



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

Út- és Vasútépítési Tanszék

**A VASÚTI PÁLYA ZAJ- ÉS REZGÉSCSILLAPÍTÓ
KAMRAELEMINEK ELMÉLETI ÉS LABORATÓRIUMI
VIZSGÁLATA**

*Tudományos Diákköri Konferencia
2014*



Csortos Gabriella

Infrastruktúra-építőmérnök hallgató, Közlekedési létesítmények szakirány
BSc IV. évfolyam

Konzulensek:

Dr. Kazinczy László, Út- és Vasútépítési Tanszék, egyetemi docens

Dr. Augusztinovicz Fülöp, Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék, egyetemi tanár

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Pásztor Józsefnek a SPED-M Kft-től, Fejérváry Gézának a GRANUFLEX Kft-től, valamint Felföldi Károlynak a STRAILastic-tól, hogy segítették dolgozatom és kutatási munkámat azzal, hogy kölcsönöztek nekem zaj- és rezgéscsillapító kamraelemeket. Továbbá köszönöm Nekik azt, hogy biztosították a laboratóriumban összeállított rendszerem alkotóelemeit (sín, sínleerősítések és betonlajak).

*Köszönöm konzulenseimnek, **Dr. Kazinczy Lászlónak** és **Dr. Augusztinovicz Fülöpnek**, hogy lehetővé tették számomra a projektben való részvételt, biztosították a munka feltételeit, szakirodalommal és tanácsaikkal láttak el a munkám során.*

*Külön köszönettel tartozom, **Dr. Augusztinovicz Fülöpnek**, hogy az általa vezetett, a Villamosmérnöki és Informatikai Karhoz tartozó Hangtechnikai és Stúdiótechnikai Laboratóriumban dolgozhattam. Köszönöm Neki azt, hogy bevezetett a rezgés- és az akusztika rejtelmébe, átadta tudását a móduselemzésről, megtanította a szerkezeti végelem program használatát, vezette méréseimet és végigkísérte munkámat.*

KIVONAT

Ma, a XXI. században egyre égetőbb kérdést jelent a környezetvédelem. A vasúti pálya, mint közlekedési létesítmény, valamint az azon közlekedő járművek és szerelvények jelentős zajhatással terhelik a környezetet. A jellemző zajforrás a kerék-sín kapcsolatból származó gördülési zaj, közúti vasútnál jellemzően a kissugarú ívekben kritikus. A pályák közvetlen közelében élők számára nagyon zavaró lehet a zajterhelés, valamint a rezgések által okozott kellemetlenségek.

A megengedhető zajszint előírások és határértékek meglehetősen szigorúak, betartatásuk azonban sok problémát vet fel. Ma a legelterjedtebb zajcsökkentési megoldás a zajvédő falak alkalmazása. A városokban a lakások ablakainak cseréjével is próbálnak védekezni az emberek, ez viszont nem a megfelelő megoldása a problémának. A probléma megoldásával kapcsolatos dolgozatom témája, miszerint a vasúti közlekedés által keletkezett zaj- és rezgésterheléseket más úton kell csökkenteni. Az utóbbi években többféle elem jelent meg a piacon, ami a vasúti pálya által keletkezett zajt illetve rezgést csillapítja. Ilyenek: ágyazati szőnyeg, rugalmas sínlátét, közbetét, aljpacucs, valamint új „idegen” elemként a pályában, a sínkamra elemek, amelyek vizsgálataim és dolgozatom témáját képezik.

Külföldön számos cég gyárt sínkamra elemeket, amiket alkalmaznak is. Hazánkban még nem terjedt el ezeknek az elemeknek a használata. Dolgozatom fő célja ezen elemek hatékonyságának szabályozott, laboratóriumi keretek között történő vizsgálata és összehasonlítása, ezáltal a hazai gyártás hatékonyságának alátámasztása és elősegítése. Magyarországon alkalmazásban vannak olyan elemek, amelyeket külföldön gyártanak, de megjelentek hazai gyártók is, akiknek az elemeit szintén lehetőségem volt vizsgálni. Többfajta zaj- és rezgéscsillapító sínkamra elemet bocsátottak rendelkezésemre, amelyeket azonos körülmények között, azonos eszközökkel és metodikával mértem a Villamosmérnöki és Informatikai Kar Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszéke Akusztikai és Stúdiótechnikai Laboratóriumában.

Vizsgálataimat egy 1 méter 20 cm hosszú UIC 60-as sínszálon végeztem. A sínszál két betonlagra volt leerősítve egy VOSSLOH cég által gyártott Skl-1 típusú szorítórugóval kialakított sínleerősítéssel. Ahhoz, hogy egy tudatos vizsgálat jöjjön létre, először a végeelemes modellezést vettem segítségül: MSCNastran szerkezeti végeelem programmal modelleztem a sínszálat, hogy lássam, adott frekvencián miként viselkedik a sínszál, milyenek az egyes sajátrezgések frekvenciái és módusalakjai. Ennek figyelembevételével helyeztem el a sínszál alkalmas pontjain három rezgésérzékelőt, valamint a sínszál közepétől 1 méter távolságra egy mikrofont. A sínszálat 13x2 pontból álló modellel helyettesítettem, amelyeket egyben gerjesztési pontként is felhasználtam. A sínfejet függőleges illetve vízszintes irányból, a sínalpat csak vízszintes irányból ütöttem meg impulzuskalapáccsal, összesen 39 ponton. A mért frekvencia átviteli függvény mátrixból a Test.Lab programcsomag móduselemző modulja segítségével szerkezeti móduselemzést végeztem. Ez volt a mérések összehasonlításának az alapja, a csillapítóelem nélküli sínszál. Ezután ugyanolyan laboratóriumi körülmények mellett, ugyanazon leerősített sínszállra helyeztem fel egyesével a különböző összetételű és geometriájú elemeket. Kétféle felhelyezési módszert alkalmaznak a cégek: voltak ragasztott technikával felrakott, és szerelhető kamraelemek.

Vizsgálati eredményeim, mivel azonos körülmények között mértem az elemeket, összehasonlíthatóak. A kapott adatokból számszerű adatokat nyertem arról, hogy mennyire hatékony a zaj- és rezgéscsillapító elemekkel ellátott sínszál a csillapítás nélküli sínszállal, valamint a különböző cégek által gyártott, más-más geometriájú, összetételű és rögzítésű csillapító elemekkel összehasonlítva. Az összes eredményt figyelembe véve megállapítható, hogy a zaj- és rezgéscsillapító kamraelemek – bizonyos körülmények között - alkalmas eszközt képeznek a vasúti zaj illetve a vasúti pálya rezgésének csökkentésére.

ABSTRACT

Nowadays protection of the environment has become a burning question. The railway as a means of transport is largely responsible for environmental noise pollution. The noise generated by the wheel-rail interaction is called rolling noise, which can become especially critical in case of curves of small radius of public road railways. The population living near the railways is deeply involved in this situation, as people are affected by noise exposure and troubled by railway induced vibrations.

Regulations and the maximum allowed noise level limit are quite strict, and in addition they generate several problems. Nowadays the erection of noise barriers is widespread as the most often applied solution for noise abatement. In the cities people have turned towards other possibilities to avoid this type of pollution. However, alternative methods such as changing the flats' windows can not be a suitable solution to this problem.

I have written my thesis exactly in connection with the solution of this problem, inasmuch as these vibrations and noise exposure produced by railway should be reduced by means of another method. Within the last years many tools and equipments have appeared on the market, and these methods can help avoiding vibrations and noise pollution, like ballast mat, flexible rail pad and rail foot damper, and as a new part on the railway, pieces of the rail chamber damper which I have studied and written about in my essay.

Many companies produce elements of rail chamber damper abroad which have been put into practice too. Unfortunately, the use of these sets has not spread yet in this country. The aim of my essay is to point out the importance and effectiveness of these elements, to be able to compare the results of the examination under appropriate laboratory conditions, which drives to facilitate and support the efficiency of domestic production. In Hungary, different parts are in use, but these are mostly produced outside the country. However, I have had the opportunity to examine the products of foreign and some newly emerged Hungarian manufacturers too.

I could measure different types of rail chamber dampers for vibration and noise abatement by using the same tools and methods under identical conditions. I performed my measurements in the Acoustic Laboratory of the Department of Networked Systems and Services of this university. The rails equipped with the dampers to be investigated were excited by an impulse hammer in many different points, the response measured by three accelerometers and a measuring microphone, and the obtained frequency response functions were processed by using the structural modal analysis program package LMS Test.Lab.

The results of the measurements can be directly compared, since I have measured the testing objects under identical or comparable conditions. As a result I can draw the conclusion, that the rails equipped with various rail chamber dampers are effective but some of them show definitely better performance than some other ones. Taking everything into account it can be proved that these parts are appropriate tools to reduce railway noise and vibration.

TARTALOMJEGYZÉK

ÁBRAJEGYZÉK.....	7
KÉPJEGYZÉK.....	9
TÁBLÁZATJEGYZÉK.....	10
1. BEVEZETÉS	12
2. A VASÚTI KÖZLEKEDÉS ZAJ- ÉS REZGÉSHATÁSAI	13
2.1. Zaj és rezgés fogalma.....	13
2.2. A vasúti járművek fontosabb zajforrása	14
2.2.1. Futómű.....	14
2.2.2. Járműszekrény	15
2.2.3. Gépészeti részek.....	15
2.3. A vasúti járművek zajszintjét befolyásoló egyes tényezők	15
2.3.1. Gördülőállománytól függő tényezők	15
2.3.2. Felépítménytől függő tényezők.....	15
2.4. Gördülési zaj	16
2.5. Fékezési zaj	17
2.6. A vasúti közlekedés által keletkező rezgés	18
2.7. A vasúti közlekedés által keltett rezgés.....	18
3. ZAJ- ÉS REZGÉSHATÁSOKKAL KAPCSOLATOS KÖRNYEZETVÉDELMI ELŐÍRÁSOK	19
3.1. Magyarország Alaptörvénye	19
3.2. A környezetvédelmi törvény	19
3.3. Zaj- és rezgésvédelem.....	19
3.4. 27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM együttes rendelet	20
3.4.1. A környezeti zaj- és rezgésterhelési határértékek megállapításáról	20
3.4.2. 1. § E rendelet alkalmazásában	20
3.4.3. 4. §	21
3.5. A közlekedéstől származó zaj terhelési határértékei a zajtól védendő területeken.....	22
4. A VASÚTI KÖZLEKEDÉS ZAJ- ÉS REZGÉSHATÁSAINAK CSILLAPÍTÁSI LEHETŐSÉGEI	23
4.1. Zajcsökkentés módozatai	23
4.1.1. Közvetlen zajcsökkentés.....	23
4.1.2. Közvetett zajcsökkentés.....	23
4.2. A vasúti zajterhelés aktív zajcsökkentés terén.....	23
4.3. A vasúti zajterhelés Passzív zajcsökkentés terén	24
4.4. A vasúti zajterhelés csökkentése a felépítményi szerkezet megválasztásától függően ..	24
4.5. A vasúti pálya zaj- és rezgéscsillapító kamraelemei.....	26

5.	ELMÉLETI HÁTTÉR	27
5.1.	Egyszabadságfokú rendszerek.....	27
5.2.	Többszabadságfokú rendszerek	31
6.	SZERKEZETI VÉGESELEM MODELLEZÉS	33
6.1.	Geometria	33
6.2.	Rácshálók	34
6.3.	Anyagjellemzők, property	35
6.4.	Analízis	36
6.5.	Sajátfrekvenciák, módusalakok	36
6.6.	Leerősített sínszál	37
6.7.	Összehasonlítás.....	40
6.8.	Értékelés, következtetés	40
7.	MÉRÉSTECHNIKA	41
8.	VIZSGÁLT ZAJ- ÉS REZGÉSCSILLAPÍTÓ KAMRAELEMELK	45
8.1.	SPED-M Kft. elemei.....	45
8.2.	GRANUFLEX Kft. elemei.....	51
8.3.	STRAILastic eleme	54
9.	SZERKEZETI MÓDUSELEMZÉS	56
10.	REZGÉSCSILLAPÍTÁS EREDMÉNYEK	59
10.1.	SPED-M Kft. elemeinek eredményei	60
10.2.	GRANUFLEX Kft. elemeinek eredményei	62
10.3.	STRAILastic elemének eredménye	65
10.4.	Összehasonlítások, értékelések	67
11.	HANGLESUGÁRZÁS EREDMÉNYEK	71
11.1.	Zajcsillapítás eredmények.....	72
11.1.1.	<i>GRANUFLEX Kft. kamraelemeinek mikrofon által mért eredményei</i>	73
11.1.2.	<i>SPED-M Kft. kamraelemeinek mikrofon által mért eredményei.....</i>	75
11.1.3.	<i>STRAILastic kamraelemének mikrofon által mért eredménye.....</i>	77
11.1.4.	<i>Ragasztott és felszerelt zajcsillapítók összehasonlítása</i>	78
12.	ÖSSZEGZÉS	81
12.1.	Értékelés	81
12.2.	Továbbhaladási irány	82
13.	IRODALOMJEGYZÉK, FORRÁSOK	83

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra	A kerék-sín kapcsolatából származó hatások	17
2. ábra	A passzív akusztikai védelem lehetőségei	24
3. ábra	Sín-kerék kapcsolatából keletkező zajok és rezgések folyamatábrája	25
4. ábra	Klasszikus felépítményi ábra	25
5. ábra	Egyszabadságfokú rendszer	27
6. ábra	Végtelen szinuszos harmonikus rezgőmozgás	28
7. ábra	Csillapított rezgőmozgás	29
8. ábra	Komplex számsíkon elhelyezkedő lehetséges gyökök	29
9. ábra	Rendszerek csoportosítása a csillapítási viszony szerint	30
10. ábra	Kétszabadságfokú rendszer	31
11. ábra	UIC 60-as sínrendszer keresztmetszeti geometriája	34
12. ábra	UIC 60-as sínrendszer keresztmetszetének rácshálója	34
13. ábra	UIC 60-as sínrendszerű szabad sínszál végeelem modellje	35
14. ábra	Szabad sínszál módusalakja 310,58 Hz frekvencián	36
15. ábra	Szabad sínszál módusalakja 731,27 Hz frekvencián	36
16. ábra	Szabad sínszál módusalakja 769,23 Hz frekvencián	37
17. ábra	Szabad sínszál módusalakja 1340,4 Hz frekvencián	37
18. ábra	Sínleerősítéssel ellátott sínszál végeelem modellje	38
19. ábra	Leerősített sínszál módusalakja 310,59 Hz frekvencián	38
20. ábra	Leerősített sínszál módusalakja 731,37 Hz frekvencián	39
21. ábra	Leerősített sínszál módusalakja 769,43 Hz frekvencián	39
22. ábra	Leerősített sínszál módusalakja 1341,2 Hz frekvencián	39
23. ábra	A sínszál helyettesítő modellje a gerjesztési pontokkal	41
24. ábra	Rezgésérzékelők helye a helyettesítő modellen ábrázolva	42
25. ábra	SOFIDON-F sínkamra betét elhelyezése vágányban, keresztmetszet	46
26. ábra	SOFIDON-F sínkamra betét keresztmetszete, FKG zavartalan működése	47
27. ábra	SOFIDON-F sínkamra betét kiosztása vágányban	47
28. ábra	GRANUFLEX Kft. elemeinek keresztmetszete	51
29. ábra	STRAILastic_A_inox kamraelem beépítve az élőpályában	54
30. ábra	A 3 gyorsulásérzékelő által mért eredmények a sínfej 7-es pontját vízszintes irányban gerjesztve	57

31. ábra A 3 gyorsulásérzékelő által mért eredmények a sínfej 7-es pontját függőleges irányban gerjesztve	58
32. ábra Sínszál módusalakja ~220 Hz frekvencián	60
33. ábra Sínszál módusalakja ~320 Hz frekvencián	60
34. ábra Sínszál módusalakja ~800 Hz frekvencián	61
35. ábra Sínszál módusalakja ~1320 Hz frekvencián	61
36. ábra Sínszál módusalakja ~1990 Hz frekvencián	61
37. ábra Sínszál módusalakja ~320 Hz frekvencián	63
38. ábra Sínszál módusalakja ~730 Hz frekvencián	63
39. ábra Sínszál módusalakja ~780 Hz frekvencián	63
40. ábra Sínszál módusalakja ~1305 Hz frekvencián	64
41. ábra Sínszál módusalakja ~1875 Hz frekvencián	64
42. ábra Sínszál módusalakja ~1975 Hz frekvencián	64
43. ábra Sínszál módusalakja ~220 Hz frekvencián	65
44. ábra Sínszál módusalakja ~315 Hz frekvencián	65
45. ábra Sínszál módusalakja ~1310 Hz frekvencián	66
46. ábra Sínszál módusalakja ~1980 Hz frekvencián	66
47. ábra Sínszál módusalakja ~320 Hz frekvencián	67
48. ábra Sínszál módusalakja ~780 Hz frekvencián	68
49. ábra Sínszál módusalakja ~1315 Hz frekvencián	69
50. ábra GRANUFLEX Kft. kamraelemeinek mikrofon által mért eredményei	73
51. ábra SPED-M Kft. kamraelemeinek mikrofon által mért eredményei	75
52. ábra SPED-M Kft. kamraelemeinek mikrofon által mért eredményei	77
53. ábra GRANUFLEX Kft. kamraelemeinek mikrofon által mért eredményei, ragasztott és szerelt felhelyezési módszer összehasonlítása.....	79
54. ábra SPED-M Kft. kamraelemeinek mikrofon által mért eredményei, ragasztott és szerelt felhelyezési módszer összehasonlítása.....	80

KÉPJEGYZÉK

1. kép	Laboratóriumban összeállított mérési rendszer (jobbról balra számozva)	44
2. kép	Laboratóriumban összeállított mérési rendszer (balról jobbra számozva)	44
3. kép	SOFIDON-F kamraelem élőpályába beépítve	48
4. kép	SOFIDON-F kamraelem oldalról	48
5. kép	A laboratóriumban összeállított rendszer a SOFIDON-F típusú kamraelemmel	48
6. kép	SOFIDON-T típusú rendszer szerelhető formában rögzítve a sínszálon	49
7. kép	SOFIDON-T típusú kamraelem szerelve	50
8. kép	SOFIDON-T típusú kamraelem ragasztott módszerrel felhelyezve.....	50
9. kép	SOFIDON-T típusú rendszer ragasztással rögzítve a sínszálon.....	50
10.kép	GRANUFLEX kamraelem szorítókkal felhelyezve	52
11.kép	GRANUFLEX kamraelem szorítókkal felhelyezve, oldalról.....	52
12.kép	GRANUFLEX kamraelem ragasztva, mérés közben	53
13.kép	STRAILastic_A_inox kamraelem beépítve az élőpályában	54
14.kép	STRAILastic_A_inox típusú kamraelem a laborban összeállított rendszerre felhelyezve.....	55
15.kép	STRAILastic_A_inox típusú kamraelem oldalról	55
16.kép	Mikrofon mérési helye	71

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat	Környezetünkben előforduló néhány hangjelenség műszerrel mérhető zajszintje	13
2. táblázat	A zaj emberi szervezetre gyakorolt hatása a hangosság függvényében.....	14
3. táblázat	Vonatok hangszintje 1 m-es magasságban a vágánytengelyre merőlegesen mérve	16
4. táblázat	A közlekedéstől származó zaj terhelési határértékei a zajtól védendő területeken	22
5. táblázat	Sajátfrekvenciák értékei azonos módusalaknál	40
6. táblázat	Használt eszközök és a rezgésérzékelők valódi helye.....	43
7. táblázat	GRANUFLEX Kft. elemek anyagának összetétele.....	51
8. táblázat	A csillapítatlan sínszál és a SPED-M Kft. kamraelemeinek sajátfrekvenciái és csillapítási tényezői.....	60
9. táblázat	32. ábrához tartozó értékek	60
10. táblázat	33. ábrához tartozó értékek	60
11. táblázat	34. ábrához tartozó értékek	61
12. táblázat	35. ábrához tartozó értékek	61
13. táblázat	36. ábrához tartozó értékek	61
14. táblázat	A csillapítatlan sínszál és a GRANUFLEX Kft. kamraelemeinek sajátfrekvenciái és csillapítási tényezői.....	62
15. táblázat	37. ábrához tartozó értékek	63
16. táblázat	38. ábrához tartozó értékek	63
17. táblázat	39. ábrához tartozó értékek	63
18. táblázat	40. ábrához tartozó értékek	64
19. táblázat	41. ábrához tartozó értékek	64
20. táblázat	42. ábrához tartozó értékek	64
21. táblázat	A csillapítatlan sínszál és a STRAILastic_A_inox kamraelem sajátfrekvenciái és csillapítási tényezői.....	65
22. táblázat	43. ábrához tartozó értékek	65
23. táblázat	44. ábrához tartozó értékek	65
24. táblázat	45. ábrához tartozó értékek	66
25. táblázat	46. ábrához tartozó értékek	66
26. táblázat	47. ábrán látható módusalakhoz tartozó kamraelemek eredményeinek összehasonlítása	67
27. táblázat	48. ábrán látható módusalakhoz tartozó kamraelemek eredményeinek összehasonlítása	68

28. táblázat	<i>49. ábrán látható módusalakhoz tartozó kamraelemek eredményeinek összehasonlítása</i>	69
29. táblázat	<i>A Granuflex Kft. 3-as számú kamraelemének szerelt és ragasztással felhelyezett módszerének összehasonlítása</i>	70
30. táblázat	<i>A SPED-M Kft. SOFIDON-T típusú kamraelemének szerelt és ragasztással felhelyezett módszerének összehasonlítása</i>	70
31. táblázat	<i>50. ábrán látható maximális csúcsok értékei adott frekvencia tartományban</i>	74
32. táblázat	<i>GRANUFLEX Kft. kamraelemeinek zajcsökkentése a csillapítatlan sínszálhoz képest</i>	74
33. táblázat	<i>51. ábrán látható maximális csúcsok értékei adott frekvencia tartományban</i>	76
34. táblázat	<i>SPED-M Kft. kamraelemeinek zajcsökkentése a csillapítatlan sínszálhoz képest</i>	76
35. táblázat	<i>52. ábrán látható maximális csúcsok értékei adott frekvencia tartományban</i>	78
36. táblázat	<i>STRAILastic kamraelemének zajcsökkentése a csillapítatlan sínszálhoz képest</i>	78

1. BEVEZETÉS

Az Európai Unió irányelvek között egyre nagyobb hangsúlyt kap a zaj elleni védelem, hiszen az elmúlt évtizedben a zaj a városi lakosságot terhelő környezeti ártalmak közül – a levegőszennyezés után – a második helyre került. Fokozottan érvényes ez a megállapítás a sűrűn beépített településekre. Határértéken túl van a zajterhelést elszenvedő lakossági arány, a városi lakosság nagy része ki van téve az egészségi állapotát kedvezőtlenül befolyásoló zajterhelésnek. Témám választását ezek a terhelések indokolták, hogy egy manapság fontos, és egyre égetőbb kérdést jelentő problémára a saját szakmámban egy új megoldási lehetőség után kutassak.

Ezen dolgozat, a vasúti pálya zaj- és rezgéscsillapító kamraelemeinek ismertetését, azoknak szabályozott, laboratóriumi keretek között történő vizsgálatát, ezáltal hatékonyságuk mértékének megállapítását és ezeknek az összehasonlítását hivatott bemutatni. Munkám célja között van még a hazai gyártók kísérleti elemeinek hatékonyságának megítélése és alátámasztása, ezáltal a hazai gyártás elősegítése, valamint méréseim iránymutatást és tájékoztatást adnak ezeknek az elemeknek a jövőbeni fejlesztéseiről.

Elsőként egy általános összefoglaló képet szeretnék mutatni a vasúti közlekedés által keletkezett rezgésekről és zajforrásokról. Ismertetem a vasúti közlekedésre vonatkozó zaj- és rezgéshatásokkal kapcsolatos környezetvédelmi előírásokat, ezek után a probléma csökkentésének módzatait. Többféle módszer van a zaj- és rezgéscsillapításra vonatkozóan, viszont én egy új csillapítási eljárást választottam dolgozatom témájának, vagyis a zaj- és rezgéscsillapító sínkamra elemeket.

A mérésem során a kísérleti móduselemzés módszerét alkalmaztam a mechanikai rendszerem, azaz a betonra leeresztett sínszál és az arra felhelyezett kamraelemek vizsgálatára. Bemutatom a móduselemzés elméleti hátterét, majd ismertetem a mérési környezetet és a mérés menetét is. A tudatos, célszerű és eredményes mérések előtt a szerkezeti végelem modellezést vettem segítségül, hogy alkalmas modellt készítek a sínszálról, látva annak viselkedését. A csillapítatlan sínszálat, valamint azt összesen hét különböző geometriájú és összetételű kamraelemmel ellátva, és több elemet szerelve és ragasztási módszerrel felhelyezve is mértem. Méréseim eredményeit táblázatban foglaltam össze, melyeket ábrákkal illusztráltam. A különböző kamraelemek hatékonyságának eredményei összehasonlíthatók.

A kapott eredményekből számszerű adatokat nyertem arról, hogy mennyire hatékonyak kamraelemekkel ellátott sínszál a csillapítás nélküli sínszállal szemben, valamint a cégek által gyártott, más-más geometriájú, összetételű és rögzítésű csillapítóelemek egymással összehasonlítva.

Dolgozatom tisztán kutatási munka eredménye, a tudományt szolgálja és objektív marad végig a különböző cégek eredményeit illetően. A laboratóriumi körülmények mellett nyert eredményeim alátámasztják, hogy a sín kamrájába helyezett elemek alkalmas eszköznek bizonyulnak a zaj- és rezgéscsillapítást illetően.

2. A VASÚTI KÖZLEKEDÉS ZAJ- ÉS REZGÉSHATÁSAI

2.1. Zaj és rezgés fogalma:

Az iparosodás, a közlekedés, a városiasodás fejlődésének kísérőjelensége világszerte a zaj növekedése. A zaj nem kívánatos, akaratunk ellenére a mindennapi élet velejárójaként keletkező hang. Fizikai értelemben a rugalmas közeg, szilárd testek, gázok, és folyadékok mozgása, rezgése során az azt kiváltó energia egy része hullámok formájában távozik, hanggá alakul. A hangnyomás mértékegysége a decibel (dB). Az emberi hallás frekvenciafüggőségének a modellezésére az „A” súlyozószűrőt használják. Ennek segítségével mért zajszint az A-hangnyomásszint, a decibel A (dBA). A környezet zajszintje a hallásküszöb (0 dB) és a fájdalomérzet (110-120 dB) között mozog.

erdő szélcsendben	20 dBA
lakószoba nappal, halk rádió, nagyváros távoli zaja hegyen	40 dBA
irodahelyiség, hangos beszélgetés, vasúti fővonal mellett éjjel	50-60 dBA
teherautóban, főforgalmi út szélén nappal, porszívó 1 méterről	70-80 dBA
mozdony 25 méterre mérve a vágánytengelytől	70-100 dBA
metróállomásra beérkező szerelvény	105 dBA
könnyűzenei koncert	100 dBA felett
sugárhajtású repülőgép közelében	140 dBA

1. táblázat Környezetünkben előforduló néhány hangjelenség műszerrel mérhető zajszintje

A vonatok zajszintje a pálya közelében kb. 85 dBA körül mozog. A hangnak az érzékelhető emberre gyakorolt hatása egyszerre szubjektív és objektív. A fül által érzékelt zajok frekvenciája 20-20.000 Hz között változik. Az emberre gyakorolt hatás függ a rezgés fizikai tulajdonságaitól, a zaj-, ill. rezgésterhelésnek kitett személyek által éppen folytatott tevékenységtől, az egészségi, valamint pihent vagy fáradt állapottól, kortól, stb.

HANGNYOMÁSSZINT [dB]	KÁROSODÁS
30	pszichés
65	vegetatív
90	hallószervi
120	fájdalomküszöb
120-130	maradandó halláskárosodás
160	dobhártyarepedés
175	halálos

2. táblázat A zaj emberi szervezetre gyakorolt hatása a hangnyomásszint függvényében

Zajnak tekintünk minden olyan hangot (függetlenül a hangosságától vagy erősségétől), amely nem kívánatos fiziológiai vagy pszichológiai hatással van az egyes emberekre vagy embercsoportokra. *Környezeti rezgéseknek* nevezzük az olyan vibrációs jelenségeket, amelyek során a környezetből származó, az épületek helyiségeiben az emberre ható és rájuk nézve kellemetlen, zavaró rezgések jönnek létre.

A MÁV Zrt. által elfogadott definíció szerint *a vasúti közlekedési zaj vagy rezgés*: a vasúti pályán – ideértve a vasúti pályaudvart, állomást és megállóhelyet is – történő vasúti közlekedés, továbbá a közlekedés lebonyolításával összefüggő vonattovábbítás, tolatás, elegyrendezés, vasútjármű-üzemeltetés, vasútjármű-tárolás és előfűtés-hűtés, fékpróba megtartás, valamint az üzembiztonsági és utastájékoztató berendezések által kibocsátott zaj vagy rezgés.

2.2. A vasúti járművek fontosabb zajforrásai:

2.2.1. Futómű

- gördülés a sínen
- kerékegyenetlenségek
- sínegyenetlenségek
- alépitmény hatása
- rugózás rendszerének hatása
- fékezés hatása

2.2.2. Járműszekrény

- légörvények
- másodlagos zajok a futóműről
- meglazult elemek
- alkatrészek
- zaj a különféle réseknel

2.2.3. Gépészeti részek:

- dízelmotor
- hajtómű
- mechanikus
- hidraulikus
- hidromechanikus
- fődinamó és villamos vontatómotorok
- fogaskerekek
- segédüzemi berendezések
- különféle tengelyek

A tényleges zaj ezek összhatásából alakul ki, de függ az észlelés helyétől, beépítettségétől is. Általában igaz, hogy a legjellemzőbb zajforrást a *vontatójármű hajtó- és segédberendezéseinek zaja*, a *vontatott jármű zaja*, valamint a kerék és sín között fellépő *gördülési zaj*, illetve *fékszaj* adja.

2.3. A vasúti járművek zajszintjét befolyásoló egyes tényezők

2.3.1. Gördülőállománytól függő tényezők:

- a vontatás neme: villamos mozdony/dízel mozdony
- teherkocsi/személykocsi
- a menetsebesség növekedése
- a vonathosszúság növekedése
- terhelt/terheletlen vasúti szerelvény
- fa/acéllemez teherkocsi-oldalfal
- öntöttvas tuskók/tárcsafék
- lapos kerék/szabályos és kopott/sima futófelületű kerék

2.3.2. Felépítménytől függő tényezők:

- illesztett/hegesztett sín
- kopott/sima koronafelületű sín
- váltó/folyamatos sín
- nedves/száraz sín
- ívmenet/egyenes vonalú haladás
- betonalj/talpfa
- betonlapok/zúzottkő ágyazat
- acél/betonhíd/földtöltés

Dolgozatomban csak a vasúti pálya pályaszerkezetében fellépő rezgésekkel és zajokkal, azon belül is a legmeghatározóbb forrással, a kerék és a sín kapcsolatából származó terhelésekkel foglalkozom. Ezeknek a zaj- és rezgésterheléseknek a kiküszöbölésére készült a kutatási munkám, egy új, lehetséges csillapítási módszert mutatok be. A járműszekrény alkotóelemei, valamint a gépészeti részek által kibocsátott zajterhelések megoldásai gépész- illetve járműmérnöki feladatok.

2.4. Gördülési zaj

A vasúti közlekedés meghatározó zajforrása a kerék és a sín kapcsolatából származó gördülési zaj, mely a jármű sebességének emelésével növekszik. Ezt mutatja be az alábbi táblázat, amelyben a sebességtől és a pálya tengelyétől mért távolság függvényében mért elhaladási zajszintet adjuk meg dBA-ban.

Távolság [m]	Menetsebesség [km/h]			
	80	120	150	200
8,5	89	95	98,5	103
25	83	89	92,5	97
50	77,5	83,5	87	91,5
100	72	78	81,5	86

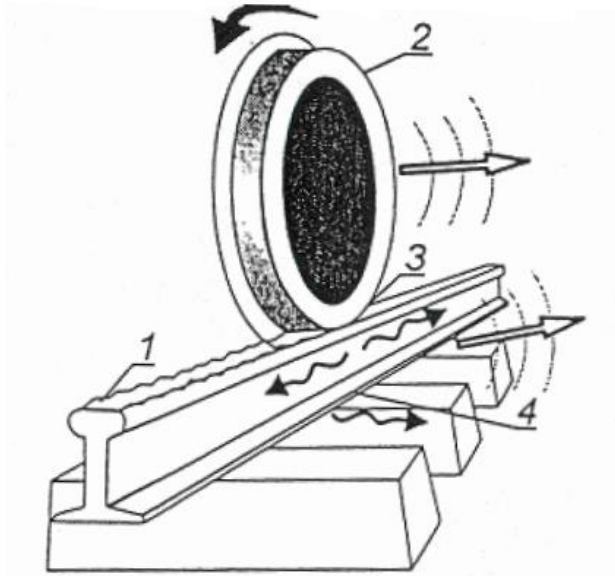
3. táblázat Vonatok hangszintje 1 m-es magasságban a vágánytengelyre merőlegesen mérve

A zajszint emelkedése a menetsebesség függvényében az alábbi összefüggés alapján számolható:

$$L = 20 \cdot \lg \frac{v_2}{v_1} [dB]$$

ahol v_1 a kezdeti-, v_2 a megnövekedett sebesség.

2.4.1. A kerék-sín kapcsolatából származó hatások okai



1. ábra A kerék-sín kapcsolatából származó hatások

1. A sín futófelületének egyenlőtlen vagy hullámos kopásából, felületi érdességéből származó zajhatások (jármű kigyózó mozgása).
2. A kerék futókörének egyenlőtlenségéből vagy kopásából származó zajhatások.
3. Ívekben a kerék-sín közvetlen kapcsolatából (nyomkarima vezetés) származó zajhatások. Ívben jellegzetes csikorgó zaj alakul ki, amit a kerekek belső sínszálon való tengelyirányú csúszása, illetve a külső sínszálon a nyomkarima súrlódása okoz.
4. A felépítmény rezgéséből származó zajhatások. (Felépítmény típusa: hézagnélküli vagy illesztéses)

A gördülési zaj frekvencia-spektrumában 500 Hz alatt a sín, 1000 Hz fölötti tartományban pedig a kerék sugárzása a mértékadó.

2.5. Fékezési zaj

Vasúti kocsik kétféle fékrendszerrel készülnek: *tuskófék* illetve *tárcsafék*.

Tuskófék alkalmazása esetén fékezéskor az öntöttvas féktuskó közvetlenül érintkezik a kerék felületével és ez hullámosítja a kerék futófelületét (laposít és felhord). Ez az egyenlőtlen, nagy érdességű kerék gerjeszti önmagát és a sínt, ami növeli a rezgést és a zajt is. Bár e felületi érdesség esztergálással csökkenthető, az néhány fékezés után újra kialakul a keréken. Tuskófékes a MÁV Rt. összes teherkocsija, ami szintén a teherkocsik magasabb zajszintjét eredményezi.

Tárcsafékes megoldás alkalmazásakor a kerék oldalfelületére tárcsa feszül, így a futófelület nem károsodik. Napjainkban tárcsaféket csak $V > 140$ km/h sebességű járművekre szerelnek. Hazánkban a nemzetközi és InterCity forgalomba bevont személykocsik készülnek ilyen fékrendszerrel, de ez csak a MÁV Rt. személykocsi állományának kb. 1/5-öd része. Megjegyezzük ugyanakkor, hogy pl. Svájcban a zajcsökkentés érdekében több évtizeddel ezelőtt a teljes teherkocsi állományt tárcsafékesre cserélték.

2.6. A vasúti közlekedés által keletkező rezgés

Rezgés hatására az emberi test egyes részei is rezgésbe jönnek, ezek közül is azok a rezgések veszélyesek, amelyek a test sajátfrekvenciájával megegyeznek. Ez az érték a testen belül változó, általában 1-100 Hz közötti frekvenciájú rezgések veszélyesek. A rezgés emberi következményei a légzési panasz, szívritmus rendellenesség, gerincbántalom, szédülés, csont- és érrendszeri elváltozások. Ezek mértéke a rezgés frekvenciájától, nagyságától, a testre hatás irányától és az egyén érzékenységétől is függ.

A rezgés szorosan kapcsolódik a zajhoz, hiszen mindkettő a környező közeg hullámmozgása, míg a zaj csak a levegőben, addig a rezgés általában a talajban vagy épületekben, illetve egyéb szerkezetekben fordul elő. A kisméretű léghangok akár rezgéseket is okozhatnak épületben.

2.7. A vasúti közlekedés által keltett rezgés

A vasúti járművek rezgéskeltésének oka a kerék-sín kapcsolaton fellépő, a felépítmény szerkezeten keresztül a talajba közvetített erő. Bár kisebb mértékben, de előfordul, hogy a dízel vontatójárművek – melyek zajkibocsátása a kisméretű tartományban nagy – léghangterjedés útján is rezgést okoznak épületekben.

Járművek felfüggesztésének, futóművének és forgóvázának helyes tervezésével simább és csendesebb futás érhető el, ami a rezgéskeltést is csökkenti. Manapság ez főleg személykocsiknál megoldott, míg a teherkocsik rezgéskeltése fokozottabban jelentkezik, mely a nagyobb tengelyterheléssel erősödik. Különösen érzékelhető a rezgés, ha a szerelvény kisméretű alépítményen halad keresztül, pl. acélhídon.

Jelentősen csökkenthető a kisugárzott rezgés mértéke a vasúti felépítmény tudatos megválasztásával vagy utólagos szigetelésével. A rezgéscsökkentés passzív módja az épületek rezgés elleni védelme, szigetelése, mely megtörténhet építéskor vagy utólagosan is.

3. ZAJ- ÉS REZGÉSHATÁSOKKAL KAPCSOLATOS KÖRNYEZETVÉDELMI ELŐÍRÁSOK

3.1. Magyarország Alaptörvénye

- *XX. cikk (1)* Mindenkinnek joga van a testi és lelki egészséghez
- *XXI. cikk (1)* Magyarország elismeri és érvényesíti mindenki jogát az egészséges környezethez

3.2. A környezetvédelmi törvény

Az 1995. évi LIII. törvény 31. §. (1) bekezdése alapján a környezeti zaj és rezgés elleni védelem kiterjed mindazon mesterségesen keltett energia-kibocsátásokra, amelyek kellemetlen, zavaró, veszélyeztető vagy károsító hang-, illetve rezgésterhelést okoznak. A környezetvédelmi törvény (2) bekezdése alapján a zaj és rezgés elleni védelem keretében műszaki szervezési módszerekkel kell megoldani:

- *a zaj- és rezgésforrások zajkibocsátásának, illetve*
- *rezgésgerjesztésének csökkentését; a zaj- és rezgésterhelés növekedésének mérséklését vagy*
- *megakadályozását; a tartósan határérték felett terhelt környezet utólagos védelmét.*

3.3. Zaj és rezgésvédelem

Magyarországon jelenleg az emberi környezetet ért és az emberi egészséget veszélyeztető zajok és káros rezgések elleni védelem alapvető szabályait a zaj- és rezgésvédelemről kiadott, többször módosított 12/1983. (V. 12.) MT sz. rendelet szabályozza.

- *2. §. (1) a) alapján e rendelet alkalmazásában veszélyes mértékű zaj: a levegőnek az emberi környezetben észlelhető olyan mértékű és minőségű nyomásingadozása, amely meghaladja a megengedett zajterhelési (zajimissziós), illetőleg zajkibocsátási (zajemissziós) határértéket;*
- *a b.) pontja szerint veszélyes mértékű rezgés a szilárd testnek olyam mértékű és minőségű ismétlődő rugalmas alakváltozása, amely meghaladja a megengedett rezgésterhelési (rezgésimissziós), illetőleg rezgés-kibocsátási (rezgésemissziós) határértéket.*

3.4. 27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM együttes rendelet

3.4.1. A környezeti zaj- és rezgésterhelési határértékek megállapításáról

A környezet védelmének általános szabályairól szóló 1995. évi LIII. törvény 89. § (3) bekezdésében, 110. § (8) bekezdés *m)* pontjában, valamint 110. § (13) bekezdés *a)* pontjában foglalt felhatalmazás alapján, a környezetvédelmi és vízügyi miniszter feladat- és hatásköréről szóló 165/2006. (VII. 28.) Korm. rendelet 1. § *a)* pontjában, valamint az egészségügyi miniszter feladat- és hatásköréről szóló 161/2006. (VII. 28.) Korm. rendelet 1. § *a)* pontjában meghatározott feladatkörünkben eljárva - a 10. § tekintetében a pénzügyminiszter feladat- és hatásköréről szóló 169/2006. (VII. 28.) Korm. rendelet 1. § *b)* pontjában meghatározott feladatkörében eljáró pénzügyminiszterrel egyetértésben - a következőket rendeljük el:

3.4.2. 1. § E rendelet alkalmazásában:

- a) *megítélési szint* (L_{AM}): a vizsgált zajforrás egyenértékű A-hangnyomásszintjéből korrekciós tényezőkkel számított, a teljes megítélési időre vonatkoztatott érték, amelynek mértékegysége: dB,
- b) *megítélési időre vonatkozó rezgésterhelés* (A_M): a rezgésterhelésnek mérési irányonként számított, a teljes megítélési időre vonatkozó értéke, amelynek mértékegysége: mm/s^2 ,
- c) *a rezgésterhelés legnagyobb értéke* (A_{max}): a rezgésterhelésnek a három irányban kapott félperces maximumok összes sorozatából kiválasztott legnagyobb értéke, amelynek mértékegysége: mm/s^2 ,
- d) *vizsgálati küszöbérték* (A_0): környezeti rezgésforrástól származó rezgésjel legnagyobb értékének e jogszabály szerint megengedett mértéke, amelynek teljesülése esetén a vizsgált rezgés megfelel az előírásoknak, túllépése esetén további vizsgálatokat kell végezni a határértékeknek való megfelelés megállapítása céljából, és mértékegysége: mm/s^2 ,

e) *ritkán előforduló, rövid idejű rezgésjelenség*: olyan, rendszeresen üzemelő rezgésforrástól származó rezgés, amely naponta legfeljebb 3 alkalommal, illetve hetente legfeljebb 15 alkalommal fordul elő, és minden alkalommal két percnél rövidebb ideig tart.

3.4.3. 4. §

- (1) A közlekedési létesítményeket úgy kell megtervezni, hogy az általuk okozott zajterhelés nem haladhatja meg a 3. melléklet szerinti határértékeket.
- (2) A 3. melléklet határértékei megítélési szintben kifejezett értékek, ahol a megítélési idő
 - a) nappal (6:00-22:00): 16 óra,
 - b) éjjel (22:00-6:00): 8 óra.
- (3) Ha a csendes övezet, fokozottan védett terület
 - a) zajtól védett területen helyezkedik el, a 3. mellékletben meghatározott határértéknél 5 dB-lel kisebb,
 - b) zajtól nem védett területen helyezkedik el, a 3. mellékletben az üdülő területi besorolásnak megfelelő zajterhelési határértéknek kell teljesülni a területén.
- (4) A 3. melléklet határértékeinek új közlekedési zajforrás létesítése esetén a meglévő védendő területen kell teljesülniük.
- (5) Meglévő közlekedési útvonal vagy létesítmény (zajforrás) korszerűsítése, útkapacitás bővítése utáni állapotra
 - a) a 3. melléklet határértékei érvényesek, ha a változást közvetlenül megelőző állapotra vonatkozó számítások és mérések a határérték teljesülését igazolják;
 - b) legalább a változást megelőző zajterhelést kell követelménynek tekinteni, ha a változást megelőző állapotra vonatkozó számítások vagy mérések a határérték túllépését igazolják.

3.5. A közlekedéstől származó zaj terhelési határértékei a zajtól védendő területeken

melléklet a 27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM együttes rendelethez

Határérték (L_{TH}) az L_{AM} megítélési szintre (dB)

Sor-szám	Zajtól védendő terület	Kiszolgáló úttól, lakóúttól származó zajra		Az országos közúthálózatba tartozó mellékutaktól, a települési önkormányzat tulajdonában lévő gyűjtőutaktól és külterületi közutaktól, a vasúti mellékvonaltól és pályaudvarától, a repülőtértől, illetve a nem nyilvános fel- és leszállóhelyektől származó zajra		Az országos közúthálózatba tartozó gyorsforgalmi utaktól és főutaktól, a települési önkormányzat tulajdonában lévő belterületi gyorsforgalmi utaktól, belterületi elsőrendű főutaktól és belterületi másodrendű főutaktól, az autóbusz-pályaudvartól, a vasúti fővonaltól és pályaudvarától, a repülőtértől, illetve a nem nyilvános fel- és leszállóhelyektől származó zajra	
		nappal 06-22 óra	éjjel 22-06 óra	nappal 06-22 óra	éjjel 22-06 óra	nappal 06-22 óra	éjjel 22-06 óra
1.	Üdülőterület, különleges területek közül az egészségügyi terület	50	40	55	45	60	50
2.	Lakóterület (kisvárosias, kertvárosias, falusias, telepszerű beépítésű), különleges területek közül az oktatási létesítmények területei, és a temetők, a zöldterület	55	45	60	50	65	55
3.	Lakóterület (nagyvárosias beépítésű), a vegyes terület	60	50	65	55	65	55
4.	Gazdasági terület	65	55	65	55	65	55

4.táblázat A közlekedéstől származó zaj terhelési határértékei a zajtól védendő területeken

4. A VASÚTI KÖZLEKEDÉS ZAJ- ÉS REZGÉSHATÁSAINAK CSILLAPÍTÁSI LEHETŐSÉGEI

Általánosságban elmondható, hogy a zajterhelés mértéke a zajforrás és a védendő létesítmény közötti távolság növelésével csökkenthető. A védőtávolság növelésének alkalmazására csak akkor van lehetőség, ha a zajforrás vagy a védendő létesítmény helyzetét változtatni lehet, viszont ez nem alkalmazható a vasúti zajterhelés csillapításában, hiszen a sínek rögzítettek, csakúgy, mint a védendő lakóházak. Az előző fejezetben ismertetett határértékek betartása nem mindenhol sikerül, főleg sűrűn lakott településeknél, városokban a lakosság nagy hányada él határérték feletti övezetben. A lakosságot terhelő környezeti ártalmak közül – a levegőszennyezés után – a második helyre került a zajterhelés. Mai feladat megoldást találni a vasúti közlekedésből származó zajok csökkentésére.

4.1. A zajcsökkentés módozatai

4.1.1. Közvetlen zajcsökkentés:

- elsődleges zajforrás által kisugárzott zaj hangnyomásszintjének mérséklése megfelelő műszaki megoldásokkal történik,
- kisugárzott hangteljesítmény csökkentése: berendezések konstrukciójának átalakításával, a technológiák helyes megválasztásával, a gépek megfelelő karbantartásával.

4.1.2. Közvetett zajcsökkentés:

- testhang gátlása: célja a rezgések mérséklése, illetve szétterjedésük csökkentése,
- elnyelő burkolattal: hangelnyelő szerkezetekkel a visszaverődő zaj csökkentése.

4.2. A vasúti zajterhelés aktív zajcsökkentés terén

- hézagnélküli vágányok létesítése,
- rugalmas sínleerősítések alkalmazása,
- az alépítmény, a felépítmény megfelelő karbantartása, a sín futó- és vezetőfelületi hibáinak kijavítása (sín-csiszolási eljárás),
- ágyazati szőnyeg alkalmazása,
- aljpapucs rendszerek alkalmazása,
- alj alatti talpprofilok alkalmazása,
- vagy ezek kombinációja.

4.3. A vasúti zajterhelés passzív zajcsökkentés terén:

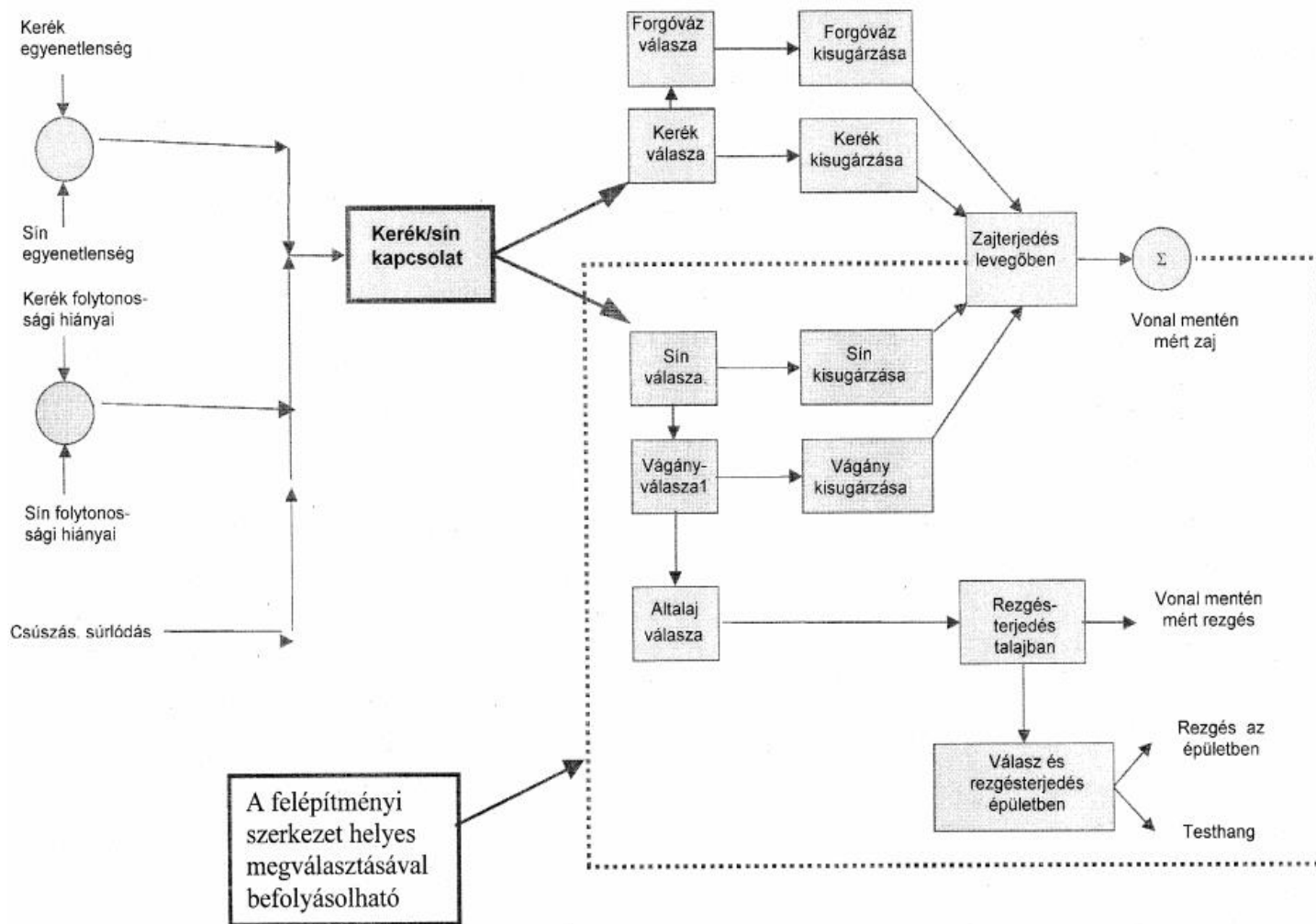


2. ábra A passzív akusztikai védelem lehetőségei

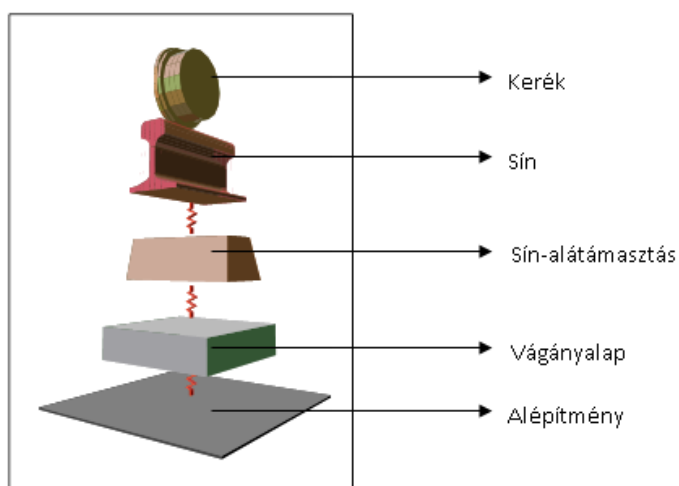
- erdősáv, növényzet telepítése megfelelő távolság esetén, bokrok, fák ültetése (hangszóródási jelenség),
- zajvédő töltés építése kellő terület esetén,
- zajárnyékoló, zajvédő falak létesítése (beton, előre gyártott betonelemes, téglá, falazóelemes, fa, műanyag, üveg, fém, egyéb anyagú) építése,
- az épület passzív elszigetelése: épületekkel: semleges funkciójú épületekkel (pl. garázs, üzlet), a lakóépület megfelelő tájolásával vagy szerkezeti kialakításával,
- a vasút fejlesztésével, korszerűsítésével egyidejűleg a környező településrészek területhasználata során a közlekedési zaj és rezgés elleni védelem lehetőségeit is alkalmazni kell.

4.4. A vasúti zajterhelés csökkentése a felépítményi szerkezet megválasztásától függően

Zajcsökkentés érhető el a vasúti felépítmény egyes elemeinek helyes megválasztásával, ahol a modern – elsősorban műanyagipari – technológiáknak köszönhetően elasztomerek, illetve gumielemelek segítségével a sín által sugárzott rezgés és az így keletkezett zaj nagymértékben csökkenthető. A 3. ábra egy folyamatábra, ami pontosan vázolja, hogyan keletkeznek a kerék-sín kapcsolatából a zaj- illetve a rezgésterhelések. Az ábrán jelölve vannak azok a részek, amiket a felépítményi szerkezet helyes megválasztásával befolyásolni tudunk, ezáltal csökkenteni tudjuk a zaj- és rezgésterheléseket.



3. ábra Sín-kerék kapcsolatából keletkező zajok és rezgések folyamatábrája



4. ábra Klasszikus felépítményi ábra

A 4. ábra mutatja, hogy három szinten történhet csillapítás: a sín alatt, a sín-alátámasztás alatt, illetve a vágánylap alatt. Rugalmas anyagok beépítésével mindhárom szinten megoldás nyújtható a zaj- és rezgésproblémákra. Ezek a megoldások a következők:

1. szintű beavatkozások közvetlenül a sín alatt:

- közvetlen síntalpágyazó lemezek
- közvetlen síntalpágyazó csíkok
- kettős hangolású sínzaj-tompító elemek

2. szintű beavatkozások a sínalátámasztásnál:

- alátétlemez-szigetelések
- keresztalj-paplanok

3. szintű beavatkozások a vágány alapjánál:

- úszatott sínágyazat
- ágyazati paplanok

4.5. A vasúti pálya zaj- és rezgéscsillapító kamraelemei

Manapság megjelentek új, más szinten való zaj- és rezgéscsillapításhoz kapcsolódó beavatkozási lehetőségek is. Ezek közül terjedőben vannak dolgozatom témáját képező, a sínkamrába helyezett, ragasztással vagy egyéb módon rögzített, erősen viszkózus tulajdonságú csillapító elemek, amelyek egy új, „idegen” pályaszerkezeti elemeként jelennek meg a pályafelépítményében.

A sínkamra csillapítók a síngerinc rezgési energiáját alakítják át hővé nagy belső súrlódásuk révén. Csillapító hatásuk vizsgálatához, az általuk kifejtett hatás számszerű meghatározásához ezért a sínekben lejátszódó rezgési folyamatok elemzése szükséges. A mérésem során a kísérleti móduselemzés módszerét alkalmazom a laboratóriumban összeállított mechanikai rendszeremen, vagyis a betonaljhoz leerősített csillapítatlan és sínkamra elemekkel ellátott sínszálon. A mérés feladata a sínszál viselkedésének mérés útján történő feltérképezése, ezáltal egy használható modell alkotása arra, hogy ezeknek az elemeknek a hatékonyságát megállapítsam, valamint azokat összehasonlítsam. A továbbiakban ezért a rezgéstani folyamatok vizsgálatát végzem el először egyszerű, majd egyre bonyolultabb analitikus, később numerikus és végül kísérleti módszerek segítségével.

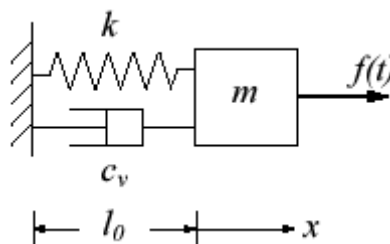
5. ELMÉLETI HÁTTÉR

5.1. Egyszabadságfokú rendszerek

Az egy szabadságfokú rendszer mozgásegyenletének általános matematikai felírása Newton 2. törvényén alapszik, úgy, hogy összegezzük a kívülről ható $f(t)$ mozgatóerőt: tömeg tehetetlensége, csillapítás és a rugó kinyújtása.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (5.1)$$

Sematikusan az 5. ábra mutatja be.



5. ábra Egyszabadságfokú rendszer

Az egyenlet egy lineáris, időben állandó, másodrendű differenciálegyenlet. A probléma teljes megoldása két részt foglal magába:

$$x(t) = x_c(t) + x_p(t) \quad (5.2)$$

ahol,

$x_c(t)$ = átmeneti tag

$x_p(t)$ = állandó tag

$f(t) = 0$ -t behelyettesítve, az 5.1 egyenlet homogén (átmeneti) formája megoldható.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = 0 \quad (5.3)$$

A differenciálegyenlet elméletéből a megoldást exponenciális függvény alakjában, ezzel az összefüggéssel keresem: $x_c(t) = X e^{st}$, ahol s egy komplex változó. Elvégezve a megfelelő deriválásokat és az 5.3 egyenletbe behelyettesítve, az alábbi egyenletet kapom:

$$(Ms^2 + C s + K)X e^{st} = 0 \quad (5.4)$$

Nemtriviális megoldásokat (azaz amikor $X \neq 0$) úgy kaphatunk, ha a zárójelben lévő tényezőt vesszük 0-nak.

$$s^2 + (C/M) s + (K/M) = 0 \quad (5.5)$$

Az 5.5 egyenlet egy másodfokú egyenlet, ami a rendszer karakterisztikus egyenlete. Megoldásával az eredeti egyenlet λ_1 és λ_2 gyökeit kapjuk:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{C}{2M} \pm \sqrt{\left(\frac{C}{2M}\right)^2 - \left(\frac{K}{M}\right)} \quad (5.6)$$

Így a homogén megoldása az 5.1 egyenletnek:

$$x_c(t) = X_1 e^{\lambda_1 t} + X_2 e^{\lambda_2 t} \quad (5.7)$$

Ahol X_1 és X_2 konstans determinánsok $t = 0$ kezdeti feltétellel. λ_1 és λ_2 gyökök értékei a mechanikai paraméterektől függenek. Fizikai tartalma: ha a csillapítás 0 ($C = 0$ és ezáltal $C/2M = 0$) akkor:

$$\lambda_{1,2} = \pm \sqrt{-\frac{K}{M}} = \pm \sqrt{-1} \cdot \sqrt{\frac{K}{M}} = \pm j \cdot \omega_0 \quad (5.8)$$

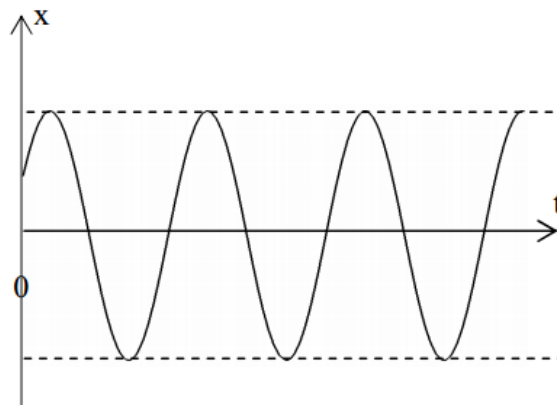
ahol ω_0 a rendszer csillapítatlan sajátfrekvenciája.

$$\begin{aligned} X_x(t) &= X_1 \cdot e^{j\omega_1 t} \cdot e^{d_1 t} + X_1 \cdot e^{-j\omega_1 t} \cdot e^{d_1 t} = X_1 \cdot e^{d_1 t} (e^{j\omega_1 t} \cdot e^{-j\omega_1 t}) = \\ &= X_1 \cdot e^{d_1 t} (\cos\omega_1 t + j\sin\omega_1 t + \cos\omega_1 t - j\sin\omega_1 t) \end{aligned} \quad (5.9)$$

Egyszerűsítve az 5.9 egyenletet:

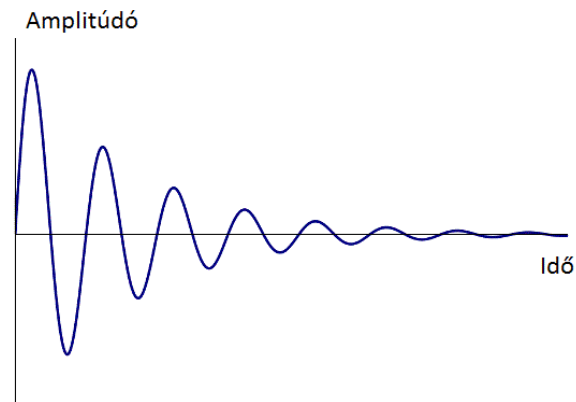
$$X_x(t) = 2X_1 \cdot e^{-d_1 t} \cdot \cos\omega_1 t \quad (5.10)$$

A megoldást grafikusán az alábbi ábra mutatja be. X kezdeti értéke nem nulla, ami azt jelenti, hogy a tömeget a vizsgálat kezdete előtt kimozdítottuk az egyensúlyi helyzetéből (ezáltal potenciális energia keletkezik a rugóban) és a jelenséget abban a pillanatban kezdjük el vizsgálni, amikor a tömeget éppen elengedjük. Innentől a rendszer csak saját tulajdonságai szerinti viselkedést mutat, hiszen külső hatás nem éri (innen származik a sajátrezgés kifejezés is). Ha a rendszerben nincs energiavesztés, akkor a tömeg végtelen szinuszos rezgést végez.



6. ábra Végtelen szinuszos harmonikus rezgőmozgás

Ha csillapítás is jelen van, az energiaátalakulásoknál egy kis energiarész mindig hővé alakul, ami a rezgés exponenciális csillapodásához, majd elvben végtelen idő múlva teljes megszűnéséhez vezet:



7. ábra Csillapított rezgőmozgás

Ha a rendszer csillapítás nélküli, a számítás két gyököt eredményez a képzetes tengelyen, amelyek az origótól vett távolsága a csillapítatlan sajátfrekvenciával egyenlő: $\lambda_{1,2} = \pm j\omega_0$

Ha a csillapítást addig növeljük, míg a rendszer éppen megszűnik rezegni, akkor elértük a kritikus csillapítást, aminek a jele: C_c . Kritikus csillapítás az, ha a gyök alatt nulla érték adódik, ekkor az 5.5 karakterisztikus egyenlet megoldása két egybeeső, tisztán valós érték:

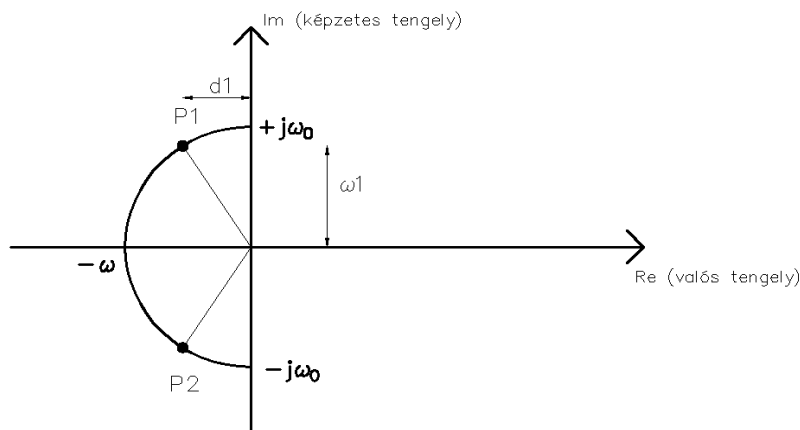
$$(C_c/2M)^2 = (K/M) = \omega^2 \quad (5.11)$$

$$C_c = 2m\omega$$

Az 5.6 egyenlet megoldása ilyenkor:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c_k}{2m} = -\omega \quad (5.12)$$

A megoldás ismét csillapítatlan sajátfrekvenciának megfelelő távolságban van az origótól, csak most a negatív valós tengelyen.



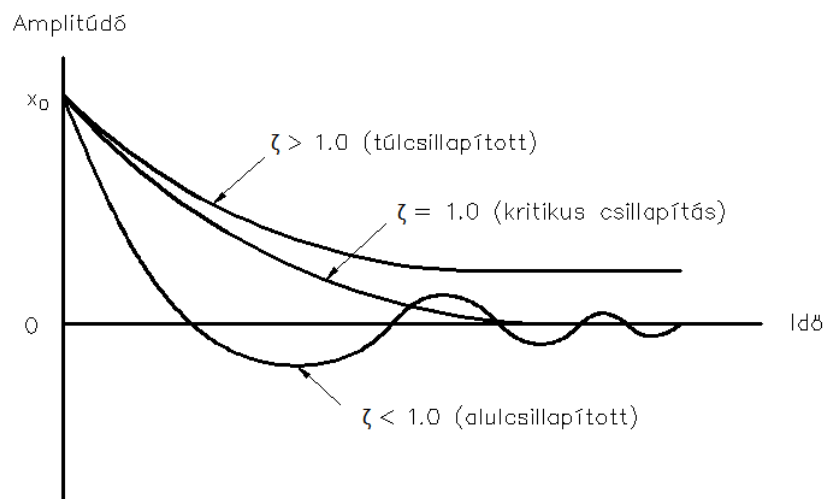
8. ábra Komplex számsíkon elhelyezkedő lehetséges gyökök

λ_1 és λ_2 (a 8. ábrán jelen esetben P1 és P2) az egyenlet lehetséges gyökei, a rendszer póluspárja, amiket komplex számsíkon ábrázolva (8. ábra) félkör alakú helygörbén helyezkednek el. Minél nagyobb a csillapítás, annál közelebb helyezkednek el a komplex konjugált párok a valós tengelyhez, és annál kisebb lesz a csillapított sajátfrekvencia, ω_1 értéke. Ha a párok éppen elérik a valós tengelyt, azt kritikus csillapításnak nevezzük, ott a gyökök egybeesnek, és a negatív valós tengelyen helyezkednek el. Valóságos rendszerek esetében a csillapítás soha nem nulla, de általában nem is érik el a kritikus csillapítás értékét. Ha a csillapítást a kritikuson túl is növeljük, ismét két gyököt kapunk, de ezek már a valós tengely mentén fognak elhelyezkedni (túlcsillapított eset).

A rendszer csillapításának mértékéül a csillapítási viszonyt vezették be, amit csillapítási faktornak vagy kritikus csillapítás %-ának is hívnak. Ez a csillapítási viszonyt a tényleges csillapítási tényező és a kritikus csillapítási tényező hányadosa:

$$\zeta = \frac{C}{C_c} \quad (5.13)$$

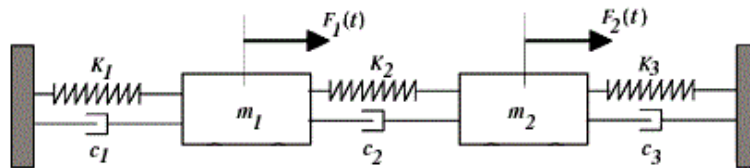
Ennek a viszonzszámnak a segítségével csoportosíthatjuk a rendszereket, melyet az alábbi ábra mutat be:



9. ábra Rendszerek csoportosítása a csillapítási viszony szerint

5.2. Többszabadságfokú rendszerek

A valóságban a legtöbb szerkezet sokkal komplikáltabb annál, hogy egy tömeggel, egy rugóval és egy csillapítással modellezni tudjuk azokat. Általános esetben a többszabadságfokú rendszereket arra használjuk, hogy megmutassák, hogyan függenek össze a szerkezet sajátvektorai és frekvencia átviteli függvényei. Egy egyszerű példán (x. ábra) keresztül szeretném bemutatni a többszabadságfokú rendszerek működését.



10. ábra Kétszabadságfokú rendszer

Az 1-es jelű tömegre ható erő gyorsítja a tömeget és nyújtja az 1-es jelű rugót és csillapítót. A két tömeget összekötő elemeken is léphet fel erő, iránya attól függ, hogy x_1 vagy x_2 kitérés nagyobb-e. Ezeket összegezve írható fel 1-es és 2-es jelű tömegre vonatkozó egyenletek:

$$f_1 = m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 + c_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_2 (x_1 - x_2) \quad (5.14)$$

$$f_2 = m_2 \ddot{x}_2 + c_3 \dot{x}_2 + k_3 x_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1) \quad (5.15)$$

Az 5.14 és 5.15 egyenleteket az egyszerűségért és kezelhetőség miatt mátrix egyenletbe is összefoglalhatóak:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (5.16)$$

Az 5.16 egyenletben mind az erők, mind a kitérések időfüggvénynek tekintendők. A változó feletti pont az idő szerinti deriválást jelöli. Ahol:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} = [M] = \text{tömegmátrix}$$

$$\begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix} = [C] = \text{csillapításmátrix}$$

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} = [K] = \text{merevségmátrix}$$

Így az 5.16 egyenlet az alábbi alakot ölti:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (5.17)$$

A mozgásegyenletben lévő független egyenletek számát a rendszer szabadsági fokszámának hívjuk. Jelen esetben $D = 2$ szabadságfokú rendszerrel van dolgunk, ebben a felírásban a szabadságfokok a tömegek elmozdulásai: x_1 és x_2

Az egyenlet megoldását, csak úgy, mint az egyszabadságfokú rendszernél most is exponenciális függvény alakjában keressük. Feltételezzük, hogy minden időbeli változás $e^{j\omega t}$ alakú. Az 5.16 egyenlet egy egyenletrendszer így az előző feltételezést alkalmazva

$$(\mathbf{K} + j\omega\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M}) \mathbf{x}(\omega) = \mathbf{f}(\omega) \quad (5.18)$$

formájú mozgásegyenletté alakíthatjuk.

A modális megoldás egy megoldási módszer, amelyhez a rendszer módusainak bevezetése szükséges. A mechanikai rendszer módusai olyan rezgésformák, melyek a csillapítatlan rendszerben a gerjesztés jelenléte nélkül is fennmaradhatnak.

A problémát egyszerűsítve egy csillapítatlan és gerjesztés nélküli rendszert vizsgálunk, így $\mathbf{C} = 0$ és $\mathbf{f} = 0$ helyettesítéseket alkalmazunk az 5.18 egyenletnél.

A módusok az így adódó általánosított sajátértékfeladat megoldásai:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}\varphi_n &= \omega_n^2 \mathbf{M}\varphi_n & (5.19) \\ n &= 1, \dots, D \end{aligned}$$

A megoldás egy másik lehetséges útja, ha az 5.18 mátrixegyenletet két lépésben egy nevezetes alakra hozzuk: $[\omega^2 \mathbf{M} + \mathbf{K}]\varphi_n = 0$ egyenlet mindkét oldalát megszorozva a tömegmátrix inverzével, majd rendezve az 5.20-as egyenletet kapjuk.

$$\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}\varphi_n = \omega_n^2 \varphi_n \quad (5.20)$$

Az 5.20 egyenlet azt állítja, hogy az $[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{K}]$ mátrixot egy φ_n vektorral szorozva éppen az φ_n vektor valahányszorosát kapjuk vissza. Ez viszont azt jelenti, hogy φ_n vektorok éppen az $[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{K}]$ mátrix sajátvektoraival egyenlők, a ω_n^2 értékek pedig a sajátértékek. Amennyiben a mátrixok ismertek, a sajátértékek és sajátvektorok meghatározhatóak. A kapott matematikai eredmény fizikai tartalmának alapján a szerkezetdinamikában a sajátvektorokat módusalaknak vagy módusvektornak nevezik.

A sajátvektor mátrix oszlopai tartalmazzák az egyes sajátvektorokat, a sajátérték (mindig diagonális) mátrix átlójában levő számok négyzetgyöke adja a sajátfrekvenciákat.

D szabadsági fokú rendszernek D különböző módusa van. Minden módus egy rezgésalakot ad meg, ami a hozzátartozó sajátfrekvencián maradhat fenn a rendszerben. Az n-ik módushoz tartozó rezgésalakot a φ_n sajátvektor adja meg, a módus sajátfrekvenciáját pedig az ω_n sajátérték. A kétféle jellemző együttese, vagyis a sajátértékek és a sajátfrekvenciáknak megfelelő sajátvektorok a vizsgálandó rendszert maradéktalanul meghatározzák, ezeket a jellemzőket hívjuk összefoglaló néven modális modellnek.

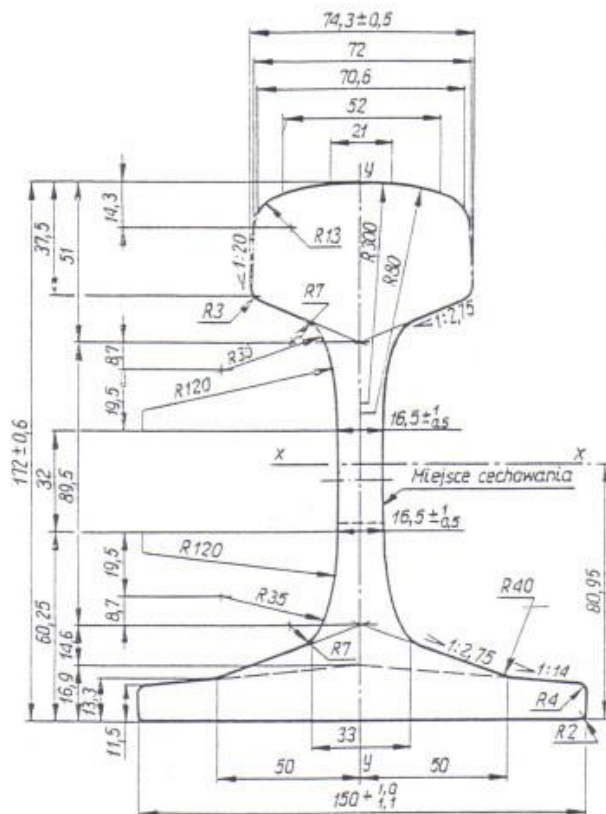
Ezen elméleti háttérrel alapszik dolgozatom témája, vagyis a zaj- és rezgéscsillapító kamraelemek laboratóriumban való vizsgálata. Egyrészt szerkezeti végeelem modellezéssel, másrészt pedig az általam összeállított mérési rendszeren keresztül analizáltam a sínszálát. Mindkét vizsgálati módszer eredményét szerkezeti móduselemzéssel nyertem, ahol az elemzett paraméterek a feljebb kifejtett sajátfrekvenciák, csillapítási tényezők és módusalakok.

6. SZERKEZETI VÉGESELEM MODELLEZÉS

Annak érdekében, hogy a laboratóriumi mérés reális számú mért szabadsági fok (azaz mérőpont) alkalmazásával is kellő mennyiségű és megbízható információt szolgáltatson, először a végeelemes modellezést vettem segítségül: MSC_Nastran szerkezeti végeelem programmal modelleztem a sínszálát, hogy lássam, adott frekvencián miként viselkedik a sínszál, milyenek az egyes sajátrezgések frekvenciái és módusalakjai.

6.1. Geometria

Vizsgálataim alapját egy UIC 60-as, 1 méter 20 centiméteres sínszál adta. Ezt a sínszálát modelleztem a programban. Első lépésként a sínszál keresztmetszeti geometriáját kellett felvennem, amit a *11. ábra* mutat.

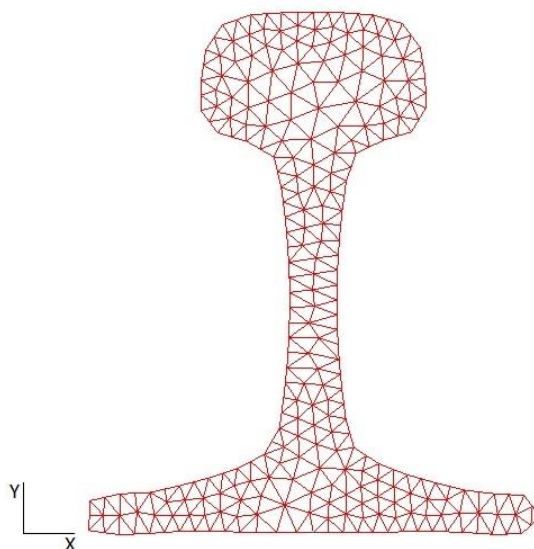


11. ábra UIC 60-as sínrendszer keresztmetszeti geometriája

A vonalak által meghatározott keresztmetszetből felületet készítettem.

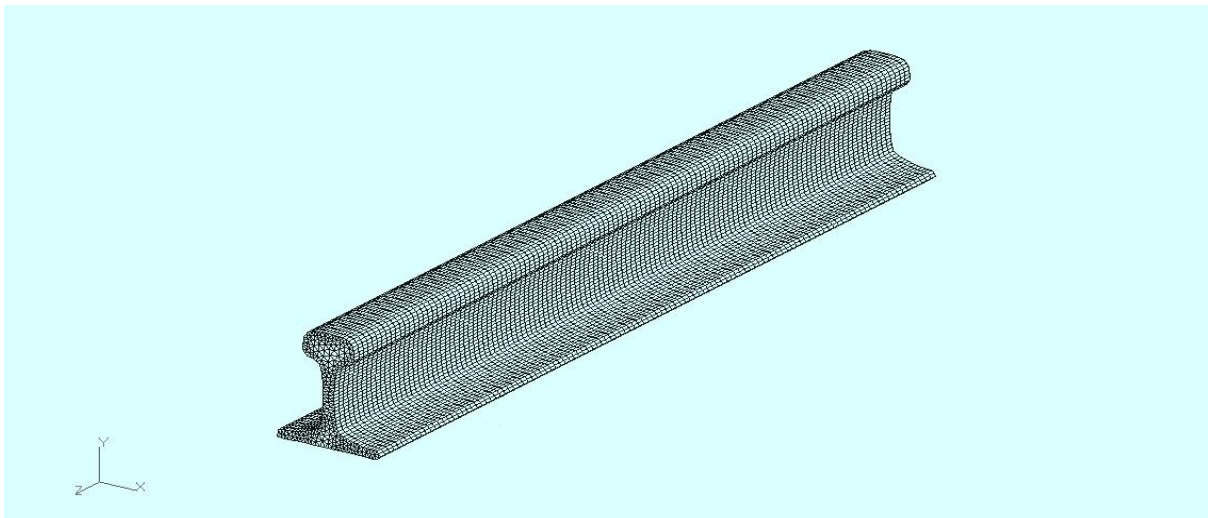
6.2. Rácshálók

Miután felvettem az UIC 60-as sín keresztmetszeti geometriáját és elkészült a felület, a következő lépés a végelem háló elkészítése volt. Mesh parancs segítségével készítettem a keresztmetszetre egy szabálytalan háromszög elemekből álló rácshálót.



12. ábra UIC 60-as sínrendszer keresztmetszetének rácshálója

A szabálytalan háromszög elemek sarokpontjai a csomópontok. A behálózott keresztmetszetet a csomópontokon keresztül a használt programcsomag, a PATRAN előfeldolgozó program kifejezésével „extrudáltam” 1 m 20 cm hosszúra. Ez azt jelentette, hogy a csomópontokat 120-szor toltam el, mivel beállítottam, hogy 1 centiméterenként tegye azt. A végeelem modell csomópontokból és az ezek kapcsolatát meghatározó elemekből áll, ezek száma adja a modell szabadsági fokát. A háromszögekből térbeli alakzatok lettek, amik egy háromszögalapú 1 cm „magas” hasábok. Az elkészült 1 m 20 cm hosszú, szabad, leerősítés nélküli, a térben egyelőre „lebegő” UIC 60-as sínszál végeelem modelljét az 13. ábra mutatja.



13. ábra UIC 60-as sínrendszerű szabad sínszál végeelem modellje

6.3. Anyagjellemzők, property

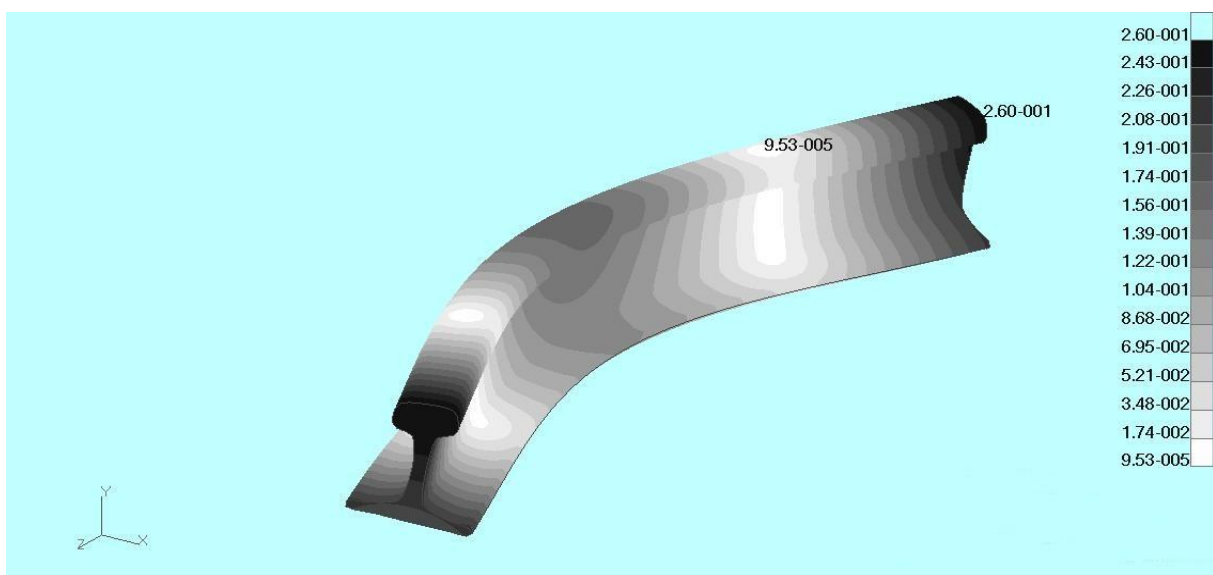
Ahhoz hogy a tömegmátrix és a merevségi mátrix előállhasson, a szükséges anyagtulajdonságokat kellett meghatároznom. A tömegmátrix előállításához a legfontosabb az anyag sűrűsége, így $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ értéket adtam meg. A csomópontok közötti rugalmas kapcsolatot az elemtípus és az anyag rugalmas tulajdonságai határozzák meg. A merevségi mátrix előállításához szükség volt az anyagra jellemző állandóra, jelen esetben a sín rugalmassági modulusára: $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$.

Ezután az alkotóelemeknek tulajdonságát (property) kellett megadnom. Mivel a modell háromszögalapú hasábokból épül fel (csomópontok és a kapcsolatokat meghatározó elemek), így 3-dimenziós térbeli, homogén property-t hoztam létre. A property az elemtípushoz rendelte hozzá a sín anyagjellemzőinek beállított értékeit.

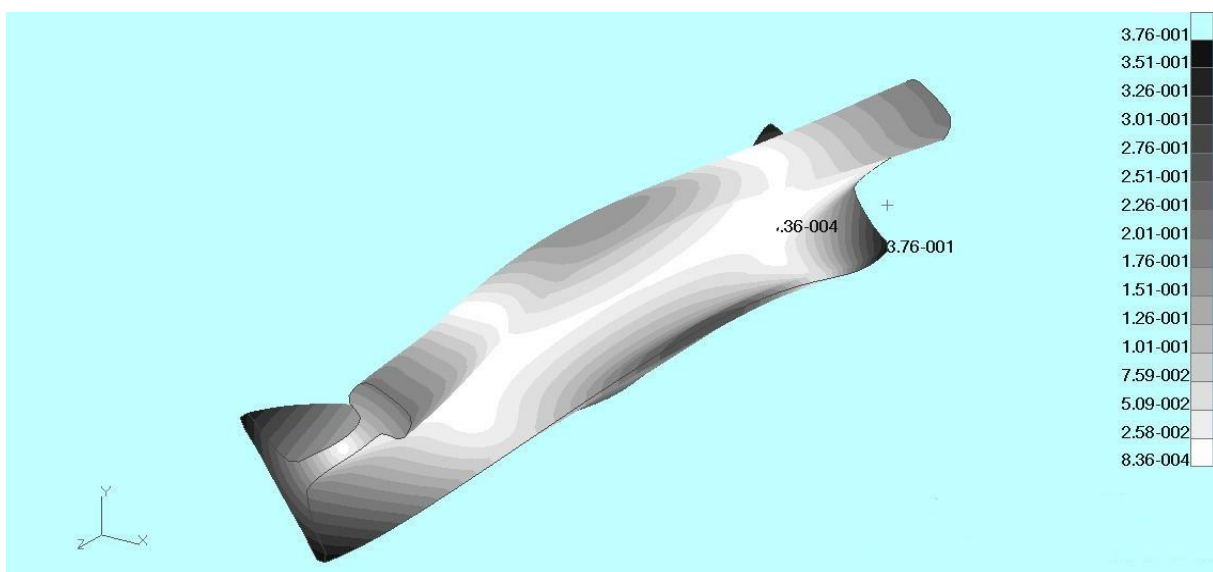
6.4. Analízis

A kész UIC 60-as sínszálam modelljére most már csak futtatnom kellett az analízist. A sajátfrekvencia analízis során a modellt mindenféle gerjesztés nélkül vizsgálom. Az analízis eredményeként a modell sajátfrekvenciáit és az ezekhez tartozó sajátrezgés alakok (módusalakok) határozhatóak meg. Az analízis előtt megadtam a programnak, hogy az első 15 darab sajátfrekvenciát keresem, a frekvenciatartományt pedig nem korlátoztam. A 15 sajátfrekvenciából csak a legfontosabb eredményeket emelem ki.

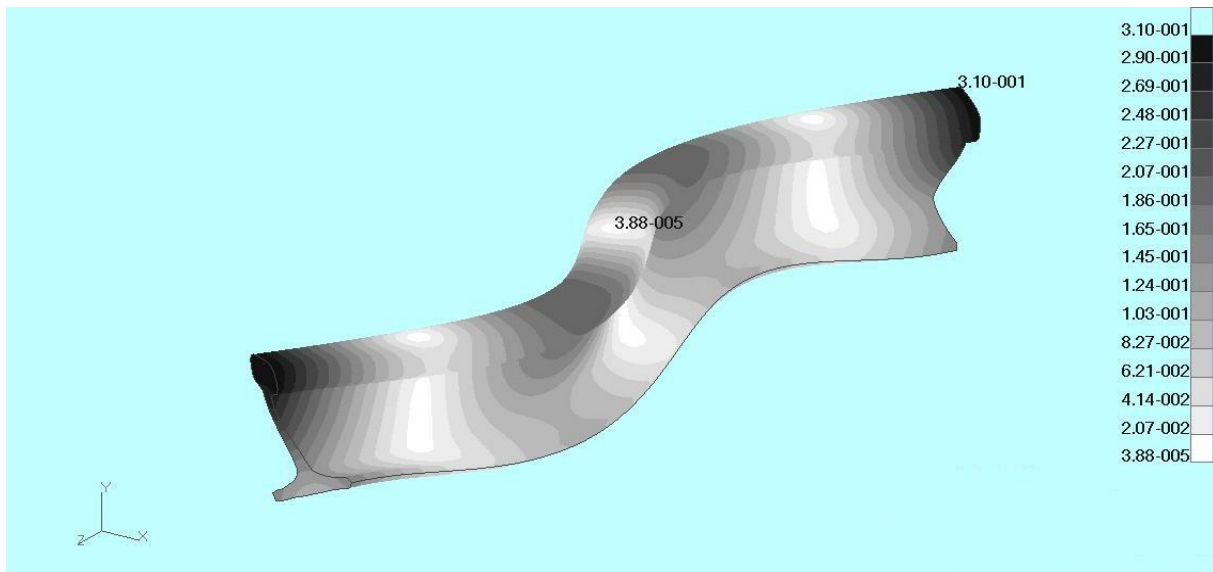
6.5. Sajátfrekvenciák, módusalakok



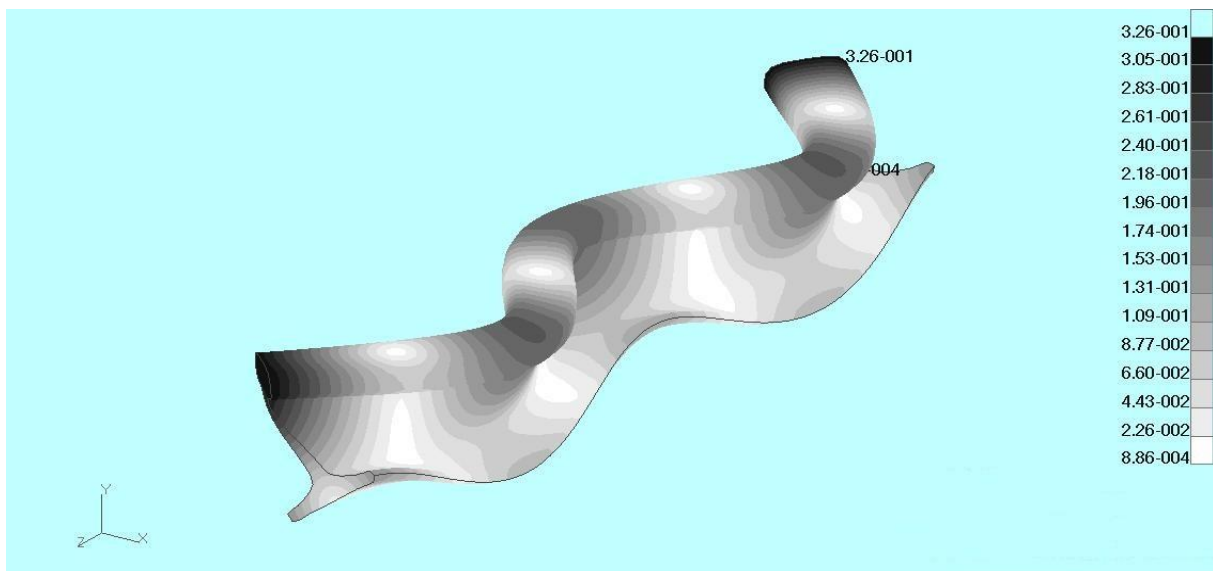
14. ábra Szabad sínszál módusalakja 310,58 Hz frekvencián



15. ábra Szabad sínszál módusalakja 731,27 Hz frekvencián



16. ábra Szabad sínszál módusalakja 769,23 Hz frekvencián



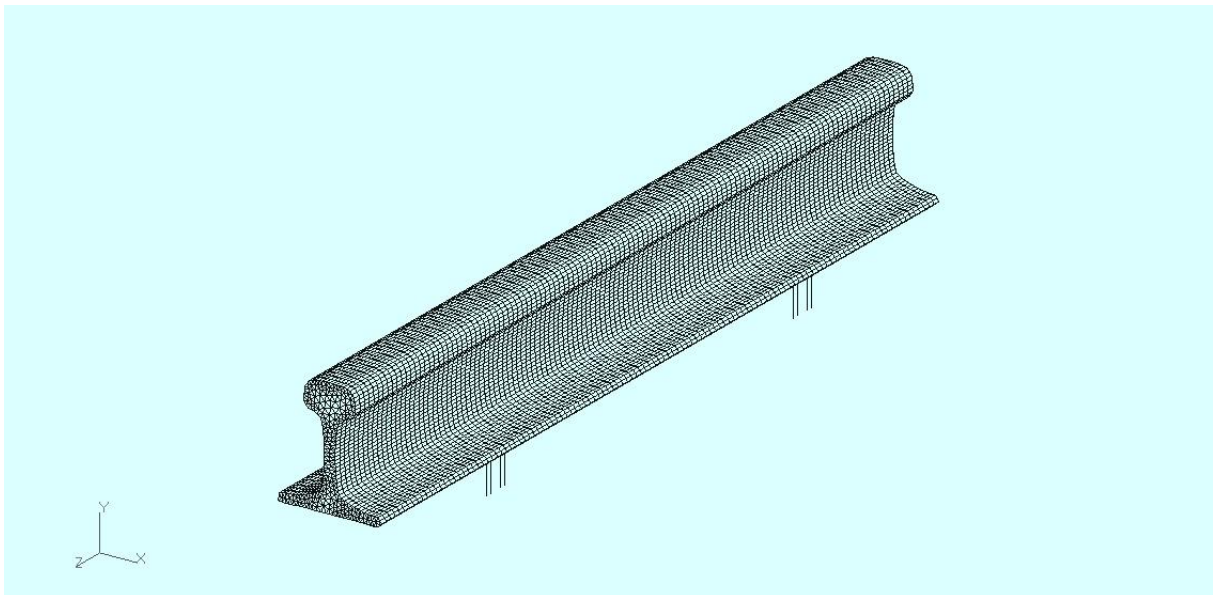
17. ábra Szabad sínszál módusalakja 1340,4 Hz frekvencián

6.6. Leerősített sínszál

A szabad, leerősítés nélküli és térben „lebegő” sínszál még nem megfelelő kiindulási alap a méréseimhez, hiszen a valóságban a sínszál sínleerősítéssel van rögzítve a betonaljhoz. Következő feladatomban volt, hogy modellezem az általam választott SKI-1 típusú leerősítést. Az SKI-1 típusú szorítórugóval kialakított sínleerősítés egy rugalmas leerősítés, amit a végeelem programban csak közelítően lehet modellezni a szerkezet bonyolultsága miatt. A végeelem modellem ugyanaz, mint az előbb.

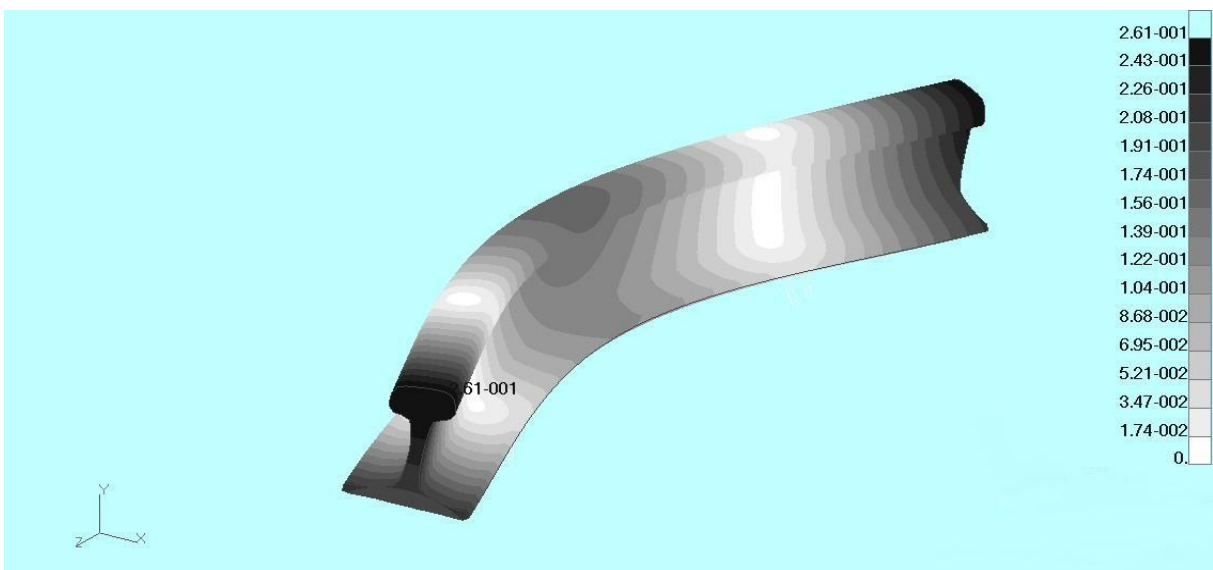
Oldalanként a két leerősítés egymástól 60 cm-re van. Egy leerősítést összesen 4 csomóponttal határoztam meg. A 4 darab csomópontot $-Y$ irányban (azaz lefelé) eltoltam x

távolságra, úgy, hogy az eredeti csomópontok is megmaradjanak. Az eltoló és az eredeti csomópontok közé rugókat helyeztem modellben, amiknek megadtam az Skl-1 típusú sínleerősítés szorítórugójának rugóállandó értékét, ami 0,91 kN/mm. Az eltoló csomópontoknak megakadályoztam az X illetve a Z irányú elmozdulását, az elfordulást egyik irányban sem korlátoztam. A sínszál a modellezett sínleerősítéssel az 18. ábra mutatja.

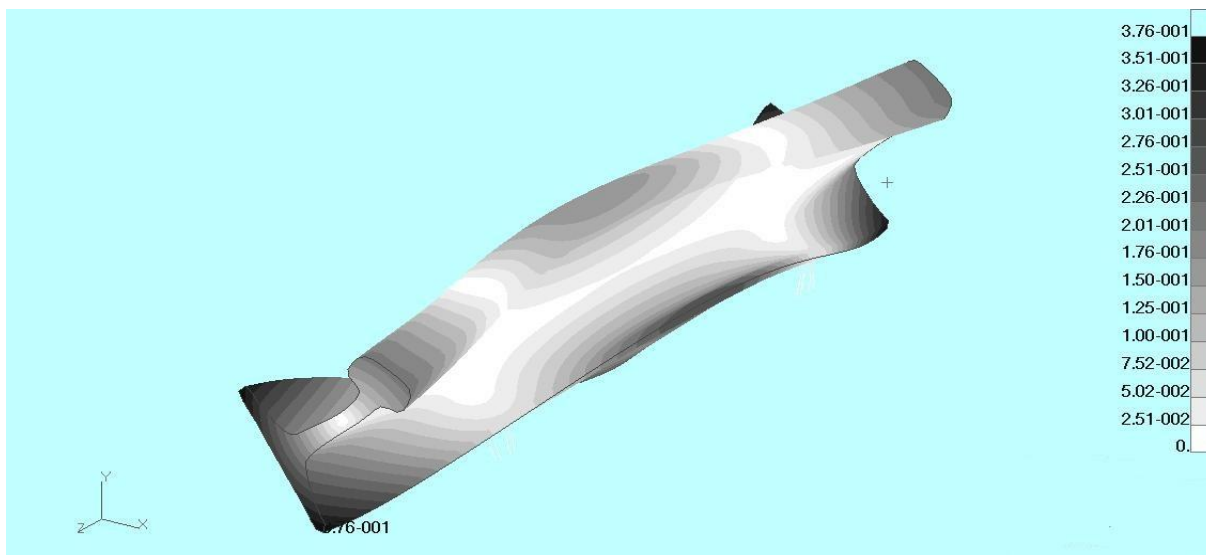


18. ábra Sínleerősítéssel ellátott sínszál végelem modellje

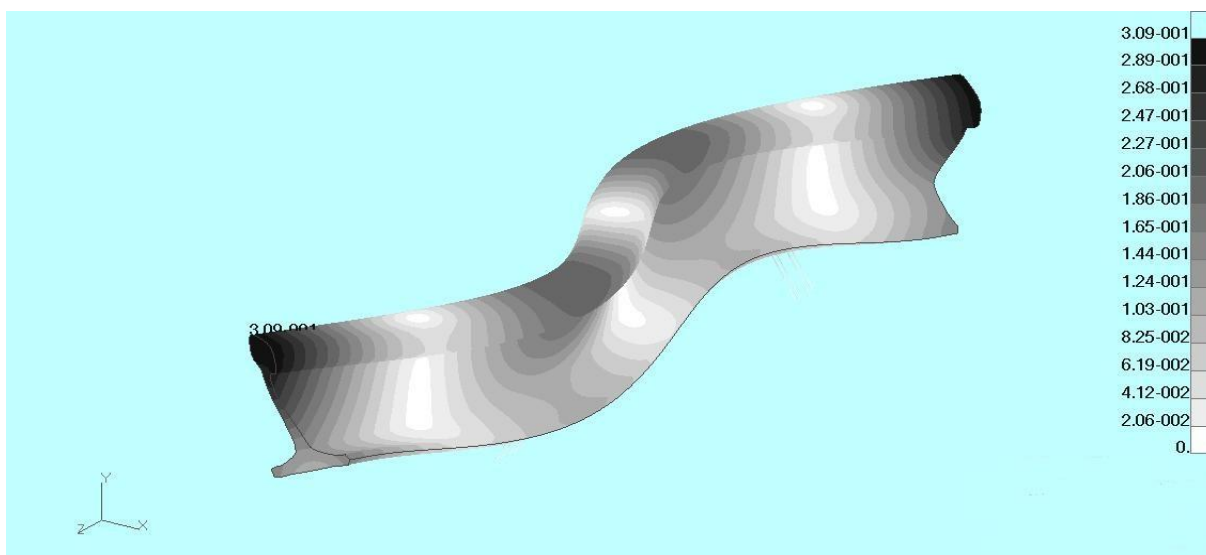
Az analízis ugyanúgy történik ebben az esetben is, 15 darab sajátfrekvencia értéket keresek. Ahogy az előbb, most is a fontosabb eredményeket emelem ki.



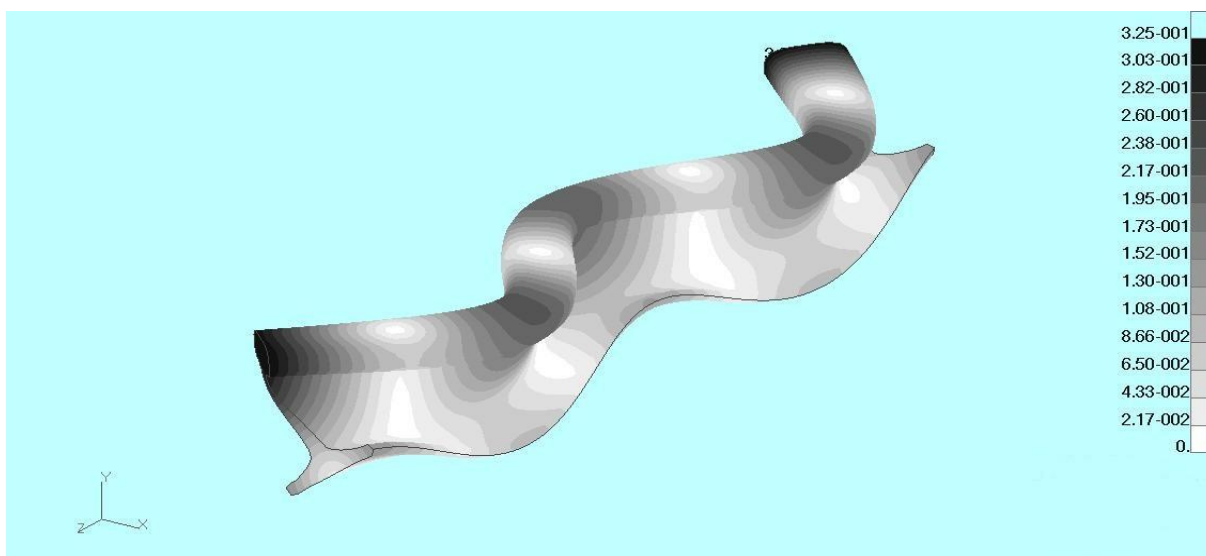
19. ábra Leerősített sínszál módusalakja 310,59 Hz frekvencián



20. ábra Leerősített sínszál módusalakja 731,37 Hz frekvencián



21. ábra Leerősített sínszál módusalakja 769,43 Hz frekvencián



22. ábra Leerősített sínszál módusalakja 1341,2 Hz frekvencián

6.7. Összehasonlítás

Mivel azonos módusalakokat vizsgálok mindkét esetben, így a két végeelem modell összehasonlítható. A két modell sajátfrekvencia értékeit az 5. táblázat foglalja össze.

LEERŐSÍTÉS NÉLKÜL	LEERŐSÍTÉSSEL
310,58 Hz	310,59 Hz
731,27 Hz	731,37 Hz
769,23 Hz	769,43 Hz
1340,4 Hz	1341,2 Hz

5. táblázat Sajátfrekvenciák értékei azonos módusalaknál

Az eredmény előre sejthető volt, hogy a leerősítés nélküli, szabad sínszálhoz alacsonyabb frekvenciák tartoznak, mint a leerősítéssel rendelkezőhöz. Érthető, hiszen a lefogott csomópontok következtében a vizsgált test merevsége növekedett, ami változatlan tömeg mellett a sajátfrekvenciák növekedéséhez vezet. DE, ezek a kis frekvenciaeltolódás különbségek valamint a módusalakok lényegében változatlan alakjai arra utalnak, hogy a leerősítés fenti módja szerinti modellje nem fedti a valóságot. A méréseimmel összevetve azonban a módusalakok és a sajátfrekvenciák közelítően már így is egyeznek, a szükséges információkat a numerikus elemzésből a pontos frekvenciák ismerete nélkül is kinyertem, ezért ezzel a témakörrel a dolgozatom keretei között nem foglalkozom tovább.

6.8. Értékelés, következtetés

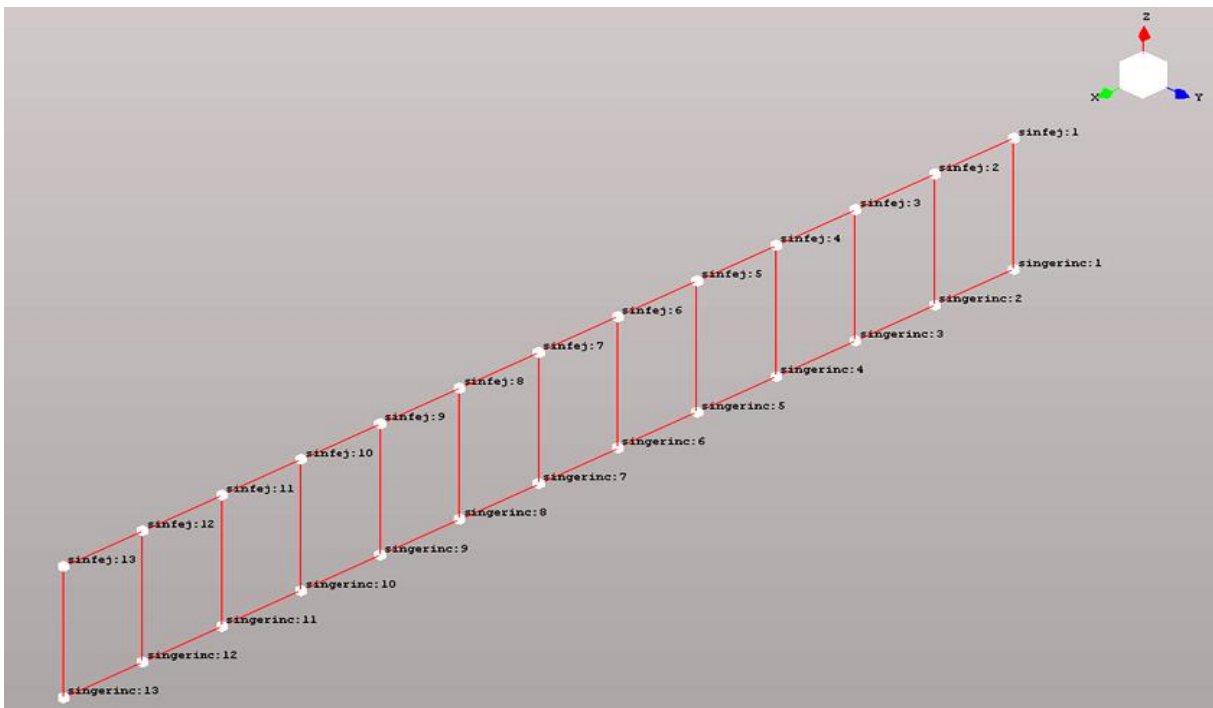
A szükséges információk a numerikus elemzésből a modell sajátfrekvenciáihoz tartozó sajátrezgés alakokból láthatók. Ezek mutatják meg, hogy miként viselkedik a leerősített sínszál a különböző frekvenciákon. Látna, hogy milyen elmozdulásokat végez a sínszál egy-egy pontja, tudatosan el lehet dönteni, hogy hova célszerű rezgésérzékelőt helyezni a sínszálon. Látható, hogy a leerősített sínszál talpa ugyanúgy csavarodhat, és mindhárom irányban elmozdulhat, mint a sínfej. A legnagyobb kitérések a sínszál végein jelentkeznek, de fontos mérési pont a sínszál közepe is. A sínfej mindenképpen vizsgálandó függőleges illetve vízszintes irányban is.

7. MÉRÉSTECHNIKA

Vizsgálataimat egy 1 méter 20 cm hosszú UIC 60-as sínszálon végeztem. A sínszál szabványos, 60 cm-nek megfelelő távolságban két db 80 kg tömegű betontesthez (egy betonalj kettévágva) volt leerősítve egy VOSSLOH cég által gyártott Skl-1 típusú szorítórugóval kialakított sínleerősítéssel. Ez volt a mechanikai rendszerem, amin a méréseimet végeztem. A sínszál előre meghatározott pontját adott erővel gerjesztve mértem a sínszál egy előre meghatározott másik pontjának elmozdulását. Céloom ezzel a rendszer jellemzése volt, vagyis a mérések során szerzett információ alapján meg tudtam határozni a rendszer mért helyein megjelenő és időbeli lefutású gerjesztésre adott válaszát. Ez viszont csak akkor lehetséges, ha ismert a rendszer φ_n módusalakjai, az ω_n sajátfrekvenciái és a ξ_n csillapítási tényezői.

A valóságos rendszerek esetében gondot okozhat, hogy azok nem koncentrált paraméteresek, hanem tömegük térben elosztott, és merevségük tetszőlegesen közeli tömegpontok között értelmezhető. Az ilyen rendszereknek végtelen számú szabadsági fokuk, és így végtelen számú módusuk is van. A módusok meghatározásánál véges frekvenciasávban vizsgáltam a rendszert, azért, hogy a folytonos rendszeremnek véges számú módusát kapjam.

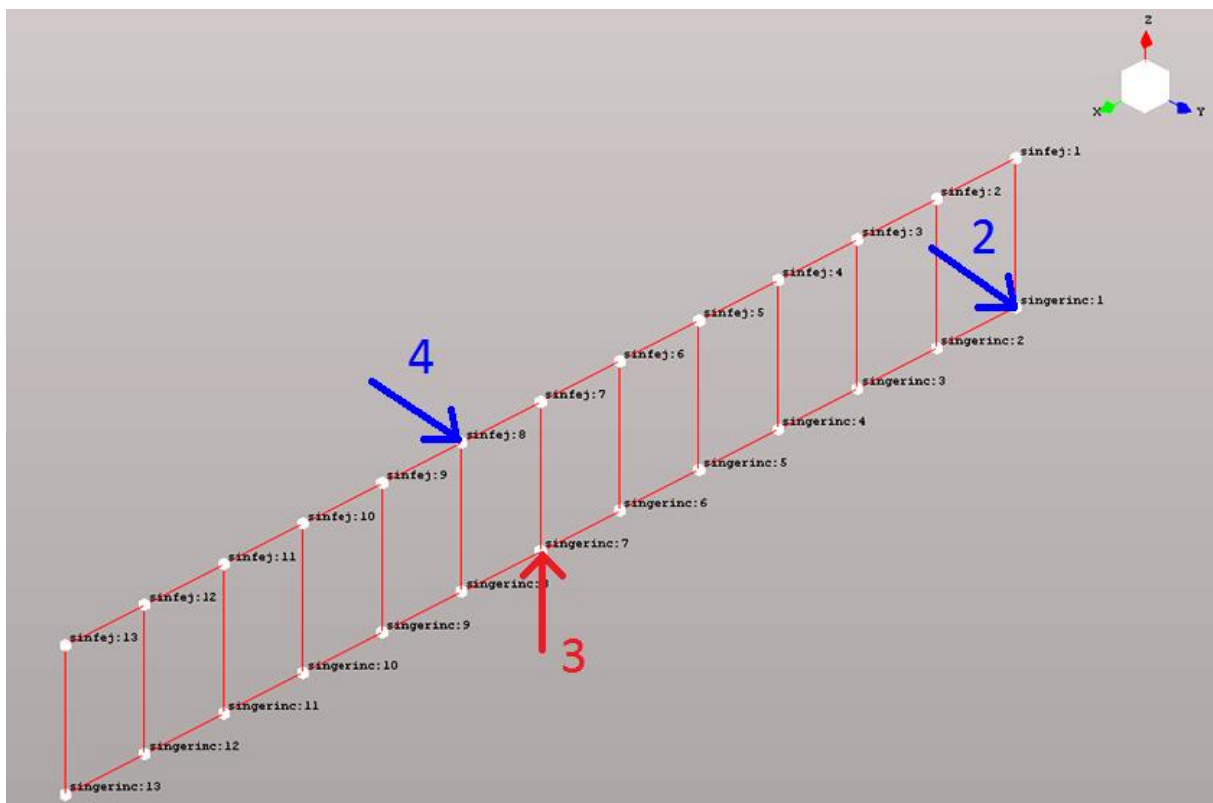
A sínszálát 13×2 pontból álló modellel helyettesítettem, amelyeket egyben gerjesztési pontként is felhasználtam. A 23. ábra mutatja az általam készített helyettesítő modellt a gerjesztési pontokkal.



23. ábra A sínszál helyettesítő modellje a gerjesztési pontokkal

A mérés során a lényegi számításokat (sajátfrekvenciák és csillapítási tényezők becslése, illetve módusalakok számítása) egy mérőszoftver végzi. Az én feladatomban az átviteli vektor kimérése volt. Az impulzusszerű erőgerjesztést alkalmaztam, amit impulzuskalapáccsal tudtam előállítani. Az impulzuskalapács olyan mérőműszer, aminek fejébe egy piezo (nyomás) elven működő erőérzékelő cella van beépítve. Ez a cella méri a kalapács fején megjelenő erőt, ami fontos az átviteli függvény méréséhez. A kalapács mérőfejének érzékenységét mV/N mértékegységben adtam meg.

A rendszer rezgésválaszát is piezo elven működő eszközökkel, gyorsulásérzékelőkkel mértem. Ezeknek az érzékenységeit is mV/N mértékegységben adtam meg, felhelyezésük egy kellően nagy szilárdságú kötőanyaggal, viasszal történt. A szerkezeti véges elem modellezéssel elért eredmények figyelembevételével, azoknak következtetéseiből és értékeléseiből nyert információk szerint helyeztem el a sínszál alkalmas pontjain a három rezgésérzékelőt, valamint a sínszál közepétől 1 méter távolságra egy mikrofont. A 24. ábra mutatja meg a helyettesítő modellen az érzékelők pontos helyét, valamint azoknak érzékelési irányát.



24. ábra Rezgésérzékelők helye a helyettesítő modellen ábrázolva

Mivel a modellben az általam készített két szál: a felső a sínfejen, az alsó pedig a sántalp és a síngerinc találkozásánál fut belül, így a valóságban belső pontokra nem tudtam érzékelőt helyezni. A 6. táblázat foglalja össze az általam használt eszközöket, valamint a rezgésérzékelők valódi helyét.

Csatorna		Pont	Hely	Irány
1	Kalapács	-	-	-
2	Gyorsulásérzékelő	1	Sántalp szélén	Vízszintes
3	Gyorsulásérzékelő	7	Sántalp alján	Függőleges
4	Gyorsulásérzékelő	8	Sínfejen	Vízszintes
5	Mérőmikrofon	(7)	1 méter távolságra	Vízszintes

6. táblázat Használt eszközök és a rezgésérzékelők valódi helye

A piezoelektromos elven működő eszközök az erőből/gyorsulásból nem közvetlenül feszültséget, hanem töltést állítanak elő. A töltést egy töltéserősítővel kell feszültséggé alakítani. A töltéserősítőt a jó jel-zaj viszony érdekében az érzékelőbe építik be, ez az ICP (Integrated Circuit Piezo) mérőműszerek jellemzője. Fontos, hogy az ICP eszközök számára biztosítani kell a 2-20 mA nagyságú egyenáramú táplálást.

A valóságban az általam készített modell gerjesztési pontjait sem lehetett impulzuskalapáccsal elérni, így: a sínfejet függőleges illetve vízszintes irányból, a sántalpat csak vízszintes irányból ütöttem meg, összesen 39 ponton. Minden egyes pontra mérésenként 5-5 kalapácsütést mértem, majd a mérési szoftver az ilyen módon meghatározott átviteli függvényeket átlagolta. Minden ütési pontot felcímkéztem és beszámoltam.

A mérés során a mérőműszerek az $f(t)$ erőgerjesztés és $a(t)$ gyorsulás válaszjelek időbeli lefutását mérik. Minden egyes gerjesztési pontot megütve a három rezgésérzékelő 3 frekvencia átviteli függvényt eredményezett, amelyekből meghatározható a sínszál módusalakjai.

A következő képek mutatják be a laboratóriumban összeállított rendszert, a méréseim összehasonlításának alapját képező csillapítatlan sínszállal. A képeken láthatóak a felcímkézett gerjesztési pontok, a mérésem során használt eszközök: az impulzuskalapács, valamint a rezgésérzékelők is.



1. kép Laboratóriumban összeállított mérési rendszer (jobbról balra számozva)



2. kép Laboratóriumban összeállított mérési rendszer (balról jobbra számozva)

8. VIZSGÁLT ZAJ- ÉS REZGÉSCSILLAPÍTÓ KAMRAELEMEEK

A méréseim összehasonlításának alapja a laboratóriumban összeállított rendszer a csillapítatlan sínszállal. Erre a csillapítatlan sínszállra helyeztem fel a különböző összetételű és geometriájú zaj- és rezgéscsillapító kamraelemeket.

Ezek a zaj- és rezgéscsillapító kamraelemek más-más összetételű gumiőrleményből, gumikeverékből készült önálló szerkezeti elemek. Kétféle módszerrel lehet felhelyezni ezeket a sínkamrára: vannak ragasztási technikával felhelyezhető és szerelhető (szorító kapcsok, kengyelek, csavarozható szorítók) elemek.

Ugyanazon sínszálon, ugyanolyan laboratóriumi körülmények mellett végeztem el ugyanazokat a méréseket, amit a csillapítatlan sínszálon. A mérések ezáltal összehasonlíthatók, számszerű adatokat nyertem arról, hogy mennyire hatékony a különböző zaj- és rezgéscsillapító kamraelemekkel ellátott sínszál a csillapítatlan sínszállal szemben. Méréseim választ tudnak adni arra a kérdésre is, hogy melyik felhelyezési módszer hatékonyabb a zaj- és rezgéscsillapításban, természetesen laboratóriumi körülmények mellett.

Három cég kölcsönzött kutatási és labormunkámhoz zaj- és rezgéscsillapító kamraelemeket. A három cég: SPED-M Kft., GRANUFLEX Kft., valamint a STRAILastic. Ebben a fejezetben a különböző cégek által kölcsönzött és dolgozatom témáját képező kamraelemeket és a laboratóriumi mérések körülményeit mutatom be részletesebben.

8.1. SPED-M Kft. elemei

A SPED-M Kft.-től összesen kétféle zaj- és rezgéscsillapító kamraelemet kaptam.

8.1.1. SOFIDON® (SOFIDON-F) sínkamra elem UIC 60 szabványú sínhez

Az egyik elem volt a SOFIDON sínkamra betét (méréseimnél később SOFIDON-F), ami Magyarországon már használatban van, 25 km szakaszon van beépítve. Ezek a szakaszok: Kápolnásnyék – Újdinnyés és Esztergom-Kertváros, Monor – Pilis, Sopron – Kismarton nagyvasúti pályán valamint a Millenniumi földalatti vonalon. Az elem ragasztva van felhelyezve a sínkamrára. Geometriáját tekintve ez az elem volt az általam mérték közül a legkisebb, semmilyen körülmények között nem zavarja a pályaépítési és fenntartási munkákat.

Anyaga:

Gumi őrlemény, ásványi őrlemény, térkitöltő polimer, stabilizátorok, öregedés gátlók.

Méretek:

Hosszúság: 495 mm

Magasság: 91 mm

Vastagság: 24 mm

Tömege:

1100 gramm, [$\pm 20g$]

Színe:

Fekete [igény szerint színezhető]

Profil:

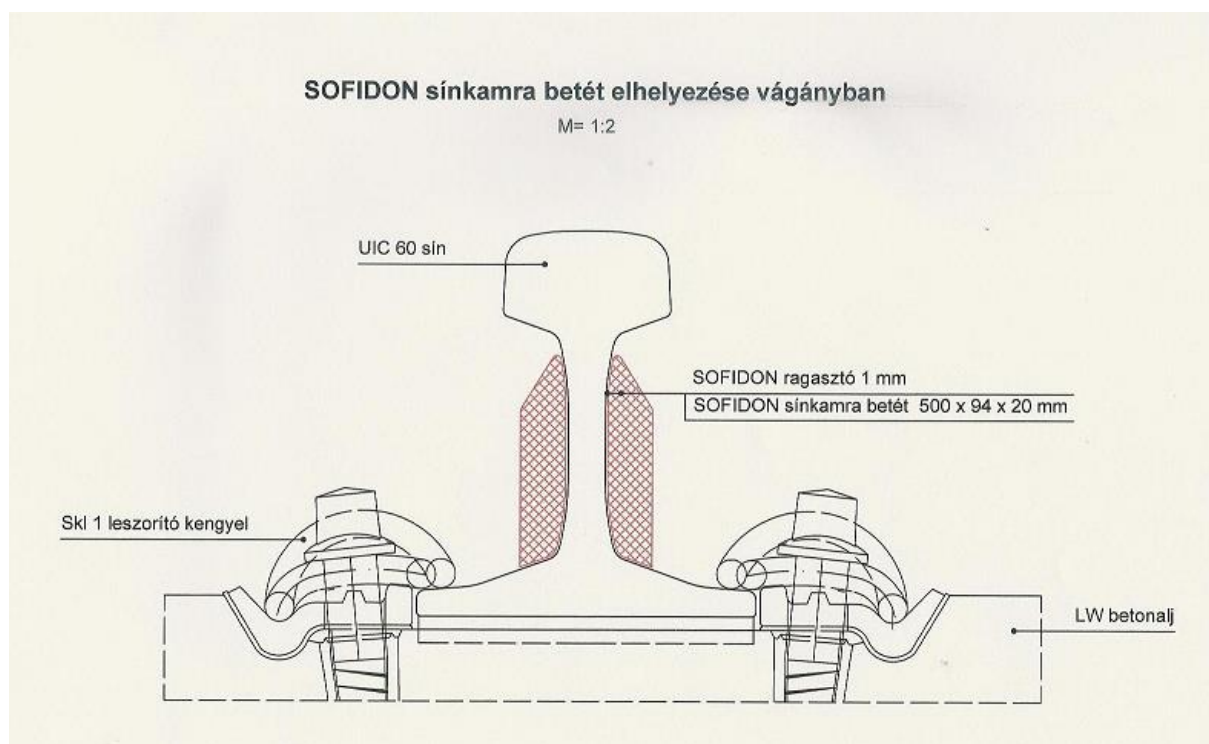
Ragasztási oldalról UIC rendszerű sínnel megegyező

Hőmérséklet tűrése:

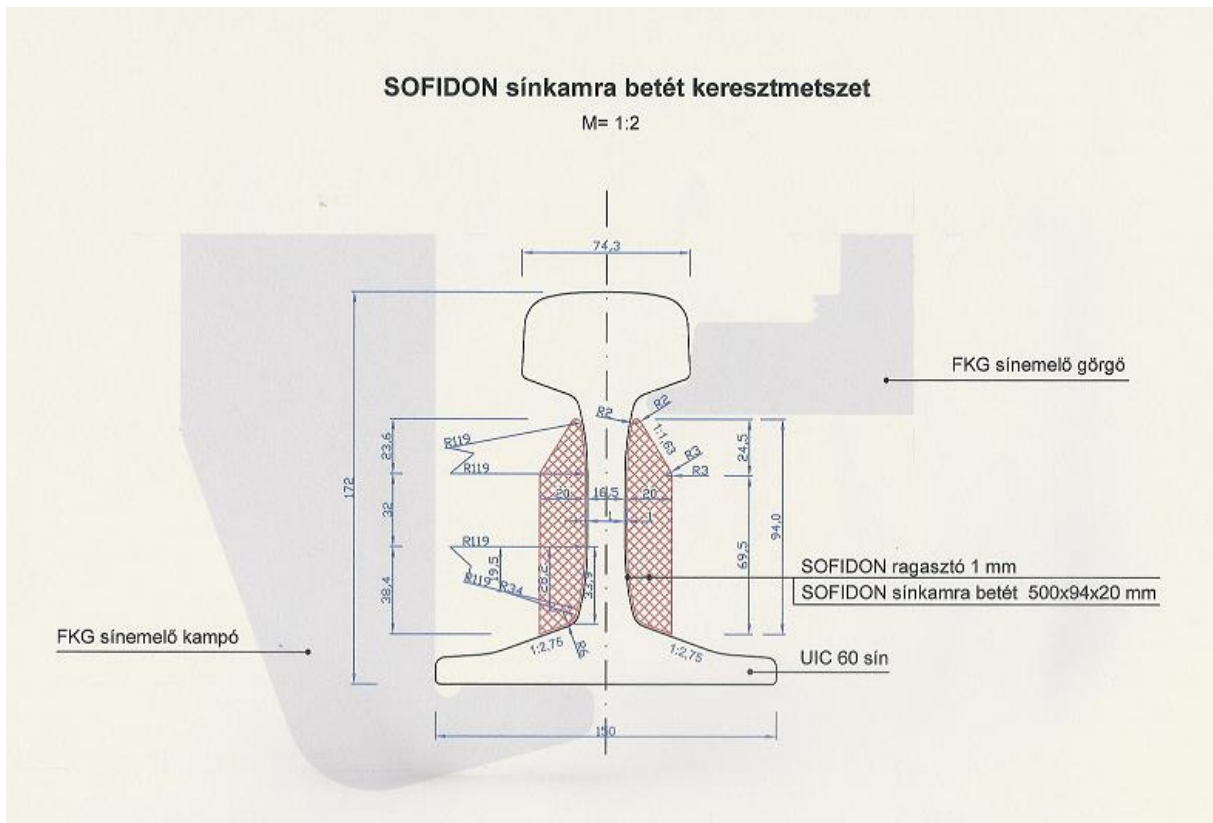
Tartósan [$-35^{\circ}\text{C} + 100^{\circ}\text{C}$ között]

Egyéb:

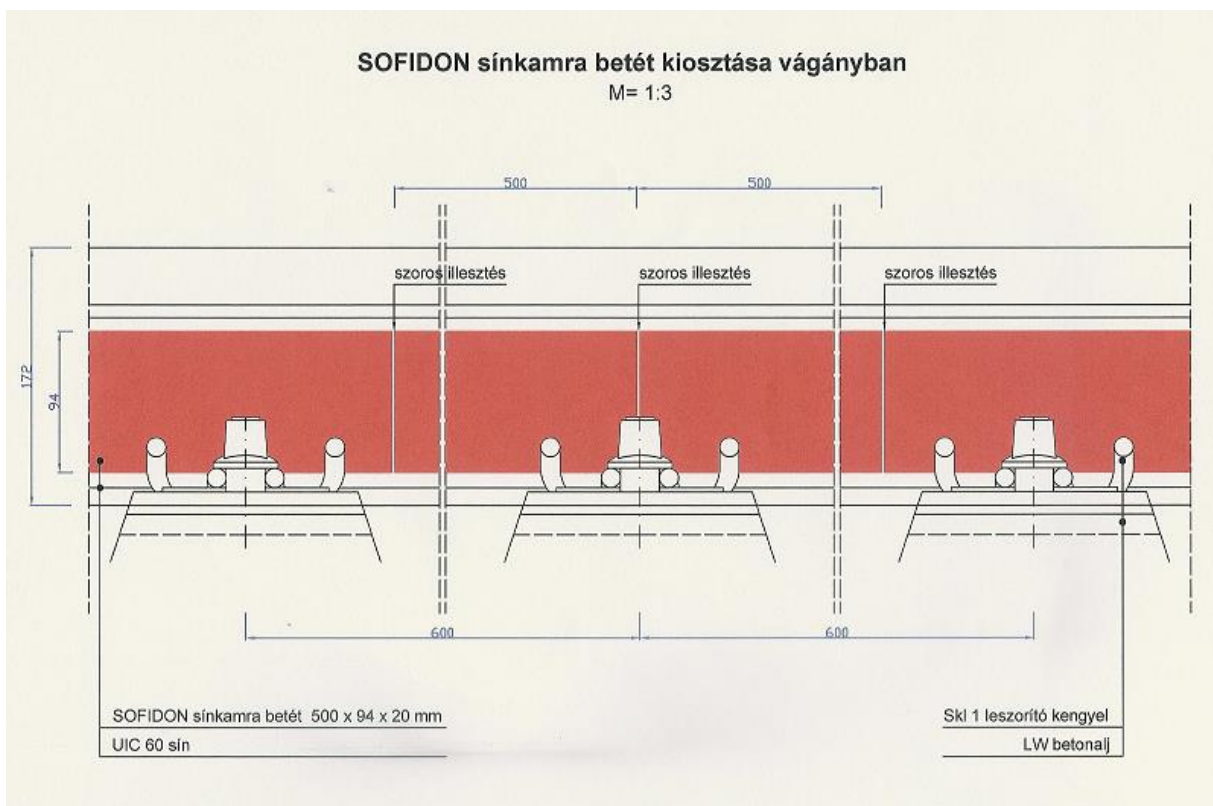
Ellenáll a ráfolyó hajtó és kenőanyagoknak, nem károsítja a pálya használatából eredő szennyeződések. Nem károsítja a fékezéskor rákerülő forró vaspár. Öregedési ideje több mint 30 év, fény és UV stabil.



25. ábra SOFIDON-F sínkamra betét elhelyezése vágányban, keresztmetszet



26. ábra SOFIDON-F sínkamra betét keresztmetszete, FKG zavartalan működése



27. ábra SOFIDON-F sínkamra betét kiosztása vágányban



3. kép SOFIDON-F kamraelem élpályába beépítve



4. kép SOFIDON-F kamraelem oldalról



5. kép A laboratóriumban összeállított rendszer a SOFIDON-F típusú kamraelemmel

8.1.2. SOFIDON-T TÍPÚSÚ KAMRAELEM

A másik típusú kamraelem a SOFIDON-T típusú kamraelem, amit kísérleti elemként kaptam a méréseimhez. Ez az elem még nincs használatban, nincs beépítve élőpályába, az első méréseket én végezhettem rajta.

Ennek az elemnek a keresztmetszeti geometriája jóval nagyobb az előzőnél, ezáltal a súlya is a többszöröse volt. Pontosabb információk (adatok és jellemzők) az elemről nem állnak rendelkezésemre.

Ezt az elemet kétféle felhelyezési módszerrel is vizsgáltam. Az egyik a szerelhető változata volt, amit két oldalról tartó lemezek rögzítettek. Ezt a két oldallemezt alulról egy újabb lemez kapcsolta össze, és ezek együttesen voltak összecsavarozva.

A másik mérést ugyanezen a gumielemen végeztem, csak rögzítése ragasztással történt.

Mérési eredményeim természetesen választ adtak arra is, hogy melyik rögzítési módszer hatékonyabb ilyen összetételű gumival és annak geometriájával.



6. kép SOFIDON-T típusú rendszer szerelhető formában rögzítve a sínzálon



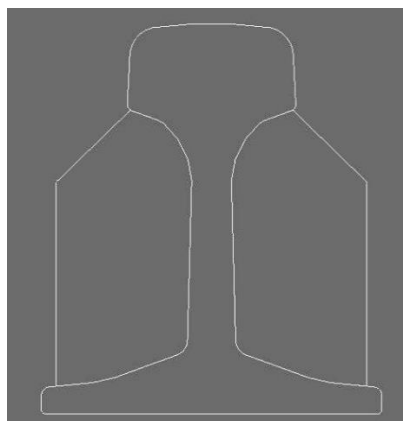
7-8. kép SOFIDON-T típusú kamraelem szerelve és ragasztott módszerrel felhelyezve



9. kép SOFIDON-T típusú rendszer ragasztással rögzítve a sínszálon

8.2. GRANUFLEX Kft. elemei

A GRANUFLEX Kft-től összesen négy zaj- és rezgéscsillapító elemet kaptam. Ezek mind kísérleti elemek, fejlesztés fázisában vannak, az első kísérleteket én végezhettem rajtuk. Mind a négy elem ugyanolyan geometriával készült, keresztmetszetét a 28. ábra mutatja.

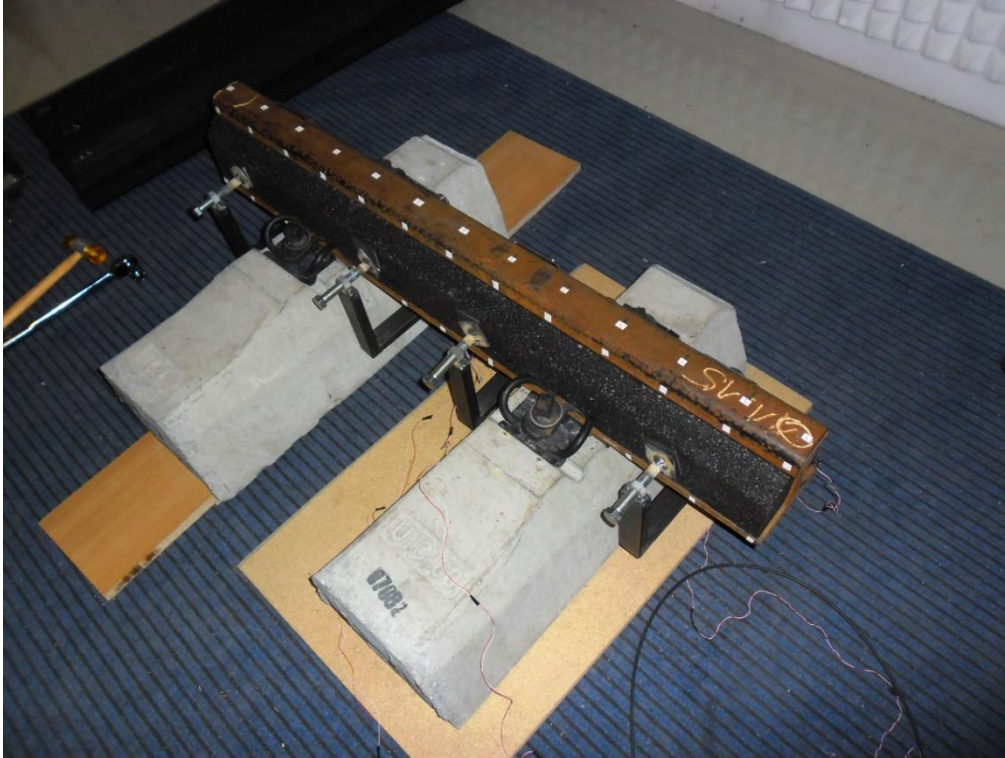


28. ábra GRANUFLEX Kft. elemeinek keresztmetszete

A kamraelemek összetételükben különböznek, ami meghatározza azok tömörségét. A négy elemet ideiglenesen G1 - G4 típusjellel láttam el. A G4-es jelű sínkamra elem a legtömörebb, ebben már kavics töltőanyag is található. Az elemek bemért összetételét a 7. táblázat foglalja össze.

KAMRAELEM JELE	ANYAG	BEMÉRÉS [kg]
G1	őrlet (1-4mm)	4,68
	poliuretán	0,46
	fekete színező	0,01
	Összesen	5,16
G2	őrlet (1,5-2,5mm)	5,35
	poliuretán	0,53
	fekete színező	0,01
	Összesen	5,90
G3	őrlet (1,5-2,5mm)	5,12
	őrlet (-1mm)	0,90
	poliuretán	0,60
	fekete színező	0,01
	Összesen	6,63
G4	őrlet (1,5-2,5mm)	4,27
	kavics (1-4mm)	5,75
	poliuretán	0,57
	fekete színező	0,04
	Összesen	10,64

7. táblázat GRANUFLEX Kft. elemek anyagának összetétele



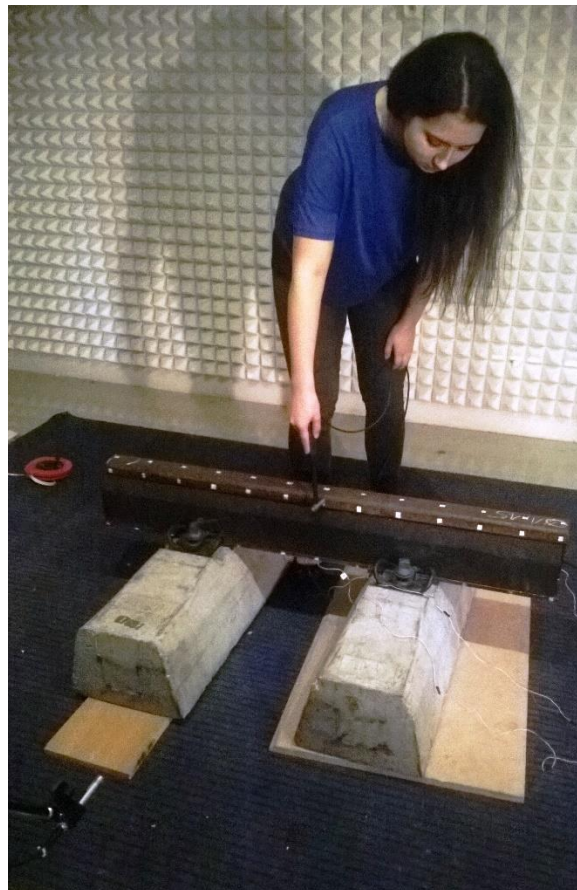
10. kép GRANUFLEX kamraelem szorítókkal felhelyezve



11. kép GRANUFLEX kamraelem szorítókkal felhelyezve, oldalról

Ezek a zaj- és rezgéscsillapító kamraelemek tehát kísérleti elemek, élőpályába nincsenek beépítve. Mivel a fejlesztés fázisában vannak, így kialakított szorítóval való rögzítés még nincsen megoldva ezeknél az elemeknél. A laboratóriumban *10-11. képen* látható szorítóeszközökkel oldottam meg felhelyezésüket. A Granuflex Kft. elemeinél elsősorban csak a gumielemek hatékonyságának megállapítása volt a cél, így ez a felhelyezési módszer megfelelő volt arra, hogy egymáshoz képest viszonyítási adatokat nyerjek róluk.

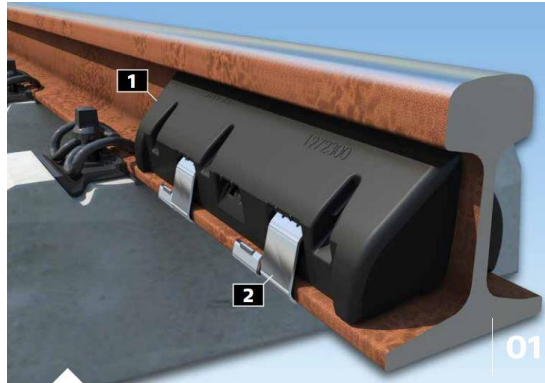
Az elért eredményekből látva, hogy jelentős különbség a 4-es és a 3-as elem között nincsen, viszont a 1-es és 2-es elemhez képest jobb értékek adódtak, így a G3-as jelű elem lett kiválasztva. Ezt ragasztási módszerrel felhelyezve is megvizsgáltam, ami a *12. képen* látható. Ezzel az eredménnyel most már képet kapok arról is, hogy melyik felhelyezési módszerrel hatékonyabb ez az elem.



12. kép GRANUFLEX Kft. G3-as jelű kamraeleme ragasztva, mérés közben

8.3. STRAILastic eleme

8.3.1. STRAILastic A inox típusú kamraelem



29. ábra STRAILastic_A_inox kamraelem beépítve az élópályában

STRAILastic_A inox elem egy tömör gumikeverékből áll, amit egy speciális vulkanikus eljárásan keresztül állítanak elő (vulkanizált kaucsukkeverék). A rugalmas anyag csillapítóan hat, a zajlesugárzás általa minimalizálva van. Semmilyen környezetkárosító anyag nem található benne. Az összes sítípushoz előállítható. Ehhez az elemhez extrém hosszú élettartamú rögzítők tartoznak, amelyek nemes acélból készülnek. Nagy előnye a szorítóknak, hogy nem kell karbantartani azokat.



13. kép STRAILastic_A_inox kamraelem beépítve az élópályában

Beépítése időjárás független, szerelhetősége gyorsnak és tartósnak mondható. A beépített elemek a síneken végzett kontroll és mérési munkákat se nem befolyásolják, se nem akadályozzák.



14. kép STRAILastic_A_inox típusú kamraelem a laborban összeállított rendszerre felhelyezve



15. kép STRAILastic_A_inox típusú kamraelem oldalról

Vizsgálatomat egy 1 méter 20 cm hosszú sínszálon végeztem és 2 db STRAILastic_A_inox típusú kamraelem állt rendelkezésemre, így ezeket csak a sínszál középre tudtam felhelyezni. A STRAIL kamraelemei önálló elemek és a sínleerősítések közé vannak tervezve, így a sínszálam végeire nem kerültek ilyen önálló elemek (nem állt rendelkezésemre, valamint el kellett volna vágni azokat). Mivel a másik két cég elemei a sínszálon végig voltak felhelyezve, így a STRAIL elemének valódi eredményei az általam mértnél jobb értékek.

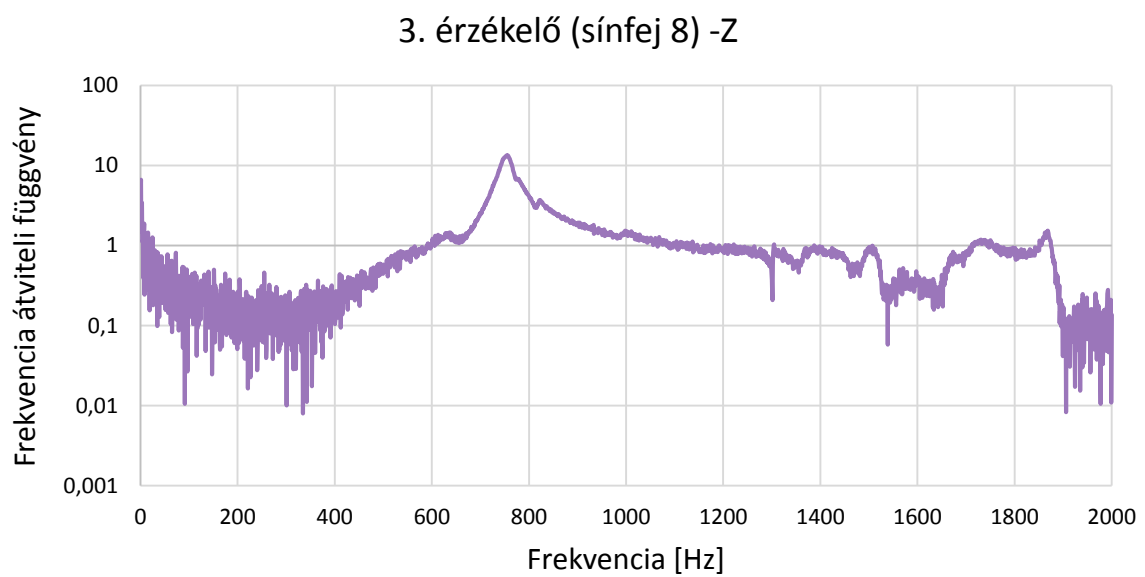
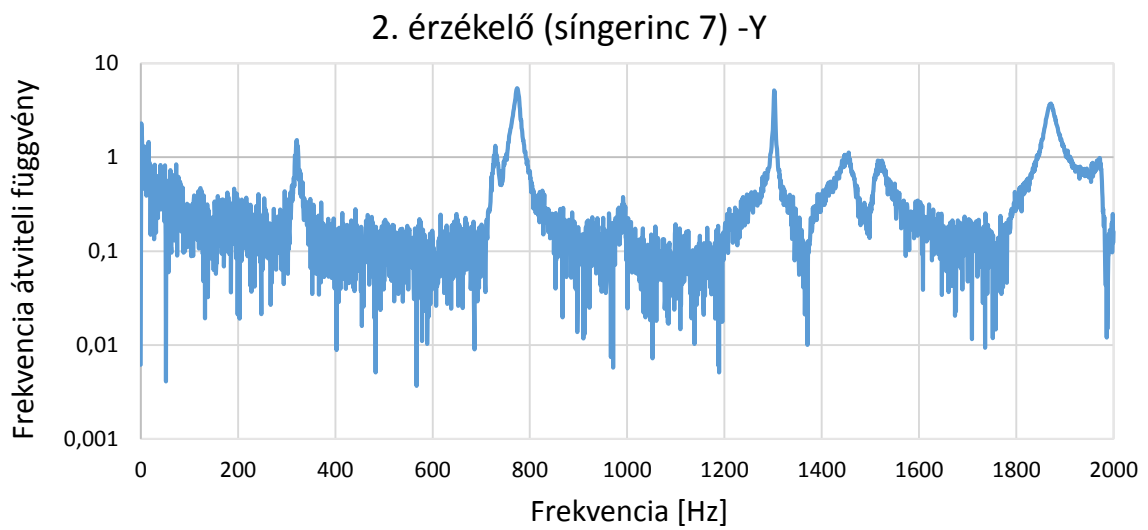
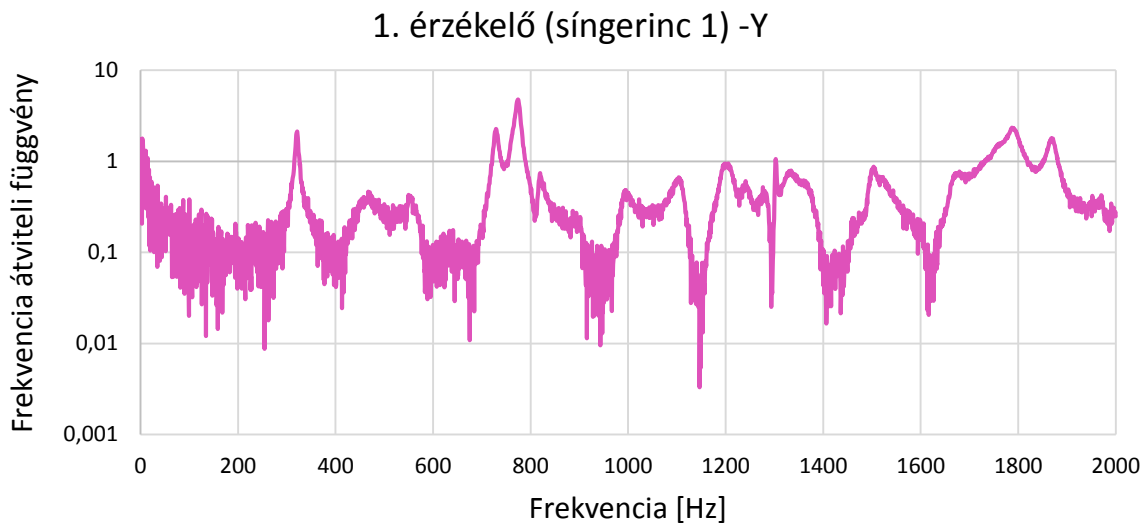
9. SZERKEZETI MÓDUSELEMEZÉS

Az elméleti háttér című fejezetnél írtakat összefoglalva tehát a móduselemzés a mérés technikám egy alapvető módszere arra, hogy a rezgő szerkezet, vagyis a sín szál viselkedését leírja. A technika lényege az, hogy a rendszert rezgésgerjesztővel (impulzuskalapáccsal) gerjesztettem, és mikrofonnal valamint 3 gyorsulásérzékelővel mértem a válaszát. Ez tehát egy egy bemenetű, de több kimenetű rendszer. A gerjesztések és a válaszok ismeretében határozza meg a Test.Lab programcsomag a rendszer sajátfrekvenciáit és módusalakjait.

A 30. és 31. ábrák az érzékelők válaszainak eredményeit mutatják. A grafikonok a frekvencia függvényében adott pontban az érzékelő által mért gyorsulást mutatják. Tehát: az ábrák megmutatják, hogy a sín abban a pontban, ahol érzékelőt helyeztem el, egy másik pontban való gerjesztés hatására milyen kitéréseket végez a frekvencia függvényében. Ezek a grafikonok mutatják méréseim eredményeit. Annyi ilyen grafikon van, ahány pontban megütöttem a sín szálát, vagyis: a sín fejet és a sín gerincet külön-külön függőleges és vízszintes irányban is 13-13 pontban: összesen 52 pontban. A 3 érzékelő és az 52 pontban gerjesztett sín szál $3 \cdot 52$ frekvencia átviteli függvényt eredményezett. Az érzékelők külön-külön függvényként írják le a sín viselkedését.

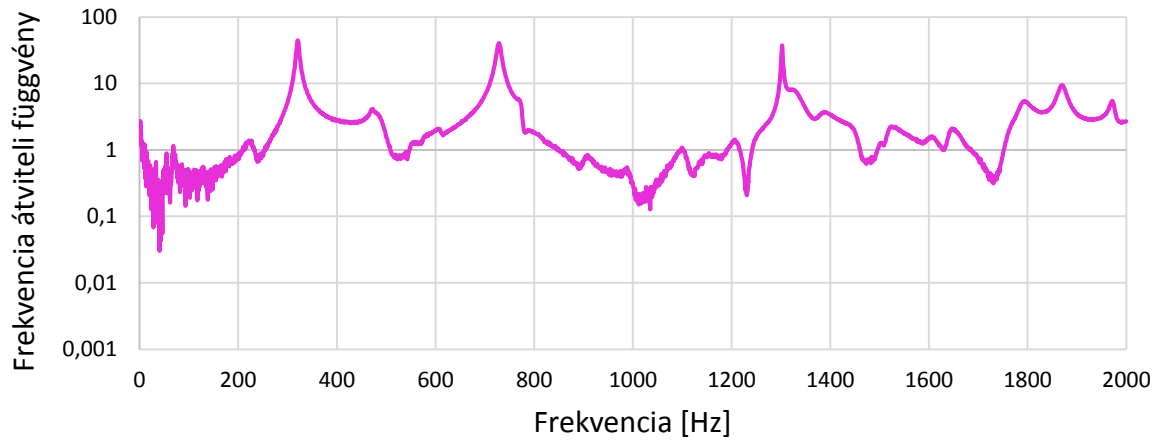
A következő grafikonok mutatnak példát az érzékelők mérési eredményeire 1-1 gerjesztési pont hatására. Az 30. ábra mutatja a két érzékelő vízszintes irányú és egy érzékelő függőleges irányú gyorsulását a sín fej 7. pontján, azaz a sín szál közepén levő pontján végzett vízszintes, egységnyi erőgerjesztés hatását a frekvencia függvényében. Ilyen eredményt mutat még a 31. ábra, ott is a sín fej 7. pontját gerjesztettem, csak ebben az esetben függőleges irányban.

A tisztán kivehető csúcsok a használható eredmények, amiknél látszik, hogy azon a frekvencián mekkora kitérést végez a sín szál. Jól látható, hogy a sín fejet vízszintes irányban gerjesztve a sín fej 8-as pontján, illetve a sín gerinc 1-es pontján lévő vízszintes érzékelők 200 és 400 Hz-es frekvencia között mutatnak jelentős vízszintes kitérést (30. ábra), viszont a sín szál 7-es pontján alul elhelyezett függőleges érzékelő semmit sem jelez ezen gerjesztés hatására. A 31. ábrán látható például, hogy a sín fejet függőlegesen gerjesztve, 1200 és 1400 Hz-es frekvencia között mindhárom érzékelőnél tiszta csúcsok láthatóak. Ez azt jelenti, hogy a gerjesztés hatására ezen frekvenciák között a 3 érzékelő jelez, vagyis érzékelési irányukban tér ki a sín. Ilyen módon lehetne tovább elemezni az ábrákon látható eredményeket, szerencsére erre a fáradságos és hosszadalmas munkára más lehetőségünk is van.

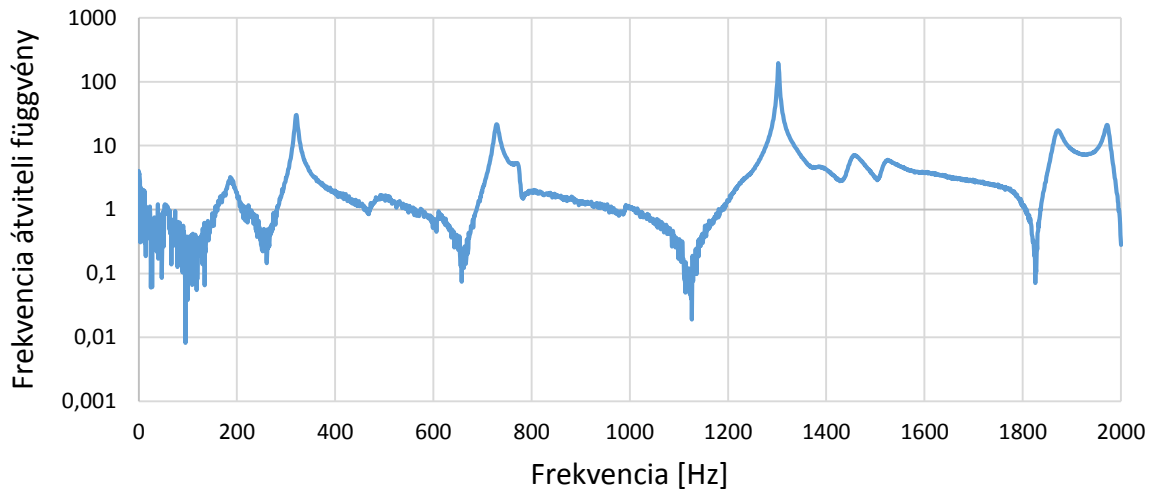


30. ábra A 3 gyorsulásérzékelő által mért eredmények a sínfej 7-es pontját vízszintes irányban gerjesztve

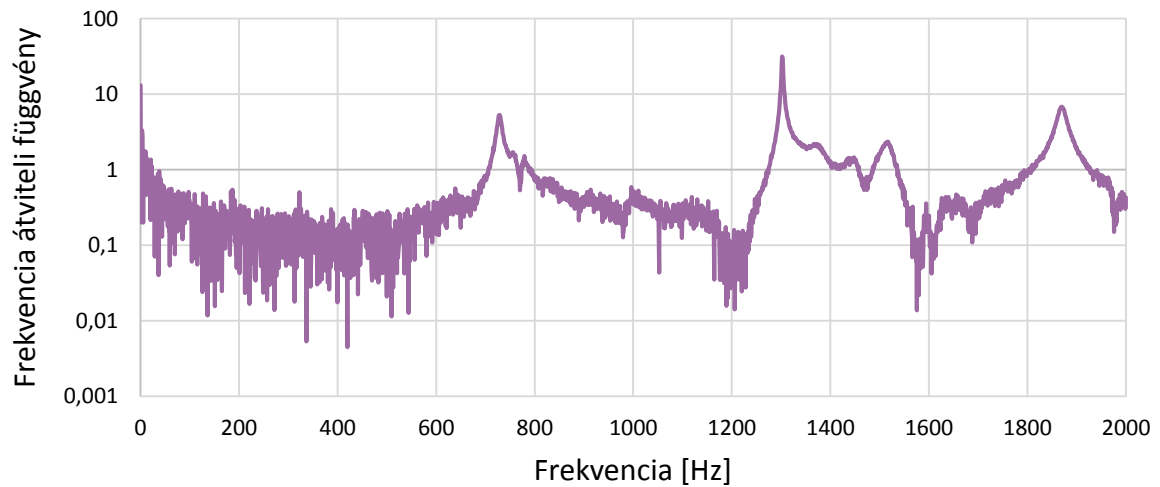
1. érzékelő (síngerinc 1) -Y



2. érzékelő (síngerinc 7) -Y



3. érzékelő (sínfej 8) -Z



31. ábra A 3 gyorsulásérzékelő által mért eredmények a sínfej 7-es pontját függőleges irányban gerjesztve

10. REZGÉCSILLAPÍTÁS EREDMÉNYEK

Mint írtam, mérésenként annyi frekvencia átviteli függvényt kaptam eredményül, ahány pontban gerjesztettem a sínszálat, függetlenül attól, hogy csillapítatlan vagy csillapító kamraelemekkel volt ellátva. Ezeket a függvényeket egyesével elemezni hosszú és fáradságos munka. Így ezekből a mért frekvencia átviteli függvény mátrixokból a Test.Lab programcsomag móduselemező modulja segítségével végeztem móduselemzést. Ez a módszer egy tökéletes és látványos képet ad mérési eredményeimről, vagyis arról, hogy hogyan viselkedik, milyen módusalakokat vesz fel a csillapítatlan sín, és ugyanaz a sín zaj- és rezgéscsillapító kamraelemekkel ellátva. Eredményeimben sajátfrekvenciákat, csillapítási tényezőket és módusalakokat elemeztem.

A méréseim összehasonlíthatóak. Alapja az, hogy minden mérésből kigyűjtöm a módusalakokat, és azonosakat keresek a csillapítatlan sínszálnál és a különböző csillapítóelemeknél is. Az azonos módusalakoknál jelentkező frekvenciák értékei nem lesznek egyenlők. A végeeselemes modellezés résznél írtak itt is érvényesek, hogy ezek a frekvencia értékek függenek attól, hogy mennyire mereven fogom le a sínt, valamint a különböző kamraelemek geometriája és tömege is befolyásoló tényező. A kamraelemek hatékonyságának mértéke a csillapítási tényezőkben látható. Csak ugyanolyan módusalakok hasonlíthatóak össze, és a csillapítatlan sínszál csillapítási tényezőjéhez hasonlítom az elemek tényezőit. Minél nagyobb egy kamraelemmel ellátott sínszál csillapítási tényezője, annál hatékonyabb annak rezgéscsillapítása. Vannak természetesen olyan eredmények is egy-egy kamraelemnél, ahol az adott módusalakot nem lehetett kivenni, ami annyit jelent, hogy a csillapítása olyan hatékony, hogy azon a frekvencián teljesen elnyeli a rezgéseket. A sajátfrekvenciák értékei azok az eredmények, ahol a sínszál felveszi a vizsgált módusalakot.

Az eredményeket táblázatos formában foglaltam össze cégenként. A SPED-M Kft. által kölcsönzött elemeket nem ugyanazon a sínszálon mértem, mint a GRANUFLEX Kft. és a STRAILastic elemeit. A két csillapítatlan sínszál között különbségek vannak, de nem számottevőek, nem kérdőjelezik meg méréseim hitelességét. Az eredményeket ezután módusalakonként foglaltam össze táblázatba, hogy láthatóak és összehasonlíthatóak legyenek közvetlenül a csillapítási értékek. Végül kiválasztva három módusalakot a 3 cég elemei együttesen vannak összehasonlítva. Ezek után a ragasztási és szerelhetőségi módszer közötti hatékonyságok összehasonlítása található.

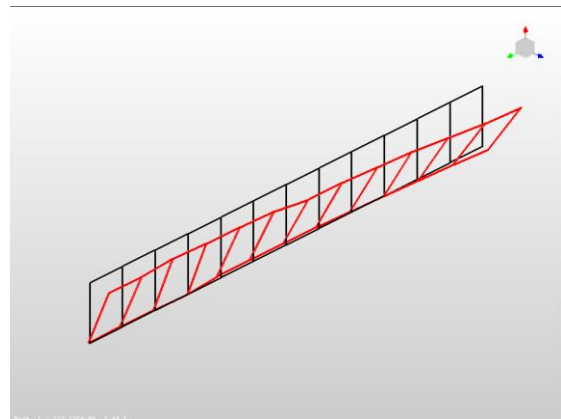
10.1. SPED-M Kft. elemeinek eredményei

	SAJÁTFREKVENCIA [Hz]	CSILLAPÍTÁSI TÉNYEZŐ [%]
CSILLAPÍTATLAN SÍN	233,236	3,49
	327,652	0,78
	811,450	1,02
	1317,576	0,09
	2006,995	0,19
SOFIDON-F (RAGASZTOTT)	216,571	4,44
	314,477	0,88
	1280,727	1,97
	1960,481	2,79
SOFIDON-T2 (RAGASZTOTT)	222,839	5,52
	811,428	3,46
	1313,349	2,47
	1993,127	2,36
SOFIDON-T1 (SZERELT)	777,629	1,48
	1330,377	2,00

8. táblázat A csillapítatlan sínszál és a SPED-M Kft. kamraelemeinek sajátfrekvenciái és csillapítási tényezői

	Hz	%
CSILLAPÍTATLAN	233,236	3,49
SOFIDON-F	216,571	4,44
SOFIDON-T2	222,839	5,52
SOFIDON-T1	-	-

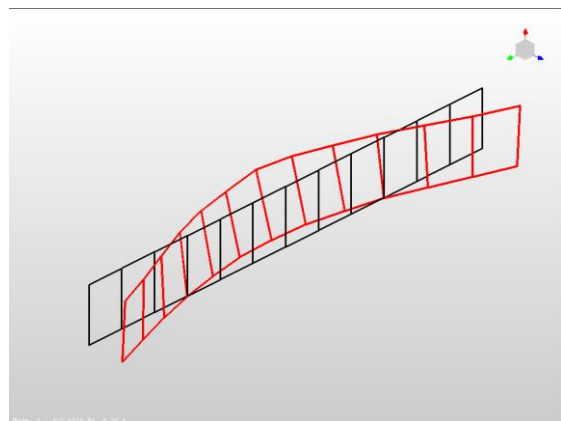
9. táblázat 32. ábrához tartozó értékek



32. ábra Sínszál módusalakja ~220 Hz frekvencián

	Hz	%
CSILLAPÍTATLAN	327,652	0,78
SOFIDON-F	314,477	0,88
SOFIDON-T2	-	-
SOFIDON-T1	-	-

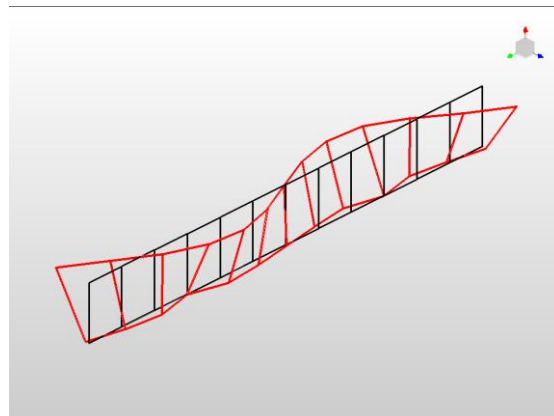
10. táblázat 33. ábrához tartozó értékek



33. ábra Sínszál módusalakja ~320 Hz frekvencián

	Hz	%
CSILLAPÍTATLAN	811,450	1,02
SOFIDON-F	-	-
SOFIDON-T2	811,428	3,46
SOFIDON-T1	777,629	1,48

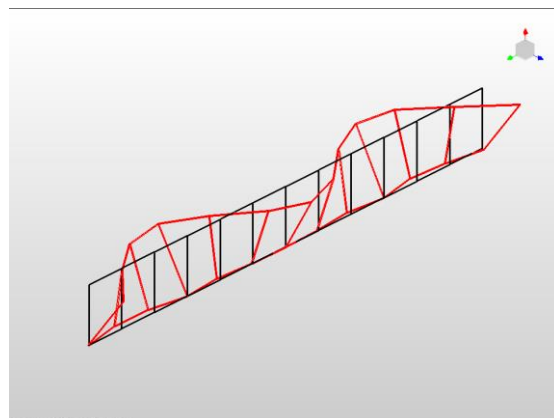
11. táblázat 34. ábrához tartozó értékek



34. ábra Sínszál módusalakja ~800 Hz frekvencián

	Hz	%
CSILLAPÍTATLAN	1317,576	0,09
SOFIDON-F	1280,727	1,97
SOFIDON-T2	1313,349	2,47
SOFIDON-T1	1330,377	2,00

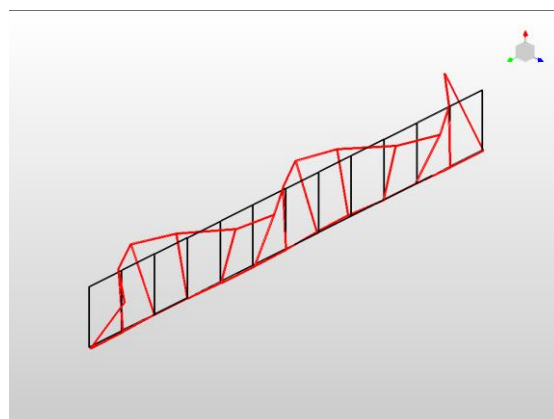
12. táblázat 35. ábrához tartozó értékek



35. ábra Sínszál módusalakja ~1320 Hz frekvencián

	Hz	%
CSILLAPÍTATLAN	2006,995	0,19
SOFIDON-F	1960,481	2,79
SOFIDON-T2	1993,127	2,36
SOFIDON-T1	-	-

13. táblázat 36. ábrához tartozó értékek



36. ábra Sínszál módusalakja ~1990 Hz frekvencián

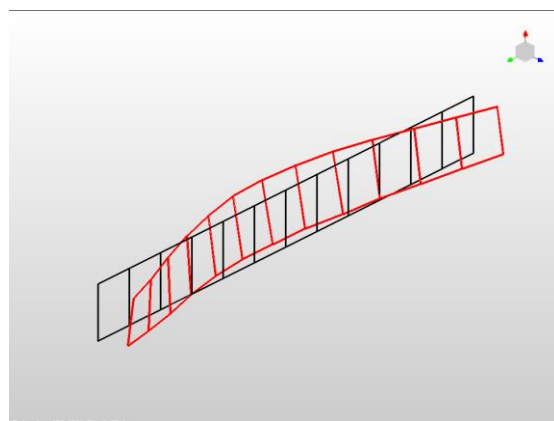
10.2. GRANUFLEX Kft. elemeinek eredményei

	SAJÁTFREKVENCIA [Hz]	CSILLAPÍTÁSI TÉNYEZŐ [%]
CSILLAPÍTATLAN SÍN	320,634	0,87
	728,469	0,60
	774,174	0,58
	1302,445	0,11
	1869,861	0,48
	1972,692	0,27
GRANUFLEX 1	327,557	4,27
	729,797	1,13
	776,721	1,27
	1303,962	0,47
	1871,538	0,98
	1974,799	0,59
GRANUFLEX 2	329,443	7,03
	732,006	1,19
	779,603	1,58
	1305,935	0,67
	1875,456	1,08
	1976,384	0,58
GRANUFLEX 3	731,388	1,37
	780,414	1,53
	1306,059	0,71
	1874,946	1,17
	1976,206	0,78
GRANUFLEX 4	736,568	2,11
	791,763	3,29
	1308,826	0,95
	1875,982	1,81
	1980,180	1,13
GRANUFLEX 3 RAGASZTOTT	282,980	3,43
	705,460	2,72
	1304,258	2,30
	1971,724	2,11

14. táblázat A csillapítatlan sínszál és a GRANUFLEX Kft. kamraelemeinek sajátfrekvenciái és csillapítási tényezői

	Hz	%
CSILLAPÍTATLAN	320,634	0,87
G-1	327,557	4,27
G-2	329,443	7,03
G-3	-	-
G-4	-	-
G-3 R	282,980	3,43

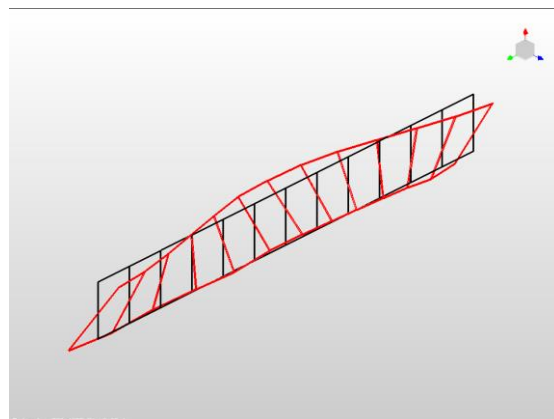
15. táblázat 37. ábrához tartozó értékek



37. ábra Sínszál módusalakja ~320 Hz frekvencián

	Hz	%
CSILLAPÍTATLAN	728,469	0,60
G-1	729,797	1,13
G-2	732,006	1,19
G-3	731,388	1,37
G-4	736,568	2,11
G-3 R	705,460	2,72

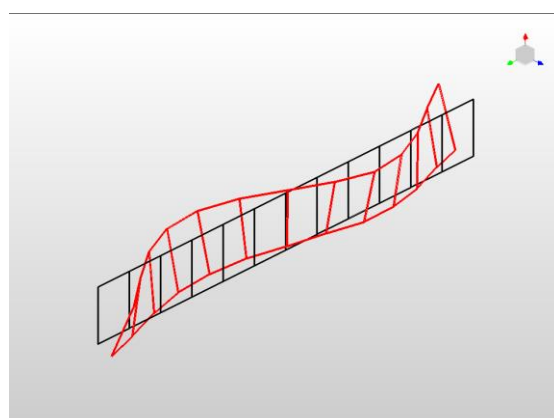
16. táblázat 38. ábrához tartozó értékek



38. ábra Sínszál módusalakja ~730 Hz frekvencián

	Hz	%
CSILLAPÍTATLAN	774,174	0,58
G-1	776,721	1,27
G-2	779,603	1,58
G-3	780,414	1,53
G-4	791,763	3,29
G-3 R	-	-

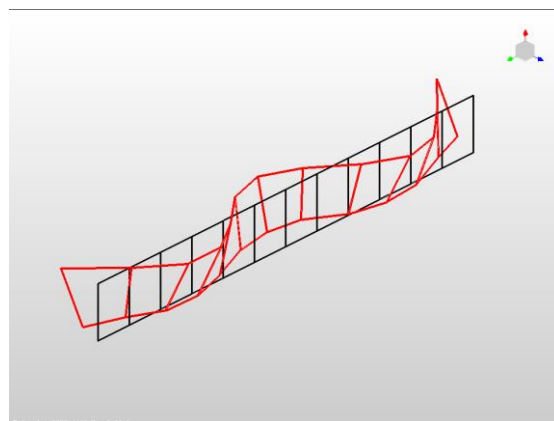
17. táblázat 39. ábrához tartozó értékek



39. ábra Sínszál módusalakja ~780 Hz frekvencián

	Hz	%
CSILLAPÍTATLAN	1302,445	0,11
G-1	1303,962	0,47
G-2	1305,935	0,67
G-3	1306,059	0,71
G-4	1308,826	0,95
G-3 R	1304,258	2,30

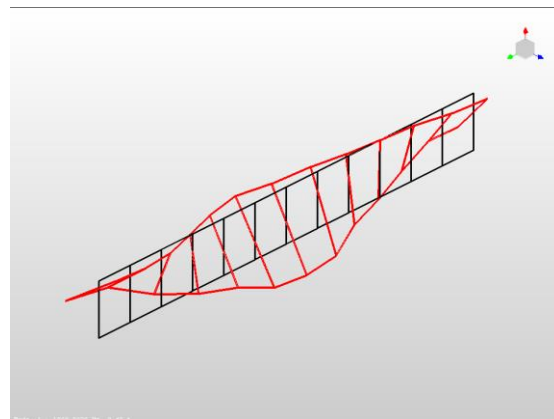
18. táblázat 40. ábrához tartozó értékek



40. ábra Sínszál módusalakja ~1305 Hz frekvencián

	Hz	%
CSILLAPÍTATLAN	1869,861	0,48
G-1	1871,538	0,98
G-2	1875,456	1,08
G-3	1874,946	1,17
G-4	1875,982	1,81
G-3 R	-	-

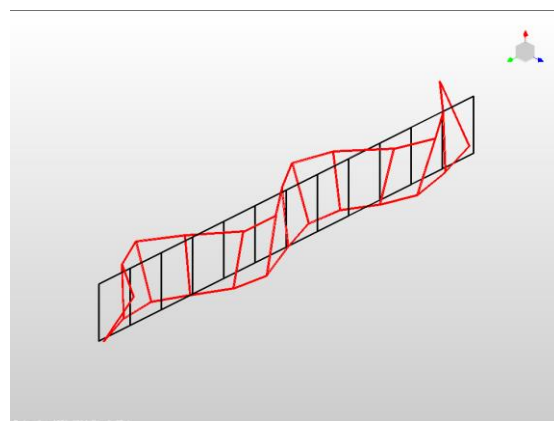
19. táblázat 41. ábrához tartozó értékek



41. ábra Sínszál módusalakja ~1875 Hz frekvencián

	Hz	%
CSILLAPÍTATLAN	1972,692	0,27
G-1	1974,799	0,59
G-2	1976,384	0,58
G-3	1976,206	0,78
G-4	1980,180	1,13
G-3 R	1971,724	2,11

20. táblázat 42. ábrához tartozó értékek



42. ábra Sínszál módusalakja ~1975 Hz frekvencián

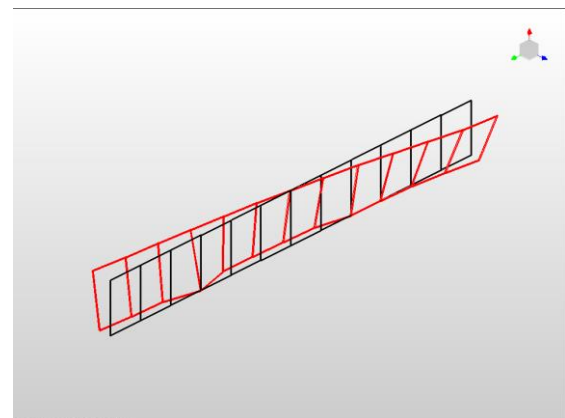
10.3. STRAILactic elemének eredménye

	SAJÁTFREKVENCIA [Hz]	CSILLAPÍTÁSI TÉNYEZŐ [%]
CSILLAPÍTATLAN SÍN	224,251	4,62
	320,634	0,87
	1302,445	0,11
	1972,692	0,27
STRAIL	222,817	5,08
	309,615	4,19
	1314,331	1,06
	1984,300	0,98

21. táblázat A csillapítatlan sínszál és a STRAILastic_A_inox kamraelem sajátfrekvenciái és csillapítási tényezői

	Hz	%
CSILLAPÍTATLAN	224,251	4,62
STRAILastic_A_inox	222,817	5,08

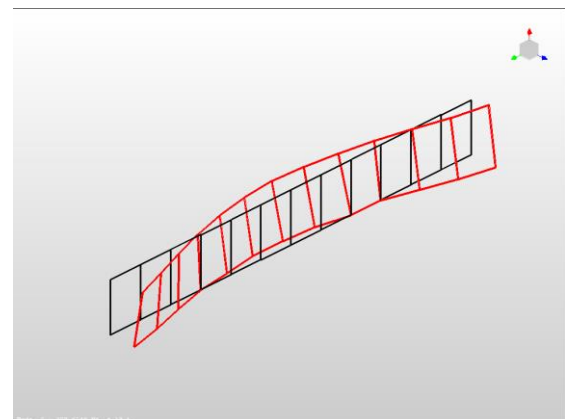
22. táblázat 43. ábrához tartozó értékek



43. ábra Sínszál módusalakja ~220 Hz frekvencián

	Hz	%
CSILLAPÍTATLAN	320,634	0,87
STRAILastic_A_inox	309,615	4,19

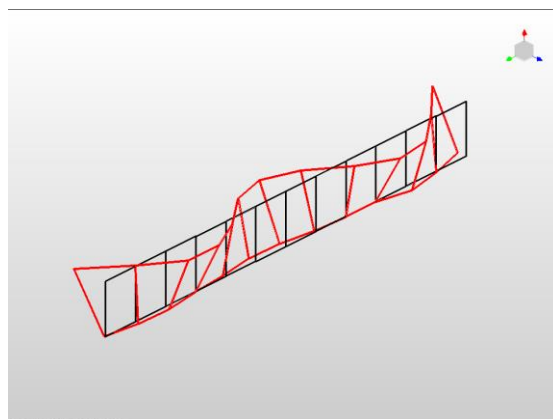
23. táblázat 44. ábrához tartozó értékek



44. ábra Sínszál módusalakja ~315 Hz frekvencián

	Hz	%
CSILLAPÍTATLAN	1302,445	0,11
STRAILastic_A_inox	1314,331	1,06

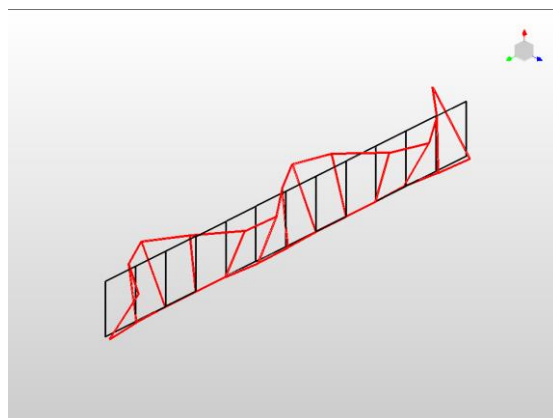
24. táblázat 45. ábrához tartozó értékek



45. ábra Sínszál módusalakja ~1310 Hz frekvencián

	Hz	%
CSILLAPÍTATLAN	1972,692	0,27
STRAILastic_A_inox	1984,300	0,98

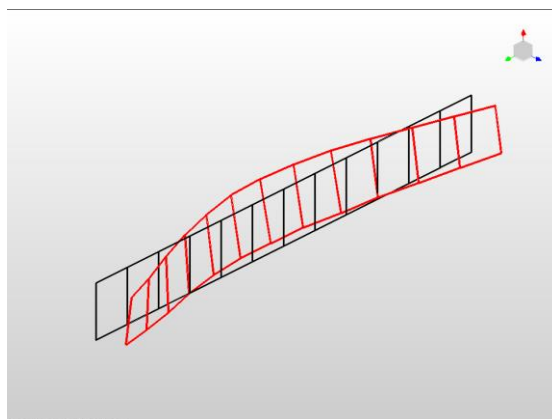
25. táblázat 46. ábrához tartozó értékek



46. ábra Sínszál módusalakja ~1980 Hz frekvencián

10.4. Összehasonlítások, értékelések

10.4.1. Csillapítatlan sínhez képest a rezgéscsillapítások

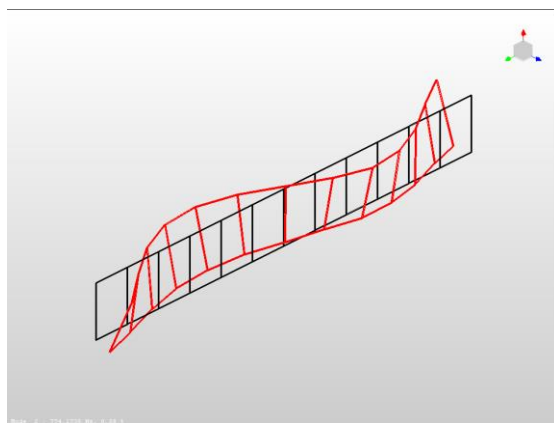


47. ábra Sínszál módusalakja ~320 Hz frekvencián

CÉG	KAMRAELEM TÍPUSA	SAJÁT-FREKVENCIA [Hz]	CSILLAPÍTÁSI TÉNYEZŐ [%]	CSILLAPÍTATLAN SÍNSZÁL		CSILLAPÍTÁSI TÉNYEZŐK KÜLÖNBSÉGE
				[Hz]	[%]	
SPED-M	SOFIDON-F	314,477	0,88	327,652	0,78	+ 0,1
	SOFIDON-T2	-	-			-
	SOFIDON-T1	-	-			-
GRANUFLEX	G-1	327,557	4,27	320,634	0,87	+ 3,40
	G-2	329,443	7,03			+ 6,16
	G-3	-	-			-
	G-4	-	-			-
	G-3 R	282,980	3,43			+ 2,56
STRAIL	STRAILastic_A_inox	309,615	4,19	320,634	0,87	+3,32

26. táblázat 47. ábrán látható módusalakhoz tartozó kamraelemek eredményeinek összehasonlítása

Ezekből az eredményekből az látható, hogy a SPED-M Kft. kísérleti SOFIDON-T eleme ezen a frekvencián teljesen megszünteti a rezgéseket, mindkét felhelyezési módszerrel. A SOFIDON-F eleme viszont ezen a frekvencián egyáltalán nem hatékony. A GRANUFLEX Kft. elemeinek eredményei is ezen a frekvencián hatékonyak módhatók: a G1 és G2 puhább anyagú elemeinek értékei biztatóak, a G3 és G4 tömörebb anyagok pedig szintén elnyelik a rezgéseket. Bár a STRAIL eleme csak a sínszál közepére volt felhelyezve, még így is ugyanolyan versenyképes eredményeket produkált, mint a többi cég elemei.

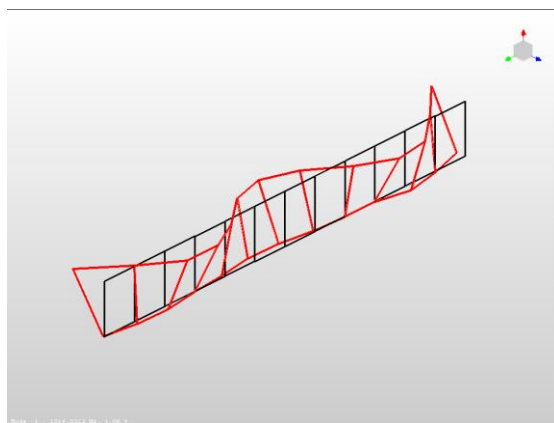


48. ábra Sínszál módusalakja ~780 Hz frekvencián

CÉG	KAMRAELEM TÍPUSA	SAJÁT-FREKVENCIA [Hz]	CSILLAPÍTÁSI TÉNYEZŐ [%]	CSILLAPÍTATLAN SÍNSZÁL		CSILLAPÍTÁSI TÉNYEZŐK KÜLÖNBSÉGE
				[Hz]	[%]	
SPED-M	SOFIDON-F	-	-	811,450	1,02	-
	SOFIDON-T2	811,428	3,46			+ 2,44
	SOFIDON-T1	777,629	1,48			+ 0,46
GRANUFLEX	G-1	776,721	1,27	774,174	0,58	+ 0,66
	G-2	779,603	1,58			+ 1,00
	G-3	780,414	1,53			+ 0,95
	G-4	791,763	3,29			+ 2,71
	G-3 R	-	-			-
STRAIL	STRAILastic_A_inox	-	-	774,174	0,58	-

27. táblázat 48. ábrán látható módusalakhoz tartozó kamraelemek eredményeinek összehasonlítása

Az előző frekvenciához (ami alacsonyabb) tartozó eredményekhez képest egy magasabb frekvencián kisebb csillapítási tényezőket mértem. Megállapítható, hogy a SOFIDON-F elem alacsonyabb frekvencián egyáltalán nem volt hatékony, viszont magasabb, 720 Hz körüli frekvencián teljesen elnyeli a rezgéseket. Fordított eset történik a kísérleti SOFIDON-T típusú elemnél, viszont ragasztott változatának eredménye jónak mondható. A GRANUFLEX elemeinél a legtömörebb 4-es elem és a 3-as elem ragasztási módszerrel felhelyezve kiemelkedő. A STRAIL eleme ezen a frekvencián is hatékony eszköznek bizonyult a rezgéscsillapításhoz.



49. ábra Sínszál módusalakja ~1315 Hz frekvencián

CÉG	KAMRAELEM TÍPUSA	SAJÁT-FREKVENCIA [Hz]	CSILLAPÍTÁSI TÉNYEZŐ [%]	CSILLAPÍTATLAN SÍNSZÁL		CSILLAPÍTÁSI TÉNYEZŐK KÜLÖNBSÉGE
				[Hz]	[%]	
SPED-M	SOFIDON-F	1280,727	1,97	1317,6	0,09	+ 1,88
	SOFIDON-T2	1313,349	2,47			+ 2,38
	SOFIDON-T1	1330,377	2,00			+ 1,91
GRANUFLEX	G-1	1303,962	0,47	1302,4	0,11	+ 0,36
	G-2	1305,935	0,67			+ 0,56
	G-3	1306,059	0,71			+ 0,60
	G-4	1308,826	0,95			+ 0,84
	G-3 R	1304,258	2,30			+ 2,19
STRAIL	STRAILastic_A_inox	1314,331	1,06	1302,4	0,11	+ 0,95

28. táblázat 49. ábrán látható módusalakhoz tartozó kamraelemek eredményeinek összehasonlítása

A három összehasonlítás közül a legmagasabb frekvenciához tartozó eredmények közül a SPED-M Kft. kamraelemeinek csillapítási értékei tűnnek ki. Hasonló értéket eredményezett a GRANUFLEX 3-as, ragasztási módszerrel felhelyezett eleme. A STRAIL eleme ezen a frekvencián már kevésbé hatékony, de a mérési körülményekhez képest (csak sínszál közepén volt felhelyezve, nem pedig végig) ez az érték is biztató.

10.4.2. Ragasztott és felszerelt rezgéscsillapítók összehasonlítása

GRANUFLEX 3 SZERELT			GRANUFLEX 3 RAGASZTOTT	
Hz	%		Hz	%
-	-	-	282,980	3,43
731,388	1,37	1,35	705,460	2,72
780,414	1,53	-	-	-
1306,059	0,71	1,59	1304,258	2,30
1874,946	1,17	-	-	-
1976,206	0,78	1,33	1971,724	2,11

29. táblázat A Granuflex Kft. 3-as számú kamraelemének szerelt és ragasztással felhelyezett módszerének összehasonlítása

SOFIDON-T1 SZERELT			SOFIDON-T2 RAGASZTOTT	
Hz	%		Hz	%
-	-	-	222,839	5,52
777,629	1,48	1,98	811,428	3,46
1330,377	2,00	0,47	1313,349	2,47
-	-	-	1993,127	2,36
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-

30. táblázat A SPED-M Kft. SOFIDON-T típusú kamraelemének szerelt és ragasztással felhelyezett módszerének összehasonlítása

A GRANUFLEX 3-as és a SPED-M SOFIDON-T típusú elemét mértem kétféle felhelyezési módszerrel. Mindkét elem kísérleti elem, méréseim egyik célja között volt, hogy megállapítsam melyik felhelyezési módszer alkalmasabb.

A mért számadatokból látható, hogy a GRANUFLEX 3-as eleme sokkal hatékonyabb ragasztással felhelyezve. Több frekvencián teljesen elnyeli a rezgéseket, ahol pedig nem, ott legalább 1,3 %-kal jobb eredményeket mutat, mint szerelt változata.

A SPED-M SOFIDON-T eleme a legnagyobb geometriával rendelkezik a mért kamraelemek közül, és szerelve, a lemezek és csavarok által, egy masszív szerkezetet alkot. Összes módus közül csak kettő módusalakot lehetett kimérni, annyira hatékony a csillapítása rezgés terén, hogy a többi frekvencián elnyeli azokat. Ragasztott változatának eredményei is kiemelkedőek, már ezek az értékek is megfelelő hatékonyságnak bizonyulnak.

11. HANGLESUGÁRZÁS



16. kép Mikrofon mérési helye

A mérési rendszeremtől, a betonlajhoz leerősített csillapítatlan sínszáltól 1 méter távolságra helyeztem el egy mikrofont, ami a sínfej magasságában vízszintes irányban mért. A mikrofonok a hangot, mint mechanikai rezgést elektromos jellé alakítják át. Feladatuk, hogy a levegő rezgéseit a membránjukkal felfogják és azzal arányos kimenő feszültséget hozzanak létre. Tehát a mikrofonok olyan elektromechanikai átalakítók, amelyek a hangnyomással arányos kimenő feszültséget szolgáltatnak. A bemenő mennyiség a membránon fellépő hangnyomás (időfüggvénye), a kimenő pedig a terheletlen feszültség. Az érzékenység a mikrofonok egyik fő jellemzője, amely a kimenőfeszültség és a hangnyomás hányadosa, mértékegysége $mV/\mu\text{bar}$. Az általam használt mikrofon érzékenységét kalibrálással állapítottam meg.

A mikrofonnal az impulzus gerjesztés hatására fellépő sínszál által lesugárzott hangjának vízszintes irányú komponensét mértem. Azért a vízszintes irányú komponenset, mert a kerék-sín kapcsolatából származó zajok vízszintes komponense terheli igazán a vasúti pálya mellett élőket. Az általam használt szoftver segítségével közvetlenül megkaphatjuk a mikrofon időtartománybeli választ, a frekvencia átviteli függvényeket. Minden egyes egységnyi erővel gerjesztett pont eredményét együttesen ábrázolva kaptam képet arról, hogy milyen tartományban működik a mikrofon.

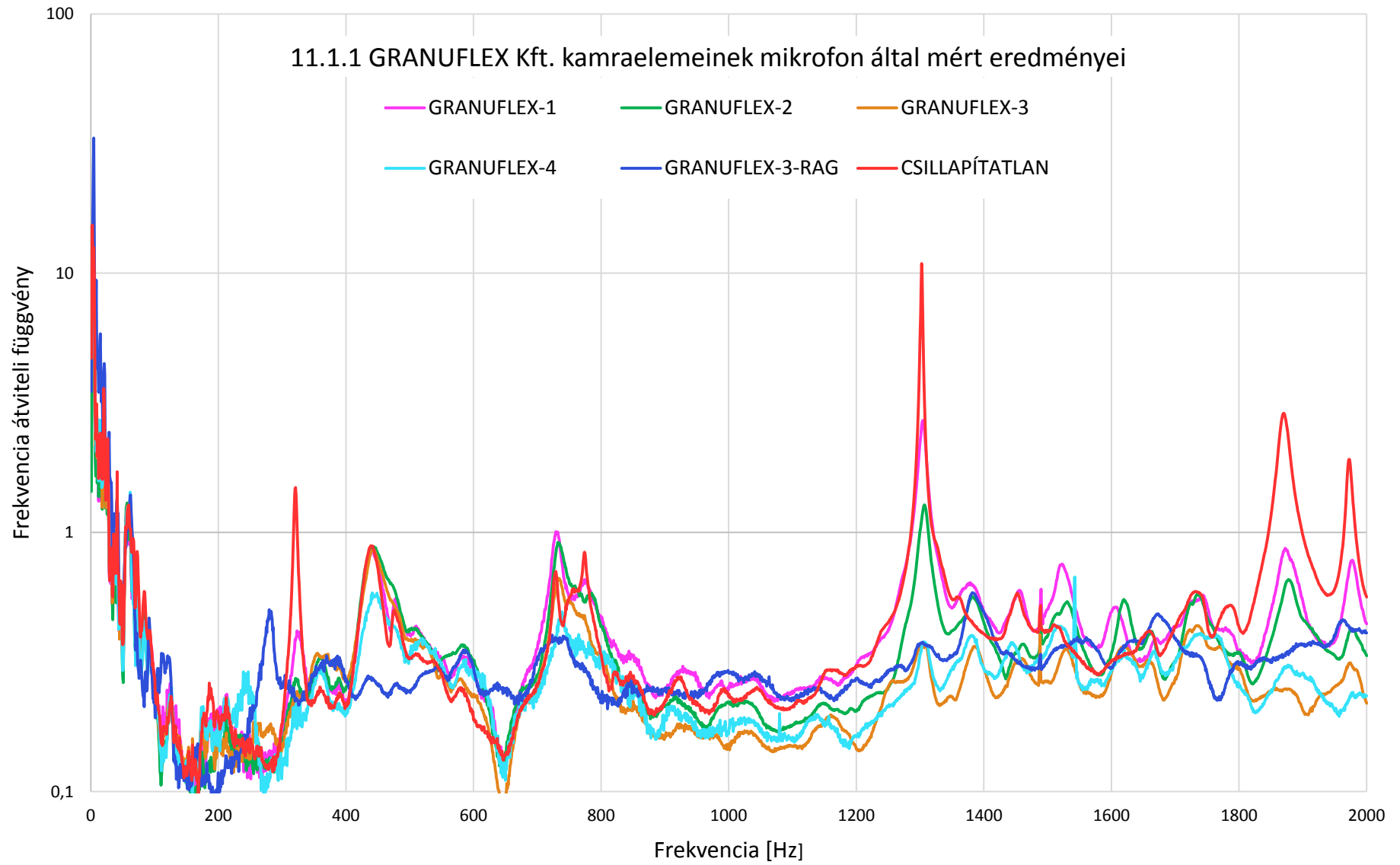
A grafikonok frekvencia átviteli függvényének tengelye logaritmikus léptékben van, közvetlenül leolvasva pontatlan, és nem decibel mértékegységben lévő eredményeket kapunk. A decibel (dB) két mennyiség arányának logaritmikus mértéke. Ahhoz, hogy megállapítsuk egyes elemek zajcsökkentésének dB-ben való eredményét, az alább képletet kell használni:

$$L = 20 \cdot \log\left(\frac{\text{érték2}}{\text{érték1}}\right)$$

Esetemben az érték1-nek a csillapítatlan sínszálát választom, érték2-nek pedig a vizsgált sínkamra elemet, azért, hogy megkapjam a csillapítatlan sínszálhoz képest a zajcsökkentéseket. Csak úgy, mint a rezgéscsillapításnál, itt is ugyanúgy járok el: az átviteli függvényeket elemezve azonos frekvenciákon ugyanolyan jellegű, de eltérő amplitúdójú csúcsokat lehet látni. A csúcsok itt is a módusokat jelzik. A kamraelemekkel ellátott sínszál csúcsai a csillapítatlan sínszálal szemben a frekvencia tengelyén eltolódnak, ennek oka továbbra is a kamraelemek által képviselt többlet-tömeg, ill. -csillapítás. Tehát: közel azonos frekvencián lévő csúcsok (azonos módusú) értékeit a csillapítatlan sínszál csúcsának értékéhez viszonyítva számoltam a hanglesugárzás eredményét. Két frekvenciatartományt választottam, egy alacsonyabb 200 – 400 Hz és egy magasabb 1200 – 1400 Hz frekvencia közötti tartományt az eredmények számadatszerű szemléltetése céljából.

11.1. Zajcsillapítás eredmények

Ebben a részben a három cég kamraelemeinek a zajcsillapítás eredményeit ismertetem. Grafikonok mutatják be a mért frekvencia átviteli függvényeket, majd azok értékeit átszámolva, decibelben adom meg a kamraelemekkel ellátott sínszál zajcsillapítási értékeit a csillapítatlan sínszáléhoz képest. Mivel méréseim egyik legfontosabb ábrái ezek, így a szemléletesség érdekében egy teljes oldalon mutatok be 1-1 grafikont. A frekvencia átviteli függvény adott frekvenciatartományban vizsgált csúcsainak értékeit, ugyanígy a decibelbe átszámolt eredményeket táblázatos formában foglaltam össze. A képletet használva negatív eredményeket kaptam, ez csak annyit jelent, hogy a csillapítatlan sínszál csúcsának értékétől mennyivel kisebb értéket kaptunk. Fontos megjegyezni, hogy ezek a csillapítási értékek nem azonosak az élőpályán való mérésekkel. Ezek az értékek az általam összeállított rendszeren, laboratóriumban, félszabad hangterű mérőhelyiségben, ún. „süket” szobában elért eredmények.



50. ábra GRANUFLEX Kft. kamraelemeinek mikrofon által mért eredményei

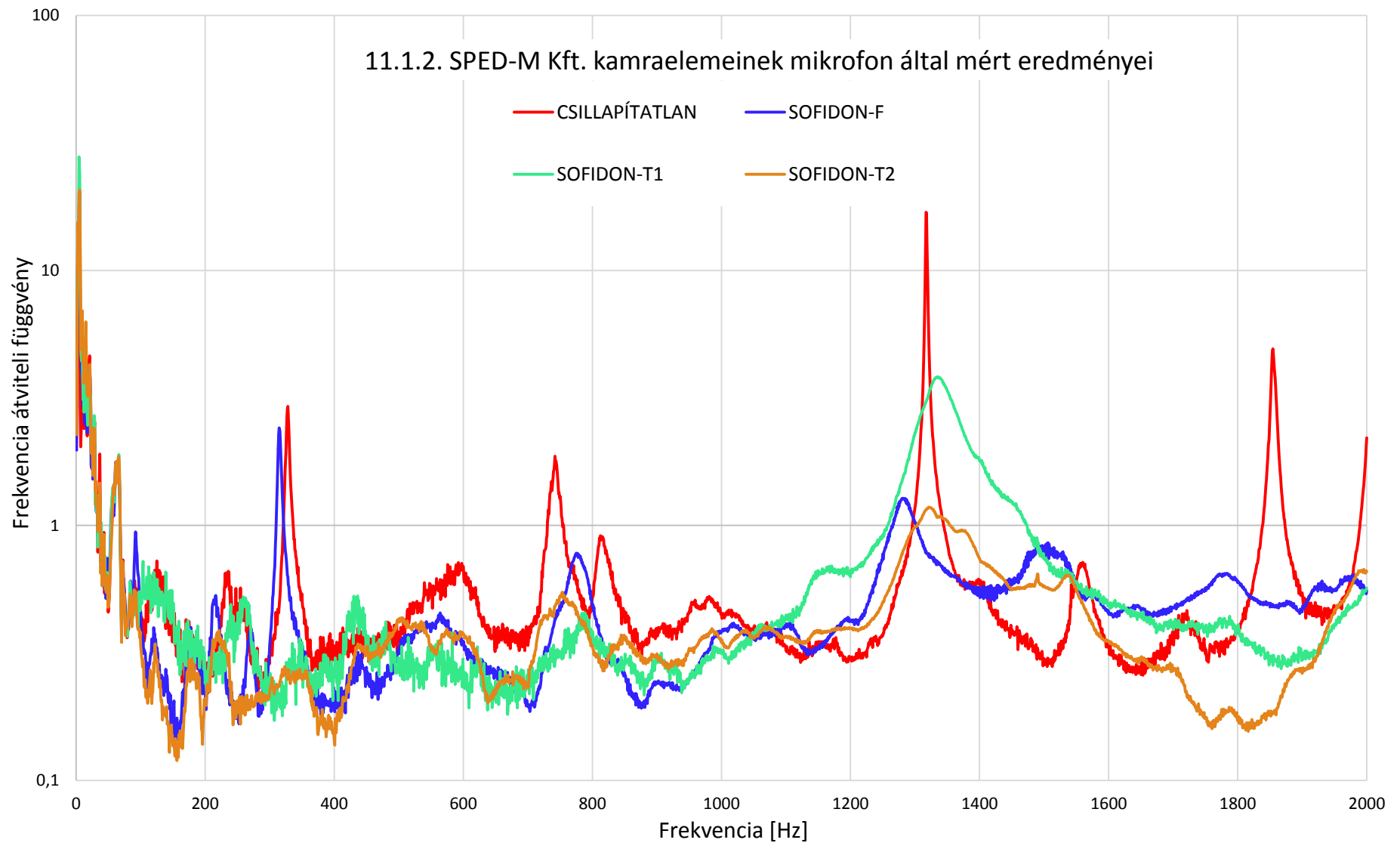
KAMRAELEM	200-400 Hz	1200-1400 Hz
CSILLAPÍTATLAN	1,4875	10,8746
G1	0,4169	2,7014
G2	0,3288	1,2756
G3	0,3413	0,3741
G4	0,3029	0,3783
G3 - R	0,5027	0,3767

31. táblázat 50. ábrán látható maximális csúcsok értékei adott frekvenciatartományban

KAMRAELEM	200-400 Hz	1200-1400 Hz
CSILLAPÍTATLAN	-	-
G1	-11,0 dB	-12,1 dB
G2	-13,1 dB	-18,6 dB
G3	-12,8 dB	-29,3 dB
G4	-13,8 dB	-29,2 dB
G3 - R	-9,4 dB	-29,2 dB

32. táblázat GRANUFLEX Kft. kamraelemeinek zajcsökkentése a csillapítatlan sínszálhoz képest

Ahogy a rezgéscsillapításban, úgy itt is látható az az eredmény, hogy minél tömörebb anyaggal csillapítjuk a sínszálát, annál jobb eredményt érhetünk el. Alacsony és magasabb frekvencián is nagyon jó értékeket érnek el zajcsökkentés szempontjából a G3-as, illetve a G4-es jelű elem. Látható, hogy a G3-as jelű kamraelem szerelve és ragasztással is ugyanolyan jó eredményeket produkál, bár egy kis különbséggel az alacsonyabb frekvencián a szerelt változat a jobb. Az ábráról, számszerűadat nélkül, szemléletből megállapítva az is látszik, hogy a 600 – 800 Hz frekvenciatartomány között a G1-es és G2-es jelű kamraelem egyáltalán nem csökkenti a zajszintet, sőt nagyobb értéket eredményeztek, mint a csillapítatlan sínszál. Ebben a frekvenciatartományban a G3-as jelű kamraelem ragasztott változata, valamint a G4-es jelű elem érte el a legjobb eredményeket.



51. ábra SPED-M Kft. kamraelemeinek mikrofon által mért eredménye

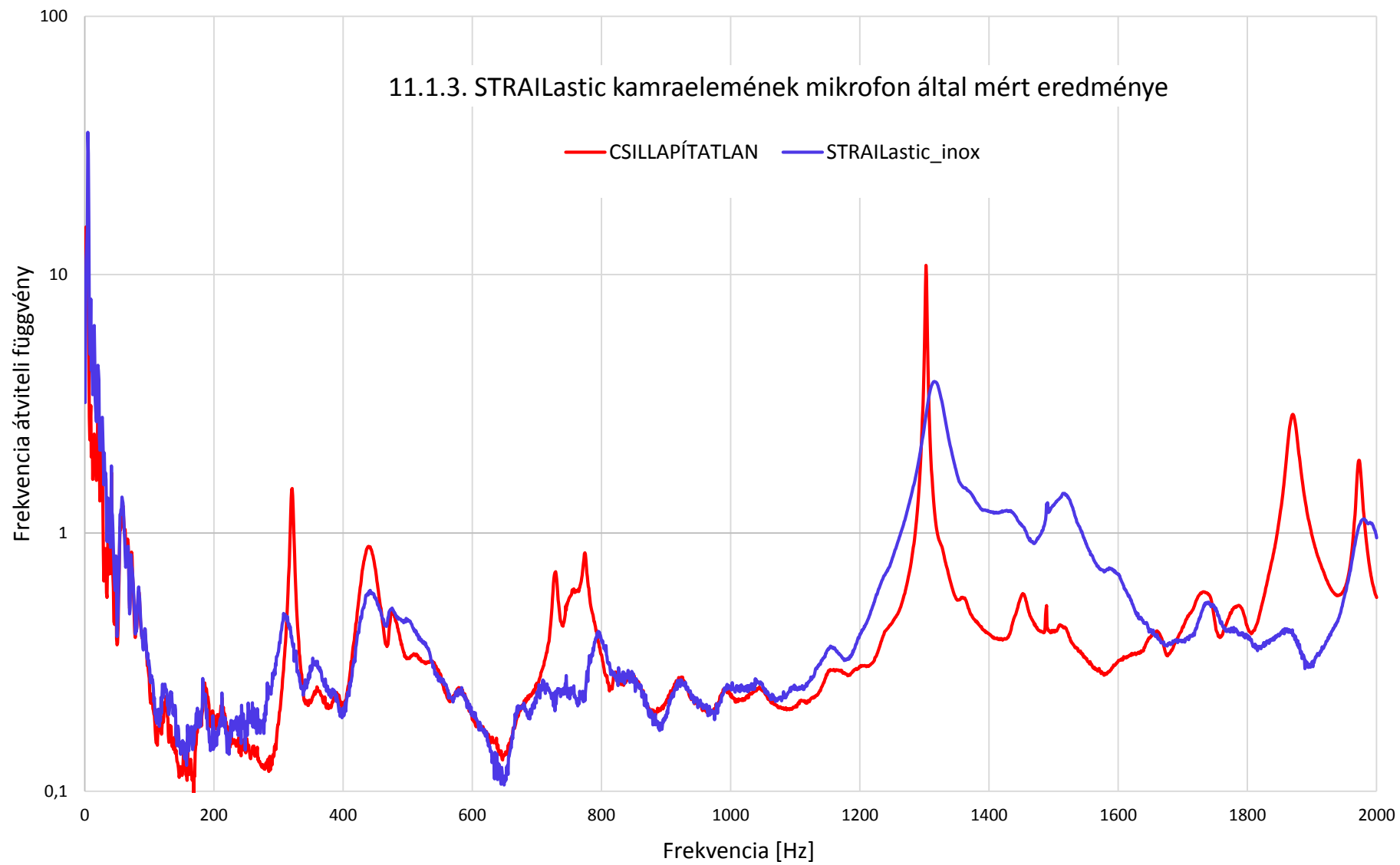
KAMRAELEM	200 – 400 Hz	1200 – 1400 Hz
CSILLAPÍTATLAN	2,9296	16,9108
SOFIDON-F	2,4103	1,2792
SOFIDON-T1	0,5287	3,8229
SOFIDON-T2	0,2800	1,1795

33. táblázat 51. ábrán látható maximális csúcsok értékei adott frekvenciatartományban

KAMRAELEM	200 – 400 Hz	1200 – 1400 Hz
CSILLAPÍTATLAN	-	-
SOFIDON-F	-1,7 dB	-22,4 dB
SOFIDON-T1	-14,9 dB	-12,9 dB
SOFIDON-T2	-20,4 dB	-23,1 dB

34. táblázat SPED-M Kft. kamraelemeinek zajcsökkentése a csillapítatlan sinszálhoz képest

Ahogy a rezgéscsillapításban, úgy a zajcsillapításban is hasonló eredmény született. Ismét szembetűnő a SOFIDON-F típusú kamraelem eredménye, miszerint alacsony frekvencián egyáltalán nem hatékony, viszont magasabb frekvencián annál inkább. Érdekes eredmény még a ragasztott és a szerelt változat összehasonlítása. Majdnem dupla akkora csillapítási érték érhető el ezeken a frekvenciatartományokban a ragasztott kamraelemmel, mint a szerelt változatával. Szemléletből pedig az látszik, hogy a 600 – 800 Hz frekvenciatartományban a szerelt változat működik hatékonyabban. Összességében ezek az eredmények is nagyon jónak mondhatók.



52. ábra STRAILastic kamraelemének mikrofon által mért eredménye

KAMRAELEM	200 – 400 Hz	1200 – 400 Hz
Csillapítatlan	1,4875	10,8746
STRAILastic_A_inox	0,4877	3,8569

35. táblázat 52. ábrán látható maximális csúcsok értékei adott frekvenciatartományban

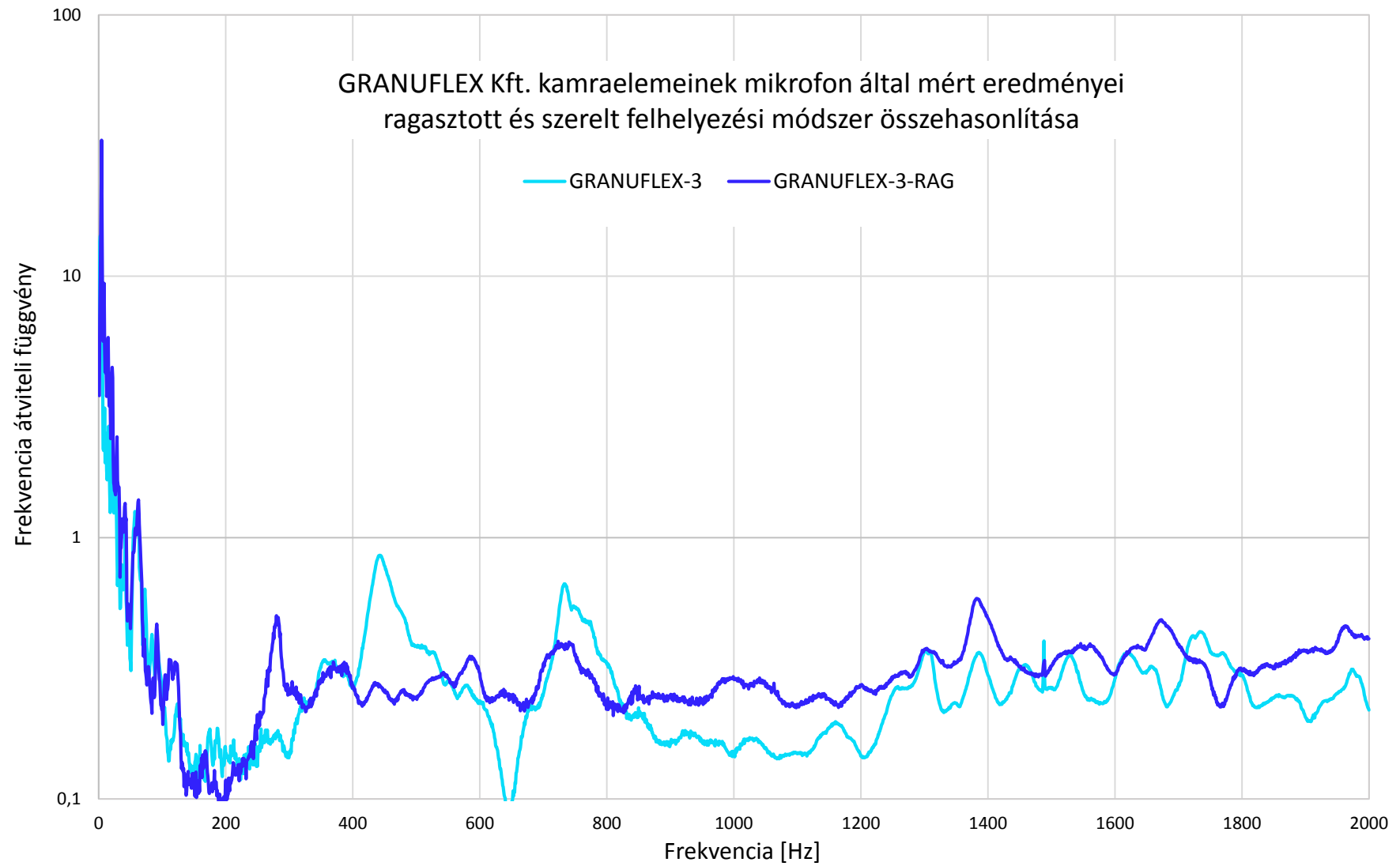
KAMRAELEM	200 – 400 Hz	1200 – 400 Hz
Csillapítatlan	-	-
STRAILastic_A_inox	-9,7 dB	-9,0 dB

36. táblázat STRAILastic kamraelemének zajcsökkentése a csillapítatlan sínszálhoz képest

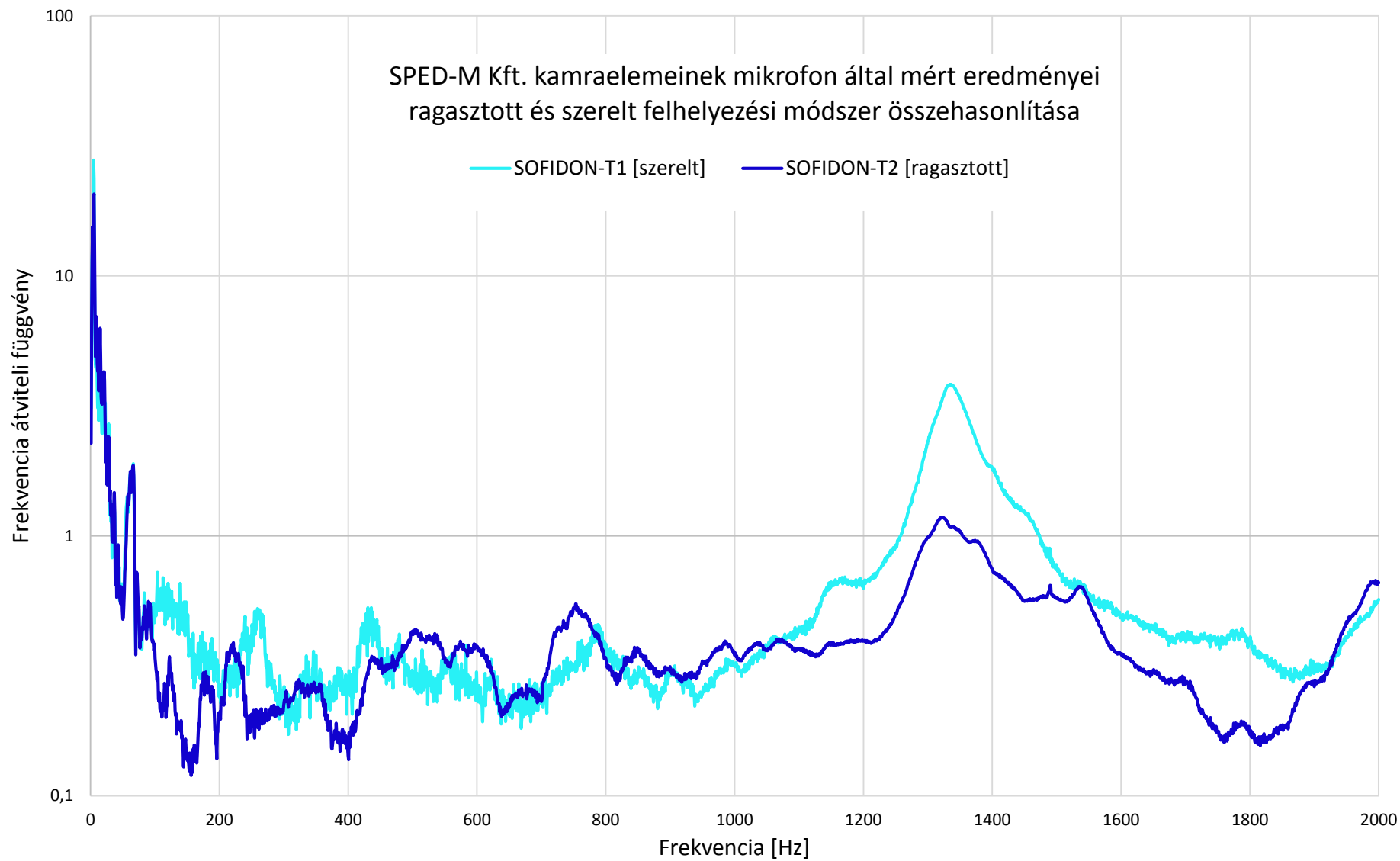
A rezgéscsillapítás eredményeinél már írtam, hogy a STRAILastic_A_inox típusú elemből két darab állt rendelkezésemre, így csak két sínleerősítés közé, a sínszálam közepére tudtam ezeket felhelyezni. Az elemek így nem futottak végig az általam vizsgált sínszálon, a sínszálam két végén nincs csillapítóelem, így ott nem történt semmilyen csillapítás. Az elem hatékonyságának valóságos eredményét úgy kaphattam volna meg, ha a sínszálra végig felhelyeztem volna ilyen elemet.

11.1.4. Ragasztott és felszerelt zajcsillapítók összehasonlítása

Az 53. és 54. ábra grafikonjai szemléltetik azt, hogy a két cég által kölcsönzött kísérleti elemek melyik felhelyezési módszerrel csillapítanak hatékonyabban. A Granuflex Kft. G3-as jelű eleme kis frekvencián szerelve, nagy frekvencián ragasztva ad jobb eredményt. A SPED-M Kft SOFIDON-T típusú eleme kis frekvencián ragasztva és szerelve is hasonló zajcsillapítást eredményez, nagy frekvencián viszont egyértelműen látszik, hogy a ragasztott változata a jobb.



53. ábra GRANUFLEX Kft. kamraelemeinek mikrofon által mért eredményei, ragasztott és szerelt felhelyezési módszer összehasonlítása



54. ábra SPED-M Kft. kamraelemeinek mikrofon által mért eredményei, ragasztott és szerelt felhelyezési módszer összehasonlítása

12. ÖSSZEGZÉS

12.1. Értékelés

Az összes mérési eredményt figyelembe véve megállapítható, hogy a zaj- és rezgéscsillapító kamraelemek – bizonyos körülmények között – alkalmas eszközt képeznek a vasúti zaj illetve a vasúti pálya rezgésének csökkentésére. Fontos kiemelnem azt, hogy a kamraelemek hatékonyságát az általam összeállított rendszeren, laboratóriumi körülmények között, hangszigetelt akusztikai szobában vizsgáltam. Ezek az eredmények NEM egyeznek meg a vasúti élőpályás mérésekkel. Az általam egységnyi erővel gerjesztett sínszál rezgésének és hanglesugárzásának kamraelemekkel való csillapításának értéke sokkal nagyobb eredmény, mint amit a vasúti pályán ezek beépítésével el lehet érni.

Céljaim között volt a magyar cégek elemeinek hatékonyságainak bizonyítása. Lehetőségem volt mérni egy forgalomban már alkalmazott zaj- és rezgéscsillapító elemet, aminek hatékonyságával a két magyar cég elemei is felértek, sőt több alkalommal jobb eredményt is szolgáltatottak. Valamint számszerű adatokat nyertem az összes kamraelemről, hogy a csillapítás nélküli sínszálhoz képest mennyire hatékonyak bizonyultak a zaj- és rezgéscsillapításban.

Az eredményekből látható, hogy alkalmasak, így két dolog maradt még hátra, amiknek fontos és befolyásoló hatásuk van ezekre az elemekre. Az első a felhelyezési módszer. Méréseimből kiderül, hogy a ragasztási módszer magasabb csillapítási értékeket produkált, mind zajcsökkentés, mind rezgéscsillapítás tekintetében. Előnyei között van, hogy ennél a módszernél a víz nem tud bejutni a síngerinc és az elem közé, így ott beszorulva nem növeli a korrózió problémáját. Hátránya, hogy a ragasztott elemeket nem lehet le- és felszerelni: fáradságos munka lenne és akár az elemek töréséhez is vezetne. Ezzel szemben a szorítókkal felhelyezhető elemek szerelhetősége könnyűnek és gyorsnak mondható, hátránya viszont, hogy a víz bejuthat az elem és a síngerinc közé.

Másik megfontolandó kérdés az összetétel és a geometria. Ez a két tulajdonság nagy befolyással bír a csillapításban. A SPED-M Kft. SOFIDON-F típusú kamraelem méréseinek eredményei bizonyítják azt, hogy a mért elemek geometriájának a felével is elérhető versenyképes eredmény. A GRANUFLEX Kft. 4 különböző összetételű anyagából pedig látszik, hogy minél tömörebbek ezek a gumielemek, annál alkalmasabbnak bizonyulnak.

12.2. Továbbhaladási irány

Kutatási munkám során szerzett ismeretek és a mérési eredményeim sikeressége miatt szeretnék tovább foglalkozni a vasúti pálya zaj- és rezgéscsillapításának témájával.

A laboratóriumban mért eredmények magas csillapítási értékei igazolják, hogy ezek a kamraelemek alkalmas eszközök a vasúti zaj és rezgés csökkentésére. A jövőben mindenképpen szeretném kibővíteni ezt a tanulmányt élőpályás méréssel, alátámasztva ezeknek az elemeknek a valódi sikerét. Valamint további kísérleteket tennék ezeknek a kamraelemeknek a hatékonyságának javításában azzal, ha megváltoztatjuk ezek geometriáját, illetve összetételét. Érdemes a ragasztási technikára fókuszálni, hiszen a hangszigetelt szobában elért eredmények azt bizonyítják, hogy ez a felhelyezési módszer az alkalmasabb. Megoldást lehetne találni a szerelhető kamraelemek víztelenítésére is, ha esetleg egy vízzáró réteggel körbe lennének kenve azok.

Valamint szeretnék a továbbiakban foglalkozni a vasúti pálya többi szintjén beépített rugalmas elemeinek vizsgálatával, kibővítve jelenlegi témámat azzal, hogy a több szinten beépített rugalmas elemek együttes eredménye mennyire lenne hatékony a zaj- és rezgéscsillapítás tekintetében.

13. IRODALOMJEGYZÉK, FORRÁSOK

Előírások, törvények, rendeletek

- [1.] Magyarország Alaptörvénye (2011. április 25.) – XX. cikk (1) és XXI. cikk (1)
- [2.] 1995. évi LIII. törvény – A környezet védelmének általános szabályairól
- [3.] 12/1983. (V. 12.) MT rendelet – A zaj- és rezgésvédelemről
- [4.] 27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM együttes rendelet – A környezeti zaj- és rezgésterhelési határértékek megállapításáról
- [5.] melléklet 27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM együttes rendelethez – A közlekedéstől származó zaj terhelési határértékei a zajtól védendő területeken

Könyvek

- [6.] Katholieke Universiteit Leuven - Proceeding of the 16th international seminar on modal analysis - Basic course on experimental modal analysis Part 1
D. Formenti, R. Allemang, R. Rost, T. Severyn, J. Leuridan - Analytical and experimental modal analysis 9-10 September 1991, Firenze, Italy

Előadások, cikkek, tanulmányok

(Utolsó megtekintések ideje: 2014. 10. 21.)

- [7.] Sínek Világa – A Magyar Államvasutak Zrt. pálya és hídszakmai folyóirata
2011/4. szám – Buskó András – A vasúti zaj – Típusai, vizsgálata és a zaj elleni védekezés (1. rész)
(<http://www.sinekvilaga.hu/123-40775.php>)
- [8.] Sínek Világa – A Magyar Államvasutak Zrt. pálya és hídszakmai folyóirata
2012/1. szám – Buskó András – A vasúti zaj – Zajpanaszok kezelése (2. rész)
(<http://www.sinekvilaga.hu/123-42294.php>)
- [9.] BME UVT - Közlekedési környezetvédelem c. tárgy
Buskó András, Kiss Balázs – Vasúti zaj és rezgésvédelem 4.
(http://www.uvt.bme.hu/targyak/k_korny/05osz/ea_BK_4.pdf)
- [10.] BME UVT – Közlekedési környezetvédelem c. tárgy
Ludvig Eszter - Vasúti környezetvédelem – előadási jegyzet
(http://www.uvt.bme.hu/targyak/k_korny/k_korny_le.pdf)

[11.] BME – HIT – Akusztikai laboratórium

Fiala Péter – Móduselemzés – Mérési segédlet – Hangtechnikai Laboratórium 1. (2008. február 15.)

(http://last.hit.bme.hu/download/Hangtechnika_Labor_1/m5_Moduselemzes.pdf)

[12.] BME – HIT – Akusztikai laboratórium

Dr. Augusztinovicz Fülöp – Több szabadságfokú mechanikai rendszerek modális elemzése

(<http://last.hit.bme.hu/download/fulop/AktSzam/4FEJ>)

[13.] Pannon Egyetem – Környezetmérnöki Tudástár

Dr. Domokos Endre és Dr. Horváth Béla – Zaj és rezgésvédelem

(http://mkweb.uni-pannon.hu/tudastar/anyagok/13-Zaj_rezges_vedelem.pdf)

[14.] Győri jegyzetek

Koren Edit - Zajvédelem

(<http://gyorijegyzet.uw.hu/zajvedelem3.ppt>)

[15.] SZE – Környezetvédelmi Tanszék

Bedő Anett – Zaj-, rezgés- és sugárzásvédelem

(http://www.sze.hu/~bedoa/Levelezo/LGB_KM015_1/5.%20ea_h.pdf)

További elektronikus források

(Utolsó megtekintések ideje: 2014. 10. 21.)

[16.] STRAILastic_A – The noise-absorber system – Track damping systems

(http://www.strail.de/uploads/media/STRAILastic_A_Broschuere_01.pdf)

[17.] Zöld Infólánc – Környezeti Tanácsadó Irodák Hálózata

A zaj. Hangtani alapfogalmak. Zajforrások. A zaj hatása az emberi szervezetre. A zaj elleni védelem feladatai. Egyéni védelem a zajhatások ellen. Nagyvárosaink zajhelyzete.

(www.zoldinfolanc.hu/doksik/orszagos/zaj/zajosszefoglalo.doc)