



MULTIDISZCIPLINÁRIS KIHÍVÁSOK
SOKSZÍNŰ VÁLASZOK

GAZDÁLKODÁS- ÉS SZERVEZÉSTUDOMÁNYI FOLYÓIRAT

MULTIDISCIPLINARY CHALLENGES
DIVERSE RESPONSES

JOURNAL OF MANAGEMENT
AND BUSINESS ADMINISTRATION

**A NAGYGÉPES VASÚTI ALÉPÍTMÉNYJAVÍTÁSI
TECHNOLÓGIA BEVEZETÉSE A MAGYAR
VASÚTÉPÍTÉSBEN**

**INTRODUCTION OF LARGE-SCALE MECHANICAL
RAILWAY SUBSTRUCTURE REPAIR TECHNOLOGY IN
HUNGARIAN RAILWAY CONSTRUCTION**

HORVÁTH Róbert - SZIGETI Cecília - MAJOR Zoltán

Kulcsszavak: *vasúti pályahálózat, közlekedésfejlesztés, fenntarthatóság*

Keywords: *Rail Network, Transport Development, Sustainability*

Jel kód: R42

<https://doi.org/10.33565/MKSV.2024.KSZ.01.03>

ABSZTRAKT

A magyar vasúti hálózat európai törzshálózatba (TEN-T) tartozó elemeinek teljes körű felújítása, modernizációja fokozott ütemben kezdődött meg a 2009-2016 közötti KÖZOP finanszírozási program keretében. A korszerű technológiák bevezetése kézenfekvő megoldás volt a vasúti alépítmény rehabilitációjának elvégzéséhez is tekintve a program során munkáltatás alá vett jelentős vágányhosszakat. A Magyarországon új technológia honosításához azonban a tervezési, műszaki ellenőrzési és kivitelezési folyamatokat szabályozó előírásrendszereket is meg kellett újítani. A kivitelezési munkák megkezdése előtt a vasúti nagygépes alépítményjavítási technológiához nélkülözhetetlen törtszemcsés kiegészítő réteg anyagának hazai körülmények között elérhető kőbányákból származó keverékét is ki kellett kísérletezni. A honosítási folyamat során a tervezési és műszaki ellenőrzési metódusok eleinte párhuzamosan folytak a korábban alkalmazott eljárásokkal míg az egyenértékűség igazolásra került. Laboratóriumi tesztek és próbaszakaszok építésével történt a kőanyag keverékterv és a technológia véglegesítése. Az alkalmazott új építési módszer a magas műszaki színvonal és a konvencionális technológiához képest igen gyors kivitelezési idő miatt jelentős vágányzári idő csökkenést eredményezett és több fontos környezetvédelmi szempontból is előnyös folyamat alkalmazását is lehetővé tette. A gépláncok a teljes zúzottkő recycling technológiával a be és kiszállítandó kőanyagok mennyiségét csökkentették, mint az alépítményi kiegészítőréteg, mint az ágyazati kőanyag tekintetében. A korszerű vasúti nagygépes alépítményjavítási technológia alkalmazásának köszönhetően az elért magas műszaki színvonal mellett az átépítési munkák CO₂ kibocsátása és ezzel párhuzamosan a vasútvonalak ökológiai lábnyoma is csökkent.

ABSTRACT

The full-scale renewal and modernisation of the elements of the Hungarian railway network forming part of the trans-European core network (TEN-T) was

intensified in the framework of the Transport Operational Programme in the period 2009-2016. The introduction of modern technologies was an obvious solution to carry out the rehabilitation of the railway subgrade, given the significant lengths of track that were undergoing work during the programme. However, to be able to introduce the new technologies in Hungary, the regulatory framework governing the design, technical control and construction processes had to be renewed. Before the construction work could start, a mixture of a crushed stone supplementary layer, which is essential for the mechanized rehabilitation of railway subgrades, had to be developed in quarries in the country. During the accreditation process, the methods of design and technical verification were initially carried out in parallel with those used previously until equivalence was demonstrated. Laboratory tests and the construction of trial sections were used to finalise the stone mixture and the technology. The new construction method used resulted in a significant reduction in track possession times due to the high technical quality and very short construction times compared to the conventional technology, and also allowed the application of several important environmental benefits. By using the complete crushed stone recycling technology, the machines reduced the amount of stone material to be supplied and removed, with respect to both the substructure supplementary layer and the ballast material. In addition to the high technical standard achieved, the application of modern mechanised railway subgrade rehabilitation technology reduced the CO₂ emissions of the reconstruction work and, at the same time, the ecological footprint of the railway lines.

BEVEZETÉS

A vasúti pályahálózat, melynek nagy része Európa szerte 100-120 évvel ezelőtt alakult ki folyamatos karbantartás mellett ciklusonként nagyobb felújításon, korszerűsítésen kell átessen. A vasúti személy és teherszállítás kapacitásának fejlődésével nagyban megnövekedett a sebesség és a tengelyterhelés is.

(Lichtberger, 2022). Az alépítmény megerősítése, átépítése nagy költségekkel és forgalmi zavartatással jár a konvencionális technológiák alkalmazásával. Ausztriában és Németországban már az 1970-as évek második felében felmerült az igény egy olyan új technológia iránt, mely lehetővé teszi az alépítményi munkák gyors, a meglévő vágányok alatt, azok elbontása nélkül történő alépítmény megerősítést. A vasúti nagygépes alépítmény javítás technológiájának kidolgozása nem csak gépészeti szempontból kívánt innovációt, hanem új pálya és geotechnikai tervezési és műszaki ellenőrzési eljárások tekintetében is újszerű gondolkodást követelt. A gépláncok magyarországi alkalmazhatóságának egyik feltétele volt a technológia specifikus tervezési és műszaki ellenőrzési eljárások honosítása, illetve hazai körülményekre való adaptálása. Az elmúlt több mint negyven évben tovább tökéletesítették a gépészeti és mérnöki hátteret és egyre nagyobb hangsúlyt fektettek az újrahasznosítási folyamatokra. Ha megvizsgáljuk részletesen a nagygépes alépítményjavítás lehetőségeit, akkor az alábbi megállapításokra juthatunk.

Az országok lakosságának mobilitása és sikeres gazdasági tevékenysége alapvetően összefügg a közlekedési infrastruktúra teljesítőképességével, legyen az vasút, közút vagy víziút. A fő szempont az állandóan magas műszaki színvonalon lévő és folyamatosan rendelkezésre álló infrastruktúra. A vasúti forgalom szempontjából ez az igény azt jelenti, hogy a vonalhálózatot a követelményeknek megfelelően kell kialakítani. A követelményeket lényegében a vonatok haladási sebessége és tengelyterhelése határozza meg. Az elmúlt évtizedek során mind a vonatok sebessége, mind a tengelyterhelések is (a szállított terhek megnövekedése révén) megemelkedtek. Ahhoz, hogy e fejleménnyel lépést tartsunk, folyamatosan tovább kell fejleszteni az infrastruktúra létesítményeket, tehát ebben az esetben a vágányrendszert, és szinten kell tartani a műszaki fejlődés haladásával. E célt szolgálják a folyamatosan átdolgozott általános műszaki szabályzatok, valamint az infrastruktúra üzemeltető vasúti társaságok speciális, vágányrendszerek kialakítására vonatkozó irányelvei. A műszaki és különösen az építési szerkesztési

előírások mellett az alkalmazott építési technológiák is fontos szerepet játszanak a követelményeknek tartósan megfelelő vasúti pálya megteremtésében.

Kutatási kérdések, hipotézisek:

- Kutatásunk során feltárjuk a nagygépes alépítményjavítási módszer nyújtotta lehetőségeket. Feltételezzük azt, hogy a módszer alkalmazása gyorsabb munkavégzést, egyenletesebb és jobb minőségű pályaállapotot eredményez a munkafolyamat végén.
- A költséghatékonyság mellett ökohatékony is a megoldás, mivel a pályában lévő anyag jelentős mennyiségét lehet újra felhasználni a recycling folyamatnak köszönhetően. Alkalmazásával a CO₂ kibocsátás és ezzel együtt az ökológiai lábnyom is eredményesen csökkenthető.

IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az elmúlt évtizedekben végbement jelentősebb változások, mint például a motorizáció fejlődése, az utazási szokások és a közlekedéssel kapcsolatos igények változása, digitalizáció, fenntarthatóság, környezetvédelem éreztetik hatásukat, melyre a vasútnak is reagálnia szükséges (Erdei, 2020). Az új közlekedési infrastruktúra létesítésének széles körű pozitív externális hatási is vannak, mélyebb társadalmi hatásokat is gyakorol a turizmusra (Grotte et al. 2021) és a helyi társadalomra (Chan et al. 2024). Egy német kutatás eredményei szerint a vasúti szolgáltatás 10%-os növelése körülbelül 1%-kal csökkenti a szén-monoxid- és 2%-kal és nitrogénoxid-szennyezést. A kutatás során azt is megállapították, hogy a vasúti szolgáltatás bővítése csökkenti az autó- és motorkerékpárhasználatot. Következtetéseik szerint szennyezéscsökkentés pozitív hatásai a vasúti szolgáltatások bővítése révén lényegesen többet érnek, mint a vasúti támogatásokra költött költségvetés támogatás (Lalive et al. 2018). Egy kínai tanulmány eredményei is igazolták, hogy a nagysebességű vasutak bevezetése negatívan korrelált a nagyvárosi PM_{2.5}-kibocsátással és a szén-dioxid-

kibocsátással, ami a városi légszennyező anyagok és a szén-dioxid-kibocsátás csökkenésére utal (Liu, 2024). Egy japán kutatás eredményei alapján, a vasúti infrastruktúra bővítése jelentősen, 2,96%-kal csökkentette a PM2.5 koncentrációt, és 15,80%-kal növelte a jövedelmet. Ezek az előnyök azonban nagyrészt a fejlett régiókra, például Tokióra koncentrálódnak (Yoo et al, 2023). Más eredmények szerint a nagy sebességű vasúti hálózatok létrehozása zöld innovációt válthat ki, megerősítve az energiahatékonyságot és ezáltal közvetett módon csökkentve a szén-dioxid-kibocsátást (Chen et al, 2023). Egy szerbiai kutatás során összehasonlították, hogy a közúti és vasúti forgalom talajra gyakorolt hatását a nehézfémek jelenlétének elemzésével egy forgalmas autópálya, helyi utak és egy aktív vasútvonal mellett gyűjtött talajmintákban. Az eredmények azt mutatták, hogy az autók nagyobb mennyiségű nehézfémet bocsátottak ki, mint a vonatok (Stojić, 2023). Font és munkatársainak kutatása rámutatott arra, hogy a pozitív környezeti hatások elsősorban a 10 évnél fiatalabb járművek esetén jelentkeznek (2023). Egy esettanulmány eredményei azt mutatják, hogy ha a közúti közlekedés teljesen villamosított és a megújuló energiára támaszkodik villamosenergia-rendszer, akkor a vasúti közlekedésnek nincs közvetlen CO₂-kibocsátási előnye a közúti közlekedéssel szemben (Vaccaro, 2024).

A vasúti közlekedésnek nem csak pozitív hatásai vannak, az általa generált legjelentősebb környezeti probléma, hogy alacsony frekvenciájú zajt generálnak. Egy magyar kutatás szerint a vasúti zajkibocsátás nagyságát számos tényező befolyásolja. E tényezők közé tartozik a vonatok sebessége, a pálya állapota, a vontatási technológia és az alkalmazott zajcsökkentési módszerek. A zajterhelés negatív hatásai közé tartozik az alvászavar, a stressz és a mentális egészség romlása. A zaj a városi területeken élő emberek életminőségére és az ingatlanárakra is hatással van. A vasúti közlekedésből származó zajkibocsátás csökkentése kulcsfontosságú az egészségesebb és fenntarthatóbb városi környezet megteremtéséhez (Ficzere, 2024). Han és munkatársai is hasonló eredményre jutottak, eredményeik szerint a zajexpozíció és a magas vérnyomás

kockázata közötti összefüggések az alacsony frekvenciák esetében a legerősebbek (2018). Priyan és munkatársainak Dublinban folytatott kutatása arra is rámutat, hogy a szállópor koncentrációhoz, a széliránytól függően a városi vasútállomások üzemelése jelentősen hozzájárul (2024).

KUTATÁSMÓDSZERTAN

A technológiák összehasonlítása

A földmunkás- és a nagygépes technológiára jellemző munkafolyamatokat az 1. táblázatban foglaltuk össze.

1. táblázat. A technológiák összehasonlítása

Földmunkás technológia			Nagygépes technológia		
Előkészítő munkák	Vágányzárban végezhető munkák	Utómunkák	Előkészítő munkák	Vágányzárban végezhető munkák	Utómunkák
Beépítendő védőréteg leszállítása közbenső depóhelyre. Megközelítő utak kiépítése az építendő vonal teljes hosszában. Meglévő vízelvezető rendszer részleges megszüntetése a megközelítő utak helyén	Vágányszerkezet bontása és elszállítása. Ágyazati anyag bontása, elszállítása közbenső depóhelyre. Ágyazati anyag depóhelyen történő rostálása. Rostálási hulladék elszállítása lerakóhelyre Védőréteg helyéről kikerülő anyag bontása és elszállítása lerakóhelyre Védőréteg anyagának közúti beszállítása és beépítése teljes hosszban Zúzottkő alsó ágyazat közúti beszállítása és beépítése teljes hosszban Vágányszerkezet beszállítása és megépítése.	Vízelvezető rendszerek helyreállítása Szállítási útvonal teljes hosszban történő megszüntetése Eredeti környezeti állapot visszaállítása	Beépítendő védőréteg leszállítása közbenső depóhelyre	<u>Alépitmény javító géplánc munkavégzése:</u> Ágyazati anyag bontása, rostálása. Újra beépíthető ágyazati anyag beépítése. Rostálási hulladék szállítóvagonba történő továbbítása Védőréteg helyéről kikerülő anyag bontása és szállítóvagonba továbbítása. Védőréteg anyagának beszállítása szállítóvagonokkal. Védőréteg beépítése. Vágányszabályozás. Hulladékanyag közbenső depóhelyre szállítása szállítóvagonokkal. Vágányszerkezet beszállítása szállítóvagonokkal Vágányszerkezet átépítése. Bontott vágányszerkezeti anyagok elszállítása. szállítóvagonokkal	Közbenső depóhelyek megszüntetése, eredeti állapot visszaállítása.

Forrás: saját szerkesztés

A meglévő vasúti pálya karbantartása ill. modernizálása esetében az építmény műszaki kialakítása szempontjából az alábbi tényezők mérvadóak az építési eljárás és technológia kiválasztásánál:

- helyi adottságok/körülmények,
- kivitelezés időbeni és üzemi előírásai,
- gazdaságosság,
- biztonság,
- környezetvédelem és fenntarthatóság.

Minden tervező és végső soron az építési szolgáltatások megrendelője is újból és újból szembesül a megfelelő munkamódszer kiválasztásával. Az előbb felsorolt 5 tényezőtől kiindulva a 2. táblázatban szereplő részletkritériumokat kell figyelembe venni a megfelelő munkamódszer kiválasztásánál.

2. táblázat. A munkamódszer kiválasztásának szempontjai

Helyi adottságok, körülmények	Egy- vagy kétvágányos vonalszakasz, vágányok távolsága, esetleges akadályok Munkaterület hossza Munkaterület hozzáférhetősége (töltés, bevágás) Idény, időjárás
Kivitelezés időbeni és üzemi előírásai	Kivitelezés időtartama (vágányzárak hossza) Munkaterületi anyaglogisztika
Gazdaságosság	Munkaterület hossza Munkaterület anyagellátása és hulladékelszállítás Vágányzárak optimalizálása Kivitelezés minősége, anyagkímélő kivitelezés
Biztonság	Biztonságos kivitelezési munka
Környezetvédelem és fenntarthatóság	Igénybevett terület Zajkibocsátás, széndioxid-kibocsátás Állat- és növényvilág károsítása Anyagok újrahasznosítása

Forrás: saját szerkesztés

A technológiák összehasonítása

A munka műszaki tartalmának teljes körű elemzése során például, ha a zúzottkő ágyazat alatt teherhordó és védő rétegek beépítése szükséges, a hagyományos földmunkás eljárás és a futószalagos nagygépes technológia közötti különbségek miatt általában a futószalagos munkamódszer alábbi gazdasági és műszaki előnyei válnak felismerhetővé a hagyományos munkamódszerrel szemben:

– *Rövid kivitelezési idő*

A technológia akár napi 1000 vágányméter teljesítményt tesz lehetővé, így csak rövid ideig tart az átépítési munka. A megmunkálás alatt álló vonalszakasz vágányzári igénye a minimumra csökken.

– *A szomszédos vágány igénybevétele nem szükséges*

A két- vagy többvágányos vonalszakaszokon a munkavágány melletti vágány(ok) korlátozásmentesen rendelkezésre áll(nak) a vasúti forgalom számára. A pálya kapacitása csupán kis mértékben csökken.

– *A szomszédos vágány ürszelvénye sértetlen marad*

A pályához kötött technológia megadott rendszerszélességben dolgozik, amely kizárja a szomszédos vágány ürszelvényébe történő behatolást. A vasúti nagygépes technológia nagyon magas szinten garantálja a forgalmi biztonságot.

– *A dolgozók magas szintű biztonsága a gép saját figyelmeztető rendszere révén*

A dolgozók biztonsága elsőrangú fontossággal bír bármilyen munkamódszer esetében. A vasúti forgalmi veszélyekre való figyelmeztetés a munkabiztonság lényeges alapeleme. A gép saját figyelmeztető rendszere a külső figyelmeztető rendszerekkel együtt elősegíti a dolgozók optimális védelmét.

– *A teljes anyagszállítás környezetkímélő módon, kizárólag a munkavágányon történik*

A pályához kötött építési technológiákhoz szükséges anyagok be- és elszállítása kizárólag a munkavágányon történik. A többvágányos

szakaszokon nem szükséges a szomszédos forgalom alatt álló vágány(ok) igénybevétele. A szomszédos vágány így teljes mértékben és folytonosan rendelkezésre áll a forgalom lebonyolítására. Nincs szükség párhuzamos építkezési bekötő utak kialakítása, valamint a vágányzónába közúti járművekkel történő behajtásra.

– *Az alépítménykorona és a teherhordozó réteg védelme*

A hagyományos földmunkás eljárások a munkaterületet szállítási útvonalként is használják. Ez a már eleve gyenge meglévő altalaj túlzott igénybevételéhez vezethet. Az alépítmény inhomogenitása nagyobb mértékű stabilizációs intézkedéseket von maga után a zúzottkő ágyazat alatti szinten.

– *Alkalmazhatóság nehéz pályakörülmények mellett is (magas töltések és hosszú bevágások, sűrűn beépített, városi területek)*

Az ilyen topográfiai helyzetekben sem jelent problémát a vasúti pálya felújítása, mert az összes anyagszállítás az alépítmény-javító géphez, illetve az anyagok elszállítása a munkaterületről kizárólag a munkavágányon történik.

– *A beépített rétegek homogenitása, nincsenek szakaszátfedések*

A pályához kötött technológiák a zúzottkő ágyazat alatti teherhordozó és védő rétegrendszerek beépítését folytonosan végzik, így nem alakulhatnak ki „illesztési hézagok” (gyengébb szakaszok) a kivitelezés megszakítása miatt.

– *A teljes teherhordozó rétegrendszer egy munkamenetben történő beépítése*

A szerkezetileg előírt teherhordozó rétegrendszer (szemcsés homokos-kavics-keverékből, valamint a geotextíliás hordozó és elkülönítő rétegekből) beépítése egy munkamenetben történik, akár az e fölött lévő zúzottkő alsóágyazattal együtt. Elkerülhető, hogy földmunkagépek

tengelyterhelésének legyenek kitéve az alépítményi anyagok, tehát elkerülhető az ebből adódó szerkezeti legyengülés.

– *Az egyenetlenségek megelőzése az alépítményben*

Az alépítményi anyagok kiépítése és elszállítása, valamint az új teherhordozó és védő rétegek anyagainak beszállítása és beépítése során nem lép fel olyan terhelés, amely az eleve legyengült alépítményben további alakváltozást és egyenetlenséget idézne elő.

– *A teherhordozó és védő rétegek optimális megnedvesítése a gépen, a tömörítés előtt*

A teherhordozó és védő rétegek követelményeknek megfelelő tömörítése érdekében szükséges az optimális víztartalom beállítása. A túl száraz beépítendő anyagok esetében a hiányzó nedvességet a gép tudja adagolni a beépítést és tömörítést megelőzően.

– *Nincs szükség statikai biztosítás/beácsolás kialakítására a szomszédos vágány felé*

A hagyományos földmunkás módszerekkel szemben a futószalagos technológia esetében nincs szükség statikai biztosítás/beácsolás kialakítására a szomszédos vágány felé. A földkiemelés a szomszédos vágány teherlevezető kúpját csupán olyan rövid ideig metszi alá, hogy nem léphet fel semmilyen károsodás a forgalom alatt álló szomszédos vágányban. A gép a földkiemelést követően azonnal feltölti a teherlevezető területet a beépítendő anyaggal.

– *A meglévő használt zúzottkő ágyazat újrahasonosítása az alépítmény-javító géplánc segítségével*

Az alépítmény-javító géplánc egységei feldolgozzák a kiépített zúzottkövet, előrostálják, megtörik, kirostálják és megmossák, majd a teherhordozó és védő rétegek beépítését követően alsóágyazatként visszaépítik a vágányba. Az olyan visszanyert anyagok, amelyek nem alkalmasak ágyazati anyagnak, azok speciális feldolgozási folyamaton mennek keresztül a gépen belül, amelyet követően teherhordozó, illetve

védő vagy köztes réteggként hasznosíthatóak újból. Ezen anyagok újrahasznosítása az alépitmény-javító rétegekben csökkenti az új anyagok igényét és ezzel csökken a bányákból kitermelendő mennyiség is.

– *Nincs szükség a munkaterület közötti megközelíthetőségére*

A munkavágányon történő anyagszállítások révén nincs szükség építkezési bekötő utak kialakítására. Az ilyen ideiglenes utak kialakításához szükséges területek bérlete, illetve megvásárlása nem szükségeltetik a pályához kötött módszer alkalmazása esetében.

– *Lerakó területek csökkentése*

A meglévő használt zúzottkő feldolgozása az alépitmény-javító gépláncon belül, valamint az anyagok azonnali visszaépítése révén nincs szükség ideiglenes lerakó helyek igénybevételére.

- *Idegen területek kismértékű igénybevétele*

Mivel nincs szükség építkezési bekötő utakra és lerakó területekre, a hagyományos földmunkás módszerekkel szemben kisebb mértékben jelentkezik az idegen területek igénybevétele.

– *Nincs szükség helyhez kötött anyagfeldolgozó létesítményekre*

Az alépitmény-javító gépen belül megoldott anyagfeldolgozás feleslegessé teszi a helyhez kötött anyagfeldolgozó létesítményeket, valamint az ezzel összefüggő logisztikai ráfordítást.

– *Az állat- és növényvilág védelme, környezetvédelmi területeken belüli munkavégzés*

Főleg mivel nincs szükség építkezési bekötő utak és lerakó területek kialakítására a vágányzónán kívül, tehát nincs szükség idegen területek igénybevételére, ezért a pályához kötött technológia érezhetően megkíméli a vágányzóna környezetében élő faunát és flórát.

– *A környezetszennyezés nagymértékű csökkentése (kb. 20-30 %-al), alacsonyabb széndioxid-kibocsátás, az életciklus-kiértékelések javítása, környezetkímélő munkavégzés*

Az utóbbi időben a globális felmelegedés kapcsán folytatott gyakori viták több elemzést eredményeztek a különböző építési eljárások környezeti kihatásairól. Különösen az alépítmény-javítás technológiáiról állnak már eredmények rendelkezésre.

Az alépítményjavító gépláncok evolúciója

A vasúti alépítmény javító gépláncok olyan integrált szerkezetek, melyek három fő részegységre oszthatóak. A géplánc elején a kitermelt anyagok elszállítására szolgáló szerelvényrész található, mely un. MFS kocsikból áll. Ezek a speciális vagonok olyan szalagsorokkal rendelkeznek melyek segítségével a szerelvény utolsó egységének folyamatos töltése mellett a szállítószalagok a legelső vagonig továbbítják a kitermelt régi töltés és kőanyagot és a szerelvényt elejétől hátrafelé töltik meg. Következő része a munkavégző egység, melyben helyet kapnak a régi zúzottkő, javítóréteg és töltésanyag kitermelését végző kaparóláncok, géptípustól függően rosta, törő és mosóegységek, az új védőréteg beépítésére használt terítőberendezés és tömörítő lapvibrátorok, valamint a zúzottkő terítő egység. A szerelvény hátsó részén a beépítendő új anyagok szállítására alkalmas un. csilléskocikból álló portáldarukkal felszerelt vagonok találhatóak.

3. táblázat. Alépítményjavító gépek főbb jellemzői

Gyártási év	Géptípus	Geoműanyagok beépítése	Zúzottkő regenerálás	Védőréteg anyag Recycling
1980	PM 200-1 BR/C	igen	nem	igen
1994	AHM-800-R	igen	nem	igen
2000	RPM 2002	igen	részben	igen
2002	PM 200-2R	igen	igen	igen
2009	PM 1000 URM	igen	igen	igen

Forrás: saját szerkesztés

A 3. táblázatban felsorolt gépek alkotják a technológia fejlődésének fő lépéseit. Kezdetben a régi védőréteg anyagát teljes egészében kiszállították, míg a kitermelt zúzottkövet a gépen lévő törőberendezéssel összetörték és a beszállításra kerülő új közét anyaggal keverve építették meg az új védőréteget. Ezt a megoldást a szakzsargonban AHM technológiának nevezik. A továbbfejlesztett változatokban aztán a részleges majd a teljes újrahasznosítási folyamat valósul meg. A PM 1000 URM a legfejlettebb mind közül, így kutatásunk során ezzel foglalkozunk tovább.

A VIZSGÁLT TECHNOLÓGIA

Pm 1000 urm géplánc által végzett újrahasznosítási folyamat

A gép három kaparólánca segítségével emeli ki a vágány alól a zúzottkövet a régi védőréteget és az alépítménykorona egy részét. Az első és a második kaparólánc által kitermelt anyag helyszínen újrahasznosításra kerül.

Első kaparólánc és a kapcsolt egységek által végzett munkafolyamatok és recycling:

A recycling folyamat a zúzottkő felső rétegének kiemelésével kezdődik. A kőanyag előtisztítása rostálással történik, majd egy ujjrosta tisztítja meg a zúzottkövet a még benne lévő finomalkotórészekről és az egyéb szennyeződésekről. Az esetlegesen az ágyazatba került fém alkatrészeket egy mágneses szállító-szalag távolítja el a zúzottkőből. A következő lépésben az ágyazati anyagot pattintással újra éles élűvé alakítják egy csigás zúzómalomban. Az így élesített zúzottkő az eljárás során létrejött méreten aluli szemcsés alkotórészekkel együtt a vibrációs szitálóba kerül. Ez kiszitálja a méreten aluli szemcsés alkotórészeket, melyeket aztán a vágány oldalára terítenek a második kaparólánc elé. A fentiekben leírtak szerint regenerált zúzottkő anyagot ezután a szerelvénybe integrált mosóberendezéssel tisztítják, majd alsóágyazatként visszaépítésre kerül. A mosóberendezésben használt vizet az integrált tisztítóberendezésben megtisztítják és a mosási folyamatban újra felhasználják.



1. ábra. A PM100 URM első és második kaparólánca munka közben

Forrás: *Eurailpool Handbuch*

Második kaparólánc és a kapcsolt egységek által végzett munkafolyamat:

A második kaparólánc kiemeli a régi ágyazat alsó részéből és a régi védőrétegből álló kevert zónát és az első kaparólánc munkafolyamatában visszaterített kisebb szemcseméretű zúzottkő anyagot. A kitermelt anyagból ebben a folyamatban is eltávolításra kerülnek az esetlegesen előforduló fém alkatrészek egy mágneses szállítószalag segítségével, majd rostálás után a 45 mm-nél nagyobb szemcseméretű zúzottkő anyag az első kaparólánc zúzottkő-hasznosító folyamatába kerül. A 45 mm-nél kisebb szemnagyságú anyagból építik meg egy csigás terítőberendezés segítségével az új kiegészítőréteg alatt kialakított maximum 5 méter szélességű általában 15-20 cm vastagságú újnevezett köztésréteget, melyhez kiegészítésként talajstabilizáló anyag például cement keverhető.

Harmadik kaparólánc által elvégzett munkafolyamat:

A harmadik kaparólánc végzi az alépítménykorona alsó síkjának kialakítását. A tervezett síkban kiemeli a maradék altalajt. A kitermelt anyag nem kerül

újrahasznosításra, azt szállítószalagok segítségével a szerelvény első részében található MFS 100 kocsiokból álló egységbe juttatják és a munkairányának megfelelő irányban kiszállítják és deponálják, esetleg töltés anyagként használják fel.

A technológia legfontosabb előnyei:

- nagy munkavégzési sebesség a földmunkás technológiához képest lényegesen kisebb vágányzári időigény, a vágányt nem kell elbontani, s minden művelet a saját vágányzónában történik,
- nem sérül az aléptímkoronára (pl. a hosszanti anyagszállítások miatt), mivel minden anyagszállítás vasúton történik, és a kedvezőtlen időjárási körülményekre kevésbé érzékeny,
- homogén és tartós a beépítési minőség, a geotextília / georács egyidejű gépi fektetése is megoldott.

Azonban az is igaz, hogy

- a beépítendő védő-/erősítő réteg vastagsága korlátozott, talajcsere, és klasszikus talajstabilizáció végrehajtása nem lehetséges,
- a kiegészítő intézkedések az építés közben felfedezett hiányosságokra válaszul csak erősen korlátozott mértékben hajthatók végre,
- az építési minőség (tömörség, teherbírás) ellenőrzése térben, időben korlátozott.
- nagyon gyenge ($E_2 < 5 \dots 10$ MPa) aléptímkoronán nem alkalmazható ez a technológia. (Horvát és Horváth, 2016)

Nagygépes aléptímkorjavítási technológiához illeszkedő tervezési előírások és módszerek honosítása

Az átépítendő pályaszakaszok aléptímkorja sokszor igen rossz állapotúak és csak kiegészítő réteg beépítésével tehetőek alkalmassá az elvárt teherbírási értékek

biztosításához. Magyarországon az alépítményre vonatkozó előírásokat a D.11. utasításban foglalt méretezési irányelvek a mértékadóak.

4. táblázat. Az E_{2stat} és az E_{din} modulus megközelítő értékei

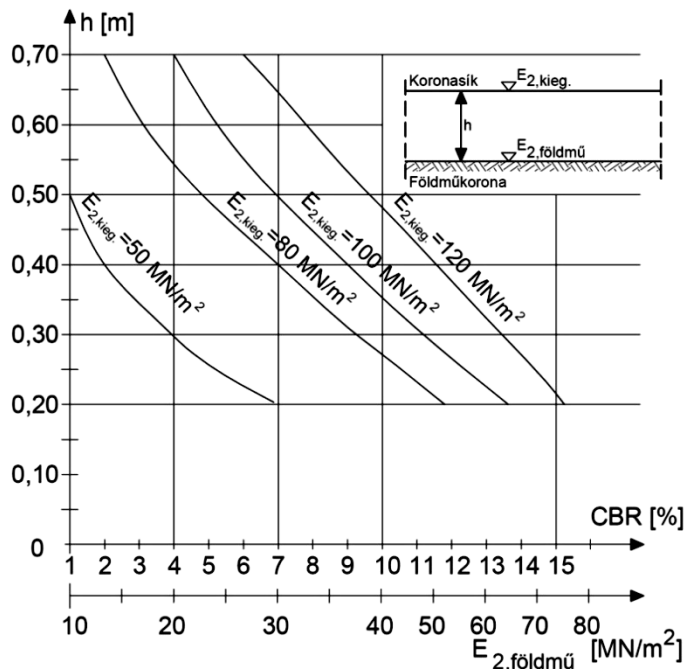
Teherbírás	Modulus	Sebesség (km/h)				
		V < 40	40 – 80	81 – 120	121 – 160	161 – 200
Kiegészítő rétegen	E_{2stat} (MPa)	50	60	80	100	120
Kiegészítő rétegen	E_{din} (MPa)	35	35	40	45	50

Forrás: saját szerkesztés

A nagygépes alépítményjavítás magyarországi meghonosításához igen fontos volt a D.11. Utasítás megújítása. A gépi alépítményjavítási technológia optimális kihasználásához elengedhetetlen a gyors és technológiaszpecifikus tervezési módszerek bevezetése. A tervezési és minőségellenőrzési folyamatokban a terepi mérési módszerek modernizálása igen sok időmegtakarítást eredményezett. A 4. táblázatban láthatóak a hagyományosan alkalmazott statikus tárcsás teherbírás mérés és a vasútépítésben hazánkban újdonságnak számító dinamikus tárcsás teherbírás mérési értékek összetartozó határértékei pályasebesség függvényében. A magyarországi tervezési gyakorlatba a nagygépes alépítményjavítási munkák tervezése kapcsán került bevezetésre a CPT-szondázással nyert adatok feldolgozásával történő geotechnikai tervezés, mely nem zárja ki a hagyományos nagy élőmunkát és viszonylag hosszú vonatmentes időt jelentő vágatolások, de helyette ez a sokkal gyorsabb módszer is alkalmazható. A 3. ábra mutatja a szondázási diagramokat, melyekből a teherbírásra, a rétegszerkezetre és a talajjellemzőkre kapunk információkat (Horváth, 2014).

A D.11. utasítás a földműkorona nem megfelelő teherbírása miatt alkalmazandó (azaz erősítő szerepű) szemcsés kiegészítő réteg vastagsági méretének megállapítására méretezési eljárást ír elő, amely gyakorlatilag a DB Richtlinie 836

méretezési módszere. A szemcsés kiegészítő réteg szükséges vastagságának meghatározására szolgáló méretezési diagram az 2. ábrán látható.



2. ábra. A szemcsés védőréteg méretezési diagramja

Forrás: *D.11 Utasítás*

A kiindulási teherbírasi érték ($E_{2,\text{földmű}}$) meghatározására két lehetőség van:

- a teherbírást kellő számú statikus tárcsás terheléssel kell megmérni az MSZ 2509/3 szabvány előírásai alapján, majd a talajmechanikai és a hidrológiai adatok segítségével, az évszakonkénti változások figyelembevételével kell belőlük a tervezési értéke(ke)t megállapítani,
- ha kellő számú és megbízhatóságú adat nem áll rendelkezésre, akkor a tervezési érték(ek) a 7. táblázat adatainak felhasználásával határozható(k) meg.

5. táblázat. Az E_{2stat} és az E_{din} modulus megközelítő értékei

Alépitmény anyaga	Szemcseátmérő $D < 0,1$ mm	Javasolt $E_{2,földmü}$ (N/mm^2) méretezési érték az alépitmény tetején, ha a hidrológiai eset				
		1	1/2	2	2/3	3
Iszapos vagy agyagos kavics	10...20%	60	45	30	25	20
Iszapos vagy agyagos homok	10...20%	50	35	25	22,5	20
Erősen iszapos vagy agyagos kavics, illetve homok	20...30%	40	30	20	17,5	15
	>30%	30	20	15	10	10
Iszap és agyag	könnyen sodorható	25	20	15	10	10
	puha	25	20	15	12,5	10
	nagyon puha	20	17,5	15	12,5	10

Forrás: saját szerkesztés

Az 5. táblázat szerint a következő hidrológiai eseteket kell megkülönböztetni:

1-es hidrológiai eset:

- az ép alépitménykoronáról a víz lefolyik, nincsenek időszakos átnedvesedések,
- az sínkورونا-1,50 m mélység feletti tartományban még időszakosan (pl. tavasszal) sincsen átnedvesedés (az I_c konzisztencia index mindig 1,00 érték felett van).

2-es hidrológiai eset:

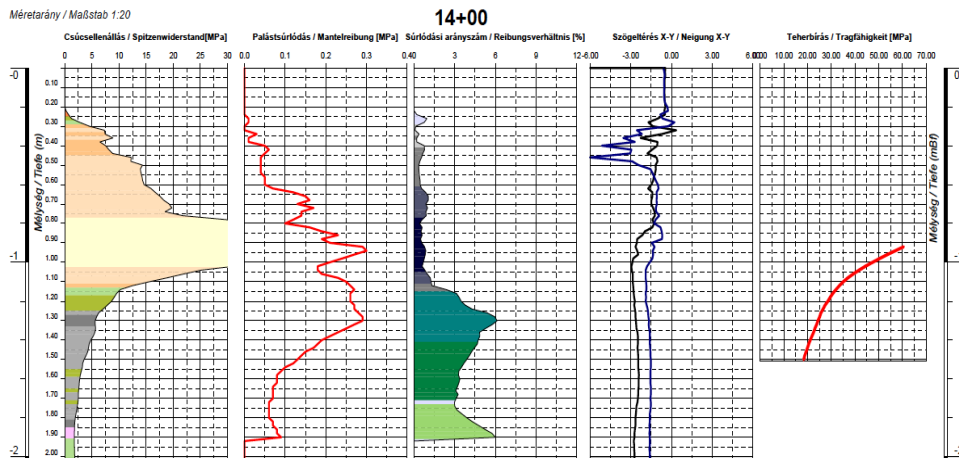
- időszakos átnedvesedés bekövetkezhet,
- rossz a vízelvezetés,
- az sínkورونا-1,50 m mélység feletti tartományban időszakosan (pl. tavasszal) jellemző az átnedvesedés (az I_c konzisztencia index 0,75..1,00 értékek között van).

3-as hidrológiai eset:

- állandó az átnedvesedés,
- nincs megoldva a vízelvezetés,

- az sínkorona-1,50 m mélység feletti tartományban állandóan jellemző az átnedvesedés (az Ic konzisztencia index kisebb, mint 0,75).

Az 5. táblázatbeli 1/2 és 2/3 kategória átmeneti eseteket jelent.

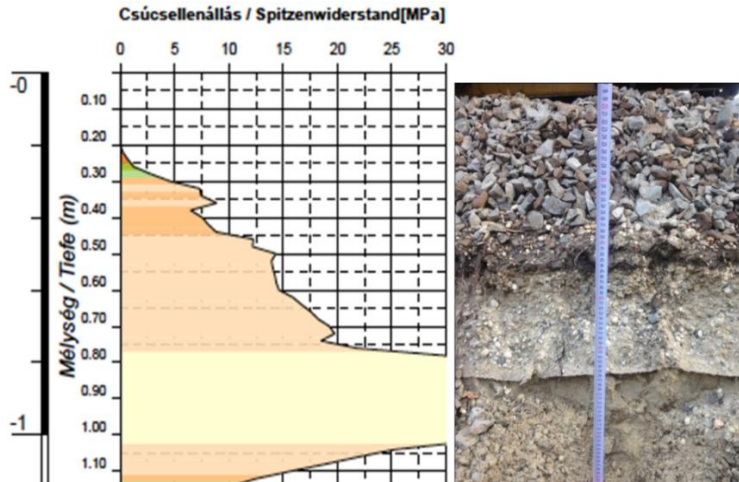


3. ábra. A CPT szonda mérési eredményei balról jobbra a csúcsellenállás, palástsúrlódás, súrlódási arányszám, szögeltérés és a teherbírási vonal

Forrás: saját szerkesztés

A CPT szondázás alkalmazhatóságának fő jellemzői a következők:

- 2 m-es mélységig teljes kép az alépítményi rétegekről,
- roncsolásmentes vizsgálat, lokális pályahiba bevitele nélkül,
- folyamatos teherbírási vonal,
- gyors, hatékony felmérési módszer,
- a mérési gyakoriság könnyen sűríthető,
- kis élőmunka igény, és csak vágányzárban végezhető.



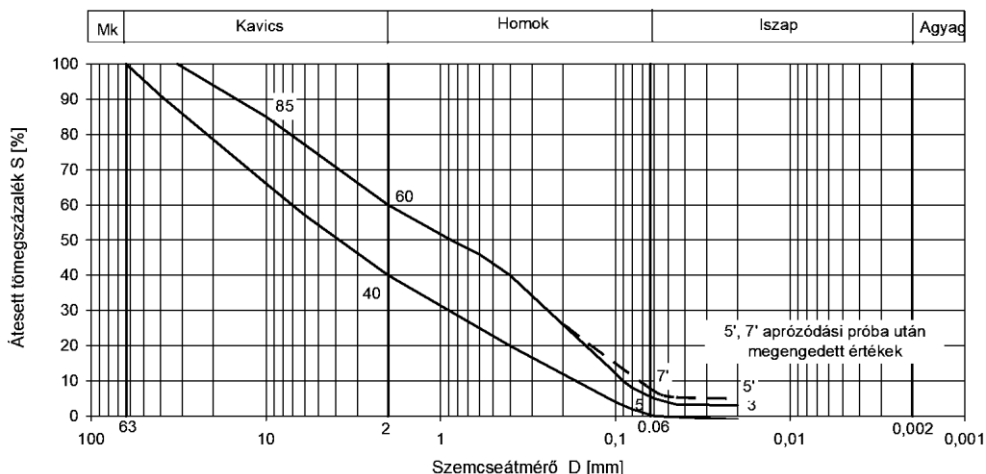
4. ábra. A CPT szonda mérési diagramjának összevetése a hagyományos vágatolások eljárásával

Forrás: saját szerkesztés

A vizsgálati módszer bevezetése előtt a 3. ábrán látható grafikus megjelenítéssel dokumentálva több száz mérés készült CPT szondázással, melyeket a hagyományos vágatolások módszerrel ugyanazon keresztmetszetben történő végrehajtással és az eredmények tervbírálatkori bemutatásával végeztek el. A 4. ábrán egy vágatolási keresztmetszet és a hozzá tartozó CPT szonda diagramja látható. Az eredmények magukért beszéltek, így mára elfogadott módszerként alkalmazzuk.

Az alépítményjavító gépláncokkal beépítésre kerülő SZK1 és SZK2 keverék hazai alkalmazása

A gyakorlati megvalósítás következő eleme volt a megfelelő szemeloszlású és kőzetfizikai tulajdonságú törtszemcsés kiegészítő réteg anyagának felkutatása. A $V > 120$ km/h sebességű pályák szemcsés kiegészítő rétegeként az ún. SZK1 és SZK2 keveréket alkalmazzák. Az SZK1 keveréknek viszonylag nagy finomrész tartalma van (ld. 5. ábrát), s ez által közel vízzáró. A keverék nagyon érzékeny az optimális beépítési víztartalom túllépésére.



5. ábra. Az SZK1 jelű szemcsés keverék határgörbéi

Forrás: *D11.Utasítás*

Az SZK1 szemcsés keveréket természetes anyagú törtszemcsés és kerek szemcsés frakciókból keveréssel kell előállítani úgy, hogy az alábbi feltételek teljesüljenek (MÁV D 11, 2014):

- a törtszemcsés rész tömegszázaléka min. 30% legyen,
- a keverék legalább 30% kerek szemcsés anyagot tartalmazzon,
- az SZK1 keverék elkészíthető akár 100%-ban törtszemcsés frakcióból is akkor, ha az alábbiakban felsorolt, valamint beépítés után a tömörségi és teherbírási követelmények bizonyítottan teljesíthetők,
- szemeloszlási görbéjének a 2. ábrán látható határgörbék közé kell esnie,
- egyenlőtlenségi mutatója $Cu \geq 15$ legyen, mert ez biztosítja, hogy a dinamikus igénybevételek hatására nem rázódik szét,
- a legnagyobb szemcseátmérője legalább 32 mm legyen, de a 63 mm-t nem haladhatja meg,
- vízáteresztőképességi együtthatója $Trq=100\%$ tömörségi foknál $k \leq 1 \times 10^{-6}$ m/s legyen,
- a $d \leq 0,063$ mm-es finomrész-tartalom legfeljebb 7 tömegszázalék legyen (a $Cu \geq 15$ követelmény teljesítése mellett), mert ez fagyállóságot biztosít,

- a Los Angeles és a micro-Deval vizsgálatok aprózódási értéke is számszakilag előírt.

A Magyarországon található megfelelő kőzetfizikai tulajdonságú kőanyaggal rendelkező bányákban végzett próbakeverések során került összeállításra a minden tekintetben megfelelő SZK1 jelű keverék. Fontos szempont volt a műszaki kritériumok mellett a szállítási, logisztikai képességek és a gyártási kapacitás szempontjának felmérése is.

KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

Kivitelezési munkák során szerzett tapasztalatok

A tervezési a műszaki átadás-átvételi metódus és a beépítendő anyagok felkutatása mellett a feladathoz legmegfelelőbb gépek magyarországi rendszerbe állítása történt. Az RPM 2002-2 géplánc volt az első alkalmazott géptípus a Budapest – Biatorbágy, a Kecskemét – Városföld és a Sopron – Szentgotthárd vonalak felújításán végzett alépítmény rehabilitációs munkáknál. Az alépítmény javító gépláncok alkalmazásának igazi felfutását azonban a KÖZOP projektek hozták meg. 2011-ben a Tárnok – Székesfehérvár vonalon került alkalmazásra először a 6. ábrán munka közben látható PM1000 URM géplánc, mely a legnagyobb teljesítményű legmodernebb géplánc.



6. ábra. A PM 1000 URM kiegészítő réteg beépítése közben

Forrás: saját készítésű fotó

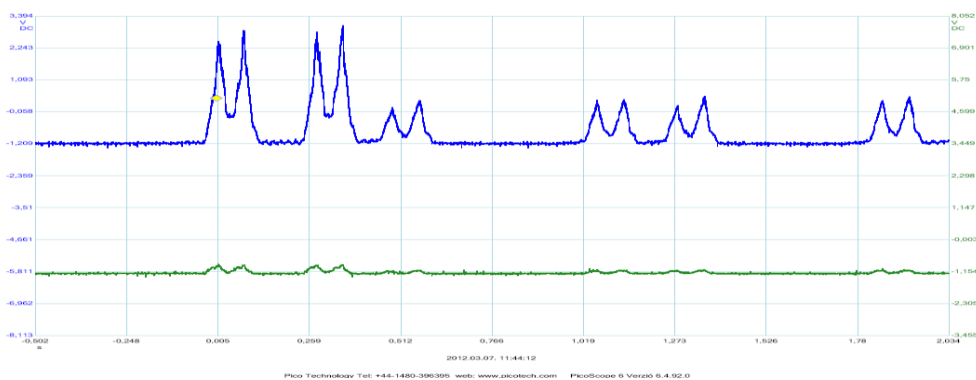
A technológia alkalmazásával 2016-ig összesen 217.509 vágányméter alépítmény javítási munka készült el, melyet azóta több újabb projekt is követett azonban azok eredményei már egy bevezetett, honosított technológiához tartoznak, így itt nem kerülnek bemutatásra. Az alépítményjavítási munkák természetesen a felépítmény cseréjével egy projektben kerültek kivitelezésre jórészt a Magyarországon a 90-es évek közepétől dolgozó SMD-80 jelű gyorsátépítő vonattal. A KÖZOP projekt időszaka alatt elvégzett alépítményjavítási munkák főbb mennyiségeit vonalanként a 6. táblázatban foglaltuk össze.

6. táblázat. Nagygépes alépítményjavítási munkák 2009 - 2016 között

Projekt neve	Projekt időszak	Vágányhossz [vágányméter]	Vágányzár [nap]
Balaton déli part I. ütem	2014-2015	26740	64
Gyoma-Békéscsaba (bal)	2013-2015	4556	11
Gyoma-Békéscsaba (jobb)	2013-2015	4556	9
Nagyút-Mezőkeresztes	2014-2015	35604	53
Szajol-Püspökladány (bal)	2011-2015	56517	80
Szajol-Püspökladány (jobb)	2011-2015	56517	93
Tárnok-Székesfehérvár (bal)	2011-2013	6600	10
Tárnok-Székesfehérvár (jobb)	2011-2013	6600	10
Sopron-Szombathely-Szentgotthárd	2009-2011	25687	49

Forrás: saját szerkesztés

A munkálatok során az elkészült létesítmények üzem közbeni megfigyelésére is nagy hangsúlyt fordítottak. Elkészült alépítmények forgalom alatti tulajdonságait vizsgálva megállapítható volt, hogy átlagos magyarországi vasútvonalak talajjellemzői mellett a 10-15 MPa tervezési teherbírású területre beépített 40 cm vastag törtszemcsés védőréteg a járműterhelést olyan jól elosztja, hogy annak alsó síkján a feszültségek alakváltozást már szinte alig okoznak. (Horváth, 2014)

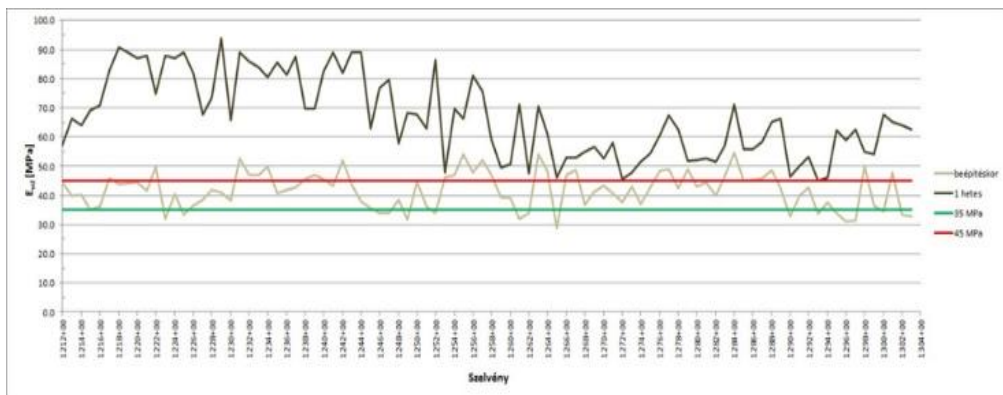


7. ábra. Süllyedésmérési eredmények egy személyvonat áthaladása közben.

Forrás: saját szerkesztés

A 7. ábrán látható egy személyvonat elhaladásából mérhető süllyedési grafikon, ahol a kék görbe a védőréteg felső, a zöld görbe az alsó síkját jelenti. Jól látható, hogy a kiegészítő rétegen a vontatójármű tengelyáthaladásából süllyedés alig mérhető, míg a vagonok okozta süllyedés szinte teljesen lecseng a védőrétegben. Ezek alapján elmondható, hogy a kiegészítő réteg feladatát jól ellátja. A magyarországi bányákból származó dolomitból készült törtszemcsés védőrétegek beépítésekor megfigyelhető, az anyagra jellemző egyik sajátosságot. Az SZK1 határgörbének megfelelő törtszemcsés anyag beépítéséhez annak víztartalmát optimumon kell tartani, mely kb. 5-7 % között mozog. Az alépítmény javító géplánc egyengető gerendája a bevitt anyagot egyenletesen a megkívánt profilnak megfelelően elteríti, majd nagy teljesítményű vibrolapokkal történik a réteg tömörítése. A földmű korona és a kiegészítő réteg közé geotextília kerül elválasztó

funkcióval, míg a törtszemcsés rétegbe georács építhető be. A georács elhelyezésére vagy közvetlenül a geotextíliára történik, vagy a fölötte lévő szemcsés rétegbe 5-25 cm magasságig. Vibrációs tömörítési eljárás miatt a beépített egyenletes szemeloszlású SZK1 jelű szemcsés kiegészítő rétegben a megnövekedett pórusvíznyomás miatt az azonnali mérések lényegesen gyengébb teherbírási értéket adnak, mint a pórusvíznyomás leépülése utáni (1 hetes) mérések. (Horváth, 2014)



8. ábra. A teherbírasi értékek alakulása közvetlen a beépítés után és 1 hetes visszaméréskor

Forrás: *saját szerkesztés*

A 8. ábrán látható beépítéskori és 1 hetes visszamérések mutatják, hogy a pórusvíznyomás megszűnése után a kiegészítő réteg teherbírása megfelelően alakul. Valamennyi projekt keretében elvégezték a beépítéskori és 1 hetes korban történő visszaméréseket. Az volt tapasztalható, hogy beépítéskor a kiegészítő réteg felső síkján $E_{wd} \sim 35$ MPa teherbírás megléte esetén a védőréteg teljesíteni tudja a tervezett teherbírasi értéket, mely jelen esetben $E_{wd} = 45$ MPa azaz $E_2 = 90$ MPa volt.

A teherhordó rétegeknek már nem alkalmas és az ágyzatregenerálás során be nem épített anyagok sem kerülnek feltétlenül hulladékként deponálásra. Amennyiben a vasúti pálya új nyomvonalának kialakításához töltésszélesítésre van szükség úgy töltésanyagként, illetve, ha a pályatest környezetének kialakítása megengedi pótpadkaként a helyszínen beépítésre kerülhet. A géplánc Magyarországon rendelkezik újnevezet Mobil hasznosítási engedéllyel, mely a recycling folyamat során képződő anyagok termékenkénti (pl: föld és kövek EWC 17-05-04) besorolását teszi lehetővé.

7. táblázat. A géplánccal visszanyert és beépített anyagok által megtakarított szállításból adódó CO₂ kibocsátás mértéke g CO₂/fm

Anyag neve és mennyisége [t]	Közúti szállítás 34-40 t nyerges vontató 100 km távolságban kibocsátás g CO ₂ /fm	Vasúti szállítás 100 km távolságban kibocsátás g CO ₂ /fm
Zúzottkő; 1,36	11,22	3,6315
SZK1 jelű anyag; 2,08	17,16	5,5536

Forrás: *saját szerkesztés*

A recycling eljárás során visszanyert köztes réteg és zúzottkő anyag helyben történő felhasználásával a szállítási és deponálási költség megtakarításán túl az építési folyamat CO₂ kibocsátását is csökkenti azonban a cikk terjedelme miatt ezzel a tényezővel itt nem számolunk. Egy 34-40 t terhelésű nyerges vontató 82,5 g CO₂/tonnakilóméter míg vasúti szállítás 26,7 g CO₂/tonnakilóméter kibocsátást okoz. Könnyen belátható, hogy a recycling folyamattal végzett nagygépes alépítményjavítás során csak a beszállítandó anyagok mennyiségének csökkentésével közúti anyagszállítással SZK1 anyag esetében elérhető akár 17,160 kg CO₂, míg zúzottkő anyag tekintetében 11,22 kg CO₂ kibocsátás csökkentés, mely jelentős környezetvédelmi eredményt jelent minden felújított vágány kilométer esetében (7. táblázat). A 4. fejezetben ismertetett 217509 m felújított vágány a kedvezőbb vasúti szállítással számolva zúzottkő esetében 789,884 kg,

míg SZK1 anyag esetében 1207,958 kg CO₂ kibocsátás megtakarítását eredményezi. (Major et al., 2023a és Major et al. 2023b)

KUTATÁS KORLÁTAI

Az általunk bemutatott nagygépes alépítménymegegerősítési technológia megkívánja a földmű kellő teherbírását, amelynek hiányában alkalmazása nem lehetséges. A másodlagos nyersanyagok (recycling) mennyiségének előzetes becslése minden esetben szükséges, mivel a munka elvégzéséhez szükséges primer nyersanyag mennyiségét eredményesen csökkentheti, viszont teljes egészében nem válthatja ki, így annak beszállítási mennyiségét is ismerni kell az eredményes munkavégzés érdekében.

FELHASZNÁLT IRODALOM

1. Chan, H.-Y., Xu, Y., Wang, Z., & Chen, A. (2024). The deeper and wider social impacts of transportation infrastructure: From travel experience to sense of place and academic performance. *Transport Policy*, 158, 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.09.008>
2. Chen, Y., Zhao, C., Chen, S., Chen, W., Wan, K., & Wei, J. (2023). Riding the Green Rails: Exploring the nexus between high-speed trains, Green Innovation, and carbon emissions. *Energy*, 282, 128955. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128955>
3. Erdei, A. (2020). Az Elektronikus Jegyértékesítés Regionális Kihívásai a magyar Vasútnál. *Multidiszciplináris Kihívások, Sokszínű Válaszok*, (2), 23–42. <https://doi.org/10.33565/mksv.2020.02.02>
4. Ficzeré Péter (2024). Vasúti közlekedés során keletkező zajok okainak és hatásainak elemzése, *International Journal of Engineering and Management Sciences*, 9(1), 116–130. <https://doi.org/10.21791/ijems.2024.009>
5. Font, A., Hedges, M., Han, Y., Lim, S., Bos, B., Tremper, A. H., & Green, D. C. (2024). Air Quality on UK diesel and hybrid trains, *Environment International*, 187, 108682. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108682>
6. Grotte, J., Erdeiné Késmárki Gally, S., & Erdei, A. (2021). A Magyar Vasút Személyforgalmi Kihívásai a Változó Európai világban. *Európai Tükör*, 24(3), 77–101. <https://doi.org/10.32559/et.2021.3.4>

7. Han, I., Samarneh, L., Stock, T. H., & Symanski, E. (2018). Impact of transient truck and train traffic on ambient air and noise levels in underserved communities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 63, 706–717. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.07.010>
- Horvát Ferenc & Horváth Róbert (2016). Design of railway substructure works performed by formation rehabilitation machines and experiences of the execution in Hungary. In *STRAHOS 2016 : zborník prednášok 17. seminára traťového hospodárstva*. pp. 53–60.
8. Horváth Róbert (2014): Vasúti pályák reabilitációjának műszaki, környezetvédelmi és minőségbiztosítási szempontja Budapesti és Pest Megyei Mérnöki Kamara, Közlekedési szakterület, Vasúti szakmai továbbképzés Budapest 2014.
9. Lalive, R., Luechinger, S., & Schmutzler, A. (2018). Does expanding regional train service reduce air pollution? *Journal of Environmental Economics and Management*, 92, 744–764. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.09.003>
10. Lichtberger B. (2022). *Das Große Handbuch der Gleisinstandhaltung mit Neubau und Umbau Band 1.. Verlag GmbH. Hamburg*
11. Liu, Z., Diao, Z., & Lu, Y. (2024). Can the opening of high-speed rail boost the reduction of air pollution and carbon emissions? quasi-experimental evidence from China. *Socio-Economic Planning Sciences*, 92, 101799. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101799>
12. Major Zoltán, Horváth Róbert, Szennay Áron, & Szigeti Cecília. (2023a). EXAMINATION AND OPTIMIZATION OF THE ECOLOGICAL FOOTPRINT OF EMBEDDED RAIL STRUCTURES In Conference Proceedings of the 7th FEB International Scientific Conference: Strengthening Resilience by Sustainable Economy and Business - Towards theSDGs (pp. 19-27). <http://doi.org/10.18690/um.epf.3.2023.5>
13. Major Zoltán, Horváth Róbert., Szennay Áron., & Szigeti Cecília. (2023b). Ecological Footprint Analysis of Tramway Track Structures. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, 107(Online), 283-288. <http://doi.org/10.3303/CET23107048>
14. MÁV Zrt. D 11. számú Utasítás VASÚTI ALÉPÍTMÉNY TERVEZÉSE, ÉPÍTÉSE, KARBANTARTÁSA ÉS FELÚJÍTÁS I. kötet
15. Priyan, S., Guo, Y., McNabola, A., Broderick, B., Caulfield, B., O'Mahony, M., & Gallagher, J. (2024). Detecting and quantifying PM_{2.5} and NO₂ contributions from train and road traffic in the vicinity of a major railway terminal in Dublin, Ireland,

Environmental Pollution, 361, 124903.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124903>

16. Stojić, N., Štrbac, S., Ćurčić, L., Pucarević, M., Prokić, D., Stepanov, J., & Stojić, G. (2023). Exploring the impact of transportation on Heavy Metal Pollution: A Comparative Study of trains and Cars. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 125, 103966. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103966>
17. Vaccaro, R., Maino, F., Zubaryeva, A., & Sparber, W. (2024), The environmental impact in terms of CO2 of a large-scale train infrastructure considering the electrification of heavy-duty road transport. *iScience*, 27(10), 110987. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.110987>
18. Yoo, S., Kumagai, J., Hong, S., Kawasaki, K., Zhang, B., & Managi, S. (2023), Economic and air pollution disparities: Insights from transportation infrastructure expansion, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 125, 103981. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103981>
19. 2012. évi CLXXXV. Törvény a hulladékról

ISSN 2630-886X

18  57

BGE