *Vulkanizált vagy hőre lágyuló gumi. A nyírési modulus és a merev lapokhoz való tapadás meghatározása. Négyzetes nyírési módszerek*, 2022.