

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar



A vasútépítési aljlapucskok vizsgálata

Szerző:

Sárik Veronika, építőmérnök hallgató

Konzulens:

Dr. Bocz Péter, okleveles építőmérnök,
egyetemi docens, Út és Vasútépítési Tanszék



2014.

Tartalomjegyzék

| | |
|---|----|
| 1. Vasúti faaljak, betonfaljak kialakulása, előnyök, hátrányok..... | 3 |
| 2. Keresztaljalátétek/Aljlapucskok kialakulása, fejlődése | 5 |
| 3. A keresztaljalátétek főbb előnyei | 7 |
| 3.1. Felépítmény védelme, vágányminőség javítása | 7 |
| 3.2. Élettartam hosszabbítása, fenntartási költségek csökkentése | 9 |
| 3.3. Rezgések csökkentése | 13 |
| 3.4. Hanghatások csökkentése | 20 |
| 4. Anyaghasználat..... | 21 |
| 5. Rögzítési módok | 24 |
| 6. Saját mérések végrehajtása..... | 27 |
| 6.1 Végzett vizsgálatok: | 28 |
| 6.2 "0" jelű, aljlapucsk nélküli betonfal vizsgálata | 29 |
| 6.3 "A" jelű aljlapucskkal ellátott betonfal vizsgálata | 32 |
| 6.4 "B" jelű aljlapucskkal ellátott betonfal vizsgálata | 34 |
| 6.5 A mért eredmények összehasonlítása..... | 36 |
| 6.6 Zimmermann-módszer | 38 |
| 6.7 Kontaktfelület-növekedés | 42 |
| 7. Gazdaságosság, befektetési megtérülés | 46 |
| 8. Összegzés..... | 58 |
| 9. Mellékletek..... | 60 |
| 1. melléklet: XI-es kitérő aljhosszainak összegzése, alkalmazott aljlapucsk mennyiségének és költségeinek számítása, kitérőcsere költségeinek becslése [20] | 60 |
| 2. melléklet: Megtérülési vizsgálat egyenlegének részletezése | 62 |
| 3. melléklet: Ágyazatrostálás költségeinek számítása [21] | 63 |
| 10. Ábrajegyzék | 64 |
| 10. Ábrajegyzék | 64 |
| 11. Táblázatjegyzék | 66 |
| 12. Felhasznált irodalom | 67 |

1. Vasúti faaljak, betonlajak kialakulása, előnyök, hátrányok

A vasútépítés kezdete óta használatos vasútépítési faaljak használata egyértelműen a legkézenfekvőbb és az akkori lehetőségekhez mérten legmegfelelőbb megoldás volt azon feladatok ellátására, melyre azok hivatottak voltak. Ezek elsősorban a sín rögzítése, a nyomtáv biztosítása, a sínről átadódó függőleges, kereszt- és hosszirányú terhek felvétele, a terhek vágánytengelyre merőleges irányú elosztása és átadása az ágyazatra voltak, mely feladatok, bár a vasútépítés, a felhasznált anyagok és eszközök nagyságrendeket fejlődtek a kezdetiekhez képest, változatlanok.

A faaljak azonban számos előnytelen tulajdonsággal rendelkeztek, amelyek miatt az anyagtechnológia fejlődésének köszönhetően felváltották őket a betonlajak. Így a korábbi, még bonyolult fatelítési eljárásokat követően is rövid élettartamúnak számító, kisebb súlyú, ennek következtében kisebb stabilitással rendelkező faaljak helyett, akár azokhoz képest kétszeres-háromszoros tömegű, nagyobb stabilitást és oldallellenállást biztosító, így a hézagnélküli felépítményhez kiemelten előnyös betonlajak nyertek teret, melyek 40-60 éves átlagos élettartamukkal, kiváló és tartós nyomtávbiztosító tulajdonságukkal, kis fenntartási igényükkel és az idő elteltével számos eltérő alakkal, így különböző igényekhez igazodó választási lehetőségek biztosításával a keresztaljak legelterjedtebbjévé váltak.

Bizonyos aspektusok azonban, köszönhetően a fentebb említett igencsak előnyös tulajdonságoknak, háttérbe szorultak a betonlajak térnyerésekor. Ilyenek például a faaljak rugalmassága vagy a faanyag természetéből adódó, kis mértékű penetrációs tulajdonsága, mely biztosította a zúzottkő ágyazat éles sarkainak kismértékű behatolását a faaljak alsó felületébe, ezzel növelve a kontaktpontok számát, a felfekvési terület nagyságát. A beton ezzel szemben sem rugalmassági modulusával, sem penetrációs tulajdonságával nem teszi lehetővé a vágányminőség ilyen jellegű javítását.

A betonlajak, faaljakhoz képesti rugalmas tulajdonságainak elmaradását a sínleerősítések fejlődése részben ellensúlyozni tudta. Ma minden korszerű sínleerősítés szorítórugós (szorítókegyeles) kialakítású, amely azt jelenti, hogy a szorítóelem a sín talpra folyamatos függőleges szorítóerőt ad át. A sín talp alá elhelyezett gumi vagy műanyag sínalátét („rail pad”) tehát egy függőleges irányú rugalmasságot tud adni a sínnek. A leerősítés szorítórugója tolerálni tudja a sínalátét gumi vonatterhelés hatására történő összenyomódását, folyamatosan megfelelő szorítóerővel. Ily módon, a sínleerősítések megfelelő kialakításával a sín és a keresztalj közötti merev kapcsolat rugalmassá válik.

Más a helyzet azonban a beton keresztalj és a zúzottkő közötti kapcsolattal, amely a faaljakhoz képest merev marad. Ez a merevség a zaj- és rezgéscsillapítás, a kontaktfeszültségek és a teherelosztás szempontjából is hátrányos.

Ezen hátrányok mérséklésére, az előnyös tulajdonságok mindinkább érvényre juttatására hoztak létre olyan eszközöket, melyek biztosítják a betonlapok számára is azon pozitív jellemzőket, melyek a faalapok használata során érvényesültek, valamint reagálni tudtak az előretörő vasúti forgalom generálta növekvő tengelyterhelésekre és sebességekre, melyek technikai és gazdasági kihívások elé állították a világ vasútügyi szakembereit. Ezek az eszközök az ún. keresztaljalapok vagy aljlapucskok (USP- under sleeper pad).

2. Keresztaljátétek/Aljlapucscok kialakulása, fejlődése

A keresztaljátét vagy aljlapucsc 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. [\[1\]](#)

Az aljátétek első tesztjei és beépítésük az 1980-as években kezdődött meg.

Az Egyesült Királyságban az 1980-as években elenyésző számú kísérletet végeztek az aljlapucscokon, sikertelenül, az aljátétek a beton aljak alsó felületére történő helytelen rögzítése miatt. Ezt követően nem történt beépítés.

1989-ben, Franciaországban az SNCF laboratóriumában végzett vizsgálatok során a beton kockákat (a keresztaljakat helyettesítendő) bevontak poliuretán réteggel, míg másik kockákat fedetlenül hagyva elvégezték rajtuk a Los Angeles vizsgálatot. A bevont kockákon nem jelentkezett kopás, míg a fedetlen kockákon jelentős mértékű kopás volt észlelhető. A poliuretán anyagú aljátéttel ellátott keresztaljakat továbbá 200 órás Vibrogir kopási vizsgálatnak is kitették, melyet követően sem a zúzottkövön, sem az aljlapucscon nem észleltek kopást.

További vizsgálatokat végeztek a keresztaljak oldallellenállására és zajkibocsátására vonatkozóan, melynél a kezdeti stádiumban nem fedeztek fel jelentős eltérést a hagyományos keresztaljakhoz képest.

Az első beépítés 1989-ben, Ausztriában történt, egy ágyazatnélküli tesztvágányon. A hagyományos, zúzottköves és a betonlemez 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 aljátétek tulajdonságainak és viselkedésének tanulmányozására további rövid kísérleti szakaszokon alkalmazták az aljlapucscokat, majd a 90-es évek elejétől kezdve a beton aljak teljes bevonását felváltotta az alsó felületükre ragasztott poliuretán aljátét. Később, ennek kiváltására kifejlesztették a aljlapucscok keresztaljakra történő rögzítési eljárásának egy új módját, mellyel az aljátéteket közvetlenül a keresztaljak alsó felületére, a vasbeton keresztaljak öntése során, a szilárdulási folyamat alatt rögzítették.

Az első éles üzemben használt beépítés Norvégiában, az osloei metró vonal 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 aljlapucscok beépítését, úgy mint Németország, Ausztria, Franciaország, Svájc vagy Dánia. [\[1\]](#)

Magyarországon 2007-ben a győri állomás közelében, egy átépített műtárgyon a gyalogos aluljárók feletti zúzottkő ágyazat vastagsága nem volt megfelelő mértékű (helyenként az 1500 mm-t sem haladta meg), ezeken a helyeken, mintegy 54 méteren alkalmazták az aljalátéteket. A ragasztás azonban, ami az aljlapucskokat volt hivatott a keresztaljhoz rögzíteni, egy évvel később elengedett, így ezt egy alternatív anyaggal kellett helyettesíteni.

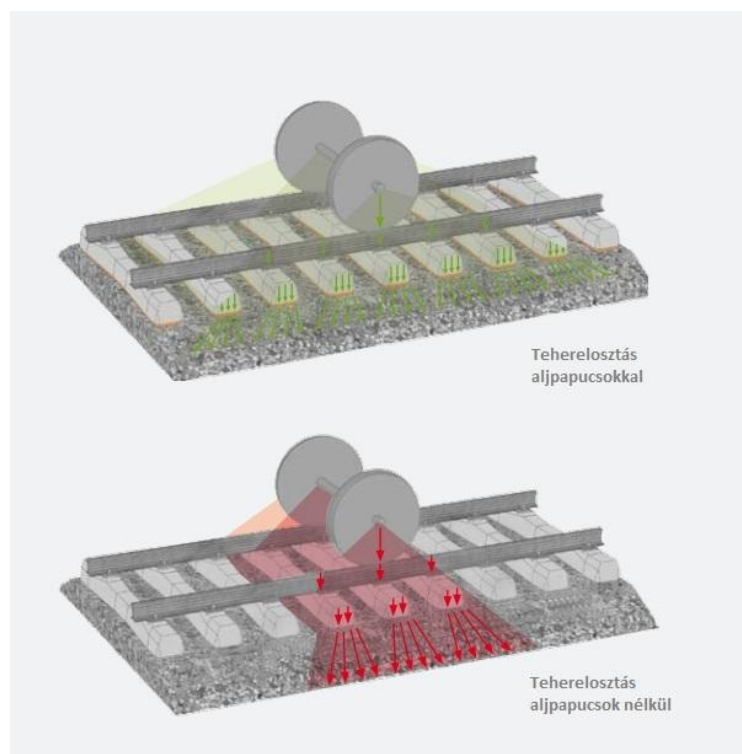
[\[1\]](#) [\[2\]](#)

3. A keresztaljátétek főbb előnyei

A keresztaljátétek használata igen sokrétű előnyt eredményez a vasútépítés és -fenntartás területén. Óvják a felépítményt (különösen a zúzottkövet), így annak élettartamát hosszabbítják, az irány- és fekszínhibák csökkentése miatt csökkentik a fenntartási költségeket, növelik a vágány minőségét, mérséklék a kártékony rezgéseket mind a nyílt vonalon, mind kitérőkben.

3.1. Felépítmény védelme, vágányminőség javítása

A legelterjedtebb felépítményi szerkezet a zúzottkő ágyazatú keresztaljas vágány. A leggyengébb elem ebben a rendszerben egyértelműen a zúzott kő, mely látens dinamikus elmozdulásnak van kitéve. A folyamatos terhelés, a zúzott kő összenyomódása a kövek kopásához és aprózódásához vezet. Ez a jelenség lerontja egyrészt a vágány geometriát, másrészt a víz szabad áramlását az ágyzatban, így egy saját magát erősítő romlási körfolyamatot indít meg. A romlás megelőzéséhez, lassításához aláverési munkálatokat tesz szükségessé. Az aljlapucscok beépítése ezt a folyamatot lelassítja, azoknak különböző pozitív hatásai által. A tengelyterhelés az aljátéteknek köszönhetően nagyobb számú keresztaljra oszlik el, mely az aljlapucscok 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 zúzott kövön (1. ábra).



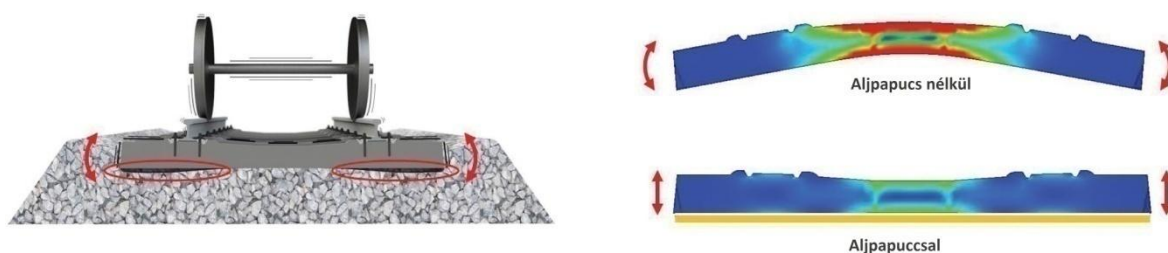
1. ábra- Teherelosztás változása az aljlapucscok beépítése által [3]

Az aljapapucs továbbá, 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, ahogy az az alábbi ábrán látható (1. ábra) [4].



2. ábra Az alj alatti érintkezési felületek [4]

Ez egyrészt biztosítja az ágyazat legfelső rétegének stabilitását, a zúzottkő darabok beágyazódása által, így a betonalkak egyenletesebb felülését és teherátadását is elősegítve mérsékeltőbb vágánysüllyedést, illetve a vágánykomponensek kisebb mértékű igénybevételét eredményezi. Másrészt a beton szilárdságából adódó aprózódási folyamat is nagyban mérsékli, amely a keresztaljalátét nélküli betonalkak alatti hézagok kialakulásáért felelős. Az aljapapucssal ellátott keresztaljak konzisztensebb behajlásának köszönhetően ezen hézagok kialakulása elkerülhető. (3. ábra) [5]



3. ábra Hézag kialakulása az aljapapucs nélküli betonalkak alatt, konzisztensebb behajlás modellezése [5]

Az aprózódás a vágánygeometria gyors leromlásán túl vízvezetési problémákhoz is vezet, hiszen a finomra zúzódó szemcsék eltömítik a zúzott kő közötti járatokat, illetve tovább növelik a vágány merevségét. Tanulmányok szerint a vágánynak plusz rugalmasságot adó elem beépítésével nem csak a zúzottkő ágyazat védelme érhető el, hanem vastagsága is csökkenthető az aljlapucskok beépítése által. Ez különösen műtárgyakon jelentős, akár elérheti a 10 cm-es csökkentést is.

3.2. Élettartam hosszabbítása, fenntartási költségek csökkentése

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 követelmény, amely a sebességi rekordokat tekintve kielégített igénynek tekinthető. Míg 1955-ben a 331 km/h-s sebesség jelentette a világcsúcst, az ezt 100 km/h-val történő felülmúlásához alig 40 évet kellett várni, míg 1993-ban a világrekordot jelentő japán Sinkansen vonat elérte 425 km/h-s csúcsebességét. Ezt követően már csak 15 évbe telt, hogy a francia TGV majd 150 km/h-val felülmúlja ezt (574 km/h). A fejlődés töretlen, az üzemsebességek 300 km/h feletti, a nagysebességű vasút a légi közlekedés komoly ellenfelévé vált.

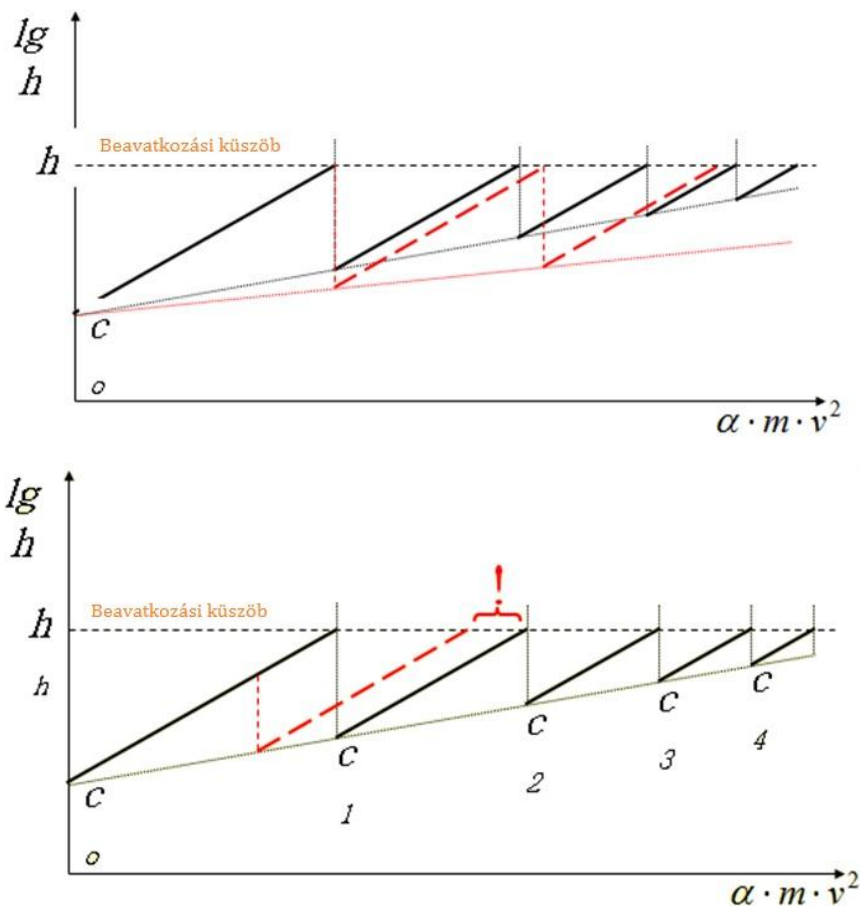
A nagy sebességek azonban igen alacsony hibatűréshez, ennek következtépp magas fenntartási igényekhez vezetnek. Bár a nagy sebességre vonatkozó követelmény alapvetően teljesül, felmerül a használhatóság és a karbantarthatóság kérdésköre. Dr. Peter Veit, a grazi egyetem professzora szerint a megoldás a műszaki és gazdasági fenntarthatóságban rejlik. [4] Olyan életciklus-menedzsment (LCM) stratégiát dolgozott ki, amelyben a minőség változtatása és az életciklusköltségek (LCC) összehangolása biztosítja az infrastrukturális létesítmények fenntarthatóságát. Ennek hatására olyan presztízsű vállalatok, mint az ÖBB Infrastruktur AG az építési és beruházási projektjeinek és fenntartási tervezésének állandó alkotóelemévé tette az életciklus-menedzsmentet.

Az életciklusköltség folyamatának érvényesülésére a karbantartás során a "megfelelő intézkedés a megfelelő időpontban" elv követendő.

"A hosszú távú hálózat-fenntartási stratégia feladata, hogy a létesítmények életciklusköltségeit lehetőség szerint alacsony szinten tartsa. Ehhez három alapvető folyamatot kell összekapcsolni – a karbantartás optimalizálását, a pótlási beruházások helyes időpontjának meghatározását és a pótlási beruházások során optimalizált életciklusú létesítmények létrehozását." [6]

Ez igazolható több modellel, többek között a Vaszary-féle egyszerűsített avulási modellel. (4. ábra) [7] 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

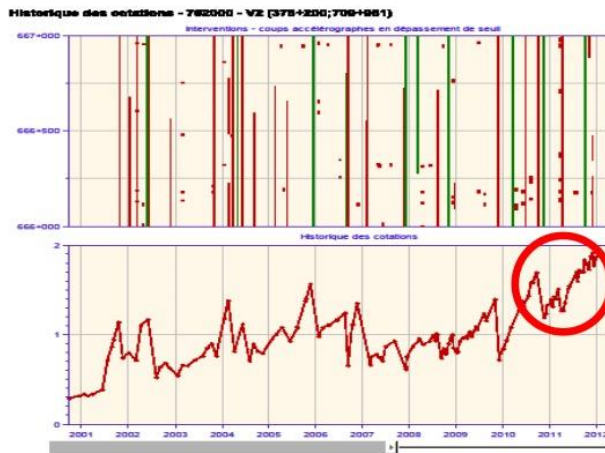
korán, túl későn) végzett aláverés, alépítményjavítás jelentősen csökkentheti a vágány élettartamát, így a megfelelő időpont kitűzéséhez komoly mérési és becslési eljárások szükségesek.



4. ábra Vaszary féle egyszerűsített avulási modell

Ezen a komplex és soktényezős problémában is az aljlapucok kiemelt hasznosítása lehetséges. Dr. Veit 1500 összehasonlított szelvényt érintő mérései alapján a kezdeti minőség a szakaszon a beépített keresztaljátétek hatására 18%-kal növekedett, a romlási ráta 63%-kal csökkent, az aláverési ciklusok 2,75-ös tényezővel való meghosszabbítása az üzemi élettartam 38%-os növekedését eredményezte.

USP nélkül



USP-vel

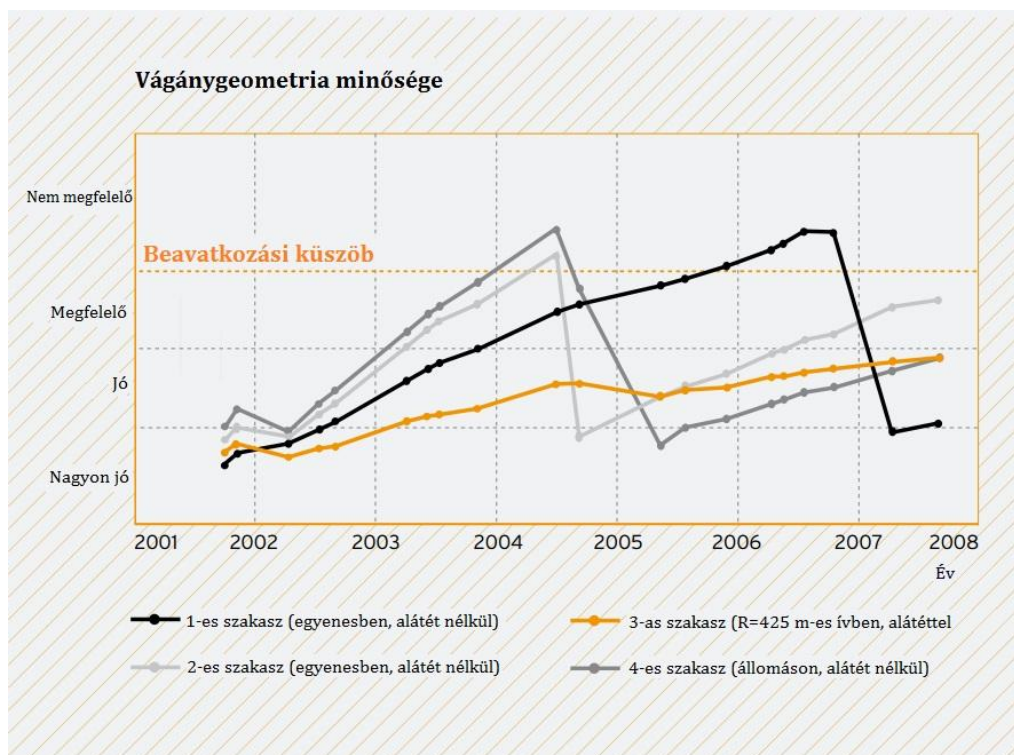


beavatkozási határ: $\sigma_v = 1,3 \text{ mm}$ (1 km) beavatkozási határ : $\sigma_v = 0,6 \text{ mm}$ (1 km)

5. ábra Avulási görbék aljlapucs beépítése nélkül és aljlapucs beépítésével

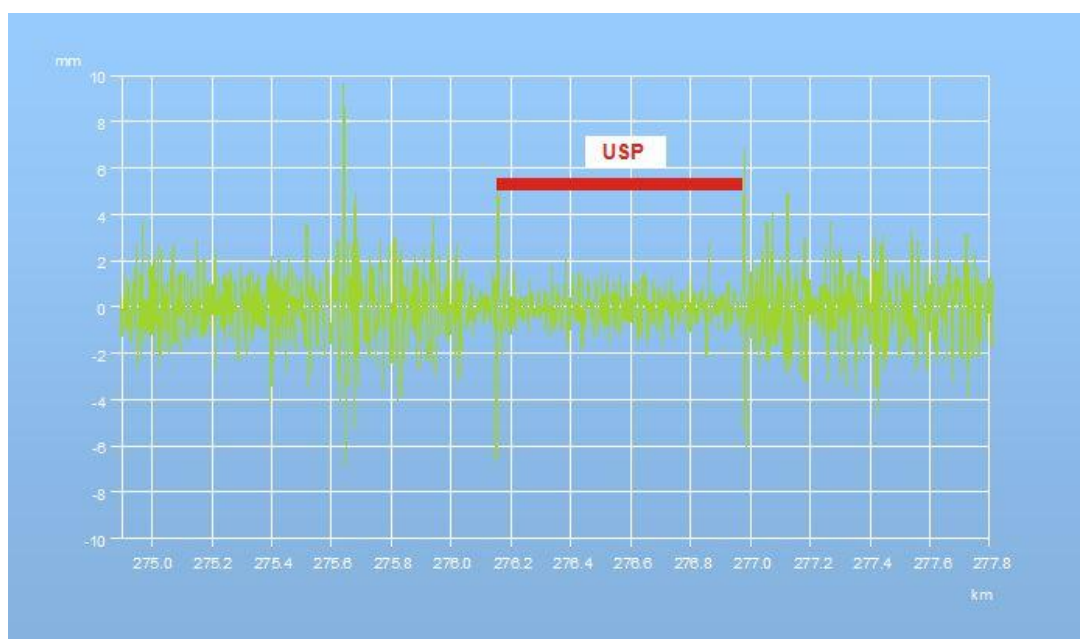
Az fenti ábrán (5. ábra) 10 év mérései láthatók a TGV nagysebességű ($v=320 \text{ km/h}$) vonalának 1 km hosszúságú szakaszán. A felső diagramon az adott évben, adott szakaszon történt pályafelújítási munkák jelennek meg, a piros vonal az aláverést, a zöld vonal a sínkösörülést szimbolizálja. Ezeknek hatására jól látható az alsó, avulási görbében történő javulás, majd újbóli leromlás kezdete. A leromlás a 9-10. évben szignifikánsan felgyorsul, eléri a 2 mm-es hibahatárt. Ezzel szemben az aljalátéttel ellátott vágány esetén a romlás egyértelműen lassabb, a vágány minősége és élettartama vitathatatlanul növekszik a beépített elem hatására. [4]

A jelenséget egyéb, főként szintén Ausztriában zajló kísérletek is igazolták. A 2001 és 2008 között lezajló tesztsorozat eredménye az alábbi vágánygeometria-minőséget ábrázoló diagram is (6. ábra), ahogy különböző szakaszok állapotának időbeli leromlását követték végig. Az aljlapucs nélküli szakaszokon a javulást minden esetben aláveréssel érték el. Jól kivehető, hogy míg mindegyik szakaszt szükséges volt fenntartási munkálatoknak alávetni a vizsgált időintervallumban, a különösen nagy terhelésnek kitett, kissugarú ($R=425 \text{ m}$) ívben a keresztaljalátéttel ellátott betonljas szakaszon erre nem volt szükség, mivel a pálya állapota ezen a szakaszon a teljes vizsgálati időszakban jó minőségű állapotban maradt. [3]



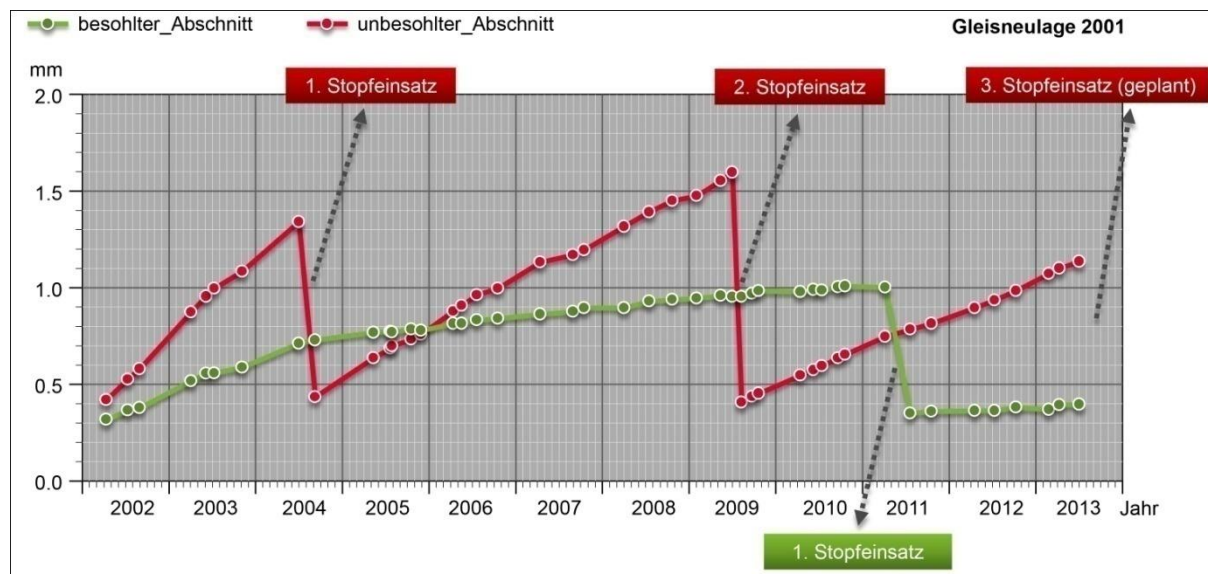
6. ábra Avulási görbék különböző típusú szakaszokra [3]

"A felépítmény süllyedési viselkedésének tekintetében sokatmondó paraméter a hossz-fekszint-jel (EM 250 mérés), mivel ez a jel tükrözi a vágányok tényleges süllyedését. A mozgó átlagolással számított standard eltérés lehetőségét ad a felépítmény változási tendenciáinak szemléletes ábrázolására.



7. ábra Hossz-fekszint-jel mérés

A 8. ábra vágány süllyedési viselkedését ábrázolja a hossz-fekszint-jel standard eltérése alapján, melyet kb. tíz éven keresztül egy kísérleti vágányszakasz aljlapucscsal ellátott, illetve aljlapucsk nélküli keresztaljai mértek". [6]

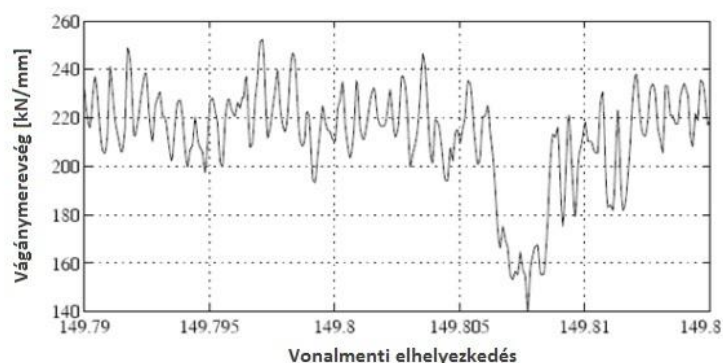


8. ábra Süllyedési viselkedés aljlapucsk beépítésével és nélküle

A szabályozási időközöket a fentiek alapján két- háromszorosukra is meg lehet hosszabbítani a rugalmas elemek alkalmazásával, ami az életciklus-költségek tekintetében igen jelentős előnnyel bír. 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. Az aljlapucskok alkalmazásának gazdasági aspektusait a későbbiekben részletezem.

3.3. Rezgések csökkentése

A felépítményi károsodásokon túl komoly problémákat okoznak a kialakult rezgések a vasúti üzem során. A kettő szoros összefüggésben áll. A sín-kerék kontakterők mechanikai rezgéseket keltenek, melyeket tovább erősítenek egyéb, építési körülménytől független tényezők. Ilyen például az vágány merevsége, mely többé-kevésbé véletlenszerű, köszönhetően az altalaj pontól-pontra változó teherbírási tulajdonságainak, így merevségének. Az ábrán a vágánymerevség mérőkocsival felmért eredményei látszanak, mely jól visszatükrözi annak egyenletlenségét (9. ábra). [8]

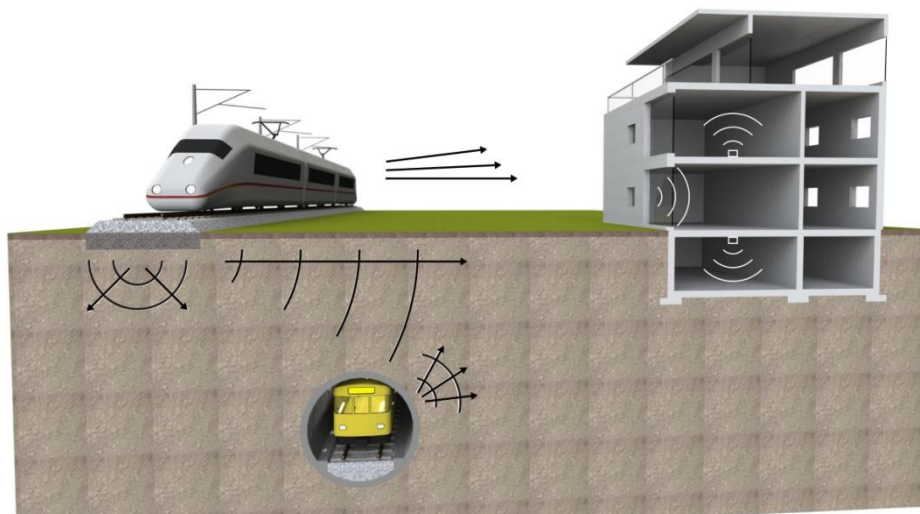


9. ábra Vágánymerevség mérése [8]

Ezen hatáson felül adódik még az olyan pályaelemeken történő áthaladásból generálódó plusz rezgések, mint a kitérők, átszelések vagy az ugrásszerűen eltérő merevségű szakaszokon történő áthaladás, mint a töltés és a híd közötti átmeneti szakasz. Továbbá, a rendes üzemből származó rezgéseken túl további, az előzőekhez adódó, azokat erősítő rezgéseket keltenek a már fentebb említett vágánygeometriai leromlással, mivel a pályán haladó vasúti jármű érzékeli a legkisebb geometriai pályahibát is, melyre a vasúti jármű reagál. Így a pálya és a jármű kölcsönhatása eredményeként a jármű gerjesztett mozgásba jön, melynek során a pályát nagyobb, dinamikus terheléssel veszi igénybe, mely a vágánygeometria leromlásának gyorsulását eredményezi. Az avulási körfolyamat magyarázata is ebben rejlik.

Ezek a rezgések a szerelvény szempontjából is előnytelenek, csökkentik az utazáskomfortot, a szállított árut és a szerelvényt is veszélyeztetik, illetve a pálya környezetét is terhelik a rezgés és zajszennyezés által.

A rezgések és a zajok tekintetében megkülönböztetünk lég- és testhangokat, rezgéseket. Az előbbi a levegőben terjedő hangra, a második szilárd testben, szerkezetben, esetünkben a pályában, talajban és környező épületekben keletkező és terjedő rezgésekre és hangra vonatkozik (10. ábra). Ezek a hatások a pálya használói számára is igen előnytelenek és pálya környezetében élők életminőségét jelentősen leronthatják, mérséklésükre folyamatos vizsgálatok és alternatív lehetőségek felállításán dolgoznak a szakértők. Az akusztikai tudományok egyik ismert alaptétele, hogy a zavaró rezgések csökkentésének leghatékonyabb módja, ha közvetlenül azok kibocsátási forrására koncentrálunk. [5]



10. ábra Rezgések átvitele a vasútvonalak környezetében [5]

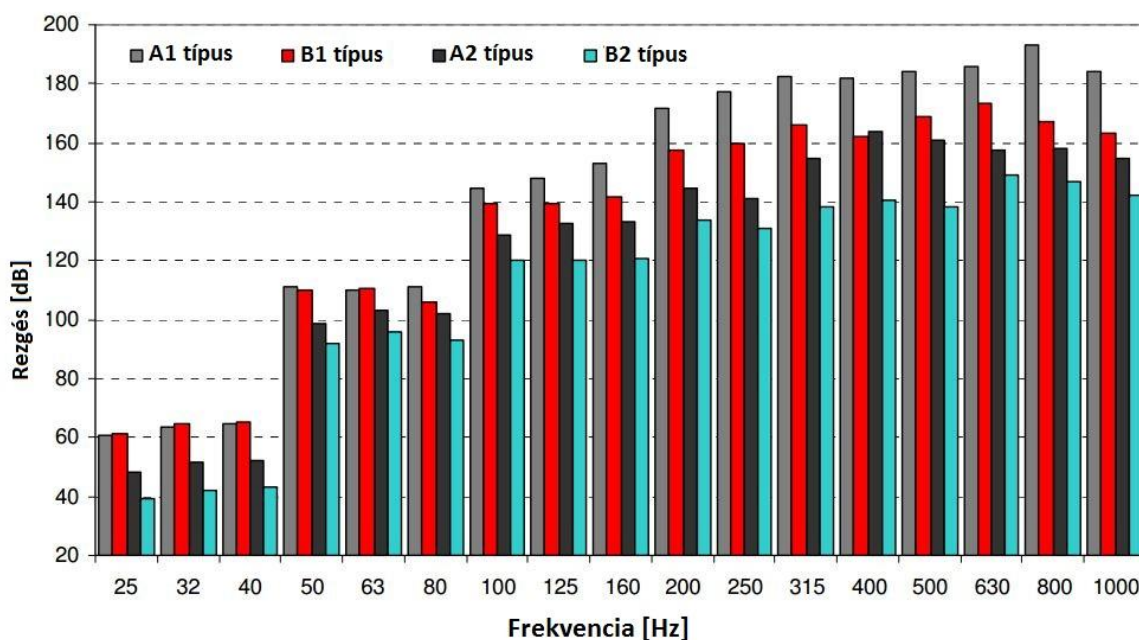
Az aljlapucscok rezgéscsökkentésre vonatkozó hatásait számos mérésorozat vizsgálta, eltérő eredménnyel.

Egy szlovák kutatás az aljlapucsc rezgéscsökkentő hatását vizsgálta különböző mérési elrendezésben. A próbatestek 2-2 betonaljból álltak, ezekhez az 1,2 m-es 60E1-es profilú sínszálakat Skl-1 típusú leerősítés rögzíti. A modellek egyikét aljlapucscsal látták el (2-es modell), a másikat (1-es modell) nélküle vizsgálták. A próbatesteket az első mérés során betonlemezre (A mérés), a második mérés során zúzottkő ágyazatra (B mérés) helyezték és a futási hibákból adódó sín-kerék kontakterőt szimuláló terhelés keltette rezgések mérését végezték (11. ábra).

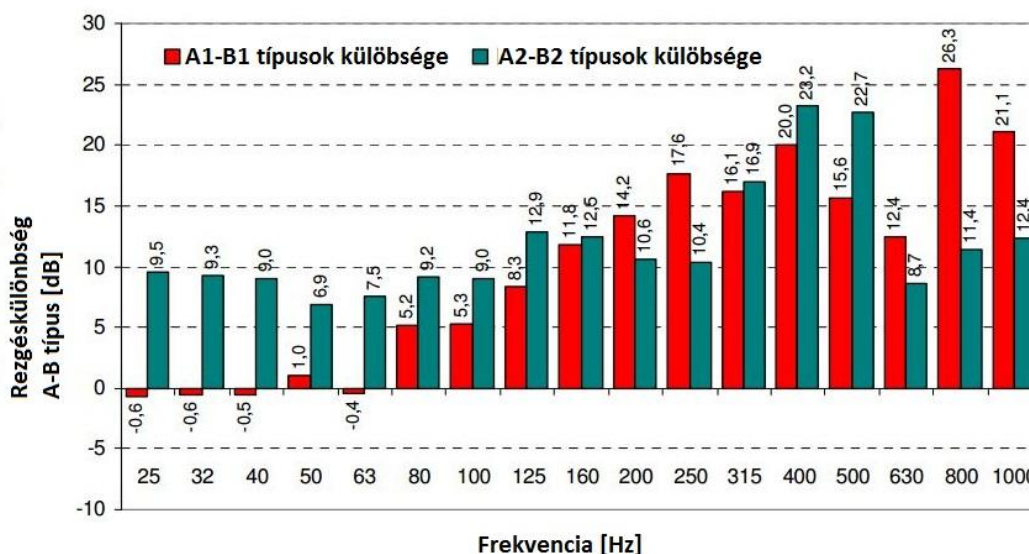


11. ábra A1 és B1 típusú mérés (balra), A2 és B2 típusú mérés (jobbra) [9]

Az eredmények igazolták a várakozásokat. A rugalmas elemek beépítése, ezáltal a vágány merevségének csökkentése mérsékli a rezgések terjedését az aljkról a vágány alsóbb rétegei felé. A rezgésértékek próbatestek közötti összehasonlítása az alábbi diagramok segítségével értelmezhető (12. ábra, 13. ábra). [9]



12. ábra Különböző típusú felépítmenyi rendszerek rezgései[9]



13. ábra Próbatestek rezgésértékeinek különbsége aljlapucs alkalmazásával és nélküle[9]

Az aljlapucscok beépítése az alacsony frekvenciájú rezgések intenzitását kis mértékben erősíthetik. Ezt egyéb kutatások is alátámasztják, okai egyelőre ismeretlenek, a jelenleg folyó kutatások témája. Azonban 40 Hz felett a csillapítás mértéke szignifikánsan nőni kezd.

A relatív különbséget, mely a referenciahelyzettől való eltérést mutatja, beiktatási csillapításnak nevezzük. Esetünkben ez megmutatja a szerkezetben keletkezett zaj 1/3 oktáv-sávós (terc) spektrumában bekövetkezett változást. [1] [3] [5] [10] [11]

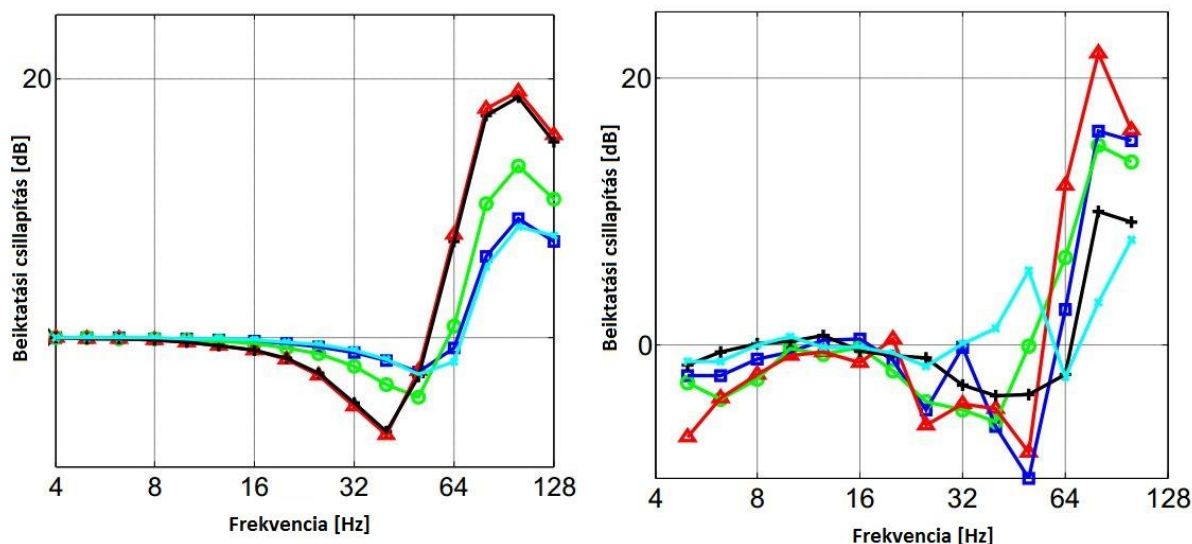
A német RAIL.ONE GmbH és a BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung=Központi Anyagvizsgálati és -kutató Intézet) közös, az Európai Unió Hetedik Keretprogramja keretein belül finanszírozott projektje, a RIVAS (Railway Induced Vibration Abatement Solutions) keretein belül különböző paraméterekkel rendelkező (esetenként kifejezetten a projekt céljaira kifejlesztett) aljakra applikált eltérő tulajdonságú aljlapucscokat vizsgáltak. [10] [11]

Az alábbi táblázat tartalmazza a próbatestek főbb adatait (1. táblázat):

| sleeper /USP type | Supply name | nominal static USP modulus | total USP area, consolid | stat. spring stiffness / tot. sleeper consolid. | Elastic Length consolid. | result. Rail seat load 20t consolid. | ballast-contact pressure consolid. |
|--------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------|---|--------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| [-] | [-] | [N/mm ³] | [cm ²] | [kN/mm] | [mm] | [kN] | N/mm ² |
| B70 G04 | SLN 1010 | 0.096 | 5,900 | 57 | 898 | 33 | 0.14 |
| B 90.2 G13 | SLN 0613 | 0.046 | 7,122 | 33 | 985 | 30 | 0.09 |
| BBS 4 G13 | SLN 0613 | 0.046 | 11,820 | 54 | 868 | 35 | 0.06 |
| BBS 4 G15 | SLN 0315 | 0.029 | 11,820 | 35 | 970 | 31 | 0.05 |
| BBS 3.1 V02 | - | 0.085 | 10,080 | 86 | 774 | 39 | 0.08 |

1. táblázat Próbatestek főbb adatai [11]

A szimulációs görbéket és a mérési eredmények görbéit az alábbi diagramok ábrázolják (14. ábra):



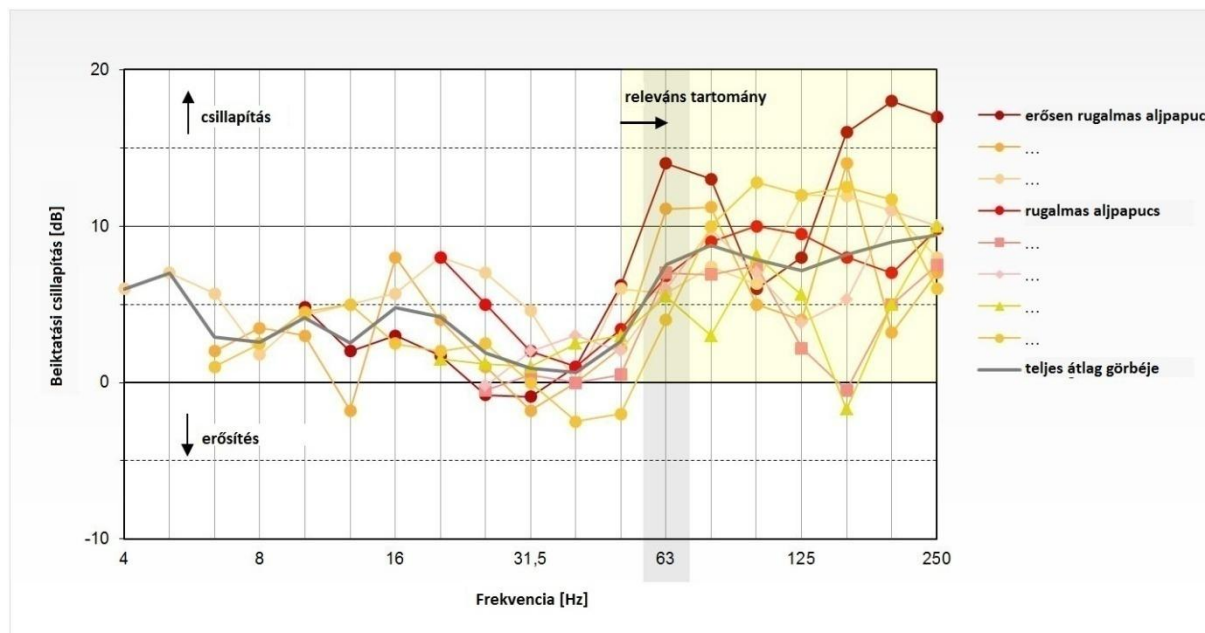
beiktatási csillapítás aljlapucscsal (szimuláció balra, mérés jobbra)
B70 G04, B90.2 G13, BBS 4 G13, BBS 4 G15, BBS 3.1 V02,

14. ábra Beiktatási csillapítás aljlapucscsal (szimuláció balra, mérés jobbra) [11]

A mérések azt mutatták, hogy a csillapítás a szimuláltnál magasabb értékeket vett fel, ez a valós körülmények a laboratóriumbeliéktől való eltérésének tudható be. A mérés szintén 40

Hz feletti frekvencia esetén mutatott az aljlapucscok beiktatási csillapításában jelentősebb eredményt, mely a 20 dB-t is elérheti a betonalj-lapucsc kombinációtól függően.

Az alábbi ábra egy másik mérésorozat eredményeit dolgozza fel, ahol különböző poliuretán anyagból készült aljlapucsc beiktatási csillapítás görbéit tartalmazza (15. ábra). [3]



15. ábra Mért beiktatási csillapítás különböző keresztaljátétekkel [3]

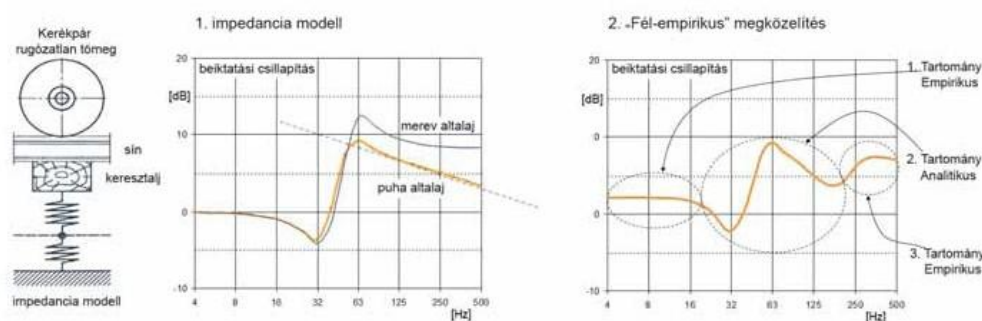
Ahogy arra a beiktatási csillapítási görbéket tartalmazó diagram rávilágít, az aljlapucscsal ellátott felépítmény saját frekvenciája 30 és 40 Hz között van. A szerkezetben terjedő testhang tekintetében releváns tartomány 50 Hz felett található. A szigetelési hatékonyság 63 Hz-en 4 és 14 dB között van, rugalmasságtól függetlenül minden aljlapucsc tekintetében. A normál rugalmasságú keresztaljátét esetében átlagosan 4-7 dB beiktatási csillapítás tapasztalható. A technológiában rejlő lehetőségek azonban elsősorban a nagyobb rugalmasságú aljlapucscok használatában tükröződnek, melyek kiemelten a szerkezetben terjedő testhangok szigetelésében hatékonyak. A kiemelten e a cél figyelembevételével akusztikailag optimalizált ágyazatos felépítményben 63 Hz-en akár 11-14 dB rezgés csillapítás is elérhető. Ezen értékek meghaladták a várakozásokat. 25 Hz alatt további 2-8 dB csillapítás jelentkezik. A 25-50 Hz-es tartományban némi erősítő hatás figyelhető meg, melyet már az előző kísérlet eredményeinek értékelésekor említettem. A grafikonon továbbá megfigyelhető, hogy 100 és 160 Hz között van egy csökkentett szigetelési hatékonyságú tartomány, ezt a puha sínaljáték hatása okozza.

Ahogy azt a grafikon egyértelműen visszaadja, az aljlapucsc csillapítási hatása erősen függ a frekvenciától. Az ágyazatszönyegek rezgés csökkentő hatásának vizsgálatához tervezett modell, az impedancia modell egy relatív egyszerű módszer a matematikai becslésre.

Azonban az aljlapucskok és az ágyazatszőnyegek természetének hasonlósága révén a modell alkalmazható a keresztalja alátétek viselkedésének vizsgálatára is.

A modell a kerékpár rugózatlan tömegéből, a sínből, a keresztaljból, az aljlapucskot és a zúzottkő ágyazatot helyettesítő 2, sorba kapcsolt rugóból áll, illetve figyelembe veszi az altalaj lezáró impedanciáját, a befogással történő helyettesítés által (16. ábra).

A beiktatási csillapítás azt is kifejezi, hogy miként aránylik a rezgési amplitúdó a földben elasztikus komponensek nélkül, az elasztikus komponensek telepítésével fellépő amplitúdókhhoz képest.



16. ábra Modell megközelítések a keresztaljalátétek beiktatási csillapításának becsléséhez

"A meglévő puha sínalátétek miatt fellépő lehetséges csillapítóhatás-csökkenés a 100–160 Hz tartományban nem látható. Hasonlóan, a mérésekben gyakran megjelenő, az USP-k által feljavított ágyazat által okozott javulás a <25 Hz tartományban nem látható.

Ahhoz, hogy a vágányban mért viselkedést egy becslési modell segítségével jobban ki lehessen fejezni, egy lehetséges megoldás lehet a „fél-empirikus” megközelítés használata. Egy részben empirikus értékeken alapuló modell, több tartományt használva, pontosabban tudja leírni a valóságot (lásd 6. ábra „Fél-empirikus” megközelítés, jobb oldali diagram 1. tartomány: eltolódás a feljavított vágányalj minőség miatt; 2. tartomány: Analitikus modell, figyelembe véve a rugalmas sínalátétek csillapító hatását, amennyiben vannak; 3. tartomány: Opcionális ereszkedő görbe, figyelembe véve pl. az altalaj által okozott csökkentő hatást). Meg kell jegyezni, hogy egy ilyen empirikus megközelítés alkalmazása bizonyos körülmények között több helyszíni mérést igényelhet annak érdekében, hogy a jövőben további pontos megállapításokat lehessen tenni az USP alkalmazási módjairól rezgéscsökkentési szempontból." [3]

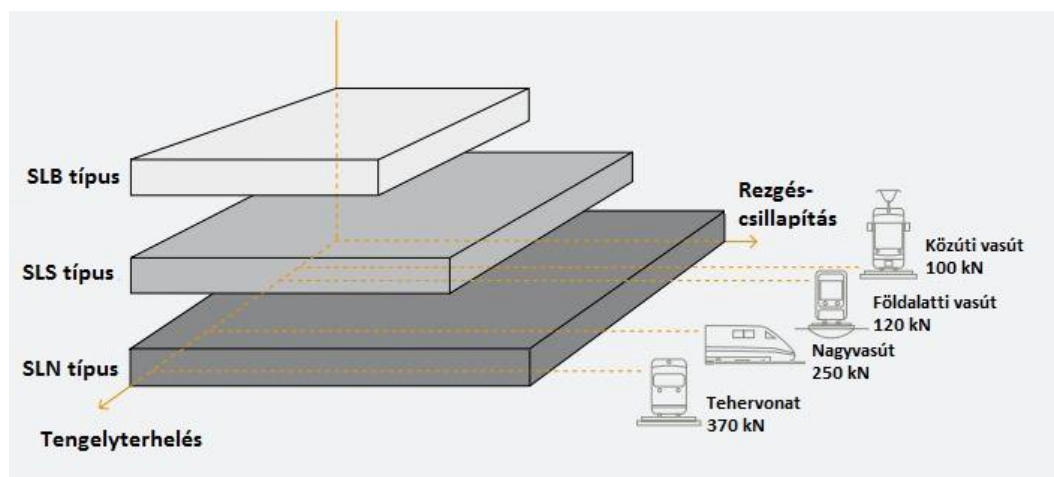
3.4 Hanghatások csökkentése

A közvetlenül kibocsátott elsődleges léghangra gyakorolt hatás tekintetében a vizsgálatok nem mutattak relevánsnak tekinthető javulást a keresztaljátétek beépítésének hatására, azonban mint az a fentiekben bizonyítást nyert, az aljlapucssal ellátott vágány élettartama, pályageometriája, így minősége is sokkal hosszabb a hagyományos vágányénál, melyben a megjelenő helyi hibák igen jelentős zajnövekedést okozhatnak. "Például a rövid periódusú sínkagylósodásos felületű sínek több mint 15 dB zajszintemelkedést okozhatnak, ha vonat halad át rajtuk." [3]

A másodlagos léghang, mely a például egy áthaladó szerelvény által rezgésre kényszerített felépítményből származtatható hanghatás kiemelten jelentős lehet fém szerkezeteknél, például acél hidaknál és viaduktoknál. A jelenlegi ismeretek szerint a Sylomer® vagy Sylodyn® anyagból készült USP felhasználható a szerkezetben terjedő zajok szempontjából releváns frekvenciatartományban a rezgések több mint 10 dB-es csökkentésére. [3]

4. Anyaghasználat

Az aljlapucscok különböző igényekhez igazítható anyaghasználattal és merevségi értékekkel állnak rendelkezésre. Az eltérő anyagi tulajdonságok a terhelés függvényében választható. Az alábbi, ábrán egy adott gyártó 3 különböző anyagból készített aljlapucscstípusainak alkalmazási területei figyelhetők meg (17. ábra).



17. ábra Aljlapucscok anyag típusainak alkalmazhatósága [5]

Az elasztikus anyagú SLB jelzésű aljlapucscot kizárólag a vágánygeometria javítására alkalmas, a rezgés-csökkentés nem elsődleges funkciójuk. Ez a típus elsősorban a zúzottkő ágyazatra eső terhelés csökkentését segíti elő. Az optimalizált anyagi tulajdonságai elősegítik a zúzottkő beagyazódását, így a felső réteg kiemelt stabilitásának biztosítását. Az SLB típus csillapítási tulajdonságaival a betonalj tulajdonságainál előnyösebb viselkedést eredményeznek a rezgések hatására. Az elasztikus aljlapucscok az éves fenntartási költségek csökkentésének és a vágány üzemidő-hosszabbításának hatékony eszközei.

Ha azonban a rezgés-csökkentés az elsődleges szempont, más típusú anyagok kerülnek előtérbe. Ilyenek a már jogvédelem alatt álló SLS és SLN típusok. Az előbbi egy elasztikus anyagú, erősebben hangsúlyozott csillapító komponenssel rendelkező aljlapucsc típus, az SLN ezzel szemben szintén elasztikus anyagú, azonban gyengébb csillapító komponenssel rendelkező keresztaljaláték típus. Az SLS, ún. Sylomer® aljlapucscok 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 kis mértékű, addicionális sín lehajlás esetén is. [5]

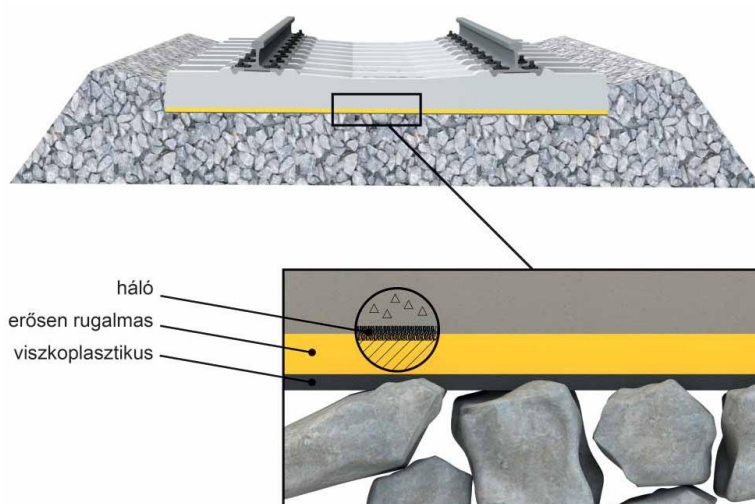
A csillapító komponens szerepe kiemelten fontos, hogy a kiemelkedően erős csúcsok a sajátfrekvencia közelében, így a rezonancia jelensége elkerülhető legyen. A dinamikus merevség pontos beállításával az aljlapucskok vágányrezgés csökkentésében, szigetelésében értendő kapacitása teljesen kihasználható.

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 aljlapucskok 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. A alábbi ábra egy szendvics elrendezésű aljlapucskot mutat több funkcionális réteggel (18. ábra).



18. ábra Keresztaljátét összetett funkcionális rétegekkel [3]

"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." [\[3\]](#)

5. Rögzítési módok

Az aljlapucskok előnyeinek érvényesüléséhez elengedhetetlen a megfelelő rögzítés, mely ellenáll a betonlaját érő hatásoknak. Különböző gyártók az aljlapucskákat különböző technológiával rögzítik. A mai napig elérhetőek a keresztaljalátétek megjelenésekor elterjedtnek mondható, a már megszilárdult betonlajához történő ragasztási módok, azonban a ragasztás hosszútávon bekövetkező gyengülése, elengedése, és az egyéb, kötés romlását okozó tényezők hatására ezek mindinkább kiszorultak a gyakorlatból. A ragasztásos technikákat követték olyan megoldások, melyeknél a kötést egy közvetítő réteg alkalmazásával látták biztosítottnak. Az első technika egy kavics anyagú csatlakozó felület volt, melyet elsőként a gumi aljlapucskba öntöttek, majd a kavicsréteggel ellátott alját a frissen öntött betonlaj alsó felületére simították (19. ábra) . [\[12\]](#) [\[13\]](#)



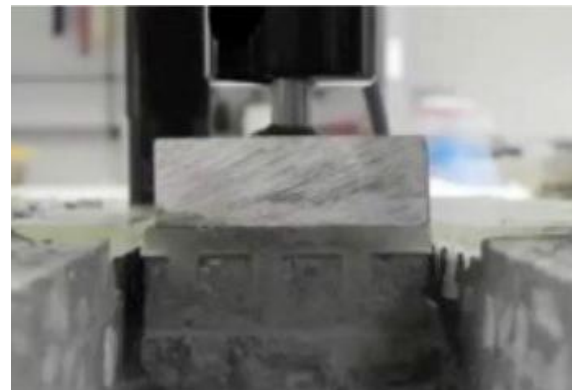
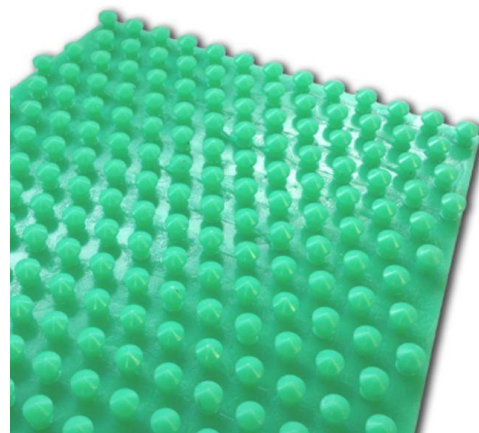
19. ábra Kavicsréteggel ellátott aljlapucsk [\[12\]](#)

Ezt követte a georácsos megoldás, melyet számos gyártó alkalmazott (20. ábra).



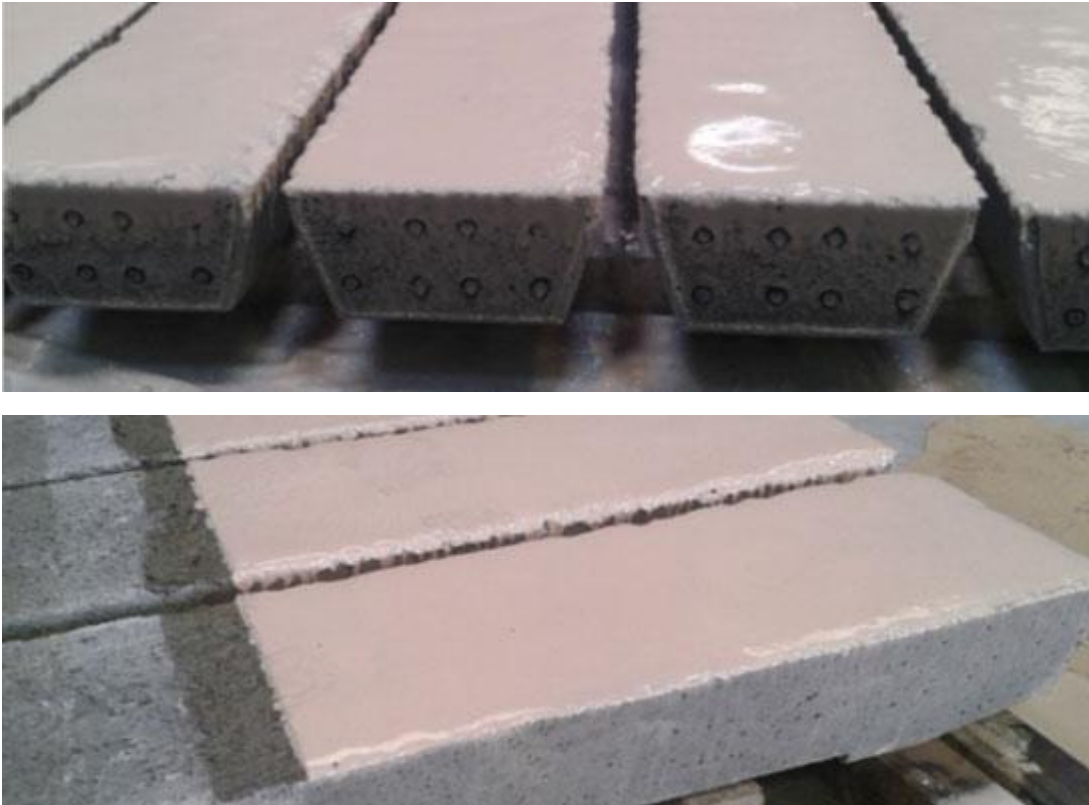
20. ábra Georács típusú rögzítési mód [\[13\]](#)

Ma már ezeknél jellemzőbbek a betonalj öntése során alkalmazott rögzítési eljárások, melyeknél nincs sem ragasztó, sem közvetítő réteg, így az erős, homogén kapcsolati réteg egyenletes vastagságú lesz és biztosítja az aljlapucsk vibrált betonba történő önbekötését. Ez történhet az aljlapucsk felszínén, az aljlapucsk anyagából kialakított installációs ráccsal (osztrák megoldás) vagy szegecses kialakítással (francia megoldás) (21. ábra).



21. ábra Szegecses típusú rögzítési mód [\[5\]](#) [\[13\]](#)

Szintén francia megoldás a száradó beton felületére permetezéssel szórt poliuretán elasztomer anyagú aljlapucskok készítése. Így a száradás során, szintén ragasztás vagy közvetítő réteg nélkül jön létre a rögzítés (22. ábra). [\[14\]](#)



22. ábra Permetezéses típusú rögzítési mód [\[14\]](#)

6. Saját mérések végrehajtása

Saját méréseimet a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Út és Vasútépítési Tanszék laboratóriumában végeztem. A laboratóriumban ezt a mérést első ízben végezték, korábban erre még nem került sor. Mivel Magyarországon nem elterjedt az aljlapucskok használata, a vizsgálatára vonatkozó szabvány sem létezik még. Így az aljlapucskok mérései a sínleerősítések és közbetétek statikus és dinamikus rugalmasságának meghatározására vonatkozó előírások alapján történtek, a MSZ EN 13481-1, MSZ EN 13481-2 és MSZ EN 13146-9:2009+A1 szabványok szerint. Az MSZ EN 13481-1 szabvány alapján a leerősítési rendszer C kategóriába esik, mivel ez a hagyományos nagyvasúti, 225 kN-os tengelyterhelésű, maximum 250 km/h-s sebességű vonalakra vonatkozik. Ezek a paraméterek megegyeztek az általam vizsgálni kívánt körülményekkel, ezeknek megfelelően végeztem a mérést és a számításokat. Az MSZ EN 13481-2 szabvány 2. sz.táblázata alapján a C kategóriájú leerősítési rendszerre tekinthető legkisebb erő az összeszerelt leerősítés statikus (F_{SA1} [kN]) és kis frekvenciájú rugalmasságának (F_{LFA1} [kN]) meghatározása során 1 kN, míg a a sínleerősítésre kifejtett erő az összeszerelt leerősítés statikus rugalmasságának meghatározása során (F_{SAmax} [kN]) és a referencia erő az összeszerelt leerősítés kis frekvenciájú rugalmasságának meghatározása során (F_{LFAmax} [kN]) 64 kN.

2. táblázat Az MSZ EN 13481-2 szabvány 2. sz.táblázata

+

Table 2 —Loads for measurement of stiffness

| Fastening category | F_{SP1} and F_{LFP1} kN | F_{SPmax} and F_{LFPmax} kN | F_{SA1} and F_{LFA1} kN | F_{SAmax} and F_{LFAmax} kN |
|--------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| A | 16 | 51 | 1 | 32 |
| B | 18 | 64 | 1 | 43 |
| C | 18 | 85 | 1 | 64 |
| D | 18 | 85 | 1 | 64 |
| E | 20 | 119 | 1 | 95 |

A mérés során az MSZ EN 13146-9:2009+A1 szabvány szerint jártam el.

A vizsgálati helyiségben ennek megfelelően a mérések során ($23 \pm 5^\circ\text{C}$) hőmérséklet állt fenn. A vizsgálathoz a következő eszközöket használtam fel:

Gömbcsuklós terhelő munkahenger, 4 csatornás, indukciós elmozdulásmérők

Vizsgálati elrendezés:

A vizsgált felépítményi rendszereket azonos módon a fenti eszközökkel vizsgáltam a következő elrendezés szerint:

Az összeszerelt próbatestet a sínfej szimmetriatengelyében terheltem úgy, hogy a teher az alj hosszirányú szimmetriatengelye felé is esett. A 4 csatornás rögzített útdók közül 2 a sántalp elmozdulását, 2 a betonalj elmozdulását mérte (23. ábra).



23. ábra Vizsgálati elrendezés

6.1 Végzett vizsgálatok:

Statikus rugalmasság meghatározása

A próbatestet a sínfejen, a szimmetriatengelyen F_{SAmax} -szal terheltem úgy, hogy a tehernövelés sebessége 120 kN/perc legyen. A terhelést háromszor végeztem el, az útdók által mért elmozdulást a harmadik terhelés során rögzítettem. A statikus rugalmasságot a következő képlettel számítottam:

$$D_{SA} = \frac{F_{SA2} - F_{SA1}}{d_{SA}} \text{ [kN/mm]}, \text{ ahol } F_{SA2} = 0,8 \times F_{SAmax} \text{ és } d_{SA} \text{ az átlagos elmozdulás mm-ben}$$

$$F_{SAmax} = 0,8 \times 64 = 51,2 \text{ kN}$$

Kis frekvenciájú dinamikus rugalmasság meghatározása

A próbatestet adott f frekvenciájú ismétlődő erővel kell terheltem, az erő alsó értéke F_{LFA1} , a felső értéke $F_{LFA1} = 0,8 \times F_{LFAmax}$, $N = 1000$ teherismétlésen keresztül. Az utolsó 100

teherismétlésen belül, tíz egymást követő ciklusban mértem kell a kifejtett erő nagyságát és a sántalp és a betonalj függőleges elmozdulását. Számítottam a d_{LFA1} (a legkisebb F_{LFA1} erőknél kialakuló elmozdulás) átlagos értékét, valamint d_{LFA2} (a legnagyobb F_{LFA2} erőknél kialakuló elmozdulás) átlagos értékét.

A sínleerősítés dinamikus rugalmasságát az adott vizsgálati frekvenciánál az alábbi képlettel számítottam:

$$D_{SA} = \frac{F_{LFA2} - F_{LFA1}}{d_{LFA2} - d_{LFA1}} \text{ [kN/mm]}$$

Vizsgált felépítményi rendszerek:

- **"0" jelzésű vizsgált felépítményi rendszer:** betonra szerelt 60E1 profilú sín, Vosshloh Skl-14-es rendszerű leerősítéssel, EVA közbetéttel
- **"A" jelzésű vizsgált felépítményi rendszer:** betonra szerelt 60E1 profilú sín, Vosshloh Skl-14-es rendszerű leerősítéssel, EVA közbetéttel, A típusú aljlapucsal
- **"B" jelzésű vizsgált felépítményi rendszer:** betonra szerelt 60E1 profilú sín, Vosshloh Skl-14-es rendszerű leerősítéssel, EVA közbetéttel, B típusú aljlapucsal

Minden rendszerre elvégeztem mindkét vizsgálatot sík beton felületen, illetve zúzottkő ágyazaton. Az ágyazati vastagság kb. 200 mm nagyságú volt, így nem érte el a hatékony vastagság mértékét, azonban mivel a laboratóriumi körülmények között aláverésre sem volt lehetőség, a pályamenti viselkedéssel történő analóg párhuzamok levonására a vizsgálat nem volt alkalmas. Ilyen méréseket célszerű inkább élő pályában, beépítés után elvégezni, amely tervbe van véve. Azonban ez a mérésorozat az aljlapucs nélküli referenciamérésekhez képest az aljlapucs biztosította vágányrugalmasság-különbség mérésére, illetve az ebből következő konklúziók levonására alkalmas volt.

6.2 "0" jelű, aljlapucs nélküli betonalj vizsgálata



24. ábra "0" jelű, aljlapucs nélküli betonalj vizsgálati elrendezése

A "0" jelű próbatestet az első vizsgálat alkalmával sík betonlemezen vizsgáltam, statikus és dinamikus terhelésre. A statikus és a dinamikus merevség igen nagy értéke adódik. Az adódó érték egyértelműen az EVA közbetét rugalmasságát adja vissza, mint egyetlen rugalmasságot adó elem a rendszerben (24. ábra).

A második vizsgálat során a "0" jelű felépítményi rendszert a zúzottkő ágyazatra helyezve vizsgáltuk, keresztaljátét beiktatása nélkül. Ez a jelenleg Magyarországon elterjedt felépítményi rendszer a reálisnak tekinthető, az aláverés és a hatékony ágyazatvastagság hiányának figyelembevételével.

Az adódó statikus merevség a zúzottkőágyazat beiktatásával a várakozásoknak megfelelően egy nagyságrendet, a dinamikus merevségi értékek több, mint harmadrészére csökkennek, ezen mérési eredmények igazolják, hogy a hagyományos felépítményben a rugalmasság legjelentősebb részét a zúzottkő ágyazat adja (3.táblázat).

| Merevség, D [kN/mm] | | | |
|---------------------|----------|-----------|-------|
| "0" | Statikus | Dinamikus | |
| Sík betonlemez | 623 | 759,8 | |
| Zúzottkő | 27,6 | 4 Hz | 5 Hz |
| | | 209,1 | 232,7 |

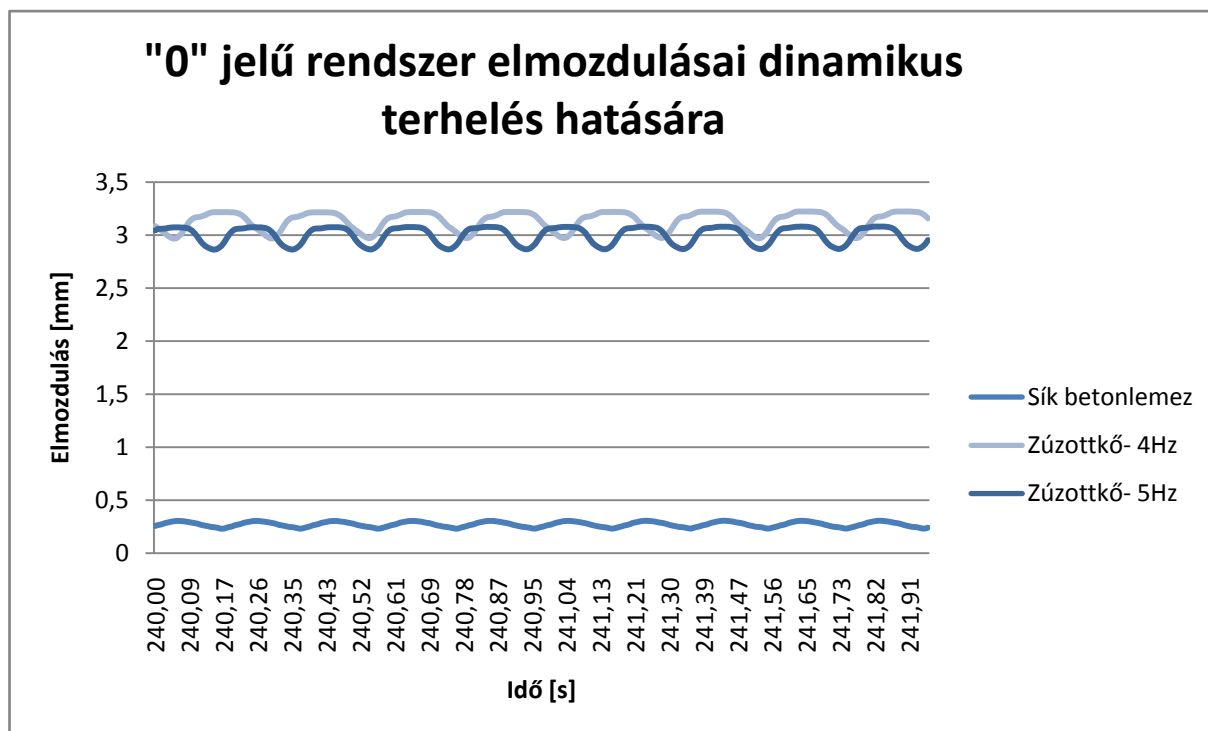
3. táblázat "0" jelű próbatest merevségei

Jól megfigyelhetők az elmozduláskülönbségek az alábbi grafikon és táblázatok segítségével.

| "0_din_zko" | 4Hz | | 5Hz | |
|-------------|----------|-----------------|----------|-----------------|
| | Erő [kN] | Elmozdulás [mm] | Erő [kN] | Elmozdulás [mm] |
| Minimális | 3,63 | 2,99 | 4,53 | 2,87 |
| Maximális | 51,38 | 3,22 | 51,60 | 3,07 |
| Amplitúdó | 47,75 | 0,23 | 47,07 | 0,20 |

4. táblázat "0" jelű próbatesten, zúzottkő ágyazaton végzett dinamikus terhelés mérési eredményei

A sík betonon mért elmozdulás amplitúdója századmilliméteres tartományban mozog, míg a zúzott kőre helyezett próbatest elmozdulásai egy nagyságrenddel nőttek, a tizedmilliméteres tartományba lépve (4. táblázat, 5. táblázat).



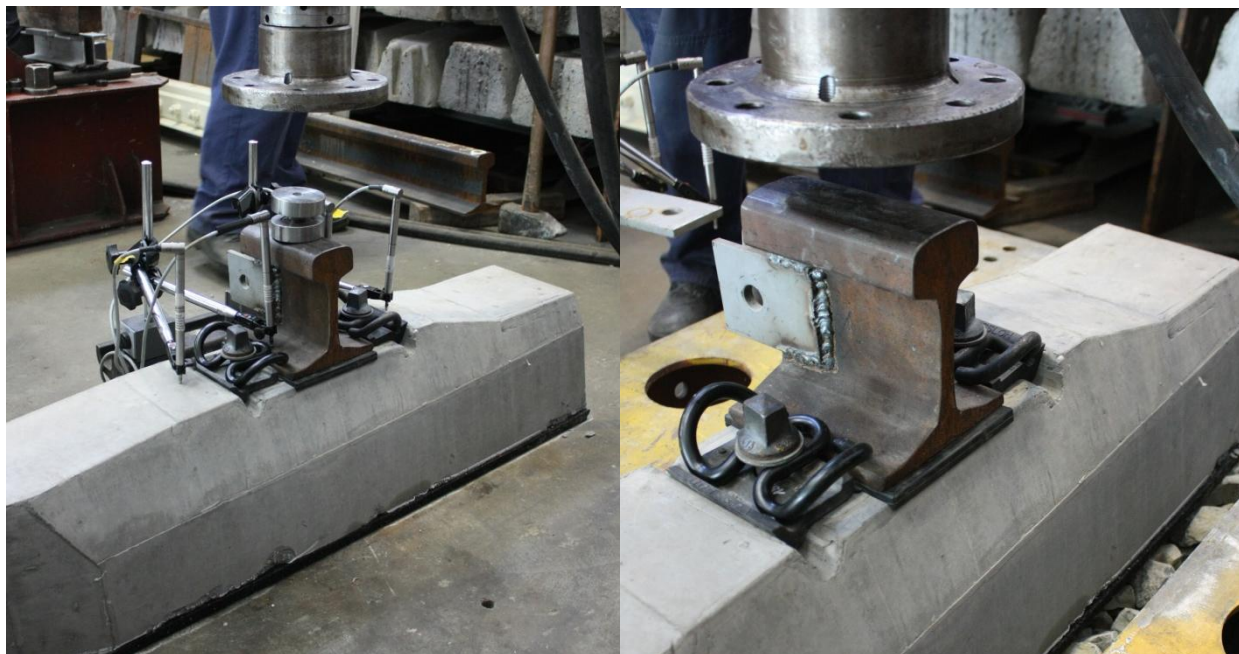
25. ábra "0" jelű rendszer elmozdulásai dinamikus terhelés hatására

| "0_din_sík" | Erő [kN] | Elmozdulás [mm] |
|-------------|----------|-----------------|
| Minimális | 1,75 | 0,24 |
| Maximális | 51,01 | 0,30 |
| Amplitúdó | 49,26 | 0,06 |

5. táblázat "0" jelű próbatesten, sík betonlemezen végzett dinamikus terhelés mérési eredményei

6.3 "A" jelű aljlapucssal ellátott betonalj vizsgálata

Az első vizsgálat itt is sík betonlemezen mért statikus és dinamikus rugalmasság volt. A "A" jelű keresztaljátét egy sima felületű, rugalmasságot biztosító elem, mely ragasztásos módszerrel került rögzítésre a betonalj alsó síkján (26. ábra).



26. ábra "A" jelű, aljlapucssal ellátott betonalj vizsgálati elrendezése

A második vizsgálat szintén a zúzottkőre helyezett statikus és dinamikus merevség mérése volt.

| Merevség, D [kN/mm] | | | |
|---------------------|----------|-----------|------|
| "A" | Statikus | Dinamikus | |
| Sík beton | 24,5 | 38,8 | |
| Zúzottkő | 8,5 | 4 Hz | 5 Hz |
| | | 18,4 | 22,5 |

6. táblázat "A" jelű próbatest merevségei

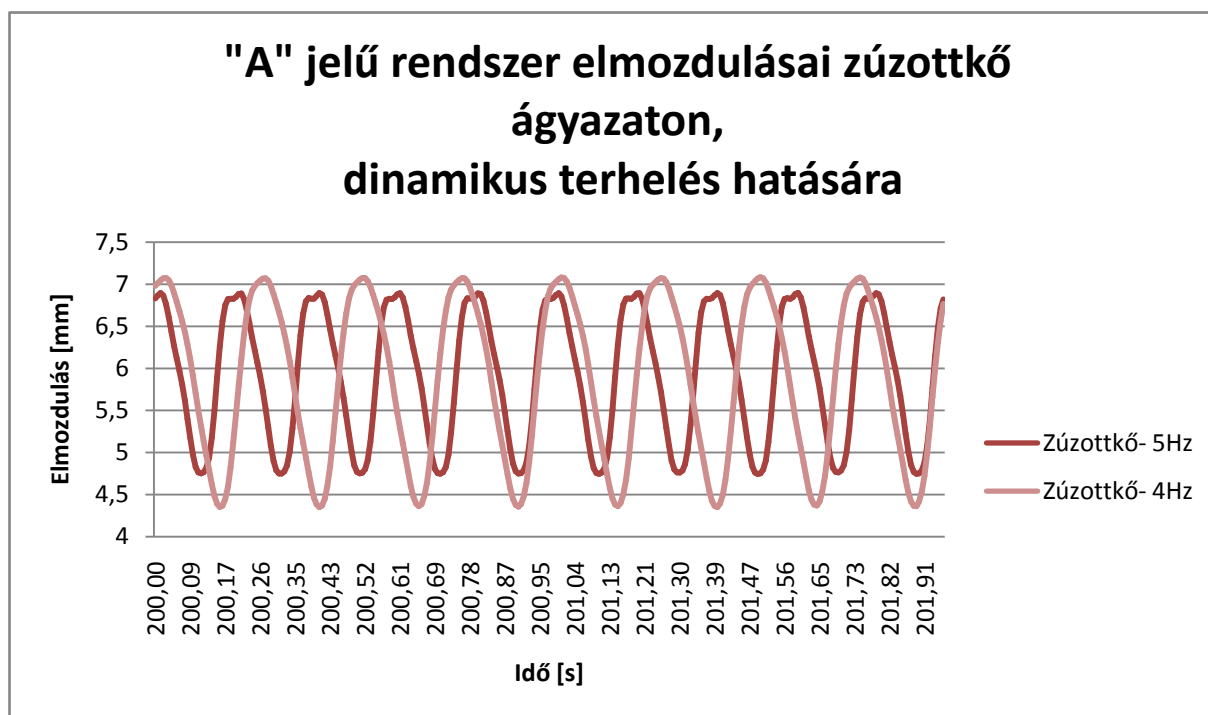
Ahogy a "0" jelű mérésnél, itt is 2 különböző frekvencián mértem a dinamikus mérés során.

A 4 Hz frekvenciájú mérésnél látszik, hogy az erőminimum csökkenésén túl, a teherátadás gyakoriságának csökkenésével az elmozdulás amplitúdója nő, mivel a deformációknak több

idejük van kialakulni az újabb teherátadás miatt. Így mind az elmozdulásminimum, mind az elmozdulásmaximum abszolútértékben nagyobb, mint az 5 Hz-es terhelésnél a megfelelő értékek (7. táblázat).

| "A_din_zko" | 4Hz | | 5Hz | |
|-------------|----------|-----------------|----------|-----------------|
| | Erő [kN] | Elmozdulás [mm] | Erő [kN] | Elmozdulás [mm] |
| Minimális | 3,27 | 4,39 | 5,42 | 4,76 |
| Maximális | 51,58 | 7,02 | 51,96 | 6,83 |
| Amplitúdó | 48,31 | 2,62 | 46,54 | 2,07 |

7. táblázat "A" jelű próbatesten, zúzottkő ágyazaton végzett dinamikus terhelés mérési eredményei



27. ábra "A" jelű rendszer elmozdulásai zúzottkő ágyazaton, dinamikus terhelés hatására

Az "A" esetben a sík betonlemezen és a zúzottkővön végzett dinamikus terhelési kísérlet eredményei között már nagyságrendi különbség nem mutatkozott, ez megfelelt a várakozásoknak, mivel a rendszer rugalmasságát adó elem, az aljalátét mindegyik esetben a rendszer részét képezte (27. ábra).

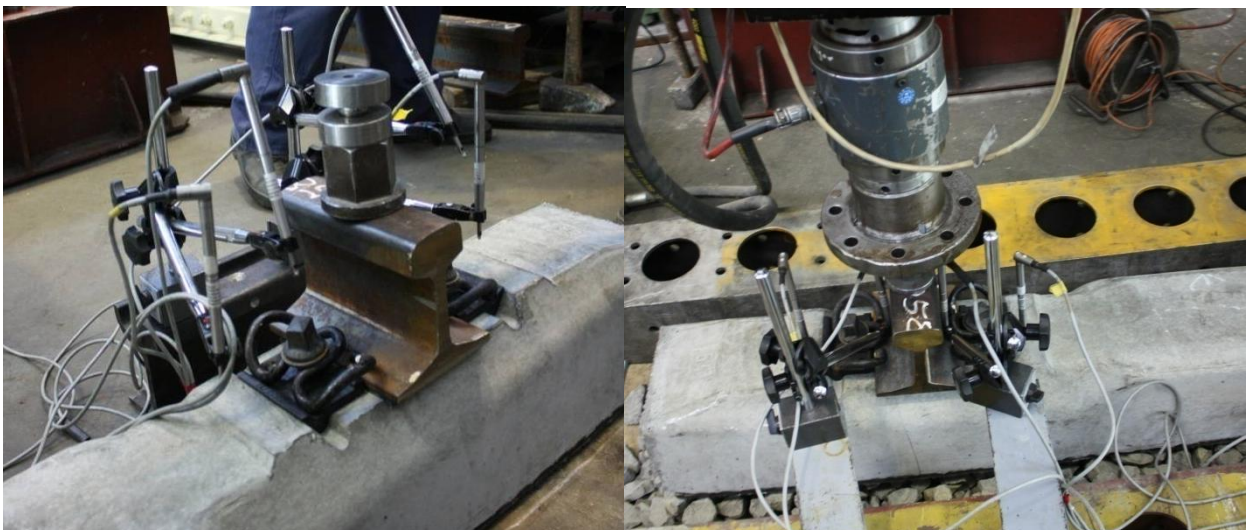
6.4 "B" jelű aljlapucssal ellátott betonalj vizsgálata

A "B" jelű rendszeren végzett vizsgálatok megegyeztek az előző 2 rendszeren végzett vizsgálatokkal. A "B" jelű aljlapucs egy bordázott felületű, ragasztással rögzített elem volt (28. ábra).



28. ábra "A" jelű aljlapucs bordázott felülete

Az első mérést sík betonlemezen végzett statikus és dinamikus terhelés hatására mért elmozdulás, ebből merevség számítása volt. A második vizsgálat zúzottkő ágyazaton mért elmozdulás volt, statikus és különböző frekvenciájú dinamikus terhelés hatására (29. ábra).



29. ábra "A" jelű, aljlapucssal ellátott betonalj vizsgálati elrendezése

| Merevség, D [kN/mm] | | | |
|---------------------|----------|-----------|------|
| "B" | Statikus | Dinamikus | |
| Sík beton | 19,54 | 30,63 | |
| Zúzottkő | 11,7 | 4 Hz | 5 Hz |
| | | 20,3 | 26,4 |

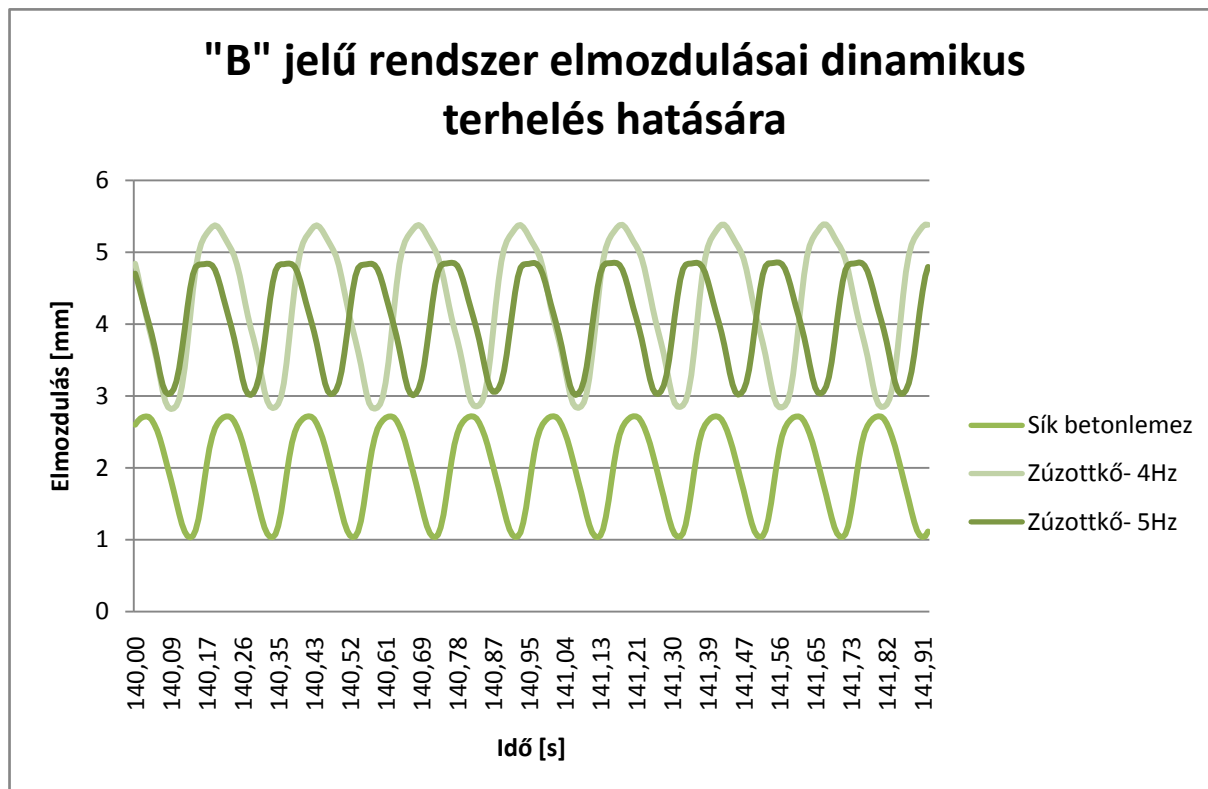
8. táblázat "B" jelű próbatest merevségei

| | 4Hz | | 5Hz | |
|-------------|----------|-----------------|----------|-----------------|
| | Erő [kN] | Elmozdulás [mm] | Erő [kN] | Elmozdulás [mm] |
| "B_din_zko" | | | | |
| Minimális | 3,27 | 2,90 | 5,63 | 3,05 |
| Maximális | 52,05 | 5,30 | 52,86 | 4,84 |
| Amplitúdó | 48,78 | 2,40 | 47,23 | 1,79 |

9. táblázat "B" jelű próbatesten, zúzottkő ágyazaton végzett dinamikus terhelés mérési eredményei

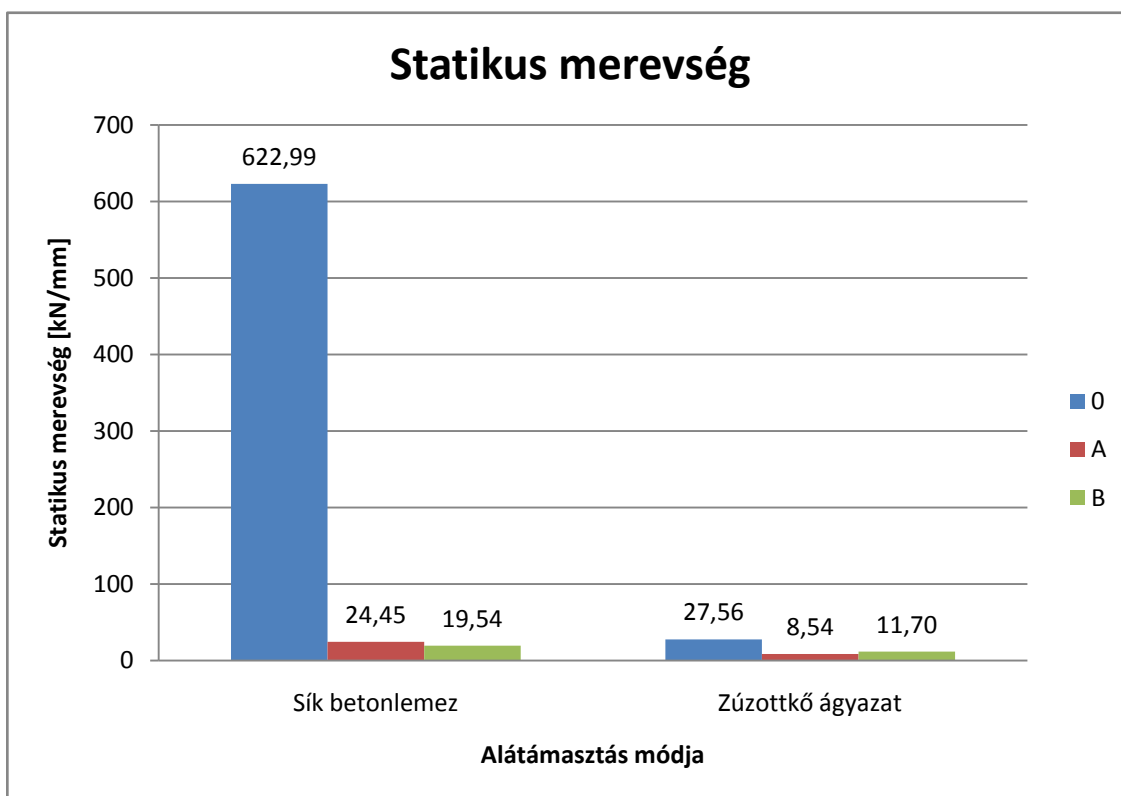
| "B_din_sik" | Erő [kN] | Elmozdulás [mm] |
|-------------|-----------|-----------------|
| Minimális | 1,596179 | 1,04794 |
| Maximális | 52,314737 | 2,703706 |
| Amplitúdó | 50,718558 | 1,655766 |

10. táblázat "B" jelű próbatesten, sík betonlemezen végzett dinamikus terhelés mérési eredményei



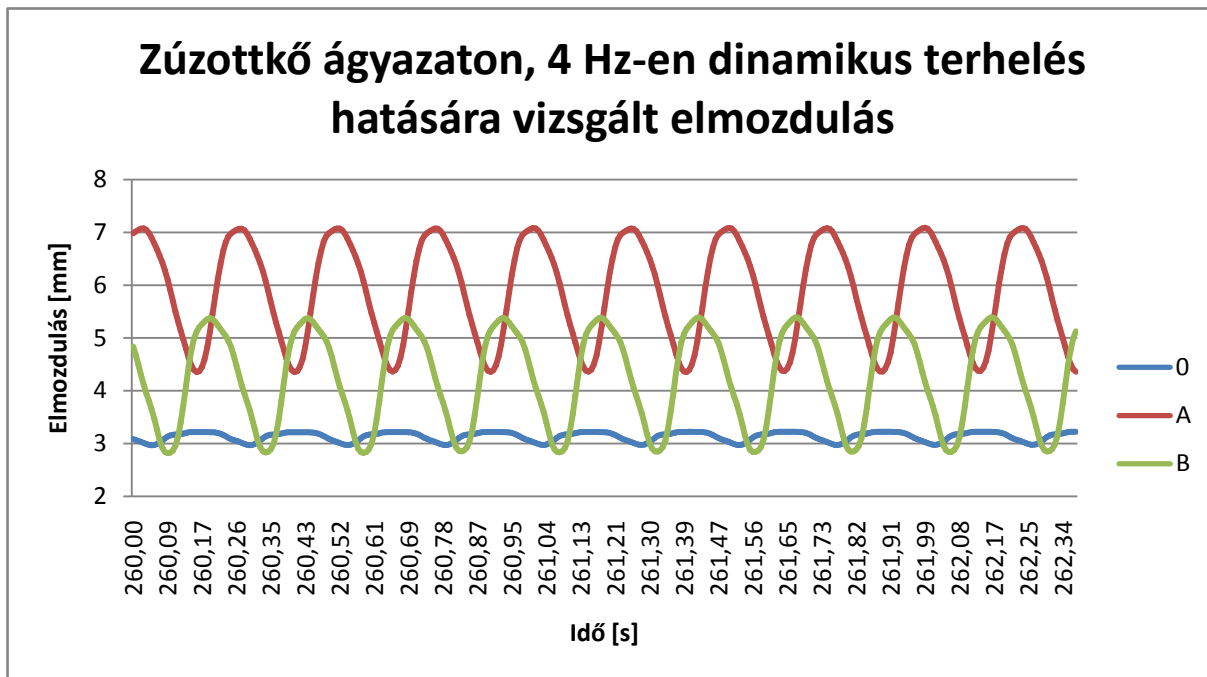
30. ábra "B" jelű rendszer elmozdulásai dinamikus terhelés hatására

6.5 A mért eredmények összehasonlítása

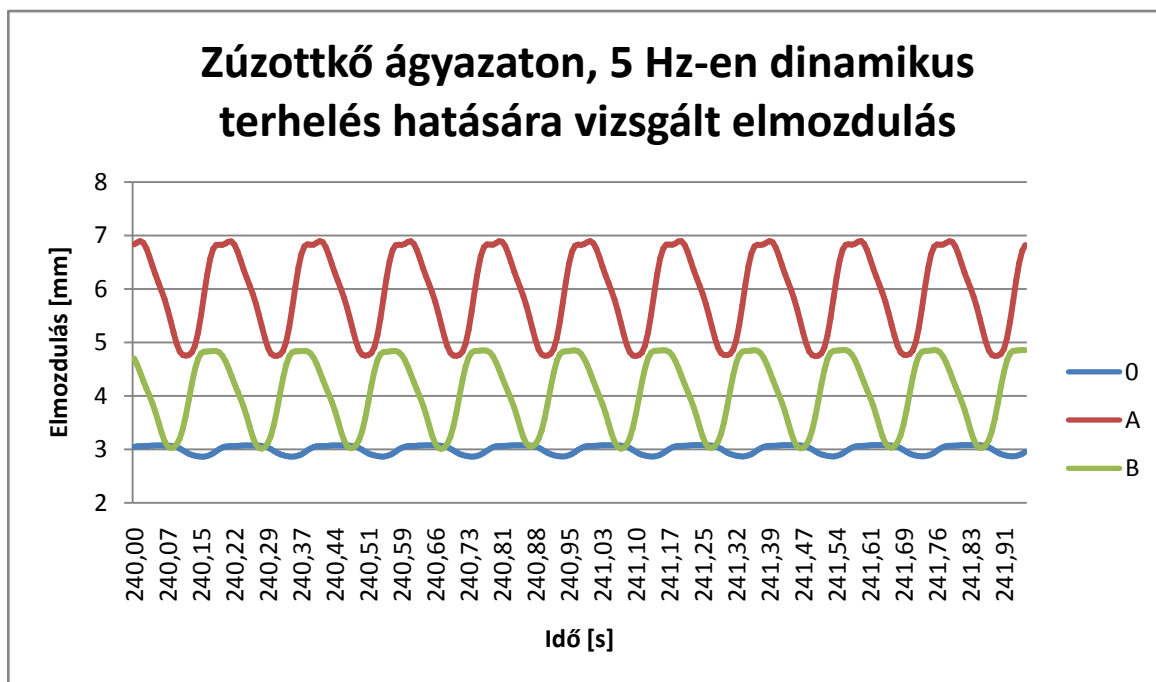


31. ábra A próbatestek statikus merevségei

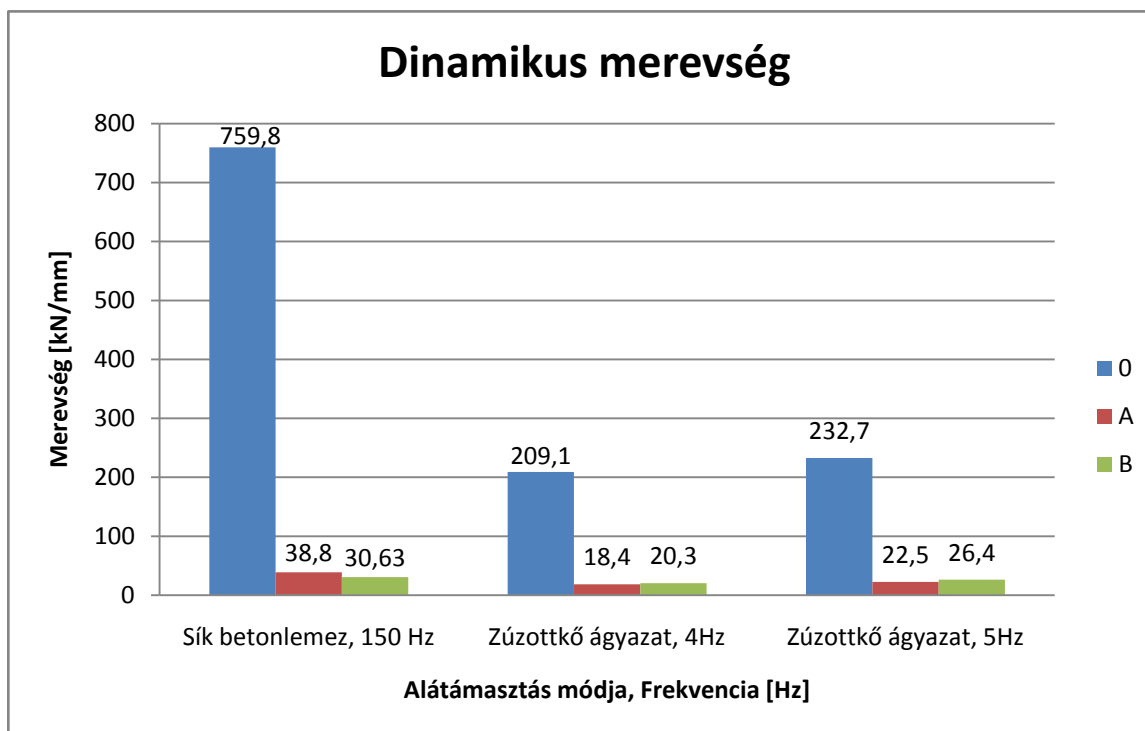
A statikus merevségek vizsgálata során kiderült, hogy az "A" jelzésű aljlapucs kisebb statikus merevséggel rendelkezik, mint a "B" típusú, azonban a várakozásoknak megfelelően mindkét rendszer szignifikánsan rugalmasabb, mint a keresztaljátét nélküli betonalj (31. ábra).



32. ábra Zúzottkő ágyazaton, 4 Hz-en dinamikus terhelés hatására vizsgált elmozdulás



33. ábra Zúzottkő ágyazaton, 5 Hz-en dinamikus terhelés hatására vizsgált elmozdulás



34. ábra A próbatestek dinamikus merevségei

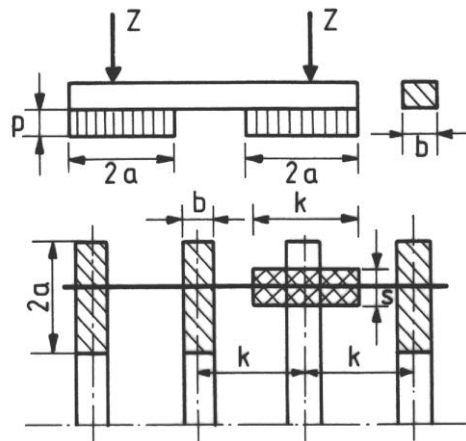
Az előbbi állítást támasztja alá a különböző frekvencián végzett dinamikus terhelés hatására vizsgált elmozdulás diagramok és dinamikus merevségeket összefoglaló diagram is. Az "A" jelű rendszer bizonyult a legrugalmasabbnak, mindkét frekvencián ez a rendszer mutatta a legnagyobb elmozdulásokat, ettől kissé elmaradva a "B" jelzésű rendszer következik az elmozdulás nagyságával és rugalmasságával. Ezeknél azonban egy nagyságrenddel bizonyult merevebbnek az aljlapucsock nélküli felépítményi rendszer, a "0" jelzésű rendszer elmozdulásai a merevebb "B" rendszer elmozdulásainak alsó ötödébe esnek (33. ábra, 34. ábra).

6.6 Zimmermann-módszer

A mért értékek segítségével a Zimmermann-módszer alkalmazásával számítottam az ágyazatban ébredő reakcióerőket és elmozdulásokat.

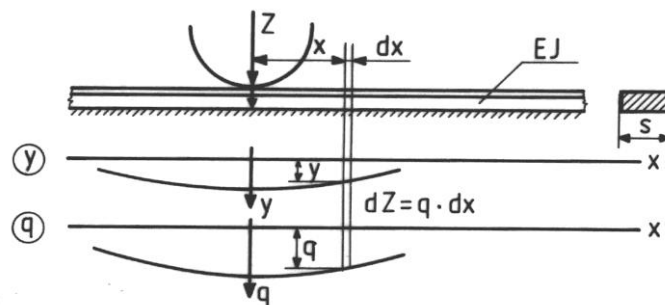
"A vasúti vágány elméleti igénybevételének számításánál a vágányt rugalmas alátámasztású tartónak tekintjük. Az alátámasztás rugalmasságát az ágyazási nyomás és az okozott besüllyedés között lineáris kapcsolattal jellemezzük, hasonlóan a szilárdságtanban ismeretes Hooke-féle összefüggéshez.

Az elméleti igénybevételek számításánál a keresztaljas vágányt fiktív, rugalmas ágyazaton folyamatosan felfekvő hosszgerendás vágánnyal helyettesítjük. A helyettesíthetőség érdekében megköveteljük, hogy a valóságos keresztaljas vágány és a helyettesítő, elméletileg hosszgerendával alátámasztott vágány rugalmas vonala, besüllyedése és feszültségi állapota is azonos legyen." (35.ábra)



35. ábra A keresztaljas felépítmény helyettesítése hosszaljas felépítménnyel [15]

"A helyettesítő hosszgerenda elvén történő elméleti igénybevétel számítása Zimmermann nevéhez fűződik, aki a megoldáshoz a helyettesítő hosszaljat végtelen hosszú, súlytalan, rugalmasan felfekvő és szilárdan leerősített tartónak tételezte fel." (36. ábra) [15]



36. ábra Helyettesítő hosszgerenda elvén alapuló igénybevétel számítása [15]

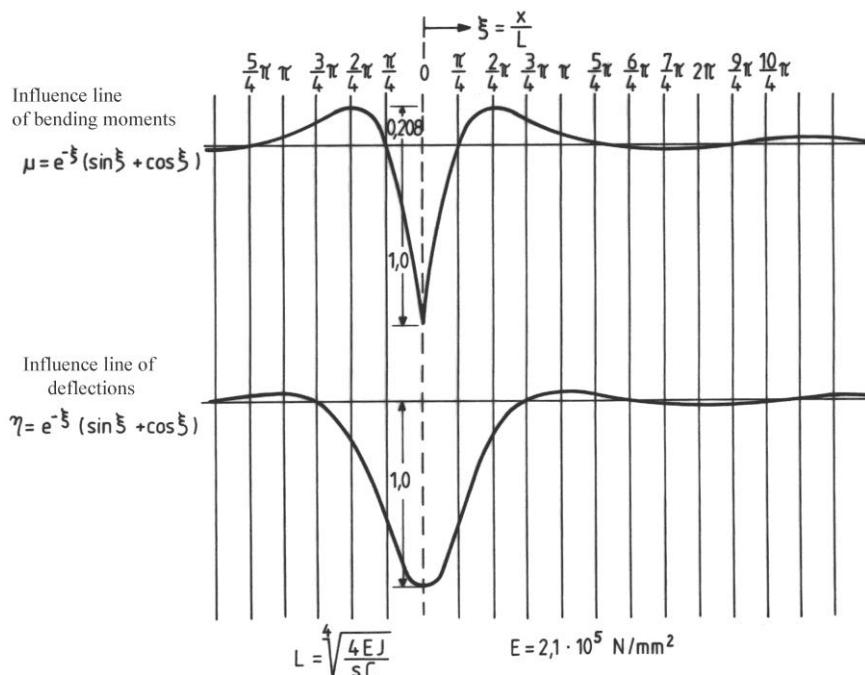
Az így figyelembe vett számítási metódusok, képletek:

$$y = \frac{Z}{2 \cdot C \cdot s \cdot L} \eta \quad F = kq = \frac{kZ}{2L} \eta, \text{ ahol:}$$

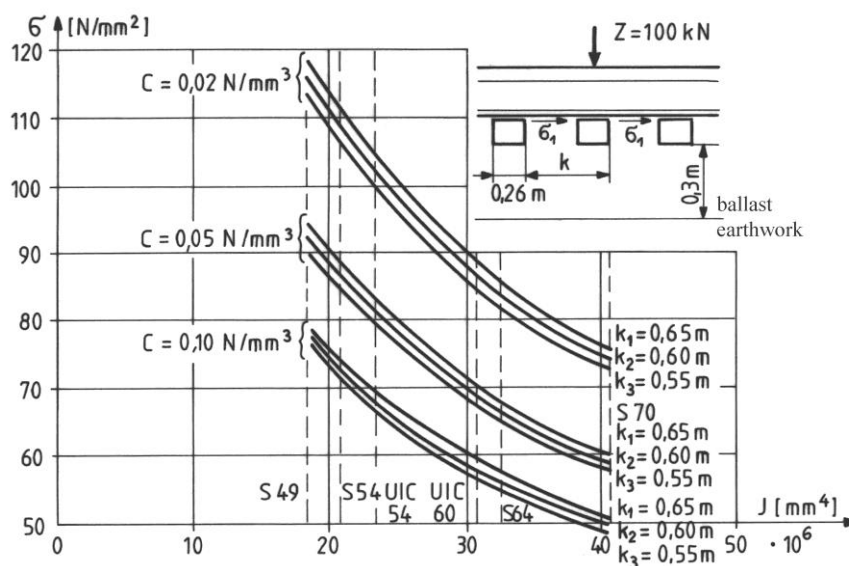
- Z [kN], statikus kerékterhelés
- C [N/mm³], ágyazási tényező
- k [mm], keresztaljtávolság
- $s = \frac{2ab}{k}$ [mm], helyettesítő hosszgerenda szélessége
- $L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{C \cdot s}}$ [mm], helyettesítő hosszalj merevségi hossza
- $\eta = \frac{\sin \xi + \cos \xi}{e^\xi}$ és $\xi = \frac{x}{L}$

- $q = C \cdot s \cdot y = \frac{Z}{2L} \eta$ [N/mm], ágyazati reakció

Jelen esetben pontszerű mérés történt, így az ágyazási tényező meghatározása helyett egyenlen keresztalra vett lineáris rugóállandó került meghatározásra (szabvány szerinti jelöléssel k_{SA} és k_{LFA}), amelynek értéke megegyezik a képletekben $k_{SA} = C \times 2a \times b$ értékkel.



37. ábra Besüllyedési és nyomatéki hatásábrák [15]



38. ábra A síntalp közepén ébredő feszültségek változása [15]

A fenti módszer segítségével számítottam a különböző felépítményi rendszereknél a tartómodell reakcióerőit és ennek alapján a támaszpontok ágyazásba való benyomódásait, illetve a sín süllyedését a kerékterhelés alatt.

Az eredményeket az alábbi táblázat tartalmazza:

| Alapadatok | | | |
|---------------------------|----|--------|----------------------------|
| Sínacél merevségi modulus | E= | 210000 | MPa |
| 60E1 sín inerciája | I= | 30,55 | $\times 10^6 \text{ mm}^4$ |
| Aljtávolság | k= | 600 | Mm |
| Statikus kerékterhelés | Z= | 112,5 | kN |

| | | Sík betonlemezen | | | Zúzottkő ágyazaton | | |
|--------------------|------------------|------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|
| | | "0" | "A" | "B" | "0" | "A" | "B" |
| | D [kN/mm] | 600 | 30 | 25 | 70 | 10 | 8 |
| | L [mm] | 400 | 846 | 886 | 685 | 1114 | 1178 |
| Teher alatt | F [kN] | 84,32 | 39,87 | 38,10 | 49,28 | 30,30 | 28,65404 |
| | y [mm] | 0,14 | 1,33 | 1,52 | 0,70 | 3,03 | 3,581755 |
| Egy alj távolságra | F [kN] | 20,13 | 27,67 | 27,21 | 28,90 | 24,25 | 23,42686 |
| | y [mm] | 0,03 | 0,92 | 1,09 | 0,41 | 2,42 | 2,928357 |
| Két alj távolságra | F [kN] | 4,80 | 2,97 | 8,76 | 16,09 | 12,29 | 5,770455 |
| | y [mm] | 0,007997 | 0,098922 | 0,350333 | 0,229927 | 1,228901 | 0,721307 |

11. táblázat A Zimmermann módszerhez felhasznált alapadatok és számítási eredmények

6.7 Kontaktfelület-növekedés

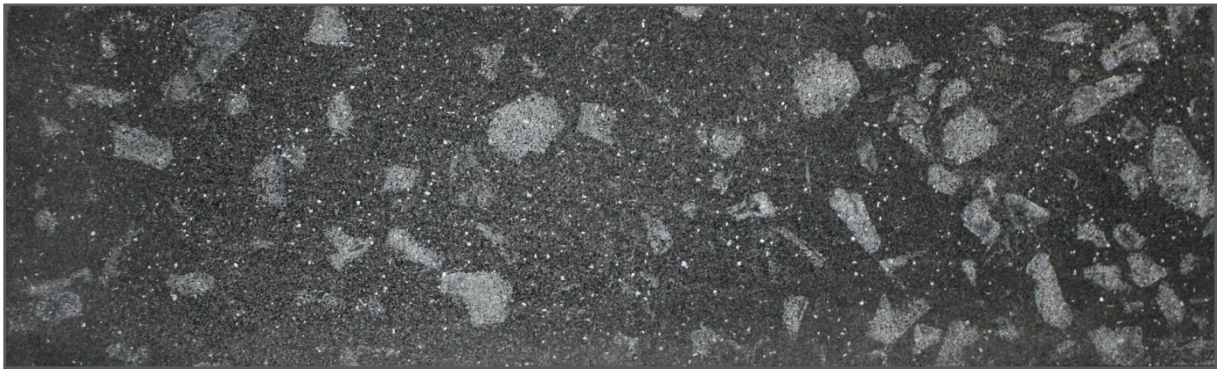
A kontaktfelület növekedéséről, annak fontosságáról, előnyeiről már a korábbiakban esett szó. A vizsgálat során bár pontos méréseket nem végeztem a kontaktfelület növekedésének becslésére, az alábbi fotók jól illusztrálják a jelenséget. Az első fotó a terhelést követően készült, a betonalj zúzottkő ágyazatról való leemelése során. Itt rögtön szembetűnők az aljlapucson a zúzottkő ágyazat által hagyott nyomok. A zúzottkővet jobban megvizsgálva az aljlapucs éles sarkain, felső felületén megjelennek az aljlapucs hagyta nyomok is. Jól kivehetően látszik, hogy nem csak az élek voltak kontaktpontok a vizsgálat során, az ágyazatszemek beágyazódtak, a sarkakat körbevette és így meg is fogta a gumi ezeken a felületeken. (39. ábra)

A keresztaljátét a betonaljról történő eltávolítása során a kontaktfelület lenyomata vizsgálhatóvá vált. Digitális képfeldolgozás alapján az aljlapucs felületének mintegy 21%-án volt észlelhető a zúzottkő ágyazat "negatívja". Ez a fenti becsléseknek megfelelően, az átlagos 6%-ot kontaktfelületet 15%-kal növelte, ami a teherelosztás szempontjából igen jelentős eltérésnek tekinthető (40. ábra, 41. ábra, 42. ábra).

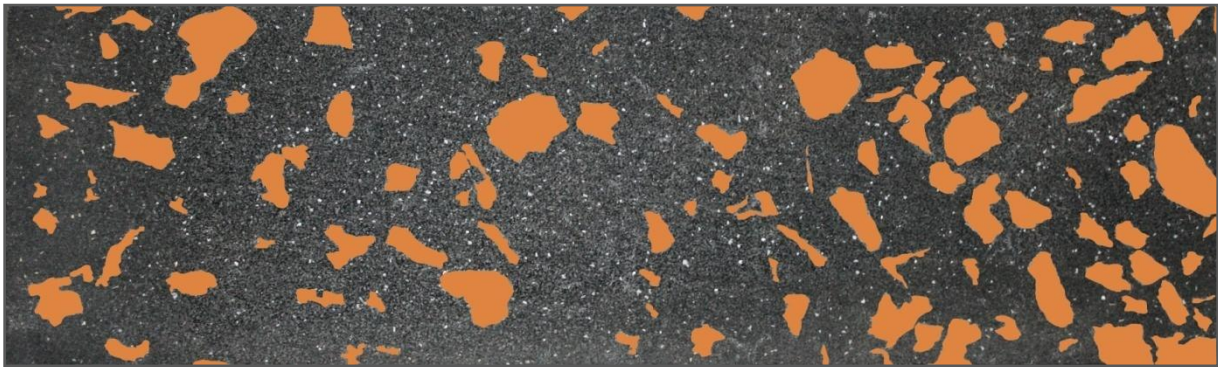




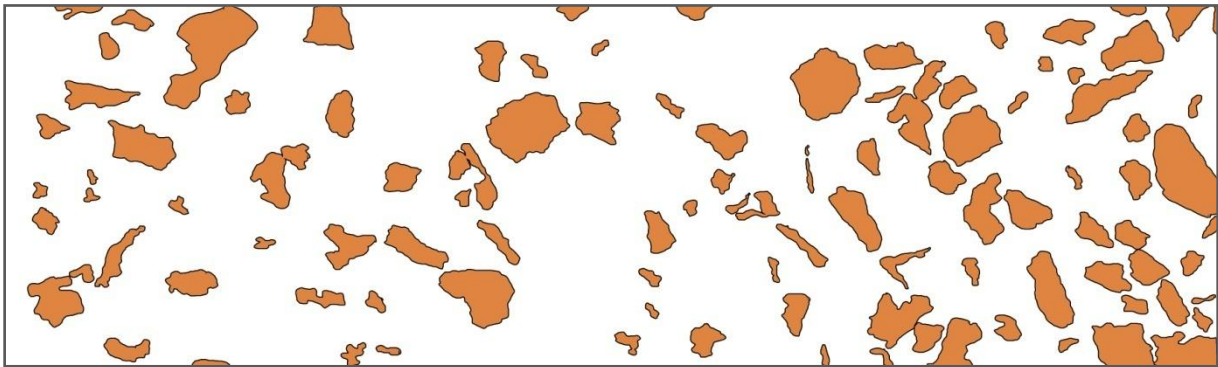
39. ábra Kontaktfelület az aljpapucson és az ágyazaton



40. ábra Aljlapuc teljes felülete

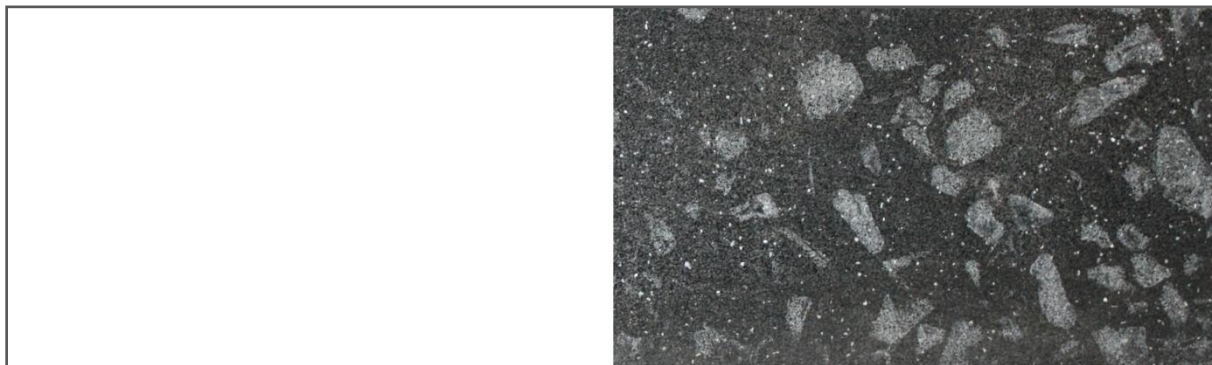


41. ábra Zúzottkő ágyzat lenyomat vizsgálata szelektív színcserével

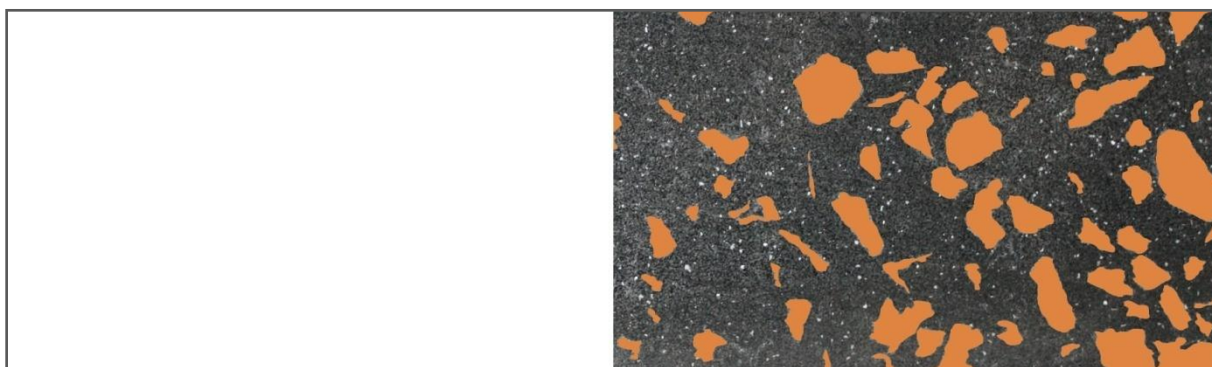


42. ábra Zúzottkő ágyzat lenyomata az aljlapucson

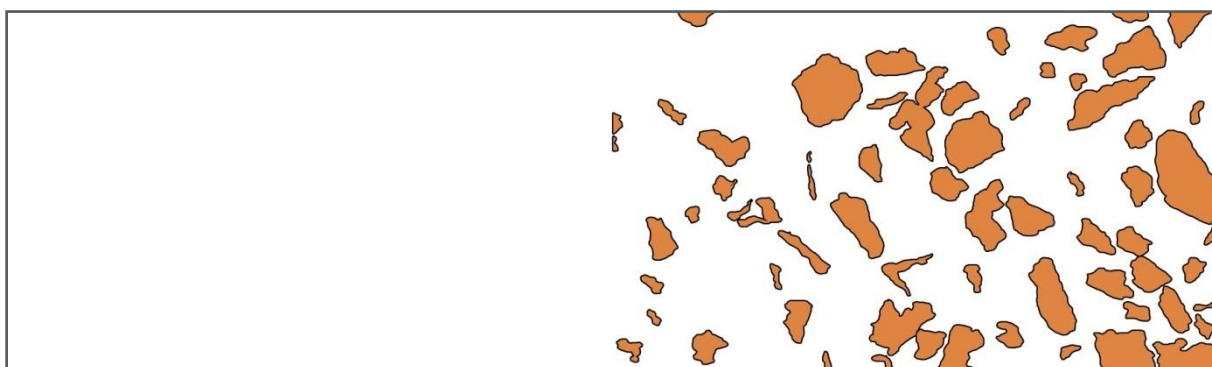
Mivel a terhelést csak a betonalj egyik felén végeztük, a zúzottkő ágyzat lenyomatát is csak az terhelt oldalon érdemes vizsgálni, ezt az adatot relevánsnak venni. Jól látható, hogy az ábrák szerinti jobb oldalon történt a terhelés, a lenyomatok sűrűsége itt jelentősen nagyobb a bal oldali területnél (43. ábra, 44. ábra, 45. ábra).



43. ábra Terhelés szempontjából releváns aljlapucs-fél teljes felülete (100%)



44. ábra Terhelés szempontjából releváns aljlapucs-fél lenyomatának vizsgálata szelektív színcserével

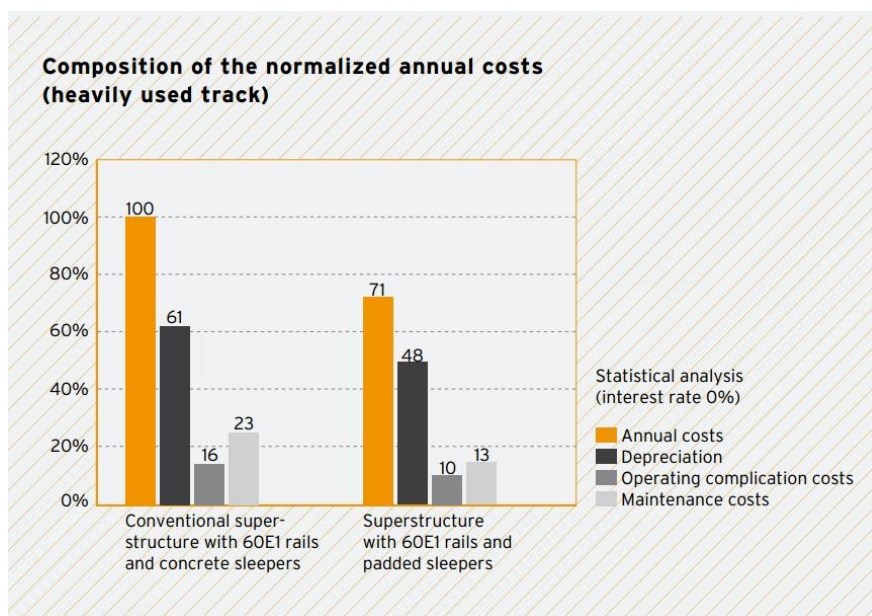


45. ábra Zúzottkő ágyazat lenyomata terhelés szempontjából releváns aljlapucs-félen (21%)

7. Gazdaságosság, befektetési megtérülés

Mint minden innovációnál, az aljlapucskok esetében is kardinális kérdés a megtérülés. A technológiai újdonságok legtöbbje egyértelműen pozitív hatással vannak az adott területre, azonban pénzügyi vonzat vizsgálata nélkül alkalmazásuk elképzelhetetlen lenne. A pozitív aspektusok érvényesülése ahhoz kötött, hogy az általuk generált bevétel a rájuk fordítandó kiadásokat meghaladja, így hasznot generáljon.

Egy osztrák becslési modell szerint egy kiemelkedő forgalmú vonalon, a hagyományos felépítmény (aljlapucs nélküli betonlj és 60E1 profilú sín) esetén a pálya éves költségeinek 61 %-át az értékvesztés, 16 %-át az üzemi zavartatások költségei, 23 %-át pedig maguk a fenntartási költségek teszik ki. Ezek az értékek az aljlapucs beépítésével szignifikánsan csökkennek. A hagyományos felépítményhez képest az éves költség 71%-ra mérséklődik, ez 29 %-os csökkenést jelent. A hagyományos rendszer költségeihez képest az értékvesztés 48%-ra csökken, ez 13%-os javulást, az üzemi fennakadásokból származó költségek 6%-os mérséklődéssel 10%-ra esnek vissza (46. ábra). A fenntartási költségek 13%-os értéke 10 % befektetésre nem kerülő összeget jelent. Ez az éves befektetés közel egyharmadának megspórolását jelenti, mely igen jelentősnek mondható. [5]



46. ábra Osztrák becslési modell az aljlapucskok gazdasági hatására [5]

Ennél a sokkal részletesebb, az aljlapucskok gazdaságosság szempontú vizsgálatára készült francia tanulmány átfogó képet ad a befektetés megtérüléséről.

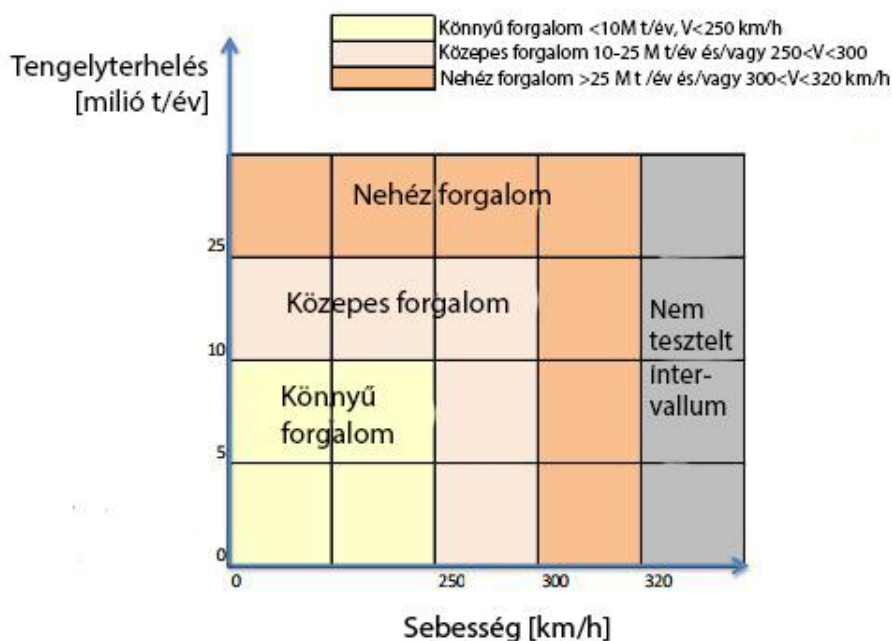
A vizsgálat Franciaországban 300 km hosszúságú LGV (nagysebességű) egyvágányú pálya megépítésére vonatkozott, amelynek a teljes hosszában alkalmaznák az aljlapucskokat, melyek megtérülését vizsgálták 50 évre vonatkozóan. A keresztaljátétek átlagos ára 20-25 euro körül mozog, így 600 mm-es aljköztávolsággal, kilométerenként kb. 1666 aljjal és így aljlapucscsal számítva, csak ezen rugalmas elemek beruházási összköltsége 40 000 euro körüli összegre adódna kilométerenként. [13]

A vizsgálat során 3 esetet vizsgáltak, valamint a következő egyszerűsítéseket tették:

- Éves vágányterhelés: Könnyű forgalom: 5 millió tonna/év, Közepes forgalom: 10 millió tonna/év, Nehéz forgalom: 25 millió tonna/év
- Menetsebességek: a kopásban érdemi különbségek a következő intervallumokban jelentkeznek: 250 km/h alatt; 250 és 300 km/h között, 300 és 320 km/h között (320 km/h felett nincs releváns adat)
- Forgalom/szerelvények minősége: tengelyterhelés; vegyes forgalom jelenléte (TGV és tehervonat, TGV és ICE stb.)

Vizsgált 3 kategória (47. ábra):

- 1. eset: Könnyű forgalom és/vagy 250 km/h alatti sebességek
- 2. eset: Közepes forgalom és/vagy 250 és 300 km/h közötti sebességek és/vagy vegyes forgalom
- 3. eset: Nehéz forgalom és/vagy 300 és 320 m/h közötti sebességek és/vagy vegyes forgalom nehéz vagy közepes forgalmi kategóriában



47. ábra Forgalmi kategóriák besorolása [13]

A megtérülési számítások elvégzésekor számba kell venni azokat a kiadásokat, amelyek az USP használatának következményeként többletköltségként jelentkeznek, valamint azokat amelyek költségmegtakarítást jelentenek a szokványos megoldáshoz képest. Ez alapján a következő bemeneti adatokról beszélhetünk egy ilyen beruházás esetén:

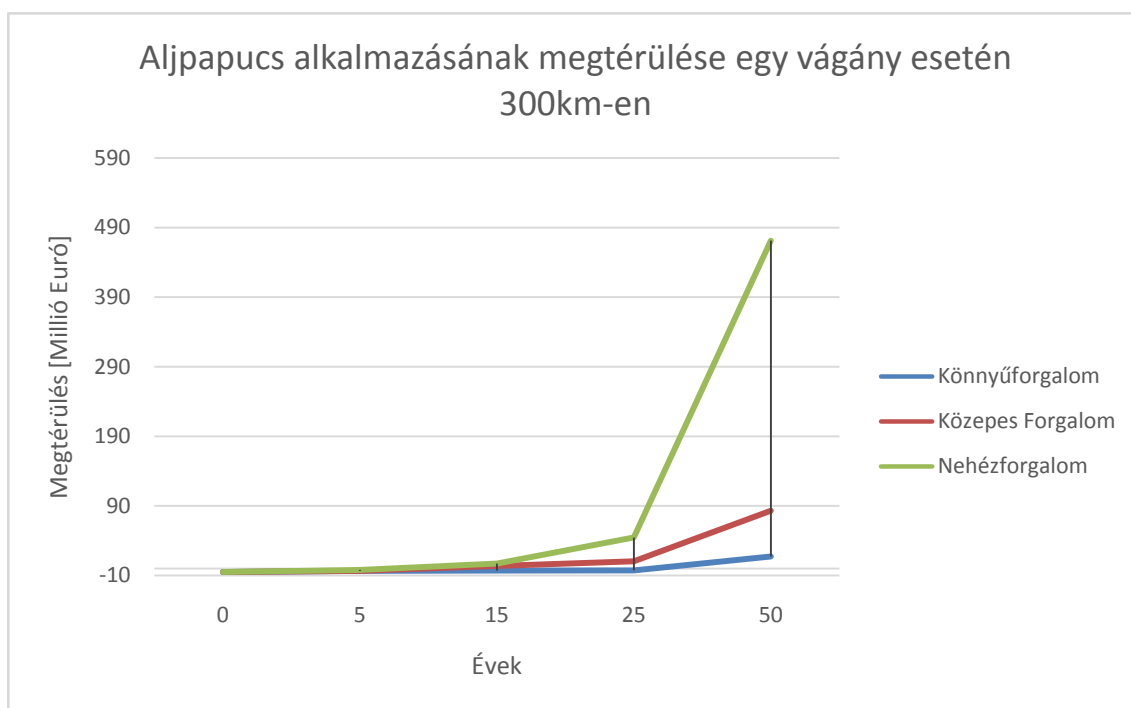
- Az aljpacucok beruházási költsége (beépítéssel együtt): 37 000 euro/km/vágány
- A zúzottkő ágyazati réteg vastagságának csökkenéséből adódó megtérülés (5 cm= 21,50 euro/m), ez az összeg levonódik a beruházási költségből
- Aláverés átlagos költsége: 7,50 euro/méter
Aljpacuc nélküli gyakoriság: Nehézforgalom: 2 évente, Közepes forgalom: 3 évente, Könnyűforgalom: 5 évente
- Ágyazatrostálás költsége 110 euro/méter
Aljpacuc nélküli gyakoriság: Nehézforgalom: 25 évente, Közepes forgalom: 40 évente, Könnyűforgalom: nem jellemző
- Alépítményjavítás: 1200 euro/méter
Nehézforgalom: 40 évente, Közepes forgalom: nem jellemző, Könnyűforgalom: nem jellemző
- Inflációs ráta: 2% (a fenti értékek ennek figyelembevétele nélkül értendők)
- A fenntartási intenzitás csökkentő tényezője az aljpacucok által: 3 (az ezzel kapcsolatosan végzett kutatások szerint a keresztaljalátétek biztosította költségcsökkenés elérheti a 4-es, akár az 5-ös szorzót is, a tanulmányban figyelembe vett 3-as érték mérsékeltnak mondható) [\[13\]](#)

A modell alapvető pénzügyi számításra épül. A megtérülések két különböző módszerrel kerülnek meghatározásra. Az első esetben a beruházási és a megtakarításokból eredő pénzáramok egyszerű figyelembevételével. A második esetben pedig a pénz időértékének kiegészítésével egy átlagos inflációs várakozás felhasználásával kerül meghatározásra a technológia alkalmazásának megtérülése. A számítások minden esetben egy 300 kilométeres egyvágányú aljpacucsal ellátott szakaszra vonatkoznak.

Az egyszerű pénzáramok modelljének alkalmazásakor a kezdeti magasabb beruházási költséget (amelynek közelítő számítása az előbbieken már megtörtént) mérsékli az aljpacucok használata miatt csökkenő zúzottkő ágyazati rétegvastagságból adódó megtakarítás. Ez adja meg számunkra a 0. évhez tartozó -5,1 millió eurós értéket. Az évek múlásával az aláverések és ágyazatrostálások számának drasztikus csökkenése, illetve az alépítmény javítás szükséges gyakoriságának mérséklése mind komoly megtakarítást jelent. Ezeket a megtakarításokat a modell, mint bevételeket kezeli. Az 12. táblázatban láthatóak a bemeneti adatok alkalmazásából eredő megtérülési adatok különböző évekhez. Ez alapján egyértelműen kijelenthető, hogy hosszútávon minden forgalomtípus esetén megéri alkalmazni az aljpacuc technológiát.

| 300 km-es egyvágányú, aljapapucssal ellátott szakasz megtérülése [Millió Euró] 50 éves időtartamban | | | | | |
|--|------|------|------|------|-------|
| Évek | 0 | 5 | 15 | 25 | 50 |
| Könnyűforgalom | -5,1 | -3,6 | -0,6 | 2,4 | 8,4 |
| Közepes Forgalom | -5,1 | -3,6 | 2,4 | 6,90 | 40,9 |
| Nehézforgalom | -5,1 | -2,1 | 5,4 | 29,4 | 227,4 |

12. táblázat 300 km-es egyvágányú, aljapapucssal ellátott szakasz megtérülése 50 éves időtartamban (francia tanulmány)

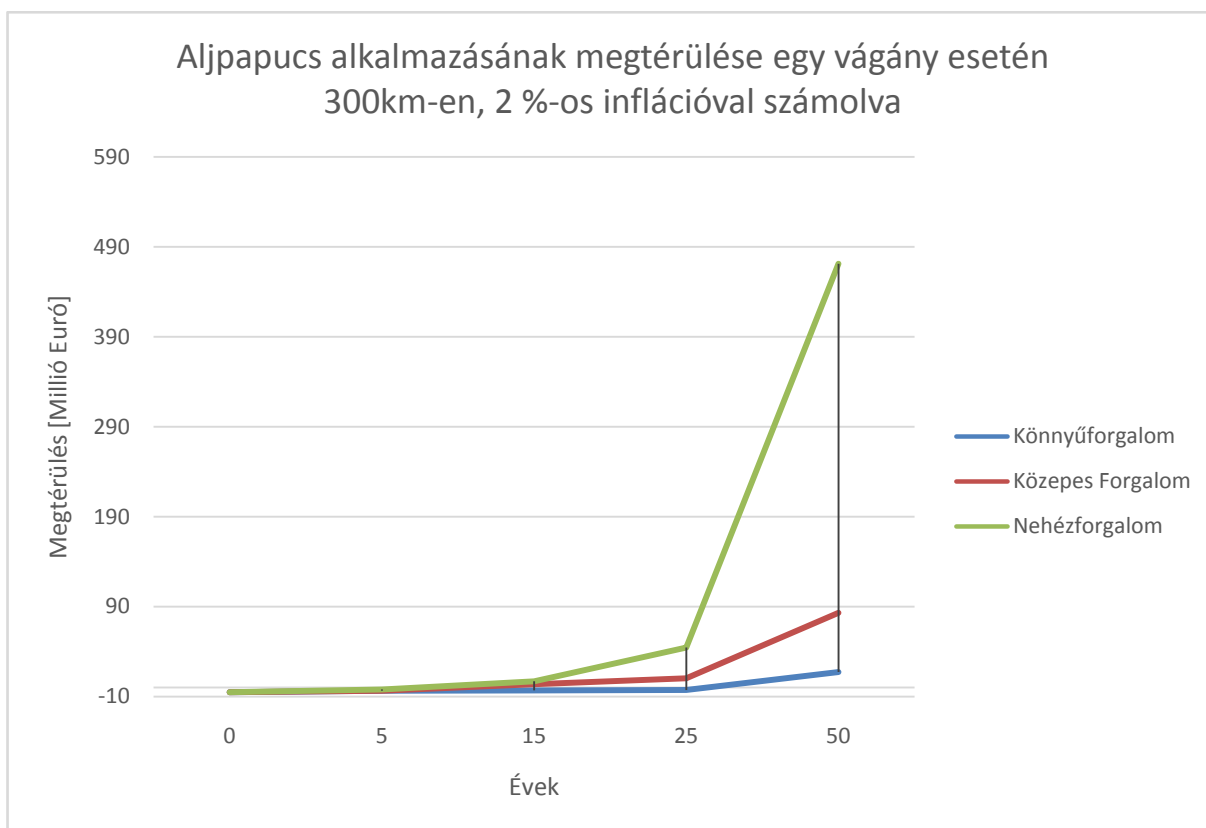


48. ábra Aljapapucs alkalmazásának megtérülése egy vágány esetén 300 km-en (francia tanulmány)

Az egyszerű pénzáramok modelljének alkalmazásánál vélhetően pontosabb eredményt kapunk, amennyiben az inflációval korrigáljuk az egyes pénzáramokat. Ez Franciaország esetében a következő 50 évre a 2%-os inflációs előrejelzés visszafogottnak minősíthető. Ebben az esetben az egyszerű kamatos kamatszámítás képletét alkalmazva meghatározhatjuk, hogy a 0. időpillanatban 7,50 euro/méter költségű aláverés melyik évben várhatóan mennyivel fog többbe kerülni az infláció következtében. Minden egyes megtakarítás esetében korrigálhatóak a pénzáramok (természetesen a 0. időpontban nincs változás). . Az 13. táblázatban láthatóak az inflációval korrigált értékek alkalmazásából eredő megtérülési adatok különböző évekhez. Ez alapján szintén egyértelműen kijelenthető, hogy minden forgalomtípus esetén megéri alkalmazni az USP technológiát, akár már középtávon (6-7 év után megtakarítást eredményez).

| 300 km-es egyvágányú, aljlapucscsal ellátott szakasz megtérülése [Millió Euró] 50 éves időtartamban, 2% inflációval számolva | | | | | |
|---|------|------|------|------|-------|
| Évek | 0 | 5 | 15 | 25 | 50 |
| Könnyűforgalom | -5,1 | -3,5 | -3,1 | -2,7 | 17,3 |
| Közepes Forgalom | -5,1 | -3,5 | 3,7 | 10,4 | 83 |
| Nehézforgalom | -5,1 | -2 | 7 | 44,5 | 471,2 |

13. táblázat 300 km-es egyvágányú, aljlapucscsal ellátott szakasz megtérülése 50 éves időtartamban, 2%-os inflációval számolva (francia tanulmány)



49. ábra Aljlapucsc alkalmazásának megtérülése egy vágány esetén 300 km-en, 2%-os inflációval számolva (francia tanulmány)

A magyar viszonyokra történő vetítés, költség-haszon elemzés készítése során sok közelítéssel és feltételezéssel kellett élnem. A pályafenntartási munkálatokra fordított összegek Magyarországon nem ennyire egzakt, egyszerűen meghatározható költségek, vágányméterre vagy vágánykilométerre történő vetítésük során a fenntartásra fordított összegek nem minden esetben bonthatóak egyértelműen az egyes munkafázisok költségeire. A pontos költségek hazánkban üzleti titkot képeznek, az általam használt értékek szakértői becslések, nagyságrendileg reális tartományba esnek.

Az infláció mértékét nem vettem figyelembe, mivel a reálisnak mondható 2%-os érték, mellyel a befektetésre fordított összeg értékéből elveszne, nagyjából megegyezik azzal a technológia költségnövekménnyel, mely ez az idő alatt előállna. Abban az esetben, ha a technológia az inflációs ráta 2%-ánál nagyobb értékben nő, az általam feltételezettnél magasabb fenntartási költségek kimaradása a bevételi oldalt erősíti, így a megtérülés szempontjából a biztonság javára tévedtem.

A vizsgálatot a francia metódussal ellentétben 1 km-re vonatkoztattam, továbbá attól eltérő körülményekre és időszakra számítottam az értékeket. A vágányélettartamot 40 évnél feltételeztem, ez magyar körülmények esetén reálisnak mondható, sajnálatos módon ennél lényegesen korosabb vágányok is találhatóak a hazai hálózatban, fővonalakon is. Az aljtávolság esetünkben is 600 mm volt, ez kilométerenként 1666 aljlapucot jelent, melynek darabárak ára szintén 20-25 euróra tehető, ez a Magyar Nemzeti Bank 2014. októberi középárfolyam adatai alapján váltva 6100-7700 Ft-nak megfelelő összegek. A francia költség-haszon elemzéstől szintén jelentősen eltérő (kisebb) forgalmakkal, tengelyterhekkel, sebességekkel számoltam.

Az alábbi ábrán az egy év alatt átgördülő bruttó elegytonna látszik a különböző magyarországi vonalakon (50. ábra). [16]



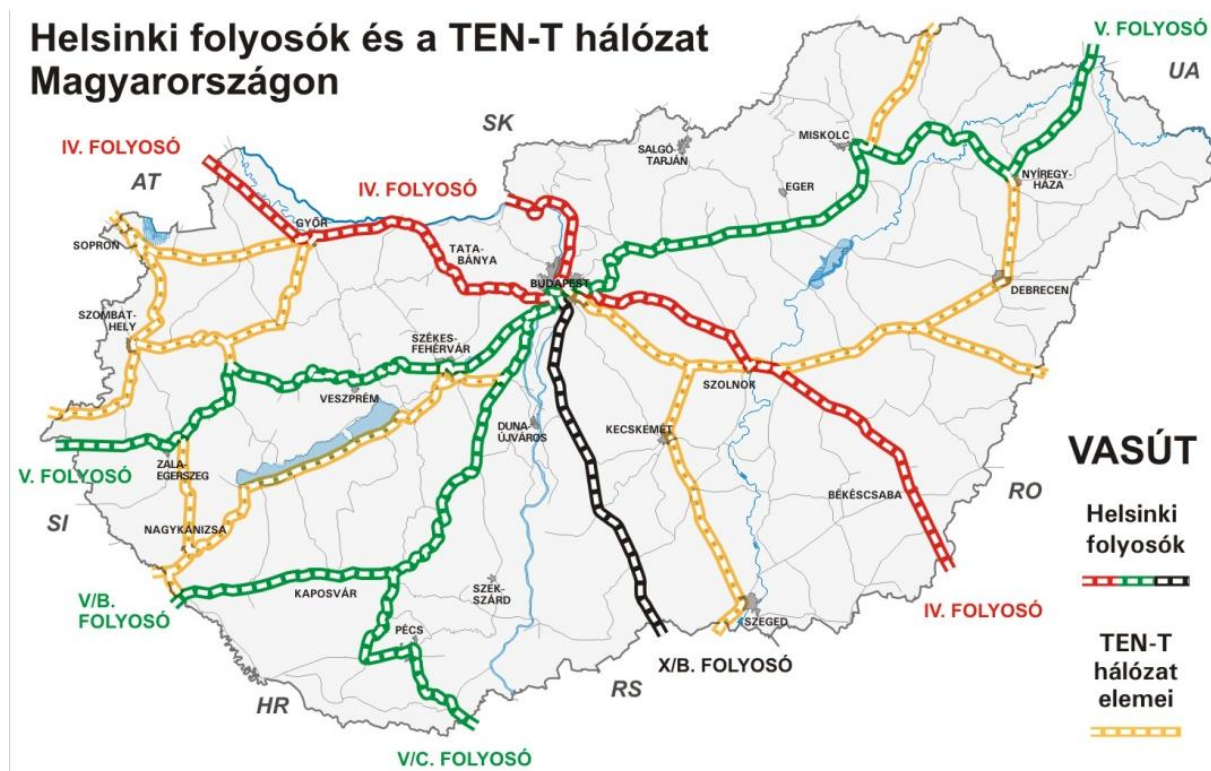
50. ábra Éves átgördült bruttó elegytonna (Magyarország) [16]

| | elegytonna [M t/év] |
|-----------|---------------------|
| Vörös | 18 -24 |
| Piros | 12 -18 |
| Narancs | 8 -12 |
| V.narancs | 4 -8 |
| Sárga | 2,4 -4 |
| V.zöld | 1,2 - 2,4 |
| S.zöld | 0,3 – 1,2 |

14. táblázat Éves átgördült bruttó elegytonna kategóriák (Magyarország)

A sötétzöldnél sötétebb színek mellékvonalakat jelölnek. Ezeken a kis forgalom és kis sebesség miatt nincs értelme az aljlapucok beépítésének vizsgálatának, mivel a beruházás költsége jóval meghaladná a realizálható hasznokat.

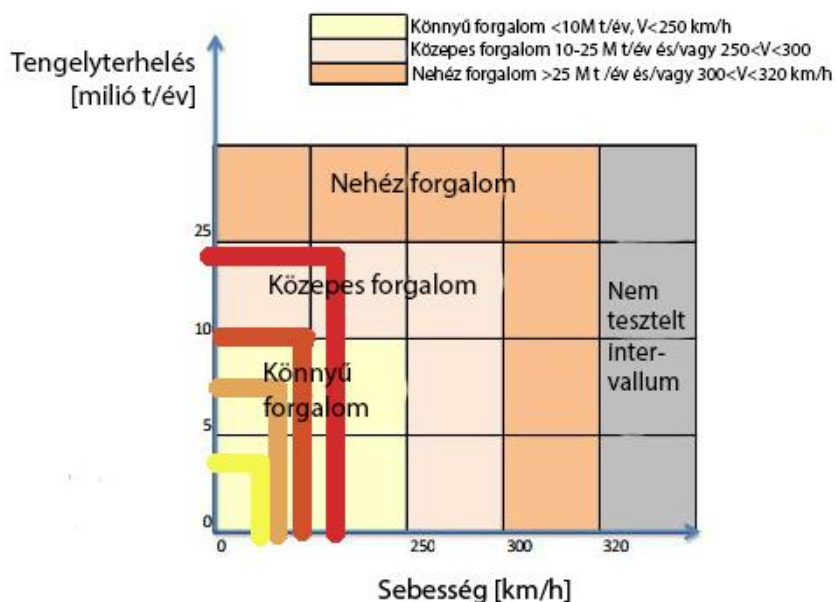
Ahogy ez az alábbi ábrán látszik, a sárgánál nagyobb elegytonnát jelző kategóriájú vonalak mindegyike a TEN-T hálózat, illetve a Helsinki folyosók valamelyikéhez tartozik (51. ábra). [17]



51. ábra Helsinki folyosók és a TEN-T hálózat Magyarországon [17]

Ezekon a vonalakon érdemes vizsgálni a keresztaljátétek beépítésének lehetőségét, mivel ezek a vonalak már a nagyobb sebesség miatt jelentősen érzékenyebbek a pályahibákra, mely a sebesség és a terhelés hatására intenzívebb. A nemzetközi kötelezettségekből fakadóan rendelkezésre kell bocsátani a pályacapacitás bizonyos százalékát, amely azt is jelenti, hogy minél kevesebb fenntartási tevékenység végzése a kívánatos.

A francia kategóriák közül minden magyar vonal a könnyű és a közepes forgalmi kategóriákba esik az áthaladt elegendő tekintetében. A sebességek Magyarországon minden esetben 250 km/h alattiak, ezért ennek a kritériumnak megfelelően egyetlen vonal sem esett magasabb terhelési kategóriába. A forgalom szerinti kategóriákat, a 14. táblázat szerinti színekkel felhasználásával a következő, 52. ábra illusztrálja:



52. ábra Forgalmi kategóriák csoportosítása (magyar viszonyok)

A különböző fenntartási munkálatok ciklusidejét a DB nem nagysebességű vonalaira kidolgozott fenntartási stratégia alapján választottam meg, mivel a magyar vasúti pályák rendszerükben a német típusú felépítményhez állnak legközelebb, szabványaink jelentős része kezdetektől a német szabványokhoz igazodott, így feltételezhetően ezekkel analóg módon kezelhetőek a fenntartási stratégia részletei is (15. táblázat).[\[18\]](#)

Ezek alapján a vágányszabályozás aljlapuc beépítési nélküli ciklusidejét 4 évre vettem fel. Ez az élettartam szakértői becslések tekintetében is reálisnak mondható.

Az ágyazatrostálás keresztaljátét nélkül 25 évente lenne szükséges, azonban ezt a ciklusidőt az aljlapucok beépítésével fellépő fenntartási intenzitást csökkentő tényező a vizsgált időszakon (tehát a vágány becsült élettartamán) túlra korrigálja majd.

| Megnevezés | Forgalmi terhelés (millió elegytonna) | Ciklusidő, illetve élettartam (év) |
|-----------------------|--|--|
| Vágányszabályozás | 40 – 70 | 4 – 5 |
| Ágyazattisztítás | 150 – 300 | 12 – 15 |
| Teljes ágyazatcsere | 200 – 500 | 20 – 30 |
| Alépitmény felújítása | > 500 | > 40 |

15. táblázat Vágányfenntartás munkálatok rendszeressége[18]

Bemeneti adatok:

- Az aljpacucok beruházási költsége (beépítéssel együtt): 11 500 000 Ft/km/vágány
- A zúzottkő ágyazati réteg vastagságának csökkenéséből adódó megtérülés (5 cm= 1100 Ft/m), ez az összeg levonódik a beruházási költségből
- Aláverés átlagos költsége: ~1800 Ft/m¹
Aljpacuc nélküli gyakoriság: Közepes és könnyű forgalom: 4 évente
- Ágyazatrostálás költsége 35 000 Ft/m²
Aljpacuc nélküli gyakoriság: Közepes és könnyű forgalom: 25 évente
- A fenntartási intenzitás csökkentő tényezője az aljpacucok által: 2,5 (a francia tanulmányban 3-as szorzót vettek figyelembe, ezt még mérsékeltem számításaim során 2,5-ös értékre)

Ez azt jelenti, hogy a 40 éves vizsgált időtartamon a 4 évente végzendő aláverési munkálatok közötti intervallum 10 évre módosul, illetve rostálásra a már említettek szerint nem lesz szükség, így ezeknek költsége mint bevétel jelenik meg a megtérülési vizsgálatban. Ezek és a francia megtérülési számításnál már említett módszertani lépésekkel analóg eljárás alapján a megtérülés 40 évre a következőképp alakul³ (16. táblázat, 53. ábra):

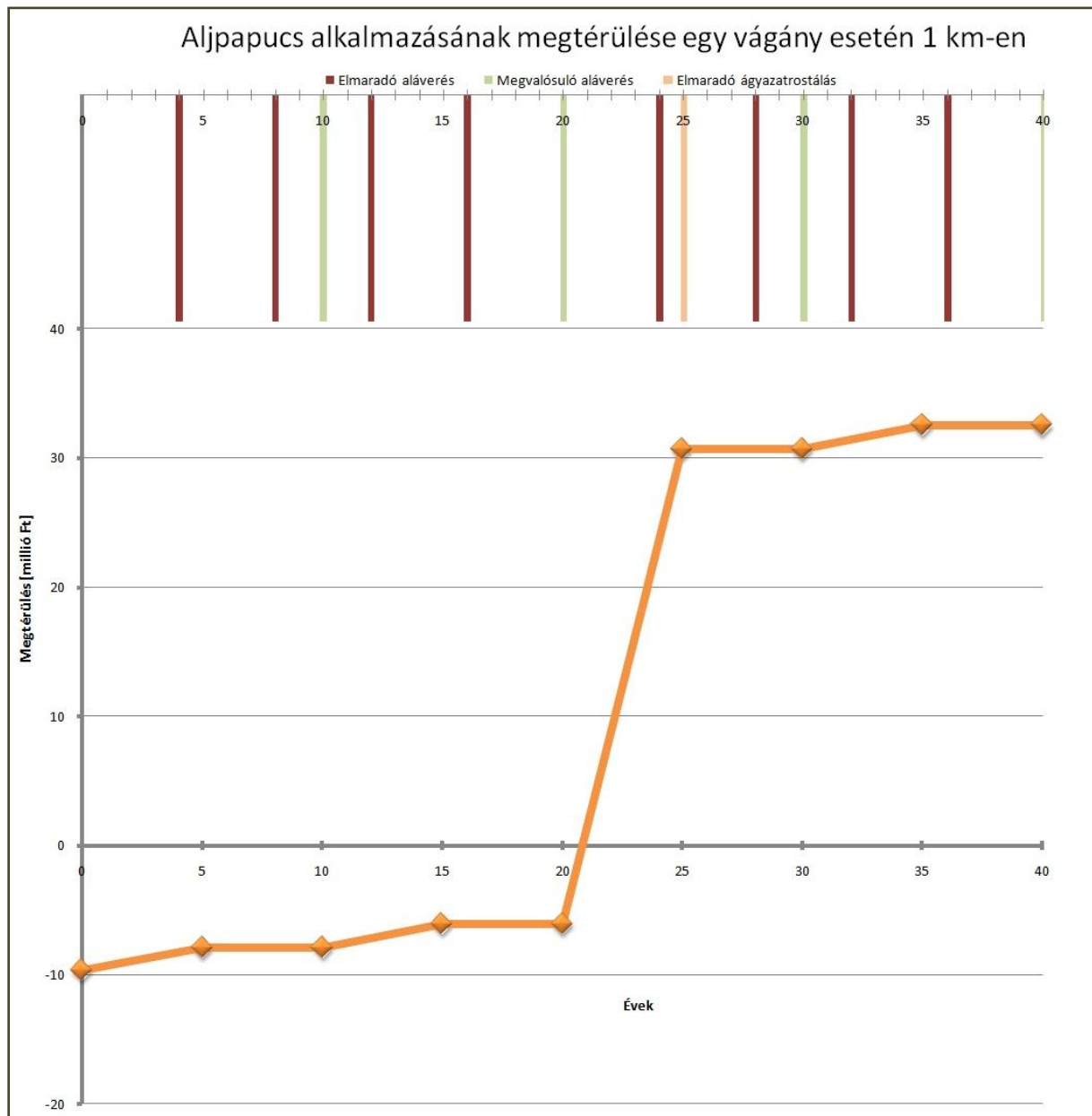
| Év | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Megtérülés [millió Ft/km] | -9,7 | -7,9 | -7,9 | -6,1 | -6,1 | 30,7 | 30,7 | 32,5 | 32,5 |

*16. táblázat Aljpacucs alkalmazásának megtérülési adatai egy vágány esetén 1 km-en
(magyarországi viszonyokra)*

¹ Szakértői becslés

² A 3. sz. mellékletben részletezett számítások és források alapján

³ Számítási részletek a 2. sz. mellékletben

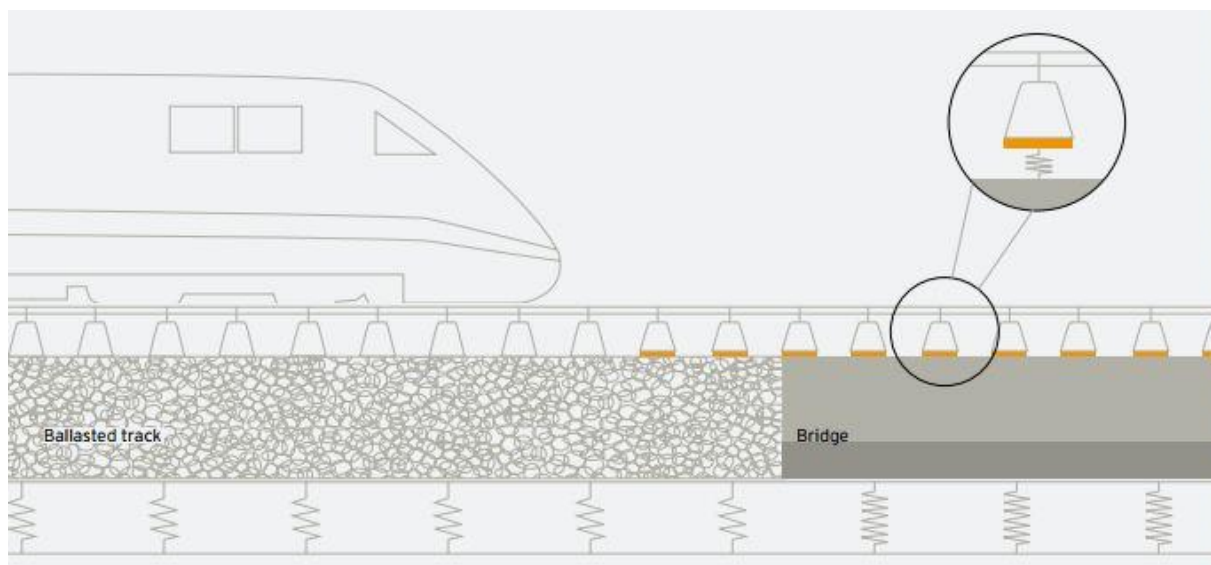


53. ábra Aljpacucs alkalmazásának megtérülése egy vágány esetén 1 km-en (magyarországi viszonyokra)

Magyar viszonyok között tehát elmondható, hogy a befektetés szintén megtérülő, hiszen a vágány üzemideje alatt kilométerenként 32,5 millió forint hasznot jelent. Ez elmarad a francia kiugróan pozitív értékektől, azonban a várakozásoknak megfelel, hiszen az ennél nagyságrenddel nagyobb megtakarítást olyan üzemi körülmények (terhelés, sebesség) között érték el, melyek Magyarországon még váratnak magukra. A francia költség-haszon elemzés során a könnyű forgalmi megtérülést felül, a közepes forgalmi megtérülést kissé alulmúlja ez az érték, azonban ez a Magyarországi viszonyok (olcsóbb munkaerő és eljárások) között reális eredmény.

Érdeemes továbbá vizsgálni olyan szakaszokon az aljlapucskok megtérülését, melyek esetén a jármű érzékenysége a pályahibákra jelentős kockázati tényezővel rendelkezik. Ilyenek például a műtárgyakat közvetlenül megelőző, illetve követő átmeneti szakaszok merevségi változása, valamint ágyazatátvezetéses megoldás esetén az altalaj merevségéből adódó hirtelen változás a rugalmasságban.

A betonlemez felépítménynél a jármű egy jelentősen (a már fentiekben mérésrel alátámasztott mértékben) nagyobb merevségű szakaszra érkezik. A nagy rugalmasságú váltás áthidalható különböző merevségű aljlapucskok alkalmazásával (54. ábra).



54. ábra Zúzottkő ágyazat és műtárgy közötti átmeneti szakasz rugalmasságának modellezése [5]

A jelenség megfigyelhető az ágyazatátvezetéses megoldás esetén is. Itt bár jelen van a zúzottkő ágyazat, mint rugalmasságot adó elem, de az altalaj merevségi tulajdonságainak változásai kihatnak a járműre, így az átmenet biztosítása kiemelt jelentőségű.

A fent említett esetek az aljlapucskok rövid szakaszokon történő alkalmazását igénylik, melynek költsége elenyésző a műtárgyon történő komplex és költséges fenntartási munkálatokhoz képest, egy esetleges baleset által okozott vagyoni és személyi károkról nem is beszélve.

Érdeemes vizsgálni továbbá a kitérők esetében az aljlapucskok gazdasági vonatkozásait.

A kitérő, mint a leggyakrabban előforduló pályahibákra különösen érzékeny szakasz vizsgálata igen komplex feladat, mivel a kitérő kialakításából adódóan nagyban eltér a folyópályában vizsgált esetektől.

A folyópálya szakaszokhoz képest, amelyekkel kapcsolatban a számítások egyszerűen elvégezhetők a homogén geometria, az sínprofil és a betonlajak szerelőfelületének állandósága miatt, a kitérők elasztikus elemeinek számításai jóval bonyolultabbak. A komplex

számítás okai között említhető a változó sínprofil, a kiegészítő elemek és a betonalkalakkal kapcsolatos feltételek általánosan erős variabilitása. Ezek a paraméterek a függőleges irányú terhelés hatására különböző mértékű lehajlást okoznak.

A váltórészben, a váltószerkezetekben is további diszkontinuitások keletkezhetnek. A váltórész csúcscsínjei magukban is egy növekvő inerciával rendelkeznek, a csúcscsín végétől a kitérő közepe felé haladva. A jármű áthaladása során, amíg a tőcsínt az egyik kerék terheli, a csúcscsínben a tehereloszlás alacsonyabb, amikor az ellentétes kerék terhelésének van kitéve. A közbenső sínek szakaszán a betonalkal folyamatosan növekvő felülete szintén említést érdemel. A masszív keresztelési csúcs a könyöksínekkel együtt nagy merevséget eredményez. A vezetőcsín és a hosszú aljak miatt a tehereloszlás ezen a területen a legnagyobb. Közvetlenül az utolsó hosszú alj után gyakran excentrikusan elhelyezett rövidített fejű aljak vannak a belső oldalon. Ez erőteljes terhelést jelent az egyik oldalon, az ennek megfelelő sintonzulással, a pálya tervezésétől függően.

A geometriailag meghatározott diszkontinuitás a kitérő területén a terhelés erős, helyi jellegű változásait idézi elő a felépítményben. Alacsonyabb ágyazási tényezővel a lehajlási hosszak meghosszabbíthatóak, ami csökkenti a nyomást a zúzottkő ágyazaton. Ugyanakkor az ágyazási tényező a különböző merevségű aljlapucskkal történő optimalizálásával lehetséges a geometriából eredő különbségek kiegyenlítése. Így a gondos tervezés és a különböző típusú keresztaljátétek beépítése kettős pozitív hatással járhat a kitérő területén: a felépítmény terhelése csökkenhet, a kitérő lehajlását pedig ki lehet egyenlíteni. [\[19\]](#)

A kitérő esetében is belátható az aljlapucskok alkalmazásában rejlő számos lehetőség. Szintén felmerülnek azonban gazdaságossági kérdések, így bár a kitérők tekintetében teljes körű költség-haszon elemzést nem készítettem, vizsgáltam a főbb aspektusokat a befektetés megtérülését illetően. Ennek keretein belül egy szabványos XI-es kitérő esetében az aljlapucskokra fordítandó összeget vetem össze a kitérőcsere költségeivel.

A kitérő keresztaljakkal történő ellátásának költségeinél azzal a reálisnak mondható feltételezéssel éltem, hogy az aljlapucsk egyedülálló betonalkalra vonatkozó árával egyenes arányosságban áll a kitérő betonalkal alsó síkjának összfelületére⁴ szükséges aljlapucskok ára. Így egy szabványos XI rendszerű kitérő esetén a keresztaljátétekre fordítandó összeg 530 000 Ft-ra tehető.

A kitérőcsere adataim alapján⁵ 37 millió forint körüli összegre tehető. A beruházási költség ennek kb. 1,5%-a, egy esetleges kitérő cserére fordítandó összeghez képest elenyészőnek mondható.

⁴ Részletes számítás az 1. sz. mellékletben

⁵ Részletes számítás és forrás a 1. sz. mellékletben

8. Összegzés

A vasút kezdeteikor használt faaljakat a vasút térnyerésekor felváltották az alj feladatainak kielégítésére sokkal alkalmasabb betonalkak. Azonban bizonyos előnyös tulajdonságok elvesztek a beton anyagának természete miatt, ezért vált szükségessé a rugalmasság növelésére különböző eszközök beiktatása, például az aljlapucscok beépítése.

Az aljlapucscok tesztelése 1980-as évektől kezdődött meg Nyugat-Európában, beépítésük a 90-es évektől kezdődően sikeres és egyre inkább elterjedőben van.

Bizonyításra került, hogy a keresztaljalátétek használata számos pozitív hatást eredményez a vasútépítés és -fenntartás területén. Ezek között említhető a felépítmény minőségének óvása, kiemeltképp a zúzottkő ágyazat védelme, ezáltal az életciklus hosszabbítása. Ez köszönhető egyrészt a gumi anyagtermészetéből adódó penetrációs tulajdonságának, mely a zúzottkő betonnal való érintkezéséből adódó nagymértékű aprózódását szignifikánsan csökkentette, így a betonalj alatti üregek képződését, illetve az ágyazatban lévő, vízelvezetés szempontjából elengedhetetlen járatok a porrá morzsolódott zúzottkő szemcsékkel történő feltelését akadályozza. Ezzel együtt, ahogy azt a mérések igazolták, szignifikánsan nő a kontakt pontok, így felfekvési terület nagysága, a tehereloszlás így egyértelműen kedvezőbb.

Ezt erősíti az a további előny, hogy a rugalmasabb vágányban, a Zimmermann-módszer alapján számolt módon a lehajlási hossz növekedése miatt a teher több aljra is oszlik el, csökkentve az átlagos összenyomódást, valamint az ágyazatra, azon keresztül az alépítményre jutó terhelést.

Mérésekkel igazolt az aljlapucscok süllyedések, irány- és fekszint hibák mérséklésére vonatkozó hatása, ennek vonzataképp a fenntartási költségek radikális csökkenése. A fentebb említett problémák egy önmagukat erősítő avulási körfolyamatot indítanak be. Ezek leírására számos modell létezik, melyek alapján vizsgálják a vágány leromlásának sebességét és mértékét, illetve megállapítják a szükséges beavatkozás időpontját. Ennek megfelelő megválasztása elengedhetetlen az optimális életciklus-menedzsmentben. Számos külföldi modell és mérés bizonyította, hogy az aljlapucscok beépítése igen jelentősen növeli a vágányminőséget és élettartamot. A hossz-fekszint mérések alapján a vágányszabályozási munkálatok közötti időközök többszörösükre hosszabbodnak, mely az életciklus-költségek tekintetében kiemelt előnnyel bír. Az aláverési, rostálási munkálatok ritkulása nem csak önmagában jelent pénzügyi hasznot, hanem a folyamatos üzem biztosítottága, így a vágányzárak és üzemi fennakadások jelentette plusz költségek elmaradnak, mely szintén haszonként jelennek meg a megtérülési elemzésben.

Ez a nyugat-európai vasúti forgalmakat és sebességeket tekintve elérheti a 450 milliós megtérülést 50 év alatt, ami igen jelentősnek mondható. A magyar viszonyokra vetítve

azonban ez az összeg bár mérsékeltebb, szintén megtérülőnek tekinthető, a fenntartási költségek csökkenése miatt.

Nehezebben számszerűsíthető előny továbbá az aljpacucoknak a rezgés- és zajcsillapításban betöltött szerepe. A forgalom keltette mechanikai rezgéseket erősítik a vágánygeometria leromlásából adódó pályahibák, melyek veszélyeztetik a szerelvényt és áruját, illetve csökkentik az utazáskomfortot, továbbá terhelik a pálya környezetét a rezgés és zajszennyezés által. Az aljpacucok biztosította pályageometria-védelem már bizonyítást nyert az előbbieken, az emiatt keletkező addicionális rezgések elmaradása az avulási körfolyamat lassulását eredményezi. A beiktatási csillapításra vonatkozó vizsgálatok alapján bizonyítást nyert továbbá a rezgés és zajcsökkentés mértéke. Ezek alapján elmondható, hogy bár az elsődleges levegőben terjedő zajokra szignifikáns hatásuk nem kimutatható, a szerkezetben terjedő testhangok szempontjából releváns frekvenciatartományban elérhető a rezgések több, mint 10 dB-es csökkentése, mely jelentős eredmény. Az előbbieken alapján rezgéscsökkentés tekintetében a műszakilag optimalizált keresztaljátét gazdaságos javítást jelent a hagyományos vágányfelépítményben. Az aljpacucshoz felhasznált anyag megválasztása azonban döntő fontosságú, mivel az eltérő rugalmasságú anyagok eltérő csillapítást eredményeznek.

A megfelelő típus pontos kiválasztása adott terhelés alatti maximum lehajlás meghatározása alapján történik. Az egyes aljpacucok egy anyagi tulajdonságú csoporton belül elsősorban rugalmasságukban térnek el. A rugalmasságuk az ágyazási tényező segítségével határozható meg. Napjainkban egyre elterjedtebb a több funkcionális rétegből kialakított aljpacuc beépítése, illetve a számos rögzítési mód közül a ragasztásos vagy a még száradó aljba, közvetítő réteg nélküli applikáció alkalmazása.

Összességében elmondható, hogy magyar viszonyokra tekintve az aljpacucok beépítése megtérülő lenne a páneurópai folyosók vonalain, illetve kiemelten érdemes lenne olyan, pályahibákra (süllyedések, fekszinthibák) különösen érzékeny keresztmetszetekben, melyek kockázati tényezője a folyópálya szakaszokénál sokkal magasabb. Ilyenek például a műtárgyakat megelőző és követő átmeneti szakaszok és a kitérők, ahol a keresztaljátétek alkalmazása kiemelten javasolt.

9. Mellékletek

1. melléklet: XI-es kitérő aljhosszainak összegzése, alkalmazott aljpacucs mennyiségének és költségének számítása, kitérőcsere költségeinek becslése [20]

| Alj sorszám | Aljhossz [m] | Alj sorszám | Aljhossz [m] |
|-------------|--------------|-------------|--------------|
| 1 | 2,6 | 31 | 3,15 |
| 2 | 2,6 | 32 | 3,15 |
| 3 | 2,6 | 33 | 3,25 |
| 4 | 2,2 | 34 | 3,25 |
| 5 | 2,2 | 35 | 3,3 |
| 6 | 2,6 | 36 | 3,3 |
| 7 | 2,6 | 37 | 3,4 |
| 8 | 2,6 | 38 | 3,4 |
| 9 | 2,65 | 39 | 3,5 |
| 10 | 2,65 | 40 | 3,5 |
| 11 | 2,65 | 41 | 3,6 |
| 12 | 2,65 | 42 | 3,6 |
| 13 | 2,7 | 43 | 3,7 |
| 14 | 2,7 | 44 | 3,7 |
| 15 | 2,7 | 45 | 3,8 |
| 16 | 2,7 | 46 | 3,8 |
| 17 | 2,75 | 47 | 3,9 |
| 18 | 2,75 | 48 | 3,9 |
| 19 | 2,8 | 49 | 4 |
| 20 | 2,8 | 50 | 4 |
| 21 | 2,85 | 51 | 4,15 |
| 22 | 2,85 | 52 | 4,15 |
| 23 | 2,9 | 53 | 4,25 |
| 24 | 2,9 | 54 | 4,25 |
| 25 | 2,95 | 55 | 4,4 |
| 26 | 2,95 | 56 | 4,4 |
| 27 | 3 | 57 | 4,5 |
| 28 | 3 | 58 | 2,6 |
| 29 | 3,1 | 58 | 2,6 |
| 30 | 3,1 | | |
| Σ | | | 82,1 |

| | Egyedülálló betonalj | Kitérő (össz) |
|---|-----------------------------|----------------------|
| Betonalj nominális szélessége [m] | 0,3 | 0,3 |
| Aljhossz [m] | 2,5 | 82,1 |
| Alj alsó síkjának nominális területe [m²] | 0,75 | 24,63 |
| Darabár [Ft] | 7000 | 229880 |

| | Munkálatok költsége [M Ft] |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Sopron állomás 21. sz. kitérő cseréje | 42 |
| Beled 1. és 5. sz. kitérők cseréje | 64 |
| Porpác 7. sz. kitérők cseréje | 47 |
| Vép 2. sz. kitérő cseréje | 31 |
| Átlag | 36,8 |

2. melléklet: Megtérülési vizsgálat egyenlegének részletezése

| Évek | Bevételek | Kiadások | Egyenleg |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0 | 1800000 | 11500000 | -9700000 |
| 1 | | | -9700000 |
| 2 | | | -9700000 |
| 3 | | | -9700000 |
| 4 | 1800000 | | -7900000 |
| 5 | | | -7900000 |
| 6 | | | -7900000 |
| 7 | | | -7900000 |
| 8 | 1800000 | | -6100000 |
| 9 | | | -6100000 |
| 10 | | 1800000 | -7900000 |
| 11 | | | -7900000 |
| 12 | 1800000 | | -6100000 |
| 13 | | | -6100000 |
| 14 | | | -6100000 |
| 15 | | | -6100000 |
| 16 | 1800000 | | -4300000 |
| 17 | | | -4300000 |
| 18 | | | -4300000 |
| 19 | | | -4300000 |
| 20 | | 1800000 | -6100000 |
| 21 | | | -6100000 |
| 22 | | | -6100000 |
| 23 | | | -6100000 |
| 24 | 1800000 | | -4300000 |
| 25 | 35000000 | | 30700000 |
| 26 | | | 30700000 |
| 27 | | | 30700000 |
| 28 | 1800000 | | 32500000 |
| 29 | | | 32500000 |
| 30 | | 1800000 | 30700000 |
| 31 | | | 30700000 |
| 32 | 1800000 | | 32500000 |
| 33 | | | 32500000 |
| 34 | | | 32500000 |
| 35 | | | 32500000 |
| 36 | 1800000 | | 34300000 |
| 37 | | | 34300000 |
| 38 | | | 34300000 |
| 39 | | | 34300000 |
| 40 | | 1800000 | 32500000 |
| Σ | 51200000 | 18700000 | 32500000 |

3. melléklet: Ágyazatrostálás költségeinek számítása [21]

| | Munkálatok költsége [Ft] |
|--|--------------------------|
| Ágyazatrostálás géppel (560 vfm.) | 6945285 |
| Vágányszabályozás (3x építési) kitűzéssel | 2436000 |
| Zúzottkő ágyazat pótlása dozátoros szerelvényből | 9689190 |
| Vágányszabályozás (1x fenntartási) kitűzéssel | 730800 |
| Σ | 19801275 |
| 1 km-re vetített érték | 35359,41964 |

10. Ábrajegyzék

| | |
|---|----|
| 1. ábra- Tehereloszlás változása az aljlapucsock beépítése által [3] | 7 |
| 2. ábra Az alj alatti érintkezési felületek [4] | 8 |
| 3. ábra Hézag kialakulása az aljlapucsock nélküli betonalj alatt, konzisztensebb behajlás modellezése [5] | 8 |
| 4. ábra Vaszary féle egyszerűsített avulási modell..... | 10 |
| 5. ábra Avulási görbék aljlapucsock beépítése nélkül és aljlapucsock beépítésével | 11 |
| 6. ábra Avulási görbék különböző típusú szakaszokra [3] | 12 |
| 7. ábra Hossz-fekkszint jel mérés | 12 |
| 8. ábra Süllyedési viselkedés aljlapucsock beépítésével és nélküle | 13 |
| 9. ábra Vágánymerevség mérése [8]..... | 14 |
| 10. ábra Rezgések átvitele a vasútvonalak környezetében[5] | 15 |
| 11. ábra A1 és B1 típusú mérés (balra), A2 és B2 típusú mérés (jobbra) [9] | 15 |
| 12. ábra Különböző típusú felépítményi rendszerek rezgései[9] | 16 |
| 13. ábra Próbatestek rezgésértékeinek különbsége aljlapucsock alkalmazásával és nélküle[9] | 16 |
| 14. ábra Beiktatási csillapítás aljlapucsocksal (szimuláció balra, mérés jobbra) [11]..... | 17 |
| 15. ábra Mért beiktatási csillapítás különböző keresztaljalátétekkel [3] | 18 |
| 16. ábra Modell megközelítések a keresztaljaláték beiktatási csillapításának becsléséhez..... | 19 |
| 17. ábra Aljlapucsockok anyagtípusainak alkalmazhatósága[5] | 21 |
| 18. ábra Keresztaljaláték összetett funkcionális rétegekkel [3] | 22 |
| 20. ábra Georács típusú rögzítési mód [13] | 24 |
| 19. ábra Kavicsréteggel ellátott aljlapucsock[12] | 24 |
| 21. ábra Szegecses típusú rögzítési mód [5] [13] | 25 |
| 22. ábra Permetezéssel ellátott típusú rögzítési mód [14]..... | 26 |
| 23. ábra Vizsgálati elrendezés | 28 |
| 24. ábra "0" jelű, aljlapucsock nélküli betonalj vizsgálati elrendezése..... | 29 |
| 25. ábra "0" jelű rendszer elmozdulásai dinamikus terhelés hatására | 31 |
| 26. ábra "A" jelű, aljlapucsocksal ellátott betonalj vizsgálati elrendezése..... | 32 |
| 27. ábra "A" jelű rendszer elmozdulásai zúzottkő ágyazaton, dinamikus terhelés hatására | 33 |
| 28. ábra "A" jelű aljlapucsock bordázott felülete | 34 |
| 29. ábra "A" jelű, aljlapucsocksal ellátott betonalj vizsgálati elrendezése..... | 34 |
| 30. ábra "B" jelű rendszer elmozdulásai dinamikus terhelés hatására | 36 |
| 31. ábra A próbatestek statikus merevségei | 36 |
| 32. ábra Zúzottkő ágyazaton, 4 Hz-en dinamikus terhelés hatására vizsgált elmozdulás | 37 |
| 33. ábra Zúzottkő ágyazaton, 5 Hz-en dinamikus terhelés hatására vizsgált elmozdulás | 37 |
| 34. ábra A próbatestek dinamikus merevségei | 38 |
| 35. ábra A keresztaljas felépítmény helyettesítése hosszaljas felépítménnyel [15]..... | 39 |
| 36. ábra Helyettesítő hosszgerenda elvén alapuló igénybevétel számítása [15]..... | 39 |
| 37. ábra Besüllyedési és nyomatéki hatásábrák [15] | 40 |
| 38. ábra A sántalp közepén ébredő feszültségek változása [15] | 40 |
| 39. ábra Kontaktfelület az aljlapucsockon és az ágyazaton..... | 43 |

| | |
|---|----|
| 40. ábra Aljlapucs teljes felülete | 44 |
| 41. ábra Zúzottkő ágyazat lenyomat vizsgálata szelektív színcserével | 44 |
| 42. ábra Zúzottkő ágyazat lenyomata az aljlapucson | 44 |
| 43. ábra Terhelés szempontjából releváns aljlapucs-fél teljes felülete (100%) | 45 |
| 44. ábra Terhelés szempontjából releváns aljlapucs-fél lenyomatának vizsgálata szelektív | 45 |
| 45. ábra Zúzottkő ágyazat lenyomata terhelés szempontjából releváns aljlapucs-félen (21%) | 45 |
| 46. ábra Osztrák becslési modell az aljlapucscok gazdasági hatására [5]..... | 46 |
| 47. ábra Forgalmi kategóriák besorolása [13] | 47 |
| 48. ábra Aljlapucs alkalmazásának megtérülése egy vágány esetén 300 km-en (francia tanulmány) | 49 |
| 49. ábra Aljlapucs alkalmazásának megtérülése egy vágány esetén 300 km-en, 2%-os inflációval számolva (francia tanulmány) | 50 |
| 50. ábra Éves átgördült bruttó elegytonna (Magyarország) [16] | 51 |
| 51. ábra Helsinki folyosók és a TEN-T hálózat Magyarországon [17]..... | 52 |
| 52. ábra Forgalmi kategóriák csoportosítása (magyar viszonyok) | 53 |
| 53. ábra Aljlapucs alkalmazásának megtérülése egy vágány esetén 1 km-en (magyarországi viszonyokra)..... | 55 |
| 54. ábra Zúzottkő ágyazat és műtárgy közötti átmeneti szakasz rugalmasságának modellezése [5] .. | 56 |

11. Táblázatjegyzék

| | |
|--|----|
| 1. táblázat Próbatestek főbb adatai [11]..... | 17 |
| 2. táblázat Az MSZ EN 13481-2 szabvány 2. sz.táblázata | 27 |
| 3. táblázat "0" jelű próbatest merevségei..... | 30 |
| 4. táblázat "0" jelű próbatesten, zúzottkő ágyazaton végzett dinamikus terhelés mérési eredményei | 30 |
| 5. táblázat "0" jelű próbatesten, sík betonlemezen végzett dinamikus terhelés mérési eredményei | 31 |
| 6. táblázat "A" jelű próbatest merevségei | 32 |
| 7. táblázat "A" jelű próbatesten, zúzottkő ágyazaton végzett dinamikus terhelés mérési eredményei | 33 |
| 8. táblázat "B" jelű próbatest merevségei..... | 35 |
| 9. táblázat "B" jelű próbatesten, zúzottkő ágyazaton végzett dinamikus terhelés mérési eredményei | 35 |
| 10. táblázat "B" jelű próbatesten, sík betonlemezen végzett dinamikus terhelés mérési eredményei | 35 |
| 11. táblázat A Zimmermann módszerhez felhasznált alapadatok és számítási eredmények | 41 |
| 44. ábra Terhelés szempontjából releváns aljlapucsc-fél lenyomatának vizsgálata szelektív színcserével | 45 |
| 12. táblázat 300 km-es egyvágányú, aljlapucscsal ellátott szakasz megtérülése 50 éves időtartamban (francia tanulmány) | 49 |
| 13. táblázat 300 km-es egyvágányú, aljlapucscsal ellátott szakasz megtérülése 50 éves időtartamban, 2%-os inflációval számolva (francia tanulmány) | 50 |
| 14. táblázat Éves átgördült bruttó elegytonna kategóriák (Magyarország)..... | 52 |
| 15. táblázat Vágányfenntartás munkálatok rendszeressége[18] | 54 |
| 16. táblázat Aljlapucsc alkalmazásának megtérülési adatai egy vágány esetén 1 km-en (magyarországi viszonyokra)..... | 54 |

12. Felhasznált irodalom

- [1] http://www.uic.org/IMG/pdf/2009-03-26_Summarising_Report_UIC-USP.pdf
- [2] http://www.cdm.eu/project_reference/HU_Vasutallomas%20USP,%20Gyor.pdf
- [3] http://www.getzner.com/uploads/media/02_Sleeper_Pads_for_ballasted_tracks.pdf
- [4] http://www.mavkfv.hu/download/Fenntarthatosag_ProfDrPeterVeit.pdf
- [5] <http://innorail.hu/rezgescsokkent-es-keresztaljalatetekkel/>
<http://innorail.hu/en/vibration-mitigation-with-under-sleeper-pads>
- [6] <http://innorail.hu/eletciklus-menedzsment/>
- [7] Dr. Kormos Gyula: Vasúti pályafenntartás. Előadási jegyzet kézirat, Budapest 1994.
- [8] <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:18486/FULLTEXT01.pdf>
- [9] <http://www.drc.si/Portals/6/prispevki/II/386-393.pdf>
- [10] http://www.rivas-project.eu/fileadmin/documents/Final_Conference/012_131121-01-WP_3-Under-Sleeper_Pads-GARBURG-BackUp.pdf
- [11] http://www.traconference.eu/papers/pdfs/TRA2014_Fom_29739.pdf
- [12] Daczi László: Alj alatti betétek (USP), 2011.
- [13] http://www.fimor.fr/public/Benefices_USPs.pdf
- [14] <http://www.vf-systems-rail.fr/v-fit-patin-reducteur-attrition.html>
- [15] Megyeri Jenő: Vasútépítéstan, Műegyetemi Kiadó, 2001., 167-172. o.
- [16] Nemzeti Közlekedési Stratégia II. kötet: Helyzetkép, Közlekedési Koordinációs Központ, Budapest, 2008
- [17] <http://www.kti.hu/uploads/images/Trendek6/Otodik/5-100.jpg>
- [18] Dr. Horvát Ferenc: Vasúti pályadiagnosztika, Széchenyi István Egyetem, 2013.
http://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.sze.hu%2F~horvat%2FMSC%2520oktatas%2FMSc_Vas%25C3%25BAti%2520p%25C3%25A1lyadiagnosztika%2FPalyadiagn_2.ppt&ei=yRtIVJT1B-eM7Aag-YG4DQ&usg=AFQjCNFhFWSnBoZoku3s_uLeBjhgcU200A&sig2=mJzh9y4pgYIBRfuFQpgVdQ&bvm=bv.77880786,d.ZGU
- [19] <http://www.tinobaab.net/ftps/sonstiges/publications/Dr.%20Harald%20Loy%20-%20Getzner%20Werkstoffe%20-%20Under%20Sleeper%20Pads%20in%20Turnouts%20-%20RTR.pdf>
- [20] GYSEV Zrt 2012 éves beszámoló
http://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCUQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww2.gysev.hu%2Ffiles%2Ftiny_mce%2FKozadat%2520program%2FBeszamolok%2FGYSEV%2520Zrt%2520%25202012%2520%2520%25C3%25A9ves%2520besz%25C3%25A1mol%25C3%25B3.pdf&ei=5BxIVJPJHsfg7QaugoDgCg&usg=AFQjCNF61DHGbWrHQztXKFNptzumR8h6Ow&sig2=DokGVz24RDLb6K0gZfwj2Q&bvm=bv.77880786,d.ZGU
- [21] GYSEV Vállalkozási Szerződés, 2012.
[http://www2.gysev.hu/files/tiny_mce/Kozbeszerzesek/Szerzodes_alairt_Agyazatrostalas\[1\].pdf](http://www2.gysev.hu/files/tiny_mce/Kozbeszerzesek/Szerzodes_alairt_Agyazatrostalas[1].pdf)

- <http://www.pandrolcdmtrack.com/products.html>
- <http://www.stradal-ferroviaire.fr/gamme-ferroviaire-urbain/ferroviaire/patins-anti-attribution/>
- <http://trophees-innovation.paysdelaloire.fr/editions-2009-2013/candidats-2009-2013/fimor-patin-ferroviaire-anti-attribution-en-polyurethane-22964.kjsp>
- <http://www.sateba.com/article34.html>
- http://www.tiflex.co.uk/track_home/under/under.html
- [http://www.strabag-rail.com/databases/internet/_public/files.nsf/SearchView/80CF826529A01F13C12579CF004E0661/\\$File/FINAL_Schwellenb_Eng_LOW.pdf](http://www.strabag-rail.com/databases/internet/_public/files.nsf/SearchView/80CF826529A01F13C12579CF004E0661/$File/FINAL_Schwellenb_Eng_LOW.pdf)
- http://ac.els-cdn.com/S0043164808001816/1-s2.0-S0043164808001816-main.pdf?_tid=0b7a603a-4311-11e4-93da-00000aab0f02&acdnat=1411470301_bca743fa2be5a8391a9dcdbc668316f6
- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164808001816>
- <http://www.mwendo.co.za/rail/ballasted-track.html>