



Vasúti pályaszerkezeti elemek zaj- és rezgéscsillapító
hatásainak vizsgálata üzemi állapotban és
laboratóriumi körülmények között

Tudományos Diákköri Konferencia 2016

Szerző

Csortos Gabriella

Konzulensek

Dr. Kazinczy László

Dr. Augusztinovicz Fülöp

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Út és Vasútépítési Tanszék

Budapest, 2016

Kivonat

A vasúti közlekedéssel szemben egyre nagyobb követelményeket állítanak; a sebesség emelése, az utazási kényelem növelése, a folyamatosan növekedő igénybevételek kielégítése, mindezek teljesítése pedig a környezet legkisebb terhelése mellett. Manapság az egyik legnagyobb problémát a vasúti közlekedéssel járó zaj- és rezgések okozta terhelések jelentik. Az előírások és szabályzatok a vasúti infrastruktúrát egyre komolyabb kihívások elé állítják a zajhatárértékek tekintetében. A téma valóban aktuális kérdés, szinte minden embert érintő probléma. Épp ezért a megengedhető zajszint előírások és határértékek meglehetősen szigorúak, betartásuk azonban komoly feladatot jelentenek.

A feladat világos, mégis megoldatlan. Miért? A vasúti infrastruktúra több szakterület kimagasló tudását és tapasztalatát igényli, a szakmák szerteágazó ismereteit szükséges egyesítenie. Építőmérnöki feladat az alépítmény és felépítmény elemeinek átgondolt tervezése, igényes kivitelezése, a teljes pályaszerkezet folyamatos karbantartása és biztonságos, környezetkímélő üzemeltetése. Tökéletes vasúti pálya azonban nincs, az újonnan épített vágányok is hibával terheltek. Minden vasúti vonal különböző, a működést rengeteg tényező befolyásolja, amelyek ok-okozati kapcsolatban állnak egymással, folyamatok egymásutánjai. A zaj- és rezgések keletkezésének okai a pályaszerkezetben szintén ezektől a tényezőktől függenek. Minden helyzet más, a különböző kimenetek és következmények miatt nincs egyetlen, univerzális megoldás a zaj- és rezgésterhelésekre a pályaszerkezet részéről.

Az előbb felsorolt okok miatt választottam korábban ezt a rendkívül fontos témát, amit jelen dolgozatomban ismét tárgyalok és igyekszem tovább fejleszteni. Ismertetem a vasúti közlekedésben keletkező zaj- és rezgéshatásokat, valamint azokat a pályaszerkezeti elemeket, amiknek csillapító hatásuk lehetnek ezekkel a terhelésekkel szemben. Tömören összefoglalom korábbi vizsgálataim eredményeit és tapasztalatait, amelyek a sín kamrájába helyezett gumielemekekre irányulnak. A csillapító hatással bíró elemek élópályás helyszíni méréseinek körülményeit, azok eredményeit és tapasztalatait részletezem, továbbá a laboratóriumban összeállított új mérési rendszert is. Az itt elvégzett vizsgálatok már jobban megközelítik a valóságot, így a helyszíni mérésekkel – kellő óvatossággal – összehasonlíthatók. Dolgozatom az eddig elvégzett vizsgálatokkal együtt átfogó képet ad arról, hogy mely pályaszerkezeti elem(ek) képesek a zaj- és rezgésterhelések csillapítására.

Abstract

More and more requirements are set to rail transport; increase of speed and ride comfort, bear the ever-increasing loads, with a minimum load on the environment side. Today, it remains one of the biggest problems are caused by noise and vibration loads associated with rail transport. The rules and regulations of the railway infrastructure will pose increasingly serious challenges with regard to noise limits. The topic is a live issue, affecting the life of almost all people. For this reason, the regulations and permissible noise limits are quite strict; however, fulfilling them is still a serious problem.

The task is clear, yet unsolved. Why? The rail infrastructure requires superior knowledge and experience in several areas, the knowledge necessary to unite diverse professions. Civil Engineering task is to design the substructure and superstructure elements, sophisticated construction, ongoing maintenance and the safe and environmentally friendly operation. Perfect railway does not exist, the newly built tracks also affected by errors. All rail lines are different; the operation affected by a number of factors that are related to each other, succession processes. The causes of noise and vibration are generated by the track structure also depend on those factors. Every situation is different, there is no single, universal solution for noise and vibration loads for the track.

For the reasons listed above I had chosen this very important topic and will present in my thesis. I will present the rail traffic generated noise and vibration effects, as well as the structural elements that may have damping effect against these loads. I present the results of my earlier studies and experiences that are related to rail chamber rubber elements. Such as the results of these damping elements on-site measurements, the detailed experiences, as well as the laboratory assembled new measurement system. The studies carried out are closer to reality, and – with caution – comparable with the on-site measurements. My thesis will give a comprehensive picture which component(s) capable of noise and vibration damping.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm konzulenseimnek, Dr. Kazinczy Lászlónak és Dr. Augusztinovicz Fülöpnek a dolgozatomhoz nyújtott szakmai segítségüket, a laboratóriumi munka feltételeinek biztosítását és létrejöttét.

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Frankó Pálnak a Frankó Rubber Technology Kft-től, Karvalics Lászlónak és Felföldi Károlynak a KRAIBURG STRAIL GmbH & Co. KG-től, hogy laboratóriumi méréseimet támogatták a cégük által felajánlott gumielemekekkel.

Külön köszönettel tartozom Pásztor Józsefnek a SPED-M Kft-től, a sok fáradásáért és támogatásért, hogy laboratóriumi méréseimhez sínszálakat, betonaljákat és sínkamra elemeket kölcsönzött.

Köszönöm a Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék Hangtechnikai és Stúdiótechnikai Laboratórium munkatársainak a helyszíni méréseket, hogy azok eredményeit jelen dolgozatomhoz felhasználhattam.

Köszönettel tartozom Dr. Szabó Józsefnek és a Pályaszerkezeti Laboratórium munkatársainak, Kovács Imrének és Ugró Lászlónak, akik nélkül a laboratóriumi mérési rendszer összeállítása nem jöhetett volna létre.

Tartalomjegyzék

Kivonat	i
Abstract.....	ii
Köszönetnyilvánítás	iii
Tartalomjegyzék	iv
1. Bevezetés.....	6
2. A vasúti infrastruktúra zaj- és rezgéshatásai	7
2.1. Vonatkozó jogszabályi háttér.....	8
2.2. Zajok és rezgések kialakulása.....	10
2.3. Védekezés módjai	19
3. Zaj- és rezgéshatások csillapítási lehetőségei vasúti pályaszerkezeti elemekkel.....	22
3.1. Sínleerősítések, közbetétek	26
3.2. Aljpacucok	33
3.3. Sínkamra elemek.....	40
4. Sínkamra elemek laboratóriumi vizsgálata	46
4.1. Vizsgálat célja.....	46
4.2. Vizsgálat felépítése	46
4.3. Vizsgálati eredmények.....	48
4.4. Értékelések, következtetések	51
5. Vasúti pályaszerkezeti elemek vizsgálata üzemi állapotban, helyszíni mérések.....	53
5.1. Dunavarsány, új sín beépítésének hatása – 1. mérési helyszín	60
5.2. Siófok-Szabadifürdő, aljpacucs beépítésének hatása – 2. mérési helyszín	63
5.3. Füzesabony, W 14-es rendszerű sínleerősítés hatása – 3. mérési helyszín.....	66
5.4. Szöny, W 21-es rendszerű sínleerősítés hatása – 4. mérési helyszín.....	69
5.5. Dinnyés, Sofidon-F típusú kamraelem beépítésének hatása – 5. mérési helyszín	73
6. Vasúti pályaszerkezeti elemek laboratóriumi vizsgálata	80
6.1. Vizsgálat célja.....	80
6.2. Vizsgálat felépítése	81
7. Értékelések, összehasonlítások, megállapítások	90
8. Összegzés	96
9. Továbbhaladási irány	97
Irodalomjegyzék.....	98
Ábrajegyzék.....	100
Táblázatjegyzék.....	102

1. Bevezetés

A zaj egészségkárosító hatása mára már elfogadott tény. Egy felmérés szerint, az Európai Unió lakosságának közel 65%-a (= 450 millió ember) él a megengedett zajterhelési határérték feletti környezetben, és közel 9,7 millió ember él elviselhetetlennek minősített zajterhelés mellett. A lakosság fokozódó érzékenysége az olyan légzajra és rezgésekre, mint amilyenek a vasútvonalak mentén a szerelvények elhaladása miatt keletkeznek, és amelyek azután egészen a lakóházig kiterjednek, megköveteli az új rezgéscsillapító rendszerek kifejlesztését, olyan csillapító jellemzőkkel, amelyek képesek csökkenteni ezeket a terjedéseket. [2]

A vasúti közlekedés zaj- és rezgésterhelésének kedvezőtlen helyzetét több probléma határozza meg. [3] Elsődleges probléma, hogy a pályák állapota többségében rossz, amelyek a kevés ráfordításokból és elmaradt karbantartási munkákból adódnak. Ez igaz a forgalomban lévő járművekre és kocsikra is, továbbá nem elhanyagolható, hogy a járműállomány átlagéletkora magas. A települések oldaláról is több meghatározó probléma adódik, mint például az, hogy a települések ráépültek az állomásokra és vasútvonalakra. A MÁV Zrt. több esetben eladta a vasúti pálya közeli – védőtávolságon belüli – területeit, ahonnan később egyértelműen zajpanaszokat jelentettek be (fognak bejelenteni) az ott élők. A pályák közelében kevés zajárnyékoló létesítmény épül és azok is általában a közúti zaj szerint vannak méretezve.

Dolgozatom célja valódi megoldást, vagy megoldásokat találni a vasúti közlekedésből származó, egyre növekvő zajok és rezgések csökkentésére. Ehhez feltárom a hatások keletkezésének okait, majd átfogó képet mutatok a problémákról. Építőmérnökként a zaj- és rezgésproblémákra az egyes vasúti pályaszerkezeti elemek befolyásolásával kutatok a megoldás után. Az elemek csillapítási eredményeit helyszíni és laboratóriumi körülmények között elvégzett mérésekkel igazolom. Természetesen a zaj- és rezgésproblémákra a megoldás a kellő mennyiségű pénzbeli ráfordítás és szemléletmód váltás lennének. A folyamatos pénzhiány, az ebből következő karbantartási munkák elmaradása és a nem elegendő anyagi fedezet biztosítása a zajvédelemre, mind az állam mind az önkormányzatok részéről, egyértelműen nem vezetnek a kellő eredmények eléréséhez. A zaj- és rezgésproblémák felismeréséhez és tényleges kezeléséhez nyújtok segítséget dolgozatommal.

2. A vasúti infrastruktúra zaj- és rezgéshatásai

A vasúti forgalom a zaj- és rezgésszennyezés egyik gyakori forrása, amelyet folyamatosan növekvő figyelem kísér. Ez részben a forgalom növekedésének (új infrastruktúrák kialakítása, illetve meglévő vágányok intenzívebb használata), részben pedig az egyre szigorodó zaj- és rezgésemisziós szabályozóknak tudható. [1]

A vasúti közlekedés zaja a lakosság közvéleménye szerint kedvezőbb, mint a közúti forgalom által keltett. Autópálya, főút mellett a zaj szüntelen, míg a vasút csak a vonat elhaladásakor zavarja meg a környezetet. [4]

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, fékpróbamegtartás, valamint az üzembiztonsági és utastájékoztató berendezések által kibocsátott zaj vagy rezgés. A megengedett értékeket meghaladó zajhatás a környezetszennyezés speciális esete, ezért a környezet tehermentesítése a vasúti közlekedési zajoktól mindannyiunk érdeke. [5]

A vasúti forgalom által gerjesztett zaj kétféleképpen jelentkezik:

1. A vágány környezetében hallható léghang formájában;
2. A vágány közelében lévő épületekben észlelhető testhang formájában.

A vasúti pálya-jármű rendszerben az elsődleges zajforrás a jármű (meghajtás, sín-kerék kapcsolat), azonban a pályaelemeinek kialakítása, minősége és pillanatnyi állapota is befolyással lehet a zaj kialakulásának nagyságára. [1]

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. A kisméretű léghangok akár rezgéseket is okozhatnak épületben. Az észlelhető rezgés általában 45 Hz alatt van. [4]

2.1. Vonatkozó jogszabályi háttér

- *COMMISSION DIRECTIVE (EU) 2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council / Az Európai Parlament és a Tanács 2002/49/EK irányelve (2002. június 25.) a környezeti zaj értékeléséről és kezeléséről*

(1) Az irányelv célja egy olyan közös megközelítési mód meghatározása, amely révén elsőbbségi alapon elkerülhető, megelőzhető vagy csökkenthető a környezeti zaj okozta káros hatás, ideértve a zajterhelést is.

(2) Az irányelv célja továbbá megalapozni a jelentősebb zajforrások — különösen a közúti és vasúti járművek és infrastruktúra, a repülőgépek, a kültéri használatra tervezett és ipari berendezések és mobil munkagépek — által kibocsátott zaj csökkentésére irányuló közösségi intézkedések kifejlesztését.

- *27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM együttes rendelet a zaj- és rezgésterhelési határértékek megállapításáról*

2.1 táblázat – 3. melléklet a 27/2008. (XII.3.) KvVM-EüM együttes rendelethez – A közlekedéstől származó zaj terhelési határértékei a zajtól védendő területeken

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 autóbussz-pályaudvartól, a vasúti fővonalától és pályaudvarától, a repülőtértől, illetve a nem nyilvános fel- és leszállóhelytől 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, teletszerű 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

- *284/2007. (X. 29.) Korm. rendelet a környezeti zaj és rezgés elleni védelem egyes szabályairól*

1. § (1) A rendelet hatálya - a (2) bekezdésben foglalt kivételekkel - azokra a tevékenységekre, létesítményekre terjed ki, amelyek környezeti zajt, illetve rezgést okoznak vagy okozhatnak.
- *93/2007. (XII. 18.) KvVM rendelet a zajkibocsátási határértékek megállapításának, valamint a zaj- és rezgés-kibocsátás ellenőrzésének módjáról*
- *1995. évi LIII. törvény a környezet védelmének általános szabályairól. Zaj és rezgés.*

31. § (1) A környezeti zaj és a rezgés elleni védelem kiterjed mindazon mesterségesen keltett energiakibocsátásokra, amelyek kellemetlen, zavaró, veszélyeztető vagy károsító hang-, illetve rezgésterhelést okoznak.

(2) A zaj és a rezgés elleni védelem keretében műszaki, szervezési módszerekkel kell megoldani:

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

(3) A környezeti zajjal leginkább terhelt területek zajcsökkentését, a zajjal még nem terhelt területek kedvező állapotának megőrzését - a külön jogszabály alapján - stratégiai zajtérképekre épülő intézkedési tervek végrehajtásával kell megvalósítani.
- *1997. évi LXXVIII. törvény az épített környezet alakításáról és védelméről.*

1. § (1) A törvény hatálya kiterjed az épített környezet alakítása és védelme körébe tartozóan:

 - a) a településfejlesztésre és a települések területének rendezésére (a továbbiakban: településrendezés),
 - b) a településfejlesztés tervezése és a településrendezés tervezésére (a továbbiakban: településtervezés)...
- *280/2004. (X. 20.) Korm. rendelet a környezeti zaj értékeléséről és kezeléséről.*

1. § (1) A rendelet hatálya kiterjed

 - a) Budapest és vonzáskörzete - amely Budapest - Dunakeszi - Fót - Csömör - Kistarcsa - Kerepes - Pécel - Vecsés - Gyál - Dunaharaszti - Szigetszentmiklós - Diósd - Érd - Halásztelek - Törökbálint - Budaörs - Budakeszi - Solymár - Üröm - Budakalász - Pomáz - Szentendre -,
 - b) a 100 000-nél több lakosú városok közigazgatási területén belül a fő és egyéb közlekedési létesítmények, illetve az üzemi létesítmények,
 - c) a fő közlekedési létesítmény által a külön jogszabály (1997. évi LXXVIII. törvény) szerinti beépítésre szánt területeken, továbbá a zajvédelmi szempontból fokozottan védett területeken keltett zaj értékelésére és kezelésére, valamint az ezzel kapcsolatos adatszolgáltatásra.

2. § (1) Az 1. § (1) bekezdés a)-c) pontjaiban meghatározott területekre stratégiai zajtérkép és intézkedési tervet kell készíteni.
- *25/2004. (XII. 20.) KvVM rendelet a stratégiai zajtérképek, valamint az intézkedési tervek készítésének részletes szabályairól.*
- *A helyszíni mérések az MSZ EN ISO 3095 Vasúti alkalmazások. Akusztika. Sínpályához kötött járművek zajkibocsátásának mérése (ISO 3095:2005) szabvány szerint lettek elvégezve*

2.2. Zajok és rezgések kialakulása

A megengedhető zajszint előírások és határértékek meglehetősen szigorúak, betartatásuk sok problémát vet fel. 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” súlyozó szűrőt 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. 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. A tényleges zaj ezek összhatásából alakul ki, de függ az észlelés helyétől, beépítettségétől is. [2]

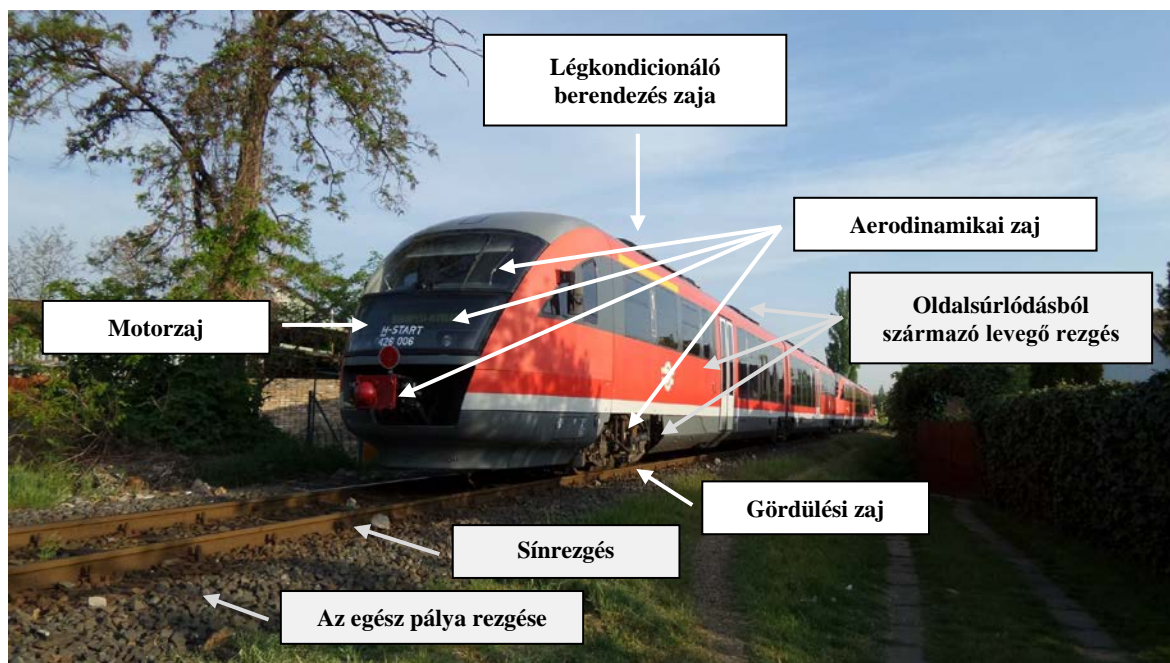
A vasúti közlekedés során fellépő leggyakoribb zajforrások a következők [5]:

- Gördülési zaj: kis járműsebesség esetén domináns;
- Ívcsikorgás: kis sugarú ívekben történő járműhaladás során lép fel;
- Kitérők: kitérőn vagy kitérőcsoportokon történő áthaladáskor többletzejterhelés;
- Összekapcsolás: kocsirendezés és járműkapcsolás során fellépő zajhatások;
- Mosás: kocsimosók környezetében a mosásból eredő üzemi zaj;
- Karbantartás: jármű- és kocsijavítás, karbantartási munkálatok során fellépő üzemi zajterhelés;
- Kürtök: kötelező hangjelzés során fellépő jelentős, rövid idejű zajterhelés;
- Járó motorú álló dízelmozdony vagy villanymozdony;
- Nyomást kiengedő kompresszor, kompresszor zaj.

A zajforrások a járművek sebességének függvényében osztályozhatók [1]:

- $V \leq 60 \text{ km/h}$ – Ebben a sebességtartományban meghatározóak a motorok, hajtóművek, szellőzők és a felépítmények zajai.
- $60 > V \leq 300 \text{ km/h}$ – Ebben a sebességtartományban uralkodóak a gördülési zajok. Ezeket alapvetően a kerék és a sínfelület érdessége befolyásolja.
- $V > 300 \text{ km/h}$ – Mintegy 300 km/h sebességtől az aerodinamikai zajok jelentősége egyre növekszik.

A tényleges zaj az előbb felsoroltak összhatásából alakul ki. Ezek, a vasúti közlekedés által okozott zaj- és rezgésforrások láthatók a **2.1. ábrán**.



2.1. ábra – Vasúti közlekedésből származó zajok és rezgések [6]

A vasúti járművek zajforrásait részletesebben a **2.2. táblázat** foglalja össze a jármű szerkezeti részei szerint.

2.2. táblázat – Vasúti járművek fontosabb zajforrásai csoportosítva [7]

Futómű	Járműszerkevény	Gépészeti részek
Gördülés a sínen	Légörvények	Dízelmotor
Kerékegyenetlenségek	Másodlagos zajok a futóműből	Hajtómű (mechanikus, hidraulikus, hidromechanikus)
Sínegyenletlenségek	Meglazult elemek, alkatrészek	Fődinamó és villamos vontatómotorok
Alépitmény hatása	Zaj a különféle réseknel	Fogaskerekek
Rugózás rendszerének hatása		Segédüzemi berendezések
		Különböző tengelyek

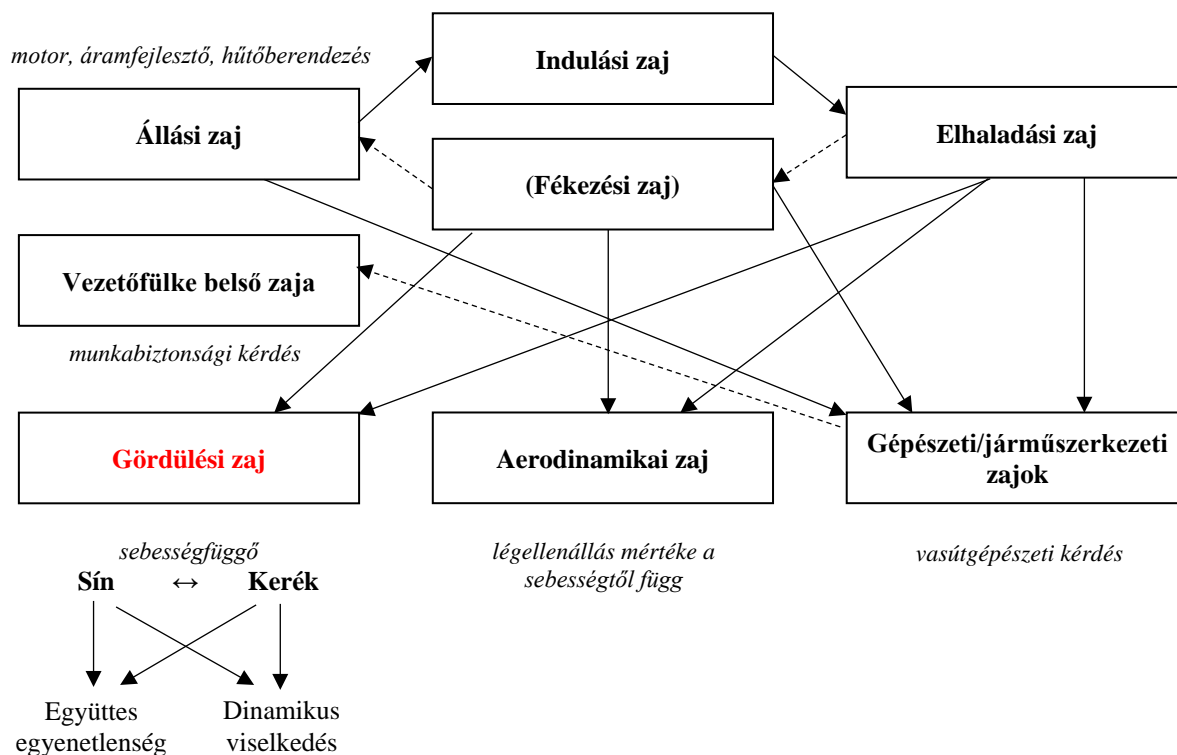
A zaj- és rezgésforrásokat két részre kell bontani, egyrészt a pálya, másrészt pedig a jármű állapotából származó okokra. A pálya és a jármű kapcsolata folyamatos, a vasúti közlekedés mindkét területtől függ. Más-más szerkezeti elemekből áll a pálya és a jármű, amelyeknek különböző, közlekedésre vonatkozó befolyásoló tényezői vannak (**2.3. táblázat**). A zajok és rezgések függenek a gördülőállomány jellemzőitől, valamint a vasúti pálya felépítmenyi elemeitől is. Az egyes tényezőknek zajszint-növelő hatásuk van, azonban optimális esetben az elemek befolyásolásával zajszint-csökkenés is elérhető.

2.3. táblázat – Vasúti közlekedés zajszintjét befolyásoló egyes tényezők és hatásuk [8]

Tényezők	Befolyásoló tényezők	Befolyásoló hatás jellege
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 laposkerék/szabályos futófelületű kerék kopott/sima futófelületű kerék	zajszint-csökkentő hatás zajszint növelő hatás +2-5 dB zajszint növelő ~ 5-10 dB zajszint növelő hatás + 2-5 dB 0, (zajszint-csökkentő hatás) zajszint-csökkentő hatás zajszint növelő hatás + 2-5 dB zajszint növelő ~ 10 dB felett zajszint növelő hatás + 2-5 dB
Felépítménytől függő tényezők	illesztett/hegesztett sín kopott/sima koronafelületű sín kitérő/folyamatos sín nedves/száraz sín ívmenet/egyenes vonalú haladás betonalj/talpa betonalapok/zúzottkő ágyazat acél/betonhíd/földtöltés	zajszint növelő ~ 5-10 dB zajszint növelő ~ 10 dB felett zajszint növelő ~ 5-10 dB zajszint-csökkentő hatás zajszint növelő ~ 10 dB felett 0, zajszint-csökkentő hatás zajszint növelő hatás + 2-5 dB zajszint növelő ~ 5-10 dB

Átmenet a hosszúsínes, hevederes vágányokról a hézagnélküli vágányokra mintegy 5 dB(A) zajcsökkenéssel jár. Ha acélhidakra átmeneti zúzottkő ágyazatot fektetnek, úgy 15 dB(A) zajszint-csökkenés adódik. Ha teherkocsik tuskófékekkel felszerelt kerekeit tárcsás fékekre cserélik, akkor 7-9 dB(A) zajszint-csökkenéssel lehet számolni. A tuskófékes kerékpárokon gyakran keletkeznek repedések a kerekek futófelületein (hullámhosszak 1-5 m), melyek a tárcsafékes kerekeken hiányoznak. Az abszorpciós anyaggal kezelt kerékkarimák zajcsökkenése mintegy 5-8 dB(A). Kerekekre szerelt lengéscsillapítók 6 dB(A) zajcsökkenést tesznek lehetővé. A tuskófékes kerekek által okozott hullámos kerékkopások (hajszál-repedések) a gördülőzaj szintjének emelkedését okozzák. Zajszint szempontjából optimális kivitelű kerekek maximum 7 dB(A) zajcsökkentést eredményeznek. A kocsiszekerény és forgóváz köténnyel történő felszerelésével csak 2 dB(A) zajcsökkenés érhető el, viszonylag nagy ráfordítással. [1]

Az előbb felsorolt összes tényező befolyással van a vasúti közlekedésből származó zajokra. A vasúti közlekedési zaj tehát állási, indulási, fékezési, elhaladási, gördülési, aerodinamikai továbbá gépészeti/járműszerkezeti zajokból tevődik össze. A csoportra bontott zajok egymásra is hatással lehetnek. Hatásuk következményeként erősíthetik egymást. A **2.2. ábra** mutatja be a vasúti közlekedési zaj összetevőit.



2.2. ábra – A vasúti közlekedési zaj [6]

A vasúti kocsik kétféle fékrendszerrel készülnek: tuskófék és tárcsafék. Tuskófék alkalmazása esetén *fékezéskor* az öntöttvas féktuskó közvetlenül érintkezik a kerék felületével és ez hullámosíthatja 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 Zrt. összes teherkocsija, ami szintén a teherkocsik magasabb hangszintjét eredményezi.

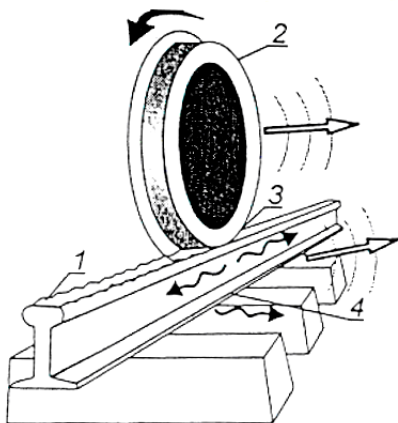
Aerodinamikai zaj a jármű alakjától függ, mely különösen nagyobb sebességeknél lehet jelentős mértékű. E zajt a jármű alakjának helyes megválasztásával, áramvonalas kialakításával csökkenteni lehet.

A vasúti közlekedés meghatározó zajforrása a *gördülési zaj*, amely a jármű sebességének emelésével növekszik. A zajszint emelkedése a menetsebesség függvényében az alábbi összefüggés alapján számolható:

$$L = 20 \cdot \lg \frac{v_2}{v_1} [dB] \quad (2.1.)$$

ahol v_1 a kezdeti-, v_2 a megnövekedett sebesség.

A gördülési zajt hátrányosan befolyásolja a gördülő kerék felületének felületi érdessége. A kerékabroncs tuskófék esetén fékezéskor ellaposodik (ún. laposkerék), ami akár 5 dB-lel növelheti a zajszintet. A laposkerék minden fordulatonál ütést mér a sínre, vagyis gerjeszti a sánt, így a sín zajkiszugárzása is megnövekszik. A lapos kerék ütése a sínkopást is felgyorsítja, illetve nagyobb igénybevételt okoz a sínben. A járműfenntartó szakaszolgálat feladata a laposkerékű kocsik forgalomból való kisorolása és a kerékabroncs felületének helyreállítása esztergálással. A gördülési zajt befolyásoló további tényezőket ismerteti az **2.3. ábra**. [4]



1. A sín futófelületének egyenlőtlen vagy hullámos kopásából, felületi érdességéből származó zajhatások (jármű kigyózó mozgása).
2. A kerék futókörének egyenlőtlenségéből vagy kopásából származó zajhatások. Továbbá a kerék átmérője.
3. Ívekben a kerék-sín közvetlen kapcsolatából (nyomkarima vezetés) származó zajhatások. Ívmenetben 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)

2.3. ábra – A kerék és a sín kapcsolatából származó hatások okai [9]

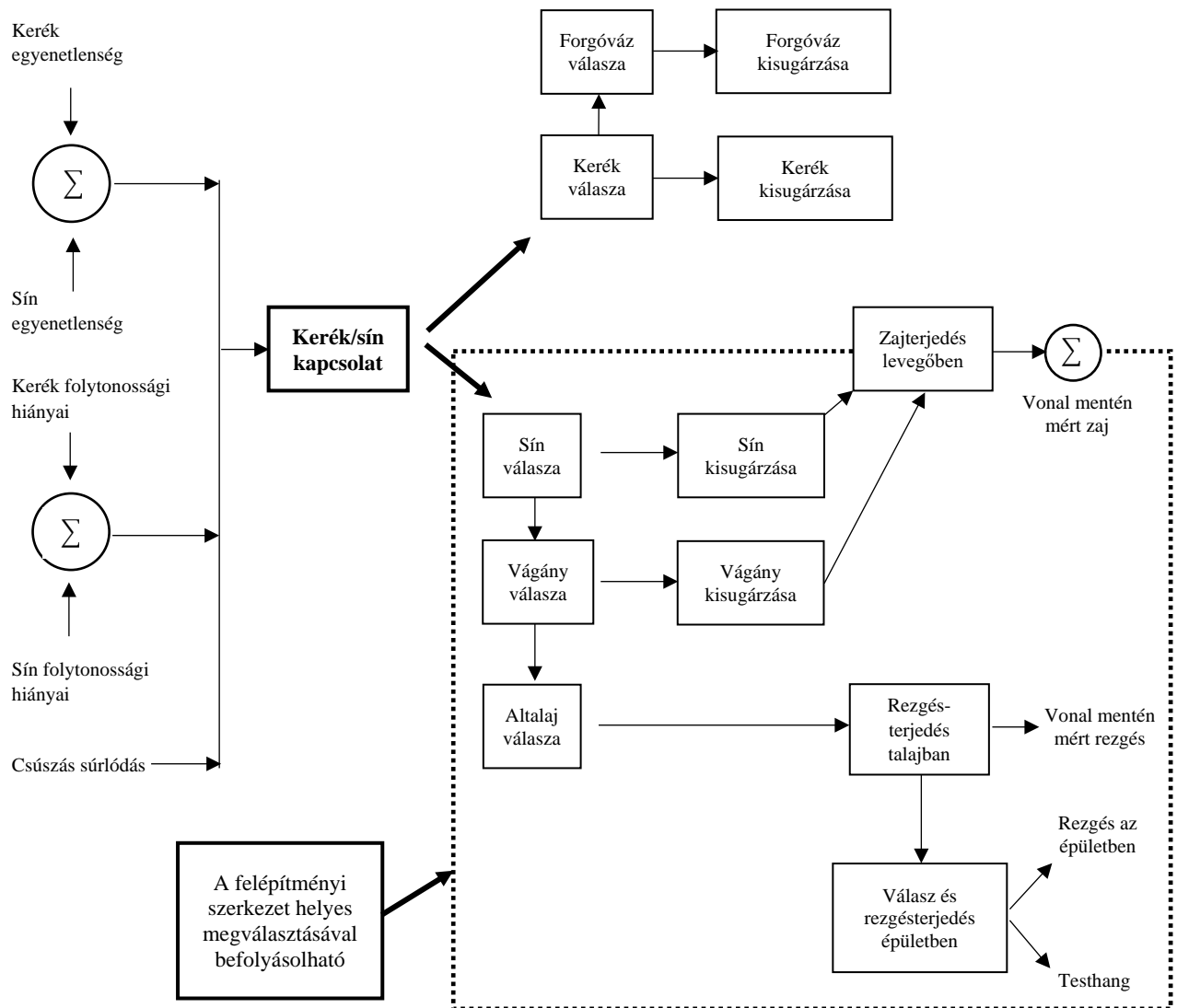
Továbbiakban a vasúti közlekedés legmeghatározóbb zajforrásával, a kerék és a sín kapcsolatából származó gördülési zajjal, annak kialakulásával és hatásával foglalkozom. Dolgozatom témája a vasúti pályaszerkezeti elemekkel való zaj- és rezgéscsökkentések lehetőségei utáni kutatás. Mivel a vasúti pályaszerkezet elemei a gördülésből származó zaj- és rezgéshatásokra lehetnek befolyással, ezért csak ezt a forrást ismertetem behatóbban. A gördülőállomány zaj- és rezgéshatásainak csökkentése jármű- illetve gépészmérnöki feladat.

Vasúti járművek gördülése közben dinamikus erők keletkeznek. A pályán álló vasúti jármű a pályában és annak környezetében mechanikai feszültséget hoz létre. Amint a jármű gördülni kezd, ez a feszültségállapot – a feszültség hullámok véges terjedési sebessége által kissé módosított formában – együtt mozog a járművel. Ez a mozgó feszültségállapot akkor is létrejön, ha a pálya és a rajta gördülő kerék ideális, hibamentes futófelülettel rendelkezik és a futás tökéletesen egyenes vonalú. A valóságban azonban a járműnek számos olyan mozgásformája is kialakul, ami az egyenesvonalú mozgástól eltér. A gördülés közben kialakuló támolygó mozgás, bólintó mozgás és oldalirányú kígyózó mozgás ingadozó erővel hat a sínekre. A kerekek geometriai hibái: az excentricitás, a kiegyensúlyozatlanság és a keréklaposodás további dinamikus erőket keltenek csakúgy, mint a periodikusan változó merevségű sínalátámasztás, illetve annak esetleges folytonossági hibái. A környezeti zajkeltés szempontjából pedig különösen fontosak azok, a fentieknél sokkal gyorsabban változó dinamikus erők, amelyek a sínszál és a rajta gördülő kerekek egyenetlenségeiből, szabálytalanságából és így a sín-kerék kapcsolat erőingadozásaiból adódnak. Mindezek a dinamikus változó erők nagyon különböző rezgésformákat hoznak létre, melyeknek egy része követi a gördülő járművet, míg mások lokális hatások maradnak. A keletkező rezgések jellemzőit, azaz rezgésamplitúdóit és frekvencia-összetételét számos további paraméter is befolyásolja: a jármű teljes és rugózatlan tömege, sebessége, a felfüggesztés kialakítása. A gerjesztési mechanizmusok egy része periodikus ingadozást, míg mások véletlen lefolyású dinamikus erőket hoznak létre. Ennek megfelelően különböző rezgéskomponensek jönnek létre, amelyeket frekvenciaelemzéssel viszonylag jól el lehet különíteni.

A rezgések tehát a kerék-sín kapcsolatban fellépő igen jelentős erők hatására keletkeznek. Ezek az erők a kerék- és sínegyenetlenségeknek megfelelően ingadoznak. Ezáltal széles frekvenciatartományú, dinamikus erőspektrum keletkezik.

A jármű-, és a pálya egy olyan komplex rendszer, amely nagyszámú saját frekvenciával rendelkezik. Ha egy gerjesztő frekvencia megfelel egy saját frekvenciának, különösen erős lengés gerjed. Minél nagyobb az utazósebesség, annál nagyobb lesz a dinamikus erő, és annál magasabbak lesznek a kibocsátott lengés frekvenciák. [1]

A sín és kerék kapcsolatát döntően meghatározó tényezők és az azokból származó zajok és rezgések terjedésének mechanizmusát mutatja be a **2.4. ábra**.



2.4. ábra – A sín és a kerék kapcsolatából keletkező zajok és rezgések mechanizmusa [4]

A rezgéseket a lengésfrekvenciák mérésével határozzuk meg. Ezek megengedett értékeit a hatóságok állapítják meg (a bécsi földalatti vasút számára például a megengedett lengéssébség értéke $5 \cdot 10^{-8}$ m/s).

Az emberek a nagyon csekély amplitúdójú lengéseket is érzékeln tudják. Ezek gyakran megalapozatlan félelmekhez is vezethetnek. A vasúti forgalom által okozott lengések 25 m távolságból elérik néha az 1 mm/s értéket is. A szakirodalomban ezzel szemben országoként eltérő, különböző amplitúdójú értékek fordulnak elő, melyek károkat okozhatnak a 2-50 mm/s tartományban. [1]

A zajszint a következő képlettel határozható meg:

$$L_p(db[A]) = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \quad (2.2)$$

ahol:

- $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ [Pa] - referencia hangnyomás

A zajkibocsátás szintek mérését a sín közepétől 25 m távolságban, és a sínkorona felett 3,5 m magasságban kell elvégezni. A „p” hangnyomás kétszeres értéke 6 dB(A) zajszint növekedésnek felel meg. A zajszint 10 dB(A) értékkel történő csökkenése az emberi hangérzet felezésének felel meg. Mechanikai lengések frekvencia tartományban történő ábrázolásának lehetősége a tercanalízis. A tercszint a rezgés intenzitást határozza meg egy tercen belül terc középfrekvenciaként (f_m), ahol egy tercsáv egy frekvenciasáv az alsó határérték (f_a), és a felső határérték (f_f) között, ahol:

$$f_0 = f_a \cdot \sqrt[3]{2} \quad (2.3)$$

$$f_m = \sqrt{f_a \cdot f_0} \quad (2.4)$$

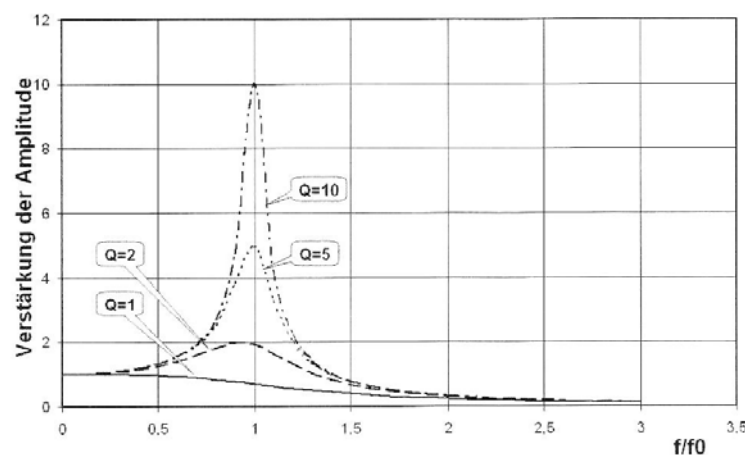
Lengésképes rendszerek tömeg és rugójellemzőik függvényében úgynevezett saját frekvenciát képeznek. Ha a lengő rendszer csillapítatlan (Q minőség = végtelen), akkor saját frekvencia mellett gerjesztés esetén végtelen nagy amplitúdók keletkeznek. Ez vezet olyan ismert jelenségekhez például, hogy a hidak saját frekvencia mellett lengeni kezdenek nagy amplitúdójú gerjesztés hatására. Ez adott esetben a híd leszakadásához vezet. Ezért a lehető legnagyobb mértékben el kell kerülni lengésképes rendszerek saját frekvencia melletti gerjesztését. Ha a gerjesztés elengedhetetlen, akkor az amplitúdókat korlátozni kell csillapító elemek beépítésével. Mivel a jelenlegi nagy utazósebességek mellett a rezonancia problémák nagy szerepet játszanak, ilyen helyeken elvileg és jellemzően egyszerű csillapítású lengő rendszereket kell alkalmazni. A vágány egymáshoz csatlakoztatott csillapító lengő tömegnek tekinthető.

A csillapítatlan lengő tömeg (melyet harmonikus oszcillátornak is neveznek) egy tömeghez rögzített rugóból áll. Ha a tömeg kileng, majd szabadon elmozdul, akkor a tömeg a rugón leng. Ennek a rendszernek az saját frekvenciája egy lengés képlettel számítható ki (ennek elemei: tömeg kilengés, maximális kilengés, csillapítatlan rendszer lengésének amplitúdója, körfrekvencia, saját frekvencia, fáziseltolódás, idő, rugóállandó, lengő rendszer tömeg).

Ha a rendszer csillapított (feltételezve, hogy a csillapítás függ a sebességtől, mint a hidraulikus lökésátlóknál), és egy külső szinuszos erő gerjeszti, akkor eltolódik a

körfrekvencia a rezonancia körfrekvenciához képest, és a gerjesztő erő egy differenciál egyenlettel kiszámítható. Ebből levezethetők a kismértékű csillapítások, illetve a csillapított oszcillátor maximális kilengés (stacionárius amplitúdó) értékek. Rezonancia estében a tényezők: gerjesztőerő maximális amplitúdó, csillapítási tényező, amplitúdó lecsengési együttható, gyorsulás, sebesség, kényszerített lengés körfrekvencia. A rezonancia amplitúdónak a statikus kilengéshez való viszonyát rezonancia növekménynek, vagy Q minőségnek nevezzük. Minél nagyobb a Q minőség értéke, annál kisebb a csillapítás. Ezért a csillapítás nélküli rendszerek elméletileg végtelen nagy növekménnyel és végtelen nagy amplitúdóval rendelkeznek energiafrekvenciás külső gerjesztés esetén, saját frekvencián.

Ezt az összefüggés olyan ábrán illusztrálható (2.5. ábra), amely rezonancia görbéket szemléltet, szinuszos erővel gerjesztett, csillapított lengő tömeggel, különböző Q minőség értékek esetén. A gyengén csillapított oszcillátor $Q=10$ értéket-, rezonancia frekvenciás gerjesztés esetén 10-szeres amplitúdót mutat fel a kisebb frekvenciákkal, mint rezonancia frekvenciával gerjesztett lengésekkel szemben. Ha az oszcillátort nagyobb frekvenciával gerjesztik, mint a rezonancia frekvencia, akkor a rendszer kisebb amplitúdóval leng ki. A vonatkozó egyenletekből kimutatható, hogy a csillapított rendszer saját frekvenciája növekvő csillapítás mellett a kisebb frekvencia tartományba kismértékben eltolódik. Ennek értéke minden esetben kisebb, mint a csillapítatlan rendszer saját frekvenciája. [1]

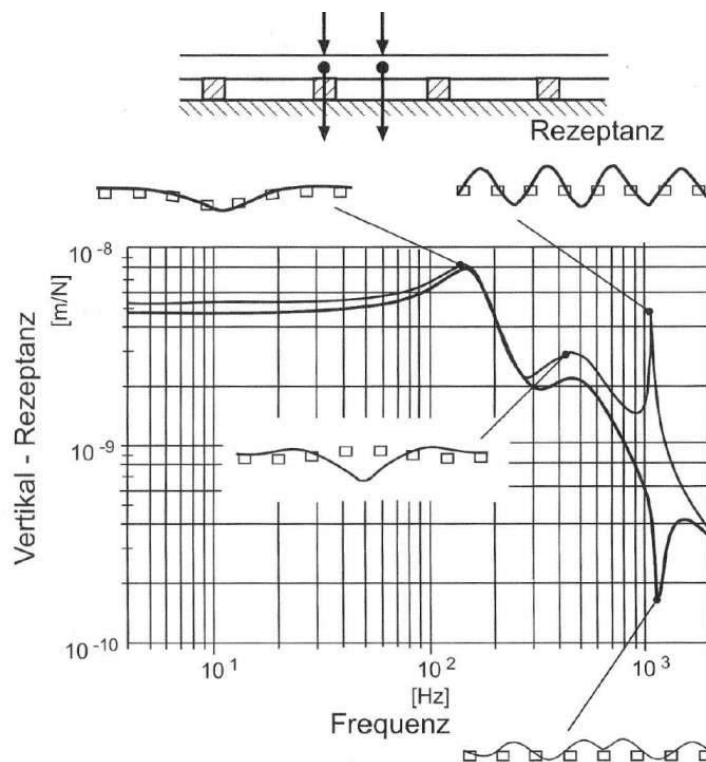


2.5. ábra – Szinuszos függvény szerinti erővel gerjesztett, csillapított lengő tömeg rezonancia görbéi, különböző Q értékek esetén [1]

A zúzottkő ágyazású vágány is egy lengésképes rendszer. A beépített rugalmas sínleerősítéseknek megfelelően lenghet a sín az aljjal szemben (2.6. ábra), és az alj a zúzottkő ágyazással szemben. [1]

Ennek során felléphetnek még további gerjesztett felső lengések. Lengések léphetnek fel a sín és az alj között, illetve a teljes vágányrács kilenghet. A rendszercsillapítási tulajdonságainak megfelelően alakulnak az amplitúdó növekmények.

A függőleges lengés érték a merevség reciprok értékét jelenti. Olyan tartományokban, ahol a függőleges lengés nagy, ott a lehajlás értékek nagyok és fordítva. [1]



2.6. ábra – A pályaszerkezeti elemek (sín-alj, alj-zúzottkő ágyazat) lengésviszonyai [1]

2.3. Védekezés módjai

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, és bár környezeti szempontból ez a legjobb, legolcsóbb és legegyszerűbb, mégsem alkalmazható a vasúti zajterhelés csillapításában, hiszen a sínek rögzítettek, csakúgy, mint a védendő lakóházak. [10]

A zaj- és rezgéscsillapítás alapvetően kétféle módon történhet. Megelőzés esetén a zajforrás által kibocsátott zaj csökkentése a cél, míg védekezés esetén a már meglévő zajt próbáljuk csökkenteni. Az első esetben csökkentjük a jármű által kibocsátott vagy a sín/kerék kapcsolatból adódó zajt. A zaj elleni védekezés passzív formája (védelem) a vonal

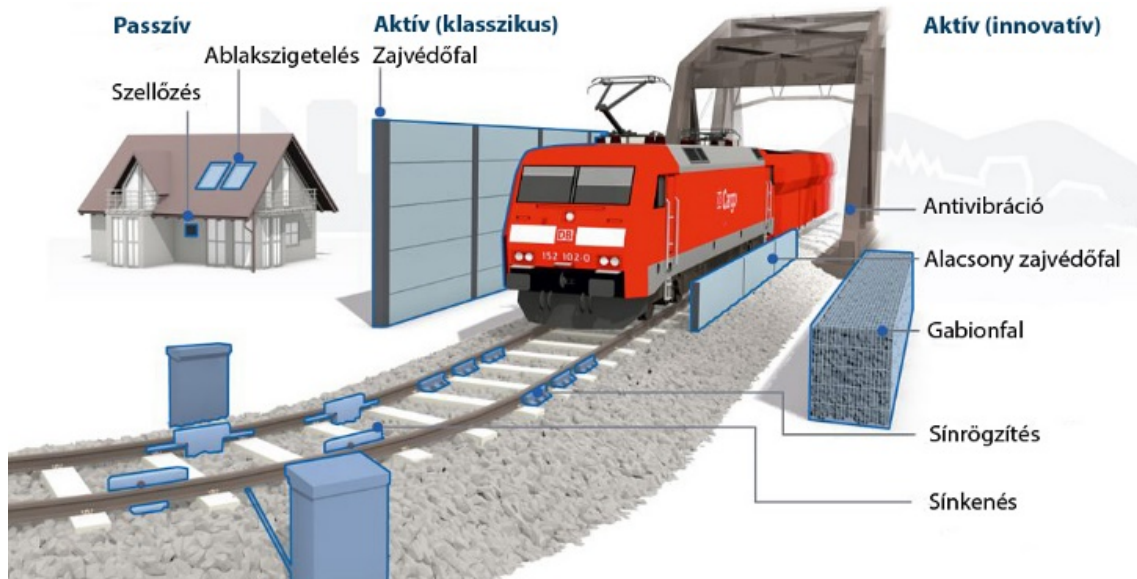
mentén létesített erdősávokkal vagy zajfogó falakkal valósítható meg. Kisebb zajbeszűródés esetén érhető el épületek tudatos tervezésével vagy utólagos szigetelésével, nyílászárók cseréjével vagy rezgés esetén, a rezgés útvonalának megszakításával (pl.: árok építésével) csökkentés. [4] Megkülönböztetünk tehát közvetlen és közvetett zajcsökkentési módokat, továbbá aktív és passzív védekezési lehetőségeket. Az aktív és passzív csillapítási módokat a **2.7. ábra** szemlélteti.

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.

Közvetett zajcsökkentés:

- Testhang gátlása: célja a rezgések mérséklése, illetve szétterjedésük csökkentése;
- Elnyelő burkolattal: hangelnyelő szerkezetekkel a visszaverődő zaj csökkentése. [2]



2.7. ábra – Aktív és passzív zaj- és rezgéscsillapítási lehetőségek [11]

A vasúti zajterhelések csökkentése érdekében aktív és passzív zajcsökkentés terén (a pálya oldaláról) további lehetőségek vannak, amelyeket a **2.4. táblázat** foglal össze.

2.4. táblázat – Aktív és passzív zajcsökkentési lehetőségek (a vasúti pálya oldaláról) [10]

Aktív	Passzív
<ul style="list-style-type: none"> - Hézag nélküli vágányok létesítése; - Rugalmas sínleerősítések alkalmazása; - Alépítmény és felépítmény megfelelő karbantartása; - A sín futó- és vezetőfelületi hibáinak kijavítása; - Alágyazati szőnyeg alkalmazása; - Aljlapucsrétegek alkalmazása; - Alj alatti talpprofilok alkalmazása; - Vagy ezek kombinációja. 	<ul style="list-style-type: none"> - Erdősáv, növényzet telepítése megfelelő távolság esetén, bokrok, fák ültetése (hangszóródási jelenség); - Zajvédő töltés építése kellő terület esetén; - Zajárnyékoló, zajvédő falak létesítése építése; - Az épület passzív elszigetelése: épületekkel: semleges funkciójú épületekkel (pl. garázs, üzlet), a lakóépület megfelelő tájolásával vagy szerkezeti kialakításával.

A megfelelő területrendezés és –felhasználás és az utólag elhelyezhető zajvédelmi létesítményeket általi zajcsökkentési lehetőségeket foglalja össze a **2.5. táblázat**.

2.5. táblázat – Út- és vasúti pálya környezetével kapcsolatos főbb zajcsökkentési lehetőségek [3]

Zajvédelmi beavatkozások területe	Zajcsökkentési lehetőségek		
Út- és vasúti pálya környezete	Védőtávolság megtartása		
	Területrendezés, területfelhasználás → a különböző felhasználású területeket és létesítményeket minél kisebb mértékben terhelje a más területekről érkező közlekedési zaj	A közúti és vasúti közlekedési alágazatok vonalainak és létesítményeinek koncentrációja egy területre	
		A közlekedési rendszerhez igazított településtervezés (pl.: védőtávolság a főközlekedési utaktól)	
		Az ipari területek, szolgáltató létesítmények a főközlekedési utakhoz és vasútvonalakhoz való kedvező elhelyezése	
		A főforgalmi utak mellé több intézmény, kereskedelmi szolgáltató létesítmény és kevesebb lakóház építése	
		A főforgalmi utak mentén az út és a lakóház közé 2-3 emeletes szolgáltató épület telepítése	
	Utólag elhelyezhető zajvédelmi létesítmények → a zajforrás és a védendő terület, illetve építmény közé elhelyezett, zajterjedés útjába állított, akusztikailag méretezett létesítmény	Zajárnyékoló falak (elnyelő típusú)	Általános
			Vasúti pálya közeli úgynevezett alacsony zajárnyékoló falak
		Zajárnyékoló töltések	
		Zajárnyékoló növényzet (erdősáv)	
Utak teljes, vagy részleges befedése			
Passzív akusztikai védelem (homlokzati hangszigetelések → nyílászárók hanggátlásának mértéke a lényeges)			

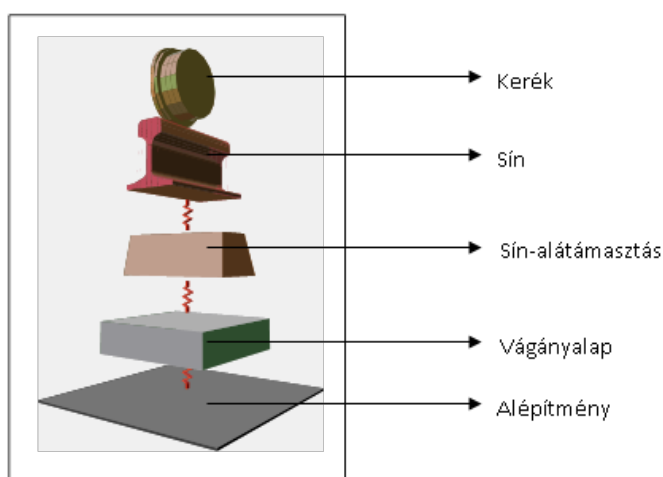
A három terület részéről a megfelelő beavatkozásokat együttesen kellene végrehajtani, ezeket az intézkedéseket a **2.6. táblázat** foglalja össze.

2.6. táblázat – Megfelelő beavatkozások a zaj és rezgések csökkentése érdekében [6]

Település	Jármű	Pálya
<ul style="list-style-type: none"> - Az épület megfelelő elhelyezése 	<ul style="list-style-type: none"> - A járművek kiképzése - A vasúti vontató járművek hajtó- és futóműveinek módosítása - Aerodinamikai zaj csökkentése - Féktuskók/tárcsafékek 	<ul style="list-style-type: none"> - A vasút helyes vonalvezetése - A vasúti pályák megfelelő kiképzése - Korszerű, rugalmas sínleerősítés - Sínek összehegesztése - Rezgéscsökkentő elemek alkalmazása - Zajvédő falak alkalmazása - Felépítmény-vizsgálat – sínköszörülés - Kis sugarú ívekben sínköszörülés

3. Zaj- és rezgéshatások csillapítási lehetőségei vasúti pályaszerkezeti elemekkel

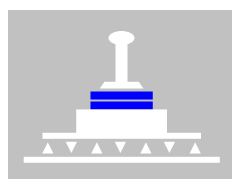
Alapvetően kétféle vágánytípus létezik: zúzottkő ágyazatú keresztaljas, és betonlemez vágány. Mindkét típusnak megvannak az előnyei és a járatos rendszerei. Az ágyazatos vágány például könnyebben kialakítható, rugalmasabb a felépítménye, viszont karbantartás szempontjából körülményesebb (ágyazatcsere). A zúzottkő ágyazat jó hangelnyelést biztosít, és bizonyos szempontból rugalmas réteggént viselkedik. A betonlemez vágány ezzel szemben merevebb, de ugyanakkor szinte alig igényel fenntartást. Mechanikai szempontból mindkét rendszer hasonló felépítésű, amely a **3.1. ábrán** látható. A felépítmény több egymás feletti merev elemből áll, amelyek a dinamikus erőket egymásnak továbbítják. Az ábra mutatja, hogy szigetelési beavatkozás három szinten történhet: a sín alatt, a sín-alátámasztás alatt, illetve a vágányalap alatt. [1]



3.1. ábra – Vasúti pályaszerkezet felépítése [12]

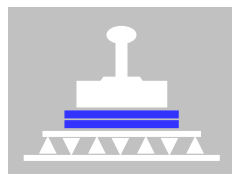
A **1-2. fejezetekben** leírtak alapján belátható, hogy a vasúti felépítmény egyes elemeinek helyes megválasztásával már zajcsökkentés érhető el. Jelentősen csökkenthető a kisugárzott rezgés mértéke a vasúti felépítmény tudatos megválasztása mellett annak utólagos szigetelésével is. A **3.1. ábrán** látható, hogy három szinten történhet beavatkozás, ahol a modern – elsősorban műanyagipari – technológiáknak köszönhetően elasztomerek, illetve gumielemelek segítségével a sín által sugárzott rezgés és az így keletkezett zaj nagymértékben csökkenthető. [4]

A különböző rugalmas anyagok beépítése mindhárom szinten megoldást nyújt a zaj- és rezgésproblémákra. A megoldások lehetőségeit szemlélteti a **3.2. ábra**.



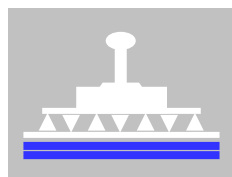
1. szint

1. szintű beavatkozások közvetlenül a sín alatt
 - közvetlen sítalpágyazó lemezek
 - közvetlen sítalpágyazó szalagok
 - kettős hangolású sínzaj-tompító elemek



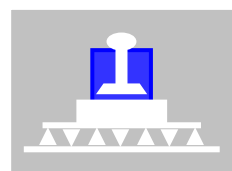
2. szint

2. szintű beavatkozások a sínalátámasztásnál
 - alátétlemez-szigetelések
 - keresztalj-paplanok (aljpapucskok)



3. szint

3. szintű beavatkozások a vágány alapjánál
 - úsztatott sínágyazat
 - ágyazati paplanok (alágyazati szőnyeg)



Körbeágyazott sín

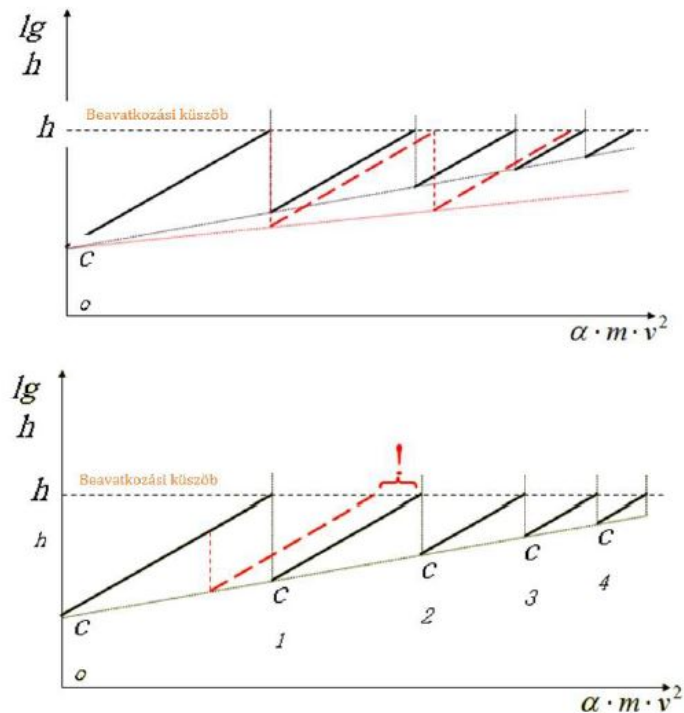
- Körbeágyazott sín
- előöltöztetett sín
 - sín sínkamra kitöltéssel
 - keresztaljjal együtt kialakított sín
 - helyszínen öntött sínágyazás
 - sínkamra elemek

3.2. ábra – Rugalmas pályaszerkezeti elemek beépítésének lehetőségei [12]

A **3.2. ábrát** szemlélve megállapítható, hogy szinte valamennyi pályaszerkezeti elem közvetlen környezetébe beépíthetők a rugalmas rezgéscsillapító elemek (lemezek, tömbök, kiöntések, stb.). Így a rugalmas elemek alkalmazhatóak a sítalpak alatt, a sínshálak hevederkamráiban, a sínleerősítések alátétlemezei, a keresztaljak, valamint a zúzottkő ágyazat és a beton pályalemezek alatt. [1]

A modern, nagy teljesítményű vasúti rendszer számos jelentős kihívás elé állítja a vasúti szakembereket. A vasúti személyi közlekedésre és teherszállításra való igény folyamatosan nő, az egyre nagyobb sebesség is állandó követelmény. A nagy sebességek azonban igen alacsony hibatűréshez, ennek megfelelően pedig magas fenntartási igényekhez vezetnek. Bár a nagy sebességre vonatkozó követelmény alapvetően teljesül, felmerül a használhatóság és a karbantarthatóság kérdésköre. Ez igazolható több modellel, többek között a Vaszary-féle egyszerűsített avulási modellel (**3.3. ábra**). Ezen a pálya állapota látható (h - pályahiba) az átgördült tömeg (m) és a sebesség (v) függvényében. Ahogy az egyértelműen látható, a fenntartási munkálatok a beavatkozási küszöb elérésekor szükségesek, azonban azok minősége és időbeli elosztása komoly hatással van a vágány

élettartamára és annak költségeire. A nem megfelelő szintű vagy időben (túl korán, túl későn) végzett aláverés, aléptmény-javítás jelentősen csökkentheti a vágány élettartamát, így a megfelelő időpont kitűzéséhez komoly mérési és becslési eljárások szükségesek. [13]



3.3. ábra – Vaszary-féle egyszerűsített avulási modell [13]

Ebben a komplex és soktényezős problémában is a rugalmas pályaszerkezeti elemek kiemelt hasznosítása lehetséges. Rugalmas pályaszerkezeti elemek alkalmazásával hatékony rezgéscsillapítás érhető el a teljes vasúti pályában. Így a szabályozási időközöket két-háromszorosukra is meg lehet hosszabbítani e rugalmas elemek alkalmazásával, ami az életciklus-költségek tekintetében igen jelentős előnnyel bír. Mivel a rezgéseket hatékonyan csillapítják, így a pálya avulási folyamata lassítható le. Ha az aláverések közötti ciklust a vágány elérhető maximális üzemidejének előrejelzésekképp értelmezzük, a hosszabb aláverési időközök a vágány hosszabb élettartamát jelzik előre. Ez és az aláverési munkálatok csökkenő száma már önmagában jelentős pénzügyi előnyt jelent, amihez még hozzáadódik a folyamatos üzem nyújtotta biztonság, mivel a fenntartási munkálatokkal járó vágányzárak és üzemi fennakadások és az ezek vonzataként megjelenő plusz költségek elmaradnak, a szakasz folyamatos rendelkezésre állása biztosított. [13]

A **3.1. táblázatban** sorolom fel a vasúti pályaszerkezeti elemeket, az elemekből származó zaj-és rezgések kialakulásának okait, amelyek általában a karbantartások elmaradásából, az elemek hibáiból adódnak. A táblázatban a hibákból és elmaradt karbantartásokra vonatkozó intézkedéseket javaslok, amik csillapítási lehetőségek lehetnek a zaj- és rezgések terén.

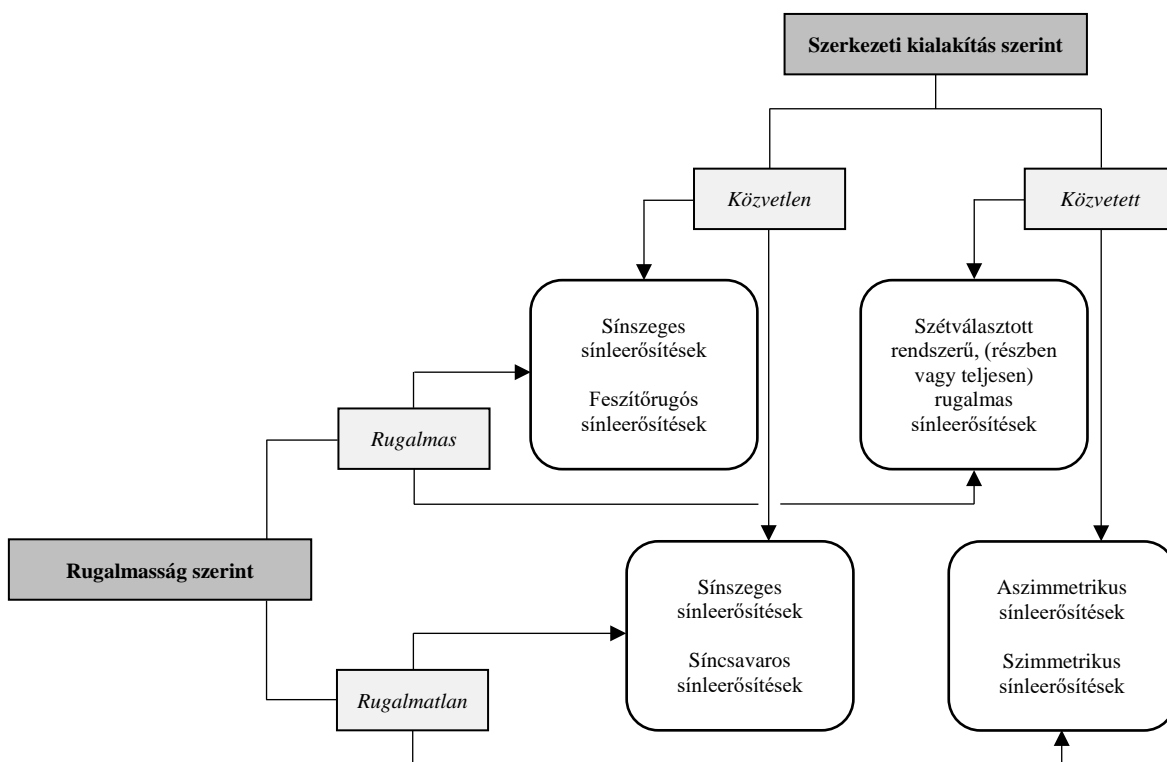
3.1. táblázat – Pályaszerkezeti elemek hatása a zaj- és rezgésekre, azok csillapítási lehetőségei

Pályaszerkezeti elem	Zaj- és rezgések kialakulásának oka	Zaj- és rezgéscsillapítási lehetőségek
Pálya és vágánygeometria	<ul style="list-style-type: none"> - kissugarú ívek - fekszing hibák (süppedések) - nyomszűkület, -bővülés - irányhibák - elmaradt karbantartások okozta hibák 	<ul style="list-style-type: none"> - sínkenő berendezések alkalmazása - ágyazat alávérese - vágányszabályozás
Sín	<ul style="list-style-type: none"> - sín/kerék kapcsolat - bármely sínkopás (különösen hullámos) - futófelületi hibák - vezetőfelületi hibák - síngonozás elmaradása 	<ul style="list-style-type: none"> - sínkamra elemek alkalmazása - sínkenő berendezések alkalmazása - sínköszörülés - síncsere - feltöltő, felrakó hegesztések
Sínillesztés	<ul style="list-style-type: none"> - hevederes illesztésű pálya - sínlehajlások - negatív hegesztések (kivölgyelődött) 	<ul style="list-style-type: none"> - hegesztett, hézag nélküli sínek - hegesztések javítása
Sínleerősítés	<ul style="list-style-type: none"> - szétválasztott, rugalmatlan sínleerősítések 	<ul style="list-style-type: none"> - rugalmas leeresztések alkalmazása - rugalmas közbetétek alkalmazása
Keresztalj	<ul style="list-style-type: none"> - vasbetonaljak (faaljak nagyobb rugalmassággal rendelkeznek, így kisebb rezgéseket keltenek) 	<ul style="list-style-type: none"> - aljlapucskok alkalmazása
Zúzottkő ágyazat	<ul style="list-style-type: none"> - szennyezett ágyazat - vízszákosodás - rossz minőségű, szemszerkezetű ágyazat - vastagsága 	<ul style="list-style-type: none"> - alágyazati szőnyeg alkalmazása - rostálás - ágyazatcsere
Alépítményi kiegészítő rétegek, földmű	<ul style="list-style-type: none"> - vízszákosodás 	<ul style="list-style-type: none"> - alágyazati szőnyeg alkalmazása - alépítmény-karbantartó géplánc
Műtárgyak	<ul style="list-style-type: none"> - acél hidak - bármely híd műtárgy 	<ul style="list-style-type: none"> - rugalmas elemek alkalmazása (bármely szinten)

A **3.1. táblázatban** kiemeltem azokat a csillapítási lehetőségeket, amelyeket üzemi állapotban, helyszíni mérésekkel, valamint laboratóriumi körülmények között is vizsgáltam. A vizsgálatok és eredmények az **5. és 6. fejezetben** találhatóak. A következő **alfejezetekben** bemutatom a vizsgált pályaszerkezeti elemeket, azok feladatait, valamint a gyártók által kínált új pályaszerkezeti elemek előnyeit és alkalmazásuk fontosságát.

3.1. Sínleerősítések, közbetétek

Jármúterhek és hőerők felvétele a sínszalagról és továbbadása az aljakra, valamint a sínszalag tartós rögzítése az aljakon a sínleerősítések feladata. A sínleerősítéseknek meg kell akadályozniuk a vágánykivetődést és biztosítaniuk kell az előírt nyomtávolságot, továbbá megfelelő rugalmasságot kell nyújtaniuk a sínre ható erőkkel szemben. A sínleerősítések csoportosítását a szerkezeti kialakítás és a rugalmasság alapján a **3.4. ábra** mutatja be. [14]



3.4. ábra – Sínleerősítések csoportosítása

A sínleerősítések csoportosíthatók továbbá a megfogásuk, illetve alátámasztásuk hosszának szempontjából [1]:

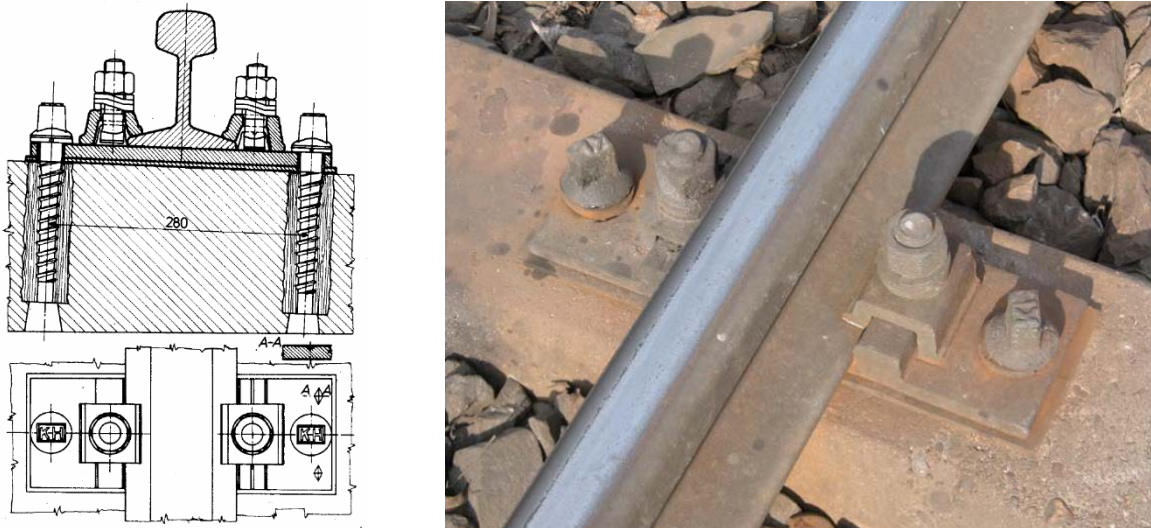
- Pontszerű sínleerősítés – példa: szorítókegyellel – PANDROL e
- Szakasos sínleerősítés – példa: síngerincnél gumibetéttel – ORTEC Delta-Lager
- Folyamatos sínleerősítés – példa: sínágyazás – EDILON Corkelast

Léteznek különleges sínleerősítések is, amelyeket helyenként, nagyterhelésű és nagysebességű folyópályáknál, hídszerkezeteknél, köríveknél, városi vasutak vonalain (közúti vasút, metró, gyorsvasút stb.) és nagyterhelésű darupályáknál alkalmaznak. [15]

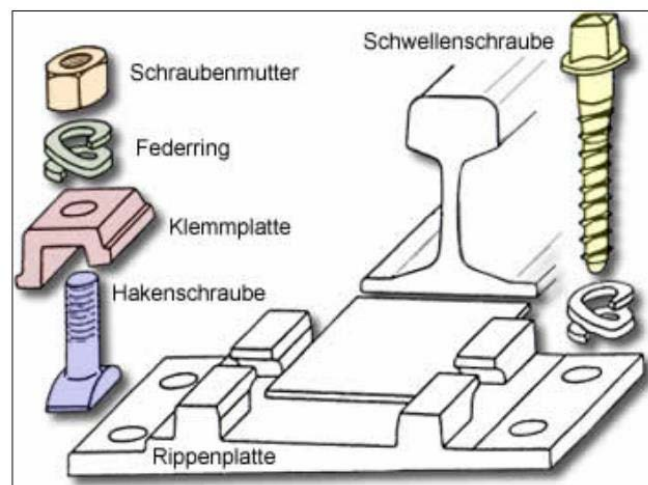
Ebben az alfejezetben a laboratóriumban és élőpályában is vizsgált sínleerősítéseket mutatom be részletesebben.

- Közvetett, rugalmas – GEO rendszerű szorítólemez sínleerősítés

A GEO rendszerű leerősítést az 1990-es évekig a MÁV elterjedten, elsősorban a fővonalain alkalmazta. Új építésű pályákban, a rugalmas közvetlen sínleerősítések térhódítása következtében, a MÁV napjainkban főképp állomások vonatfogadó vágányaiban és kis sebességű mellék- és iparvágányokban alkalmazza. Egyre inkább teret nyer mellékvonalainkon, mind fővonalai vissznyereményből végzett nagyobb átépítések, mind szórványos aljcserek következtében. Főleg 48 és 54 kg-os sínek leerősítésére használják, szórványosan előfordul "I" (42,8 kg) és "c" (34,5 kg) sínek alatt is. [16] A GEO rendszerű sínleerősítés keresztmetszeti rajza és pályába építve látható a **3.5. ábrán**. A GEO rendszerű sínleerősítés részeit a **3.6. ábra** mutatja be.



3.5. ábra – GEO rendszerű, MÁV fővonalai sínleerősítés betonalj [13]



3.6. ábra – GEO rendszerű sínleerősítés részeit (ábramegnevezések: anyacsavar, kettős csavarbiztosító gyűrű [Grower-gyűrű], leszorítólemez [kengyel, köröm], leszorítócsavar [szár], alátétlemez, laposvállú síncsavar) [15]

- **Közvetett, rugalmas – VOSSLOH KS 24 sínleerősítés (GEO rendszer Skl-24 szorítókegyellel)**

A szétválasztott rendszerű alátétlemezes (GEO bordás alátétlemezes), merev szorítólemezekkel (GEO szorítólemezek) felszerelt sínleerősítés első jelentősen rugalmas utódja – az Skl-2 szorítókegyeles változat után – az Skl-3 jelű szorítórugós megoldás volt. Pár évvel később a bordás alátétlemezekben az Skl-3 jelű szorítókegyelt a még rugalmasabb Skl-12 jelű rugó váltotta fel. Az Skl-12 jelzésű szorítórugó Magyarországon széles körben ismert és alkalmazott eleme a GEO bordás alátétlemezrel kivitelezett rugalmas rendszerű lekötéseknek. A hazai alkalmazások a közúti vasutaktól – a földalatti gyorsvasutakon keresztül – a nagyvasútig terjednek, kiváló referencia tapasztalatokkal.

A függőleges irányban fokozottabban rugalmas ágyazási tulajdonságú GEO alátétlemezes („K” rendszerű) sínleerősítésekhez fejlesztette ki a VOSSLOH Fastening Systems GmbH az Skl-24 típusú szorítórugót, amely lényegében a már 20 éve gyártott Skl-12 típusú szorítókegyelek mai, szétválasztott rendszerű, alátétlemezes termékcsaládjának legkorszerűbb változata.

Az Skl-24 jelű szorítókegyelkekkel ellátott bordás, alátétlemezes sínleerősítések faaljakon és beton-aljakon egyaránt alkalmazhatók (**3.7. ábra**). Az Skl-24 jelzésű szorítókegyel hegesztett, hézag nélküli, vagy hevederes illesztésű vágányokban egyaránt alkalmazható. Az Skl-24 jelzésű szorítókegyel a MÁV 48,5-, az S 49-, az S 54-, az UIC 54-, az UIC 60 rendszerű Vignol sínek, valamint az Ri 51,4-, az Ri 59-, és az Ri 60 rendszerű vályús sínek leerősítésére alkalmas. [17]



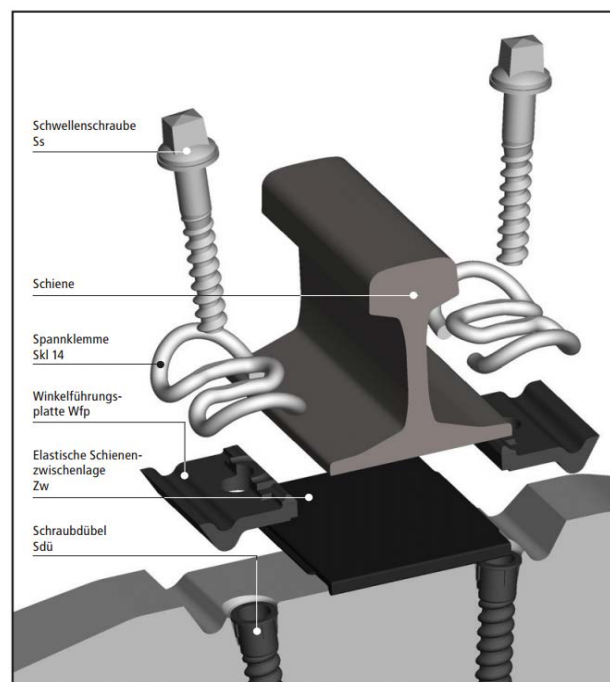
3.7. ábra – A KS 24 rendszerű, alátétlemezes sínleerősítés (Skl-24 típusú szorítórugóval), faaljra szerelve [18]

- **Közvetlen, rugalmas – VOSSLOH W 14 sínleerősítés (Skl-14)**

A VOSSLOH Fastening Systems GmbH többféle kör keresztmetszetű rugós leerősítést fejlesztett ki és gyárt napjainkban is. A közvetlen és rugalmas sínelerősítésekhez tartoznak ezek a típusok is, itt a sín leszorítását különféle alakú szorítórugók biztosítják. A betonaljokban a sínleerősítésnek megfelelően van kialakítva egy vályú. A vályúba nyomtávtartó szögelemet helyeznek, aminek feladata a nevéből adódóan a nyomtáv tartása, illetve a szorítórugó megtámasztása. A sínt a szorítórugókon keresztül síncsavar erősíti le. A csavar furatába menetes műanyag betéteket, a sín alá rugalmas közbetétet helyeznek. Ilyen típusú a VOSSLOH által gyártott W 14-es (3.8 ábra) és W 21-es rendszerű (3.11. ábra) sínleerősítés is. A 3.9. ábra mutatja be az ilyen típusú sínleerősítések részeit W 14-es rendszeren keresztül.

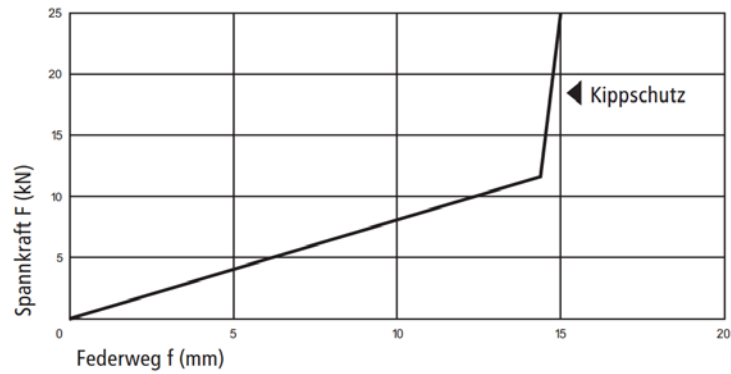


3.8. ábra – Skl-14-es szorítókengyel előszerelve (balra) és szerelt állapotában (jobbra) [19]



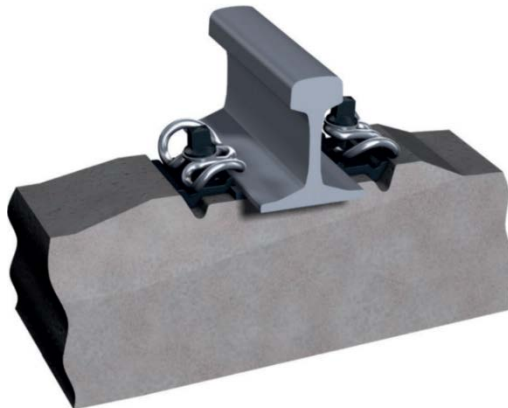
3.9. ábra – W 14-es rendszerű sínleerősítés részei (ábramegnevezések: síncsavar, sín, Skl-14-es szorítókengyel, nyomtávtartó szögelem, rugalmas közbetét, menetes műanyag betét) [19]

W 14-es és W 21-es rendszerű sínleerősítések között szerkezetbeli különbség nincs, a rendszerhez tartozó szorítórugók alakja különbözik. Értelemszerű, hogy a szorítórugókra vonatkozó erő-elmozdulás diagramok (3.10. és 3.12. ábra) is eltérők.

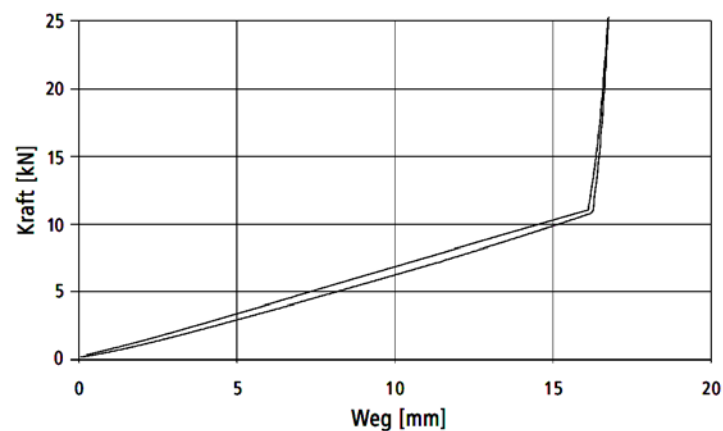


3.10. ábra – Skl-14-es szorítórugó erő-elmozdulás diagramja [18]

- Közvetlen, rugalmas – VOSSLOH W 21 sínleerősítés (Skl-21)



3.11. ábra – Skl-21-es szorítókegyl szerelt állapotában (balra) és előszerelve (jobbra) [19]



3.12. ábra – Skl-21-es szorítórugó erő-elmozdulás diagramja [19]

A kerék-sín kapcsolatban rezgésbe került sínszál csillapításában, a sínleerősítéseken belül, elsősorban a rugalmas kapcsolatokat nyújtó elemek (szorítókengyelek, spirálrugók), illetve a rugalmas megtámasztást-, vagy ágyazást biztosító szerkezetek (közvetétek, alátétlemezek, kamraelemek, stb.) vesznek részt. A sínleerősítések sínszálak irányába kifejtett rezgéscsillapító szerepe azért is fontos, mert a sínszálak két irányban fejtenek ki akusztikai terhelést a környezet felé. Egyrészt a sínszál körbevevő levegőben jönnek létre hullámok, azaz a sín, mint zajforrás kiindulópontja jelenik meg, másrészt a sínszál alátámasztó-, vagy körbefogó szerkezetekben rezgések indulnak el a pályatest belseje felé, azaz a sín, mint a rezgések forrása szerepel a felépítményi rendszerben. Így a sínleerősítésekben, illetve a pályaszerkezetben ébredő mechanikai igénybevételeken túl az akusztikai igénybevételek szempontjából is fontos a rugalmas elemek rugalmassági jellemzőinek az ismerete. A szorítókengyelek-, és rugók rugalmassági jellemzőit legjobban a rugókarakterisztikák-, a közvetétek, alátétek rugalmassági adatait használható módon a rugóállandójuk [kN/mm], illetve ágyazási tényezőjük [N/mm³] képezik. Ha szemügyre vesszük a sínleerősítésekben alkalmazott szorítókengyelek úgy nevezett rugókarakterisztikáit (erő-elmozdulás görbéit, **3.10. és 3.12. ábra**) akkor megállapíthatjuk, hogy azok az üzemi tartományban többnyire lineárisak. Ez azt jelenti, hogy az üzemi tartományban a szorítókengyelek rugalmasságát jól jellemzi a görbék meredeksége, azaz ezen a szakaszon értelmezett rugóállandó.

Az ábrákról látható, hogy az Sk1 - kengyelek rugódiagramjai két szakaszból állnak. Az első az úgynevezett üzemi szakasz. A sínleerősítés normál vasútüzemi használatának körülményei között a kengyelek erő-elmozdulás értékei erre a szakaszra esnek. Amennyiben a sín (sínleerősítés) a szokásosnál nagyobb oldalirányú erőt kap, akkor a sínszál megengedettnél nagyobb mértékű elfordulását, illetve ennek következtében a határértéken túli rugalmas nyombövlést a kengyelek közepső - hurokszerű, merev szakasza akadályozza meg, miután a sántalp nekiütközik. Ekkor lép működésbe az erő-elmozdulás diagram második szakasza, amely szinte alig enged további sántalp emelkedést. Ennél fogva ezen második szakasz rugóállandója jóval nagyobb az elsőnél. Ha a VOSSLOH szorítókengyelek fejlődési folyamatát vizsgáljuk, megállapítható, hogy azok üzemi szakaszon egyre rugalmasabb tulajdonságot mutatnak, vagyis erő-elmozdulás görbéik egyre laposabbak – rugóállandóik egyre kisebbek. Ez azt jelenti, hogy ugyanazon elmozduláshoz egyre kisebb értékű erőváltozás tartozik, amely vasútüzemi szempontból tekinthető előnyösnek (a VOSSLOH Sk1-24 jelű szorítókengyel esetében a rugóállandó értéke: $11,5 \text{ kN} / 16,5 \text{ mm} = 0,70 \text{ kN/mm.}$) [1]

• **Közbetétek – Wirthwein AG (Zw)**

A közbetétek fő feladata természetesen a rugalmasság biztosítása a vasúti pályában. Ez a rugalmasság azért szükséges, hogy megóvjuk a felépítményt és annak egyes elemeit. Közbetétek alkalmazásával növekszik az utazási kényelem, továbbá a felépítményi elemek élettartama is. Csökkentik a sín felületi és hullámos kopását, valamint biztosítják a sínszálak alátámasztásának rugalmasságát is. A közbetéteket a sín és az aljak közé építik be, méretük a sínrendszertől és az alj típusától függ. A közbetétek anyaga nagy befolyással van a rugalmasságra.

A Wirthwein AG [20] által gyártott közbetétek típusát és azok jellemzőit a **3.2. táblázat** foglalja össze. A sínleerősítésekhez az alábbi anyagokból készítik a közbetéteket:

- Termoplasztikus (hőre lágyuló) poliuretán (Thermoplastic polyurethane - TPU)
- Etilén–vinil-acetát kopolimer (Ethylene-vinylacetate copolymer - EVA)
- Nagysűrűségű polietilén (High-density polyethylene - HDPE)

3.2. táblázat – Wirthwein AG által gyártott közbetétek [20]

DB szerinti osztályozás	Zw 900	Zw 700	Zw 787a	Zw 687a	Zw 687a
Anyag	TPU	TPU	EVA	EVA	HDPE
Méret (hossz/maximum hossz x sántalp szélessége [kevesebb, mint 2 mm ráhagyás] x vastagság)	180/165x148x9	180/165x148x7	180/165x148x7	180/165x148x6	180/165x148x6
Tulajdonság	rugalmas	rugalmas	félig rugalmas	szabványos	nagy teherbírású
Névleges statikus rugómerevség, szobahőmérséklet, 18-68 kN	kb. 60 kN/mm	kb. 60 kN/mm	kb. 140 kN/mm	kb. 600-700 kN/mm	kb. 950 kN/mm
Behajlás [mm]	kb. 0,85 mm	kb. 0,8 mm	kb. 0,35 mm	kb. 0,08 mm	
Statikus rugómerevség, 50 °C, 18-68 kN	kb. 45 kN/mm	kb. 50 kN/mm	kb. 60 kN/mm	kb. 400-500 kN/mm	
Dinamikus rugómerevség, 10 Hz, szobahőmérséklet, 10 s után	kb. 104 kN/mm	kb. 106 kN/mm	kb. 260 kN/mm	kb. 1600-1800 kN/mm	
Dinamikus rugómerevség, 10 Hz, - 10 °C, 10 s után	kb. 295 kN/mm	kb. 280 kN/mm			
Dinamikus rugómerevség, 30 Hz, szobahőmérséklet, 10 s után	kb. 105 kN/mm	kb. 124 kN/mm			

Az **3.2. táblázatban** szürke színnel emeltem ki azokat a típusokat, amelyeket helyszíni és laboratóriumi körülmények között vizsgáltunk. A laboratóriumban Zw 700-as és Zw 687a típusú közbetétet, üzemi állapotban, a szőnyi mérés során, pedig Zw 900-as és szintén Zw 687a típusú közbetét hatását mértük.

3.2. Aljlapucskok

A keresztalj-alátétek vagy aljlapucskok (Under Sleeper Pads – USP) gazdaságos megoldást nyújtanak a vasúti forgalom által keltett zavaró rezgések csökkentésére. Ezt a rugalmas rétegtípust használva a vágányok nemcsak egyenletesebben fekszenek, hanem a keresztaljak alatti hézagok is elkerülhetők, de a szerkezetben terjedő kellemetlen zajok is mérsékelhetők.

A keresztalj-alátét vagy aljlapucsk a beton keresztaljak alsó felületére rögzített rugalmas anyagú réteg. A készítésére eddig felhasznált anyagok a gumi, poliuretán és az EVA voltak, ezek közül a poliuretán és annak származékai terjedtek el. [21]

Az első beépítés 1989-ben, Ausztriában történt, egy ágyazatnélküli tesztvágányon. A hagyományos zúzottköves, és a betonlemezes felépítmény átmeneti szakaszán a beépített keresztaljakat 2-3 mm-es poliuretán réteggel vonták be, hogy növeljék a vágány minőségét. Ezek az aljak ma is használatban vannak.

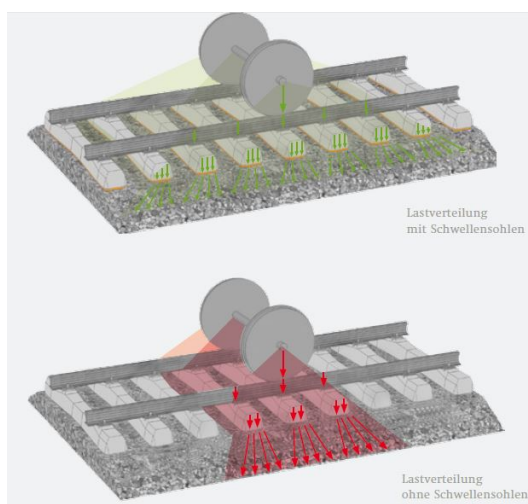
Az aljalátétek tulajdonságainak és viselkedésének tanulmányozására további rövid kísérleti szakaszokon alkalmazták az aljlapucskokat, majd a 90-es évek elejétől kezdve a betonalkak teljes bevonását felváltotta az alsó felületükre ragasztott poliuretán alátét. Később, ennek kiváltására kifejlesztették az aljlapucskok keresztaljakra történő rögzítési eljárásának egy új módját, mellyel az aljalátéteket közvetlenül a keresztaljak alsó felületére, a vasbeton keresztaljak öntése során, a szilárdulási folyamat alatt rögzítették. Az első éles üzemben használt beépítés Norvégiában, az oslovi metróvonal mintegy 1100 méteres szakaszán történt 1990-ben, majd 1993-ban, a rezgések csökkentése miatt. A szakasz még mindig jó állapotban van, nem tervezett karbantartást azóta sem igényelt. A 90-es évek közepétől számos európai ország kezdte el az aljlapucskok beépítését, úgy, mint Németország, Ausztria, Franciaország, Svájc vagy Dánia.

A keresztalj-alátétek használata igen sokrétű előnyt eredményez a vasútépítés és fenntartás területén. Alkalmazásuk két részre bontható: a felépítményi elemek szerkezetének védelmére, valamint akusztika terén, a káros zajok és rezgések csökkentésére. Alkalmazási területüket és hatásukat az **3.3. táblázat** foglalja össze. Az aljlapucskok óvják a felépítmény (különösen a zúzottkövet), így annak élettartamát hosszabbítják, az irány- és fekszinthibák csökkentése miatt csökkentik a fenntartási költségeket, növelik a vágány minőségét, mérséklük a kártékony rezgéseket mind a nyílt vonalon, mind a kitérőkben. [13]

3.3. táblázat – Aljpacucok alkalmazásának lehetséges területei

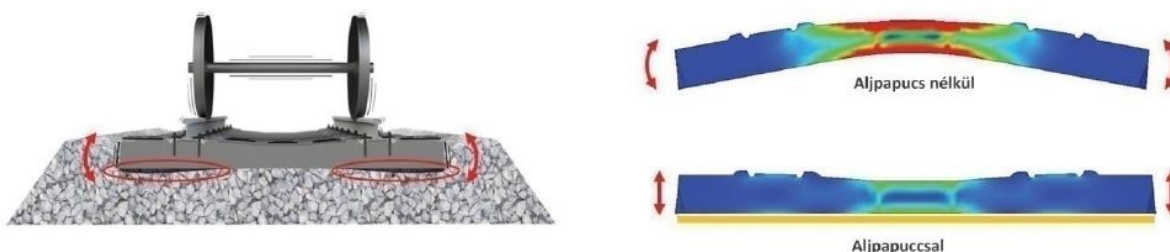
Vágányminőség		Vibrációcsökkentés	
Alternatíva az ágyazat alatti szőnyegekhez műtárgyakon	Az ágyazatkopás csökkentése	Vibrációk csökkentése	Hullámos sínkopások csökkentése
<ul style="list-style-type: none"> - nagy sebességű vonalakra - a szerkezet által továbbított zaj csökkentésére 	<ul style="list-style-type: none"> - hidakon, ha az ágyazat vastagsága csökkentett - inhomogén körülményekhez, átmeneti szakaszoknál (különböző rugalmasságok, konstrukció típusok változása) 	<ul style="list-style-type: none"> - épületek a vágány közelében 	<ul style="list-style-type: none"> - előnyök a kissugarú ívekben

A legelterjedtebb felépítményi szerkezet a zúzottkő ágyazatú keresztaljas vágány. A leggyengébb elem ebben a rendszerben egyértelműen a zúzottkő, mely látens dinamikus elmozdulásnak van kitéve. A folyamatos terhelés, a zúzottkő összenyomódása a kövek kopásához és aprózódásához vezet. Ez a jelenség lerontja egyrészt a vágány geometriáját, másrészt a víz szabad áramlását az ágyazatban, így egy saját magát erősítő romlási körfolyamatot indít meg. A romlás megelőzéséhez, lassításához aláverési munkálatokat tesz szükségessé. Az aljpacucok beépítése ezt a folyamatot lelassítja, azok különböző pozitív hatásai által. A tengelyterhelés az aljalátéteknek köszönhetően nagyobb számú keresztaljra oszlik el, mely az aljpacucok rugalmas tulajdonságaiból eredő lehajlási hossz növekedésével hozható párhuzamba. A teher így több aljra, nagyobb területre oszlik el, amely csökkenti az átlagos összenyomódást, így a terhelést a zúzottkővön. **(3.13. ábra)** [13]



3.13. ábra – A tehereloszlás aljpacucokkal és aljpacucok nélkül [22]

Az aljlapucs továbbá, a már említett penetrációs tulajdonságának köszönhetően növeli a kontaktfelület nagyságát a keresztalj és az ágyazat között. A kontaktfelület így az átlagos 3-9%-ról akár 30-35%-ra is növekedhet. Ez egyrészt biztosítja az ágyazat legfelső rétegének stabilitását, a zúzottkő darabok beágyazódása által, így a betonlajak egyenletesebb felülését és teherátadását is elősegítve mérsékeltebb vágánysüllyedést, illetve a vágánykomponensek kisebb mértékű igénybevételét eredményezi. Másrészt a beton szilárdságából adódó aprózódási folyamatot is nagyban mérsékli, amely a keresztalj-alátét nélküli betonlajak alatti hézagok kialakulásáért felelős. Az aljlapucssal ellátott keresztaljak konzisztensebb behajlásának köszönhetően az említett hézagok kialakulása elkerülhető (**3.14. ábra**). Az aprózódás a vágánygeometria gyors leromlásán túl vízvezetési problémákhoz is vezet, hiszen a finomra zúzó szemcsék eltömítik a zúzottkő közötti járatokat, illetve tovább növelik a vágány merevségét. Tanulmányok szerint a vágánynak plusz rugalmasságot adó aljlapucs elem beépítésével nem csak a zúzottkő ágyazat védelme érhető el, hanem vastagsága is csökkenthető. Ez különösen műtárgyakon jelentős, akár elérheti a 10 cm-es csökkentést is. [13]



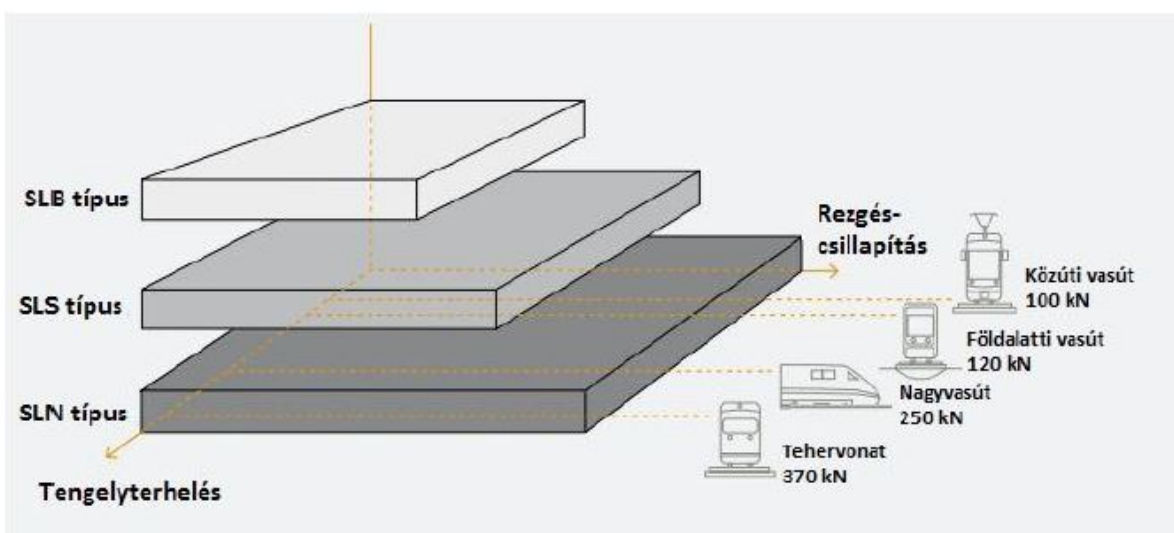
3.14. ábra – Hézag kialakulása az aljlapucs nélküli betonlajak alatt, konzisztensebb behajlás modellezése [21]

Előfordulnak olyan szakaszok is a vasúti pályákon, ahol egy rugalmas alátámasztású zúzottkő ágyazatú felépítmény csatlakozik egy merevebb felépítményhez, vagy szerkezethez (pl. híd, alagút, betonlemez felépítmény). Ezeken a helyeken hirtelen, ugrásszerű változás következik be a rugalmasság szempontjából, amik a pályában többlet igénybevételeket okozhatnak. Ennek a hatásnak a mérséklésére is alkalmasak többek között az aljlapucskok. Egy átmenetet, vagy közel azonos rugalmasságot biztosítanak a merevebb szerkezeten is, mint a hozzá kapcsolódó rugalmasabb zúzottköves felépítményen.

Az aljlapucskok alkalmazásának okai, beépítésük fontossága, az USP-k célja összefoglalóan a következők:

- Többletrugalmasságot vinni a felépítménybe;
- Ágyazat és alj kopásának csökkentése (betonaljak esetén);
- Növelni a pályaszerkezet és a sínszálak alátámasztásának rugalmasságát;
- Növelni a zúzottkő ágyazat aljjal szembeni stabilitását;
- Növelni a feltámaszkodási felületet;
- Csökkenteni a fenntartási költségeket;
- Meghosszabbítani a pályaszerkezet élettartamát;
- Egyenletes felületet és teherátadást biztosítani;
- Mérsékelni a zúzottkő aprózódási folyamatát;
- Csökkenteni a sín felületi kopását és a sín hullámos kopását;
- Védelmet nyújtani a vibrációval és a szerkezetben terjedő zajjal szemben.

Az aljlapucskok különböző igényekhez igazítható anyaghasználattal és merevségi értékekkel állnak rendelkezésre. Az eltérő anyagi tulajdonságok a terhelés függvényében választhatók. Az **3.15. ábrán** a Getzner Werkstoffe GmbH 3 különböző anyagból készített aljlapucsk típusainak alkalmazási területei figyelhetők meg.



3.15. ábra – Aljlapucskok anyag típusainak alkalmazhatósága [13]

Az elasztoplastikus anyagú SLB jelzésű aljalátétek kizárólag a vágánygeometria javítására alkalmasak, a rezgéscsökkentés nem elsődleges funkciójuk. Ez a típus elsősorban a zúzottkő ágyazatra eső terhelés csökkentését segíti elő. Az optimalizált anyagi

tulajdonságai elősegítik a zúzottkő beágyazódását, így a felső réteg kiemelt stabilitásának biztosítását. Az SLB típus csillapítási tulajdonságaival a betonalj tulajdonságainál előnyösebb viselkedést eredményeznek a rezgések hatására. Az elasztoplasztikus aljalátétek az éves fenntartási költségek csökkentésének és a vágány üzemidő-hosszabbításának hatékony eszközei.

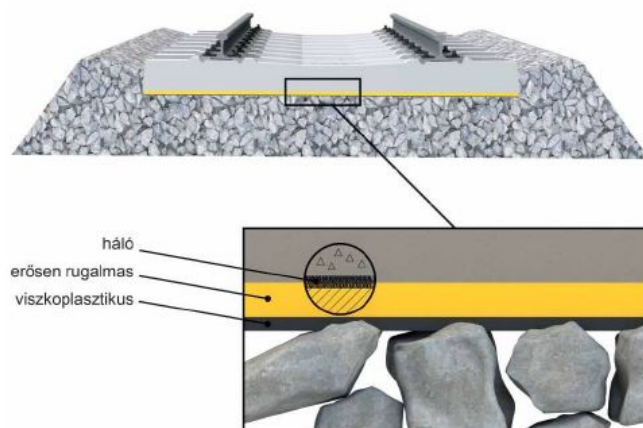
Más típusú anyagok kerülnek előtérbe, ha elsődleges szempont a rezgéscsökkentés. Ilyenek a már jogvédelem alatt álló SLS és SLN típusok. Az előbbi egy elasztikus anyagú, erősebben hangsúlyozott csillapító komponenssel rendelkező aljlapucs típus, az SLN ezzel szemben szintén elasztikus anyagú, azonban gyengébb csillapító komponenssel rendelkező keresztalj-alátét típus. Az SLS, ún. Sylomer[®] aljlapucskok (3.16. ábra) mutatnak csillapító tulajdonságokat, azonban az SLN típusú Sylodyn[®] megoldásai azok, melyek közel megegyező kapcsolatot teremtenek a statikus és a dinamikus merevség között. Ez egy kiemelten hatékony megoldás, mely alkalmazható még kismértékű, addicionális sín lehajlás esetén is.



3.16. ábra – Alul Sylomer[®] USP-vel ellátott vasbeton aljak telepítése [21]

A csillapító komponens szerepe azért fontos, hogy a kiemelkedően erős csúcsok ne a sajátfrekvencia közelében legyenek, és ezáltal a rezonancia jelensége is elkerülhető legyen. A dinamikus merevség pontos beállításával az aljlapucskok a vágányrezgés csökkentésében, szigetelésében értendő kapacitása teljesen kihasználható. Általános szabályként kimondható, hogy minél nagyobb a választott poliuretán anyag dinamikus hatékonysága, annál nagyobb a rezgésszigetelési teljesítmény. A megfelelő típus pontos kiválasztása adott terhelés alatti maximum lehajlás meghatározása alapján történik. Az egyes aljlapucskok egy anyagi tulajdonságú csoporton belül elsősorban rugalmasságukban térnek el. A rugalmasságuk az ágyazási tényező segítségével határozható meg. Ma az aljlapucskok 0,02 és 1,5 N/mm³ ágyazási tényező közötti skála teljes terjedelmében elérhetőek.

Napjainkban az aljlapucok gyakran eltérő rétegekből felépülő rendszerek, melyek alsó rétege – mely közvetlenül érintkezik a zúzottkő ágyazattal – egy ellenálló, képlékeny tulajdonságú anyagból készül, mely lehetővé teszi az ágyazatszemek kiváló beágyazódását. Ez a réteg egyben védi is az ez alatt elhelyezkedő réteget, mely egy puhább, dinamikusan nagyon rugalmas anyagból készül, alacsony lengéscsillapítási tulajdonságokkal. Ez a réteg a rezgésszigetelés feladatát látja el. A vágánygeometria stabilitása és biztonsága elősegíti a zavaró rezgések megjelenésének csökkentését különböző anyagok kombinációjával, melyek a rezgésszigetelés fizikai elvének alkalmazásával a rezgések kibocsátását szintén csökkentik. Az **3.17. ábra** egy szendvics elrendezésű aljlapucot mutat több funkcionális réteggel. A puha és akusztikailag nagyon hatásos, Sylodyn®-ből készült elasztikus réteg védelmet nyújtva ágyazódik be egy érintkező médium („mechanikai tapadó” háló) – a betonalj irányában –, valamint egy viszkoplasztikus réteg – az ágyazat irányában – közé. A funkciók ilyen jellegű szétválasztása több szempontból is előnyös, valamint biztosítja az összetett követelményeknek való megfelelést. [13]



3.17. ábra – Aljlapucok anyagának rétegződése [21]

Helyszíni mérések során lehetőségünk volt Magyarországon már élőpályába beépített aljlapucok zaj- és rezgéshatásainak vizsgálatára. A helyszíni mérés Balatonszabadi és Siófok közötti szakaszon valósult meg. A Lábatlani Vasbetonipari Zrt. a Dél-Balatoni vasútvonalhoz két gyártó USP termékeit felhasználva gyárt aljlapucos átmeneti- és kitérő vasbeton aljakat [23]:

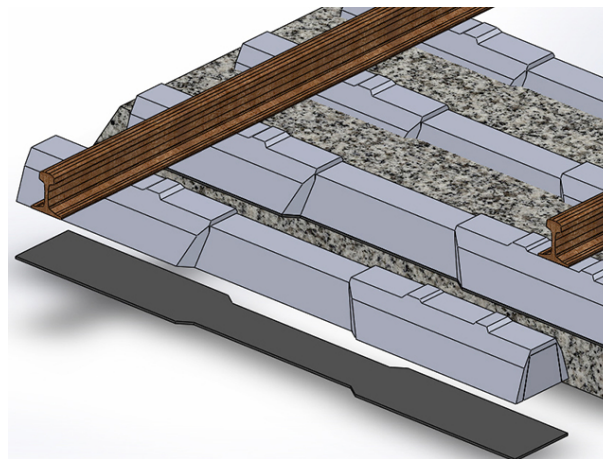
- Getzner Werkstoffe GmbH: SLB 3007G és SLB G típusok
- Paul Müller Technische Produkte GmbH: M 022 típus

A mérőszakaszon az M 022-es típusú aljlapucot építették be. A mérés körülményeit és az M 022-es típusú elem eredményeit az **5.2. alfejezetben** mutatom be.

- **Frankó Rubber Technology Kft. – FRT-USP aljlapucs**

Az FRT-USP aljlapucskok 80 %-a újrahasznosított guminyersanyagból és -hulladékból készül, ezáltal kiemelkedően környezetbarát termékek. Ennek és az előállítási technológiájának köszönhetően érték-ár arányban optimális megoldást nyújt, beépítésével a korábban már ismertetett előnyök hasznosíthatók. Az aljlapucskok vastagsága 3-12 mm között változik az adott pálya terhelésétől és pályaszerkezetétől függően. Legfeljebb 300 kN statikus tengelyterhelésig és maximum 350 km/h-ás sebességig alkalmazhatók. Ezek az elemek is bármely keresztaljhoz gyárthatók.

Az ívekben fekvő keresztaljakra speciális megoldást biztosít a cég által fejlesztett, különböző rugalmasságú aljlapucskok. A különböző rugalmasság alatt itt az értendő, hogy egy gumiterméken, azaz egy aljlapucs elemen belül, változik annak rugalmassága. Ez különösen hatékony az ívekben, ugyanis a belső és külső sínzálra jutó erők nagysága különböző. Erre az egyenlőtlen terhelésnek az elosztására lettek kifejlesztve a változó rugalmasságú gumielemekek. A rugalmasság függ a körív sugarától, a pálya sebességétől és túlemelés mértékétől; ezeket figyelembe véve az aljlapucs két vége között 5-15 %-os rugalmasságbeli eltérést lehet alkalmazni egy gumielemen belül.



3.18. ábra – FRT-USP típusú aljlapucs rajza [24]

Laboratóriumi mérés során LM betonaljhoz alkalmas, 6 mm vastagságú FRT-USP aljlapucs rezgéscsillapító hatását vizsgáljuk. A laboratórium és a mérés körülményeit a **6. fejezetben** ismertetem.

3.3. Sínkamra elemek

A zaj- és rezgéscsillapító kamraelemek egy új, „idegen” elemek a pályaszerkezet felépítményében. A vasúti pálya területén egy új beavatkozási lehetőséget nyújtanak a zaj- és rezgéscsillapítás tekintetében, ezek a sín kamrájába helyezett, ragasztással, vagy egyéb módon (szorítókengyelekkel) rögzített, erősen viszkózus tulajdonságú csillapító elemek.

A vasúti járművek körívekben történő haladásakor – különösen a városi és az elővárosi üzemek $R = 200$ m-nél kisebb sugarú íveiben a gördülőállomány műszaki állapotától függően, az ívekben „csikorgás” lép fel. Az ívekben ez a „csikorgás” elérheti a kb. 110 dB(A) maximális zajszintet is. Ezt a zajt a gerjesztett sínszálak idézik elő. A síngerinc, amely csekély súlya miatt gyorsan rezgésbe kerül, a rendszer akusztikai megítélésekor gyenge pontnak tekinthető, amely a pályaszerkezet legnagyobb zajkibocsátását okozza.

A rezgéscsillapító kamraelemeket a síngerinc (mint rezgésforrás) zajkibocsátásának csökkentésére alkalmazzák. A rezgéscsillapító sínkamra elemek egy nagy hatékonyságú rendszert jelentenek a légzaj, és a testzaj kibocsátás csökkentése szempontjából, ami a kerék – sín kölcsönhatásából keletkezik. A sínkamra elemek úgy csökkentik a zaj- és rezgéseket, hogy a síngerinc rezgési energiáját alakítják át hővé nagy belső súrlódásuk révén. Az akusztikai tudományok egyik ismert alaptétele, hogy a zavaró rezgések csökkentésének leghatékonyabb módja, ha közvetlenül azok kibocsátási forrására koncentrálunk. A sín, mint a pályaszerkezet legfelső felületi eleme esetén ezekkel a kamraelemekkel pontosan ezt tesszük.

Alkalmazási területek:

- A kamraelemek a nagyvasutak-, az elővárosi gyorsvasutak-, a földalatti gyorsvasutak-, és a közúti vasutak nyitott pályaszerkezeteibe egyaránt beépíthetők;
- Valamennyi vasúti ágazat zúzottkő-ágyazatú keresztaljas, valamint szilárd rögzítésű (beton hosszgerendás és beton alaplemezes) felépítmény szerkezeteiben alkalmazhatók;
- Egyenes-, és íves pályaszakaszokon egyaránt felhelyezhetők.

Alkalmazásuk előnyei:

- A légzaj szintjének hatékony csökkentése;
- Karbantartásmentes alkalmazás;
- Bármely sínrendszerhez gyárthatók és alkalmazhatók;
- Időjárásnak, mechanikus igénybevételeknek ellenállnak. [2]

Az elemek, mivel a sín kamrájához vannak rögzítve, így a vasúti pályafenntartási munkákat nem befolyásolják: aláverés, köszörülés, rostálások stb. (3.19. ábra). Ha mégis szükséges eltávolításuk a sínről, ezt könnyedén meg lehet tenni, hiszen fel- és leszerelésük könnyű a szorítókegyelek miatt. A ragasztott típusok esetén a leszerelés kicsit körülményesebb, odafigyeléssel és pontossággal ezek az elemek is eltávolíthatók. A rezgéscsillapító sínkamra elemeket egymással szemben, a sínek mindkét oldalán erősítik fel.



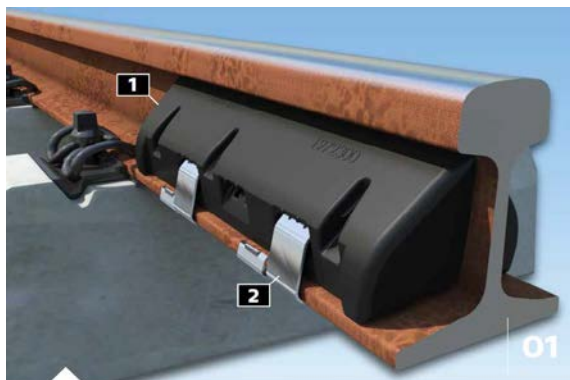
3.19. ábra – Felszerelt sínkamra elemek melletti zavartalan munkavégzés (STRAILastic) [27]

Különböző keresztmetszeti geometriájú, kialakítású, szerelésű és anyagú kamraelemek léteznek. A gyártók egy széles skálát kínálnak a sín kamrájába rögzített elemekből. Külföldön számos cég gyárt sínkamra elemeket, amiket sikeresen alkalmaznak is. Hazánkban még nem terjedt el ezeknek az elemeknek a használata. A hazai és külföldi gyártók elemeit a következőkben ismertetem. Bemutatásra kerülnek azok a kamraelemek is, amelyeket korábban laboratóriumi körülmények között vizsgáltam, és amelyek a jelenlegi laboratóriumi vizsgálataim tárgyát képezik.

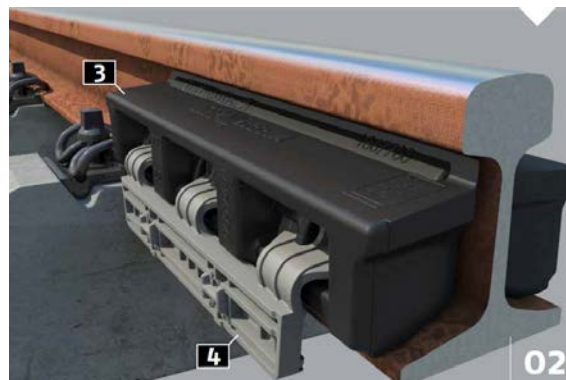
- **Külföldi gyártók – KRAIBURG STRAIL GmbH & Co. KG**

A STRAILastic [27] két különböző zaj- és rezgéscsillapító kamraelemet gyárt, mindkét elem a kerék és sín kapcsolatából keletkező gördülési zajt és rezgéseket csökkenti. Az elemek tömör gumikeverékből készülnek, amit egy speciális vulkanikus eljáráson keresztül állítanak elő. Az elemek nagy tömegük és rugalmasságuk által minimalizálják a zaj- és rezgéshatásokat. Az elemek nem tartalmaznak semmilyen környezetkárosító anyagot. Az elemek telepítése időjárás-független, vonatmentes időben gyorsan és könnyedén elvégezhető. Az elemek ideiglenes eltávolítása problémamentesen és bármikor kivitelezhető, ha ez szükséges, például hegesztési munkák miatt. A pálya-karbantartási, illetve vágány- vagy síndiagnosztikai munkákat sem zavarja, nem szükséges eltávolítani azokat (3.19. ábra). Az elemek és a hozzájuk tartozó klipszek nem igényelnek karbantartást.

A STRAILastic_A inox típusú kamraelem (3.20. ábra) belsejében acél mag található, ami gumikeverékkel van körülveve. A rendkívül tartós rögzítését rozsdamentes acél klipszek biztosítják. A STRAILastic_A synth (3.21. ábra) nem tartalmaz fémet. Ez egy természetes gumikeverékből előállított kamraelem. A felhelyezése műanyag szorítóelemmel megoldott.

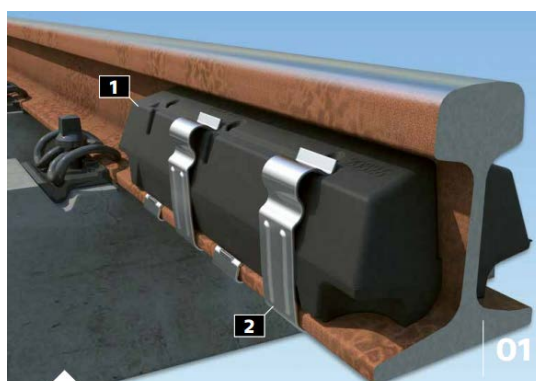


3.20. ábra – STRAILastic_A inox [27]



3.21. ábra – STRAILastic_A synth [27]

Korábbi, 2014-es laboratóriumi munkám során a STRAILastic_A inox típusú kamraelemet vizsgáltam. A mérés körülményeit és a kamraelem csillapítási eredményeit a **4. fejezetben** ismertetem. Legutóbbi laboratóriumi méréseim óta a STRAILastic_A inox típusú kamraelemet továbbfejlesztették, az új elem STRAILastic_A inox 2.0 (3.22. ábra) változatszámmal jelzett nevet kapta. A kamraelem teljes geometriája megváltozott és a hozzátartozó klipszek méretei is. Anyagában nem történtek módosítások. További lényeges változást jelent az első verzióhoz képest, hogy ennél a típusnál a kamraelem és a síngerinc közé egy bevonatot visznek fel telepítéskor. A bevonat a síngerinc és a gumielem közötti szigetelőkapcsolatot teremti meg.



3.22. ábra – STRAILastic_A inox 2.0 [27]

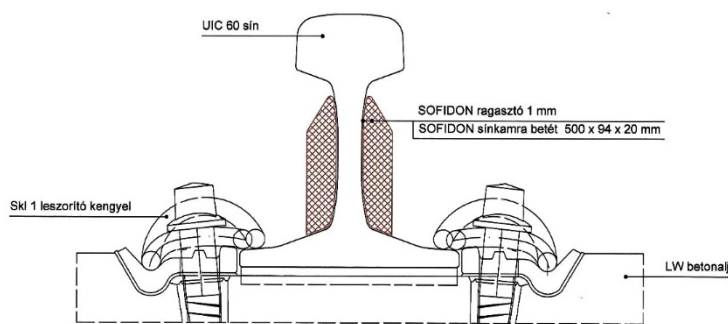
A STRAILastic_A inox 2.0 típusú kamraelemet is lehetőségem volt laboratóriumi körülmények között vizsgálni. A vizsgálatot a **7. fejezetben** található.

- **Hazai gyártók – SPED-M Kft.**

A Sofidon-F típusú elem gumi és ásványi őrleményből, térkitöltő polimerből, stabilizátorokból és öregedés-gátlókból áll. Méretét tekintve kis elemnek mondható, vastagsága 24 mm. A sínkamrájához kengyelek nélkül, ragasztással van rögzítve (**3.24. ábra**). Semmilyen körülmények között sem zavarja a pályaépítési és fenntartási munkákat. Magyarországon már 25 km szakaszon van beépítve (**3.23. ábra**). Ezek a szakaszok: Kápolnásnyék – Újdinnyés, Esztergom – Esztergom-Kertváros, Monor – Pilis, Sopron – Kismarton, valamint az M1-es (Millenniumi Földalatti Vasút) metróvonalon és az M4-es metró kelenföldi járműtelepén.



3.23. ábra – Sofidon-F pályába építve [Pásztor József]



3.24. ábra – Sofidon-F keresztmetszeti ábrája [Pásztor József]

A Sofidon-T típusú elem egyelőre kísérleti elem, jelenleg még nincs beépítve üzemben lévő pályába. Az elem robosztusabb, nehezebb, mint a Sofidon-F típusú társa. Kamrába történő rögzítése kétféleképpen, kengyelek segítségével, illetve ragasztással történhet, amik az **3.25. ábrán** láthatók. A kengyel két oldalsó és egy alsó lemezből áll. Az alsó lemez kapcsolja össze a két oldallemezt.



3.25. ábra – Sofidon-T típusú kamraelem kétféle rögzítési módszerrel felhelyezve 60E1 rendszerű sínszálra [saját fotó]

- Hazai gyártók – GRANUFLEX Kft.

A GRANUFLEX Kft-nek 4 db különböző összetételű kísérleti eleme van. Keresztmetszeti geometriájuk azonos, összetételük pedig a számozással azonos mértékben változott, a G1 jelű elem a legkönnyebb, a G4 jelű pedig a legtömörebb. Az elemek összetételét az **3.4. táblázat** foglalja össze. A kísérleti elemek felhelyezési módszere még nem eldöntött, ragasztással, illetve szorítókengyelek (**3.26. ábra**) segítségével is megoldható.

3.4. táblázat – GRANUFLEX Kft. kamraelemeinek összetétele

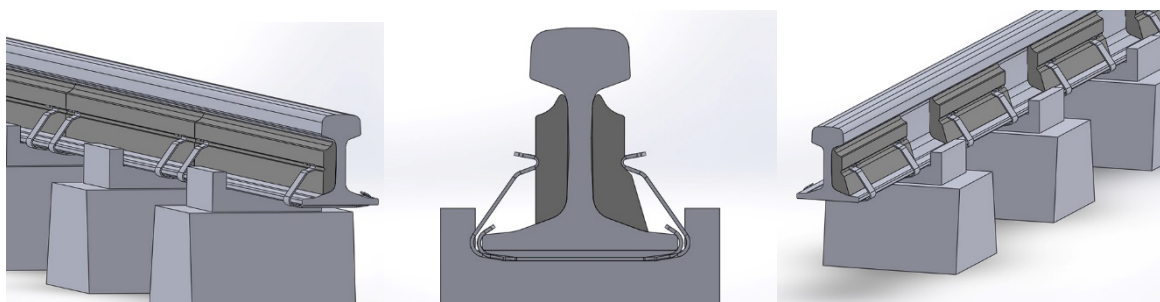
Kamraelem jele	Anyag	Bemérés [kg]
G1	őrlet (1-4mm)	4,68
	poliuretán	0,46
	fekete színező	0,01
	<i>Összesen</i>	<i>5,16</i>
G2	őrlet (1,5-2,5mm)	5,35
	poliuretán	0,53
	fekete színező	0,01
	<i>Összesen</i>	<i>5,90</i>
G3	őrlet (1,5-2,5mm)	5,12
	őrlet (-1mm)	0,90
	poliuretán	0,60
	fekete színező	0,01
<i>Összesen</i>	<i>6,63</i>	
G4	őrlet (1,5-2,5mm)	4,27
	kavics (1-4mm)	5,75
	poliuretán	0,57
	fekete színező	0,04
	<i>Összesen</i>	<i>10,64</i>



3.26. ábra – Granuflex kamraelem vizsgálati elrendezése 60 E1-es sínrendszeren [saját fotó]

- Hazai gyártók – Frankó Rubber Technology Kft.

A Frankó Rubber Technology Kft. zaj- és rezgéscsillapító kamraelemei az FRT-RCP nevet kapták, amelyek valamennyi járatos sínprofilhoz (mint például 49E1, 54E1, 60E1, stb.) gyárthatók. A kamraelemek újrahasznosított gumiabroncs granulátumokból és megfelelő arányban egykomponensű poliuretán kötőanyag keverékéből készülnek, hagyományos sajtoló technológiával. A kamraelemek sűrűsége igény szerint változtatható. Ezek a kamraelemek is függetlenek a felépítmény bármely elemétől, bármely vonalon telepíthetők. Két különböző FRT-RCP kamraelem áll rendelkezésre (**3.27. ábra**).



3.27. ábra – FRT-RCP első (jobbra) és második (balra) típusú kamraelem 60 E1 sínrendszeren és azok keresztmetszeti rajza (középen) [24]

Az első típus fejlesztésénél a fő szempont a minél nagyobb rezgéscsillapítás volt, míg a második típusnál a beépítés utáni pálya-karbantartási munkák zavartalan lebonyolíthatósága lett figyelembe véve. Így a második típus csillapító tulajdonsága mérsékeltőbb az elsőhöz képest, azonban a legtöbb karbantartást végző gép munkáját nem akadályozza. Az első típus az aljközökbe építhető be, a második típus lehetővé teszi a kamraelemek folyamatos elhelyezését. Mindkét kamraelem felhelyezése ragasztóval történik, azokat klipszekkel rögzítik. A ragasztó a nagyobb csillapítás érdekében szükséges, a klipszek pedig az időtálló rögzítésért.

A SPED-M Kft. Sofidon-F és Sofidon-T elemét, a STRAILastic_A inox 1.0 típusú elemet, és a GRANUFLEX Kft. összes elemét lehetőségem volt laboratóriumi körülmények között vizsgálni 2014-ben [25]. Az eredményeket összefoglalóan a **4. fejezetben** ismertetem. Kutatási munkám folytatásaként, jelenlegi laboratóriumi kísérleteim során a STRAILastic_A inox 2.0 elemet, a Sofidon-F és Sofidon-T elemet és az FRT-RCP kamraelemet is vizsgálom (**7. fejezet**). Kápolnásnyék és Dinnyés között élőpályába beépített Sofidon-F típusú kamraelemet üzemi állapotok között is vizsgálhattam. A mérést és annak eredményeit az **5.5. alfejezetben** mutatom be.

4. Sínkamra elemek laboratóriumi vizsgálata

2014-es Tudományos Diákköri Konferenciára készített dolgozatom [25] témája a vasúti pálya zaj- és rezgéscsillapító sínkamra elemeinek elméleti és laboratóriumi vizsgálata volt. A méréseket a Villamosmérnöki és Informatikai Kar Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék Akusztikai és Stúdiótechnikai Laboratóriumában végeztem. A teljes laboratóriumi mérésorozatot a sín kamrájába helyezett elemek zaj- és rezgéscsillapító hatékonyságának megállapításának érdekében végeztem. Mivel szorosan kapcsolódik jelenlegi, kibővített témámhoz, így ez a fejezet a korábbi, szabályozott laboratóriumi körülmények között elvégzett vizsgálatokat és az ott elért eredményeket foglalja össze.

4.1. Vizsgálat célja

A vizsgálat célja a sín kamrájába helyezett elemek zaj- és rezgéscsillapító hatásának megállapítása volt laboratóriumi körülmények között, továbbá a különböző összetételű és geometriájú gumielemelek hatékonysága közötti összefüggések felállítása. Megállapítani azt, hogy melyik felhelyezési módszerrel a leghatékonyabb a vizsgált kamraelem.

4.2. Vizsgálat felépítése

A vizsgálat alapja egy 120 cm hosszú 60E1 rendszerű sínszál. A sínszál szabványos, 60 cm távolságban a német VOSSLOH cég által gyártott, Skl-1 típusú szorítórugóval kialakított sínleerősítéssel két darab, körülbelül 80 kg-os betontesthez volt leerősítve. A betontestek valójában L4 típusú vasbetonaljak, amiknek 1/3 részét alkalmaztam. A mechanikai rendszer ebből a három pályaszerkezeti elemből állt össze (**4.1 ábra**).

A vizsgálat lényege, hogy a sínszál egy előre meghatározott pontját adott erővel gerjesztve mérhető a sínszál egy előre meghatározott másik pontjának elmozdulása. A cél ezzel a rendszer jellemzése, vagyis a mérések során szerzett információ alapján meg lehet határozni a rendszer mért helyein megjelenő és időbeli lefutású gerjesztésre adott válaszát.

A sínszálat 13×2 pontból álló modellel helyettesítettem, amelyek egyben gerjesztési pontok voltak. Impulzusszerű erőgerjesztést alkalmaztam, amit impulzuskalapáccsal állítottam elő. A rendszer rezgésválaszát piezo elven működő eszközökkel, gyorsulásérzékelőkkel mértem. Három érzékelőt alkalmaztam, amit a mérést megelőző végeelemes modellezés eredményei alapján helyeztem el a sínszál alkalmas pontjain. Az érzékelők, elhelyezésüktől függően, függőleges és vízszintes komponenseket mértek.

A sínfejet függőleges, illetve vízszintes irányból, a sínalpat csak vízszintes irányból gerjesztettem, összesen 39 ponton.



4.1 ábra – A laboratóriumban összeállított rendszer, a mérés összehasonlításának alapját képező csillapítatlan sínszál. Láthatók a sínszálon felcímkézett gerjesztési pontok és a mérések során használt eszközök: az impulzuskalapács, valamint a rezgésérzékelők. [saját fotó]

A mérési rendszertől, a betonlajkhoz leerősített csillapítatlan sínszáltól, 1 méter távolságra egy mikrofont is helyeztem, ami a sínfej magasságában vízszintes irányban mért (4.2 ábra). A mikrofonnal az impulzusgerjesztés 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.



4.2. ábra – A mérési rendszertől 1 méter távolságra elhelyezett mikrofon [saját fotó]

Az előbb ismertetett rendszer képezte a mérések alapját. A csillapítatlan sínszállra helyeztem fel a gumielemeket. A csillapítatlan sínszáll gerjesztésre adott válaszait összehasonlítva az egyes kamraelemekkel ellátott sínszállal, megkaptam a csillapítás mértékét, azaz a zaj- és rezgéscsillapító kamraelem hatékonyságát.

Laboratóriumi méréseim során a következő zaj- és rezgéscsillapító sínkamra elemeket vizsgáltam:

SPED-M Kft. által gyártott gumielemekek

- Sofidon-F típusú (felhelyezési módszer: ragasztva)
- Sofidon-T típusú (felhely. módszer: ragasztva, ill. szorítólemezekkel) – kísérleti elem

GRANUFLEX Kft. által gyártott gumielemekek

- 4 darab, összetételükben különböző elemek (felhely. módszer: szorítókengyelekkel, ill. leghatékonyabb elem ragasztva) – kísérleti elemek

KRAIBURG STRAIL GmbH & Co. KG – StraiLastic által gyártott gumielem

- StraiLastic_A inox típusú kamraelem (felhely. módszer: rögzítő klipszekkel)

4.3. Vizsgálati eredmények

A teljesség igénye nélkül ebben a részben csak a fontosabb mérési eredményeket emelem ki. Az összes mérési eredményem és a hozzátartozó számszerű értékek, grafikonok megtalálhatók a 2014-es Tudományos Diákköri Konferenciára [25] készített dolgozatomban.

A szerkezeti móduselemzés az alapvető módszer arra, hogy a rezgő szerkezetet, ez esetben a sínszáll viselkedését leírja. A Test.Lab programcsomag a gerjesztések és válaszok ismeretében határozza meg a rendszer sajátfrekvenciáit és módusalakjait. Mérési eredményül frekvencia átviteli függvényeket kaptam, annyit, ahány pontban gerjesztettem a sínszállat. 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. Ezekből a mért frekvencia átviteli függvény mátrixokból a programcsomag móduselemző modulja segítségével végeztem móduselemzést. Eredményeimben sajátfrekvenciákat, csillapítási tényezőket és módusalakokat elemeztem.

Fontos megjegyeznem továbbá, hogy a mérések laboratóriumi körülmények között történtek, az eredmények számszerű értékei nem egyeznek meg a valóságban, üzemi állapotban lévő pályán történő mérések eredményeivel!

4.1. táblázat – ~320 Hz frekvencián kialakuló (sínszál) módusalkhoz tartozó kamraelemek rezgéscsillapítási eredményeinek összehasonlítása

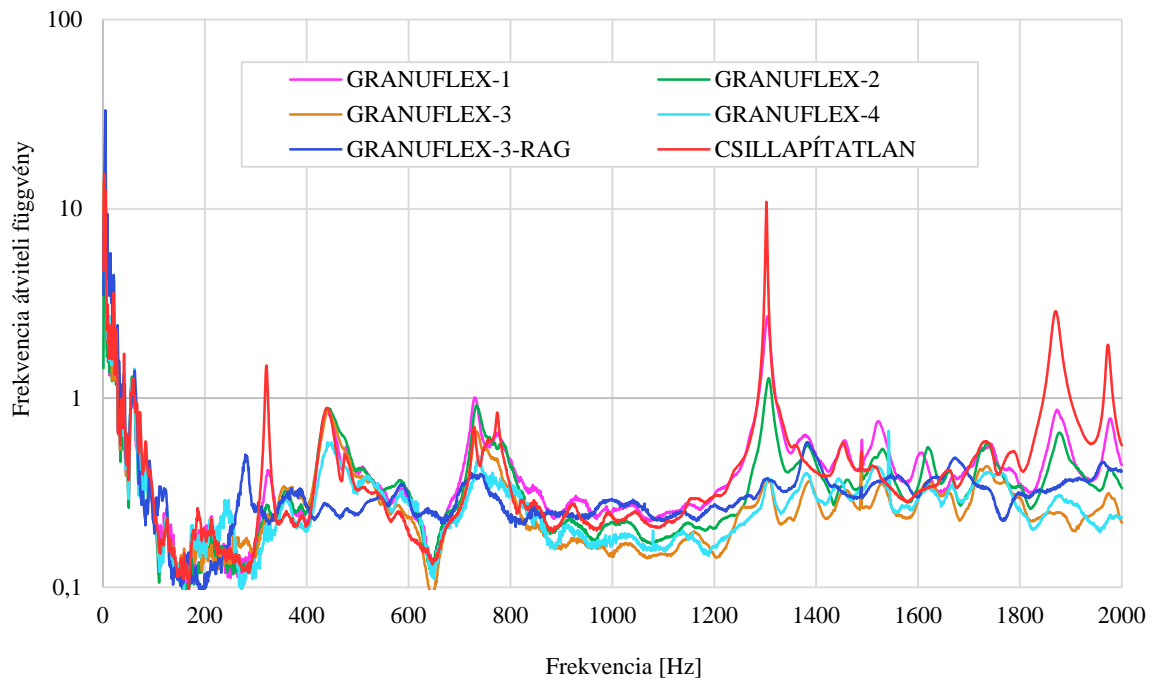
Gyártó	Kamraelem típusa	Saját-frekvencia [Hz]	Csillapítási tényező [%]	Csillapítatlan sínszál		Csillapítási tényezők különbsége
				[Hz]	[%]	
GRANUFLEX	G-1	327,557	4,27	320,634	0,87	+ 3,40
	G-2	329,443	7,03			+ 6,16
	G-3	-	-			-
	G-4	-	-			-
	G-3 (ragasztott)	282,980	3,43			+ 2,56
SPED-M	Sofidon-F	314,477	0,88	327,652	0,78	+ 0,1
	Sofidon-T2 (ragasztott)	-	-			-
	Sofidon-T1	-	-			-
STRAIL	StraiLastic_A inox	309,615	4,19	320,634	0,87	+3,32

4.2 táblázat – ~780 Hz frekvencián kialakuló (sínszál) módusalkhoz tartozó kamraelemek rezgéscsillapítási eredményeinek összehasonlítása

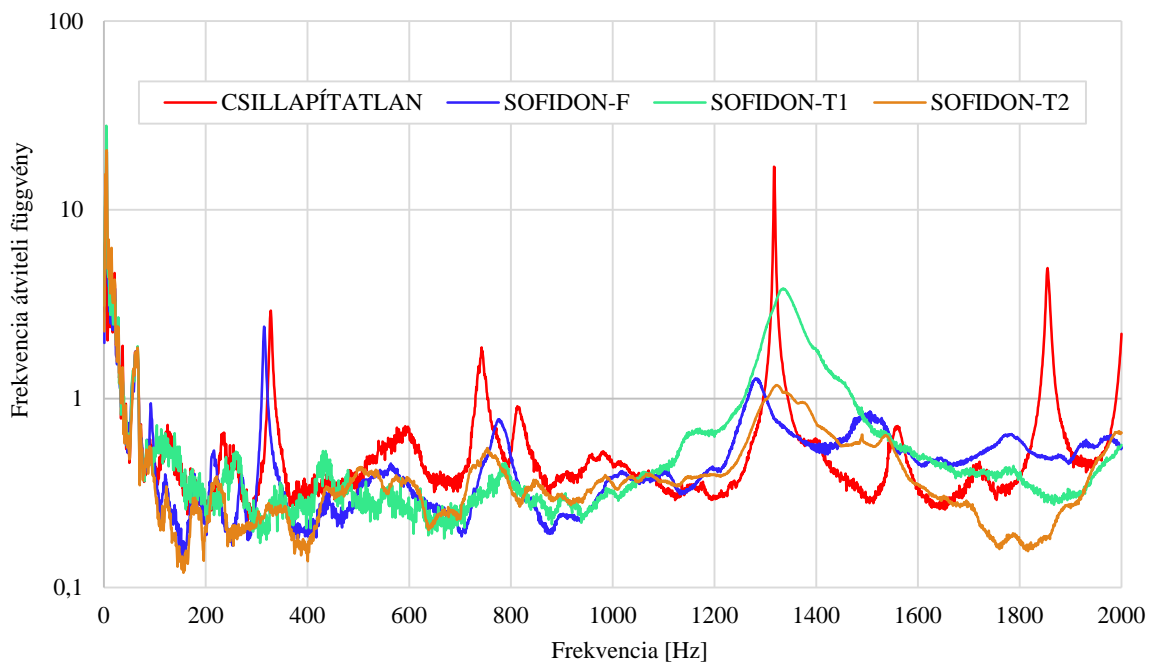
Gyártó	Kamraelem típusa	Saját-frekvencia [Hz]	Csillapítási tényező [%]	Csillapítatlan sínszál		Csillapítási tényezők különbsége
				[Hz]	[%]	
GRANUFLEX	G-1	776,721	1,27	774,174	0,58	+ 0,66
	G-2	779,603	1,58			+ 1,00
	G-3	780,414	1,53			+ 0,95
	G-4	791,763	3,29			+ 2,71
	G-3 (ragasztott)	-	-			-
SPED-M	Sofidon-F	-	-	811,450	1,02	-
	Sofidon-T2 (ragasztott)	811,428	3,46			+ 2,44
	Sofidon-T1	777,629	1,48			+ 0,46
STRAIL	StraiLastic_A inox	-	-	774,174	0,58	-

4.3 táblázat – ~1315 Hz frekvencián kialakuló (sínszál) módusalkhoz tartozó kamraelemek rezgéscsillapítási eredményeinek összehasonlítása

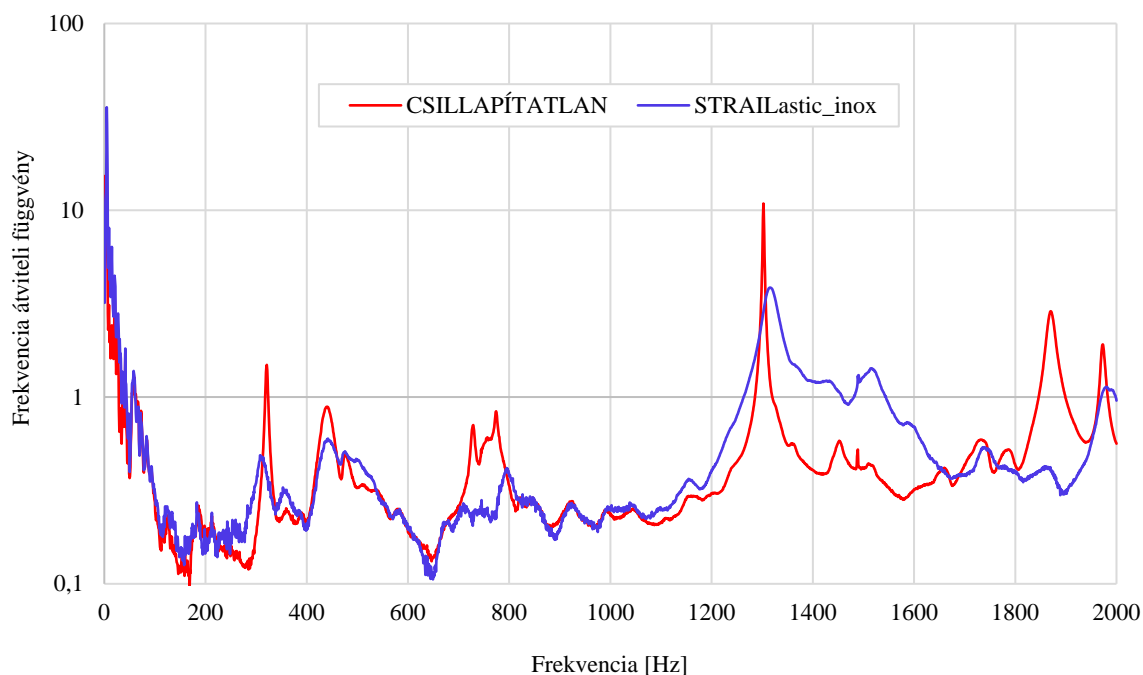
Gyártó	Kamraelem típusa	Saját-frekvencia [Hz]	Csillapítási tényező [%]	Csillapítatlan sínszál		Csillapítási tényezők különbsége
				[Hz]	[%]	
GRANUFLEX	G-1	1303,962	0,47	1302,4	0,11	+ 0,36
	G-2	1305,935	0,67			+ 0,56
	G-3	1306,059	0,71			+ 0,60
	G-4	1308,826	0,95			+ 0,84
	G-3 (ragasztott)	1304,258	2,30			+ 2,19
SPED-M	Sofidon-F	1280,727	1,97	1317,6	0,09	+ 1,88
	Sofidon-T2 (ragasztott)	1313,349	2,47			+ 2,38
	Sofidon-T1	1330,377	2,00			+ 1,91
STRAIL	StraiLastic_A inox	1314,331	1,06	1302,4	0,11	+ 0,95



4.3 ábra – GRANUFLEX Kft. kamraelemeinek mikrofon által mért eredményei



4.4 ábra – SPED-M Kft. kamraelemeinek mikrofon által mért eredménye



4.5 ábra – STRAILastic_A inox típusú kamraelem mikrofon által mért eredménye

4.4 Értékelések, következtetések

A kamraelemek hatékonyságának mértéke a csillapítási tényezőben látható, a csillapítatlan sínszál csillapítási tényezőjéhez hasonlítottam az elemek tényezőit. Csak ugyanolyan módusalakok hasonlíthatóak össze. 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.

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.

Három fontos tényező befolyásolja egy kamraelemnek a hatékonyságát; az elem geometriája, összetétele, valamint a felhelyezési módszer. Az előbb bemutatott mérési eredmények mindhárom tényező kérdésére választ adnak.

A méréseimből levonható következtetések azt mutatják, hogy egy kamraelem tervezése során nagy hangsúlyt kell fektetni a geometria kialakítására, illetve a kamraelem alkotóelemeinek kiválasztására. Megállapítható, hogy a legnagyobb térfogatú és legtömörebb anyagú elem érte el a legnagyobb csillapítást laboratóriumi körülmények között. A GRANUFLEX Kft. négy különböző összetételű kamraelemének mérési eredményeiből látszik, hogy minél tömörebbek ezek a gumielemek, annál alkalmasabbnak bizonyulnak. Természetesen a Sofidon-T típusú kamraelem is hasonlóan működött, alacsony és magasabb frekvencián is jó értékeket ért el. Szembetűnő és érdekes a Sofidon-F típusú kamraelem (aminek térfogata és tömörsége is a legkisebb volt az általam vizsgáltak közül) eredménye, miszerint alacsony frekvencián egyáltalán nem hatékony, viszont magasabb frekvencián hasonló eredményt ért el, mint a vizsgált, robosztusabb elemek.

Méréseimből kiderül, hogy a ragasztási módszer magasabb csillapítási értékeket produkált, mind zajcsökkentés, mind rezgéscsillapítás tekintetében, mint a szorítókkal felhelyezhető elemek. Ugyanazzal a kamraelemmel magasabb csillapítás érhető el, ha a sín kamrájába ragasztva helyezzük fel azt. Erre adhat magyarázatot a Sofidon-F típusú elem „anomáliája”, miszerint ragasztással felhelyezett elem már fele akkora geometriával és tömörséggel is jó eredményt nyújthat.

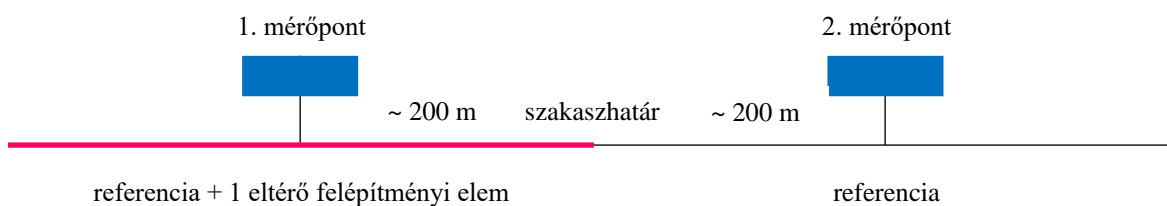
Összegezve tehát a mérésekből megállapítható, hogy a zaj- és rezgéscsillapító kamraelemek – bizonyos körülmények között – alkalmas eszközt képeznek a vasúti zaj, illetve a vasúti pálya rezgésének csökkentésére. Az előbb ismertetett tényezőket szükséges figyelembe venni a kamraelemek jövőbeni tervezéséhez, hogy üzemi állapotban lévő pályába beépítve is hatékony elemei legyenek a pálya szerkezetének.

5. Vasúti pályaszerkezeti elemek vizsgálata üzemi állapotban, helyszíni mérések

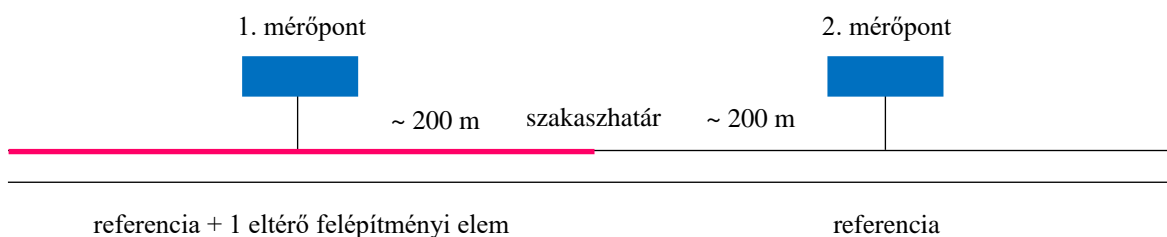
A MÁV Magyar Államvasutak Zártkörűen Működő Részvénytársaság és a Budapesti Műszaki Egyetem Út és Vasútépítési Tanszék között 2015. szeptember 11.-i keltezéssel Kutatás - Fejlesztési szerződés jött létre „A vasúti közlekedési zajvédelem pályavasúti vonatkozásainak laboratóriumi és helyszíni vizsgálatai” című kutatási projekt tárgyában. [1] A projekt tartalmazza a pályamérések helyszínének kiválasztását, kijelölését. A kutatási projekt egyik fő része a pályamérések zaj- és rezgéscsökkentős elemek beépítési helyszínein, valamint referencia helyszíneken történő elvégzése, továbbá a kísérleti pályaszakaszokon végzett vizsgálatok eredményeinek értékelése. A pályaméréseket a BME Villamosmérnöki Kar Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék Akusztikai és Stúdiótechnikai Laboratórium munkatársai végezték el. Dr. Augusztinovicz Fülöp vezetése mellett Dr. Fiala Péter, Firtha Gergely, Nagy Attila Balázs és Rucz Péter dolgozott együtt a helyszínen és azok kiértékelésében [28]. Ezúton szeretném megköszönni a Tanszék munkatársainak és Dr. Augusztinovicz Fülöpnek, hogy elérhetővé tették számomra a mérési eredményeket és azokat jelen dolgozatomban felhasználhattam.

A helyszíni mérések célja, hogy összehasonlításra kerüljenek az egyes felépítményszerkezeti megoldások, rétegrendek, vagy a zajcsillapítási kísérletek hatékonyságai. Olyan mérési helyszíneket kellett tehát keresni, ahol azonos körülmények, azonos forgalmi terhelés tapasztalható, csak egyetlen paraméterben tér el a pálya szerkezete, rétegrendje, minősége vagy állapota.

A célkitűzés érdekében tehát olyan helyszínek lettek kiválasztva a mérések végrehajtására, ahol akusztikai szempontból megfelelő és közel azonos körülmények között, ugyanazon szerelvények közel azonos üzemállapotban keltett zaja és rezgése vizsgálható a referencia pályaszakaszon, ill. az annak közelében levő módosított pályaszerkezeten. A helyszíneken a két mérőpontot a felépítményváltás előtt, illetve után 200 m távolságra állították fel, annak érdekében, hogy a zajkeltés egyértelműen az egyik, vagy a másik szakaszon haladó szerelvényről származzon, és az mérhető is legyen. A helyszíni mérések elvi elrendezése látható az **5.1.a és 5.1.b ábrákon**.

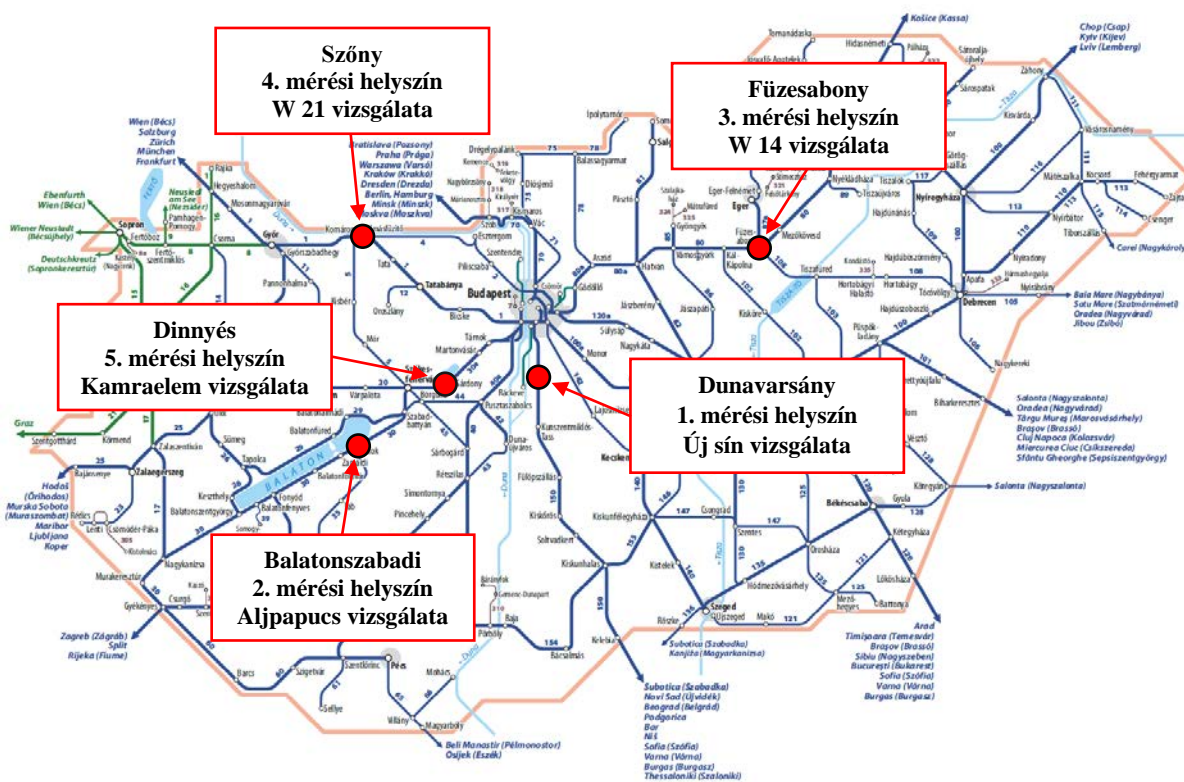


5.1.a ábra – Helyszíni mérések elvi elrendezése egyvágányú pályán



5.1.b ábra – Helyszíni mérések elvi elrendezése kétvágányú pályán

A vasúti járművek és szerelvények zajvizsgálatára vonatkozó szabvány [MSZ EN ISO 3095 Vasúti alkalmazások. Akusztika. Sínpályához kötött járművek zajkibocsátásának mérése (ISO 3095:2005)] szerint a méréseket sík (a sínkorona magasságához képest legfeljebb 0 és -1 m közötti magasságú) terepen fekvő pályán kell végezni. A mérőmikrofonok közelében nem lehetnek hangvisszaverő objektumok és felületek. A pálya és a mérőmikrofon közötti területnek szabadnak és lehetőség szerint mentesnek kell lennie nagy hangelnyelési fokú anyagoktól (nem lehet közben másik vágány, magas növényzet vagy hó), de nem lehet teljesen visszaverő felület sem (pl. vízfelület vagy jég). A megengedett maximális sebesség 5 m/s, az alapzajnak a vonat elhaladása közben mért értéknél minimum 10 dB-lel alacsonyabbnak kell lennie. Szempont volt továbbá, hogy olyan vasútvonal legyen kiválasztva, ahol naponta kellően nagy vonatforgalom bonyolódik le, így biztosítva a nagyobb számú mérés lehetőségét. További lényeges követelmény volt, hogy a mérési helyszín könnyen megközelíthető legyen (pl. párhuzamos út), valamint a balesetveszély minimális legyen (ezt főként a megfelelő rálátással lehet biztosítani). Ezeket a körülményeket elsősorban a sík terepen vezetett szakaszok elégítik ki, a töltések, és főként a bevágások kerülendőek voltak [1]. Ezeket az ideális körülményeket maradéktalanul biztosító mérőpálya Magyarországon valószínűleg nincs, a vizsgálatokat ezért csak kisebb-nagyobb kompromisszumok árán kiválasztott helyszíneken tudták elvégezni. A kiválasztott helyszíneket az **5.2. ábra** mutatja be. Az alábbiakban ismertetem az igénybe vett helyszínek jellemzőit, a mérési rendszert és elvét, a következő alfejezetekben pedig részletesen mutatom be a helyszíneket és az ott mért eredményeket.

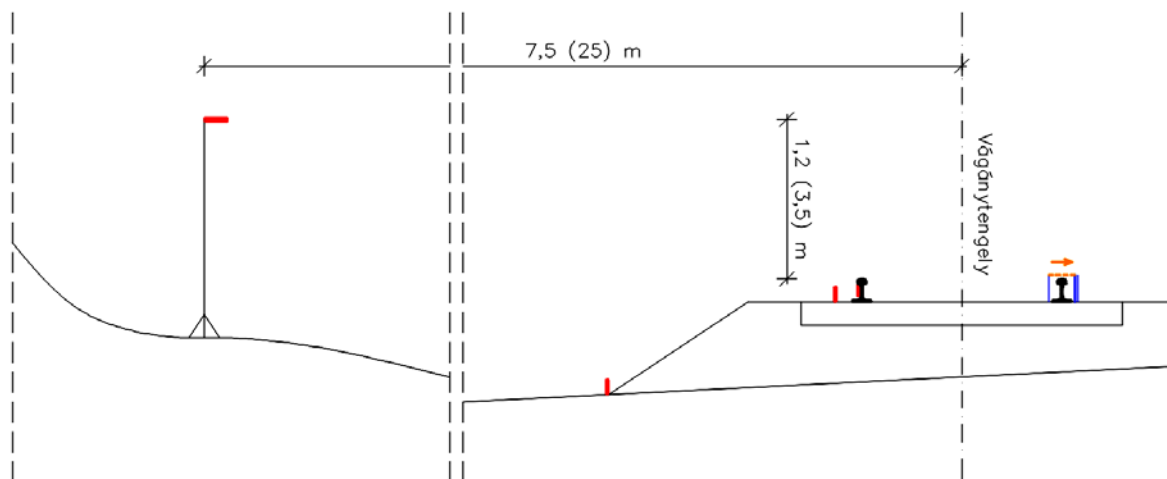


5.2. ábra – Mérési helyszínek (térkép: [27])

5.1. táblázat – Igénybe vett helyszínek és azok jellemzői

<ul style="list-style-type: none"> Dunavarsány – Síncsere hatásának vizsgálata – 1. mérési helyszín
<ul style="list-style-type: none"> - 150-es vonal, 2016. július 7-8. - 218 szelvény: referencia, régi sín - 222 szelvény: új sín beépítve
<ul style="list-style-type: none"> Balatonszabadi – Aljapucok hatásának vizsgálata – 2. mérési helyszín
<ul style="list-style-type: none"> - 30-as vonal, 2016. július 19-20. - 1096 szelvény: referencia, aljapucok nélkül - 1101 szelvény: aljapucok beépítve
<ul style="list-style-type: none"> Füzesabony – W 14-es rendszerű sínleerősítés hatásának vizsgálata – 3. mérési helyszín
<ul style="list-style-type: none"> - 80-as vonal, 2016. augusztus 4. - 1264 szelvény: W 14-es rendszerű sínleerősítés - 1268 szelvény: referencia, GEO rendszerű sínleerősítés
<ul style="list-style-type: none"> Szőny – W 21-es rendszerű sínleerősítés hatásának vizsgálata – 4. mérési helyszín
<ul style="list-style-type: none"> - 1-es vonal, 2016. szeptember 15-16. - 999 szelvény: referencia, W 14-es rendszerű sínleerősítés - 1003 szelvény: W 21-es rendszerű sínleerősítés
<ul style="list-style-type: none"> Dinnyés – Kamraelem hatásának vizsgálata – 5. mérési helyszín
<ul style="list-style-type: none"> - 30a vonal, 2015. március 19. - 566 szelvény: kamraelem beépítve - 569 szelvény: referencia, kamraelem nélkül

A két mérőponton telepített, azonos felépítésű mérőrendszer vázlatát az **5.3. ábra** szemlélteti.



5.3. ábra – Mérőrendszer vázlatrajza. A mikrofon, a három rezgésérzékelő (sínfej alatt, keresztaljon, ágyazat mellett) és fénykapu elhelyezése

A sínfej alatt, az alátétlemezen (ahol lehetett), a keresztaljon és a zúzottkő ágyazat melletti padkán a talajba levert talajszondán fokozatosan növekvő érzékenységű gyorsulásérzékelőket helyeztek el, melyek rögzítése csavarral vagy erős mágnes segítségével történt. PCB típusú gyorsulásérzékelőket alkalmaztak 2 és 1000 mV/g érzékenységgel, elhelyezésüket az **5.4. ábra** szemlélteti. A PCB típusú 28 mV/g érzékenységű mérőmikrofonokat az [MSZ EN ISO 3095] szabvány szerint a vágánytengelytől 7,5 m távolságban és a sínkorona felett 1,2 m magasságban, ill. 25 m távolságban és 3,5 m magasságban állították fel, továbbá a szélzajok mérséklése érdekében zajcsökkentő szivacsfeltéttel látták el.



5.4. ábra – Sínfej alatt és keresztaljon elhelyezett rezgésérzékelők (Szabadifürdő) [28]

A rezgésyorsulással, illetve hangnyomással arányos feszültséget PCB 482 A20, ill. PIM típusú előerősítővel kondicionálták és National Instruments gyártmányú, NI 9234 típusú analóg-digitális konverterek segítségével digitalizálták. A mérőrendszerek energiaellátását 12 V-os akkumulátorról táplált, szinuszos 230 V-os feszültséget előállító inverterek szolgáltatták. A digitalizált jelet a helyszínen egy laptop segítségével rögzítették [28]. Az előbb felsorolt eszközökből felállított mérőállomás látható az **5.5. ábrán**.

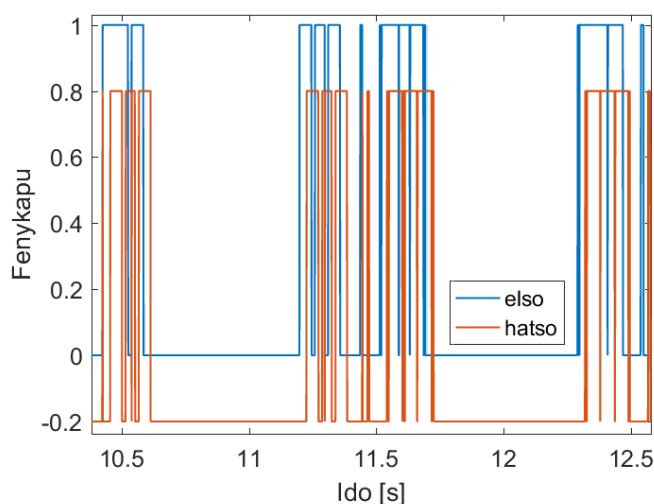


5.5. ábra – Mérőállomás (Szabadifürdő) [saját fotó]

A mérőrendszer egyik fontos, egyben meglehetősen kritikus eleme volt a szerelvények helyzetét és elhaladási sebességét mérő és rögzítő berendezés, amely egymástól kb. 1,2 m távolságban elhelyezett két fénykapuból és a jelek egyetlen mérőcsatornán való rögzítését lehetővé tevő analóg áramkörből állt. A fénykapukat és a fényvisszaverő prizmákat kezdetben a pálya mellett helyezték el, ez azonban megbízhatatlannak bizonyult, ezért a második mérősorozattól kezdve közvetlenül a sínszálon rögzítették [28]. Elhelyezésüket az **5.6. ábra**, az általuk szolgáltatott, már egyetlen csatornára rögzített kompozit mérőjelet az **5.7. ábra** mutatja. A **2.2. alfejezetben** ismertettem a gördülési zaj fogalmát, ahol ismertettem, hogy a zajszint emelkedése a menetsebesség függvényében nő, így a zajszintet jelentősen befolyásolja az elhaladó járművek sebessége. Emiatt volt szükséges a sebességek mérése és ismerete. Ha a két mérőpontnál nem volt azonos egy vonat sebessége, úgy azt a mérést a kiértékelés során figyelmen kívül kellett hagyni.



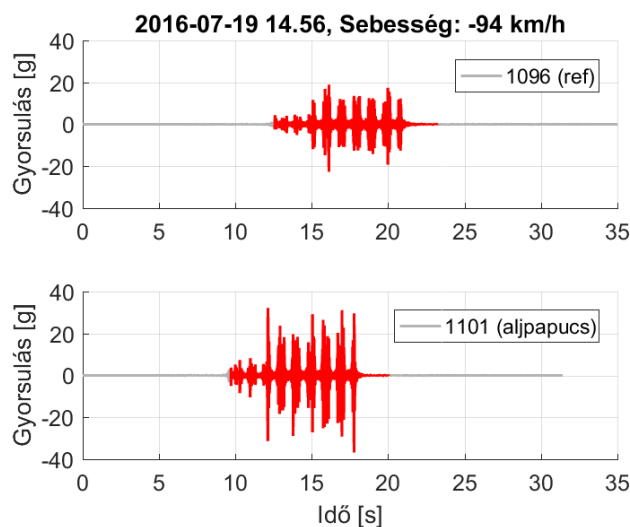
5.6. ábra – Fénykapuk elhelyezése (Szabadifürdő) [saját fotó]



5.7. ábra – Sebesség mérése, fénykapuk által szolgáltatott kompozit mérőjelek [28]

A digitalizált jelet a helyszínen csak rögzítették; a jelek feldolgozása és értékelése utólag, a BME Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék munkatársai által kidolgozott, az adott feladathoz illesztett mérőszoftver segítségével, laboratóriumi körülmények között történt. Az átlagolás a mért vonattípusoktól és azok sebességétől függetlenül minden, az adott helyszínen rögzített és kiértékelhető regisztrátum feldolgozásával és az eredmények átlagolásával készült. A jelfeldolgozás több lépcsőben történt.

Elsőként azok a felvételek lettek kiválogatva, amelyek környezeti alapzaj (pl. a másik vágányon közlekedő szerelvény), a sínkoronán fellépő elektromos zavar, vagy egyéb ok miatt nem voltak alkalmasak feldolgozásra. Ezután a keresztaljon mért időjel effektív értékének csúszó időablakokban végzett meghatározásával, automatikus triggereléssel, ill. manuális beavatkozással választották ki a szerelvény elhaladásának idejére eső jelszakaszt [28]. Egy ilyen tipikus idősort mutat az 5.8. ábra.



5.8. ábra – Egy tipikus szerelvény elhaladása során, a keresztaljon mért rezgés gyorsulás jel effektív értékének időbeli változása. A feldolgozás a piros színnel megjelölt időszakokra történt. A negatív sebességérték Budapest felé haladó szerelvényt jelöl. (*Szabadifürdő*) [28]

Ezekre az időkre a mért jeleket gyors Fourier-transzformációnak vetették alá és a szerelvény elhaladásának idejére eső integrálást alkalmazva csatornánként és elhaladásonként egy-egy tercsávós frekvenciaspektrumot képeztek. A kétféle pályaszerkezeten az érzékelők közelében elhaladó szerelvények elhaladásának idejére meghatározott zaj- és rezgésspektrumokat úgy hasonlítjuk össze, hogy a beépített rezgéscsillapítónál mért jellemzőket elosztjuk a referencia pályaszakaszon mért azonos típusú jellemzővel, és az eredményt decibelben kifejezve, tercsávós spektrum vagy egyszámadatos zajszint (dBA érték) formájában adjuk meg.

A hangnyomásszint spektrumokból frekvenciasúlyozással szabványos A-hangnyomásszinteket számítottak, amelyhez hozzárendelték a fénykapuk jeléből számított sebességet és a szerelvény elhaladási idejét is; a kapott egyszámadatos jellemzőket a következő alfejezetek táblázataiban közölöm. A mérőhelyenként telepített két mérőpont egy szerelvény-elhaladásra vonatkozó gyorsulás-, ill. hangnyomásszint spektrumaiból kivonással különbségi frekvenciaspektrumokat képeztek, amelyeket mérőhelyenként átlagolva megkapható a vizsgált pályaszerkezetre jellemző zaj-, ill. rezgéscsillapítást.

$$\Delta L = L (\text{eltérő pályaszerkezet}) - L (\text{referencia})$$

Amennyiben ez az érték negatív, akkor a szerkezet csökkenti, amennyiben pozitív, akkor növeli a szinteket a referencia értékekhez viszonyítva. Az átlagértékek mellett minden különbségi spektrumból tapasztalati szórás értékeket is számítottak, így a mérés megbízhatóságáról is információt nyertek. [28]

5.1. Dunavarsány, új sín beépítésének hatása – 1. mérési helyszín

A Budapest–Kunszentmiklós-Tass–Kelebia vasútvonal a MÁV 150-es számú vonala, a nemzetközi törzshálózat: a X. számú páneurópai vasúti korridor tagja. Folytatódik (Belgrád–Athén) irányába. A vonal jellemzően egyvágányú villamosított. 2006. december 10-től a vonal is része az ország keleti felében bevezetett integrált ütemes menetrendnek. A vonalon elővárosi forgalomban napi 20 pár személyvonat közlekedik egyórás ütemes menetrend alapján Kőbánya-Kispest és Kunszentmiklós-Tass között. A távolsági forgalmat 6 személyvonat és a Belgrád felé tartó "Avala-EuroCity" vonat bonyolítja le. 2014-től a személyvonatok S25-ös viszonylatjelöléssel közlekednek. A vonal teherforgalma jelentős, erős a balkáni nemzetközi és konténeres teherforgalom. [29]

Dunavarsány közelében az egyvágányú pálya sík terepen fekszik, környezetében füves, bokros terület, egy földút, illetve távolabb szántóföld található. A referencia mérés a 218-as szelvénynél történt, ott, ahol nem végeztek síncserét. A második mérőpont a 222-es szelvénynél újonnan beépített sínek mellett lett felállítva (**5.9. ábra**). Mindkét mérőpont a vágány jobb oldalán létesült. A viszonylag kedvező körülmények ellenére a két mérőpont akusztikai környezete nem volt teljesen azonos: az új sínek mellett viszonylag kis közelségben bokrok, a mérőmikrofon felőli oldalon pedig meglehetősen magas növényzet található. A mérések 2016. július 7-én és 8-án, szélcsendes, igen meleg napon történtek. Ezen a helyszínen a síncsere hatásának vizsgálata volt a cél, az új sín milyen mértékben befolyásolja az itt közlekedő szerelvények által keltett zajt és rezgést.



5.9. ábra – Referencia mérőpont a 218-as szelvénynél (balra) és az újonnan beépített sínek melletti mérőpont a 222-es szelvénynél (jobbra) [28]

A kétnapos mérésorozat során összesen 21 vonat elhaladásának hatását tudták megmérni. A mérések között személyvonatok, tehervonatok, gépmenetek és egy AVALA EC található. A helyszínen rögzített jegyzőkönyv feltüntetését és a számítás menetét mellőzve, összefoglalva, vonatonemekre bontva mutatom be az eredményeket. A helyszínen a mikrofonok által rögzített zaj eredményeket az **5.2. táblázat** foglalja össze. A negatív eredmények csökkenést jelentenek.

5.2. táblázat – Síncsere (új sín) hatásának eredménye a zajszintre vonatnemenként

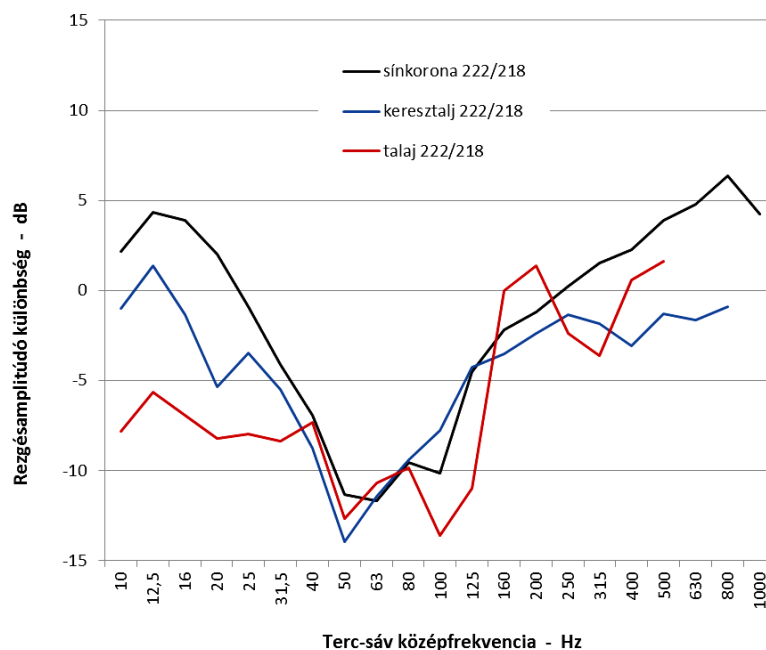
		Eltérés [dBA]
Személyvonatok	átlag	-1,64
	szórás	1,46
Tehervonatok, gépmenetek	átlag	-0,23
	szórás	0,60
Összes vonat	átlag	-1,17
	szórás	1,52

Ezen a vonalon a személyvonatok S25-ös viszonylatjelöléssel közlekednek. Az S25-ös viszonylaton három különböző összeállításban közlekednek a vonatok. Egyrésztől BVp mot 415 (kék Flirt) sorozatú motorvonatok, illetve két motorvonat („dupla Flirt”) összekapcsolva közlekedik. Másrésztől pedig a 431-es mozdony (V43) mögött három Bhv 20-07 típusú kocsiszekrény összeállításban közlekednek a személyvonatok. A személyvonatok vonatösszeállítás szerinti eredményeit az **5.3. táblázat** ismerteti.

5.3. táblázat – Síncsere (új sín) hatásának eredménye a zajszintre a különböző összeállítású személyvonatok elhaladása során

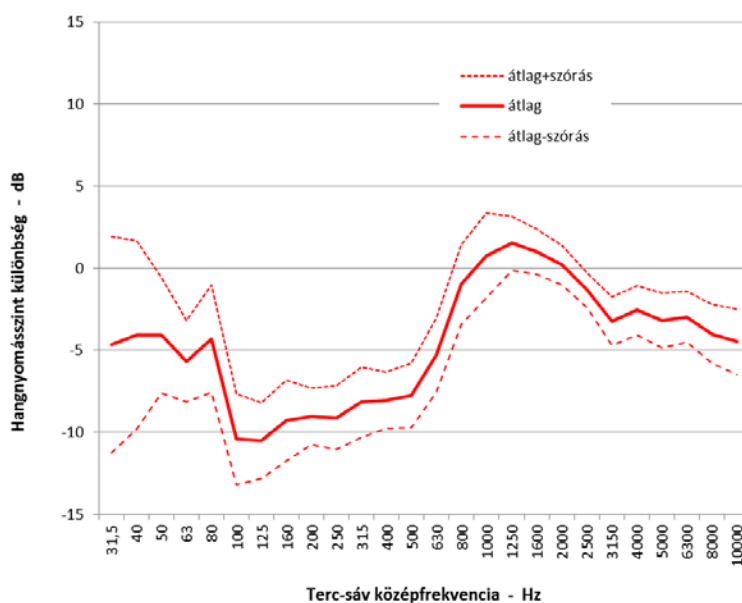
		Eltérés [dBA]
Flirt (kék)	átlag	-1,24
	szórás	1,69
dupla Flirt (kék)	átlag	-2,40
	szórás	1,31
431 mozdony + 3 kocsi	átlag	-0,63
	szórás	2,01

A két mérőpontban mért átlagos rezgésamplitúdókat frekvenciaspektrumban ábrázolva figyelhető meg, hogy melyik frekvenciahelyeken történik csillapítás, esetleg erősítés a referenciaponthoz képest. Ezt látható az **5.10. ábrán**, ahol a három elhelyezett rezgésérzékelőnek mérési eredményei vannak ábrázolva.



5.10. ábra – Síncsere hatása az átlagos rezgésamplitúdókra [28]

A síncserélt pályaszakaszon minden ponton, és 500 Hz alatt szignifikánsan kisebb rezgésamplitúdókat mértek, mint a referencia ponton és 500 Hz fölött is csak a sínrezgés haladta meg jelentősen a referencia értéket. Ennek megfelelően a pálya mellett mért zajspektrumban (5.11. ábra) 100 és 500 Hz között jelentős, 10 dB-t is elérő csökkenés figyelhető meg. Mivel azonban a 630 és 2500 Hz közötti tartományban a csökkenés csak minimális, így az eredő zajszint átlagosan csak 1,2 dBA-val csökkent. Ezt az eredményt ismertettem az 5.2. táblázatban.



5.11. ábra – Síncsere hatása az átlagos hangnyomásszintekre [28]

5.2. Siófok-Szabadifürdő, aljapucss beépítésének hatása – 2. mérési

helyszín

A Székesfehérvár–Gyékényes-vasútvonal a MÁV 30-as számú villamosított vasútvonala, a 30a vasúti fővonal folytatása. Idegenforgalmi szempontból igen jelentős, mert összeköti a Balaton déli partját Budapesttel, és az ország szinte minden területével. Jellemzően a Budapest-Déli pályaudvarról indulnak a Nagykanizsára, Keszthelyre, Fonyódra tartó gyorsvonatok és a Balaton déli partján közlekedő személyvonatok és InterCity indul Zágráb (Agram IC) felé. Nyári idényben fürdővonatok közlekednek a Balaton partjára Miskolc, Nyíregyháza, Győr, Szombathely és Pécs irányából. A nyári menetrendben egyesített InterCity+Gyorsvonatok közlekednek kétóránkénti gyakorisággal. A 2013/2014-es menetrendváltással megjelentek a vonalon a gyorsított személyvonatok, melyek a Budapesten belüli vasúti közlekedést kívánják részben biztosítani S-Bahn jelleggel. A 2014/2015-ös menetrendváltással pedig Kelenföld - Ferencváros - Kőbánya-Kispest viszonylatban már félóránként járnak személyvonatok S-Bahn jelleggel S36-os (Kőbánya-Kispest - Érd alsó - Tárnok) és G43-as (Kőbánya-Kispest - Érd felső - Székesfehérvár) viszonylatjelzéssel. Többnyire MÁV V43-as, MÁV V63-as mozdonyok vontatják a személyszállító vonatokat. 2006 óta a nyári hétvégéken Flirt motorvonatok is közlekednek a vonalon, sőt nyári forgalomban ritkán előfordul még az 1047 sorozatú mozdony és BVmot villamos motorvonat is. A vasútvonal teherforgalma közepes. [29]

A vasútvonal Szabadifürdő és Siófok szakaszon a Balaton partjához közel húzódik, az egész környék üdülőhely. Emiatt volt szükséges a nemrég átépített szakaszon M 022 típusú rugalmas aljapucssot beépíteni és az egyvágányú pálya teljes Balaton felőli oldalán zajárnyékoló falat felhúzni. A pálya másik oldalán eltérő geometriájú és növényzetű rézsű található. A létesített mérőpontok környezete látható az **5.12. ábrán**. További eltérést okozott a hangterjedésben az aljapucssal ellátott felépítmény melletti mérőponton nagyjából a Füredi utcával szemben levő gyalogos átjáró, ami kedvező lehetőséget teremtett ugyan a mérőrendszer felállítására, a hangteret azonban a másik mérőponthoz képest eltérő módon befolyásolta. Az érzékelőket ezért a lehető legtávolabb helyezték el az átjárótól, és a geometriai eltéréseket utólag igyekeztek valamilyen módon és mértékben figyelembe venni. (numerikus számítást végeztek el) [28]. A referencia mérés az 1096-os szelvénynél, az aljapucssal ellátott szakasz mérése a 1101-es szelvényben történt, 2016. július 19-én és 20-án. A meteorológiai körülmények kedvezőek voltak: szélcsendes nap, itt is nagy meleg.



5.12. ábra – Referencia mérőpont az 1096-as szelvénynél (balra) és az aljpuccsal ellátott vágány melletti mérőpont az 1101-es szelvénynél (jobbra) [28]

A kétnapos méréssorozat során itt 19 vonat elhaladásának hatását tudták mérni. A mérések többségét az Expressz vonatok teszik ki, összesen 10 szerelvény. Továbbá a mérések között Sebes vonatok, 1 személyvonat, 1 tehervonat és 1 InterCity vonat is szerepel. Ebben az alfejezetben is mellőzöm a részletes adatokat és számításokat, a zajmérés eredményeit az **5.4. táblázat** foglalja össze. A pozitív eredmények zajnövelést jelentenek.

5.4. táblázat – Aljpuccs beépítésének eredménye a zajszintre vonatnemenként

		Eltérés [dBA]
Expressz (Balaton, Aranypart, Ezüstpart)	átlag	1,41
	szórás	1,53
Déli Parti Sebes	átlag	0,90
	szórás	2,19
1 Személy		4,3
1 Tehervonat		2,5
1 Agram InterCity		1,7
Összes vonat	átlag	1,47
	szórás	1,77

Az aljpuccs beépítésének hatása – az általános várakozással szemben – a rezgés- és zajkeltés szempontjából kevésbé kedvező. Amint az **5.13. ábra** szemlélteti, mind a sín, mind pedig a keresztalj rezgése növekedik, a keresztalj rezgés növekedés pl. 200 és 250 Hz környékén eléri a 10 dB-t is. A talajrezgés ugyanakkor a 250 Hz alatti tartományban csökken, 315 és 400 Hz-en viszont kismértékű erősítés lép fel.



5.13. ábra – Aljpacucs beépítésének hatása az átlagos rezgésamplitúdókra [28]

Mindezek szükségszerű következményeként az aljpacucs gyakorlatilag minden frekvenciasávban inkább növeli, mint csökkenti a zajt, és az átlagos zajszintnövekedés csak azért nem lesz nagyobb 1,5 dBA-nál (5.4. táblázat), mert az eltérés az emberi hallás (és az azt szimuláló szabványos A-szűrő) legérzékenyebb frekvenciatartományában, 1000 és 3000 Hz között viszonylag csekély (5.14. ábra). A mért adatok arra utalnak, hogy az aljpacucs rezgés szempontjából valamilyen mértékben csatolásmentesíti, „függetleníti” a sínt és a keresztaljakat, amelyek így könnyebben jönnek rezgésbe és növekedik az általuk lesugárzott hangenergia mennyisége [28]. A rezgéscsillapító hatás viszont jól kimutatható a talajban.



5.14. ábra – Aljpacucs beépítésének hatása az átlagos hangnyomásszintekre [28]

5.3. Füzesabony, W 14-es rendszerű sínleerősítés hatása – 3. mérési helyszín

A Hatvan–Miskolc–Szerencs–Sátoraljaújhely/Nyíregyháza-vasútvonal a MÁV 80-as számú, részben villamosított és részben kétvágányú fővonala. A nemzetközi törzshálózat tagja. A vasútvonal Hatvantól Mezőzomborig kétvágányú, villamosított, az itt engedélyezett legnagyobb sebesség 120 km/óra. A vonal villamosított szakaszán jellemzően a V43-as villanymozdony-sorozat a meghatározó vontatási eszköz a személyszállításban. Iskolaidőszakban pénteken és hétfőeken InterCity-forgalomban megjelennek a Siemens-gyártmányú Desiro dízel motorvonatok is. Teherszállításban a villamosított részen a V43-asok mellett a V63-as „Gigant” becenevű villanymozdonyok is számottevőek. [29]

A mérőszakasz Füzesabony területén a Patak utcai útátjáró után kezdődik. A bal vágányban ezen a szakaszon van sínleerősítés-váltás; GEO rendszerű vált W 14-es rendszerű leerősítést. A pálya megközelítése és a mérőberendezések telepítése a bal vágány felőli oldalon, az ottani terepviszonyok és növényzet miatt nem volt megoldható, ezért a méréseket a jobb vágány melletti padkára helyezett mikrofonnal és földútra telepített mérőeszközökkel végezték (5.15. ábra). A referencia mérőpont a GEO leerősítésű vágány mellett volt az 1264-es szelvénynél, a második mérőpont a W 14 sínleerősítés-rendszerű vágány mellett, a 1268-as szelvénynél. További problémát jelentett, hogy a szerelvények egy része – elsősorban a tehervonatok – a füzesabonyi bejáratú jelzőnél lelassítottak, így hosszú szerelvények esetén az állomáshoz közelebbi mérőponton már kisebb sebességgel haladtak [28]. A mérésre 2016. augusztus 4-én került sor, szélcsendes, meleg nyári időben.



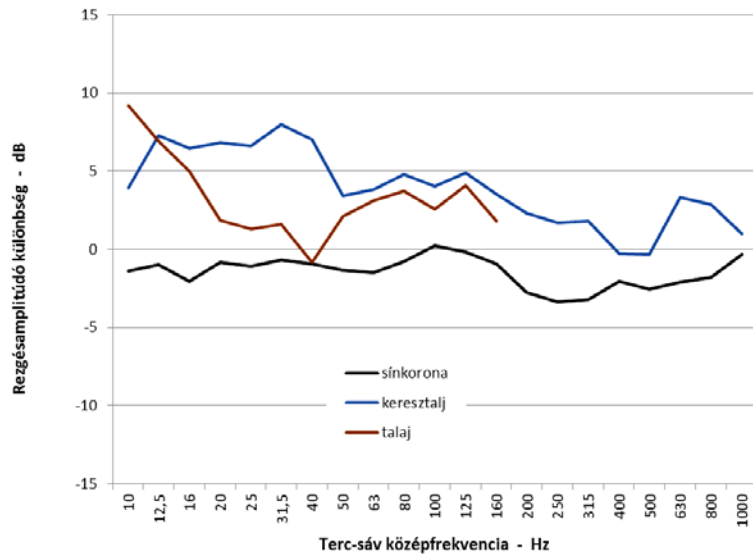
5.15. ábra – Mérőpont és környezete a W 14 sínleerősítés-rendszerű vágány mellett [28]

Füzesabonynál 17 vonat elhaladását sikerült mérni. A vonatok között személyvonatok, InterCity és Sebes vonatok, valamint több tehervonat és gépmenet is volt. A mérések közül az előbb említett sebességkülönbségek miatt, többet is figyelmen kívül kellett hagyni. Az **5.5. táblázatban** található a két mérőpont közötti zajszintkülönbségek. A táblázatból, majd az azt követő grafikonokból is látható, hogy jelentős eltérést nem okoznak zaj- és rezgés terén egymáshoz képest ezek a típusú sínleerősítések.

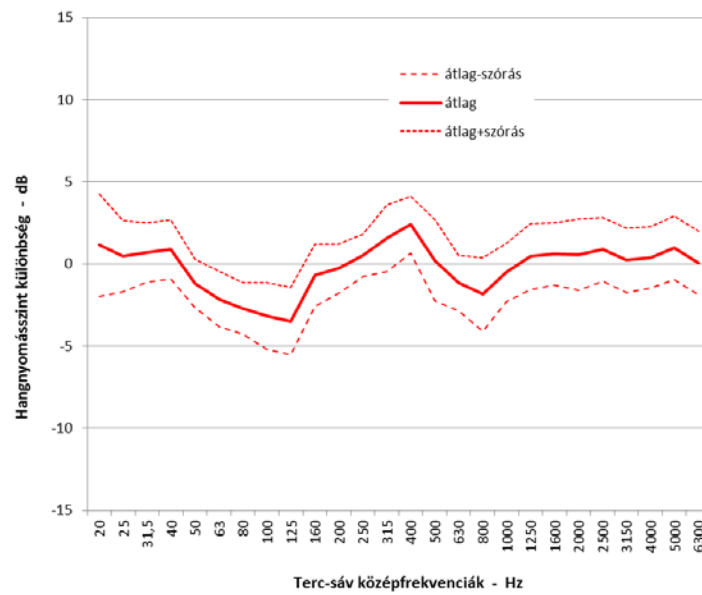
5.5. táblázat – W 14 sínleerősítés-rendszerű szakasz és GEO sínleerősítés-rendszerű szakasz közti eredmény a zajszintre vonatkozóan vonatnemenként

		Eltérés [dBA]
Személy (431, Bzmot, BDVmot)	átlag	-0,61
	szórás	1,52
Tehervonatok, gépmenetek	átlag	0,77
	szórás	1,45
InterCity (KÓCSAG, SZINVA), Sebes	átlag	0,12
	szórás	0,88
Összes vonat	átlag	-0,05
	szórás	1,41

Az **5.16. és 5.17. ábra** is igazolja, hogy a GEO és a W 14 rendszerű sínleerősítés rezgés- és zajjellemzői között nem találni jelentős eltérést. A W 14-es szakaszon mért sínrezgés kismértékben alacsonyabb, az eltérés 0 és 3 dB közötti. A keresztalj- és a talajrezgés viszont némileg nagyobb értéket mutat, itt erősítést idéz elő a W 14-es rendszer a GEO rendszerrel szemben. Ez arra utal, hogy az Skl-14 szorítórugóval ellátott sínleerősítés szorosabb csatolást létesít, jobban „megfogja” a sánt, mint a GEO rendszerű leerősítés, ezért a sínrezgés csökken, a vele kapcsolatban lévő további felépítményi elemek (keresztalj, ágyazat, talaj) rezgése viszont növekedik. A rezgésamplitúdó különbségek +5 és -5 dB között mozognak, nagyjából azonos mértékben. Mivel ezek az értékek kiegyenlítik egymást, így a zajkeltés szempontjából a két leerősítés hatása is kiegyenlítődik, ezáltal az eredő zajban gyakorlatilag nem tapasztalható eltérés, ahogy ezt az **5.5. táblázat** számadatai is mutatják.



5.16. ábra – GEO/W 14 sínleerítés-váltás hatása az átlagos rezgésamplitúdókra [28]



5.17. ábra – GEO/W 14 sínleerítés váltás hatása az átlagos hangnyomásszintekre [28]

5.4. Szőny, W 21-es rendszerű sínleerősítés hatása – 4. mérési helyszín

Budapest–Hegyeshalom–Rajka-vasútvonal, a MÁV és a GYSEV 1-es számú vasúti fővonala a budapesti Déli illetve Keleti pályaudvar és a magyar-osztrák/magyar-szlovák államhatár között. Magyarország egyik legfontosabb vasútvonala, ami kétvágányú és villamosított. Tata és Hegyeshalom között a pálya alkalmas a 160 km/óra menetsebesség használatára. A vonalon ütemes menetrend szerint óránként közlekednek elővárosi személyvonatok. Kétóránként indulnak a belföldi gyorsvonatok és a nemzetközi InterCity, EuroCity, EuroNight és Railjet járatok. Személy és teherforgalmán kívül az általa teremtett nemzetközi összeköttetés fontosságában kiemelkedik: transzkontinentális nemzetközi közlekedési folyosó része, valamint az egész Nyugat-Európa vasúti elérhetőségének kardinális pályája. [29]

Az 1-es vonalon a Vossloh AG rendelkezésre bocsátott rugalmasabb sínlátót (Zw 900 típusú) alkalmazásával W 21-es rendszerű sínleerősítéseket, amit 400 méter szakaszon ennek kísérlet céljából építettek be. Korábbi W 14 rendszerű sínleerősítéseket cseréltek ki W 21-esre az 1-es vonal jobb vágányában. A referencia mérőhelyet (W 14) a jobb vágány mellett, a 999-es szelvényben, a módosított pályaszerkezethél (W 21) levő mérőhelyet az 1003-as szelvényben helyezték el (**5.18. ábra**). A pálya környezetének geometriája közelítően egyező volt. A pálya melletti bokros részek és a bal vágány mellett levő magas lombos fák a pálya mentén azonban jelentős eltéréseket mutattak, ami így változó hangcsillapítást, illetve hangvisszaverést képviselt. A mérés 2016. szeptember 15-én és 16-án történt. A környezeti hőmérséklet az előző három mérés körülményeihez képest jelentősen csökkent, továbbá szélcsend helyett élénk szél fújt. [28]



5.18. ábra – Mérőpont Szőny és Komárom között az 1003-as szelvényben, W 21 rendszerű sínleerősítéssel ellátott pályaszakaszon [28]

A helyszínen mindkét mérőpontban két-két mikrofont is el tudtak helyezni a jobb vágány melletti környezet miatt. Az egyik mikrofont 7,5 méter (1,2 méter magasra a sínkoronától), a másikat 25 méter távolra (3,5 méter magasra a sínkoronától) helyezték el. A kétnapos méréssorozat során összesen 20 vonat elhaladásának hatását tudták sikeresen mérni. Csak a jobb vágányon haladó vonatokat mérték, amik Komárom felé közlekedtek. A mérések között személyvonatok, tehervonatok, InterCity vonatok és Railjetek találhatók. A két-két mikrofon miatt így közelebbi és távolabbi eltérések és hatások is elemezhetők. A helyszínen a mikrofonok által rögzített zaj eredményeket vonatnemenként az **5.6. táblázat** foglalja össze.

5.6. táblázat – W 21 sínleerősítés-rendszerű szakasz és W 14 sínleerősítés-rendszerű szakasz közti eredmény a zajszintre vonatkozóan vonatnemenként

		1. mikrofon, 7,5 m	2. mikrofon, 25 m
		Eltérés [dBA]	Eltérés [dBA]
Személyvonatok	átlag	-0,41	0,75
	szórás	2,22	1,37
IC, gyors vonatok	átlag	2,08	0,93
	szórás	2,81	1,27
Railjet-ek	átlag	1,07	1,80
	szórás	2,31	0,00
Tehervonatok	átlag	0,23	0,37
	szórás	0,72	1,29
Összes vonat	átlag	0,53	0,86
	szórás	2,34	1,19

S10-es viszonylatszámú közlekedő személyvonatok között BVp mot 415 (vörös Flirt) sorozatú motorvonatot és BVbdp mot 425 (vörös Flirt) sorozatú motorvonatot sikerült mérni. A 415-ös motorvonat dupla Flirt-ként közlekedik a vonalon, szombaton a 425-ös sorozatú is, azonban a mérések hétköznap zajlottak. A Flirt motorvonatok mérési eredményeit foglalja össze az **5.7. táblázat**. A 25 méterre lévő mikrofon eredményeit a szimpla Flirt motorvonatok elhaladása során zavaró hanghatások és egyéb zajt befolyásoló tényezők miatt nem lehetett figyelembe venni.

5.7. táblázat – W 21-es eredménye zajsztintre a W 14-essel szemben a különböző összeállítású személyvonatok elhaladása során

		1. mikrofon, 7,5 m	2. mikrofon, 25 m
		Eltérés [dBA]	Eltérés [dBA]
dupla Flirt	átlag	0,23	0,75
	szórás	1,99	1,37
Flirt	átlag	-3,20	
	szórás	0,85	

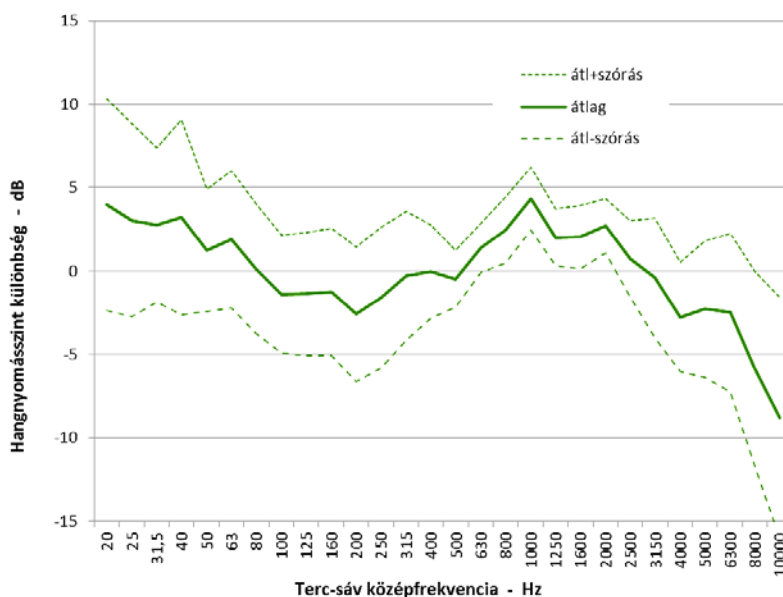
Az **5.19. ábrán** látható, hogy a W 14 rendszernél rugalmasabb, W 21 rendszerű sínleerősítés kedvezőbb rezgéscsökkentő hatása a keresztaljon kisebb, a talajban nagyobb mértékben jelentkeznek. A csillapítás lokális minimuma 125 Hz-es frekvencián figyelhető meg, ami több, mint 10 dB rezgésamplitúdó különbséget eredményezett. Itt is fellép az előzőekben, az aljapapucs beépítésének hatásának vizsgálata során már megfigyelt, 315-400 Hz-es frekvencián kialakuló lokális maximum. A lokális maximum értéke itt közel 8 dB rezgésamplitúdó különbség.



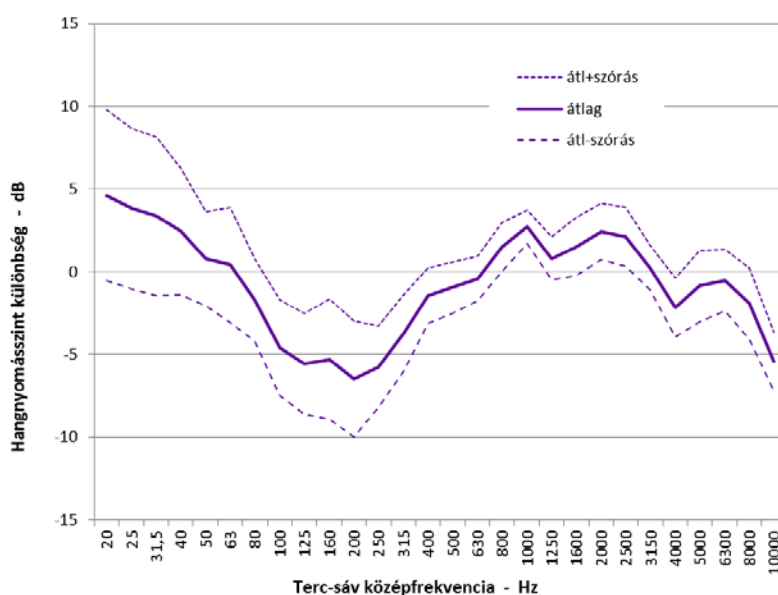
5.19. ábra – W 14/ W 21 rendszerű sínleerősítés váltás hatása az átlagos rezgésamplitúdókra [28]

A csökkenő keresztalj rezgés a zajkeltésben is megnyilvánul 80 és 400 Hz között, nagyobb frekvenciákon azonban inkább erősítés lép fel (**5.20. ábra**). Az eredő zajsztint a kiegyenlítődéssel miatt itt is kismértékű növekedést mutat: a közeli mikrofonpontban 0,5 dBA, a távoliban 0,9 dBA az eltérés (**5.6. táblázat**).

Ha összevetjük a közeli és távoli mikrofonpontban megfigyelt hangnyomásszint-eltérések frekvenciafüggését, akkor látható, hogy a pályához távolabb az eltérések erősebben függenek a frekvenciától és a szintek szórása is nagyobb, közelről mérve kisebb különbségeket és csekélyebb mértékű frekvenciafüggés tapasztalható (5.20. és 5.21. ábra). A várt eredmény, miszerint a gördülési zaj a pályához közel erősebben befolyásolja az eredő zajt, mint nagyobb távolságban; valamint a távoli megfigyelő számára az eredő zajban a többi, a felépítmény eltéréseire nem érzékeny komponensek (egyéb mechanikai összetevők és áramlási komponensek) kiegyenlítő szerepe érvényesül jobban, fordítottja lett igaz.



5.20. ábra – A szőnyi mérőhely közeli (7,5 méter távolságra a vágánytengelytől) mikrofonpontjában mért átlagos hangnyomásszint [28]



5.21. ábra – A szőnyi mérőhely távoli (25 méter távolságra a vágánytengelytől) mikrofonpontjában mért átlagos hangnyomásszint [28]

5.5. Dinnyés, Sofidon-F típusú kamraelem beépítésének hatása – 5.

mérési helyszín

A Kutatás – Fejlesztés projekt keretein belül a pályamérések 5. mérési helyszíne Dinnyés. Ez az alfejezet kivételt képez az előzőktől, ezt a mérést a Tanszék munkatársai még nem végezték el jelen dolgozatom készítéséig. Azonban 2015 tavaszán készített Diplomamunkám [2] keretein belül Dr. Augusztinovicz Fülöp konzulensemmelel és a SPED-M Kft-től, Pásztor József úrral végeztünk zajméréseket ezen a helyszínen, így a diplomamunkám során elvégzett pályamérést és annak eredményeit mutatom be. A helyszínen rezgésméréseket nem, csak zajméréseket végeztünk.

A Budapest-Székesfehérvár vasútvonal a MÁV 30a számú, kétvágányú villamosított vasúti fővonala. A Balaton és Velencei-tó miatt turisztikailag kiemelt vasútvonal. A szakaszon a megengedett legnagyobb sebesség 120 km/h. Elővárosi vonatok és távolsági vonatok is egyaránt közlekednek a szakaszon, nyáron sűrűbben. Az elővárosi vonatok „zónázó” rendszer szerint közlekednek és a Stadler FLIRT nevű korszerű motorvonatokat állították forgalomba. A távolsági vonatok között vannak gyorsvonatok, nyáron sebesvonatok és átlós fürdősvonatok is járnak, köztük egy expresszvonat. A vonalon nemzetközi gyorsvonatok is közlekednek. A vasútvonal a Velencei-tó partján húzódik, de az egész környék egy kertvárosi hangulatú üdülőhely. Emiatt is volt indokolt és szükséges a zaj- és rezgéscsillapító kamraelemek beépítése, valamint több kilométeres szakaszon zajvédő-falak létesítése, hogy a zajterhelés az üdülőhelyekre megállapított határérték alatt legyen.

A SPED-M Kft. Sofidon-F típusú zaj- és rezgéscsillapító kamraeleme 12 km-es szakaszon van beépítve a Velencei-tó mellett, Kápolnásnyék és Dinnyés között. Tudomásom szerint, jelenleg ez a leghosszabb, Magyarországon már üzemben alkalmazott kamraelemmel csillapított szakasz. A Sofidon-F típusú kamraelemet a **3.3. alfejezetben** ismertettem, a **4. fejezetben** pedig a laboratóriumi vizsgálatot és a kamraelem laboratóriumban elért csillapítási eredményét.

A mérést 2015. március 19-én délután végeztük, napos időben és szélcsendben. A mérés a kamraelemmel ellátott 12 km-en beépített szakasz Budapesttől távolabb eső végén, Dinnyés település mellett történt (**5.22. ábra**).



5.22. ábra – 12 kilométeres beépített szakasz vége Dinnyés mellett [saját fotó]

Két mérőhelyet létesítettünk (5.23. ábra) a bal oldali vágány mellett, a vágánytengelytől 5 méter távolságban: az egyiket a kamraelemmel még ellátott vágány mellett és attól 300 méterre a másikat, ahol már csillapítatlan sínek voltak. A két mérőállomás által mért eredményeket hasonlítottuk össze, különbségük adta a kamraelem által elért zajcsökkentés végeredményét. A vasúti pálya közelében csak egy mellékút húzódott, ami a vágányokat keresztezte (vasúti átjáró), így a mérést nem befolyásolta más. A méréssorozatokat a mellékúton elhaladó járművek befolyásolhatták volna, a zajmérések alatt viszont nem közlekedett az úton jármű, így „tisztán”, a vágányon haladó vasúti járművek okozta zajterhelést tudtuk mérni.



5.23. ábra – A csillapítatlan (balra) és csillapított vágány (jobbra) melletti mérőhely [saját fotó]

A helyszíni mérés során összesen 10 vonatot tudunk mérni, volt köztük személyvonat, gyorsvonat, valamint egy tehervonat is. A méréseket két azonos, Brüel & Kjaer 2250 típusú kézi hangnyomásszint-mérő és frekvenciaelemzővel végeztük. Az 1. pontossági osztályú műszereket Larson Davis CAL250 típusú kalibrátorral hitelesítettük. A hitelesítési értékek eltérése 0,2 dB volt, amit az értékelés során korrekcióba vettünk. A mérés úgy zajlott, hogy amikor észleltük, hogy közeledik a vonat, „logging” üzemmódban elindítottuk a mérést. A műszer ezután minden egyes másodpercben mért egy LAeq szintet, ami az 1 másodperces szakaszokra megállapított egyenértékű A-hangnyomásszint. A vasúti forgalom nélküli időben mért alapzaj átlagosan 45 dBA értékű volt, ami az elhaladások során jelentős mértékben, maximum 40-50 dBA-val megnövekedett. Ez azt jelenti, hogy a mérés alapzaj korrekciót nem igényelt. Az előző pályamérésekkel ellentétben itt a sebességet nem fénykapuk segítségével határoztuk meg, hanem egy radaros sebességmérő műszerrel (**5.24. ábra**) mértük. Egy esetben (a második vonat elhaladásakor) volt különböző sebesség a két mérési pontnál, a többi esetben azonos sebességgel haladtak el a vonatok, így csak ezek a mérések hasonlíthatók össze.



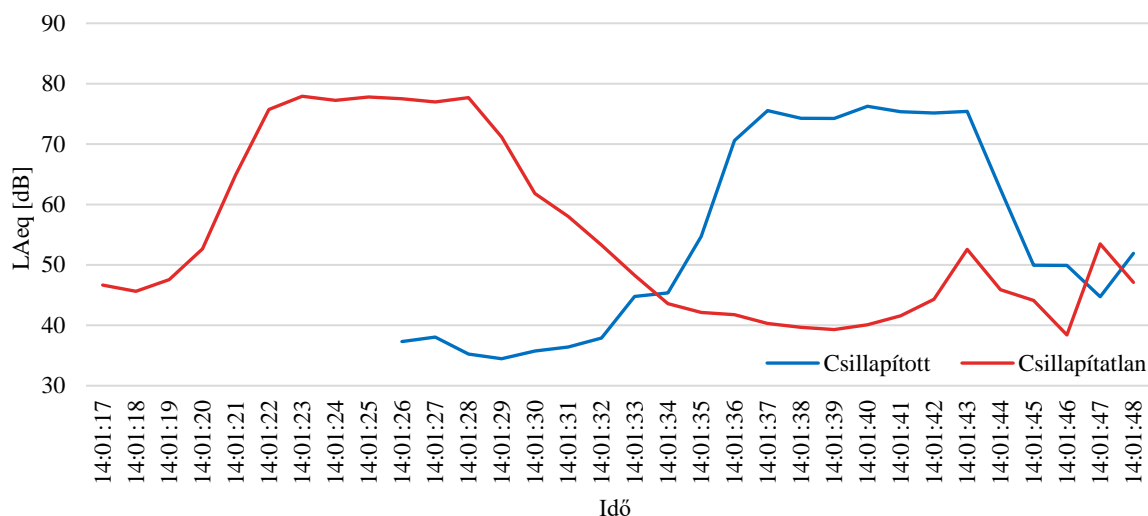
5.24. ábra – Radaros sebességmérő műszer [saját fotó]

Az eredmények kiértékelése úgy történt, hogy megkerestem a maximum dB értéket egy vonat elhaladása során és a maximum értékből kivontam 10 dB-t. Csak az előbb kapott érték feletti eredményeket vettem figyelembe, majd azokat átlagoltam. A két mérőállomás által mért eredmények átlagát kivontam egymásból és így kaptam meg az elem dB mértékegységben kapott csillapítási végeredményét (**5.8, 5.9. és 5.10. táblázat**).

Az eredményeket grafikonon is ábrázoltam (5.25., 5.26. és 5.27. ábra), ahol a két mérőhely távolsága miatt a különböző időpontban kapott mérési eredmények láthatók. Az ábrákról a két mérőpontban mért szintek különbsége, azaz a Sofidon-F kamraelem csillapításának mértéke is leolvasható. A főbb mérési eredményeket emelem ki, a többi táblázat, valamint grafikon Diplomamunkámban [1] megtalálható.

5.8. táblázat – 3. vonat – dupla Flirt – elhaladása során mért hangnyomásszintek különbsége

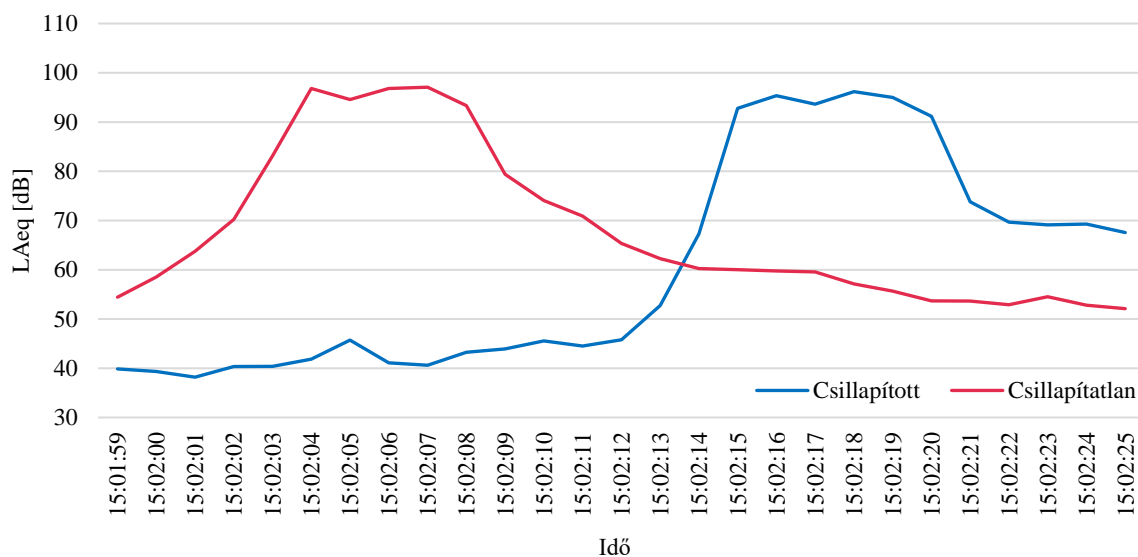
3. vonat – dupla Flirt							
Csillapított				Csillapítatlan			
14:01:36	70,58	11428783,3		14:01:22	75,73	37411058,8	
14:01:37	75,55	35892193,5		14:01:23	77,92	61944107,5	
14:01:38	74,27	26730064,1		14:01:24	77,23	52844525,2	
14:01:39	74,24	26546055,6		14:01:25	77,81	60394862,9	
14:01:40	76,26	42266861,4		14:01:26	77,50	56234132,5	
14:01:41	75,37	34434993,1		14:01:27	76,98	49888448,7	
14:01:42	75,14	32658783,2		14:01:28	77,69	58748935,3	
14:01:43	75,42	34833731,5				53923724,4	77,3
		30598933,2	74,9				
2,5 [dB]							



5.25. ábra – 3. vonat – dupla Flirt – elhaladása során mért másodpercenkénti hangnyomásszintek

5.9. táblázat – 9. vonat – IC/gyors – elhaladása során mért hangnyomásszintek különbsége

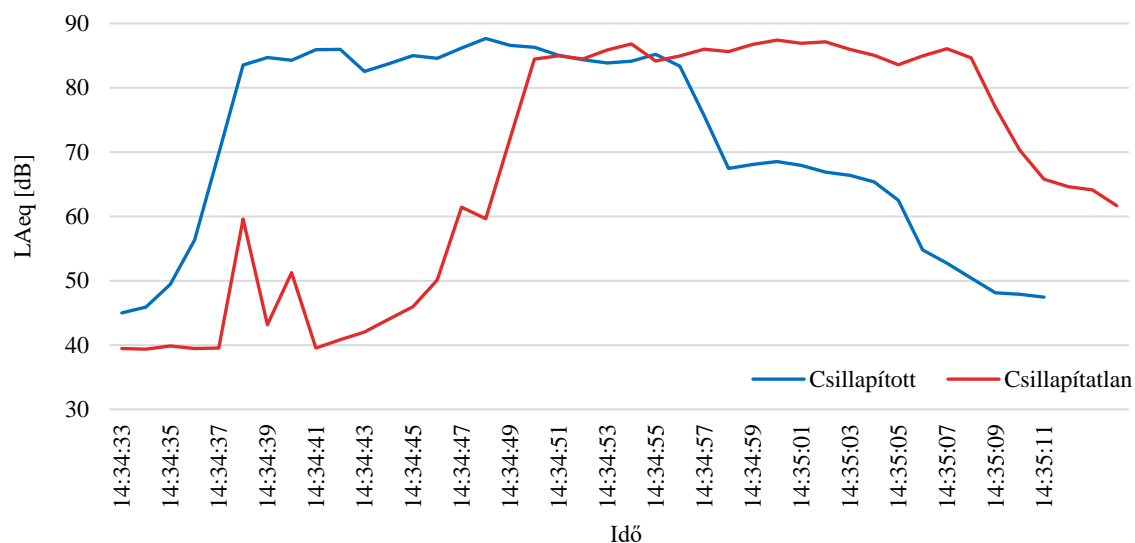
9. vonat – IC/gyors							
Csillapított				Csillapítatlan			
15:02:15	92,79	1901078280		15:02:04	96,82	4808393484	
15:02:16	95,36	3435579479		15:02:05	94,57	2864177970	
15:02:17	93,63	2306747189		15:02:06	96,80	4786300923	
15:02:18	96,17	4139996748		15:02:07	97,07	5093308711	
15:02:19	94,98	3147748314		15:02:08	93,33	2152781735	
15:02:20	91,15	1303166778			79,38	3940992565	96,0
		2705719465	94,3				
1,6 [dB]							



5.26. ábra – 9. vonat – IC/gyors – elhaladása során mért másodpercenkénti hangnyomásszintek

5.10. táblázat – 8. vonat – tehervonat – elhaladása során mért hangnyomásszintek különbsége

8. vonat - Tehervonat							
Csillapított				Csillapítatlan			
14:34:38	83,52	224905461		14:34:50	84,46	6,99197714	
14:34:39	84,70	295120923		14:34:51	84,98	314774831	
14:34:40	84,27	267300641		14:34:52	84,48	280543364	
14:34:41	85,93	391741877		14:34:53	85,86	385478358	
14:34:42	85,98	396278034		14:34:54	86,81	479733449	
14:34:43	82,54	179473363		14:34:55	84,16	260615355	
14:34:44	83,72	235504928		14:34:56	84,95	312607937	
14:34:45	85,01	316956746		14:34:57	86,00	398107171	
14:34:46	84,57	286417797		14:34:58	85,63	365594792	
14:34:47	86,17	413999675		14:34:59	86,75	473151259	
14:34:48	87,66	583445104		14:35:00	87,41	550807696	
14:34:49	86,60	457088190		14:35:01	86,92	492039536	
14:34:50	86,30	426579519		14:35:02	87,14	517606832	
14:34:51	85,06	320626932		14:35:03	85,98	396278034	
14:34:52	84,36	272897778		14:35:04	85,04	319153786	
14:34:53	83,86	243220401		14:35:05	83,59	228559880	
14:34:54	84,13	258821292		14:35:06	84,96	313328572	
14:34:55	85,21	331894458		14:35:07	86,08	405508535	
14:34:56	83,35	216271852		14:35:08	84,64	291071712	
14:34:57	75,64	36643757,5		14:35:09	76,95	49545019,1	
		307759436	84,9			341725306	85,3
0,5 [dB]							



5.27. ábra – 8. vonat – tehervonat – elhaladása során mért másodpercenkénti hangnyomásszintek

Mind a tíz elhaladt vonathoz tartozik egy, az előbb bemutatott táblázat és hangnyomásszint görbe. Az eredményeket, a részletező táblázatok és grafikonokat mellőzve, az 5.11. táblázat összesítve tartalmazza.

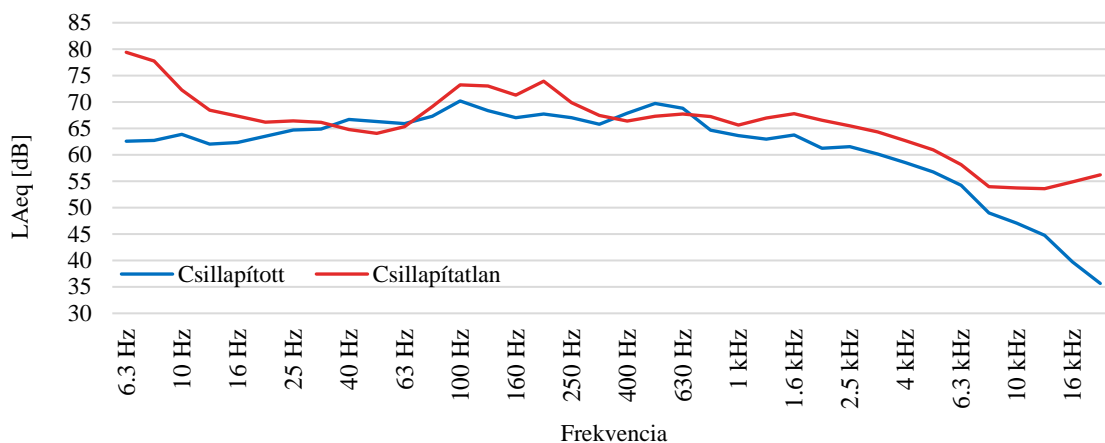
5.11. táblázat – Összesítő táblázat, a Sofidon-F típusú kamraelem zajcsökkentésének végeredménye

Mérés sorszáma	Vonat típusa	Sebesség [km/h]	Honnan - Hova	Csillapítatlan [dB]	Csillapított [dB]	Különbség [dB]
1.	IC/gyors	113	Szfv. – Bp.	98,2	96,5	1,7
2.	dupla Flirt	80-110	Bp. – Szfv.	76,6	73,8	2,8
3.	dupla Flirt	74	Szfv. – Bp.	77,3	74,9	2,5
4.	IC/gyors	115	Bp. – Szfv.	91,8	89,4	2,3
5.	V43/gyors	114	Bp. – Szfv.	83,6	82,3	1,2
6.	dupla Flirt	100	Szfv. – Bp.	82,2	80,4	1,8
7.	dupla Flirt	120	Bp. – Szfv.	74,4	72,8	1,5
8.	Tehervonat (22 vagon + mozdony)	86	Bp. – Szfv.	85,3	84,9	0,5
9.	IC/gyors (5 kocsi)	108	Szfv. – Bp.	96,0	94,3	1,6
10.	dupla Flirt	95	Szfv. – Bp.	83,8	81,3	2,5

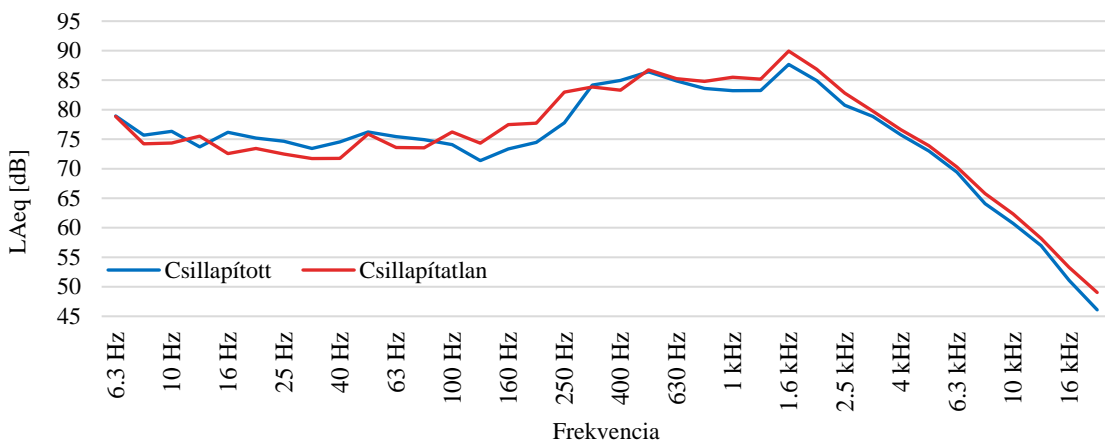
dupla Flirt [bal vg.] átlag	2,2
dupla Flirt [jobb vg.] átlag	1,5
IC/gyors [bal vg.] átlag	1,6
IC/gyors [jobb vg.] átlag	1,8
Teljes átlag:	1,7
Szórás:	0,7
Végeredmény	1,7 ± 0,7 [dB]

jobb vágány (Székesfehérvár felé)
 bal vágány (Budapest felé)

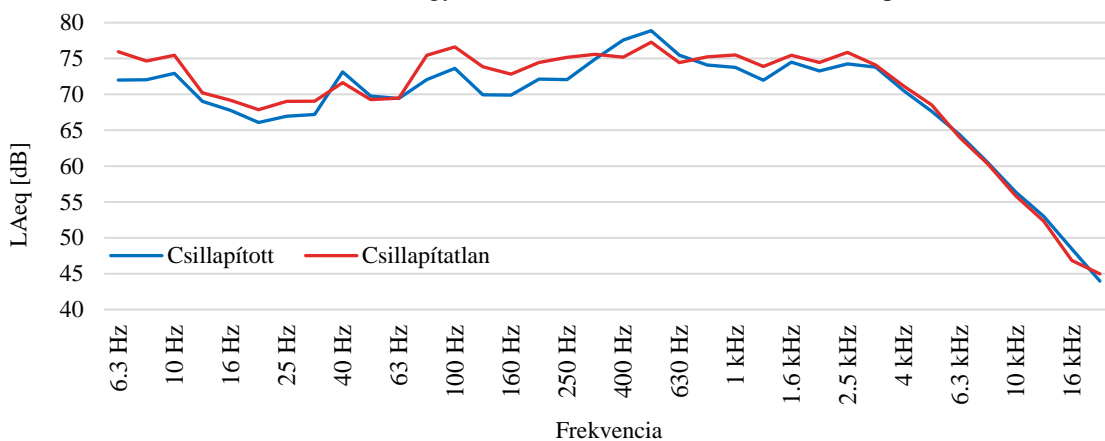
A hang nemcsak a rezgő közeg időbeli mozgásával írható le, hanem részhangjainak spektrumaként is ábrázolható. Az általunk mért spektrum különböző frekvenciahelyeken más-más intenzitású részhangból tevődik össze. Az alkalmazott műszer tulajdonságainak megfelelően a 6,3 Hz-től 20 kHz-ig terjedő tartományban kaptam eredményeket. A két mérőpontban mért spektrumokat grafikonon (5.28., 5.29. és 5.30. ábra) ábrázoltam.



5.28. ábra – 3. vonat – dupla Flirt – elhaladása során mért frekvencia-spektrumok



5.29. ábra – 9. vonat – IC/gyors – elhaladása során mért frekvencia-spektrumok



5.30. ábra – 8. vonat – tehovernat – elhaladása során mért frekvencia-spektrumok

6. Vasúti pályaszerkezeti elemek laboratóriumi vizsgálata

A MÁV Magyar Államvasutak Zártkörűen Működő Részvénytársaság és a Budapesti Műszaki Egyetem Út és Vasútépítési Tanszék között 2015. szeptember 11.-i keltezéssel Kutatás - Fejlesztési szerződésben „A vasúti közlekedési zajvédelem pályavasúti vonatkozásainak laboratóriumi és helyszíni vizsgálatai” című kutatási projekt tartalmazza a zaj- és rezgéscsökkentő elemek üzemi állapotban elvégzett mérései mellett az elemek hatásának laboratóriumi vizsgálatát is. A laboratóriumi körülmények között elvégzett mérések is alappillért képezik a projektnek. A laboratóriumi munka az Út és Vasútépítési Tanszék Pályaszerkezeti Laboratóriumában valósult meg. A projektnek ebben a munkájában Dr. Szabó József és Dr. Augusztinovicz Fülöp vezetése mellett én is részt vehettem. Ebben a fejezetben a vizsgálati célkitűzéseket, a laboratóriumi körülményeket, a mérési rendszer tervezését és megvalósítását, valamint magát a vizsgálatot mutatom be.

6.1. Vizsgálat célja

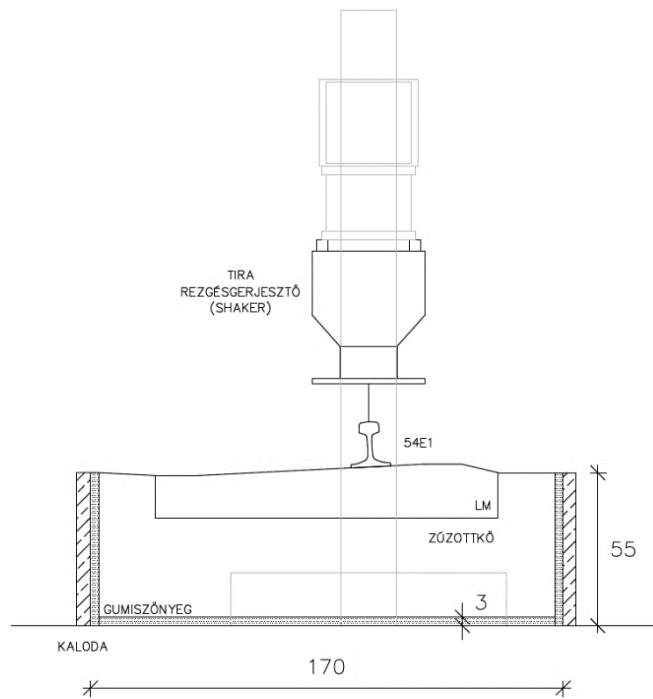
A laboratóriumi vizsgálat célja a valóságos üzemi állapotokat a lehető legjobban megközelítő, ugyanakkor a Pályaszerkezeti Laboratórium kötöttségei ellenére is megvalósítható rezgésvizsgáló berendezés összeállítása. Kísérleti vizsgálatok elvégzése az összeállított mérési rendszer segítségével a rezgéscsillapító pályaszerkezeti elemek (aljpapucs, rugalmas sínleerősítések és sínkamra elemek) rezgésátviteli és rezgéscsökkentő hatásának számszerű eredményeiért. Cél volt, hogy az összeállított rendszeren elvégzett mérések alkalmasak legyen a helyszíni vizsgálatokkal való összehasonlításra. Az összehasonlítást azonban kellő óvatossággal kell kezelni, ugyanis egy laboratóriumi vizsgálat a valóságos körülményeket csak közelíteni tudja, sosem nyújt azonos eredményt. Célkitűzéseink között volt, hogy a helyszíni és laboratóriumi vizsgálatok eredményei alapján választ kapjunk, hogy melyik pályaszerkezeti elem a leghatékonyabb, illetve az elemek együttesen milyen kombinációban bizonyulnak a legalkalmasabbnak. A legeredményesebb pályaszerkezeti elemekre és azok kombinációira a jövőben kiemelt figyelmet kell fordítani, további vizsgálatokkal szükséges eredményességüket alátámasztani. Ezek az adatok továbbá alapul szolgálhatnak további, új megoldások kísérletezésére is.

6.2. Vizsgálat felépítése

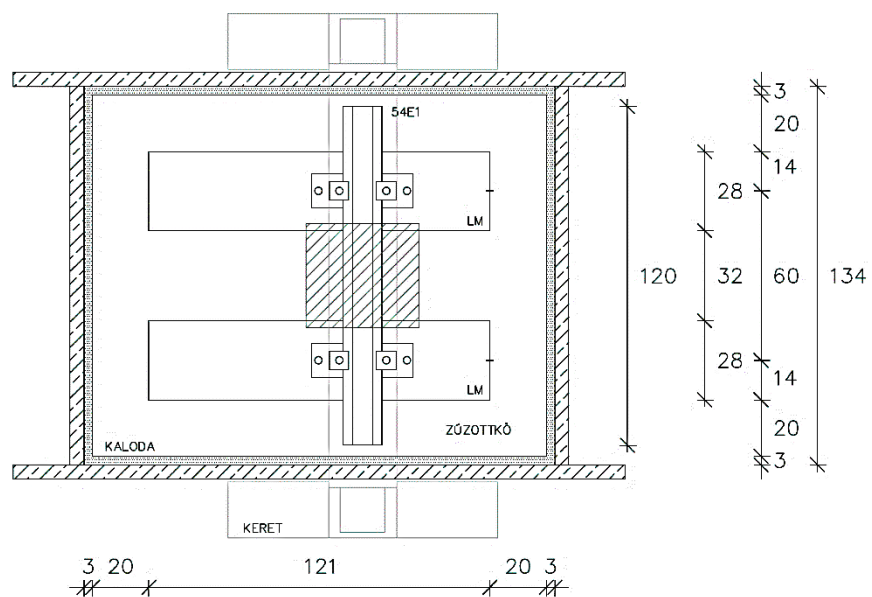
A Pályaszerkezeti Laboratórium kötöttségei, valamint az anyagi háttér hiánya miatt a mérési rendszer összeállítása nem volt könnyű feladat. A legminimálisabb költségekkel kellett az üzemi állapotokat lehető legjobban megközelítő rezgésvizsgáló berendezést felépíteni. A mérési rendszer összeállítását egy tervezés előzte meg. Kiindulás alapját korábbi laboratóriumi mérés adta (**4. fejezet**), az ott összeállított szerkezet volt a kiinduló pont. Mivel az üzemi állapotokat a lehető legjobban akartuk megközelíteni, így egy sínszál két betontesthez rögzítve nem volt elegendő. Következésképp a tervezés fázisában már eldöntött tény volt, hogy zúzottkő is szükséges a mérések elvégzéséhez. Mivel a Laboratóriumban helyhiány van és a maradék szabad helyek is korlátozottak, így az eredeti ötlet, miszerint egy teljes vágányrácban történő méréseket végezzünk el, elvetésre került. A helyhiány mellett a zúzottkő mennyisége is a vágányrác ellen volt, ugyanis kb. 3 tonna zúzottkőre lett volna szükség. Így a vágányrác méretét felére csökkentettük. Szándékaink között volt a minél „színesebb” méréssorozatok kivitelezése, így a minél több és különböző zaj- és rezgéscsillapító, illetve rugalmas pályaszerkezeti elem beszerzése volt a cél. Ennek eredményeképp aljapucss, kamraelemek és rugalmas sínleerősítések rezgéshatásainak vizsgálatára építkeztünk. Mivel különböző sínleerősítéseket kívántunk megvizsgálni, így olyan vasbetonaljra volt szükség, ami a közvetett és közvetlen sínleerősítésekhez is alkalmas, emiatt az LM típusú vasbetonalj lett kiválasztva. A kétféle vasbetonaljat alkalmazunk: LM-GEO vasbetonaljat kettévágva a GEO rendszerű sínleerősítésekhez és LM-S vasbetonaljat kettévágva az Sk1 szorítórugóval ellátott közvetlen sínleerősítésekhez. A sínleerősítések vizsgálata tehát megkövetelte a vasbetonalj típusát, ám ezzel együtt a sínrendszerét is. Az LM típusú vasbetonaljához az 54 E1 sínrendszer járatos. A tervezés következő sarkalatos pontja azonban a sínkamra elemek voltak, ugyanis az elemek szinte kivétel nélkül csak 60 E1-es sínrendszerhez készülnek. Ennek oka az, hogy jellemzően új építésű vágányok sínszálaira szerelik fel ezeket a gumielemeket, az új pályákat pedig többnyire 60 E1 sínrendszerrel építik. Így a laborban egy újabb felépítményi rendszert volt szükséges összeállítanunk a kamraelemek vizsgálata miatt. Az 54 E1 sínrendszerhez a vizsgált elemek közül egyedül a Sofidon-F típusú kamraelem volt alkalmas, annak mérete miatt. A korábbi vizsgálatomból (**4. fejezet**) rendelkezésre állt L4 típusú vasbetonaljak (szintén kettévágva), amelyek 60 E1 sínrendszerhez alkalmasak, valamint Sk1-1 szorítórugójú leerősítések is. Ennél a felépítményi rendszerénél az alj és a leerősítés típusa

nem számít, a kamraelemek összehasonlítása érdekében szükséges azokat azonos rendszerben vizsgálni. Mivel az összes vizsgált kamraelemet ragasztással rögzítik a sín gerincére, így a következő feladat több, 120 cm hosszú sínszál beszerzése volt.

Az előzőekben leírtak alapján belátható a rendszer bonyolultsága, több, különböző felépítményi rendszert kellett összeállítani az eredmények sikeressége érdekében. A mérési rendszer elrendezési vázlata látható oldalnézetben a **6.1. ábrán**, felülnézetben a **6.2. ábrán**.



6.1. ábra – Mérési rendszer egyszerűsített elrendezési vázlata oldalnézetben



6.2. ábra – Mérési rendszer egyszerűsített elrendezési vázlata felülnézetben

A laboratóriumban alkalmazott vasúti pályaszerkezeti elemeket listaszerűen a **6.1. táblázatban** ismertetem, a **6.2. táblázat** pedig a felépítményi kombinációkat foglalom össze.

6.1. táblázat – Méréshez alkalmazott vasúti pályaszerkezeti elemek listája

Sínek, kamraelemek	<ul style="list-style-type: none"> - 54 E1 r. sín, csillapítatlan, 120 cm hosszú - 54 E1 r. sín, Sofidon-F kamraelemmel, 120 cm hosszú - 60 E1 r. sín, Sofidon-F kamraelemmel, 120 cm hosszú - 60 E1 r. sín, Sofidon-T kamraelemmel, 120 cm hosszú - 60 E1 r. sín, STRAILastic_A inox / FRT-RCP kamraelemmel, 120 cm hosszú
Sínleerősítések, közbetétek	<ul style="list-style-type: none"> - GEO (54 E1) - GEO + Skl-24 (54 E1) - W 21 (54 E1) – Zw 687a típusú közbetéttel - W 14 (54 E1) – Zw 700 típusú közbetéttel - Skl-1 (60 E1)
Vasbetonaljak	<ul style="list-style-type: none"> - LM-GEO jelű vasbetonalj (54 E1) - LM-S jelű vasbetonalj (54 E1) - L4 jelű vasbetonalj (60 E1)
Aljlapucs	<ul style="list-style-type: none"> - FRT-USP típus, 6 mm vastag
Zúzottkő	<ul style="list-style-type: none"> - 1 m³, kb. 1,5 tonna
Gumiszőnyeg	<ul style="list-style-type: none"> - 30 mm vastag táblák a zúzottkő alatt és a kaloda oldalain

6.2. táblázat – Laboratóriumi vizsgálatok felépítményi kombinációi

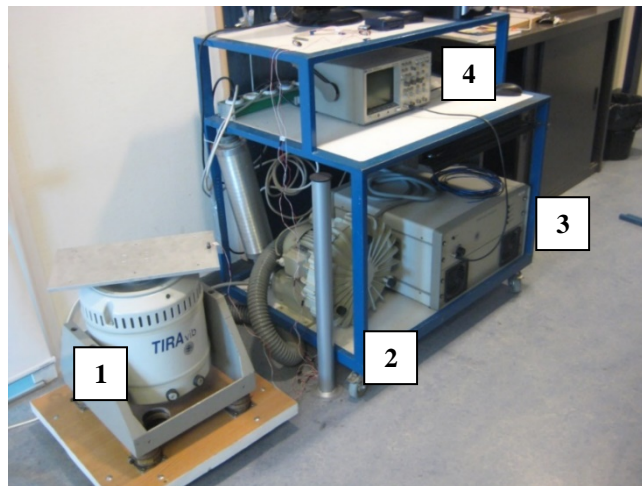
Sín	Vasbetonalj	Aljlapucs	Sínleerősítés	Kamraelem	
54 E1	LM-GEO	-	GEO	Sofidon-F	
			-	-	
		FRT-USP	GEO	Sofidon-F	
			GEO + Skl-24	Sofidon-F	
		LM-S	-	W 21	Sofidon-F
				W 14	Sofidon-F
	FRT-USP		W 21	Sofidon-F	
			W 14	Sofidon-F	
	60 E1	L4	-	Skl-1	Sofidon-F
					Sofidon-T
			STRAILastic_A inox 2.0		
			FRT-RCP		
FRT-USP		Sofidon-F			
		Sofidon-T			
		STRAILastic_A inox 2.0			
		FRT-RCP			

A vasúti felépítmény és annak kombinációinak tervezése mellett szükség volt a mérőműszerek összeállításának az átgondolására is. Míg a 2014-ben végzett laboratóriumi kutatásom során impulzusszerű erőgerjesztést alkalmaztam impulzuskalapáccsal, itt a valósághoz közelebb álló, a gördüléskor keletkező erőhatások szimulálására elektrodinamikus rezgésgerjesztő (shaker) mellett döntöttünk. Korábban impulzuskalapáccsal, egységnyi erővel gerjesztett pontok alapján határoztam meg az elhelyezett pontokon lévő rezgésérzékelők időbeli lefutású gerjesztésre adott válaszait a frekvencia függvényében. Az elektrodinamikus rezgésgerjesztő folyamatosan adott, seperi frekvenciájú szinuszos rezgésgerjesztése mellett kalibrált rezgésátviteli függvények határozhatók meg. A felvett rezgésátviteli függvények összehasonlításából állapítható majd meg az egyes rezgéscsökkentő elemek hatékonysága a frekvencia függvényében.

A mérési rendszer fő egysége tehát a TIRAvib 5220 típusú elektrodinamikus rezgésgerjesztő (6.3. ábra). Legfontosabb jellemzője a szinuszos rezgésgerjesztő erő, ami 1000 N csúcstól csúcsig számítva. 2- 7000 Hz frekvenciatartományban működik, szinuszos gerjesztésének maximális sebessége 1,5 m/s. Maximális elmozdulása csúcstól csúcsig mérve 25,4 mm. Armatúrájának átmérője 120 mm. A rezgésgerjesztőhöz csatlakoztatva van egy erőmérőcella is, aminek segítségével fog történni ismert erővel a gerjesztés. Az erőmérőcella típusa 201B10-es. A shaker folyamatos hűtést igényel működése közben, ezért a rendszer része egy TB 0140 hűtőventillátor is, ami a mérés során végig üzemel. A shakerhez egy teljesítményerősítő egység is szükséges, a laboratóriumban alkalmazott típusa BAA 1000-E. A mérőeszközök egy része látható a 6.4. ábrán.



6.3. ábra – TIRAvib 5220 típusú elektrodinamikus rezgésgerjesztő (shaker)
[Dr. Augusztinovicz Fülöp fotója]

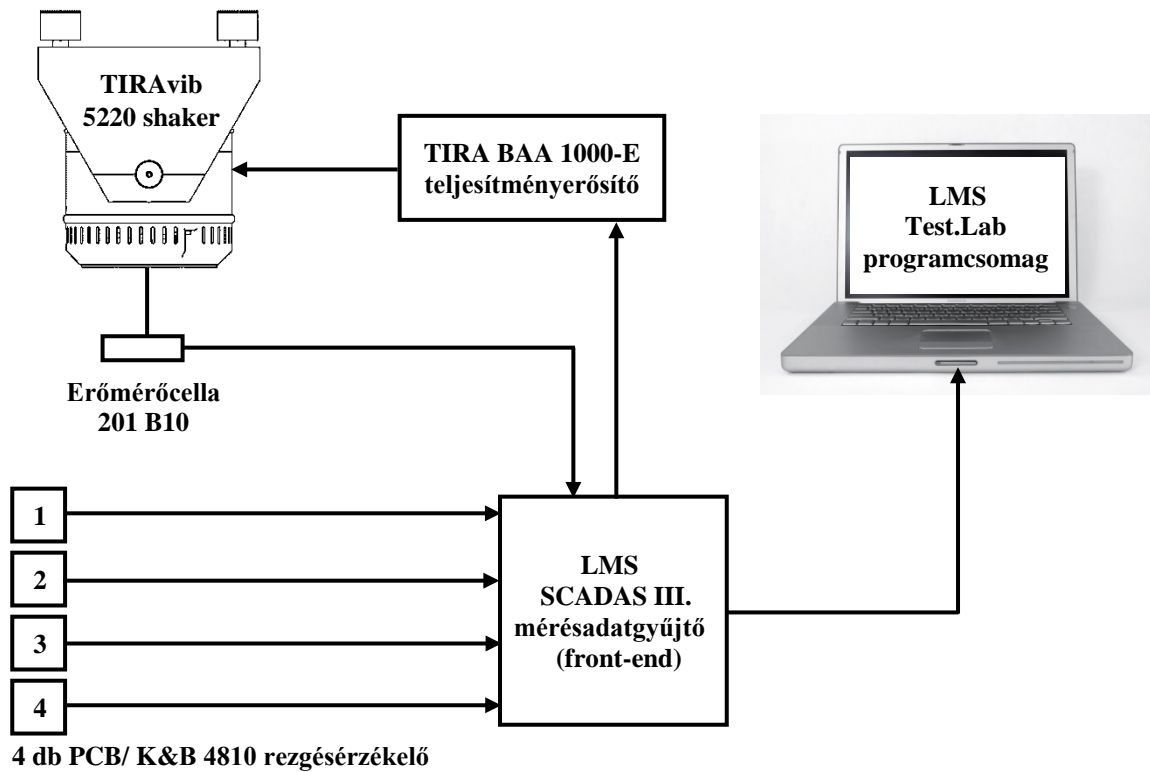


6.4. ábra – Mérőműszerek egy része (ábramejelölések: 1. TIRA vib 5220; 2. TB 0140 hűtőventillátor; 3. BAA 1000-E teljesítményerősítő; 4. oszcilloszkóp [Dr. Augusztinovicz Fülöp fotója]

A laboratóriumi mérések során 4 darab rezgésérzékelőt alkalmazunk. Mivel a gerjesztés a sínszál közepén fog történni, így egy rezgésérzékelő a sínszál közepénél, egy pedig a betonalj felett, a sínleerősítéseknel lesz elhelyezve. Nem szükséges elhelyezni még egy érzékelőt a másik betonalj fölé, hiszen a központos gerjesztés miatt szimmetrikus hatások alakulnak ki. További rezgésérzékelőt helyezünk el az egyik keresztaljon, valamint egyet a zúzottkő befogását szolgáló kalodára/ládára. Az utóbbi mérésnek várhatóan nem lesz releváns eredménye, azonban az elemek egymáshoz történő összehasonlításában szerepet játszhat, visszacsatolást kapunk arról, hogy milyen hatás keletkezik az ágyazatban. Különböző érzékenységű érzékelőkkel dolgozunk, PCD illetve B&K típusúakkal.

A rezgésérzékelők által mért jeleket és az erőmérőcella adatait egy mérésadatgyűjtő berendezés biztosítja, ami a számítógéphez is csatlakozik. Front-end egységként feladata a bemenő és kimenő adatok fogadása, továbbadása. A rezgésérzékelők méréseiből eredményként rezgésátviteli függvényeket kapunk. Az LMS Test.Lab programcsomag segítségével számítógépen történik a kiértékelés. A mérési rendszer egységei és funkcionális összefüggései blokksémaként láthatók az **6.5. ábrán**. A rendszer elemei a következők:

- Elektrodinamikus rezgőgerjesztő: TIRA vib 5220 shaker
- Teljesítményerősítő: BAA 1000-E
- Hűtőventillátor: TB0140
- Erőmérőcella: 201 B10
- Rezgésérzékelők: PCB vagy B&K 48010-es típusúak
- Mérésadatgyűjtő: LMS SCADAS III.
- Szoftver: LMS Test.Lab



6.5. ábra – A mérőeszközök bloksémája

Az impulzuskalapácsos mérés esetén tetszőleges volt a gerjesztés helye (**4. fejezet**), azonban a jelenlegi laboratóriumi mérések során a két keresztalj között, a sínzál közepén állítunk elő rezgésgerjesztést. Ehhez szükség volt egy rögzítő keretre, ami lehetővé tette a shaker felfüggesztését (**6.6. ábra**). A rögzítő keret elemeit úgy kellett megépíteni, hogy a shaker (felfelé álló) talpán fellépő reakcióerő a keretet és azon keresztül a zúzottkő ágyazatot ne hozza rezgésbe, a vizsgált pályaszerkezet egyes pontjain fellépő rezgés csak a sínzálra ható erő következményeként jöjjön létre.



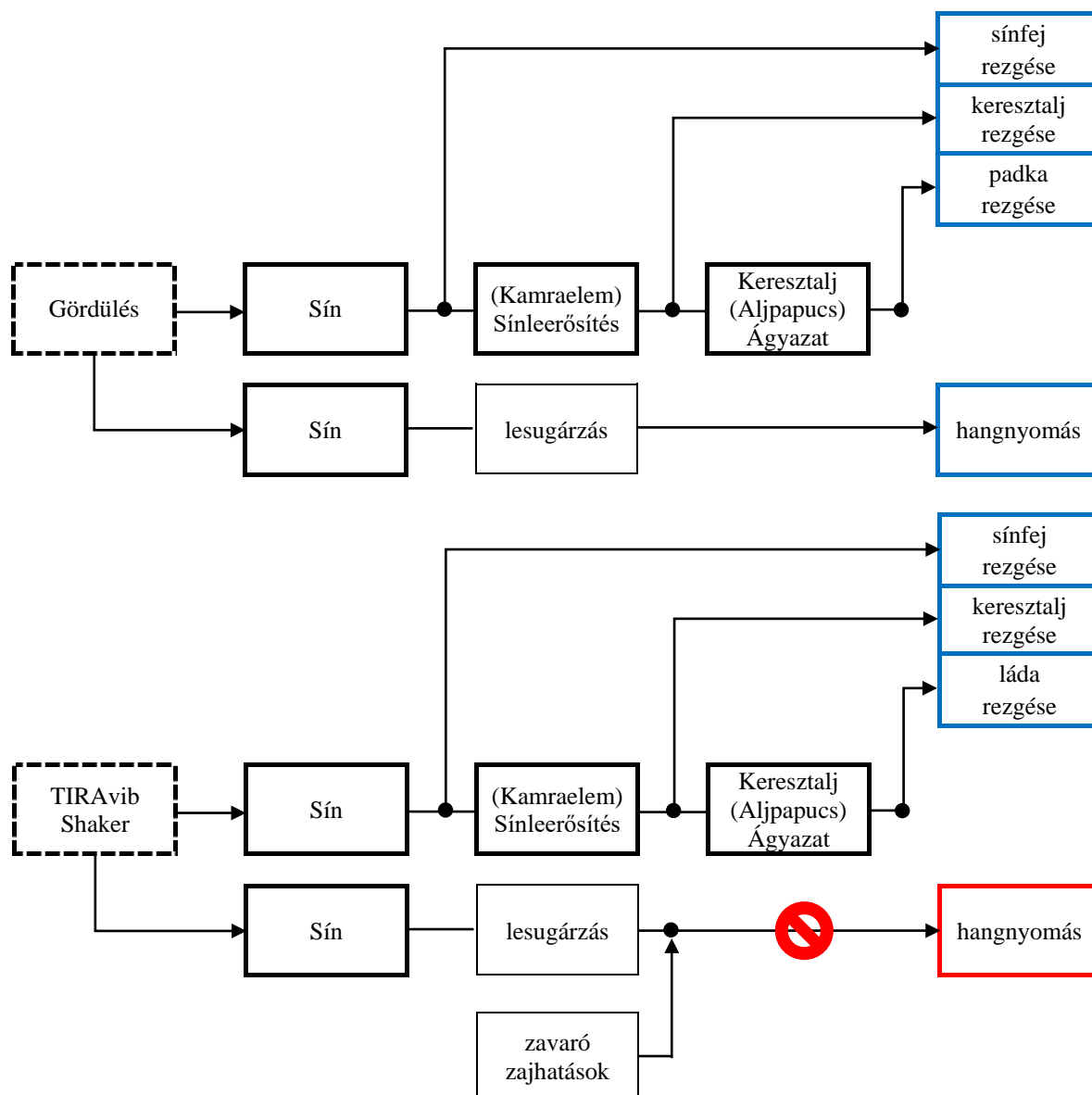
6.6. ábra – Az elektrodinamikus rezgésgerjesztő (shaker) felfüggesztése

A korábban ismertetett pályaszerkezeti elemekből a laboratóriumban megépített felépítmény (kalodában) és a rögzítő keretre felfüggesztett shaker látható a **6.7. ábrán**.



6.7. ábra – Laboratóriumban felépített mérési rendszer

A felépített mérési rendszerrel célunk volt a valóságos üzemi állapotokat, a lehetőségekhez és korlátokhoz mérten, legjobban megközelíteni. Ennek oka, hogy a helyszíni és laboratóriumi mérések összehasonlíthatók legyenek, a végén azonos tendenciát mutató eredményekre jussunk, teljes képet kapjunk a pályaszerkezeti elemek hatékonyságáról. Ennek ellenére a két mérés közvetlenül nem hasonlítható össze egymással, mivel laboratóriumi körülmények között nem lehet elérni a vasúti pálya üzemi állapotát, valamint a járművek okozta terheléseket sem lehet reprodukálni. A laboratóriumi mérések alkalmasak lesznek az elemek rezgésre gyakorolt hatásainak megállapítására, és ezeket a mért rezgéseket a frekvencia átviteli függvényeken keresztül lehet majd egymáshoz képest összehasonlítani, a helyszíni mérésekkel pedig a frekvenciatartományokban történő csillapító illetve erősítő hatásuk kimutatásával. A helyszíni és laboratóriumi mérések elvi modelljét mutatom be a **6.8. ábrán**. A rajzok a két mérés elvi különbségét és összehasonlításuk további akadályát hivatottak bemutatni, ugyanis a laboratóriumban a mérőeszközök és egyéb zavaró hatások miatt nem lehet zajméréseket végezni.



6.8. ábra – Helyszíni (felső) és laboratóriumi (alsó) mérések bloksémája

A két mérés különbsége már a sínt gerjesztő erőből ered. A több ponton ható, időben és térben változó gördülést elektrodinamikus rezgésgerjesztővel szimuláljuk, ami által csak egy pontot kifejtett erőbevétel értéke (1000 N) töredéke a járművékének. A labormérésekben valószínűleg nagyságrendekkel kisebb dinamikus erőket tudunk csak előállítani, a statikus terhelés pedig teljesen hiányzik. Ez utóbbi azért lenne fontos, mert az alkalmazott elasztomerek erősen nem lineárisak, tehát a valóságostól eltérő munkapontban mérünk. Mindezek következtében a labormérések elsősorban relatív, egymáshoz viszonyított hatásról szolgáltathatnak adatokat.

Mindkét mérés során három fő komponens rezgését mérjük, azonban az összeállított mérési rendszeren nincs lehetőség az ágyazatból adódó padka rezgésének vizsgálatára. A

födém kialakítása miatt az ott elhelyezett rezgésérzékelő további, többletrezgéseket érzékelne. A zúzottkő ágyazat vizsgálata érdekében azonban mégis elhelyezünk egy érzékelőt, ami majd csak az elemek önmagukban történő viszonyításában fog eredményt adni. Ez a rezgésérzékelő a kaloda egy sarokpontján lesz elhelyezve.

Az alkalmazott mérőeszközök zajjellemzői, a shaker rezgése által keltett szekunder zajlesugárzás, valamint a ventilátor működésének zaja miatt, és a további zavaró hanghatások miatt nincs mód a hangnyomásszint különbségek meghatározására. Kalapácsos gerjesztés esetén (**4. fejezet**) a zajlesugárzás mérhető volt az alkalmazott mérőeszközök és süket szoba nyújtotta lehetőségek következtében. Ilyen módon csak az 5. mérési helyszín hasonlítható össze a 4. fejezetben ismertetett laboratóriumi munkám eredményeivel. Mivel a dinnyési mérései során nem végeztünk rezgésméréseket, úgy az jelenlegi laboratóriumi munkámmal nem vehető majd össze. Az ágyazatból származó rezgések különböző módon történő mérése és a laboratóriumban nem mérhető hanglesugárzások hiányában, a két mérés csak a sínfej és keresztalj rezgésén keresztül hasonlíthatók össze. Az összehasonlítások természetesen nem számszerű adatként történnek, hanem a frekvenciatartományokban produkált eredmények hatásán keresztül. A laboratóriumi mérések sorrendjét a **6.3. táblázatban** ismertettem. A sorrend a minél hatékonyabb munka érdekében került megtervezésre.

6.3. táblázat – Laboratóriumi mérések tervezett sorrendje

Sorszám	Sín	Vasbetonalj	Aljlapucs	Sínleerősítés	Kamraelem
1. mérés	54 E1 (F)	LM-GEO	-	GEO	Sofidon-F
2. mérés	54 E1 (F)	LM-GEO	-	GEO + Skl-24	Sofidon-F
3. mérés	54 E1	LM-GEO	-	GEO	-
4. mérés	54 E1	LM-GEO	-	GEO + Skl-24	-
5. mérés	54 E1 (F)	LM-GEO	FRT-USP	GEO	Sofidon-F
6. mérés	54 E1 (F)	LM-GEO	FRT-USP	GEO + Skl-24	Sofidon-F
7. mérés	54 E1	LM-GEO	FRT-USP	GEO	-
8. mérés	54 E1	LM-GEO	FRT-USP	GEO + Skl-24	-
9. mérés	54 E1 (F)	LM-S	-	W 21	Sofidon-F
10. mérés	54 E1 (F)	LM-S	-	W 14	Sofidon-F
11. mérés	54 E1	LM-S	-	W 21	-
12. mérés	54 E1	LM-S	-	W 14	-
13. mérés	54 E1 (F)	LM-S	FRT-USP	W 21	Sofidon-F
14. mérés	54 E1 (F)	LM-S	FRT-USP	W 14	Sofidon-F
15. mérés	54 E1	LM-S	FRT-USP	W 21	-
16. mérés	54 E1	LM-S	FRT-USP	W 14	-
17. mérés	60 E1 (F)	L4	-	Skl-1	Sofidon-F
18. mérés	60 E1 (T)	L4	-	Skl-1	Sofidon-T
19. mérés	60 E1 (S)	L4	-	Skl-1	STRAILastic_A inox 2.0
20. mérés	60 E1 (FRT)	L4	-	Skl-1	FRT-RCP
21. mérés	60 E1 (F)	L4	FRT-USP	Skl-1	Sofidon-F
22. mérés	60 E1 (T)	L4	FRT-USP	Skl-1	Sofidon-T
23. mérés	60 E1 (S)	L4	FRT-USP	Skl-1	STRAILastic_A inox 2.0
24. mérés	60 E1 (FRT)	L4	FRT-USP	Skl-1	Frankó Pali

7. Értékelések, összehasonlítások, megállapítások

A kapott eredmények helyes értékeléséhez érdemes megjegyezni, hogy a 2 dB különbséget akkor lehet füllel érzékelni, ha az érzékelés közvetlenül egymás után történik. 3 db már hallható, 5 dB pedig igen jelentős zajcsökkenés lenne. Ennek az erősen változó értékelésnek az az alapja, hogy az emberi fül nemlineáris, és ezt az összefüggést a logaritmikusan képzett hangnyomásszinttel fejezzük ki. Ebből következik az, hogy kis dB-csökkenés szinte semmilyen hatást nem eredményez, miközben 5 dB már elég jelentős, egy 20 dB-es csökkenés pedig gyakorlatilag a forrás kikapcsolásával egyenértékű.

A helyszíni mérések eredményeit, a vizsgált pályaszerkezetek átlagos eredő zajszintjére gyakorolt hatását együttesen a **7.1. táblázatban** foglalom össze. Szembetűnő, hogy a várakozások ellenére a hatások csekélyek, több esetben pedig az elvárt csökkenés helyett erősítést mutatnak. Az adatok szórása meglehetősen nagy.

7.1. táblázat – Helyszíni mérések során vizsgált pályaszerkezeti elemek hatásának összefoglaló táblázata

Vizsgált felépítményi elem	Referencia	Eredő átlagos hangnyomásszint csökkenés, dBA	
		7,5 m távolságban	25 m távolságban
Új sín	Régi sín	-1,17 ± 1,52	
Aljpacucs	Aljpacucs nélkül	1,47 ± 1,77	
W 14	Geo r.	-0,05 ± 1,41	
W 21	W 14	0,53 ± 2,34	0,86 ± 1,19
Kamraelem	Kamraelem nélkül	-1,73 ± 0,65	

A szemléletesség érdekében a táblázatban zöld és piros színnel jelöltem a csillapításokat és erősítéseket. A hatások egyértelműen elenyészőek. Zajcsillapításban azok az elemek vannak befolyással, amik közvetlenül a sín és kerék kapcsolatában aktívak. Ez a helyszíni mérések alapján az új sín és a beépített kamraelem hatása. A sín kamrájába helyezett elemek a kerék és sín kapcsolatából rezgésbe került síngerinc rezgési energiáját alakítják át hővé nagy belső súrlódásuk révén. Mindenki számára világos, hogy a sín és kerék kapcsolatát azok állapotai határozzák meg, így az új, még nem kopott sín hatása mindenki számára egyértelmű. A kerekek simábban, gördülékenyebben futnak, az érintkezési felület biztosabb és kevésbé lépnek fel a járművek szabálytalan mozgásai és az azokból származó káros hatások. A W 14-es rendszerű Skl-14-es szorítórugóval ellátott sínleerősítésnek az átlagos hangnyomásszint csökkentésére egyáltalán nincs hatása a Geo rendszerű sínleerősítéssel

szemben. Érdekes, hogy azok az elemek, amelyektől csillapítást vártunk nem bizonyultak hatékonyak. A beépített aljpacucs és W 21-es rendszerű sínleerősítés erősítő hatása figyelhető meg a hangnyomásszintekre. Mindkét mérés eredménye arra utal, hogy az aljpacucs és a rugalmas közbetéttel beépített W 21-es rendszerű sínleerősítés valamilyen mértékben a keresztaljakat és sánt függetleníti a teljes rendszertől, így azok könnyebben jönnek rezgésbe, ami azt eredményezi, hogy az általuk lesugárzott hangenergia mennyisége is növekedik. Azonban mindkét felépítményi elemnek az ágyazat és a talaj felé mutatott rezgésátvitelben rezgéscsillapító hatását lehetett kimutatni: a legtöbb frekvenciasávban jelentősen csökkentek általuk a rezgések. Az elemek rezgéscsillapításban elért eredményeit a **7.4. táblázat** foglalja össze.

Az eredmények nagy szórást mutatnak. A szórás arra utal, hogy a különböző összeállítású szerelvények elhaladása során más-más csillapító/erősítő értéket produkál az adott helyszínen vizsgált felépítményi elem. A **7.1. táblázat** eredményei az adott helyszínen felvett összes, a mérőpontoknál elhaladt vonat eredményeinek átlagát mutatja. A vonatösszetétel azonban minden vonalon más, valamint a járműállomány életkora is nagy szórást mutat Magyarországon. A **7.2 táblázatban** az elemek Magyarországon legmodernebb motorvonatok elhaladására gyakorolt hatását foglalom össze, a **7.3. táblázatban** pedig a tehervonatokéra.

7.2. táblázat – Helyszíni mérések során vizsgált pályaszerkezeti elemek hatása Flirt motorvonatok elhaladása során

Vizsgált felépítményi elem	Eredő átlagos hangnyomásszint csökkenés, dBA	
	Flirt	dupla Flirt
Új sín	-1,24 ± 1,69	-2,40 ± 1,31
Aljpacucs	-	-
W 14	-	-
W 21	-3,20 ± 0,85	0,23 ± 1,99
Kamraelem	-	-2,27 ± 0,40

7.3. táblázat – Helyszíni mérések során vizsgált pályaszerkezeti elemek hatása tehervonatok elhaladása során

Vizsgált felépítményi elem	Eredő átlagos hangnyomásszint csökkenés, dBA
	Tehervonat
Új sín	-0,23 ± 0,60
Aljpacucs	2,50 ± 0,20
W 14	0,77 ± 1,45
W 21	0,23 ± 0,72
Kamraelem	0,50 ± 0,00

Szembetűnő a két táblázat eredményeinek különbsége. Ennek okát a **2.2. alfejezetben** már ismertettem. A vasúti közlekedésből származó zajok valóban függenek a járműállomány állapotától, azok összetételétől. Egy tehervonat elhaladása során bármilyen rugalmas pályaszerkezeti elemet beépíthetünk, annak nem lesz számottevő hatása a vonat által keltett zajra. A pálya megfelelő karbantartásával és helyes építésével a gördülési zajokra lehet hatást gyakorolni, de egyáltalán nem lehet az aerodinamikai, gépészeti és járműszerkezeti zajokra. Az eredmények különbsége abból adódik, hogy egy tehervonat elhaladása során nem a sín és kerék kapcsolata a mértékadó zajforrás, így hiába történne ott csökkenés, annak hatása csak csekély mértékben befolyásolna. Ebben az esetben a felépítményre nem érzékeny komponensek (egyéb mechanikai összetevők és áramlási komponensek) szerepe jobban érvényesül.

A szőnyi mérés során lehetőség volt 25 méter távolságra elhelyezni második mikrofonokat a két mérőponton. A 7,5 és a 25 méter távolságra elhelyezett mikrofonok átlagos hangnyomásszint különbségei láthatók az **5.4. alfejezet 5.20. és 5.21. ábráin** a frekvencia függvényében. A különböző távolságra lévő mikrofonok eredményei azt mutatták, hogy a gördülési zaj a pályához közelebb kisebb mértékben befolyásolta a zajt, mint nagyobb távolságban. Várakozásunkat, miszerint a közelebbi megfigyelő ponton erősebb a kerék és sín kapcsolatból származó hatás, távolabb pedig a felépítménytől független zajok, a járműszekrényből, a gépészeti részekből, illetve az áramló levegőből származók a mértékadók, a mikrofonok által mért eredmények cáfolták.

Az elemek mért rezgés- és zajjellemzői szoros összefüggésben állnak egymással. A zajszintek változásai szükségszerű következményei a mérőhelyek által mért rezgéseknek. A sínfej alatt, keresztaljon, illetve az ágyazat melletti talajon elhelyezett érzékelők által mért, a vizsgált elemek rezgéshatásainak eredményeit a **7.4. táblázat** foglalja össze.

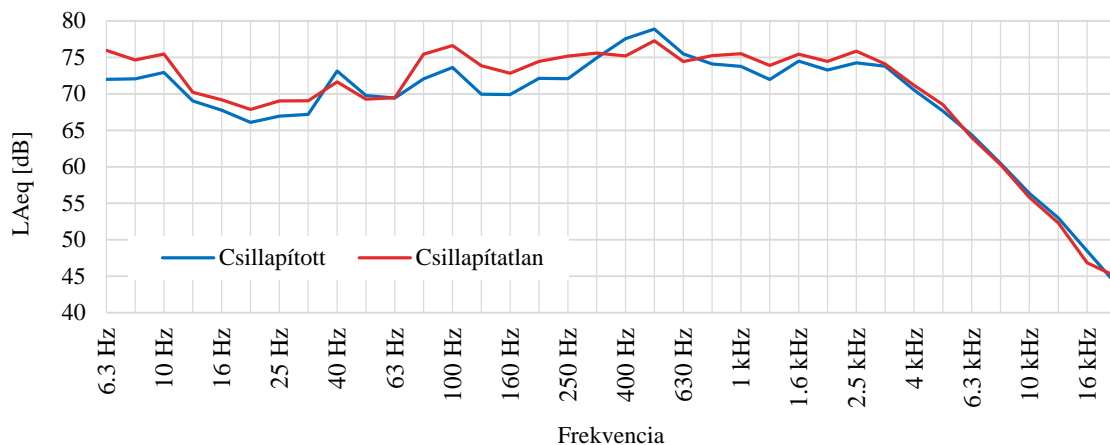
7.4. táblázat – Helyszíni mérések során vizsgált pályaszerkezeti elemek hatása a rezgésekre (jelölések: - csillapítás; + erősítés; 0 /-/- nincs hatás, kismértékű csillapítás; 0 /+/- nincs hatás, kismértékű erősítés; n.a. nem áll rendelkezésre adat)

Vizsgált felépítményi elem	Referencia	Rezgéscsillapítás		
		Sín	Keresztalj	Talaj
Új sín	Régi sín	-	-	-
Aljlapucs	Aljlapucs nélkül	+	+	-
W 14	Geo r.	0 /-/-	0 /+/-	0 /+/-
W 21	W 14	n.a.	-	-
Kamraelem	Kamraelem nélkül	n.a.	n.a.	n.a.

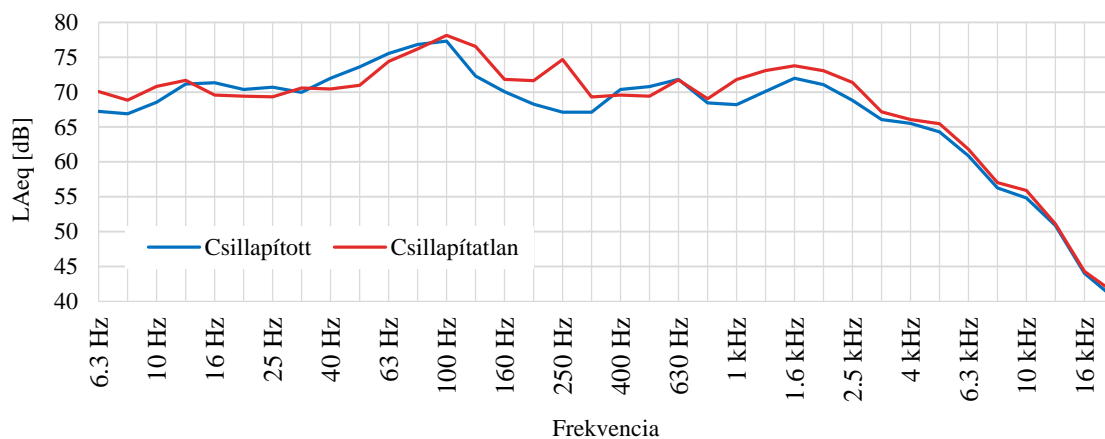
Az 5. mérési helyszínen, Dinnyésnél a kamraelemek vizsgálata során csak zajméréseket végeztünk el, ezért rezgéscsillapításban elért eredmények nem állnak rendelkezésemre. A mért adatokból látható, hogy az új sínnek mindhárom helyen rezgéscsillapító hatása van, ami a zajcsillapításban is már megmutatkozott, és az ott ismertetett okok miatt a kialakuló rezgések is mérséklődnek. A W 14 rendszerű sínleerősítés minimális hatása a Geo rendszerű sínleerősítéshez képest itt is megmutatkozik. A kismértékű erősítő és csillapító hatások arra utalnak, hogy az Skl-14 típusú szorítórugó szorosabb, erősebb lefogást létesít, mint a Geo rendszerű leerősítés, emiatt a sín rezgése csökken, viszont a velük további kapcsolatban lévő felépítményi elemek rezgése növekedik. A talajban mért rezgések jelentősen csökkennek a beépített aljlapucs és rugalmas W 21-es sínleerősítés hatására. Az aljlapucs függetlenítő hatása az ágyazat és a keresztalj között azt eredményezi, hogy a keresztaljak és sín könnyebben rezgésbe jönnek, azonban csillapító hatása megmutatkozik az ágyazatban, majd a talajban. A W 21 rendszerű sínleerősítés rezgéscsökkentő hatása a keresztaljakon is kismértékben jelentkezik. Ennél a mérésnél a sínfej alatt elhelyezett rezgésérzékelő az elhaladások jelentős részénél valamilyen elektromos zavar következtében hibás jeleket mért, így azokat nem lehetett figyelembe venni.

A laboratóriumi mérésekkel célunk, hogy az üzemi állapotban mért zaj- és rezgéshatások eredményeit szabályozott körülmények között is alátámasszuk. A helyszíni mérésekkel valóságos képet kaptunk az egyes elemek befolyásoló hatásairól, így a laboratóriumban ugyanezeket az eredményeket várjuk. A laboratórium bizonyos szempontból optimális mérési körülményeket képes biztosítani, mivel a mérések redukálhatók, szükség esetén többször elvégezhetők és egyből kiértékelhetők. A laboratóriumban alacsony az alapzaj- és rezgés. Másfelől azonban jelentős eltérések jönnek létre a valóságos üzemi körülmények között mérhető rezgésátvitelhez képest: több ponton ható, időben és térben változó gerjesztés helyett egy ponton történő erőbevitelt alkalmazunk, továbbá az alépítmény mechanikai jellemzői eltérnek a laborépület földemének jellemzőitől. Az utóbbi problémát gumiszőnyeggel próbáljuk kompenzálni. Mindezen eltérések következtében a kétféle méréssorozat kvantitatív eredményei nagy valószínűséggel eltérőek lesznek, a tendenciák azonban összhangba hozhatók és olyan esetekben is vizsgálhatók, amelyek helyszíni mérésére nincs – vagy még nincs – lehetőség. A laboratóriumi és helyszíni mérések tendenciáinak összehasonlíthatóságára mutatok példát a következőkben.

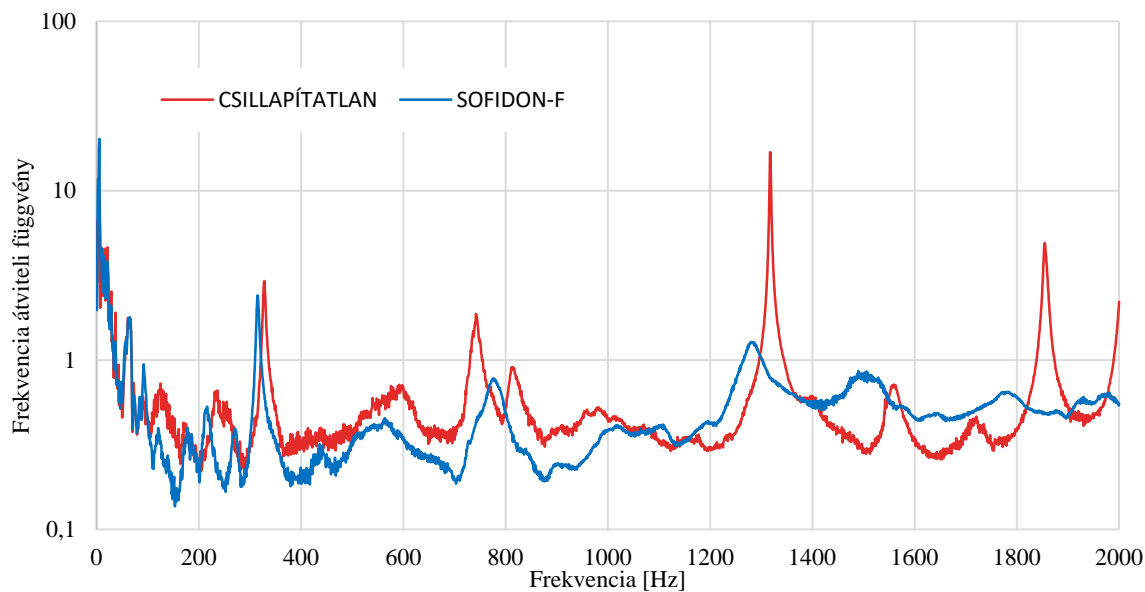
Korábbi laboratóriumi munkám eredménye és az 5. mérési helyszín eredményei láthatók a **7.1., 7.2. és 7.3 ábrán**. A grafikonok a tendenciák összehasonlíthatóságát szemléltetik.



7.1. ábra – Tehervonat elhaladása során mért frekvencia-spektrumok (*Dinnyés*)



7.2. ábra – Flirt motorvonat elhaladása során mért frekvencia-spektrumok (*Dinnyés*)



7.3. ábra – Sofidon-F típusú kamraelem mikrofon által, laboratóriumban mért eredménye

A **7.1. és 7.2. ábra** a helyszíni mérés során felvett hangot, a rezgő közeg részhangjainak spektrumát ábrázolja. Az alkalmazott műszer tulajdonságai szerint 6,3 Hz és 20 kHz tartományban kaptam eredményeket. A laboratóriumban 0 Hz-től 2000 Hz-ig terjedő frekvencia tartományban vizsgáltam. A **7.3. ábra** a laboratóriumi mérés során kapott, Sofidon-F típusú kamraelem hanglesugárzási eredménye látható. A laboratóriumban szoftver segítségével kaptam meg a mikrofon időtartománybeli válaszát, a frekvencia átviteli függvényeket, amelyeket együttesen ábrázolva meghatározható, hogy milyen tartományban működik a mikrofon, mik a gerjesztett pontok együttes eredménye. A grafikonokról a Sofidon-F típusú kamraelem hatékonysága állapítható meg, melyik frekvenciatartományban csillapít és melyikben nem. A **7.3. ábra** csillapítási eredményeit a kiemelkedő csúcsoknál kell értelmezni. Látható, hogy a 600-800 Hz-ig, az 1200-1400 Hz-ig és 1800-2000 Hz-ig terjedő tartományban érhető el jelentős csillapítás ezzel az elemmel. Ellenben kis frekvencián, 200-400 Hz-ig terjedő tartományban nem történik csillapítás. A két különböző típusú vonat, motorvonat és tehervonat, elhaladása során kapott frekvenciaspektrumok azonos tendenciát mutatnak. Az ábrákról leolvasható, hogy 0-tól 100 Hz-ig, valamint 400-tól ~600 Hz-ig terjedő tartományon kívül mindenhol csillapítást eredményez a Sofidon-F típusú kamraelem. A laboratóriumi mérések és a helyszíni mérések így módon, a frekvenciaspektrumokon mutatott tendenciáikon keresztül hasonlíthatók össze. Az előbb ismertetett eredmények a hangnyomásszintek összehasonítását mutatták be, a jelenlegi laboratóriumi mérés és a többi helyszínen elvégzett mérés összevetése csak rezgésspektrumokon keresztül lehetséges (**6. fejezet**).

A laboratóriumban végzett mérések jelenleg is zajlanak, számadatszerű eredményt írásbeli dolgozatom benyújtásáig még nem tudok bemutatni. A laboratóriumi mérési rendszer összeállítása sok energiát igényelt és a mérőrendszer bonyolultsága is további munkát kíván. A mérésekkel lehetőség nyílik a helyszíni, üzemi állapotban történt mérések sikerességének alátámasztására. Az azonos felépítményi szerkezeten vizsgált, különböző összetételű, típusú, geometriájú kamraelemek hatékonysága megállapítható lesz, továbbá a különböző sínleerősítés típusok egymáshoz képesti rezgéscsillapításban elérhető eredményei is. A felépítményi elemek cserélésével több kombináció mérésére nyújt lehetőséget a tervezett méréssorozat, így a legmegfelelőbb pályaszerkezeti összeállítás határozható meg a rezgések csökkentésének szempontjából. Laboratóriumi mérések eredményeit a konferencián, szóbeli előadásom során fogom ismertetni.

8. Összegzés

A vasúti infrastruktúra összes rendszerének és elemének legfontosabb követelménye, hogy a biztonságos üzemi és műszaki feltételeket kielégítse, a folyamatos elvárásoknak eleget tegyen. Az egyre nagyobb követelmények a vasúti közlekedéssel szemben, mint a sebesség emelése és a növekvő igénybevételek kielégítése az innovációk (és természetesen kellő mennyiségű pénzbeli ráfordítások) segítségével teljesíthetők. Ennek ellenére a zaj- és rezgésproblémák mérséklése ezektől elmarad. Dolgozatommal a vasúti pályaszerkezeti elemek befolyásoló hatásaival kerestem a megoldást. Bár a várakozások ellenére a zajcsillapítás terén csekély mértékű hatással voltak az általam vizsgált elemek, azonban a rezgéscsillapításban nagyon is hatékonynak bizonyultak. Igazán azok a felépítményi elemek eredményesek, amelyek közvetlenül a sín és a kerék kapcsolatára vannak befolyással.

A mérések bizonyították, hogy az új, még nem kopott síneknek csökkentő hatása van a zaj- és rezgésterhelésekre. Még egy érv szól amellett, hogy nem szabad elhanyagolni a sínek karbantartását. Tervezési fázisban előregondolkodva alkalmas lehet anti head check profilok választása, a kopások kialakulásának megelőzésére sínkenő berendezés alkalmazása, továbbá megoldás lehet a megelőző jellegű és problémamegoldó síngondozás hatékony köszörűgépekkel. A rugalmas sínleerősítéseknek a zajcsillapításra nem volt kimutatható hatása, azonban alkalmazásuk e téren is javasolt, hiszen rezgéscsillapítás érhető el velük. Várakozások ellenére az aljpacucok hanglesugárzásban kapott eredményei erősítő jellegűek. Ennek ellenére nem szabad elvetni az aljpacucok alkalmazásának fontosságát, hiszen a mérések kimutatták a rezgésekre gyakorolt hatásukat is, amelyek igencsak kedvezőnek bizonyultak. Szem előtt kell tartani azt, hogy a zúzottkőben és talajban okozott rezgéscsillapítással, a vágány romlásának folyamatát lassíthatjuk le, ami igaz az előbb bemutatott valamennyi rugalmas elemre is. Aljpacucok beépítése számos további előnnyel jár, azonban a zajcsökkentésre gyakorolt hatása csak a pálya romlási folyamatának lassításából adódik. A sín kamrájába helyezett elemek zaj- és rezgésre gyakorolt hatásai kedvezőnek bizonyulnak, azonban mindenképp szükség van további üzemi állapotban történő mérésekre, más típusú kamraelemek hatásosságának a megállapítására.

Ezeket az elért eredményeket nem szabad figyelmen kívül hagyni. A vasúti infrastruktúrából származó zaj- és rezgéshatásokat több komponens okozza, amit a vasúti pálya önmaga nem képes csillapítani. Ezt bizonyították a vizsgálatok.

Új, rugalmas pályaszerkezeti elemek beépítése vagy modernebb elemek alkalmazása, a pálya folyamatos karbantartása valóban hatással van a zajok és rezgések kialakulására és azok csillapítására, azonban csekély mértékben. A vasúti infrastruktúra összetettsége miatt nem elegendő az egyoldalú megoldás megtalálása, közös fejlesztésekre van szükség: a járművek oldaláról is intézkedéseket kell tenni. Ezeket a tényeket figyelembe véve nem lehet elhanyagolni a zajvédő falak építését, hiszen úgy tűnik, továbbra is ez az egyetlen védekezési mód a vasúti közlekedésből származó zajok ellen. A pálya állapotának befolyásolásában nem vesz részt, nem csillapítja a pálya elemeiben fellépő rezgéseket és az azokból származó zajokat, hanem egyszerűen egy hatékony védelmet nyújt ellenük. A lakosságot pedig csak a végeredmény érdekli.

Célom, miszerint a vasúti pályában fellépő rezgések és zajok csökkentése elérhető legyen a pályaszerkezeti elemek befolyásolásával teljesült, ugyanis a mérések bizonyították ezt. Építőmérnökként törekednünk kell arra, hogy a beépülő elemek a vasúti pálya tényleges hasznos élettartamát meghosszabbítsák, és ezzel együtt a karbantartási és javítási intézkedéseket csökkentsék. Csak így érhető el a mi oldalunkról egy üzembiztos, biztonságos és folyamatos vasúti közlekedés a környezet legkisebb terhelése mellett. Ezt a feladatot azonban csak az innováció, a haladó szellemű műszaki tervezés és a pálya minden elemének termék-továbbfejlesztése útján lehet megvalósítani.

9. Továbbhaladási irány

A vasúti pálya zaj- és rezgéscsillapításának témája rendkívül összetett és széleskörű. A jövőben tovább folytatom ezen a területen megkezdett munkámat. TDK dolgozatom folytatásaként elvégzem a tervezett laboratóriumi méréseket, amelyek 2016-os Diplomamunkám egyik alappilléret képezik, és összehasonlítom azokat a már elvégzett helyszíni mérésekkel. A jövőben további üzemi állapotban történő méréseket szeretnék elvégezni, több pályaszerkezeti elem befolyásoló hatásának vizsgálatára. Kiemelten szeretnék foglalkozni a beépített aljpacucok hatásaival, hiszen ezeknek a gumielemeknek a helyszínen mért rezgéscsillapítási eredményei a talajban, okot adnak a további mérések elvégzésére. Eddigi munkám során csak egyféle, vasúti pályába beépített kamraelemet volt lehetőségem mérni. Jövőbeni kutatásom során azonban további, más típusú, összetételű és geometriájú kamraelem valódi, üzemi állapotban elérhető csillapítási értékeinek megállapítására szeretnék vizsgálatokat végezni.

Irodalomjegyzék

- [1] Út és Vasútépítési Tanszék: I. Kutatási Részjelentés, „A vasúti közlekedés zajvédelem pályavasúti vonatkozásainak laboratóriumi és helyszíni vizsgálatai” témakörben végzett kutatás-fejlesztési tevékenységgel kapcsolatban, 2016. június 7., Budapest
- [2] Csortos Gabriella: A vasúti pálya zaj- és rezgéscsillapító kamraelemeinek vizsgálata, tervezési körülményeinek megállapítása, BME UVT, Diplomamunka, Budapest (2015)
- [3] Tulipánt Gergely: A közúti és vasúti áruszállítás zajkibocsátásának elemzése és a zajterhelés csökkentési lehetőségeinek vizsgálata, BME KKU, PhD disszertáció, Budapest (2007); http://www.kukg.bme.hu/kukg/doktori/TulipantGergely_phd.pdf, letöltve: 2016.10.15.
- [4] Ludvigh Eszter: Vasúti környezetvédelem, BME UVT, Közlekedési Környezetvédelem c. tantárgy előadási jegyzet, 2., bővített kiadás, Budapest (2003); <http://www.doksi.hu/get.php?lid=6473>, letöltve: 2016.10.16.
- [5] Buskó András: A vasúti zaj – Típusai, vizsgálata és a zaj elleni védekezés (1. rész), Sínek Világa folyóirat, archívum 2011/4. szám, 25-28. oldal; http://www.sinekilaga.hu/documents/archive/Sinek_Vilaga_2011_4.pdf, letöltve: 2015.
- [6] Buskó András: Anomáliák a vasúti zajvédelem területén, OPAKFI Zajvédelmi Szeminárium, előadás, 2015. október 14-16.
- [7] Buskó András, Kiss Balázs: Vasúti zaj és rezgésvédelem 4. előadás, BME UVT, Közlekedési környezetvédelem c. tárgy előadás; http://www.uvt.bme.hu/targyak/k_korny/05osz/ea_BK_4.pdf, letöltve: 2015.03.20.
- [8] Györfi András: Zaj-, rezgés- és sugárzásvédelem, SZE Környezetvédelmi Tanszék, 2011-2012. tanév tavasz 7. előadás; <http://www.sze.hu/~gyorfia/Zaj,%20rezges,%20sugar/eloadasok/7.%20ea.ppt>, letöltve: 2015.03.04.
- [9] Bedő Anett: Zaj-, rezgés- és sugárzásvédelem, SZE Környezetvédelmi Tanszék, 2014-2015. tanév tavasz 3. előadás; http://www.sze.hu/~bedoa/Levelez/LGB_KM015_1/3.ea_h.pdf, letöltve: 2015.03.04.
- [10] Buskó András: A vasúti zaj – Zajpanaszok kezelése (2. rész), Sínek Világa folyóirat, archívum 2012/1. szám, 15-18. oldal; http://www.sinekilaga.hu/documents/archive/Sinek_Vilaga_2012_1.pdf, letöltve: 2015.
- [11] Zöldi Péter: A zajvédő falak közé zárt világ, Indóház Közlekedési Lap- és Könyvkiadó online közlekedési, környezetvédelmi és utazási hírportálja, 2014.06.30.; <http://iho.hu/hir/a-zajvedo-falak-koze-zart-vilag-140630>, letöltve: 2016.10.16.
- [12] CDM Magyarország Zaj- és Rezgéscsillapítási Rendszerek Kft.; CDM-USP Under Sleeper Pad (System Data Sheet) http://cdm.eu/data_sheets/CDM-USP.pdf, letöltve: 2015.03.04.
CDM-BAM Ballast Mat (System Data Sheet) http://www.cdm.eu/data_sheets/CDM-BAM.pdf, letöltve: 2015.03.04.
Horváth Zoltán: CDM rezgéscsillapítási rendszerek, 2008.01.29.
- [13] Sárík Veronika: Vasútépítési aljlapucskok vizsgálata, BME UVT, TDK dolgozat, Budapest (2014); <http://tdk.bme.hu/EMK/DownloadPaper/Vasutepitesi-aljlapucskok-vizsgalata>, letöltve: 2015.03.20.
- [14] Dr. Kazinczy László: Sínleerősítések, BME UVT, Közlekedési létesítmények pályaszerkezeti c. tantárgy, Vasúti pályaszerkezetek előadás, 2.3.0. Sínleerősítések; http://www2.uvt.bme.hu/kazinczy/index.php?d=/.1.%20Oktat%E1si%20anyagok_/1.1.%20E1%F5ad%E1sok_/1.1.2.%20K%F6zleked%E9si%20I%E9tes%EDtm%E9nyek%20p%E1lyaszerkezeti%20-%20Vas%FAti%20p%E1lyaszerkezetek_, letöltve: 2016.10.16.
- [15] Dr. Kazinczy László: Közlekedési létesítmények pályaszerkezeti, BME UVT, segédlet a BME Építőmérnöki Kar hallgatói részére, jegyzet; http://www2.uvt.bme.hu/kazinczy/1.%20Oktat%C3%A1si%20anyagok_/1.2.%20Jegyzetek_/2.%20K%C3%B6zleked%C3%A9si%20I%C3%A9tes%C3%ADtm%C3%A9nyek%20p%C3%A1lyaszerkezetek_/2.%20Vas%C3%BAti%20p%C3%A1lyaszerkezetek_.pdf, letöltve: 2016.10.16.
- [16] Sínleerősítés: GEO rendszerű leeresztés, Wikipédia, a szabad enciklopédia; <https://hu.wikipedia.org/wiki/Sínleerősítés>; letöltve: 2016.10.16.

- [17] Dr. Kazinczy László: A bordás GEO alátétlemezes vasúti sínleerősítések korszerűsítése az új fejlesztésű VOSSLOH Sk1-24 típusú szorítókengyelekkel, BME UVT, Műszaki szemle, 2010. (13. évf.), 49. sz., 9-15. oldal;
http://epa.oszk.hu/00000/00028/00041/pdf/musze_EPA00028_2010_49_09-15.pdf, letöltve: 2016.10.16.
- [18] Vossloh Fastening Systems GmbH: Produkte/ Convetional Rail/ Broschüren (System W 14, W 21, KS 24);
http://www.vossloh-fastening-systems.com/de/produkte_2015/anwendungsbereiche/conventional_rail/conventional_rail_1.html, letöltve: 2016.10.16.
- [19] Dr. Kazinczy László: egyetemi docens anyagai, 6. Információs anyagok/ 6.2. Sínleerősítések, 6.2.1. VOSSLOH sínleerősítések, 6.2.1.3. VOSSLOH sínleerősítések betonraljon (01. W 14. pdf, 03. W 21.pdf);
http://www2.uvt.bme.hu/kazinczy/index.php?d=.%20Inform%20E1ci%20F3s%20anyagok_/6.2.%20s%20EDnleer%20F5s%20EDt%20E9sek_/6.2.1.%20VOSSLOH%20s%20EDnleer%20F5s%20EDt%20E9sek_/6.2.1.3.%20VOSSLOH%20s%20EDnleer%20F5s%20EDt%20E9sek%20betonaljon_, letöltve: 2016.10.16.
- [20] Wirthwein AG – ‘Wirthwein and the Railway’ (Competences and Products);
http://www.wirthwein.de/fileadmin/media/pdfs/Bahnprospekte/Bahnmagazin_en_2014.pdf, letöltve: 2016.10.27.
- [21] Dr. Harald Loy: Rezgés csökkentés keresztaljátétekkel – Döntő fontosságú a felhasznált anyag megválasztása, Innorail magazin, I. évfolyam, 2014/2. szám, 22-27. oldal;
<http://innorail.hu/rezgescsokkent-es-keresztaljalat-ekkel/>, letöltve: 2015.11.15.
- [22] Getzner Werkstoffe GmbH: Rugalmas poliuretán komponensek;
www.ktenet.hu/download.php?edid=472, letöltve: 2015.11.15.
- [23] Lábatlani Vasbetonipari Zrt. – Aljpacucos betonraljak gyártása a Lábatlani Vasbetonipari Zrt.-nél;
<http://www.railone.hu/index.php/aljpacucos-betonralj>, letöltve: 2016.10.27.
- [24] Frankó Rubber Technology Kft. – Resilient chamber profile for Vignol rail;
<http://frankorubber.eu/termek.php?t=9>, letöltve: 2016.10.28.
FRT Kft. – Under Sleeper Pad;
<http://frankorubber.eu/termek.php?t=10>, letöltve: 2016.10.28.
- [25] Csontos Gabriella: A vasúti pálya zaj- és rezgéscsillapító kamraelemeinek elméleti és laboratóriumi vizsgálata, BME UVT, TDK dolgozat, Budapest (2014);
<http://tdk.bme.hu/EMK/utepites-vasutepite/A-vasuti-palya-zaj-es-rezgescsillapito1>
- [26] KRAIBURG STRAIL GmbH & Co. KG – STRAILastic: The noise-absorber system, Track damping systems, STRAILastic_A – noise Absorber;
http://www.strail.de/uploads/media/STRAILastic_A_Broschuere_01.pdf, letöltve: 2014.10.08.
http://www.strail.de/uploads/media/STRAILastic_A_Brochure_08.pdf, letöltve: 2016.10.28.
- [27] Magyarország vasúti személyszállítási térképe – MÁV-START Vasúti Személyszállító Zrt.
<https://www.mavcsoport.hu/file/34181/download?token=upxjrfmY>, letöltve: 2016.10.29.
- [28] Út és Vasútépítési Tanszék: II. Kutatási Részjelentés, „A vasúti közlekedés zajvédelem pályavasúti vonatkozásainak laboratóriumi és helyszíni vizsgálatai” témakörben végzett helyszíni vizsgálatokkal kapcsolatban, 2016. október 21., Budapest (Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék Akusztikai és Stúdiótechnikai Labor munkatársainak vizsgálatai)
- [29] Budapest – Kunszentmiklós-Tass – Kelebia – vasútvonal;
<https://hu.wikipedia.org/wiki/Budapest%E2%80%93Kunszentmikl%C3%B3s-Tass%E2%80%93Kelebia-vas%C3%BAtvonal>, letöltve: 2016.10.24.
Székesfehérvár – Gyékényes – vasútvonal;
<https://hu.wikipedia.org/wiki/Sz%C3%A9kesfeh%C3%A9rv%C3%A1r%E2%80%93Gy%C3%A9k%C3%A9nyes-vas%C3%BAtvonal>, letöltve: 2016.10.24.
Hatvan – Miskolc – Szerencs – Sátoraljaújhely/Nyíregyháza – vasútvonal;
<https://hu.wikipedia.org/wiki/Hatvan%E2%80%93Miskolc%E2%80%93Szerencs%E2%80%93S%C3%A1toralja%C3%BAjhely/Ny%C3%ADregyh%C3%A1za-vas%C3%BAtvonal>, letöltve: 2016.10.24.
Budapest – Hegyeshalom – Rajka – vasútvonal;
<https://hu.wikipedia.org/wiki/Budapest%E2%80%93Hegyeshalom%E2%80%93Rajka-vas%C3%BAtvonal>, letöltve: 2016.10.24.

Ábrajegyzék

2.1. ábra	Vasúti közlekedésből származó zajok és rezgések [6].....	11
2.2. ábra	A vasúti közlekedési zaj [6].....	13
2.3. ábra	A kerék és a sín kapcsolatából származó hatások okai [9].....	14
2.4. ábra	A sín és a kerék kapcsolatából keletkező zajok és rezgések mechanizmusa [4].....	16
2.5. ábra	Színusz függvény szerinti erővel gerjesztett, csillapított lengő tömeg rezonancia görbéi, különböző Q értékek esetén [1]	18
2.6. ábra	A pályaszerkezeti elemek (sín-alj, alj-zúzottkő ágyazat) lengésvizonyai [1].....	19
2.7. ábra	Aktív és passzív zaj- és rezgéscsillapítási lehetőségek [11].....	20
3.1. ábra	Vasúti pályaszerkezet felépítése [12].....	22
3.2. ábra	Rugalmas pályaszerkezeti elemek beépítésének lehetőségei [12].....	23
3.3. ábra	Vaszary-féle egyszerűsített avulási modell [13]	24
3.4. ábra	Sínleerősítések csoportosítása.....	26
3.5. ábra	GEO rendszerű, MÁV fővonalai sínleerősítés betonaljra [13]	27
3.6. ábra	GEO rendszerű sínleerősítés részei (ábramegnevezések: anyacsavar, kettős csavarbiztosító gyűrű [Grower-gyűrű], leszorítólemez [kengyel, köröm], leszorítócsavar [szár], alátétlemez, laposvállú síncsavar) [15]	27
3.7. ábra	A KS 24 rendszerű, alátétlemezes sínleerősítés (Skl-24 típusú szorítórugóval), faaljra szerelve [18].....	28
3.8. ábra	Skl-14-es szorítókegnyel előszerelve (balra) és szerelt állapotában (jobbra) [19].....	29
3.9. ábra	W 14-es rendszerű sínleerősítés részei (ábramegnevezések: síncsavar, sín, Skl-14-es szorítókegnyel, nyomtávartó szögelem, rugalmas közbetét, menetes műanyag betét) [19].....	29
3.10. ábra	Skl-14-es szorítókegnyel erő-elmozdulás diagramja [18].....	30
3.11. ábra	Skl-21-es szorítókegnyel szerelt állapotában (balra) és előszerelve (jobbra) [19].....	30
3.12. ábra	Skl-21-es szorítókegnyel erő-elmozdulás diagramja [19].....	30
3.13. ábra	A tehereloszlás aljlapucscsuklók és aljlapucscsuklók nélkül [22]	34
3.14. ábra	Hézag kialakulása az aljlapucscsuklók nélküli betonalkjak alatt, konzisztensebb behajlás modellezése [21].....	35
3.15. ábra	Aljlapucscsuklók anyagfajtáinak alkalmazhatósága [13].....	36
3.16. ábra	Alul Sylomer® USP-vel ellátott vasbeton aljlap telepítése [21]	37
3.17. ábra	Aljlapucscsuklók anyagának rétegződése [21]	38
3.18. ábra	FRT-USP típusú aljlapucscsuklók rajza [24]	39
3.19. ábra	Felszerelt sínkamra elemek melletti zavartalan munkavégzés (STRAILastic) [27].....	41
3.20. ábra	STRAILastic_A inox [27].....	42
3.21. ábra	STRAILastic_A synth [27]	42
3.22. ábra	STRAILastic_A inox 2.0 [27].....	42
3.23. ábra	Sofidon-F pályába építve [Pásztor József].....	43
3.24. ábra	Sofidon-F keresztmetszeti ábrája [Pásztor József].....	43
3.25. ábra	Sofidon-T típusú kamraelem kétféle rögzítési módszerrel felhelyezve 60E1 rendszerű sínszállra [saját fotó].....	43
3.26. ábra	Granuflex kamraelem vizsgálati elrendezése 60 E1-es sínrendszeren [saját fotó].....	44
3.27. ábra	FRT-RCP első (jobbra) és második (balra) típusú kamraelem 60 E1 sínrendszeren és azok keresztmetszeti rajza (középen) [24].....	45
4.1 ábra	A laboratóriumban összeállított rendszer, a mérés összehasonlításának alapját képező csillapítatlan sínszáll. Láthatók a sínszállon felcímkézett gerjesztési pontok és a mérések során használt eszközök: az impulzuskalapács, valamint a rezgésérzékelők. [saját fotó].....	47
4.2. ábra	A mérési rendszertől 1 méter távolságra elhelyezett mikrofon [saját fotó].....	47
4.3 ábra	GRANUFLEX Kft. kamraelemeinek mikrofon által mért eredményei	50
4.4 ábra	SPED-M Kft. kamraelemeinek mikrofon által mért eredménye	50
4.5 ábra	STRAILastic_A inox típusú kamraelem mikrofon által mért eredménye.....	50
5.1.a ábra	Helyszíni mérések elvi elrendezése egyvágányú pályán.....	54
5.1.b ábra	Helyszíni mérések elvi elrendezése kétvágányú pályán.....	54
5.2. ábra	Mérési helyszínek (térkép: [27])	55
5.3. ábra	Mérőrendszer vázlatrajza. A mikrofon, a három rezgésérzékelő (sínfej alatt, keresztaljon, ágyazat mellett) és fénykapu elhelyezése	56

5.4. ábra	Sínfej alatt és keresztaljon elhelyezett rezgésérzékelők (<i>Szabadifürdő</i>) [28]	56
5.5. ábra	Mérőállomás (<i>Szabadifürdő</i>) [saját fotó]	57
5.6. ábra	Fénykapuk elhelyezése (<i>Szabadifürdő</i>) [saját fotó]	58
5.7. ábra	Sebesség mérése, fénykapuk által szolgáltatott kompozit mérőjelek [28]	58
5.8. ábra	Egy tipikus szerelvény elhaladása során, a keresztaljon mért rezgés gyorsulás jel effektív értékének időbeli változása. A feldolgozás a piros színnel megjelölt időszakokra történt. A negatív sebességérték Budapest felé haladó szerelvényt jelöl. (<i>Szabadifürdő</i>) [28]	59
5.9. ábra	Referencia mérőpont a 218-as szelvénynél (balra) és az újonnan beépített sínek melletti mérőpont a 222-es szelvénynél (jobbra) [28].....	60
5.10. ábra	Síncsere hatása az átlagos rezgésamplitúdókra [28]	62
5.11. ábra	Síncsere hatása az átlagos hangnyomásszintekre [28]	62
5.12. ábra	Referencia mérőpont az 1096-as szelvénynél (balra) és az aljpuccsal ellátott vágány melletti mérőpont az 1101-es szelvénynél (jobbra) [28].....	64
5.13. ábra	Aljpuccs beépítésének hatása az átlagos rezgésamplitúdókra [28]	65
5.14. ábra	Aljpuccs beépítésének hatása az átlagos hangnyomásszintekre [28]	65
5.15. ábra	Mérőpont és környezete a W 14 sínleerősítés-rendszerű vágány mellett [28]	66
5.16. ábra	GEO/W 14 sínleerősítés-váltás hatása az átlagos rezgésamplitúdókra [28].....	68
5.17. ábra	GEO/W 14 sínleerősítés váltás hatása az átlagos hangnyomásszintekre [28].....	68
5.18. ábra	Mérőpont Szőny és Komárom között az 1003-as szelvényben, W 21 rendszerű sínleerősítéssel ellátott pályaszakaszon [28].....	69
5.19. ábra	W 14/ W 21 rendszerű sínleerősítés váltás hatása az átlagos rezgésamplitúdókra [28]	71
5.20. ábra	A szőnyi mérőhely közeli (7,5 méter távolságra a vágánytengelytől) mikrofonpontjában mért átlagos hangnyomásszint [28].....	72
5.21. ábra	A szőnyi mérőhely távoli (25 méter távolságra a vágánytengelytől) mikrofonpontjában mért átlagos hangnyomásszint [28].....	72
5.22. ábra	12 kilométeres beépített szakasz vége Dinnyés mellett [saját fotó]	74
5.23. ábra	A csillapítatlan (balra) és csillapított vágány (jobbra) melletti mérőhely [saját fotó].....	74
5.24. ábra	Radaros sebességmérő műszer [saját fotó]	75
5.25. ábra	3. vonat – dupla Flirt– elhaladása során mért másodpercenkénti hangnyomásszintek	76
5.26. ábra	9. vonat – IC/gyors – elhaladása során mért másodpercenkénti hangnyomásszintek	77
5.27. ábra	8. vonat – tehervonat – elhaladása során mért másodpercenkénti hangnyomásszintek	78
5.28. ábra	3. vonat – dupla Flirt – elhaladása során mért frekvencia-spektrumok	79
5.29. ábra	9. vonat – IC/gyors – elhaladása során mért frekvencia-spektrumok	79
5.30. ábra	8. vonat – tehervonat – elhaladása során mért frekvencia-spektrumok.....	79
6.1. ábra	Mérési rendszer egyszerűsített elrendezési vázlata oldalnézetben	82
6.2. ábra	Mérési rendszer egyszerűsített elrendezési vázlata felülnézetben.....	82
6.3. ábra	TIRAvib 5220 típusú elektrodinamikus rezgésgerjesztő (shaker) [Dr. Augusztinovicz Fülöp fotója]	84
6.4. ábra	Mérőműszerek egy része (ábramegjelölések: 1. TIRAvib 5220; 2. TB 0140 hűtőventillátor; 3. BAA 1000-E teljesítményerősítő; 4. oszcilloszkóp [Dr. Augusztinovicz Fülöp fotója]	85
6.5. ábra	A mérőeszközök blokksémája	86
6.6. ábra	Az elektrodinamikus rezgésgerjesztő (shaker) felfüggesztése	86
6.7. ábra	Laboratóriumban felépített mérési rendszer.....	87
6.8. ábra	Helyszíni (felső) és laboratóriumi (alsó) mérések blokksémája.....	88
7.1. ábra	Tehervonat elhaladása során mért frekvencia-spektrumok (<i>Dinnyés</i>)	94
7.2. ábra	Flirt motorvonat elhaladása során mért frekvencia-spektrumok (<i>Dinnyés</i>)	94
7.3. ábra	Sofidon-F típusú kamraelem mikrofon által, laboratóriumban mért eredménye	94

Táblázatjegyzék

2.1 táblázat	3. melléklet a 27/2008. (XII.3.) KvVM-EüM együttes rendelethez – A közlekedéstől származó zaj terhelési határértékei a zajtól védendő területeken 8
2.2. táblázat	Vasúti járművek fontosabb zajforrásai csoportosítva [7] 11
2.3. táblázat	Vasúti közlekedés zajszintjét befolyásoló egyes tényezők és hatásuk [8]..... 12
2.4. táblázat	Aktív és passzív zajcsökkentési lehetőségek (a vasúti pálya oldaláról) [10]..... 21
2.5. táblázat	Út- és vasúti pálya környezetével kapcsolatos főbb zajcsökkentési lehetőségek [3]..... 21
2.6. táblázat	Megfelelő beavatkozások a zaj és rezgések csökkentése érdekében [6] 21
3.1. táblázat	Pályaszerkezeti elemek hatása a zaj- és rezgésekre, azok csillapítási lehetőségei 25
3.2. táblázat	Wirthwein AG által gyártott közbetétek [20] 32
3.3. táblázat	Aljlapucok alkalmazásának lehetséges területei 34
3.4. táblázat	GRANUFLEX Kft. kamraelemeinek összetétele 44
4.1. táblázat	~320 Hz frekvencián kialakuló (sínzál) módusalkhoz tartozó kamraelemek rezgéscsillapítási eredményeinek összehasonlítása 49
4.2 táblázat	~780 Hz frekvencián kialakuló (sínzál) módusalkhoz tartozó kamraelemek rezgéscsillapítási eredményeinek összehasonlítása 49
4.3 táblázat	~1315 Hz frekvencián kialakuló (sínzál) módusalkhoz tartozó kamraelemek rezgéscsillapítási eredményeinek összehasonlítása 49
5.1. táblázat	Igénybe vett helyszínek és azok jellemzői 55
5.2. táblázat	Síncsere (új sín) hatásának eredménye a zajszintre vonatva vonatnemenként..... 61
5.3. táblázat	Síncsere (új sín) hatásának eredménye a zajszintre a különböző összeállítású személyvonatok elhaladása során..... 61
5.4. táblázat	Aljlapuc beépítésének eredménye a zajszintre vonatva vonatnemenként 64
5.5. táblázat	W 14 sínleerősítés-rendszerű szakasz és GEO sínleerősítés-rendszerű szakasz közti eredmény a zajszintre vonatkozóan vonatnemenként..... 67
5.6. táblázat	W 21 sínleerősítés-rendszerű szakasz és W 14 sínleerősítés-rendszerű szakasz közti eredmény a zajszintre vonatkozóan vonatnemenként..... 70
5.7. táblázat	W 21-es eredménye zajszintre a W 14-essel szemben a különböző összeállítású személyvonatok elhaladása során..... 71
5.8. táblázat	3. vonat – dupla Flirt – elhaladása során mért hangnyomásszintek különbsége..... 76
5.9. táblázat	9. vonat – IC/gyors – elhaladása során mért hangnyomásszintek különbsége 76
5.10. táblázat	8. vonat – tehervonat – elhaladása során mért hangnyomásszintek különbsége 77
5.11. táblázat	Összesítő táblázat, a Sofidon-F típusú kamraelem zajcsökkentésének végeredménye 78
6.1. táblázat	Méréshez alkalmazott vasúti pályaszerkezeti elemek listája 83
6.2. táblázat	Laboratóriumi vizsgálatok felépítményi kombinációi 83
6.3. táblázat	Laboratóriumi mérések tervezett sorrendje 89
7.1. táblázat	Helyszíni mérések során vizsgált pályaszerkezeti elemek hatásának összefoglaló táblázata..... 90
7.2. táblázat	Helyszíni mérések során vizsgált pályaszerkezeti elemek hatása Flirt motorvonatok elhaladása során 91
7.3. táblázat	Helyszíni mérések során vizsgált pályaszerkezeti elemek hatása tehervonatok elhaladása során..... 91
7.4. táblázat	Helyszíni mérések során vizsgált pályaszerkezeti elemek hatása a rezgésekre (jelölések: - csillapítás; + erősítés; 0 +/- nincs hatás, kismértékű csillapítás; 0 +/- nincs hatás, kismértékű erősítés; n.a. nem áll rendelkezésre adat)..... 92