



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Gazdaság - és Regionális Tudományok Doktori
Iskola, Gödöllő

Doktori (PhD) Értekezés

A vasúti talpfák környezetkímélő újrahasznosításának aspektusai

DOI: 10.54598/005720

Bencző László

Gödöllő, Magyarország

2025

Doktori Iskola neve: Gazdaság- és Regionális Tudományok Doktori Iskola
tudományága: regionális tudományok

Doktori Iskola vezetője: Prof. Dr. Bujdosó Zoltán PhD

Témavezetők:

Prof. Dr. Bujdosó Zoltán PhD

Prof. Dr. Habil. Szabó Lajos Professzor Emeritus Az MTA doktora (DSc)

.....
Doktori Iskola vezetőjének jóváhagyása

.....
Témavezetők jóváhagyása

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS	8
1.1 Kutatási háttér.....	11
1.2 Problémafelvetés	12
1.3 Kutatási cél	15
1.4 Kutatási kérdés	16
1.5. Hipotézisek	17
2. A SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	21
2.1. Fenntarthatósági paradigmák a gazdaságban: Lineáris és körkörös gazdasági modellek az újrahasznosítás és újrafelhasználás szemszögéből.....	21
2.1.1. Lineáris gazdasági modell: A „Vedd-használd-dobd el” paradigma	21
2.1.2. Körkörös gazdaság: A hulladék minimalizálása és az erőforrások zárt rendszere .	22
2.1.3. Újrahasznosítás és újrafelhasználás a körforgásos gazdaságban	24
2.1. 4. Kritikai elemzés és jövőbeli irányok a körkörös gazdasági modellben	24
2.2. A szennyező anyagok kezelése a környezetkímélő technológiák alkalmazásában	25
2.3. Az újrahasznosítás technológiai háttere a vasúti közlekedésben.....	26
2.3.1. Az újrahasznosítási folyamatok jelentősége és hatékonysága	27
2.3.2. A fenntarthatósági célok és a környezetbarát technológiák szerepe.....	28
2.3.3. A hulladékgazdálkodási elvek a vasúti anyagok esetében.....	29
2.3.4. Gazdasági előnyök és kihívások az újrahasznosításban	30
2.4. Fenntartható vasúti közlekedés és a környezetbarát újrahasznosítási megoldások a nemzetközi gyakorlatban	31
2.4.1. A Dán Állami Vasutak (DSB)	31
2.4. 2. Holland Vasutak (NS).....	33
2.4.3. Belga Vasutak (SNCB)	34
2.4.4 Finn Vasutak (VR).....	37
2.4. 5 Norvég Nemzeti Vasúttársaság (NSB)	38
2.4.6. Német Vasutak (DB AG)	38
2.4.7. Osztrák Szövetségi Vasutak (ÖBB)	41
2.4.8. A svájci vasút újrahasznosítási gyakorlata	43
2.4.9. Magyar Államvasutak Zrt. (MÁV)	47
2.4.10. A Lengyel Vasúttársaság (PKP-PLK) faaljak újrahasznosítási gyakorlata	50
2.10.1 Vasúti faanyagok.....	52
2.1.11. Brazília újrahasznosítási gyakorlata	54

2.4.	12 Ausztrália újrahasznosítási gyakorlata.....	56
2.4.13.	Fenntartható vasúti közlekedés és a környezetbarát újrahasznosítási megoldások a nemzetközi gyakorlatban – részösszegzés	57
2.5.	EU direktíva.....	59
3.	ANYAG ÉS MÓDSZER	61
4.	EREDMÉNYEK	64
4.1.	Szekunder kutatás eredményei	64
4.2.	Primer kutatás eredményei: Esettanulmányok	72
4.2.1.	Esettanulmány 1.: Diósgyőr: A vasúti infrastruktúra újrahasznosításának történeti és jelenkori tanulságai.....	73
4.2.2.	Esettanulmány 2. : Budakalász: A kis méretű telephelyek gazdasági kihívásai....	78
4.2.3.	Esettanulmány 3.: Püspökladány- a vasúti talpfák konzerválásának öröksége	87
4.2.4.	Esettanulmány 4.: Dunaújváros: A meddő és salak újrahasznosításának gazdasági lehetőségei.....	92
4.2.5.	Esettanulmány 5: Energiatárolási lehetőségek az energiaközösség számára: A vanádiumos akkumulátor lehetőségei	97
4.2.6.	Esettanulmányok összefoglalása és következtetések	103
4.3.	Primer kutatás eredményei: A remediációs eljárás: Innovatív technológiák szerepe...	105
5.	HIPOTÉZISEK ÉRTÉKELÉSE	110
6.	KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK, TOVÁBBI KUTATÁSI IRÁNYOK.....	113
7.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	118
8.	ÖSSZEFOGLALÁS	123
9.	ANGOL NYELVŰ ÖSSZEFOGLALÓ	125
	MELLÉKLETEK	127
	M1: Irodalomjegyzék	127
	M2 További mellékletek.....	139

TÁBLÁZAT- ÉS ÁBRAJEGYZÉK

Táblázatok

1. táblázat: Összefüggéseket bemutató táblázat
2. táblázat: Veszélyes hulladékként kezelt vasúti talpfák költségei és alternatív árbevételi lehetőségek (2018–2020)
3. táblázat: Egy 50 kW-os napelemes rendszer költség tételei
4. táblázat: Napelemes rendszerek telepítési költségei és éves megtakarítása
5. táblázat: Esettanulmányok összefoglalása
6. táblázat: A salak kémiai összetevői
7. táblázat: A salak újrahasznosításának gazdasági előnyei
8. táblázat: A talajminták elemzése alapján a szennyezőanyag-koncentrációk
9. táblázat: Talajvíz szennyezés
10. táblázat: A hagyományos és biológiai remediációs módszerek költségeinek összehasonlítása
11. táblázat: A mintavételi pontokon mért TPH-és fenolkoncentrációk
12. táblázat: A tervezett rehabilitáció költségei és potenciális bevételei
13. táblázat: Naperőmű beruházás gazdasági számítása
14. táblázat: Salak újrahasznosítás gazdasági számítása
15. táblázat: A vanádiumos akkumulátor költségeinek összehasonlítása más energiatárolási rendszerekkel
16. táblázat: A vizsgálati eredmények TPH szintjei
17. táblázat: Költséghatékonysági elemzés (Az alternatív biológiai remediációs módszer összehasonlítása a hagyományos földkitermeléses technológiával)
18. táblázat: Hipotézisek értékelése

Ábrák

1. ábra: CO₂-megtakarítás különböző területeken elhelyezett napelemekkel
2. ábra: Napelem-rendszerek energiahatékonysági mutatói
3. ábra: Újrahasznosítás gazdasági eredményei
4. ábra: Feltáró források
5. ábra: A kármentesítési módszerek költségeinek és hatékonyságának összehasonlítása
6. ábra: TPH-koncentrációk térbeli eloszlása
7. ábra: Gazdasági hatások elemzése
8. ábra: A naperőmű diszkontált megtérülési időszaka (5% kamatlábbal)
9. ábra: Összehasonlító diagram az energiatárolási rendszerek költségeiről
10. ábra: TPH szintek csökkenése a mintavételi pontokon
11. ábra: Költséghatékonysági elemzés: Hagyományos vagy bioremediációs földkitermeléses technológia
12. ábra: A Dunaújvárosi funkcionális várostérség települései jogállásuk szerint
13. ábra: A vanádiumakkumulátor működési elve

Jelölések, rövidítések

DB – Deutsche Bahn (Német Vasúttársaság)

DR – Deutsche Reichsbahn (volt keletnémet állami vasút)

DSB – Danske Statsbaner (Dán Államvasutak)

NS – Nederlandse Spoorwegen (Holland Vasutak)

SNCB – Société Nationale des Chemins de fer Belges (Belga Vasutak)

VR – Valtionrautatiet (Finn Vasutak)

NSB – Norges Statsbaner (Norvég Vasutak)

ÖBB – Österreichische Bundesbahnen (Osztrák Szövetségi Vasutak)

MÁV – Magyar Államvasutak Zrt.

PKP-PLK – Polskie Koleje Państwowe – Polskie Linie Kolejowe (Lengyel Vasúti Pályahálózat-működtető)

UIC – Union Internationale des Chemins de fer (Nemzetközi Vasútegyesület)

TPH – Total Petroleum Hydrocarbons (összes kőolajszármazék tartalom)

VRFB – Vanadium Redox Flow Battery (Vanádium redox-áram akkumulátor)

HMKE – Háztartási Méretű Kiserőmű

CO₂ – Szén-dioxid

MSZ EN – Magyar Szabványügyi Testület – Európai Szabvány

PV – Photovoltaic (fotovillamos)

NPV – Net Present Value (nettó jelenérték)

1. BEVEZETÉS

A környezeti problémák iránti növekvő társadalmi érzékenység, valamint a számos területet érintő szűkös gazdasági feltételek új döntések meghozatalára kényszerítették többek között a vasúti vállalatokat is. Európában és más régiókban is jellemzővé vált a vasúti üzemeltetés szétválasztása: az állami tulajdonban maradt infrastruktúra – beleértve a pályát és annak tartozékait – elkülönült a profitorientált vállalatoktól. Ezek működését elsősorban a piaci környezet és a mindenkori gazdasági események befolyásolják.

Az energiaforrások fogalma nem minden szakkönyvben kap részletes tárgyalást. Disszertációmban – amely a magyar és nemzetközi kötőtpályás közlekedés környezeti terheléseivel foglalkozik – kiemelten a használt vasúti faaljak újrahasznosításának problémáit vizsgálom. Célom, hogy elfogadható meghatározást találjak ezekre a kérdésekre, és megoldási javaslatokat tegyek.

Saját tapasztalatom szerint energiaforrásként olyan természeti rendszerek értelmezhetők, amelyekből technológiai eszközökkel energia nyerhető, figyelembe véve az adott társadalmi, politikai és műszaki fejlettségi szintet, valamint a gazdasági hatékonyságot. Iskolás éveimben még azt tanították, hogy az ember képes uralma alá hajtani a természetet, például a folyók folyásirányának megfordításával. Ez a szemlélet azonban mára jelentősen megváltozott, és a természettel való fenntartható együttélés került előtérbe.

A kérdés: Mindezt, hogyan lehet gazdaságosabban?

Választott témámhoz kapcsolódó technológia fejlődését figyelemmel kísérve, disszertációmban rá kívánok világítani, hogy közvetlen környezetünk is képes annyi energiával ellátni mindennapjainkat, hogy a gazdaságosság mellett ne kelljen lemondanunk a komfortról sem. Az energiaforrások ritkán alkalmazhatók közvetlenül technikai rendszerek energiaellátására. Bár nem tökéletes példa, a termálvízzel fűtött melegház szemlélteti ezt a folyamatot, mivel az energiaforrást itt is közvetlenül használják fel. Az esetek többségében azonban az energiaforrásokat először át kell alakítani energiahordozókká, mielőtt felhasználhatóvá válnának.

Mivel három évig éltem az Arapahok földjén Boulder, Colorado-ban, munkám egyik alap gondolatát az észak-amerikai indiánok föld iránti vallásos tisztelete ihlette, melyben engesztelő szertartással igyekeztek megbékíteni a szellemeket a környezettől elvett, javarészt saját táplálásukra elvont erőforrások miatt.

A tanulmány jelentősége

Az újrahasznosítás kiemelt szerepet játszik mind a társadalom, mind a gazdaság működésében, miközben alapvető eleme a fenntartható környezet megteremtésének. A jövő alakításában ezért elengedhetetlen, hogy a környezetpolitikai, társadalmi és gazdasági szempontokat együttesen vegyük figyelembe. Az elmúlt évtizedekben az újrahasznosítás területén megfigyelhető átalakulások jól tükrözik a technológiai fejlődés és a környezeti kihívások hatását. A hulladékok újrafelhasználása nemcsak az éghajlatváltozás kezelésében és az élelmiszerbiztonság javításában játszik szerepet, hanem hozzájárul a fenntartható mezőgazdaság növekedéséhez is.

A természeti erőforrások védelme, a termelékenység fenntartása és a gazdálkodók jövedelmének növelése központi célkitűzések. Az ökológiai szemléletű gazdálkodás, amely környezetbarát és természetközeli módszereket alkalmaz, a fenntartható gazdaság alapja. Célja a természeti sokféleség megőrzése és az újrahasznosított termékek minőségének javítása. Ez a megközelítés lehetővé teszi a gazdálkodók számára, hogy összhangban működjenek a természettel, minimalizálva a káros környezeti hatásokat. Az alacsonyabb károsanyag-kibocsátás és -használat szintén kulcsszerepet játszik a fenntartható fejlődésben.

A hulladékmentes vagy minimális hulladékot termelő gazdálkodási gyakorlatok hozzájárulnak a talaj mikroorganizmusainak és hasznos élőlényeinek megőrzéséhez, ezáltal hosszú távon javítják a talaj minőségét és termékenységet. A hulladék csökkentése mérsékli a környezeti károkat, például a talajvíz szennyezését és a vízi ökoszisztémák károsodását. A fenntartható földhasználat – amely magában foglalja a földterületek megóvását, az erózió elleni védekezést és a talaj minőségének javítását – alapvető fontosságú a mezőgazdaság jövője szempontjából (Baes et al., 1984). Ezek a gyakorlatok lehetővé teszik a mezőgazdasági termékek hosszú távú előállítását a természeti erőforrások károsítása nélkül.

A fenntarthatóság megvalósítása korunk egyik legnagyobb kihívása, de a mezőgazdaság az egyik legdinamikusabban fejlődő ágazat. A gazdálkodók egyre inkább felismerik az újrahasznosítási gyakorlatok jelentőségét és azok hosszú távú előnyeit. A fenntartható mezőgazdasági technológiák és eljárások széles körű elterjedése nemcsak a termelés hatékonyságát növeli és az élelmiszerbiztonságot erősíti, hanem jelentősen csökkenti a környezetre gyakorolt negatív hatásokat és a természeti erőforrások túlzott kiaknázását.

Az emberiség és a mezőgazdaság egyik legfontosabb kérdése, hogy képesek vagyunk-e megőrizni az ökológiai sokféleséget, valamint a természeti erőforrások mennyiségét és változatosságát. E téma fontosságát mutatja, hogy az Európai Unió 1257/99-es Vidékfejlesztési rendelete előírja, hogy minden tagállam Nemzeti Vidékfejlesztési Tervében kötelező elemként kell szerepelnie a

környezetvédelemnek. A következőkben bemutatom, hogyan illeszkedik mindez az általam tervezett prototípushoz.

A disszertáció másik elméleti alapját az adja, hogy a kapitalizmus, amely mint gazdasági és társadalmi rendszer az elmúlt 5-600 évben fejlődött ki, és különösen a XIX. század óta meghatározza világunk működését, elsődleges céljaként a profittermelést tartja szem előtt. Ezt a megközelítést Milton Friedman Nobel-díjas közgazdász úgy fogalmazta meg: „a vállalkozás dolga az üzlet.” (Friedman, 1970, 73p.) Ebből következően a tőketulajdonosok figyelmét alapvetően a nyereségtermelésre összpontosítja, míg a társadalmi és környezeti kérdések felelősségét gyakran más szereplőkre hárítja.

Azonban a mai társadalmi és környezeti kihívások fényében szükségesnek tartom e megközelítés újragondolását, különösen a vállalatok társadalmi felelősségvállalása (Corporate Social Responsibility, CSR) szempontjából, amely a vállalati szereplők szélesebb körű kötelezettségeit foglalja magában mind az ökológiai környezet, mind a szociális jólét és az emberi fejlődés területén. A társadalmi felelősségvállalás szükségességét tovább erősíti a technológiák könnyebb hozzáférhetősége és azoknak a globális környezeti hatásokra gyakorolt hatása.

Véleményem szerint a kapitalizmus jelenlegi működési elvei nem feltétlenül biztosítanak hosszú távú fenntarthatóságot, mivel a rendszer a profit maximalizálására épül, ami gyakran a természeti erőforrások fokozott kihasználásával és az ökológiai egyensúly megbomlásával jár. Ez a disszertáció megkísérli feltárni, hogy miként lehet a jelenlegi gazdasági rendszer keretei között olyan környezetkímélő technológiai megoldásokat alkalmazni, amelyek csökkentik a fenntartási költségeket és a károsanyag-kibocsátást, melyet a közgazdaságtan externáliaként kezel. Célom továbbá olyan gyakorlati javaslatok megfogalmazása, amelyek elősegíthetik a társadalmi és gazdasági erőforrások fenntartható újrahasznosítását és hatékonyabb felhasználását.

A kutatás során alkalmazott esettanulmányok segítségével szeretném bemutatni, hogy hogyan valósítható meg a szükségleten túli erőforrás-felhasználás csökkentése, valamint a felszabaduló források fenntartható módon történő visszaforgatása a gazdaságba. A dolgozat célja, hogy a fenntarthatóság szempontjából értékelje a technológiai fejlesztések szerepét, különös tekintettel azok gazdasági és műszaki megvalósíthatóságára, és felmérje, hogy ezek a fejlesztések milyen mértékben képesek hozzájárulni a környezeti terhelés csökkentéséhez.

1.1 Kutatási háttér

Közel 20 éve dolgozom az újrahasznosítás iparában, különböző területeken, vállalkozóként és cégvezetőként egyaránt. 2020 tavaszán a MÁV Zrt. pályarekonstrukciós és felújítási tendereket indított. A feladatom az volt, hogy felmérjem a keletkező és már keletkezett újrahasznosítható, egyéb és veszélyeshulladék-mennyiséget. Az újrahasznosítható részeket (mint mágnesezhető, színes- és nemesfémek, beton, zúzottkő stb.) a megfelelő engedélyekkel rendelkező cégek vásárolhatták meg. A 40 felmért helyszínen, amelynek 95%-a vasútállomás volt, megközelítőleg 19.000 metrikus tonna használt vasúti talpfát, szaknyelven faaljat azonosítottam. A talpfáknak nemcsak a vasúti pálya stabilitását, és rugalmasságát kell biztosítaniuk, de ellenállónak kell lenniük a faanyagokat pusztító gombák és kártevők ellen. Használatukat sok esetben 30-35 évre tervezik. A talpfákat zárt tartályokban, nagy nyomáson és magas hőmérsékleten, egy speciális olaj segítségével tartósítják, vagy kátrányba áztatják, amely eljárás védi a rothadás, korhadás ellen. A tartósságot elősegítő olaj a kreozot. Funkcionális képlete: $\text{CH}_3\text{OC}_6\text{H}_3(\text{CH}_3)\text{OH}$

A bükkfakátrányból előállított olajszerű folyadék, több benzolszármazék elegyének tekintendő, legtöbb benne aguajacol. Funkcionális képlete: $\text{C}_7\text{H}_{10}\text{O}_2$

A kreozot egy rákkeltő anyag, így az emberi egészségre negatív hatással van, ezért fogyasztói használata 2003 óta be van tiltva az Európai Unió területén. A cserét követően az elhasználódott talpfák veszélyes hulladéknak minősülnek, és 17 02 04 hulladékaazonosító (EWC) kóddal rendelkeznek. Hasonló kutatást végeztem a BKV Zrt.-nél. Lényegesen kevesebbet, már a cégek méreteit (MÁV Zrt., BKV Zrt.) tekintve is, de a „fogaskerekű”(Budapest, Széchenyi-hegy) és a „fonódó” villamos (Budapest, Margit körút) rekonstrukciója során, kiemelt és letárolt használt vasúti talpfákat volt lehetőségem minőségileg és mennyiségileg megvizsgálni. Mindkét állami vállalat hozzáértő szakembereivel a többszöri konzultáció rávilágított, hogy doktori értekezésem választott témája megfelelő kihívást és feladatot jelenthet számomra. Fontos megjegyezni, hogy állami tulajdonú cégek lévén, állami vagyonnal rendelkeznek, gazdálkodnak és állami vagyont kezelnek. Ennek értelmében és állapotától függetlenül állami vagyon minden kiemelt faalj. A jelen szabályozás és jogszabályi háttér szerint a kiemelt faaljakat csak selejtezni lehet. Szakszerű tárolásuk a vizsgált helyszíneken sehol nem megoldott. Rakodás, szállítás és gyűjtés során a megfelelő intézkedés megtételével és az elérhető jobb technika alkalmazásával biztosítani lehetne a talaj- és egyúttal a talajvíz-, levegőterhelés megelőzését. A rakodás során megfelelő műszaki intézkedésekkel megoldható lenne, hogy a mozgatott anyag légszennyezést ne okozzon.

Az újrahasznosítás gazdasági előnyei több szempontból is jelentősek lehetnek:

1. **Költségmegtakarítás az anyagköltségek csökkentése:** Az újrahasznosított vasúti talpfák és egyéb anyagok (pl. fémek, beton) értékesítése bevételi forrást jelenthet a vállalatok számára, miközben a hulladékkezelési költségek csökkennek. Ez állami vállalatok esetében különösen fontos, mivel az eladott anyagokból származó bevételek visszaforgathatók más közszolgáltatási projektek finanszírozásába.
2. **Környezeti költségek csökkentése és a fenntarthatósági célok támogatása:** Az újrahasznosítás hozzájárul a hulladéktárolás és -szállítás során keletkező környezeti költségek mérsékléséhez, mivel az újrahasznosított anyagok minimalizálják a környezetterhelést. A talpfák kezelésének javítása csökkenti a talaj- és talajvízszennyezést, amely hosszú távon mérsékli a környezetvédelmi kármentesítési költségeket.
3. **Fenntarthatósági és társadalmi elvárásoknak való megfelelés:** A vasúti és közlekedési vállalatok számára az újrahasznosítás nemcsak gazdasági előnyt jelent, hanem lehetőséget ad arra is, hogy teljesítsék a fenntarthatósági követelményeket és CSR-keretrendszerüket. Az ilyen kezdeményezések támogatják a vállalatok pozitív társadalmi megítélését, ami közvetetten hozzájárulhat a hosszú távú pénzügyi stabilitásukhoz.

A BKV Zrt. és a MÁV Zrt. esetében a hulladékgazdálkodási költségek optimalizálása fontos költségcsökkentési lehetőséget kínál, amellyel hozzájárulhatnak az állami vagyon hatékony kezeléséhez és a fenntarthatósági célkitűzésekhez. A BKV-val folytatott konzultációk során kapott belső adatok (Takács Péter és Borbás Péter vezetők részéről) alapján mindezek a költségcsökkentési lehetőségek megerősítést nyertek.

1.2 Problémafelvetés

A problémakör kiválasztása nem előzmények nélküli: megelőző vizsgálataim során már szembesültem a vasúti talpfák kezelési gyakorlatának fenntarthatósági kérdéseivel

Doktori témám egyik legfontosabb kérdéskörének gondolom a problémafelvetés részét, hiszen ez az a fejezet, amit későbbiekben részletesen, az adott területeken és a vizsgált országok vasúttársaságainak tekintetében ki kívánok bontani.

A vizsgálatba bevont országok kiválasztása több szempont figyelembevételével történt. Elsődlegesen az újrahasznosítási gyakorlatok fejlettsége, illetve a fenntartható vasúti közlekedéshez való viszonyuk jelentette az alapot. Az európai országok – így például Dánia, Hollandia, Belgium, Finnország, Norvégia, Németország, Ausztria, Svájc, Lengyelország és

Magyarország – hosszabb ideje alkalmaznak környezetbarát megközelítéseket a vasúti infrastruktúra kezelésében, különösen a faaljak újrahasznosítása terén. Ugyanakkor Brazília és Ausztrália esetei jól példázzák, hogyan valósíthatók meg innovatív újrahasznosítási megoldások más kontinenseken, eltérő szabályozási és gazdasági környezetben. A sokszínű országlista lehetőséget teremt a különböző földrajzi, társadalmi és technológiai háttérrel rendelkező vasúttársaságok környezetvédelmi gyakorlatainak összehasonlító elemzésére.

A bevezetésben említett selejtezési megoldás felveti bennem a kérdést: Miért csak selejtezni lehet? Miért nem lehet ténylegesen újrahasznosítani, vagy újrahasznosított terméket előállítani a használt vasúti faaljakból? A „környezetbarát”, „környezetkímélő” közlekedés ideája meggyőző tényező lehet a konkurenciaharcban, kifejezetten az új vasútvonalak építésének és elsősorban a nagysebességű, európai és tagállamokon kívüli pályák esetén. Szeretném megemlíteni a német egyesítés környékén bekövetkezett DB (Deutsche Bahn) és DR (Deutsche Reichsbahn) vasúttársaságok egybeolvasztását, aminek komoly környezetvédelmi vonatkozásai voltak. Időközben szinte minden Európához tartozó országban (nem csak a tagállamokban) új és szerteágazó környezetvédelmi szabályozás lépett életbe. Ami eddig megszokott, hétköznapi dolognak számított, az lehet, hogy „ettől az időponttól” kezdve törvénybe ütköző. Ez is volt az oka annak, hogy a nemzetközi vasútszervezet (UIC) 1992-ben az európai vasutak szakembereiből álló Környezetvédelmi Csoportot hozott létre. A cél az volt, hogy közös munkával javaslatokat, állásfoglalást és irányelveket dolgozzon ki annak érdekében, hogy összehangolják a tagvasutak környezetvédelmi tennivalóit. Az UIC környezetfilozófiájáról, annak folyamatáról, eredményeiről szóló beszámolóknak egész kiadványokat szentel a Rail International 1995-től folyamatosan. A UIC kiadványokban teszi közzé a megfogalmazott, vagy módosult környezetvédelmi irányelveket. Ezek legfontosabb sajátosságai a következők:

- a, tagvasutak környezetpolitikájának összehangolása;
- b, környezetvédelmi koordinátorok rendszeres találkozója;
- c, energiafogyasztás és levegővédelem kérdései;
- d, veszélyes áruk és anyagok szállítása;
- e, veszélyes anyagok kezelése;
- f, környezeti hatásvizsgálatok kérdéskörének tárgyalása;
- g, EU direktíva-javaslatok;
- j, környezetvédelmi részjelentések készítése (UIC, 2021);

Az első környezetvédelmi koordinátorok értekezletét 1994-ben tartották, ahol megállapodtak a vizsgálatra érdemes témakörökről. Ezek között szerepelt a veszélyes áruk szállításának kérdése, a zaj- és rezgéshatások elemzése, az energiafelhasználás vizsgálata, a különböző közlekedési módok összehasonlítása, hatásvizsgálatok elvégzése, közös környezetvédelmi politika kialakítása, valamint a talaj- és vízvédelem. Ez is mutatja, hogy a UIC-t élénken foglalkoztatják ezek a problémák, amelyek remélhetőleg már a tagvasutaknál is konkrét formát öltöttek.

Ellwanger, a UIC környezetvédelmi biztosa, 1995-ben példaként hozta fel a Riói Konferencia alapelvét, amely szerint a nemzeti hatóságoknak törekedniük kell arra, hogy a környezeti költségek és gazdasági eszközök nemzetközi szinten is érvényesüljenek, figyelembe véve azt az alapelvet, hogy a szennyező félnek kell viselnie a szennyezéssel járó költségeket. Kérdéseket intéztem a UIC környezetvédelmi csoportjához a faalkhoz kapcsolódó méréseikről és intézkedéseikről. Válaszaikban kiemelték a talaj- és vízszennyezés veszélyeit, valamint a hulladék- és zajproblémák megoldásának fontosságát, amelyek a jövőben kezelendő kihívások közé tartoznak. Öt tagállam vállalatai és azok alvállalkozói rendelkeztek KIR rendszerrel, de a megkérdezettek csak tervezik, hogy egyetemlegessé teszik a rendszert a teljes hálózaton belül a közeljövőben.

Kutatásom központi problémája, hogy bár az európai vasúttársaságok környezetvédelmi irányelveket követnek, a használt vasúti faalkak újrahasznosítása és a hulladékkezelési folyamatok területén jelentős kihívások és hiányosságok tapasztalhatók. A jelenlegi gyakorlat szerint a használt talpfákat egyszerűen selejtezik, mivel a szabályozási keretek nem teszik lehetővé a teljes újrahasznosítást vagy az újrahasznosított termékek előállítását. Ez a megközelítés nem csak környezetvédelmi, hanem gazdasági szempontból is aggályos, hiszen a selejtezett anyagok kezelésének költségei magasak, miközben a potenciális újrahasznosítás jelentős megtakarításokat eredményezhetne a vasúttársaságok számára.

Ebből adódik az a kutatási rés, hogy miként lehetne az elhasználódott vasúti talpfákat gazdaságilag és környezetileg fenntarthatóbb módon kezelni, különös tekintettel az újrahasznosításra. Jelen kutatásom célja tehát annak feltárása, hogy milyen technológiai és gazdasági lehetőségek állnak rendelkezésre a használt faalkak újrahasznosítására, és hogyan lehetne a meglévő szabályozási kereteket oly módon módosítani, hogy támogassák ezeket a fenntarthatóbb megoldásokat.

A dolgozat alapját korábbi megelőző vizsgálataim képezik, melyek során feltérképeztem a vasúti talpfák újrahasznosításának hazai és nemzetközi gyakorlatát, különös tekintettel azok környezetterhelési és gazdasági vonatkozásaira

1.3 Kutatási cél

Kutatási célom, hogy bizonyítsam és igazoljam, hogy az állami vagyont képező, használt vasúti talpfából (faaljból), amely veszélyes hulladéknak minősül, újrahasznosítással használható termék állítható elő. Véleményem szerint a megfelelő engedélyekkel rendelkező gazdálkodó szervezet(ek) a kutatási eredményeimet hasznosítva meg tudná(k) valósítani a termékeket, útmutatásaim és a prototípusom szerint. A projektpartnernek választott vállalkozásoknak természetesen rendelkeznie kell a megfelelő engedélyekkel, legfőképpen veszélyeshulladék-újrahasznosítási engedéllyel. Az elgondolásom és a megvalósítás tárgyát képező használt vasúti talpfa hazánk szinte minden vasútállomásán fellelhető. Termékké minősítés esetén tovább fejleszthető, mint jógyakorlat, mert szerte az EU-ban, dél-Dobruzsától a Hebridákig, Brazíliától Ausztráliáig, mindenhol megoldatlan probléma a használt vasúti talpfa újrahasznosítása.

Kutatási célok:

- **C1: Megvizsgálni**, hogy a jelenlegi jogszabályi és engedélyezési környezet mennyiben támogatja vagy gátolja a használt vasúti talpfák újrahasznosítását. Különösen arra keresem a választ, hogy milyen szabályozási változtatások lennének szükségesek ahhoz, hogy a talpfákat veszélyes hulladékból hasznosítható termékké lehessen minősíteni.
- **C2: Feltárni**, hogy milyen technológiai megoldások alkalmazhatók a használt vasúti talpfák újrahasznosítására, és mely módszerek biztosítják a legkisebb környezeti terhelést és a legnagyobb gazdasági hatékonyságot. Ezen belül célom a prototípusok kidolgozása és bemutatása, amelyeket a projektpartnernek alkalmazhatnak.
- **C3: Bebizonyítani**, hogy a megfelelő technológiák alkalmazásával a használt vasúti talpfákból előállított termékek versenyképesek lehetnek a piacon, és bemutatni, hogy a környezetvédelmi szempontok integrálásával a vasúttársaságok és partnereik számára is jelentős költségmegtakarítás érhető el.
- **C4: Gazdaságilag kimutatni**, hogy a használt talpfák újrahasznosítása nemcsak a hulladékkezelési költségek csökkentéséhez járul hozzá, hanem gazdasági értéket is teremt azáltal, hogy fenntartható termékek előállítására ad lehetőséget. Ezáltal a projekt segíthet abban, hogy a vasúttársaságok hatékonyabban gazdálkodjanak az állami vagyonnal, és hosszú távon is fenntarthatóbb működést valósítsanak meg.
- **C5: Gazdaságilag kimutatni**, hogy a hulladékkezelési költségek optimalizálásával hogyan érhető el pénzügyi megtakarítás a vasúttársaságok számára, és hogy az

újrahasznosítási folyamatok hosszú távon milyen pozitív hatással lehetnek a vállalatok költségvetésére és a fenntarthatósági célkitűzéseikre.

1.4 Kutatási kérdés

Kutatómunkám során az alábbi kérdésekre kerestem a válaszokat:

K1a. Milyen újrahasznosítási elveket és gyakorlati megoldásokat alkalmaznak a megkérdezett vasúttársaságok, illetve az újrahasznosításban részt vevő alvállalkozók a használt vasúti talpfák kezelésében?

K1b. Működtetnek-e környezetközpontú irányítási rendszert (pl. ISO 14001), illetve minőségbiztosítási rendszert (pl. ISO/TS 9002-2016) ezek a szervezetek, és milyen módon kapcsolódnak ezek az újrahasznosítási gyakorlatukhoz?

K2. Milyen újrahasznosítási elveket és eljárásokat alkalmaznak a megkérdezett szereplők (vasúttársaságok, alvállalkozók) a használt vasúti talpfák (faaljak) kezelésére, és ezek mennyiben tükröznék környezettudatos gondolkodást vagy viselkedést?

K3. Hogyan változott a környezeti fenntarthatósághoz kapcsolódó környezettudatos gondolkodás és gyakorlat a gazdálkodók, illetve alvállalkozók mindennapi működésében az elmúlt évek során?

K4. Mennyire tartják fontosnak a gazdálkodók/alvállalkozók a fenntarthatóságot?

K5. Része-e pályagazdálkodásuknak a környezeti monitoring eredményeinek figyelembevétele?

K6. Milyen mértékben járul hozzá a vasúti talpfák újrahasznosítása a környezeti állapot javulásához és a fenntarthatóbb szemlélet kialakulásához a vasúttársaságok körében?

K7. Milyen pozitív és negatív visszajelzések érkeztek a gazdálkodó szervezetektől és alvállalkozóktól a vasúti talpfák újrahasznosítási lehetőségeivel, környezeti hatásaival és gazdasági hasznosíthatóságával kapcsolatban?

A kérdések arra irányultak, hogy van-e írott környezetvédelmi stratégiája a megkérdezett vasúttársaságnak. Későbbiekben mutatom a saját eredményeimet. Időközben tanulmányoztam a UIC által végzett hasonló felmérések eredményeit is. Nyilvánvaló, hogy a közel 20 év távlatára jelentős különbségeket mutat az eredményekben. (Hüber et al., 2002, Sagevik et al., 2004).

Kutatási célok és kérdések közötti kapcsolat

A kutatási célok elérése érdekében kvalitatív és kvantitatív módszereket alkalmaztam, amelyek alapját a célokhoz illeszkedő kutatási kérdések képezték. A kutatási kérdések célja, hogy feltárják a jelenlegi iparági gyakorlatokat, a környezettudatos vállalatirányítás meglétét, valamint az újrahasznosítás technológiai és gazdasági lehetőségeit.

A cél–kérdés összerendelés az alábbi logika mentén alakult:

- **C1 célhoz kapcsolódik:** K1, K2 – a jogszabályi és intézményi háttér, valamint a jelenlegi újrahasznosítási gyakorlatok vizsgálata.
- **C2 célhoz kapcsolódik:** K2, K5 – a technológiai eljárások és az alkalmazott környezeti monitoring szerepe.
- **C3 célhoz kapcsolódik:** K3, K4, K6 – a fenntarthatósági szemlélet, valamint a vállalati és alvállalkozói attitűdök elemzése.
- **C4 és C5 célokhoz kapcsolódik:** K7 – a gazdálkodók visszajelzései, valamint a projekt gazdasági értékelésének visszacsatolása.

A fenti összefüggések mentén a kutatás logikusan épül fel: az elméleti megalapozás után az empirikus adatgyűjtés és a válaszadók véleményei segítenek értékelni és alátámasztani a kitűzött kutatási célokat.

1.5. Hipotézisek

Felvetett kutatási kérdésekre az alábbi, előzetes hipotéziseket fogalmazok meg:

H1: Magyarországon a veszélyes hulladéknak minősülő használt vasúti talpfák jelentős része nem kerül újrahasznosításra.

H2: A Németországban, Hollandiában, Svájcban, Lengyelországban és Brazíliában alkalmazott használt vasúti talpfák újrahasznosítási gyakorlata jelentős eltéréseket mutat a Magyarországon alkalmazott gyakorlathoz képest.

H3: Az érintett, újrahasznosítással megbízott gazdálkodók csak az energetikai újrahasznosítást választják környezetbarát gazdálkodási módszernek.

H4: A kidolgozott újrahasznosítási prototípus alkalmazása növeli a használt vasúti talpfák fenntartható feldolgozásának arányát az elkövetkező években.

H5: A használt vasúti talpfák újrahasznosítása gazdasági előnyökkel járhat a vasúttársaságok számára, mivel csökkenti a hulladékkezelési költségeket, és lehetőséget teremt bevétel realizálására az újrahasznosított anyagok értékesítése révén.

Az 1. táblázat bemutatja az egyes kutatási célokat, hozzájuk tartozó kutatási kérdéseket, hipotéziseket és vizsgálati módszereket, segítve az értekezés logikai struktúráját és az összefüggések átláthatóságát.

1. táblázat: Összefüggéseket bemutató táblázat

Kutatási cél	Kutatási kérdés	Hipotézis	Vizsgálati módszer
C1: Megvizsgálni, hogy a jelenlegi jogszabályi és engedélyezési környezet mennyiben támogatja vagy gátolja a használt vasúti talpfák újrahasznosítását.	K1a. Milyen újrahasznosítási elveket és gyakorlati megoldásokat alkalmaznak a megkérdezett vasúttársaságok, illetve az újrahasznosításban részt vevő alvállalkozók a használt vasúti talpfák kezelésében? K1b. Működtetnek-e környezetközponitű irányítási rendszert (pl. ISO 14001), illetve minőségbiztosítási rendszert (pl. ISO/TS 9002-2016) ezek a szervezetek, és milyen módon kapcsolódnak ezek az újrahasznosítási gyakorlatukhoz? K2. Milyen újrahasznosítási elveket és eljárásokat alkalmaznak a megkérdezett szereplők (vasúttársaságok, alvállalkozók) a használt vasúti talpfák (faaljak) kezelésére, és ezek mennyiben tükröznek környezettudatos gondolkodást vagy viselkedést?	H1.: Magyarországon a veszélyes hulladéknak minősülő használt vasúti talpfák jelentős része nem kerül újrahasznosításra. H2: A Németországban, Hollandiában, Svájcban, Lengyelországban és Braziliában alkalmazott használt vasúti talpfák újrahasznosítási gyakorlata jelentős eltéréseket mutat a Magyarországon alkalmazott gyakorlathoz képest.	Dokumentumelemzés a jogszabályokról és engedélyezési környezetről; nemzetközi összehasonlítás a hazai és más országok gyakorlatával.

C2: Feltárni a technológiai megoldásokat a használt vasúti talpfák újrahasznosítására, minimális környezeti terhelés és maximális gazdasági hatékonyság mellett.	K3. Hogyan változott a környezettudat a gazdálkodók mindennapjaiban? K4. Mennyire tartják fontosnak a fenntarthatóságot?	H3: Az újrahasznosítással megbízott gazdálkodók csak az energetikai újrahasznosítást választják környezetbarát gazdálkodási módszernek.	Technológiai elemzés; prototípus-fejlesztés és bemutatás; interjúk a gazdálkodókkal és a technológiákat alkalmazó szervezetekkel.
C3: Bizonyítani, hogy megfelelő technológiák alkalmazásával a használt vasúti talpfákból előállított termékek versenyképesek lehetnek, és hozzájárulhatnak a környezetvédelmi célok eléréséhez.	K5. Rész-e a pályagazdálkodásuknak a környezeti monitoring? K6. Milyen mértékben járul hozzá a vasúti talpfák újrahasznosítása a környezeti állapot javulásához és a fenntarthatóbb szemlélet kialakulásához a vasúttársaságok körében?	H4: A kidolgozott újrahasznosítási prototípus alkalmazása növeli a használt vasúti talpfák fenntartható feldolgozásának arányát az elkövetkező években.	Piaci versenyképességi elemzés; prototípus validáció; visszajelzések gyűjtése a környezeti hatások elemzéséhez.
C4: Gazdaságilag kimutatni, hogy a használt talpfák újrahasznosítása költségcsökkentést és gazdasági előnyt is jelenthet, ezzel támogatva a fenntartható gazdálkodást.	K7. Milyen pozitív és negatív visszajelzések érkeztek a gazdálkodó szervezetektől és alvállalkozóktól a vasúti talpfák újrahasznosítási lehetőségeivel, környezeti hatásaival és gazdasági hasznosíthatóságával kapcsolatban?	H5: A használt vasúti talpfák újrahasznosítása gazdasági előnyökkel járhat, mivel csökkenti a hulladékkezelési költségeket, és lehetőséget teremt bevétel realizálására az újrahasznosított anyagok értékesítése révén.	Költség-haszon elemzés; interjúk és kérdőívek a gazdálkodó szervezeteknél, elemzése a hulladékkezelési költségekről és potenciális bevételekről.

Forrás: Saját szerkesztés, 2024

2. A SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. Fenntarthatósági paradigmák a gazdaságban: Lineáris és körkörös gazdasági modellek az újrahasznosítás és újrafelhasználás szemszögéből

2.1.1. Lineáris gazdasági modell: A „Vedd-használd-dobd el” paradigma

A lineáris gazdasági modell hagyományosan az erőforrások kitermelésére és egyszeri felhasználására épít, ami hulladéktermelést eredményez (Stahel, 2016). A modell hosszú távon fenntarthatatlan, mivel nem ösztönzi az erőforrások körforgásban tartását, és súlyos környezeti kockázatokat idéz elő (D’Amato et al., 2021). Ez a modell elavulttá vált, mivel nem veszi figyelembe az erőforrások véges voltát. Sariatli (2017) kritizálja ezt a modellt, hangsúlyozva, hogy a társadalmi és gazdasági fenntarthatóság érdekében új rendszerek szükségesek, amelyek minimalizálják a környezeti lábnyomot. Korhonen et al. (2018) továbbá megjegyzi, hogy a lineáris modell a termelési hatékonyságra koncentrál, nem pedig a fenntarthatóságra, így hosszú távon káros hatással lehet a természeti erőforrásokra.

A lineáris gazdasági modell alapvető problémája, hogy a „használd és dobd el” szemlélet nem ösztönzi a felelős erőforrás-gazdálkodást. Kouhihabibi (2022) hangsúlyozza, hogy a lineáris modell nemcsak környezetvédelmi, hanem gazdasági szempontból is fenntarthatatlan, mivel növeli a termelési költségeket az alapanyagok szűkössége miatt. Williams (2019) az ipari folyamatok kapcsán kiemeli, hogy a lineáris gazdaság nagy mértékben függ az olcsó energia és nyersanyag elérhetőségétől, ami hosszú távon kockázatos stratégia. A termékek rövid élettartamának ösztönzése, valamint az elavulás tervezése (planned obsolescence) tovább rontja a helyzetet (Bovea et al., 2018).

Kovač Kralj (2023) rámutat arra, hogy a lineáris gazdasági modell a természeti erőforrások kimerüléséhez és súlyos környezeti degradációhoz vezet. Cooper és Gutowski (2017) külön hangsúlyozzák a tervezett elavulás negatív környezeti hatásait, amelyek növelik a hulladéktermelést és csökkentik a fenntartható gazdálkodási lehetőségeket.

A vasúti infrastruktúra szempontjából a lineáris modell továbbra is uralkodó szemlélet, különösen a használt anyagok – például talpfák – kezelésében. Saját kutatásom eredményei is azt mutatják, hogy a jelenlegi gyakorlatok nem ösztönzik az újrahasznosítást, hanem inkább a lerakással vagy égetéssel történő ártalmatlanítást támogatják. E szemlélet fenntartása hosszú távon

fenntarthatatlan, ezért kutatásom egyik célja éppen ennek a logikának a meghaladása egy körforgásos modell irányába. Ezzel összhangban a legújabb szakirodalom is rámutat arra, hogy a fogyasztói és ipari gyakorlatokban egyaránt komoly akadályai vannak a lineáris logika meghaladásának, és szükség van strukturált átmenetre a körforgásos modell felé (Harris et al., 2023).

2.1.2. Körkörös gazdaság: A hulladék minimalizálása és az erőforrások zárt rendszere

A körkörös gazdasági modell a termelési folyamatok zárt rendszerében történő megvalósítását célozza, amely biztosítja, hogy a hulladék anyagok újrahasznosításra kerüljenek. Bocken et al. (2016) szerint ez a modell számos gazdasági és társadalmi előnnyel jár, többek között a munkahelyteremtés és a környezeti terhelés csökkentése révén. Murray et al. (2017) emeli ki, hogy a körkörös gazdaság támogatja a hosszú távú fenntarthatóságot, azonban kihívásokat is rejt, például az újrahasznosítási rendszerek bevezetési költségeit. Geissdoerfer et al. (2020) javasolják, hogy a kormányok megfelelő támogatási rendszerek és ösztönzők révén segítsék a vállalatokat a körforgásos gazdaság modelljének integrálásában.

A körforgásos gazdaság mint koncepció nem újkeletű, ugyanakkor új tartalommal bővül napjaink fenntarthatósági kihívásai nyomán. Vasa (2020) rámutat arra, hogy a körforgásos gazdaság nem csupán jövőbemutató trend, hanem bizonyos értelemben visszatérés is a tradicionális, erőforrás-takarékos gazdasági szemlélethez. Véleménye szerint a modell sikeres alkalmazásához strukturált állami és piaci együttműködésre van szükség, amely a környezeti, társadalmi és gazdasági szempontokat egyaránt figyelembe veszi. Ez az értelmezés jól illeszkedik a vasúti szektorban megvalósítható újrahasznosítási gyakorlatok keretébe, különösen, ha azokat nem csupán technológiai, hanem rendszerszintű megközelítésben vizsgáljuk.

A körkörös gazdaság sikere érdekében kulcsfontosságú az anyagáramok optimalizálása és az új technológiák bevezetése. Desing et al. (2021) szerint a körforgásos gazdaság akkor lehet valóban fenntartható, ha rendszerszintű szemlélettel optimalizálja az anyagáramokat, figyelembe véve a környezeti korlátokat és az újrahasználat lehetőségeit. Kirchherr et al. (2017) kiemelik, hogy az innovációs technológiák és az ökológiai tervezés hozzájárulhatnak a fenntarthatóbb gyakorlatokhoz. A társadalmi szinten történő elterjedés érdekében az oktatás és a fogyasztói tudatosság növelése is elengedhetetlen. Továbbá, Stahel (2019) hangsúlyozza, hogy a körkörös gazdaság nemcsak újrahasznosítást, hanem az erőforrások megtartását is előtérbe helyezi, például a javítás, felújítás és újrahasználat révén.

Ghisellini et al. (2016) hangsúlyozzák, hogy a körkörös gazdaság nemcsak a hulladék minimalizálását célozza, hanem az erőforrások hatékonyabb használatát is. Ez a modell lehetőséget kínál a fenntarthatóság megvalósítására egy olyan gazdasági rendszerben, amelyben az anyagáramokat úgy alakítják, hogy minimalizálják a negatív környezeti hatásokat. Andersen (2007) rámutat arra, hogy a körkörös gazdaság megközelítése egy olyan gazdasági paradigmaváltást jelent, amely az újrahasznosítás, javítás és hosszú élettartamú termékek előtérbe helyezésével javítja a természeti erőforrások kihasználását.

A hazai kutatások is alátámasztják, hogy a körforgásos gazdasági modellben az újrahasznosítás nem csupán hulladékcsökkentési célokat szolgál, hanem technológiai és gazdasági innovációt is jelent. Voith (2020) tanulmányában az üveghulladék előkészítésének technológiai folyamatait vizsgálja, kiemelve, hogy a megfelelő válogatás és tisztítási eljárások kulcsfontosságúak a másodlagos nyersanyagként történő felhasználáshoz. Ez a megközelítés párhuzamba állítható a vasúti talpfák előkészítésével és újrahasznosításával, ahol szintén kiemelt szerepe van az anyagkezelési technológiáknak.

Winans et al. (2017) elemzik a körkörös gazdaság koncepciójának történeti fejlődését és alkalmazásait, rámutatva, hogy az elmúlt évtizedekben a fenntarthatóság érdekében tett lépések fokozatosan megeremtetették a körkörös gazdaság alapjait. E tanulmány szerint a körkörös modell szerves részévé válhat a nemzeti és nemzetközi gazdasági stratégiáknak, amelyek célja az erőforrások fenntarthatóbb hasznosítása.

A körforgásos gazdasági modell a vasúti talpfák újrahasznosítása kapcsán is kiváló keretrendszert biztosít. A kutatásomban kidolgozott prototípusok és javasolt szabályozási reformok azt célozzák, hogy a veszélyes hulladéknak minősített anyagokat – mint például a talpfák – ne egyszerűen eltávolítandó hulladékként, hanem másodlagos nyersanyagként kezeljük. A körkörös gazdaság tehát nemcsak elméleti modell, hanem egy valós alternatíva, amelyet a dolgozatban gyakorlati példák mentén is alátámasztok.

Gervai, Horváth és Trautmann (2023) kiemelik, hogy a körforgásos gazdaság nem csupán környezetvédelmi célkitűzés, hanem iparstratégiai jelentőséggel is bír. Megállapításaik szerint a körkörös gazdaság bevezetése hozzájárulhat az erőforrásokkal való hatékonyabb gazdálkodáshoz, valamint a nemzetgazdaság rezilienciájának növeléséhez. Ez a szemlélet a vasúti ágazatban is kulcsszerepet kaphat, különösen ott, ahol jelentős mennyiségű másodnyersanyag – például használt talpfa – keletkezik, amely újrafeldolgozható lenne.

2.1.3. Újrahasznosítás és újrafelhasználás a körforgásos gazdaságban

Az újrahasznosítás és újrafelhasználás a körkörös gazdaság fontos elemei, amelyek célja az anyagok gazdaságban való megtartása és az erőforrások újrafelhasználása. Ghisellini et al. (2016) rámutatnak, hogy az újrahasznosítás csökkenti a hulladék mennyiségét és hozzájárul a nyersanyag-felhasználás mérsékléséhez. Reike et al. (2018) viszont rámutatnak, hogy az újrahasznosítás önmagában nem elegendő a fenntarthatóság eléréséhez, és egy átfogó, integrált szemléletre van szükség, amelyben az újrahasználat, az anyagcsere folyamatok és a hulladék minimalizálása mind szerves részei a gazdasági rendszernek.

A kutatásom során különös figyelmet fordítottam arra, hogy ne csak újrahasznosítási lehetőségeket mutassak be, hanem értékeljem ezek környezeti és gazdasági hatékonyságát is. A vasúti talpfák újrahasznosítása során a bioremediációval előkészített faanyagok például reálisan beilleszthetők az építőiparba, amennyiben megvalósul a megfelelő osztályozás és minősítés. Ezzel a szemlélettel a körforgásos modell nem csupán elérhető cél, hanem konkrét gyakorlati lehetőség is a vasúti szektor számára.

Saját kutatásaim alapján a vasúti talpfák újrahasznosítása nemcsak technológiai, hanem környezetpolitikai szempontból is releváns megoldásként jelenik meg.

2.1. 4. Kritikai elemzés és jövőbeli irányok a körkörös gazdasági modellben

A körkörös gazdasági modell elméleti alapjait illetően több kutató is kihangsúlyozza, hogy a modell nemcsak környezetvédelmi, hanem gazdasági előnyökkel is jár. Ugyanakkor a Morsetto (2020) által végzett kritikai elemzés felveti, hogy a körkörös gazdasági modell korlátai közé tartozik a piacgazdaságra való támaszkodás és a rendszer működtetéséhez szükséges anyagi befektetések nagysága. Továbbá, Kirchherr és van Santen (2019) arra figyelmeztetnek, hogy a körforgásos modell bevezetése során a társadalmi elfogadottság és az innováció iránti nyitottság kulcsfontosságú lehet a sikeres adaptációhoz.

Egyetértek azokkal a kritikákkal, amelyek a körforgásos gazdaság gyakorlati megvalósításának korlátait emelik ki. Ugyanakkor úgy látom, hogy a vasúti iparban – különösen az állami tulajdonú vállalatok esetében – megvan az a strukturális háttér és szabályozási lehetőség, amely lehetővé tenné a körforgásos logika fokozatos bevezetését. A kutatásomban szereplő javaslatok és pilot projektek pontosan ezt az átmenetet célozzák meg, egy fenntarthatóbb és erőforrás-hatékonyabb működés érdekében.

A körkörös gazdasági modell alkalmazása egyre inkább túlmutat az ipari és technológiai szinteken, és megjelenik a térségi és városi szintű stratégiákban is. Németh et al. (2023) tanulmányukban kifejtik, hogy a körforgásos logika különösen a kis- és középvárosok esetében hozhat áttörést a fenntartható fejlődés területén, ahol a helyi erőforrások hatékony hasznosítása és a lokális újrahasznosítási rendszerek kialakítása kulcsfontosságú. Ez a szemlélet a vasúti infrastruktúra újrahasznosításához is jól illeszthető, hiszen a regionális vasúti rendszerek beilleszthetők egy térségi körkörös gazdasági modellbe, amely erősíti a helyi gazdaságokat és csökkenti az ökológiai lábnyomot.

2.2. A szennyező anyagok kezelése a környezetkímélő technológiák alkalmazásában

A környezetkímélő technológiák célja a különféle veszélyes anyagok kibocsátásának minimalizálása és a környezetben való terjedésük megakadályozása. Ezek a technológiák jelentős mértékben építenek a szennyező anyagok viselkedésének tudományos ismereteire, amelyek alapvetően meghatározzák, hogy egy anyag milyen mértékben és hogyan befolyásolja a talajt, vizet és a levegőt. Az ilyen technológiák fejlesztéséhez nélkülözhetetlen a szennyező anyagok környezeti sorsának, azaz azok lebomlási, felszívódási és terjedési mechanizmusainak megértése (Baes et al., 1984).

A veszélyes anyagok kezelése szempontjából Howard és munkatársai (1989) által nyújtott átfogó adatok alapvetőek. Munkájuk részletesen bemutatja a szennyező anyagok talajban, vízben és levegőben végbemenő átalakulását, lebomlását, illetve ökológiai hatásaikat, így támogatja a szennyezés csökkentésére irányuló technológiai megoldások kidolgozását. Ezen ismeretek segítik a szennyező anyagok kezelésére vonatkozó innovációkat, amelyek nélkülözhetetlenek a környezetkárosító anyagok terjedésének csökkentésében és a fenntarthatóság megvalósításában (Howard et al., 1989).

A technológiai innovációk, mint például a bioremediáció, hatékony megoldást kínálnak a környezeti szennyezés kezelésére azáltal, hogy a természetes lebontási folyamatokat használják fel a szennyező anyagok eltávolítására vagy ártalmatlanítására (Kumar et al., 2011). A bioremediáció különösen hasznos olyan környezetben, ahol a hagyományos fizikai vagy kémiai tisztítási módszerek túl költségesek vagy nem megfelelőek a talaj és a víz kíméletes kezelésére. A vasúti közlekedés során keletkező szennyező anyagok kezelésében a fitoremediáció is kiemelkedő, amely növényeket használ a talajban található toxikus anyagok felvételére és lebontására (Ali et al., 2013).

A környezetkímélő technológiák gazdasági vonatkozásai szintén figyelembe veendők. Az innovatív szennyezéskezelési technológiák, bár kezdetben magasabb beruházási költségekkel

járhatnak, hosszú távon csökkenthetik a környezeti károkhoz kapcsolódó költségeket és növelhetik a fenntarthatóságot (El-Fadel et al., 1997). Ezzel a vállalatok nemcsak a környezeti előírásoknak tesznek eleget, hanem gazdasági előnyökre is szert tehetnek, hiszen a környezetkímélő gyakorlatok általában pozitív hatással vannak a vállalati megítélésre és az üzleti teljesítményre is. Összességében a környezetkímélő technológiák és innovációk, mint a bioremediáció és fitoremediáció, jelentős mértékben hozzájárulnak a fenntartható ipari gyakorlatok kialakításához és a környezetbarát gazdasági folyamatok megvalósításához, elősegítve a hosszú távú fenntarthatóságot (Baes et al., 1984; Howard et al., 1989; Kumar et al., 2011; Ali et al., 2013; El-Fadel et al., 1997).

2.3. Az újrahasznosítás technológiai háttere a vasúti közlekedésben

Az újrahasznosítás alapvető szerepe a fenntartható fejlődés elérésében rejlik, hiszen minimalizálja a természeti erőforrások kitermelését és csökkenti a hulladék mennyiségét. A vasúti közlekedésben az újrahasznosítási folyamatok olyan anyagokra irányulnak, mint a fém alkatrészek, beton, műanyag és fa. A hulladékok újrahasznosítása nem csupán a környezetterhelés csökkentésére irányul, hanem a költségcsökkentésre is, mivel az újrahasznosított anyagok beépíthetők új infrastrukturális projektekbe (Howard et al., 1989; Geyer & Jackson, 2004).

A korszerű technológiák, például a mechanikai és kémiai feldolgozás, lehetővé teszik az anyagok nagyfokú újrahasznosítását, amely hozzájárul a vasúti rendszerek fenntartható működéséhez. Például a hulladékbeton darálása és újrafelhasználása újak helyett már meglévő nyersanyagokból is biztosítható, ami jelentősen csökkenti az építési projektek ökológiai lábnyomát (Tam & Tam, 2006). Ezenkívül a fém alkatrészek újrahasznosítása révén csökken az acéltermeléshez szükséges energiaigény, ami a karbonlábnyom csökkentésében is jelentős szerepet játszik (Ponsot et al., 2019).

A műanyagok újrahasznosítása szintén fontos a vasúti rendszerekben, különösen a kábelburkolatok és egyéb védőanyagok esetében. A fejlett műanyag-újrafeldolgozó eljárások lehetővé teszik a polimerek szerkezetének helyreállítását, így az anyagok újból hasznosíthatók hosszú távú projektekben, mint például vasúti infrastruktúra védelmi rendszereinek kiépítése (Hopewell et al., 2009).

A faanyagok, például a vasúti talpfák újrahasznosítása során gyakran alkalmaznak hőkezelési és kémiai eljárásokat, hogy eltávolítsák a káros anyagokat és felkészítsék az anyagot további felhasználásra (Veit, 2015). Ez különösen fontos, mivel a környezetbarát módszerek elősegítik a fenntarthatóságot, és csökkentik a hulladékkezelési költségeket.

Össességében a vasúti közlekedésben alkalmazott újrahasznosítási technológiák hozzájárulnak a gazdaság körforgásos modelljéhez és csökkentik a környezetre gyakorolt negatív hatásokat. Az újrahasznosítás folyamatos fejlesztése és alkalmazása lehetővé teszi, hogy a vasúti rendszerek fenntarthatóbban működjenek, miközben támogatják a természeti erőforrások megőrzését és a hulladékcsökkentést (Geyer & Jackson, 2004; Hopewell et al., 2009; Tam & Tam, 2006).

A vizsgált technológiai eljárások kiválasztása saját terepi és laboratóriumi kísérleteim tapasztalataira épült.

2.3.1. Az újrahasznosítási folyamatok jelentősége és hatékonysága

A fenntarthatósági célok eléréséhez a vasúti társaságok egyre inkább környezetbarát technológiákat alkalmaznak, melyek csökkentik a környezeti terhelést. Az Európai Unió környezetvédelmi előírásai és irányelvei, mint például az Európai Zöld Megállapodás, arra ösztönzik a vasúti ipart, hogy csökkentse ökológiai lábnyomát és támogassa a körforgásos gazdaságot (European Commission, 2019). Az újrahasznosítás hatékonyságának növeléséhez olyan megközelítéseket alkalmaznak, mint a zárt láncú újrahasznosítás, amely biztosítja, hogy az anyagok újrahasznosított formában visszakerüljenek az ipari folyamatokba, csökkentve ezzel az új alapanyagok iránti keresletet (Geyer & Jackson, 2004).

A vasúti infrastruktúra építéskor és fenntartásakor alkalmazott technológiák, például az újrahasznosított beton és acél alkalmazása, minimalizálják a szén-dioxid-kibocsátást. Az acél újrahasznosítása például lényegesen kevesebb energiát igényel, mint az elsődleges acélgyártás, így jelentős energia- és költségmegtakarítást eredményezhet (Ponsot et al., 2019). Az újrahasznosított beton használata pedig nemcsak csökkenti a bányászat szükségességét, hanem a hulladéklerakók terhelését is mérsékli, ami jelentős környezeti előnyökkel jár (Rahmen et al., 2020).

A fenntartható hulladékgazdálkodási elvek alkalmazása a vasúti iparban segít csökkenteni a környezetre gyakorolt káros hatásokat. Az anyagok visszanyerését és újrahasznosítását célzó innovatív módszerek, mint a fitoremediáció és a bioremediáció, hatékonyak lehetnek a vasúti talpfák esetében, különösen a veszélyes anyagok kezelésénél, amelyek egyébként szennyezhetik a talajt és a vizet (Ali et al., 2013; Mrozik et al., 2003). Ezek a módszerek csökkentik a hulladékkezelési költségeket, miközben növelik az újrahasznosított anyagok minőségét és biztonságát.

A hatékonyságot növelő megközelítések közé tartozik a hulladékgazdálkodási rendszerek és a termelési folyamatok optimalizálása is, amely hosszú távon fenntarthatóbb működést eredményez. Például a „lean manufacturing” (hatékonyságnövelő gyártás) és a körforgásos gazdaság integrálása lehetőséget teremt a hulladék minimalizálására és az anyaghasználat hatékonyságának növelésére

(Lieder & Rashid, 2016). A vasúti társaságok számára ez a megközelítés nemcsak környezeti, hanem jelentős gazdasági előnyökkel is jár, mivel csökkenti a termelési költségeket és javítja a versenyképességet (Korhonen et al., 2018).

Összességében az újrahasznosítási folyamatok alkalmazása és fejlesztése elengedhetetlen a vasúti ipar fenntarthatóbb működésének megvalósításához. Az ipar egyre nagyobb mértékben támaszkodik a körforgásos gazdaság modelljére, amely az anyagok visszaforgatását és újrafelhasználását ösztönzi, csökkentve ezzel a természeti erőforrások felhasználását és a hulladékképződést (Kirchherr et al., 2017; Stahel, 2016).

2.3.2. A fenntarthatósági célok és a környezetbarát technológiák szerepe

A fenntarthatósági célok elérésében kiemelt jelentőségűek a hulladékgazdálkodási elvek, amelyek alapvető fontosságúak a vasúti anyagok – például a fa, fém és műanyag – kezelésében. Az EU-ban alkalmazott hulladékhierarchia szerint a megelőzés, a hasznosítás, az újrafeldolgozás és a biztonságos ártalmatlanítás az alapvető irányelvek (Directive 2008/98/EC). Ez a hierarchia támogatja a körforgásos gazdaság modelljét, amelyben a hulladékok visszaforgatása és újrahasznosítása kulcsfontosságú szerepet játszik (Stahel, 2016).

A vasúti talpfák esetében például a bioremediációs módszerek alkalmazása segít a veszélyes anyagok eltávolításában, így a faanyagot biztonságosabbá teszi a további újrahasznosításra. A bioremediáció olyan környezetbarát megoldás, amely a természetes lebontási folyamatokat használja fel a szennyező anyagok eltávolítására, így hozzájárul a talaj- és vízszennyezés minimalizálásához (Mrozik et al., 2003). A vasúti infrastruktúrában használt fém alkatrészek esetében szintén fontos a környezetbarát újrahasznosítási technológiák alkalmazása, mivel a fémek újrafeldolgozása jelentős energia- és nyersanyagmegtakarítást eredményez (Hossain et al., 2019). A fenntarthatósági célok elérésében a vasúti alkatrészek élettartamának meghosszabbítása és az elavult alkatrészek másodlagos felhasználása is jelentős szerepet játszik. Az élettartam-hosszabbítás és a megelőző karbantartás nemcsak csökkenti az új anyagok iránti keresletet, hanem hozzájárul a hulladékmennyiség csökkentéséhez és az ipari hulladék lerakásának mérsékléséhez is (Pongrácz et al., 2004). A vasúti infrastruktúra fenntarthatóságának növelése érdekében alkalmazott környezetbarát technológiák közé tartoznak a fitoremediációs eljárások, amelyek lehetővé teszik a növények számára, hogy a talajban található szennyező anyagokat kivonják és lebontsák, hozzájárulva ezzel a talaj egészségének megőrzéséhez (Ali et al., 2013).

A hulladékgazdálkodás és a fenntarthatósági célok összefüggésében a „zero waste” elv, amely a hulladék minimalizálását és az anyagok újrafelhasználásának maximalizálását célozza, szintén kiemelt fontosságú. E megközelítés lehetővé teszi, hogy a vasúti ipar hatékonyabban kezelje a

hulladékot és csökkentse a környezeti terhelést (Lehmann & Crocker, 2012). Az ilyen típusú környezetbarát technológiák bevezetése hosszú távon gazdasági előnyökkel is jár, hiszen csökkentik a környezetterhelési költségeket és növelik a fenntarthatóságot (Korhonen et al., 2018). A környezetbarát technológiák alkalmazása tehát nemcsak a fenntarthatósági célok elérését segíti elő, hanem fontos gazdasági és társadalmi előnyökkel is jár. Az anyagok újrafelhasználása és a hulladék minimalizálása jelentősen hozzájárul a vasúti szektor környezeti lábnyomának csökkentéséhez és a körforgásos gazdaság fejlődéséhez (Kirchherr et al., 2017; Bocken et al., 2016).

2.3.3. A hulladékgazdálkodási elvek a vasúti anyagok esetében

A hulladékgazdálkodás elvei alapvető fontosságúak a vasúti anyagok, például a fa, fém és műanyag esetében. Az EU-ban alkalmazott hulladékhierarchia szerint a megelőzés, a hasznosítás, az újrafeldolgozás és a biztonságos ártalmatlanítás az alapvető irányelvek (Directive 2008/98/EC). Az újrahasznosítási folyamatok során elsődleges cél, hogy a hulladékképződés minimalizálása mellett az anyagok másodlagos felhasználása is biztosított legyen, ezáltal csökkentve az ökológiai lábnyomot (Zaman & Lehmann, 2011).

A vasúti talpfák esetében például a bioremediációs módszerek alkalmazása segít a veszélyes anyagok eltávolításában, így a faanyagot biztonságosabbá teszi a további újrahasznosításra. A bioremediáció olyan környezetbarát technológia, amely lehetővé teszi a káros anyagok lebontását biológiai úton, ezáltal támogatva az anyag fenntartható újrahasznosítását (Mrozik et al., 2003). Ezen kívül a faanyagok fitoremediációs kezelése is hatékonyan járul hozzá a veszélyes anyagok eltávolításához, melynek során növények segítségével vonják ki a szennyező anyagokat a talajból és a faanyagból (Ali et al., 2013).

A hulladékgazdálkodás további eszközei közé tartozik a vasúti alkatrészek élettartamának meghosszabbítása és az elavult alkatrészek másodlagos felhasználása. Az élettartam-hosszabbítás különösen fontos a vasúti infrastruktúrában, mivel a fém és beton alkatrészek újrafelhasználása jelentős anyag- és költségmegtakarítást eredményezhet, valamint csökkenti a hulladéklerakók terhelését (Pongrácz et al., 2004). Az elhasznált anyagok újrafeldolgozása lehetőséget nyújt arra is, hogy az iparág megfeleljen az EU környezetvédelmi előírásainak, és hozzájáruljon a fenntarthatósági célok eléréséhez (Kaza et al., 2018).

A hulladékgazdálkodás során alkalmazott egyik innovatív megoldás a "zero waste" megközelítés, amely a hulladékképződés teljes kiküszöbölését célozza. Ez a megközelítés elősegíti, hogy az anyagok zárt ciklusban mozogjanak, ami csökkenti az új alapanyagok kitermelésének szükségességét, és minimalizálja a hulladék mennyiségét (Lehmann & Crocker, 2012). Az ilyen

megközelítések hozzájárulnak ahhoz, hogy a vasúti ipar hatékonyabban kezelje a hulladékot, csökkentve ezzel a környezetre gyakorolt negatív hatásokat.

Összességében a hulladékgazdálkodási elvek és a fenntartható technológiák alkalmazása a vasúti anyagok esetében jelentős gazdasági és környezeti előnyökkel jár. A hulladék csökkentésére és az anyagok újrafelhasználására irányuló törekvések hozzájárulnak a körforgásos gazdasági modell megvalósításához, és lehetővé teszik, hogy a vasúti ipar fenntartható módon működjön (Korhonen et al., 2018; Stahel, 2016, Venturini, 2021).

2.3.4. Gazdasági előnyök és kihívások az újrahasznosításban

Az újrahasznosítás jelentős gazdasági előnyökkel jár, különösen a vasúti közlekedésben, ahol az anyagok újrafelhasználása csökkenti a költségeket és csökkenti a környezeti terhelést. Az újrahasznosítási folyamatok csökkentik a hulladékgazdálkodási és anyagköltségeket, valamint a munkahelyteremtés révén közvetlen gazdasági előnyöket kínálnak (El-Fadel et al., 1997; Geyer & Jackson, 2004). Az újrahasznosított anyagok felhasználása különösen előnyös a vasúti infrastruktúrában, mivel ezek az anyagok alkalmasak például beton talpfák, acélsínek vagy műanyag elemek helyettesítésére, ezáltal csökkentve az új nyersanyagok iránti igényt (Tam & Tam, 2006).

Ugyanakkor kihívások is felmerülnek az újrahasznosítási folyamatok ipari bevezetése során. Az újrahasznosításhoz szükséges infrastruktúra és a szabályozási keretek kialakítása jelentős beruházásokat igényelhet, amelyek nélkülözhetetlenek a hatékony újrahasznosítási rendszerek működtetéséhez (Mazzanti & Zoboli, 2008). Az újrahasznosítás gyakorlati megvalósítása ráadásul bonyolult folyamat, mivel figyelembe kell venni az újrahasznosított anyagok minőségét és a piaci kereslet változásait is. Például, az újrahasznosított anyagok piaci ára gyakran ingadozik, ami bizonytalanságot okozhat a hosszú távú beruházások megtérülésében (Lave et al., 1995).

A modern technológiák, mint például a zárt láncú újrahasznosítás, kezdetben magas beruházási költségekkel járhatnak, azonban hosszú távon jelentős megtakarításokat eredményezhetnek a termelési költségek és az erőforrások megőrzése terén (Kumar et al., 2011; Kirchherr et al., 2017).

A zárt láncú rendszerek hatékonyan visszajuttatják az anyagokat a termelési láncba, csökkentve ezzel az alapanyagbeszerzés költségeit, valamint a hulladékkezeléshez kapcsolódó költségeket. Ezen technológiák alkalmazása nemcsak a gazdasági teljesítményt javítja, hanem megfelel a környezetvédelmi követelményeknek is (Förstner et al., 1993), ezáltal csökkentve a szén-dioxid-kibocsátást és elősegítve a fenntartható fejlődést (Stahel & Reday-Mulvey, 1981).

Az újrahasznosítás további kihívása a technológiai fejlesztések folyamatos követése és a fenntarthatósági célkitűzésekhez való igazodás, mivel az új módszerek és technológiák gyakran magas képzési igénnyel járnak. Ez különösen igaz a vasúti közlekedésben, ahol a műszaki fejlődés és a fenntarthatósági előírások összhangja alapvető fontosságú a hosszú távú gazdasági és környezeti hatások optimalizálásában (Hopewell et al., 2009).

Összességében, bár az újrahasznosítás számos gazdasági előnyt kínál, a megvalósítása komplex kihívásokkal jár. A szabályozási környezet fejlesztése és a technológiai innovációk támogatása elengedhetetlen az újrahasznosítás gazdasági fenntarthatóságának biztosításához. Az infrastruktúra fejlesztéséhez szükséges beruházások mellett a hosszú távú költségmegtakarítás és környezeti előnyök hangsúlyozása hozzájárulhat a vasúti szektor fenntarthatóbb működéséhez (McKinnon, 2018; Shankar & Barbosa-Póvoa, 2017).

2.4. Fenntartható vasúti közlekedés és a környezetbarát újrahasznosítási megoldások a nemzetközi gyakorlatban

2.4.1. A Dán Állami Vasutak (DSB)

A Dán Államvasutak (DSB) szinte elsőként ismerte fel a környezeti menedzsmentrendszer fontosságát és annak szükségességét, hogy fenntartható módon csökkentsék a vasúti működés környezeti hatásait. 1993-ban a DSB hat önálló egységre vált szét, egy ügyvezető igazgató felügyelete alatt, és az infrastruktúra levált az üzemviteli feladatokról. Ez azt eredményezte, hogy a környezetvédelmi tevékenység beépült az új egységek mindennapi működésébe (Andersen et al., 1995). A legfelső szintű döntés keretében környezeti menedzsmentrendszert vezettek be, amely a teljes vasúttársaságra kiterjedt, és elősegítette, hogy a fenntarthatósági célok és környezetbarát technológiák alkalmazása mindennapos gyakorlattá váljon.

Mindegyik tagvállalatnál megkezdődtek a környezetvédelmi politikák kidolgozásával kapcsolatos tevékenységek. Az első lépés a vállalati környezetvédelmi politika megfogalmazása volt, amely a vasúttársaság átfogó környezetvédelmi terve alapján készült. Ezt követte a környezeti hatások részletes feltárása, valamint a prioritások és vállalati működési célok meghatározása, majd a környezetvédelmi tevékenységi tervek előkészítése (European Environment Agency, 2021). Az integrált környezeti menedzsment rendszerek alkalmazása előnyt jelentett a vasúttársaság számára, mivel ezek segítségével a fenntarthatóság és a versenyképesség egyidejűleg erősödött (Stahel, 2016).

Egyre több ipari vállalat és vasúttársaság lát előnyt abban, hogy rendszerszintű környezeti menedzsmentet alkalmaz, amely hasonló a minőségbiztosítási rendszerekhez. Az EU direktívái alapján számos alvállalkozó és tagvállalat kénytelen volt bevezetni környezetirányítási rendszert, amely segíti őket a környezeti előírásoknak való megfelelésben (Directive 2008/98/EC). A környezeti teljesítmény így versenyképességi paraméterként funkcionál, amelyre a vasúttársaságok egyre inkább előremutató üzleti stratégiaként tekintenek (Anderson et al., 2022; Rail Freight Forward, 2019).

A DSB környezetbarát törekvései között szerepeltek a zöld energiaforrások használatának növelése, valamint az elektromos vonatok fejlesztése, amelyek alacsonyabb kibocsátást eredményeznek. A fenntarthatósági irányelveknek való megfelelés érdekében a DSB a „Green Cargo” programot is elindította, amely az áruszállítási ágazatot célozza, és segíti a vasúti áruszállítást abban, hogy környezetbarát alternatívát nyújtson a közúti szállítással szemben (UIC, 2020).

Az ilyen irányú fejlesztések nemcsak a környezetvédelmi előírásoknak való megfelelést segítik elő, hanem a költséghatékonyságot is javítják. A környezetirányítási rendszerek és a zöld technológiák alkalmazása révén a DSB képes csökkenteni az energiafelhasználást, valamint a szén-dioxid-kibocsátást, amelyek mind hozzájárulnak a fenntarthatóbb működéshez (Pietrzykowski & Fijałkowski, 2018).

A Dán Állami Vasutak környezetpolitikájának fordítása

„A DSB célkitűzése, hogy minimalizálja tevékenységeinek környezetre gyakorolt káros hatásait. Ezt úgy kívánja elérni, hogy versenyképes közlekedési és kapcsolódó szolgáltatásokat nyújt a dán társadalom számára, amelyek alacsony környezeti terheléssel és csekély nyersanyag-felhasználással járnak. Ha sikerül ezt megvalósítani, a társadalom számára maximális mobilitást biztosíthatunk a lehető legkisebb környezeti költségek mellett. Egyértelművé tesszük, hogy a személy- és áruszállítási szolgáltatásaink környezetvédelmi szempontból előnyösebbek, mint más közlekedési ágazatok megoldásai.

E célok érdekében a DSB minden tevékenységének tervezése és megvalósítása során figyelembe veszi a természet és a környezet érdekeit. Az egész szervezetre kiterjedő környezetirányítási rendszer biztosítja, hogy a környezetvédelem kiemelt prioritást élvezzen, és minden tevékenységünket áthassa. A környezeti problémák megelőzése érdekében azonosítjuk és elemezzük a működésünk során felmerülő környezeti kockázatokat. Az ezekből nyert tapasztalatokat integráljuk a tervezési folyamatokba, a fejlesztésekbe és a beszerzési eljárásokba.

Nagy hangsúlyt fektetünk a DSB működéséből eredő környezeti hatások csökkentésére. Minden munkavállalónkat felkészítjük, és aktívan bevonjuk a környezetvédelmi tevékenységekbe. Emellett párbeszédet folytatunk az érintett ügyfelekkel, alvállalkozókkal, hatóságokkal, a Dán Vasút Ügynökséggel és más szomszédos vasúttársaságokkal a környezeti kérdésekről.” (DSB Environmental Policy Office, 1998).

Újrahasznosítási elvek a Dán Állami Vasutaknál

1997 óta a dán vasúttársaság évente készít környezeti jelentést, amelyben részletesen bemutatja az energiafelhasználását, valamint a keletkezett hulladék mennyiségét és típusát. Az évek során a környezetvédelmi adatbázisuk fejlesztésének köszönhetően az adatok pontossága jelentősen javult (Hjelmar, 2016).

A hulladékkezelési adatok négy kategóriába sorolva jelennek meg, az alkalmazott kezelési módszerek alapján: speciális hulladékkezelési adatok, égetéssel kapcsolatos adatok, lerakási adatok, valamint újrahasznosítási adatok. A vegyszerek felhasználásánál három fő kategóriát különítenek el, amelyek a kémiához és a vegyiparhoz kapcsolódnak: gyomirtószerek (herbicidek), jégmentesítésre használt ammóniumtartalmú anyagok, valamint tisztító- és kenőanyagok, például faaljakhoz. A jövőben a UIC vasúttársaság ajánlására a környezeti indikátorok bevezetését is tervezik (DSB Environmental Policy Office, 1998).

2.4. 2. Holland Vasutak (NS)

Az NS, akárcsak a disszertációban vizsgált többi vasúttársaság, jelentős átalakulásokon ment keresztül az EU 91/440-es irányelvének (Council of the European Communities) hatására. Ez a változás nemcsak az NS ügyfélkörét és utasait, hanem magát a vasúttársaságot is mélyen érintette. Az irányelv hatására az NS-nél az alábbi módosítások történtek:

A személy- és áruszállítási részleg önálló üzletigazgatósággá alakult, amelynek feladata, hogy gazdaságilag hatékonyan működjön a szállítási piacon.

A Vasúti Infrastruktúra Menedzsment a szervezet részeként funkcionális egységként kezdett működni, feladata a vasúti infrastruktúra kezelése az állami irányítás alatt.

Az NS vontatási részlege szintén önálló üzletággá vált, amely a vontatási tevékenységekért felel, és a Személy- és Árufuvarozási Üzletigazgatóság utasításai alapján működik.

Ezekkel párhuzamosan létrejött egy menedzsmentegység is, amely a hosszú távú környezetvédelmi stratégiák kidolgozásáért felelős, és elősegíti a különböző szektorok közötti együttműködést a vasúttársaságon belül. Bár az NS nem rendelkezik önálló környezetvédelmi

szervezettel, helyi szinten kialakított környezeti menedzsmentrendszere van, amely a fenntarthatóságot és a környezetvédelmi szempontokat helyi szinten biztosítja (NS, 2023).

A felépítményi anyagok újrahasznosítása

Az NS-re vonatkozóan nincs meghatározott speciális hulladék-kibocsátási határérték. Az újrahasznosítható anyagokat országszerte gazdasági szempontok alapján dolgozzák fel. A régi vasúti acél- és vasanyagokat 100%-ban újrahasznosítják, míg a faaljak 85%-át a vasúton belül használják fel újra; ezeket ledarálják és elégetik. A régi ágyazati anyagok 90%-át újra felhasználják, bár ezek nem kizárólag vasúti területeken kerülnek felhasználásra. Az ágyazattisztítást és előkészítést külső vállalatok végzik, és az ágyazatra vonatkozóan nincs szennyezettségi minősítésük (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), 1991).

A környezeti menedzsmentrendszer keretében rendszeresen gyűjtik és nyilvántartják a szennyezéssel kapcsolatos adatokat. A környezetvédelem érdekében a következő intézkedéseket hajtják végre:

A környezetre károsabb faaljakat betonraljakra cserélik.

Kutatásokat folytatnak a gyomirtószeresek használatának csökkentése érdekében.

A szennyezett ágyazat kezelését végző külső cégektől bizonylatokat kérnek.

Utólagos ellenőrzések során rögzítik a felbontott anyagok szennyezettségi szintjét.

Az éves környezeti jelentésekben nyilvánosságra hozzák a monitoring eredményeit (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), 1991).

2.4.3. Belga Vasutak (SNCB)

Néhány évvel ezelőtt Belgiumban a környezetvédelmi és jogi követelmények még nem voltak különösebben szigorúak. Azonban az Európai Közösség környezetvédelmi politikája jelentős változásokat hozott minden tagállam számára, és új környezetvédelmi előírások léptek életbe. Ennek hatására Belgiumban is felgyorsult a szabályozások bevezetése, beleértve a vasúti iparágat is.

A belga vasúttársaságon, az SNCB-n belül a környezetvédelemmel egy központi és több decentralizált hivatal foglalkozik. A központi egység, a Környezetvédelmi Koordinációs Központ, a környezeti stratégiák kidolgozásáért és az ügyintézésért felelős. A decentralizált hivatalok pedig a stratégia gyakorlati megvalósítását végzik (Bontmind, 1995).

A környezetvédelmi koordinációs rendszerben a következő hat osztály különül el: vasútüzem, vontatás, infrastruktúra (pálya), gazdaság, utasszállítás és teherszállítás. Ezen osztályok közül három rendelkezik önálló környezetvédelmi csoporttal, amelyek a belső koordináció és környezetvédelmi célkitűzések megvalósítása érdekében működnek. A zajszennyezés problémakörének kezelése különösen kiemelt figyelmet kap, amelyet a vonatok és az állomási tevékenységek okoznak, mint például a faaljak cseréje. A zajcsökkentés, a mérések és a lakossági panaszok kezelése az infrastruktúra osztály hatáskörébe tartozik, míg a vízvédelem és a vízzel kapcsolatos szennyezés kezelése a vontatási részleg feladata, mivel a legtöbb vízszennyező tevékenység a járműjavítónál történik (De Sousa & Heidrich, 2005).

Az SNCB környezetvédelmi és fenntarthatósági intézkedései között szerepel a hulladékkezelés fejlesztése, különös tekintettel az újrahasznosítási folyamatokra. A belga vasút újrahasznosítási gyakorlata más európai vasutakhoz hasonló rendszeren alapul, és magában foglalja a fém, műanyag, fa és beton elemek újrafeldolgozását is. A faaljak újrahasznosítása különösen fontos a fenntarthatósági célok elérése szempontjából, mivel a faaljak cseréje során keletkező hulladékok megfelelő kezelésére és újrahasznosítására van szükség (Kaza et al., 2018).

Az SNCB továbbá a fenntartható vasúti infrastruktúra fejlesztésére is összpontosít, amely magában foglalja a zajcsökkentési technológiák alkalmazását és az energiahatékonyság növelését. Az SNCB részt vesz a nemzetközi "Shift2Rail" programban is, amely innovatív, fenntartható vasúti megoldások kidolgozását támogatja az EU-ban. A projekt célja a vasúti szektor környezeti lábnyomának csökkentése, és a vasúti közlekedés versenyképességének növelése más közlekedési módokkal szemben (Shift2Rail, 2020).

A fenntarthatóság érdekében az SNCB egyre nagyobb hangsúlyt fektet a megújuló energiaforrások alkalmazására és az elektromos vonatok fejlesztésére, amelyek alacsonyabb kibocsátást eredményeznek. Ezek a technológiák lehetővé teszik, hogy a belga vasút csökkentse a fosszilis energiahordozóktól való függőségét és támogassa a zéró kibocsátás elérését a közlekedési szektorban (UIC, 2021).

2.4.3.1. Faaljak

A belga vasúthálózaton jelenleg a faaljak aránya 60% (többnyire tölgy), míg a betonból készült aljaké körülbelül 40%. Kétféle fafajtát használnak: tölgyet és bükköt, és több mint tíz éve nem rendeltek egzotikus faanyagokat pályaszerkezetekhez. A faaljak egyik legnagyobb hátránya, hogy érzékenyek a külső környezeti hatásokra, különösen a nedvesség ingadozásaira. Jelenleg az egyetlen gazdaságosan kivitelezhető megoldás a telítéses kezelés.

A faaljak újrahasznosítása és selejtezése az alábbi módokon történhet:

Eladás külső feleknek: Azokat a faaljakat, amelyek már nem alkalmasak vasúti használatra, általában selejtezik és a raktárból értékesítik. Az eladandó készleteket minőségi kategóriák szerint állítják össze, például kerítésfának vagy selejt faaljnak.

Újrahasznosítás kerítésfaként: Az újrahasznosítás lehetőségei javíthatók, ha a faaljakról eltávolítják a fém alkatrészeket, például az alátétlemezeket. Ezeket a faanyagokat többféleképpen lehet újrafelhasználni, például kerítésoszlopként, töltések megerősítésére, gyalogutak szegélyezésére vagy különböző szintű platók összekötésére (SNBC, 2020).

2.4.3.2. Hulladékként való hasznosítás

A vasúttársaság tisztában van azzal, hogy a rosszabb állapotú faaljak eltávolítását kizárólag olyan cégekre bízhatja, amelyek jogosultak a hulladék kezelésére. Törekedni kell arra, hogy ezek a faaljak ne végleges hulladéklerakókba kerüljenek. Azok a faaljak, amelyeket már nem lehet újrahasználni, veszélyes ipari hulladéknak minősülnek, és kizárólag veszélyeshulladék-tárolók vagy -égetők fogadhatják be, ha szükséges.

A faaljak hulladéktárolókba való elhelyezésének költségeit nehéz pontosan megbecsülni, mivel ezek évente változhatnak. Fontos figyelembe venni azokat az ökológiai alternatívákat, amelyek célja a hulladéklerakók terhelésének csökkentése. Az egyik leggyakrabban alkalmazott megoldás, hogy a faaljakat felaprítják és forgácsolják, majd égetési célokra hasznosítják. Tűzifaként történő értékesítésük azonban szigorúan tilos a telítőanyagból származó PCB-tartalom miatt (SNBC, 2021).

2.4.4 Finn Vasutak (VR)

A Finn Vasutak 1994 végére elkészítette a Környezettudatos Irányítási Rendszerét (KIR). Ez a rendszer az EMAS (Eco-Management and Audit Scheme) eljárási alapelvein nyugodott, amelyet az Európai Bizottság dolgozott ki (Európai Bizottság, 2023).

1995-ben intenzív munkavállalói képzéseket indítottak a rendszer gyakorlati megvalósítása érdekében. A KIR vezetése az ügyvezetés szerves részévé vált, és feladata lett a környezetvédelmi intézkedések tervezésének, végrehajtásának és ellenőrzésének koordinálása. A döntéshozatali folyamatok azonban az egyes osztályokon belül zajlanak, figyelembe véve az adott tevékenységek környezeti hatásait.

Ennek eredményeként egy átlátható működésű környezetvédelmi szervezet jött létre, amelynek célja, hogy rangsorolja a szükséges beavatkozásokat, támogassa a szervezett értékelési folyamatokat, és elősegítse a hatékony és gyors kommunikációt. Ez a szervezet magában foglalja a Környezetvédelmi Menedzsment Csoportot, amelynek tagjai a szakági igazgatók, valamint a különböző szakszolgálatok környezeti koordinátorai (Európai Bizottság, 2023).

2.1.4.1. Anyagok újrahasznosítása a finn vasúttársaságnál

Az 1995-ben létrehozott Finn Vasúti Hivatal a Közlekedési Minisztérium egyik részlege, amelynek feladata a környezetbarát vasúti közlekedés fejlesztésének és működésének támogatása. Saját bevallásuk szerint azonban az építési, pályafenntartási és felújítási területeken még mindig hiányzik az életciklus-szemléletű tervezés. Ha ezt sikerülne megvalósítani, az ehhez kapcsolódó adatbázis jelentősen hozzájárulhatna az újrahasznosítás fejlesztéséhez. Az életciklus-elemzés ugyanis megkövetelné a beszállítóktól, hogy termékeiken feltüntessék a környezetterhelés mértékét és az újrahasznosítási lehetőségeket.

Jelenleg a kitérők és folyópályák faaljainak nagy részét úgy hasznosítják újra, hogy a még használható részeket levágják és összeillesztik, miközben csak kis hányadukat semmisítik meg (égetik el). Ez a folyamat költséges és rendkívül nehéz. Vizsgálják továbbá a vasúti pályákhoz használt kő, homok és kavics építőmérnöki projekteken való alkalmazásának lehetőségeit.

Emellett összeállítják a veszélyes anyagokat tartalmazó vasúti hulladékok listáját. A használt faaljakat központosítottan elégetik energianyerési célból, míg a használt vasbeton aljakat

összetörik, és építőanyagként (például vasúti vagy autópálya alapként) hasznosítják újra. (LWR, 2005).

2.4. 5 Norvég Nemzeti Vasúttársaság (NSB)

Az NSB a norvég nemzeti vasúti hatóság, amely a Közlekedési és Kommunikációs Minisztérium felügyelete alatt felelős az országos vasúti hálózat üzemeltetéséért. Az éves költségvetést a Norvég Parlament hagyja jóvá, amely évről évre változik. A hosszú távú tervezéshez a parlament négyéves időszakokra határozza meg a költségkereteket. Például a 2015–2020 közötti Vasúti Tervben 73,610 millió norvég koronát különítettek el a vasút fejlesztésére és fenntartására.

A vasúti hálózati infrastruktúra Norvégiában is állami tulajdonban van. Az állami hálózatot három szervezet használja forgalombonyolításra: az NSB BA, a Malmtrafik AS és az NSB Gardermobanen AS.

A Norvég Nemzeti Vasúttársaság mind minőségi, mind környezeti menedzsmentrendszerrel rendelkezik. Környezeti Menedzsment Rendszerük az ISO 14001 és az EMAS szabványoknak megfelelően működik. (Norwegian National Rail Administration, 2020).

2.4.5.1. Faaljak újrahasznosítása a Norvég Nemzeti Vasúttársaságnál

A norvég vasúton nagyrészt faaljakat használnak. Korábban ezeket újrahasznosítás céljából magánszemélyeknek adták el, akik gyakran kerti építményekhez használták fel. Ma azonban ez a gyakorlat tilos, mivel a faaljakban található telítőanyag miatt veszélyes hulladéknak minősülnek. Jelenleg a selejtezett faaljak hulladéklerakóba kerülnek, vagy speciálisan engedélyezett technológiával égetik el (Norwegian National Rail Administration, 2021).

2.4.6. Német Vasutak (DB AG)

A két Németország egyesülése után, 1994-ben a két különálló vasúttársaság egyesülésével létrejött a Deutsche Bahn AG, amely jelentős változást hozott a környezetvédelem megítélésében is. Az ezt megelőző „csővégi” (end of the pipe) megközelítés helyét átvette a gazdálkodási folyamatokba

integrált környezetvédelem elve (Baastner et al., 1995). Az előbbi szemlélet lényege az volt, hogy költséges technológiákkal igyekeztek biztosítani, hogy az emissziók ne lépjék túl a hivatalosan megállapított határértékeket. Az új elv azonban a megelőzésre helyezte a hangsúlyt, előtérbe állítva a költség- és energiatakarékos, valamint környezetkímélő működést.

Ez az új megközelítés nemcsak a környezettel szembeni felelősségvállalás erősödésének volt köszönhető, hanem annak is, hogy az üzleti szemléletű vasúttársaság átfogó, objektív és minden területre kiterjedő elemzéseket végzett (Maier et al., 1996). Ennek révén sikerült megakadályozni, hogy az egyes üzleti egységek saját érdekeik alapján, a többi egységtől függetlenül, néha pedig a teljes vasúttársaság érdekeivel ellentétes környezetvédelmi megoldásokat részesítsenek előnyben.

2.4.6.1. Újrahasznosítás a német DB AG vasúttársaságnál

A Német Vasútnál évente több millió tonna ágyazatot – beleértve a használt faaljakat is – cserélnek vagy tisztítanak. Az ágyazat minőségi értékelésének és újrahasznosításának kérdése egyre sürgetőbbé vált, mivel a gazdasági és környezeti érdekek szorosan összefonódnak. A Német Vasút az ágyazatszennyeződést két fő típusba sorolja:

1. Ágyazati aprózódás: Ez magában foglalja az alépítményi anyag benyomódását, rakományszóródást, gyomnövény-maradványokat stb.
2. Kémiai-fizikai szennyeződés: Ide tartoznak az ásvány- és kenőolaj-maradványok, a szállításból eredő vegyi anyagok okozta szennyezések, rakodási szennyeződések, a vasúti pálya környezetéből származó ipari szennyeződések, valamint a sín- és kerékkopásból származó anyagok.

Mechanikai szennyeződésként minden, a szabványos zúzottkő-méret alatti anyagot – még a kisebb zúzottkő-szemcséket is – azonosítják az ágyazatban. A nemzetközi kutatások szerint a 25 mm átmérő alatti szemcsék aránya gyakran eléri a 30–40%-ot, ami jelentős mértékben veszélyezteti az ágyazat funkcionális teljesítményét. Az ilyen szennyeződések mechanikus módszerekkel, például különböző ágyazattisztítási eljárásokkal távolíthatók el.

Német vizsgálatok (Kaess et al., 1993) szerint a használt zúzottkő általában nem tartalmaz kimutatható szennyeződést. Ezzel kapcsolatban azonban vitatható, hogy az üzemeltetés során a zúzottkővet nemcsak vegyi anyagok szennyezhetik, hanem egyéb, ismeretlen eredetű és összetételű szennyezőanyagok is, amelyek az erózió hatására a rostaaljba is bejuthatnak, ahol tovább halmozódnak és szennyezést okoznak.

2.4.6.2. Az újrahasznosítható ágyazat minőségi előírásai

A tisztítási eljárások, különösen a kémiai-fizikai módszerek, magas költsége miatt csak a ténylegesen szennyezett anyagokat kezelik. Ehhez azonban a kitermelést is külön kell választani, ami további nehézségeket okoz. A kezelés után az újrahasznosított anyagoknak meg kell felelniük a német RAL-RG 501/2 szabványnak, amely az anyag és minőségi előírásokat tartalmazza. A mechanikai vizsgálatok során a TL 918-061 (Szállítási előírások vasúti ágyazat és faaljak) szabványt kell alkalmazni, ami azt jelenti, hogy az újrahasznosított anyag nem tekinthető teljes mértékben egyenértékűnek az új anyagokkal.

A Német Vasút szabályai szerint a visszaforgatott régi ágyazatot csak bizonyos feltételek mellett lehet használni: 140 km/h-nál nagyobb, de legfeljebb 200 km/h sebességű vonalakon kizárólag alsó ágyazatként alkalmazható, míg 140 km/h-nál kisebb sebességű vonalakon teljes ágyazatvastagságban beépíthető.

A régi ágyazat vizsgálatát, kezelését és újrahasznosítását a Német Vasút egy átfogó rendszer keretében végzi, amely kiterjed a faaljak újrahasznosítására is. Ennek az eljárásnak a lényege, hogy a használt zúzottkővet és faaljakat az ország különböző pontjain található telephelyekre szállítják, ahol depóniákban tárolják azokat. Az anyagokat a keresletnek megfelelő szemszerkezet szerint osztályozzák és tárolják az eladásig (DB AG, 2021).

A legnagyobb újrahasznosítással foglalkozó vállalat a BSR Naturstein-Aufbereitungs GmbH, amelynek központi telephelye Kirschmösenben található. Ide nemcsak a vasút területéről szállítanak anyagokat, hanem más bontási területekről is, például természetes kőzeteket, kavicsot, homokot, földet és faaljakat. Ez lehetővé teszi különféle szemszerkezetű és minőségű anyagok előállítását, a mezőgazdasági földtakarótól egészen a vasúti ágyazatokig.

A szennyezettséget szűrőpróbaszerűen ellenőrzik a telephelyeken található depóniákból vett minták vizsgálatával. A tiszta és szennyezett anyagokat gyakran keverik és rostálják, ami a jelentős szennyeződések „hígítja” (DB AG, 2021). Ezt a gyakorlatot – amely lényegében a szennyezés továbbadását eredményezi – nem tartom elfogadhatónak, különösen Magyarországon.

2.4.7. Osztrák Szövetségi Vasutak (ÖBB)

Ausztriában a vízvédellel, különösen az ivóvízkészletek védelmével kapcsolatos törvények a legszigorúbbak. Ennek megfelelően minden olyan tevékenységet, amely veszélyeztetheti az ivóvízkészleteket, szigorú szabályozás alá vonnak. Az országban működő összes vállalatnak, így az ÖBB-nek is, be kell tartania a hulladéklerakásra vonatkozó előírásokat. Az alapelv az, hogy minden munkafolyamatnak energiatakarékosnak kell lennie:

- Hulladékminimalizáló technológiákat kell alkalmazni.
- Az anyagok újrahasznosítása minden esetben kiemelt prioritás.
- A hulladékok és melléktermékek újrahasznosítása lehetőség szerint zárt rendszerben, a vállalat saját technológiáján belül történjen.

Ezeknek az elveknek a megszegése szigorú pénzbírságokat von maga után. A szabályok betartására a vállalatokat nemcsak bírságokkal, hanem a nem megújuló erőforrásokra kivetett adók révén is ösztönzik. Az ÖBB környezetpolitikája teljes mértékben igazodik az országos környezetvédelmi jogszabályokhoz, amelyeket elegendően szigorúnak és részletesnek tart ahhoz, hogy támogassák a vállalati környezeti menedzsment célkitűzéseit is (ÖBB, 2022).

2.4.7.1. Az Osztrák Vasutak újrahasznosítási gyakorlata

A telefonos megkeresésre adott válasz alapján a vállalat számára kizárólag a fémhulladék újrahasznosítása jelent bevételi forrást, míg az összes többi hulladékfeldolgozási tevékenység esetében a vállalatnak kell fizetnie.

Betonaljok és faaljak

A rendeltetésszerű használatra már nem alkalmas betonaltaljakat külön előkészítés nélkül használhatják fel például rámpák burkolására vagy rakodóterületek megerősítésére. Azonban a baleseteknél sérült betonaltaljakat építőanyag-feldolgozó telepekre küldik, ahol útépitési anyagként hasznosítják őket. Az országban számos cég foglalkozik betonaltaljak és építési törmelék feldolgozásával. A faaljak viszont magánszemélyek számára nem értékesíthetők, mivel veszélyes anyagokat (például PCB-t) tartalmaznak, és különleges kezelést igényelnek. Ezeket égetőkben semmisítik meg, így energetikai újrahasznosításuk valósul meg.

Ágyazati anyag

Az ágyazatok tisztítására három technológiai módszer létezik, amelyek a német mintát követik:

1. Rostálás a pályában
2. Földmunkás technológia ágyazatcserével
3. Ágyazatcsere alépítmény-javítással

Függetlenül attól, hogy melyik technológiával távolítják el az ágyazatot, amint az kikerül a pályából, hulladékként kell kezelni. Erre az ÖNORM S 2072 előírásai, valamint az 1997 óta érvényben lévő „Deponieverordnung” szabályai vonatkoznak. Négyféle depóniát különböztetnek meg:

- Talajkiemelésből származó anyagok depóniája
- Építési törmelék depóniája
- Maradékanyag-depónia
- Tömeges hulladék depóniája

Ezekbe a kategóriákba sorolható a már használhatatlanná vált faalj is. Minden depóniatípusra két alapvető vizsgálati kritériumot alkalmaznak: a talajmintából kioldható veszélyes anyagok koncentrációját, valamint az összes veszélyes anyag mennyiségét. A legkritikusabb szennyezőanyagok között szerepelnek az összes szénhidrogén, az összes PAH, valamint a gyomirtószeres (Mahro & Schaefer, 1998).

Az ágyazati anyagok 90%-át újrahasznosítják, míg a fennmaradó 10% - amely a határértéket meghaladó szennyezőanyag-tartalommal rendelkezik - veszélyes hulladéklerakókba kerül. Ez az arány összhangban van más vasutaknál szerzett tapasztalatokkal.

Környezetirányítási rendszerek

Bár az ÖBB nem tette kötelezővé az ISO szabvány szerinti rendszerek egységes bevezetését, az egyes szakszolgálatok saját kezdeményezésükre és érdekükben kiépítették azokat. Például a járműjavító műhelyek és a teherszállítási részlegek már rendelkeznek tanúsított minőségbiztosítási és környezetirányítási rendszerekkel. Az európai vasutak között elsőként Graz állomása szerezte meg az ISO tanúsítvány szerinti környezetirányítási minősítést (ÖBB, 2022).

2.4.8. A svájci vasút újrahasznosítási gyakorlata

A svájci vasútvállalatnál évente körülbelül 350.000 m³ hulladék keletkezik, amely kifejezetten a vasúti tevékenységhez köthető. Ide tartozik az ágyazat, a földmunka felső rétege, a vasúti pálya al- és felépítménye, valamint a faaljak. Ezzel összefüggésben egy irányelvet készítettek „A vasúti pályából kikerülő anyagok” címmel (Oggier et al., 2002), amelyet a közzététel óta alkalmaznak. Az irányelv létrehozásának célja nem az volt, hogy pótolja a hulladékgazdálkodási törvényt, hanem hogy hangsúlyozza az ökológiai szempontból legelőnyösebb hulladékkezelési megoldások fontosságát.

A svájci vasutaknál eddig az egyik legnagyobb kihívást a faaljak telítési anyagából származó szennyeződések (PAH, PCB) jelentették. Ezek az anyagok az esővíz hatására bejutottak az ágyazatba, ami különleges környezeti problémákat okozott. Az új irányelv azonban rámutat arra, hogy manapság más technológiákkal védik az aljakat, így a jövőben várhatóan kevesebb ilyen típusú szennyezéssel kell számolni.

A vizsgálatok kimutatták, hogy sem a fémek, sem a permetezőszerek nem érnek el határérték-közeli koncentrációt. A leggyakoribb szennyezőanyagok továbbra is a szénhidrogének. Az ivóvízbázisok védelme érdekében két fő megoldást alkalmaznak. Az egyik a földműkorona kialakítása, amelynek felső rétege aszfalttal van borítva, hogy a szennyezőanyagok ne hatolhassanak be az alsóbb rétegekbe. A másik megoldás, hogy a permetezővonatok személyzetét figyelmeztetik az ilyen szakaszokon a permetezés tilalmára. Ezek az intézkedések jelentős környezeti felelősségtudatot igényelnek (SBB, 2005).

A svájci szakértők által készített életciklus-értékelési (LCA) tanulmány nemzetközi szinten is iránymutatón meghatározta a bükkfából és tölgyfából készült vasúti talpfák újrafelhasználási lehetőségeit. A Studiengesellschaft Holzschwellenoberbau (Társadalmi kutatás a fából készült vasúti talpfákról) a használt talpfák ártalmatlanításra vonatkozóan tanulmány (Rainer et al., 2009 jegyzi) a bükk és tölgy erdészeti folyamatairól a Hamburgi Egyetem tanulmányai alapján.

A kreozot előállítására vonatkozó adatok értékelését - beleértve a lepárlási folyamat elosztását – az adott gazdasági érdekek befolyásolták. A kátrányolaj előállításához szükséges koksizációs folyamatot (rendelkezésre álló használt vasúti talpfák) egy német koksizgyár gazdasági igénye és érdeke kívánta. Az impregnálási folyamatból származó kibocsátások elemzése az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynökségétől származó adatok alapján, az EN 13991 szabvány szerinti, C minőségű kreozot kizárólagos használata, csökkentett párolgási hajlam mellett, csökkentett behelyezett kreozot mennyiség figyelembevételével, a DIN 68811:2007-01 jelenlegi

szabvány alkalmazása szerint lett meghatározva. A tanulmány mindezen értékek figyelembevételével hasonlítja össze a vasúti talpfák környezeti hatásait egymáshoz képest. Összegzésük szerint a környezet úgy normalizálódik a megfelelő indikátorértékekhez hasonlóan a fa talpfák esetében, hogy a hővisszanyerést az európai jog gyakorlati megvalósításaként veszi alapul. Amennyiben ez az érték negatív, azt jelenti, hogy a fa talpfa égéséből/égetéséből származó hővisszanyerés - amely helyettesíti a fosszilis tüzelőanyagok elégetését - több kibocsátást elkerül, mint amennyi a fa talpfa égés előtti életciklusa során felszabadul. A használt vasútaltalpfák környezeti profiljának alaposabb elemzése alapján a vizsgálat eredményei a következőkben foglalhatók össze:

- 1) Általában az összes talpfának a környezeti profilját a pályaágy építésének és karbantartásának környezeti hatásai uralják.
- 2) Minden hatáskategóriában az új talpfák okozzák a legnagyobb hozzájárulást. Ez független az acélra alkalmazott allokációs eljárástól.
- 3) A javított talpfákkal kapcsolatos környezeti hatások minden kategóriában alacsonyabbak, mint a betonaltaljak hatásai, és meghaladják a fa talpfák hatásait.
- 4) A javított acél talpfákhoz és a beton talpfákhoz képest a fa talpfák okozzák (néha igen jelentős mértékben) a legkisebb hatást minden hatáskategóriában, kivéve az eutrofizációt (melynek során a vízben lévő foszfor és nitrogén túl nagy mennyisége a víz elalgásodásához vezet). Az eutrofizációhoz való hozzájárulás nem különbözik jelentősen minden (már régen) elhelyezett/kihelyezett/máshová elhelyezett fa talpfák esetében.
- 5) Egyes hatáskategóriáknál az energetikai helyettesítésből származó elkerülhető kibocsátások, a fosszilis tüzelőanyagok elégetésének elkerülése, a termikus hasznosítás miatt a B típusú elpárolgott kreozot részaránya 45%-ról megközelítőleg 5%-ra csökken a kreozot C fokozatába érve Künniger& Richter (1998).

A fentiek értelmében a fából készült talpfák életciklusa során a károsanyag-kibocsátás magasabb lehet, mint a közvetlen kibocsátás, különösen az éghajlatváltozás (ha a fát kombinált hő- és energiatermelésre használják). Azonban az abiotikus (a biológiában az abiotikus tényezők, másképp élettelen tényezők az ökológiai értelemben vett környezet élettelen, de az élethez szükséges fizikai és kémiai elemei, jelenségei) erőforrások kimerülése, a sztratoszféra ózonrétegének csökkenése vagy a fotokémiai szmog esetében ez további vizsgálatot igényel. A bükkfa és a tölgyfa talpfa környezeti hatásai között nincs jelentős különbség. A tölgyfa talpfák valamivel alacsonyabb (kemence-száraz) súlyát és a kisebb mértékű kreozot (ILO 2018)-tartalmat

az egy talpfára jutó alacsonyabb fűtőérték kompenzálja, és ennek megfelelően alacsonyabb a termikus hasznosításból és a hővisszanyerésből eredő helyettesítő hatás. Összességében a DIN 68811:2007-01 szerint alkalmazott EN 13991 szabványnak megfelelő C minőségű kreozot használatára való áttérés a fából készült vasúti talpfák környezeti hatásainak nagyon jelentős csökkenéséhez vezetett. Ilyen körülmények között a kreozot használata kisebb szerepet játszik a fából készült vasúti talpfák ökológiai profiljában. A fából készült talpfák jogszabályban előírt termikus hasznosítása alapvető fontosságúnak bizonyult a kedvező környezeti tulajdonságai miatt.

Életciklusuk során a fa talpfák megközelítőleg annyi CO₂-t tárolnak, mint a szén, ami az üvegházhatású-gázok fosszilis forrásaiból szabadul fel a talpfa életciklusa során, beleértve a pályaágy építését és karbantartását is.

Ha következőképpen hővisszanyerésre - vagy lehetőleg kombinált hő- és energiatermelő erőművekben - használják, a fa talpfák termális hasznosítása annyi CO₂-t helyettesít, amennyi a fa talpfák teljes életciklusa során felszabadul, beleértve a pályaágy építését és karbantartását. Ez azt jelenti, hogy a fenntarthatóan kezelt erdők fából készült fa talpfák nemcsak a biogén (élő szervezeteket felépítő atomokból álló) szén tekintetében karbonsemlegesek, hanem a fosszilis forrásokból származó CO₂ tekintetében is. A talpfák környezeti profiljának további javítása érdekében a jelen életciklus-értékelés eredményeiből a következők mutathatók ki:

A pályaágy kialakításának és karbantartásának domináns hatása miatt minden műszaki intézkedés alkalmas a talpfák környezeti profiljának javítására, amely csökkenti az új kavicságy használatát és szállítását.

Az élettartam minden talpfa környezeti profiljának döntő tényezője. Annak meghosszabbítására, vagy a karbantartási intervallumok meghosszabbítására szolgáló műszaki lehetőségek kidolgozása kulcsfontosságú stratégia a további környezeti fejlesztésekhez minden talpfa esetében.

Mivel számos folyamatoptimalizálás csökkentette a fa talpfák környezeti profilját, az EN 13991 szabvány szerinti C impregnálóolaj minőségre való áttérés és a DIN 68811:2007-01 szabvány szerinti mennyiségek csökkentése, a hulladékfára vonatkozó német rendeletből eredő hulladékégetés és a fa talpfákból történő energia-visszanyerés fedezheti a szerelőanyagok újrahasznosításának környezeti hatásait. Az acélmennyiségek csökkentése, a szerelőberendezések fokozott újrafelhasználása vagy akár az újrafelhasználásra alkalmasabb szerelőberendezések fejlesztése tovább javíthatja a fa talpfák környezetbe való visszaillesztését.

Az acéltalpfák esetében az újrahasznosítás (körforgásos-gazdaság és gazdálkodás) kulcsfontosságú. Az új talpfák első gyártású acélból vagy akár újrahasznosított acélból történő készítése rosszabb környezeti profillal jár.

Megvizsgálható az egy talpfára jutó acélmennyiségek csökkentésének lehetősége a kialakítás megváltoztatásával. Az anyagmennyiség csökkentése azonban nem eredményezheti az élettartam csökkenését. A beton talpfák esetében is meg lehet vizsgálni, hogyan csökkenthető a beton és a betonacél felhasználása a kialakítás módosításával úgy, mint az acél talpfák esetében. A felhasznált anyag mennyiségének csökkentése nem eredményezheti az élettartam csökkenését az újrafelhasznált anyag lehetőségének csökkenésével, vagy magasabb karbantartási intervallumokat. Az újrahasznosított betonnak a kavics helyettesítésére való használatát is meg lehet vizsgálni, legalább egy életciklus-értékelés során. A hivatkozott kutatók különböző érzékenységi elemzéseket végeztek, hogy teszteljék több módszertani döntés és feltételezés általános eredményre gyakorolt hatását, úgy mint:

Az acélgyártást és az újrahasznosítást az újrahasznosított acél tényleges aránya alapján modellezték az acél teljes mennyiségére vonatkozóan, ami 37% újrahasznosított fémtartalmat eredményezett az acél esetén. Alternatív megoldásként a termékspecifikus újrahasznosítási arányt alkalmazták, figyelembe véve az acél építési termékek újrahasznosítási hatékonyságát, ami 85%-os újrahasznosított fémtartalmat eredményezett.

A saját tapasztatom szerint:

Az acél egyik legnagyobb előnye, hogy végtelenszer újrahasznosítható anélkül, hogy alapvető tulajdonságai sérülnének. Ezáltal kiválóan illeszkedik a környezettudatos és körforgásos gazdasági modellekhez. Egy tonna acélhulladék újrahasznosításával 1200 kg vasérc, 7 kg szén és 51 kg mészkő felhasználását lehet megspórolni. Másként fogalmazva, ha tiszta vasérc helyett acélhulladékot használnak az acélgyártásban, az energiafelhasználás 5%-kal, a nyersanyag-felhasználás pedig 90%-kal csökkenthető.

Ezek az adatok jól mutatják, hogy a fémhulladékból készült acél arányának maximalizálása nemcsak gazdasági érdek, hanem környezetvédelmi szempontból is kiemelt fontosságú. A szigorodó környezetvédelmi előírások tovább növelik a fémhulladék újrahasznosításának jelentőségét. Ennek eredményeként jelentősen mérsékelhető a vízfelhasználás (40%-kal), a levegőszennyezés (86%-kal), a bányászati hulladék képződése (90%-kal) és a vízszennyezés (76%-kal).

A beton karbonizációját hosszú távú hatásként vették figyelembe:

- a klinkergyártásból származó geogén (az üvegházhatású gázok meghatározása az ISO 14064-1 szabvány alapján) CO₂-kibocsátások újbóli megkötését,

-fából készült talpfák impregnálására vonatkozó módosított feltételezéseket, miszerint a koksizálási folyamat tömegalapú elosztása, azaz 1,38 kg szén koksizálása 1 kg nyers kátrányra van elosztva (a gazdasági szempontú elosztás szerinti 0,714 kg helyett).

Az impregnáló üzemekben a légszűrők szűrési hatékonyságát 95%-osnak feltételezik(ték) (99% helyett). A felhasznált kreozot 10%-ának elpárolgását feltételezik(ték) az élettartam során (5% helyett). Ezen érzékenységi elemzés alapján a vizsgálat eredményei és következtetései ugyanolyan erőteljesek, vagy akár feltételesek is lehettek. Ezen kutatási eredmények olvasata, tanulmányozása során, összevetve a saját tapasztalataimmal, kérdések merülnek fel bennem, hogy a kutató mit is akart igazolni.

2.4.9. Magyar Államvasutak Zrt. (MÁV)

Az irodalmi források szerint a környezetpolitika a legtöbb vasúttársaságnál hasonló, mivel maga a tevékenység természete is azonos alapokra épül. Ennek megfelelően a továbbiakban a MÁV környezetpolitikájára és az ott felhalmozott anyagok újrahasznosítására helyezem a hangsúlyt. Az 1993. évi XCV. törvény, amely 1994. január 1-jén lépett hatályba, már az első mondatában környezetbarátként említi a vasúti közlekedést:

„Az Országgyűlés a környezetbarát és a közszolgáltatási feladatokat is ellátó vasút és a vasúti közlekedés fejlesztése, a közlekedéspolitikai célok megvalósítása érdekében a következő törvényt alkotja.”

Ez alapján a vasúti közlekedés környezetbarát működése jogszabályi elvárásként is megjelenik. Az európai példák azonban rávilágítanak, hogy a jogszabályok betartása önmagában nem elegendő, különösen mivel a vasúti szektor egyben vállalkozói tevékenységet is folytat. A társadalom növekvő környezeti tudatossága szükségessé teszi a MÁV pozitív környezetvédelmi megítélésének kialakítását.

Az 1995. évi LIII. törvény a környezet védelmének általános szabályairól többek között célként tűzte ki:

a) a környezet igénybevételének, terhelésének és szennyezésének csökkentését, károsodásának megelőzését, valamint a károsodott környezet helyreállítását;

b) a természeti erőforrások ésszerű, takarékos felhasználását és megőrzését;

c) a gazdasági működés és a környezetvédelmi követelmények összhangjának biztosítását (I. fejezet, 1. §).

A törvény kimondja, hogy minden környezetre veszélyes anyagot és technológiát környezetvédelmi szempontból minősíteni kell, és gondoskodni kell a minőségbiztosítás feltételeiről (84. §). A vasúti energiatakarékos és környezetkímélő gazdálkodás azonban nem új keletű törekvés, és nem kizárólag jogszabályok nyomására alakult ki. A vasúti építés és fenntartás terén a szervezett újrahasznosítás régóta elterjedt gyakorlat, elsősorban gazdasági megfontolások miatt, hiszen a sín- és ágyazati anyagok költségesek.

Ez a gazdálkodási rendszer jelentős előnyökkel járhat, amikor új, környezetvédelmi szempontokat előtérbe helyező megoldások bevezetése szükséges. Ugyanakkor hátrányként is jelentkezhet, ha a régóta alkalmazott módszerekről derül ki, hogy károsak a környezetre, ami nehezítheti az átállást. Ezért egy átgondolt, következetes környezetpolitika és átfogó stratégia kidolgozása elengedhetetlen.

A MÁV már a 90-es évek elején foglalkozott a Környezetvédelmi Koncepcióval, és 1994-re elkészült a környezetvédelmi stratégiája, amelyet azóta többször módosítottak (Horvát, 2018). A legfrissebb változatok a 2023-as év során többször frissültek, és ezek a szervezet honlapján és a Magyar Közlönyben is elérhetők. A stratégia alapelvei között szerepel az elővigyázatosság, a megelőzés, a felelősség, valamint a szennyező fizet elv, továbbá az átláthatóság, kiszámíthatóság, és a mérhető teljesítmények biztosítása.

A MÁV környezetvédelmi stratégiája a fenntartható mobilitást helyezi középpontba. A következő öt évre kiemelt feladatként jelöli meg a környezeti károk csökkentését, a hulladék újratermelődésének mérséklését, valamint a hulladékgazdálkodási terv célkitűzéseinek megvalósítását. Az újrahasznosítási arány növelése, a nagytömegű hulladék gazdaságos kezelése és az egyedi megoldások megszüntetése kiemelt célkitűzés. A stratégia minden környezetvédelmi területre kiterjed, beleértve a talaj- és vízvédelmet, a levegőtisztaságot, valamint a zaj- és rezgéscsökkentést (MÁV, 2023).

2.4.9.1.A kutatás- fejlesztési tevékenység stratégiai vonatkozásai a MÁV-nál

A vasúti környezetvédelem területén felmerülő problémák és a jogszabályi változások várható hatásainak elemzése számos olyan kérdést vet fel, amelyeket általános tapasztalatok alapján nem lehet egyértelműen megválaszolni. Éppen ezért kiemelten fontos stratégiai feladat, hogy a vasút felkészüljön ezek szakszerű kezelésére. Ilyen stratégiai kérdések közé tartozik például a KIR rendszer jogszabályoknak megfelelő, de rugalmas alkalmazása, a szennyezett ágyazati anyagok tisztításának és újrahasznosításának lehetőségei, valamint a hatékony megelőzési módszerek és eljárások vizsgálata.

A fentiekből jól látszik, hogy az értekezésemben bemutatott megoldások szervesen illeszkednek ezekbe a stratégiai elképzelésekbe, és a gyakorlatban is hasznosíthatók. A környezetvédelmi szervezet egységes szolgáltatási rendszeren belüli elhelyezkedése pedig az Egészség-Biztonság-Környezetvédelem (EBK) struktúráján belül valósítható meg. Ez a szervezeti modell lehetővé teszi, hogy a központi stratégiai funkciók megerősödjenek, és a környezetvédelem gyakorlati végrehajtása egységes szervezetben történjen.

Egy ilyen szervezeti felépítés biztosítja, hogy a környezetvédelem szakmai profilja tisztán körvonalazódjon, magas színvonalú szolgáltatásokat nyújtson az üzletágak és egyéb egységek számára, miközben az irányítási és szolgáltatási tevékenységek elkülönülnek egymástól. Ez hozzájárul a hatékonyabb működéshez és a környezeti kihívások eredményesebb kezeléséhez.

2.4.9.2.A Magyar Államvasutak Zrt. újrahasznosítása a gyakorlatban

A vasúti sínek újrahasználatára szigorú szabályok vonatkoznak. Előzetes előkészítés nélkül az alárendelt vonalakon használhatók fel, vagy újraprofilozás után építhetők be ismét. Az újrahasznosítás másik lehetősége, hogy az acélanyagokat más célokra hasznosítják.

A zúzottkő újrahasznosítása szintén fontos része a vasúti fenntartási folyamatoknak, különösen a rostálási eljárás során. Az ágyazattisztítás során az apró részecskéktől megtisztított zúzottkövet a lehető legnagyobb arányban újra kell hasznosítani, hogy ismét a vasúti pálya szerves részévé válhasson.

Azonban az ágyazatból kihulló kisebb szemcséjű, nem szabványos anyagok, valamint a rostaalj újrahasznosítása országos szinten még nincs megfelelően szabályozva vagy megoldva. Bár

történtek kísérletek ezeknek az anyagoknak a beépítésére, például vízzáró földműjavító rétegeként geotextíliák alkalmazásával, ezek a megoldások egyelőre nem váltak általánossá.

2.4.10. A Lengyel Vasúttársaság (PKP-PLK) faaljak újrahasznosítási gyakorlata

Az ásványi nyersanyagokat és a természetes energiaforrásokat a folyamatosan növekvő fogyasztási és gyártási hulladékból származó másodnyersanyagokkal kell helyettesíteni. Ezek az igények képezik a „Zero Waste for Europe” közösségi program alapját. A körkörös gazdaság koncepcióját a vasúti ágazatban is végre kell hajtani a megfelelő hulladékgazdálkodás, valamint az energiamegtakarítás és az anyaghasznosítás biztosítása érdekében. (Wojciechowski et al., 2018) szerint az újrahasznosítási folyamatnak tartalmaznia kell többek között a kreozotolajjal impregnált, használt fa vasúti talpfákat, amelyek globális környezeti problémát okoznak. A szerzőtársak bemutatják a kreozotolajjal impregnált fa vasúti elemek alkalmazási elveit és követelményeit. Vannak olyan tényezők is, amelyek hátráltatják az átfogó megközelítést az érintett termékek újrahasznosítására. Ugyanakkor jellemzik a szerves hulladékok termolízissel történő termikus lebontásának módszereit, ideértve a használt fa vasúti talpfákból származó anyagok tulajdonságait is. Az EU gazdasága a nyersanyagok és az energiaforrások hiányának, valamint ezek beszerzése során felmerülő folyamatosan növekvő költségeknek van kitéve. A hulladékgazdálkodás az Európai Unió általános hulladékgazdálkodási stratégiájának egyik eleme. A jelenlegi gyors gazdasági növekedés - különösen az elektronika és a közlekedés terén -, az újrahasznosítás és hasznosítás megszervezéséhez kapcsolódó műszaki megoldások, ugyancsak az innovatív koncepciók megalkotását vonják maguk után. A környezet megóvása és a gazdaság fejlesztése érdekében szükségesnek látszik a termékéletrajzon alapuló gazdaságpolitika alakítása (körforgásos gazdaság). Az újrahasznosításra és hasznosításra vonatkozó feltételezések megkövetelik a társadalom megfelelő környezettudatos hozzáállását a gyártókkal szemben, akik kötelesek az ilyen kérdéseket már a tervezési szakaszban figyelembe venni. A kimerült termékek esetében (természetes obszolitást betervezve) a leghatékonyabb hasznosítási és semlegesítési/ártalmatlanítási technológiát kell alkalmazni. Ezenkívül az újrahasznosítás nagyszerű lehetőség a fenntarthatóságra. Anyagforgalom-gazdaság, a körkörös gazdaság koncepcióját a vasúti szektorban is meg kell valósítani a megfelelő hulladékgazdálkodás és energiamegtakarítás, valamint az anyaghasznosítás biztosítása érdekében. A szerves és vegyes hulladékok kezelésére szolgáló új technológiák hozzájárulnak az üvegházhatású gázok kibocsátásának és a környezetszennyezésnek csökkentéséhez, valamint a hulladékból félkész termékek előállításához, amelyeknek köszönhetően korlátozható az elsődleges nyersanyagok

iránti kereslet. Emiatt az újrahasznosítási folyamatnak elsősorban a kimerült fából készült vasúti talpfákat kell magában foglalnia, amelyek jelentős környezetvédelmi problémát jelentenek. A körkörös gazdaságnak hozzá kell járulnia a termékek tartósabbá tételéhez, továbbá az újrafelhasználás optimalizálásához. Korlátoznia kell a természeti erőforrások igényen felüli fogyasztását és annak pazarlását. A körforgásos-gazdaság hatékony megvalósítása érdekében a fogyasztás utáni hulladék minden lényeges áramát hozzá kell adni az anyagforgalmi ciklushoz. Ilyen erőforrások a vasúti infrastruktúra fából készült elemei, különösen a kimerült talpfák, a hídaltárak és a váltó talpfák. Ezek az elemek impregnáltságuk miatt nem alkalmasak közvetlen tüzelőanyagként való felhasználásra, mert veszélyes (mérgező) kreozotot tartalmazzak. Fontos megemlíteni, hogy az elhasznált vasúti talpfák használata központi kazánokban vagy teljesítményblokkokban tüzelőanyagként nem hatékony, valamint veszélyt jelent a környezetre és az emberi egészségre. Speciális szűrők és magas (legalább 850 Celsius fok feletti) égési hőmérsékletekre van szükség, aminek a létrehozása rendkívül költséges. Kétkamrás kemencéket igényelne a folyamat, kipufogógáz-égetővel a rákkeltő dioxinoktól való megszabadulás érdekében. A fa talpfákat műszaki okokból (például alacsony hőmérséklet-ingadozásokkal szembeni ellenállás, rugalmas talaj megléte – rossz minőségű ballasztok) és gazdasági okokból (az előfeszítetteknél olcsóbbak) továbbra is használják. Az elemeket kreozotolajjal telítik a nagynyomású Rüping módszerrel, más néven vákuum-nyomásos módszerrel vagy üres cellás módszerrel. (Az eljárás lényege: egyszerű Rüping-eljárás levegőnyomás alá helyezés, olajnyomás alá helyezés, vákuumos, kettős Rüping-eljárás (kétszer ismétlik meg az egyszerű eljárás lépéseit), Bethell telítési eljárás (elővákuum, olajnyomás, utóvákuum), "Teljes" telítési eljárás (elővákuum, olajnyomás). A hihetetlenül komoly környezeti kihívásokkal és a nem megújuló természeti erőforrások csökkentésével szembeesülve a hulladékfeldolgozás a modern gazdaságban gazdaságtalan szükségletnek, de elengedhetetlennek bizonyul. A gazdasági növekedés dinamikája meghatározza a hulladék-újrahasznosítási technológiák és az anyaghasznosítási megoldások fejlesztésének szükségességét. A világ legjobban iparosodott országainak gazdaságai jelentős hatást gyakoroltak a hulladék-újrahasznosítási kezdeményezésekre, különösen a termékek és anyagok betervezett obszolitálásán alapuló újrahasznosítására, valamint meghatározzák a lehetséges kutatási és fejlesztési irányokat. A vasúti infrastruktúra az egyik legnagyobb anyagfogyasztó piac, következésképpen a potenciális hulladék nagy forrása. A Lengyel Központi Statisztikai Hivatal, valamint a PKP-PLK (2023) vasúttársaság adatai azt mutatják, hogy az elhasznált vasútvonalak hossza (2020. december 31-i adatok szerint) a következő: egyvágányú vonalak 10 623 km, két- és többvágányú vonalak 8 617 km. A (2020. december 31-i adatok szerint) PKP PLK S.A hálózathoz használt vasúti infrastruktúra elemei a következők: 36 100 km fővonalis vágány és pályaudvari vágány, 40 343 vasúti váltó, 24 858 vágánykilométer a vontatási hálózat. Ez azt

jelenti, hogy sok olyan elem van, amelyet elhasználódásuk után ki kell cserélni, vagy semlegesíteni/ártalmatlanítani, újrahasznosítani és visszanyerni.

2.10.1 Vasúti faanyagok

A vasúti talpfák fenyőből, tölgyből és bükkből készülnek. A fa természetes kompozit anyag, melynek köszönhetően optimális tulajdonságokkal rendelkezik: például a rugalmasság, a tartósság és a különféle működési feltételekkel (pl. a változó időjárási és talajviszonyokkal) szembeni ellenállás tekintetében. A vasúti burkolat faelemei a felhordás helyéből adódóan talpfák, váltótalpok és hídtalpok formáját öltik. A környezetre káros, és a szerves anyagok életciklus utáni hulladékok kezelésének hatékony módszere az alacsony hőmérsékletű termikus bomlás (termolízis). Ez az acélreaktorban 490°C-ig terjedő hőmérsékleten a hulladék aerob termikus bomlását jelenti.

WGW GreenEnergy Poland Sp. z.o.o. kidolgozta ezeket a módszereket, és korszerűsítette a feldolgozó berendezések szerkezetét és telepítését, valamint optimalizálta a tervezési folyamatokat. Lehetővé tette a szerves és összetett hulladékból értékes és minőségi termékek előállítását, piacra szánt, gazdaságilag indokolt módon. A Precíziós Mechanikai Intézettel együttműködve, és a kutatás-fejlesztési munkák részeként a WGW technológiát fejlesztett ki a több anyagból származó, fogyasztás utáni veszélyes hulladékok, különösen a TetraPak csomagolási és diagnosztikai hulladékok újrahasznosítására. A termolízis/pirolízis hasonló a XIX. század óta ismert szárazfa-desztillációhoz, amely a fa hőlebomlását eredményezi levegőhöz való hozzáférés nélkül (vagy minimális hozzáféréssel) töltött reaktorokban, amelyeket körülbelül 500 °C-os hőmérsékletre fűtenek. Azonnal felmerül a kérdés, honnan származik a fűtéshez szükséges energia? A fa hőbomlás-termékei: a szén, a fagáz, a faecet (ecetsav, metanol) és a kátrány. A folyamat során keletkező fagáz (körülbelül 20% térfogat), szén-monoxid (körülbelül 20%) és kisebb mennyiségű metán és nem gyúlékony nitrogén (körülbelül 50-60%), szén-dioxid és vízgőz.

A WGW által kifejlesztett modern hőbontási technológia garantálja a különféle szerves és vegyes hulladékok biztonságos feldolgozását, valamint az összes hulladék kezelését. Jelenleg a WGW mérnöki tevékenysége keretében a Vasúti Kutatóintézettel együttműködve úgy döntött, hogy egy környezetbarát, termolízisen alapuló, optimális hőbontási technológiát dolgoz ki a kimerült fa vasúti talpfák számára, valamint átfogó technológiát a bomlástermékek piaci célú kezelésére. A kísérletek bebizonyították, hogy nincs akadálya a fa vasúti talpfák kezdeti hulladék-újrahasznosítási technológiájának más fahulladékkal (például forgáccsal) együtt való

megvalósításának. A szóban forgó módszer perspektivikusnak tűnik a meglévő fogyasztó, a vasút felhasználása tekintetében, de a pazarlást és a valós újrahasznosítást végző szervezetezt nem vehette/veheti figyelembe. Ez a rendszerben lévő vasúti infrastruktúra fontos kiegészítése lehet, lehetővé téve a körkörös gazdaság vasúti bevezetését.

A fa termikus bomlásának (pirolízisének) termékei a szén, víz, szén-monoxid és -dioxid, metán és egyéb szénhidrátok, metanol, ecetsav és értékes szerves vegyületeket tartalmazó fakátrány (összetétele a feldolgozás módjától és a fafajtától függ). A faforgács néhány millimétertől 10 cm-ig terjedő apró fadarabok sokasága, amelyek gépekben, úgynevezett faforgácsoló gépekben végzett csiszolás vagy fafeldolgozás eredményeként jönnek létre (többek között vasúti talpfáknál is). A fahulladék termolízisén alapuló első hőbontási kísérletek (forgácsok és kimerült vasúti talpfák) azt mutatták, hogy nagy a valószínűsége annak, hogy a semlegesítési/ártalmatlanítási folyamat ipari méretekben hajtható csak végre. A termolízisből származó szénmintákat alávetették termikus besugárzás során keletkező gázok toxicitási vizsgálatának. A mérést a Vasútkutató Intézetben végezték a PN-EN ISO 5659-2 szerinti egykamrás vizsgálattal (25 kW/m² sugárzási intenzitás).

A FTIR (Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia analizátorral kombinálva) az a kutatási módszer, amely alkalmazza az infravörös és az úgynevezett távoli infravörös fényt (25-1000·10⁻⁶ m) sugárzás tartományában a fenti szabvány szerinti eredmények kimutatására és igazolására. A kimerült fa (keményfa és tűlevelű) vasúti talpfák mennyiségére vonatkozó adatokat figyelembe véve feltételezhetjük, hogy az ártalmatlanításra/semlegesítésre szánt elemek száma meghaladja a 20 millió metrikus tonnát. Feltételezve, hogy egy egyágvas talpfa átlagos tömege körülbelül 80 kg, a vasúti talpfák formájában lévő hulladék tömege 1.600.000,00 metrikus tonna. Ez szükségessé teszi a vasúti talpfákra épülő optimális hulladékfeldolgozási technológia kidolgozását ipari méretekben, a megvalósítást feltételezve. Egy ilyen módszer mérnöki folyamatának kidolgozása elengedhetetlen:

- a Vasúti Kutatóintézettel együttműködve,
- a releváns logisztikát,
- valamint a WGW termolízis-berendezés konstrukciójának a jellegéhez és a szükséges folyamattérfigathoz, valamint a sarzs méreteihez való igazítását

figyelembe véve.

Ezért szükséges lehet, a fát impregnáló anyagok elsődleges összetételéből adódó veszélyes kibocsátások kiküszöbölése érdekében egy poszttermikus gázkezelő rendszer tervezése és

tesztelése, valamint az ezen rendszerhez kapcsolódó, a gázösszetétel ellenőrzésére, a fából készült vasúti talpfák környezetbarát újrahasznosítását ellenőrző módszer is. Tekintettel arra, hogy a 2020-as Stratégia és a Fenntartható Fejlődés Politika hangsúlyozta a vasúti közlekedés fejlesztésének fontosságát, a korábbi hagyományos megoldásokat az innovatív gazdaság, és különösen a jelenleg megvalósuló körforgásos gazdaság követelményeihez kell igazítani. A közeljövőben meg kell oldani az elhasználódott vasúti infrastruktúra (főleg a talpfák) újrahasznosításával kapcsolatos legsúlyosabb problémákat: a vasúti infrastruktúra több tízéves életciklusa akadályozza az újrahasznosítás megközelítését, mivel nehéz megjósolni, hogy 50 vagy 100 év múlva mely újrahasznosítási technológiák állnak majd rendelkezésre. A kormánynak és a helyi hatóságoknak viszonylag korlátozott az érdeklődése a vasúti infrastruktúra újrahasznosítása iránt, mivel általában a vasúti vállalkozások helyiségeiben tárolt hulladékok látszólag nem okoznak kellemetlenségeket. Egyes, jelenleg termelésben elfogadott anyagok felhasználását 20 év múlva betilthatják, ami megakadályozza, hogy a környezetvédelmi előírásoknak megfelelő feldolgozás (újrahasznosítás) alá kerüljenek innovatív, illetve a veszélyes hulladékok feldolgozásához kapcsolódó környezetbarát technológiák hosszú távú megtérülési befektetéssel, ami a végrehajtási kör és a végrehajtási ciklus miatt kormányzati segítség nélkül nehezen valósítható meg. Az energia- és éghajlatpolitika, valamint az EU gazdaságának végső célja a hulladékmentesség biztosítása 2050-ig.

2.1.11. Brazília újrahasznosítási gyakorlata

A közlekedést ma az emberek életében elengedhetetlen tevékenységként értelmezik szerte a világon. A közlekedési rendszerek hatékonysága egy nemzet fejlettségének és életminőségének egyik legfontosabb mutatója. A közlekedési rendszerek változatos modalitásainak mindegyike sajátos jellemzőkkel bír, amelyek a kereslettől és a rendelkezésre álló keretektől függően versenyben állnak egymással, előnyeikkel és hátrányaikkal együtt. A közlekedési eszközként használt módok közé tartozik a „HighwayModal, a RailwayModal, a NavalModal és a AerialModal.” Érdemes megjegyezni, hogy a RailwayModal a személyszállításban és a teherszállításban egyaránt szükségessé válik, mivel nagyon fontos logisztikai láncszem egy nagy területű, rendkívüli mezőgazdasági termelésű és a városi területeken magas népsűrűségű ország gazdaságában, ami Brazília esetében egyáltalán nem elhanyagolható tényező. Bár az egyéb közlekedési eszközök fontossága a brazil gazdaság és a lakosság életminősége szempontjából is kiemelkedő, a RailwayModal a többihez képest lényegesen jelentősebb. Mivel a vasút alacsony technológiai jellemzővel és viszonylag kiforrott technikai rendszerekkel rendelkezik, lehetőséget

kínál hosszú kötélek kialakítására, egyedi erőgéppel vonva, ami nagy energiamegtakarítást biztosít. A vonatok manapság nagy sebességével, viszonylag rövid időn belül nagy távolságokat képesek megtenni, nagy utasszámmal és nagy tömegű teherszállítással, valamint relatív alacsony költséggel. A RailwayModal-hoz kapcsolódó és abból leágazó metróközlekedését illetően az utasok nagyobb kényelme és biztonsága mellett hatékony gyorsaságot és pontosságot is kínál, ami a hagyományos HighwayModal esetében, különösen a nagyvárosok tekintetében nem könnyen megoldható. A braziliai vasút az általa bemutatott sokrétű pozitívumok ellenére továbbra sem tudja felvenni a versenyt a többi Modal-lal, főleg a HighwayModal-lal, mert a vasúti pályát érintő fenntartási költségek rendkívül magasak. Tény, hogy magánvállalatok kezében vannak, szemben a HighwayModal-lal, amelynek fenntartási költsége a kormány feladata és felelőssége, kivéve a magánutakat. Figyelembe véve a braziliai vasútnak ezt a jellegzetes tulajdonságát, egyes kutatóközpontok, egyetemek és gyártók különféle anyagok és vasúti alkatrészek kifejlesztésén dolgoztak és dolgoznak azzal a céllal, hogy mindezen költségeket minimalizálják, és versenyképesebbé tegyék ezt a Modal-t. A Centro de Tecnologia da UNICAMP egyik osztálya, a DESF (Departamento de Engenharia de Sistemas e Ferroviária) – válaszul a fogyasztók igényeire, mivel egyre inkább elkötelezett a nem megfelelő szabványoknak és műszaki előírásoknak megváltoztatása iránt – elindította a megfelelő laboratóriumi vizsgálatokat. A programozott terhelés alkalmazási rendszerének lehetőségeivel, amely különféle szervo-hidraulikus hajtóművekből áll, 40 metrikus tonna/tengelyig terjedő kapacitással lehetővé teszi a tényleges terhelési helyzetek szimulációját 3D formában. A laboratóriumban statikus és dinamikus (fáradási) mechanikai vizsgálatokat végeznek a vasúti és metró társaságok által használt szerelvényeken, alkatrészeken és speciális eszközökön, hogy igazolják azok minőségét, a szabványok és műszaki eljárások gyártói specifikációit. A DESF által már tesztelt számos termék között van a talpfa/faalj, amely jelen disszertáció szakirodalmi háttérelmézésének, kutatásának célja, kiemeli a vizsgálati módszereket, ezeknek a teszteknek a szabványait és a talpfának nevezett vasúti alkatrész monologizálásának vonatkozásait. Sajnálatos módon Braziliában is égetőkben, hulladéklerakókban végzik az említett teszteknek nem megfelelő, használt faaljak (UNICAMP Centro de Tecnologia e Departamento de Engenharia de Sistemas e Ferroviária (DESF), 2023).

2.4. 12 Ausztrália újrahasznosítási gyakorlata

Ausztráliában Stephen Webster vállalkozása 2014. óta fejleszt kompozit vasúti talpfákat újrahasznosított műanyagból. Kérdésemre elmondta, hogy a fejlesztési út nem volt könnyű. A közreműködő vállalatok és a kormányzat együttműködése elengedhetetlen volt a körforgásos gazdasági kezdeményezés felvirágoztatásához. Az Integrated Recycling kezdetben egy kis csapat volt, amely a nagy mennyiségű műanyag-újrahasznosítás lehetőségét nyerte el. Infrastruktúrájuk, gépeik, eszközeik, viszonylag hamar rendelkezésre álltak a termelés/feldolgozás beindításához. Folyamatban voltak az újrahasznosításhoz szükséges vasúti talpfák próbái olyan helyeken, mint a Melbourne belvárosában található Richmond és a V/Line Wyndham Vale, a QueenslandRail-n és másik két telephelyen. Az Integrated Recycling hatékonyan egy „új iparágat hozott létre”, amely hatalmas mennyiségű hulladékanyagot használ fel jelenleg is, és jelentősen jobb minőségű talpfákat gyárt, mintha azt a fából készült vasúti talpfák környezetbarát újrahasznosításával tette volna. A körkörös/körforgásos gazdaság, beleértve az újrahasznosítást, elengedhetetlen része a modern gazdaságnak. A fogyasztás utáni, veszélyes és környezetkárosító, elsősorban szerves anyagokból álló hulladékot a környezetvédelmi előírásoknak megfelelően kell kezelni, és legelőnyösebben különféle tüzelőanyag-formákra (olaj, gáz, szén, hidrogén, alkohol, természetesen ide tartozik a cserélt, használt vasúti talpfa is, stb.) dolgozzák fel az energiaforrások diverzifikálása és a környezeti leromlás minimalizálása érdekében. A cég 2014-ben a fóliák, műanyag palackok újrahasznosításával és gyártásával kapcsolatos munkák/megrendelések jelentős részét elveszítette, ennek értelmében új üzletek, lehetőségek felé fordult. A cégvezető ekkor felvette a kapcsolatot Trevaskis úrral, aki egy nyugdíjas vasúti mérnök, és megkérdezte, adnának-e újrahasznosított talpfákat a turizmus fellendítése érdekében a helyi műemlékvasút számára. Az üzemeltetők a fahiány és az előregedett faaljak „izzadása” miatt a karbantartási problémákat leküzdhetetlennek tartották. Tesztelési célból műanyag talpfákra helyezték a vágányokat a richmondi állomáson. Ez a műszaki megoldás vezetett - Victoria Állam által támogatva - a Monash's IRT tervezési és tesztelési irányelveinek kidolgozásához, valamint az újrahasznosított műanyagból készült talpfák elterjedéséhez: az 50 éves tervezési élettartamú kompozit talpfákéhoz, amelyek ellenállnak a rothadásnak és a természet károsító hatásának. Jelen idő szerint „hét-nyolc” műemlékvasútra szerelték fel Victoria-ban, beleértve a Puffing Billy Railway-t a Dandenong-hegységben. A Duratrack talpfák 85 százalékban újrahasznosított anyagból készülnek, polisztirolt és mezőgazdasági műanyagot, bányászatban használt csövet, farostot, használt vasúti talpfa darálékot, valamint színezőanyagot tartalmaznak. A visszanyerési adatok lenyűgözőek: 64 tonna újrafelhasznált műanyag minden egyes kilométerenként az Integrated termékével lefektetett vágányon. Ha figyelembe vesszük Ausztráliában a pálya

menyiségét – 36 000 kilométer –, akkor nagyon érdekessé válik az újrahasznosított kompozit talpfák lerakóhely-csökkentési lehetősége, ha sikerül elfogadtatni őket. A QueenslandRail jelenleg öt év alatt 700 000 fa talpfát kíván kicserélni hálózatában. Webster cége azon három cég között van, amelyeknél termékük nagyforgalmú pálya közbeni tesztelése folyik, és az egyetlen, amely újrahasznosított anyagokat használ. „150 talpfát tavaly év végén szereltünk be két helyszínen, Helidon és Gatton, illetve Chinchilla és Miles között, ahol havonta körülbelül negyedmillió tonna árut szállítanak” – mondja Webster. - „Tehát 12 hónap elteltével 3 millió tonna forgalom megy majd át rajtuk. És ez segíteni fog az újrahasznosított műanyagból készült talpfák teljesítményének ellenőrzésében.”

Webster pénzügyi és banki ügyvéd volt, mielőtt 1993-ban távozott, hogy az ingyenc pitegyártó Boscastle partnerévé váljon, a Storm Sustainability élén. Ezt követően az Integrated Packaging vezérigazgatója felkérte, hogy építsék ki újrahasznosított műanyag üzletüket. Akkoriban a műanyag-újrahasznosítás „inkább újdonságnak számított”. Úgy vélte, hogy a körforgásos gazdaság sikeréhez – amely téma robbanásszerűen népszerűvé vált jelenlegi szerepének 2010-es megkezdése óta – egy sor dologra van szükség. Először is, létfontosságúak azok az innovatív termékek, amelyekre a végfelhasználók vágnak. Másodszor, az együttműködés – amint azt egy olyan termék fejlesztése során megköveteltek, amelyre nem léteznek szabványok – szintén létfontosságú. Harmadszor, állami támogatásra van szükség. Ez magában foglalja az ellenőrzött ausztrál tartalommal rendelkező termékek beszerzési követelményeit, valamint a célnak megfelelő termékek fejlesztésének támogatását bármely biztonság tudatos iparág számára. Webster esetében mindez lehetővé tette, hogy kapcsolatba lépjen a Monash mérnökeivel, hogy termékirányelveket dolgozzanak ki. „Egy jó kis tudomány kell hozzá, és nehéz területet választottunk, mivel ez egy nagyon biztonság tudatos környezet” – mondja. „A vasúti mérnök olyan, mint egy hídmérnök: „nem fog elbukni az életben” (Wittmann, 2000). Konzervatív megközelítéssel gondoskodik arról, hogy az újítás alatt álló termék úgy működjön és teljesítsen, ahogy azt ő akarja és eltervezte.” (Integrated Recycling, 2022).

2.4.13. Fenntartható vasúti közlekedés és a környezetbarát újrahasznosítási megoldások a nemzetközi gyakorlatban – részösszegzés

A fenntarthatóság egyre fontosabb célkitűzéssé válik a vasúti közlekedés számára, mivel a szektor szereplői felismerik, hogy környezetvédelmi intézkedésekkel jelentősen csökkenthetik az ökológiai lábnyomukat. Számos európai országban a vasúttársaságok innovatív megoldásokkal törekednek az anyagok újrahasznosítására és a hulladékkezelés optimalizálására.

A Dán Állami Vasutak (DSB) és a Holland Vasutak (NS) például fejlett környezeti menedzsment rendszereket vezettek be, amelyek célja az energiaszolgáltatás csökkentése és az újrahasznosítási folyamatok bővítése. Ezen rendszerek részeként kiemelten kezelik a veszélyes hulladéknak minősített fa talpfákat (vasúti aljakat), amelyeket egyes országok speciális eljárásokkal dolgoznak fel a környezeti hatások minimalizálása érdekében.

A Belga Vasutak (SNCB) és a Finn Vasutak (VR) az acél és beton talpfák újrahasznosítására fókuszálnak. Az acél és beton anyagok esetében ezek a vasúttársaságok olyan körforgásos gazdasági modellt követnek, amely lehetővé teszi, hogy a már elhasznált anyagokat visszajuttassák a termelési láncba. Ez a megközelítés csökkenti az elsődleges alapanyagok iránti keresletet, ami hosszú távon hozzájárul a természetes erőforrások megőrzéséhez.

Az egyes országok különböző technológiai megoldásokat alkalmaznak az újrahasznosítás érdekében. Norvégiában és Svájcban például szigorú környezetvédelmi szabályozások vannak érvényben, amelyek megkövetelik, hogy a fa talpfákat veszélyes hulladékként kezeljék, minimalizálva a talaj- és vízszennyezés kockázatát. Ausztráliában viszont olyan új típusú talpfákat fejlesztettek ki, amelyek teljes mértékben újrahasznosított műanyagból készülnek. Ez a technológia hosszabb élettartamot biztosít a talpfáknak, miközben teljes mértékben újrahasznosítható anyagból készül, így csökkenti a hulladék mennyiségét és elősegíti a körforgásos gazdaságot.

Braziliában és Lengyelországban további újrahasznosítási innovációkat alkalmaznak, mint például a termolízis és pirolízis technológiákat. Ezek az eljárások lehetővé teszik, hogy a fa és műanyag aljakat magas hőmérsékleten kezeljék, így olyan melléktermékeket állítanak elő, amelyek üzemanyagként vagy egyéb ipari célokra is felhasználhatók. Ezzel csökkentik a hulladék mennyiségét és növelik az újrahasznosított anyagok arányát.

Ezek az intézkedések együttesen hozzájárulnak ahhoz, hogy a vasúti szektor egyre inkább környezetbarát működési modellt valósítson meg, amely a hulladékképződés minimalizálására és az anyagok körforgásban tartására összpontosít. A vasúttársaságok hosszú távú célja, hogy fenntartható, alacsony környezeti terhelésű megoldásokat alkalmazzanak, amelyek illeszkednek a modern társadalom környezetvédelmi elvárásaihoz. Az ilyen fejlesztések nemcsak a természetes erőforrások megőrzését támogatják, hanem hozzájárulnak a vasúti közlekedés jövőbeli fenntarthatóságához is, így biztosítva, hogy a vasút a jövőben is az egyik legkörnyezetbarátabb közlekedési mód maradjon.

2.5. EU direktíva

Az EU szigorú követelményeket támasztott a hulladékkal kapcsolatban. Emiatt és a magas büntetések elkerülése érdekében minden államnak magas díjakat kell fizetni a következők tekintetében: kommunális hulladék újrahasznosítása 70%-os szinten 2030-ig a hulladék tárolásának maximalizálása. 10%-os 2030-ig a szelektív hulladék tárolásának teljes tilalma. Az Európai Parlament és az Európai Bizottság még mindig dolgozik a hulladékgazdálkodással kapcsolatos közös állásponton. Az egyik radikális elképzelés a hulladékégetés legkésőbb 2030-ig történő leállítása. Jelenleg nehézségekbe ütközik a tagállamok jóváhagyása a Bizottság és az Európai Parlament javaslataihoz.

A szankciók eredményessége tagállamonként eltérő, és a gyakorlatban gyakran felmerül, hogy a bírságok összege nem mindig bír elrettentő hatással, különösen nagy ipari szereplők esetében, akik a büntetéseket üzleti költségként kezelik. A környezeti közgazdaságtanban ismert Pigou-adó elve szerint a környezetszennyezés költségeit közvetlenül a szennyezőre kell hárítani, hogy az gazdaságilag se érje meg a szabályok megsértése. Ennek alapján több tagállam már bevezetett olyan progresszív díjrendszereket, amelyekben a hulladékkezelési hiányosságokat súlyozott, hosszú távú pénzügyi terhekkel szankcionálják. A sikeres példák közé tartozik Hollandia és Svédország, ahol a bírságok nagysága és a kockázatkezelés költségei együtt már valóban ösztönzően hatnak a fenntartható hulladékgazdálkodási megoldások választására. Magyarország számára ezek a példák irányadóak lehetnek a szankciók hatékonyságának növelésében.

Szeretném idézni az EU bizottságának határozatát, amit 2003-ban el is fogadtak. A határozat egyértelműen meghatározza és kimondja, hogy az ásványi olajjal átitatott faaljak egészségre veszélyesek voltak miatt kereskedelmi forgalomba nem hozhatók. Életciklusuk végeztével a kibocsátónak gondoskodni kell a végleges megsemmisítésről (lásd: 1. sz. melléklet). A mellékletben található idézet az Európai Bizottság 2003. január 6-i irányelvéből származik, amely módosította a veszélyes anyagokra vonatkozó korábbi uniós irányelveket, különös tekintettel az arzéntartalmú vegyületek használatára a fa tartósításában. Az irányelv az „Arzéntartalmú faanyagvédő szerek korlátozása” címet viselheti, mivel célja az arzénfaanyagok kockázatainak csökkentése, különösen az egészségre és környezetre gyakorolt hatások figyelembevételével.

Napjainkban az emberiséget egyre inkább aggasztja a környezet állapota, különös tekintettel a levegő, a víz, a talaj, valamint az élő szervezetek szennyeződésére. A növekvő népesség igényeit kiszolgáló gazdasági rendszerek a termelés és a fogyasztás fokozására ösztönöznek, ami a természeti erőforrások intenzív kihasználásához vezet. Ez a környezet kizsákmányolását egyre

nyilvánvalóbbá teszi. Az ásványi nyersanyagok kitermelése és felhasználása hosszú ideig abban a tévhitben történt, hogy ezek a készletek kimeríthetetlenek (Purves, 2001; Fergusson & Kim, 1991).

A környezetterhelés 80-85%-a arra vezethető vissza, hogy 1946-tól kezdve új ipari technológiák, például műanyagok, műtrágyák és növényvédő szerek terjedtek el. Ezek helyett a környezetbarát megoldások helyett olyan eljárások váltak általánossá, amelyek az „ingyen” rendelkezésre álló levegőt, talajt és vizet, valamint az élővilágot károsítják. Csak az elmúlt néhány évtizedben vált általánosan elfogadottá, hogy a környezet érték, és azt a gazdasági tervezésben is figyelembe kell venni.

A Föld élő rendszerei nem képesek rövid időn belül alkalmazkodni a drasztikus környezeti változásokhoz. Ugyanez igaz az emberi szervezetre, amely evolúciós szempontból szintén nincs felkészülve a jelentős kémiai terhelésre (Purves, 2001; Fergusson & Kim, 1991). Purves (2001) arra figyelmeztet, hogy a jövő nemzedékeinek talán már nem lesz esélyük megszabadulni a szennyezett környezettől. Bár a levegő, a víz és a talaj részleges megtisztítása elképzelhető lenne, ennek energiaszükséglete olyan mértékű szennyezést eredményezne, hogy a gyakorlatban aligha valósítható meg.

Az emberi tevékenység hatásai a bioszféra egészét érintik, mivel a beavatkozás méretei rendkívül nagyok. A bioszféra elemei – például a talaj, a víz, a levegő, a növények, az állatok és maga az ember – különböző elemekkel és mérgező fémekkel szennyeződnek, ami a kémiai környezetterhelés egy formája, és jelentős gazdasági, valamint ökológiai következményekkel jár.

A szennyeződés mértékét a vizek, vízi élőlények és üledékek vizsgálata révén is nyomon lehet követni. Egyes élőlénycsoportok különösen érzékenyek a környezeti terhelésre; visszaszorulásuk vagy kipusztulásuk figyelmeztető jel a növekvő környezeti károokra.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

A kutatás módszertani megközelítése a primer és szekunder kutatási módszerek együttes alkalmazásán alapul, melyek célja a környezetkímélő technológiák és újrahasznosítási eljárások vizsgálata, különös tekintettel a vasúti faaljak fenntartható kezelésére. E módszerek lehetővé teszik a téma mélyreható feltárását és a gazdasági, környezeti szempontból releváns következtetések levonását (Yin, 2014).

Saját kutatásaim során kvalitatív és kvantitatív megközelítést egyaránt alkalmaztam, amelyek megalapozzák a prototípusok értékelését és a gazdasági elemzéseket.

1. Szekunder kutatás

A szekunder kutatás során már meglévő adatokat és információkat gyűjtöttem össze és elemeztem, amelyek más kutatások vagy szervezetek által korábban gyűjtött adatokon alapulnak. Ez a megközelítés lehetővé teszi a kutatási probléma pontosítását és a meglévő ismeretek feltárását.

A kutatás során felhasznált adatbázisok és források között szerepeltek:

1. Magyar Államvasutak (MÁV) dokumentációi: Ezek a belső dokumentumok betekintést nyújtottak a vasúti faaljak jelenlegi kezelésébe és az alkalmazott újrahasznosítási gyakorlatokba.
2. BKV Zrt.-től kapott belső adatok: A budapesti közlekedési vállalat adatai segítettek megérteni a városi vasúti infrastruktúrában alkalmazott faaljak kezelését és azok újrahasznosítási lehetőségeit.
3. Európai Unió vonatkozó direktívái és irányelvei (pl. 76/769/EEC, 98/8/EC): Ezek az irányelvek meghatározzák a veszélyes anyagok kezelésére és az újrahasznosításra vonatkozó szabályozásokat, amelyek alapvetőek a kutatás szempontjából.

A szekunder kutatás során elemeztem más nemzetközi tanulmányokat is, amelyek a faanyagok kezelésének környezeti hatásait és újrahasznosításának lehetőségeit vizsgálják (Lave et al., 1995). Ez hozzájárult a fenntarthatóság és a környezetvédelmi szabályozások hatásainak mélyebb megértéséhez.

2. Primer kutatás

A primer kutatás során saját adatgyűjtést végeztem, amely kifejezetten a kutatási kérdések megválaszolására irányult. Ez lehetővé tette, hogy első kézből származó, releváns adatokat gyűjtsek a vizsgált problémáról.

A primer kutatás fő módszerei:

1. Esettanulmányok készítése: Részletes elemzéseket végeztem magyar és külföldi vasúttársaságok újrahasznosítási gyakorlatairól. Az esettanulmányok kiválasztásánál figyelembe vettem a technológiai fejlettséget, a környezeti terhelés csökkentésére irányuló törekvéseket és a szabályozási környezetet.
2. Talajminták vizsgálata: A vasúti faaljakból származó szennyező anyagok környezeti hatásainak felmérése érdekében talajmintákat gyűjtöttem és elemeztem. Ez a vizsgálat konkrét adatokat szolgáltatott a faaljakból kioldódó anyagok mennyiségéről és azok környezeti hatásairól.

Ez a megközelítés biztosította, hogy a kutatás során mind a meglévő ismereteket, mind a saját adatgyűjtés eredményeit felhasználjam, ezáltal átfogóbb és megalapozottabb következtetéseket vonhassak le a vasúti faaljak fenntartható kezelésével kapcsolatban.

3. Adatgyűjtési körülmények és módszerek

Az adatgyűjtés fő forrását a MÁV és a BKV szakembereivel készített interjúk, valamint az általuk biztosított belső dokumentumok és adatok jelentették, amelyek révén részletes betekintést nyertem a magyar hulladékgazdálkodási gyakorlatokba és a költségoptimalizálási lehetőségekbe. Az interjúk során olyan információkat gyűjtöttem, amelyek közvetlenül hozzájárultak a vasúti talpfák újrahasznosítási eljárásainak és szabályozásainak mélyebb megértéséhez (Maxwell, 2013).

Emellett a kutatás részeként nemzetközi adatgyűjtést is végeztem telefonon, e-mailen, valamint különböző online kommunikációs platformokon (Skype, Teams, Zoom) keresztül, több ország – köztük Dánia, Hollandia, Belgium, Finnország, Norvégia, Németország, Ausztria, Lengyelország, Svájc, Magyarország, Brazília és Ausztrália – vasúttársaságainak szakembereivel. A kvalitatív adatgyűjtés során félig strukturált kérdőívet alkalmaztam, amelyet előre kidolgozott tematikus kérdések mentén használtam fel, ugyanakkor lehetőséget adtam az interjúalanyoknak a szabad kifejtésre is. A kérdések minden interjúalany esetében azonos logika szerint követték az alábbi főbb témaköröket:

1. alkalmazott újrahasznosítási technológiák,
2. környezetvédelmi irányítási rendszerek (pl. ISO 14001) megléte,
3. a faaljak kezelésére vonatkozó jogi és műszaki kihívások,
4. a jövőbeni fejlesztési tervek és jógyakorlatok.

Az adatgyűjtés nem ad hoc jelleggel történt, hanem szisztematikusan előre egyeztetett struktúra szerint. A válaszokat tematikus tartalomelemzéssel csoportosítottam és összegeztem. E kapcsolattartási módszerek biztosították a rugalmas, időzónákon és földrajzi határokon átívelő adatgyűjtést, amely lehetővé tette a vizsgált országok eltérő környezeti és szabályozási megközelítéseinek feltárását (Patton, 2002). Az információk közvetlen beszerzése révén a

vasúti faaljak újrahasznosítására irányuló megoldások sokrétűségébe és a kapcsolódó szabályozási kihívásokba nyерhettem betekintést.

4. Módszertani standardok alkalmazása

Az adatgyűjtés során alkalmazott módszereket az ISO 9001:2015 szabvány minőségirányítási követelményeivel is összevetettem. Ez a minőségirányítási szabvány lehetőséget adott arra, hogy az adatgyűjtési és feldolgozási folyamatok megfeleléségét értékeljem, valamint felmérjem, hogy mennyire integrálhatók a fenntarthatósági elvek a vizsgált vasúttársaságok hulladékgazdálkodási és újrahasznosítási gyakorlataiba (ISO, 2015). Az ISO szabványnak való megfelelés vizsgálata fontos eleme volt a kutatásnak, mivel ez megalapozta a fenntarthatósági elvek technikai alkalmazhatóságát és a kutatás szilárd metodológiai alapját képezte.

5. Adatbázisok és értékelési szempontok

A szekunder kutatás során használt adatbázisokban található adatok a 2000–2023 közötti időszakot ölelik fel, melyek relevánsak a hulladékgazdálkodási folyamatok és újrahasznosítási gyakorlatok elemzéséhez. A primer kutatás során használt esettanulmányokat többek között a MÁV, BKV, valamint külföldi vasúttársaságok (pl. DB AG, SNCB, NSB) adatai és gyakorlatai alapján választottam ki. A kutatás során figyelembe vettem az európai uniós direktívák által előírt környezetvédelmi követelményeket is (European Environment Agency, 2021).

6. Elemzési módszerek és módszertani források

Az adatok feldolgozása és értékelése során különféle statisztikai és kvalitatív elemzési módszereket alkalmaztam. A módszertani fejezet elkészítéséhez olyan szakirodalmi forrásokra támaszkodtam, mint Babbie (2017) *A társadalomtudományi kutatás gyakorlata*, valamint más módszertani források, amelyek az esettanulmányok alkalmazásával kapcsolatos legjobb gyakorlatokat mutatják be (Bryman, 2016).

7. Az eredmények fejezettel való összhang

Az eredmények fejezetben részletesen bemutatom az egyes esettanulmányok alapján levont következtetéseket, amelyek tükrözik a módszertani fejezetben ismertetett kutatási célok és hipotézisek vizsgálatát. Az esettanulmányok alapján lehetőség nyílik a környezetkímélő technológiai fejlesztések gyakorlati alkalmazására és a fenntartható hulladékkezelési megoldások feltárására.

A kutatás során alkalmazott módszerek kiválasztása saját korábbi vizsgálataim tapasztalatain alapult, melyek során az újrahasznosítás technológiai és környezeti aspektusait egyaránt vizsgáltam.

4. EREDMÉNYEK

4.1. Szekunder kutatás eredményei

A szekunder kutatás során a vasúti talpfák újrahasznosításának gazdasági, környezetvédelmi és technológiai lehetőségeit vizsgáltam, különös tekintettel a magyarországi és nemzetközi gyakorlatokra. Emellett elemzésre kerültek az alumíniumprofilok és napelemek költségei, valamint az energiahatékonyság növelésének lehetőségei. Az alábbi részletes eredmények foglalják össze a kutatás főbb megállapításait.

1. Vasúti talpfák újrahasznosítása – Gazdasági elemzés

Adatok a BKV Zrt.-től

A BKV Zrt. az elmúlt években jelentős mennyiségű vasúti talpfát szállított el veszélyes hulladékként, magas költségekkel. A 2. táblázat a rendelkezésre álló adatokat foglalja össze:

2.táblázat: Veszélyes hulladékként kezelt vasúti talpfák költségei és alternatív árbevételi lehetőségek (2018–2020)

Év	Első kezelés költsége (Ft)	Mennyiség (kg)	Alternatív értékesítési árbevétel (Ft)	Potenciális nyereség (Ft)
2018	763 200	8 480	84 800	848 000
2019	1 697 400	18 860	188 600	1 886 600
2020	540 900	6 010	60 100	601 000

Forrás: Borbás, 2021 adatai alapján saját szerkesztés

A 2. táblázat a BKV Zrt. vasúti talpfáinak veszélyes hulladékként történő kezelésével kapcsolatos költségeket és az alternatív újrahasznosításból származó potenciális árbevételi lehetőségeket mutatja be 2018 és 2020 között.

A potenciális nyereség számítása: Ez az érték az alternatív újrahasznosítás révén elérhető maximális bevételt jelöli, amelyet a vizsgált években egységesen 100 Ft/kg árbevétellel kalkuláltunk. Ez az összeg azt szimbolizálja, hogy ideális piaci környezetben az újrahasznosított talpfák értékesítéséből ennyi árbevétel származhatna. Például 2018-ban a 8 480 kg mennyiség 100 Ft/kg áron számolva 848 000 Ft potenciális bevételt jelentene. Az oszlopban szereplő értékek tehát nem a tényleges piaci eladási árakat tükrözik, hanem egy elméleti, becsült lehetőséget.

Az adatok alapján látható, hogy a kezelés költségei és a mennyiség között egyértelmű összefüggés van, miközben az alternatív értékesítés révén elérhető nyereség minden vizsgált évben jelentős lehetőséget kínál a gazdasági hatékonyság növelésére.

Az alternatív értékesítési árbevétel a vasúti talpfák másodlagos hasznosításából származó elméleti bevételt jelöli, amelyet jelen esetben egységesen 100 Ft/kg árral kalkuláltunk. Ez az ár az újrahasznosított faanyag potenciális piaci értékét tükrözi például tűzifaként, építőipari célokra vagy egyéb ipari felhasználásra. Bár a tényleges eladási ár piaconként és felhasználási területenként eltérhet, az alkalmazott 100 Ft/kg becsült érték megfelelő alapot nyújt a gazdasági elemzéshez. Így jól szemléltethető, hogy a jelenlegi veszélyes hulladékként való kezeléshez képest az újrahasznosítás alternatívája milyen mértékű árbevételt, ezáltal gazdasági megtakarítást jelenthetne a vállalat számára.

A költségek és a potenciális bevételek változásai rávilágítanak arra, hogy a jelenlegi kezelés gazdasági hátrányai alternatív megoldásokkal csökkenthetők lennének. Az újrahasznosítás nemcsak jelentős költségmegtakarítást eredményezne, hanem hozzájárulna a fenntarthatóbb hulladékgazdálkodáshoz és a környezeti terhelés mérsékléséhez is.

Gazdasági potenciál:

Az elszállítás költségének elmaradásával és az értékesítésből származó bevétellel évente jelentős költségmegtakarítás érhető el.

Értékesítési potenciál és szabályozási akadályok

A talpfák értékesítésére vonatkozó szabályozás jelenleg szigorú kereteket szab, különösen a veszélyes hulladékok kategóriájában. A megfelelő környezetvédelmi engedélyekkel rendelkező vállalatok számára történő nyílt licit során azonban a hulladék árbevétele és az elszállítási költségek csökkentése jelentős gazdasági előnyt eredményezhet.

2. Fenntarthatósági szempontok

Környezetvédelmi előnyök

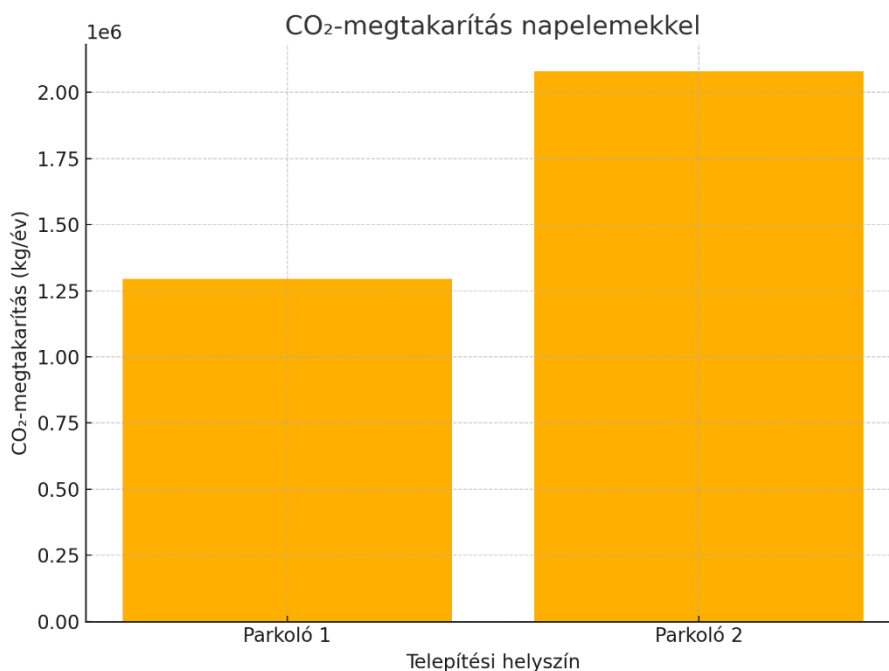
A talpfák megfelelő újrahasznosítása mérsékli a környezeti terhelést:

Kreozot tartalom eltávolítása: Csökkenti a talaj- és talajvízszennyezést.

CO₂-megtakarítás: A megfelelő újrahasznosítás és energiahatékony napelemek telepítése évente több millió kilogramm CO₂-t takaríthat meg (Budapest Airport, 2021).

A Budapest Airport Zrt. által biztosított adatok alapján a parkolók fölé telepített napelemek éves CO₂-megtakarítása akár 1 296 000 kg is lehet (Budapest Airport, 2021).

A 1. ábra a különböző telepítési helyszínek éves CO₂-megtakarítását mutatja, amely a napelemek által megtermelt megújuló energia eredményeként érhető el.



1. ábra: CO₂-megtakarítás különböző területeken elhelyezett napelemekkel

Forrás: Budapest Airport Zrt., 2021 alapján saját szerkesztés

Ahogy az 1. ábrán látható két fő telepítési helyszínt vizsgáltam:

Parkoló 1 esetében az éves CO₂-megtakarítás 1 296 000 kg. Ez azt jelenti, hogy az itt elhelyezett napelemek által termelt energia ennyi szén-dioxid-kibocsátást vált ki fosszilis energiaforrások helyettesítésével. Ez a mennyiség jelentős, különösen, ha figyelembe vesszük, hogy ez egy közepes méretű parkoló feletti napelemrendszer eredménye.

Parkoló 2 esetében a CO₂-megtakarítás még nagyobb, évi 2 079 076 kg. Ez a különbség a telepítési helyszín nagyobb méretéből adódik, amely lehetővé teszi több napelem telepítését, így nagyobb energiahozamot és kibocsátás-csökkentést eredményez.

Az 1. ábra vizuálisan kiemeli a telepítési helyszínek közötti különbségeket. A magasabb CO₂-megtakarítás Parkoló 2 esetében egyértelműen mutatja, hogy a nagyobb területű rendszerek hatékonyabbak lehetnek a fenntarthatósági célok elérésében. Ez az eredmény arra utal, hogy a nagyobb napelemfelületek előnyben részesítése jelentősen hozzájárulhat a környezetvédelemhez, különösen a közlekedési infrastruktúrák modernizálása során.

3. Alumíniumprofilok és napelemek költségszámítása

Költségszámítás a napelemekhez szükséges profilok alapján:

- 1 tonna alumíniumprofil ára: 4 320 USD, amely 2021-es árfolyamon kb. 1 594 080 HUF
- Egy napelempprofil súlya: 30 kg.
- Egy darab napelempprofil költsége: **47 822,4 HUF**.

Napelemes rendszer beruházási költségszámítása és gazdasági megtérülése

A napelemes rendszerek költségszámításánál nem elegendő kizárólag az alumíniumprofilokat és a napelem táblákat figyelembe venni. A teljes beruházási költség realista és megalapozott meghatározásához az alábbi főbb tételeket szükséges figyelembe venni:

- Inverterek: minden napelemes rendszer igényel egy vagy több invertert, amely az egyenáramot váltóárammá alakítja. Átlagos költség: 40 000–80 000 Ft/kW.
- Vezetékezés és kábelezés: szükséges a panelek és a hálózati csatlakozási pontok összekötéséhez. Általában a teljes beruházási költség 5–8%-át teszi ki.
- Transzformátor és hálózati csatlakozás: 50 kW feletti rendszerek esetén külön transzformátor szükséges, és a közcélú hálózatba történő betáplálás díja is megjelenik. Átlagos költség: 1–10 millió Ft.
- Szerelési, telepítési munkák: ide tartozik a munkadíj, logisztika, daruzás, és a kivitelezési idő. Átlagos költség: 100 000–150 000 Ft/kW.
- Engedélyeztetés és adminisztráció: a hálózatra csatlakozás jogi és műszaki feltételei (ELMŰ / E.ON / MAVIR, HMKE regisztráció, kiviteli tervek). Átlagos költség: 1–3% a beruházásból.
- Karbantartás: a rendszer üzemeltetése során évenkénti költségek jelentkeznek, jellemzően 0,5–1% évente, amit 20–25 évre vetítve kell figyelembe venni.

A 3. táblázat egy példa alapján mutatja be egy 50 kW-os rendszer teljes beruházási költségét, figyelembe véve az összes releváns tételt:

3. táblázat: Egy 50 kW-os napelemes rendszer költségtételei

Költségtétel	Egységár / kWh vagy db	Összesen (HUF)
Alumíniumprofil	47 822,4 Ft × 1 412 db	76 268 000 Ft
Napelem	100 000 Ft × 1 412 db	141 200 000 Ft
Inverter (50 kW × 40 000 Ft)	40 000 Ft × 50 kW	2 000 000 Ft
Kábelezés, csatlakozás	~5%	11 000 000 Ft
Telepítési munkák	100 000 Ft × 50 kW	5 000 000 Ft
Engedélyezés, adminisztráció	2%	5 000 000 Ft
Karbantartás (20 évre)	Évente 1% × beruházás	28 000 000 Ft (becslés)
Teljes költség		~268 468 000 Ft

Forrás: Saját számítás alapján, 2021-es árak figyelembevételével

A hosszú távú gazdasági megtérülés szempontjából kulcsfontosságú, hogy a rendszer mennyi energiát termel évente, és az milyen pénzügyi előnnyel jár. A 4. táblázat példaként két különböző telepítési helyszínt mutat be, ahol eltérő napelemdarabszámmal és energiatermeléssel kalkuláltak:

4.táblázat: Napelemes rendszerek telepítési költségei és éves megtakarítása

Telepítési helyszín	Alumíniumprofil költsége (HUF)	Napelem darabszám	Éves energiahozam (kWh)	Éves megtakarítás (HUF)
Parkoló 1	76 268 000	1 412	635 400	31 770 000
Parkoló 2	130 900 000	2 398	1 079 100	53 55 000

Forrás: Budapest Airport Zrt., 2021 alapján saját szerkesztés

Bár a 4. táblázat csak a napelemek és alumíniumprofilok költségét tartalmazza, jól érzékelteti a rendszer éves energiahozamát és az ebből származó pénzügyi előnyt. A teljes beruházási költséggel való megtérülés pontos kiszámításához a fenti részletes költségtételeket szükséges figyelembe venni.

Alternatív értékesítési árbevétel: Amennyiben a napelemes rendszer által termelt villamos energia egy része nem helyben kerül felhasználásra, hanem visszatáplálásra kerül a közcélú hálózatba, úgy a rendszer üzemeltetője értékesítheti a felesleget. Az árbevétel nagysága függ az aktuális szabadpiaci ártól vagy a garantált átvételi tarifától. Ezt az árbevételt a megtérülési számításoknál figyelembe kell venni, mivel kiegészíti a helyben felhasznált energia által biztosított megtakarítást.

A 4. táblázat a napelemes rendszerek telepítési költségeit és éves megtakarítását mutatja két különböző helyszín (Parkoló 1 és Parkoló 2) esetében. Az alábbi fő szempontokat magyarázza:

Alumíniumprofil költsége:

Egy alumíniumprofil ára: Egy darab alumíniumprofil, amely 30 kg tömegű, 47 822,4 HUF-ba kerül. Az ár számítása az 1 tonna (1000 kg) alumíniumprofil árából (4 320 USD, 1 594 080 HUF) történik, a kilogramm árának kiszámításával és megszorozva 30 kg-mal.

Összköltség: A telepítési helyszíneken a szükséges profilok darabszámának szorzata egy darab profil árával. Például a Parkoló 1 esetében 1 412 napelemprofil szükséges, tehát az összköltség 76 268 000 HUF.

Napelem darabszám: A 4. táblázat megadja az egyes helyszínekhez szükséges napelemek darabszámát (1 412 db a Parkoló 1-ben és 2 398 db a Parkoló 2-ben). Ez közvetlenül összefügg az alumíniumprofilok számával, mivel minden napelemhez szükség van egy profilra.

Éves energiahozam: Az egyes telepítési helyszínekre telepített napelemes rendszerek éves energiahozama a telepített napelemek számától és az adott helyszín adottságaitól függ. Például a Parkoló 1 rendszere évente 635 400 kWh energiát termel.

Éves megtakarítás: Az éves megtakarítás a megtermelt energiából származik, amelyet a helyszínek energiaszükségletének fedezésére, illetve hálózatra történő visszatáplálásra fordítanak. Például:

Parkoló 1: Az éves megtakarítás 31 770 000 HUF, amely a 635 400 kWh energiatermelésből adódik.

Parkoló 2: Az éves megtakarítás 53 550 000 HUF az 1 079 100 kWh energiatermelés alapján.

Következtetések:

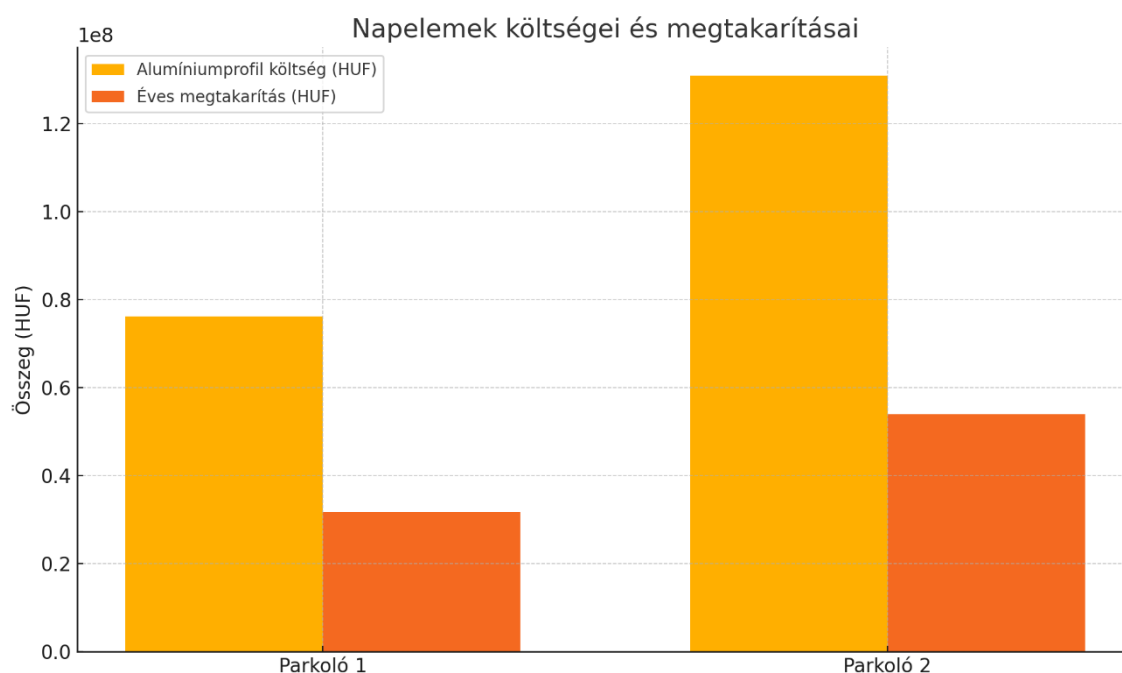
1. **Gazdaságosság:** A 4. táblázat rávilágít a napelemes rendszerek telepítésének költségeire és az azokból származó éves megtakarításokra.
2. **Megtérülés:** Az alumíniumprofil költsége jelentős tétel a beruházásban, de az éves energiamegtakarítás hosszú távon megtéríti ezt az összeget.
3. **Skálázhatóság:** A nagyobb rendszer (Parkoló 2) nagyobb beruházási költséggel jár, de az energiahozam és a megtakarítás is arányosan magasabb.

Összefoglalóul megállapíthatjuk, hogy a 4. táblázat átfogó képet nyújt a napelemes rendszerek telepítési költségeiről és azok megtérülési potenciáljáról.

4. Szekunder adatok összefoglalása

- A vasúti talpfák újrahasznosításának éves szinten akár **1–2 millió Ft nettó megtakarítást** eredményezhet a BKV Zrt. számára.
- A napelemes rendszerek telepítése jelentős hosszú távú energia- és költségmegtakarítást kínál, miközben csökkenti a CO₂-kibocsátást.

A 2. ábra a napelemek telepítésével kapcsolatos költségek és az éves megtakarítások közötti kapcsolatot szemlélteti két helyszínrre vonatkozóan: Parkoló 1 és Parkoló 2.



2. ábra: Napelem-rendszerek energiahatékonysági mutatói

Forrás: Saját kutatás alapján saját szerkesztés

A 2. ábrán látható, hogy a telepítéshez szükséges alumíniumprofil költsége jelentős:

Parkoló 1 esetében ez körülbelül 76,3 millió HUF.

Parkoló 2 nagyobb méretű rendszere 130,9 millió HUF-ba kerül.

Ez a költség az alumíniumprofil árából és a szükséges mennyiségből adódik, amely a napelemek alátámasztásához szükséges.

Éves megtakarítás:

Az alumíniumprofil magas kezdeti költségei ellenére a napelemek által termelt energia hosszú távon jelentős megtakarításokat eredményez:

Parkoló 1 esetében az éves megtakarítás 31,77 millió HUF, amely a termelt energiaérték és a megspórolt villamosenergia-költségek összegéből áll.

Parkoló 2 esetében ez az érték 53,95 millió HUF, amely a nagyobb napelembfelület eredménye.

Megállapítások

A 2. ábra jól mutatja, hogy a kezdeti beruházás jelentős ugyan, de a rendszerek megtérülése gyors, különösen Parkoló 2 esetében, ahol a nagyobb telepítési méret magasabb éves megtakarítást eredményez. A hosszú távú költséghatékonyság érdekében érdemes előnyben részesíteni a nagyobb kapacitású rendszereket, amelyek gazdaságilag és környezetvédelmi szempontból is hatékonyabbak.

A 2. ábra segít megérteni a beruházás költségei és a megtakarítások közötti összefüggést, amely egyaránt támogatja a fenntartható fejlődést és a gazdasági racionalitást. Ez az elemzés arra enged következtetni, hogy az ilyen jellegű beruházások hozzájárulhatnak az energiafüggetlenség növeléséhez és a karbonlábnyom csökkentéséhez.

Összegzés

A kutatás eredményei rámutattak, hogy az újrahasznosítás és a környezetbarát technológiák alkalmazása nemcsak fenntarthatósági szempontból, hanem gazdasági értelemben is jelentős előnyökkel jár. A számítások és vizualizációk alátámasztják, hogy a vasúti talpfák újrahasznosítása és a napelemek telepítése stratégiai fontosságú lehet a fenntartható gazdasági működés megteremtésében.

4.2. Primer kutatás eredményei: Esettanulmányok

Az 5. táblázat öt különböző esettanulmány lényegi elemeit foglalja össze, amelyek célja a környezeti problémák és lehetőségek multidiszciplináris megközelítése volt. A kutatások változatos módszertanokkal tártak fel környezeti, gazdasági és technológiai összefüggéseket, különös tekintettel az újrahasznosítás, remediáció és energiagazdálkodás témáira.

5.táblázat: Esettanulmányok összefoglalása

Esettanulmány	Kutatási cél (Cx)	Hipotézis (Hx)	Módszerek	Főbb eredmények
1. Diósgyőr	C2, C4, C5	H3, H5	Helyszíni mintavétel, laborvizsgálat, gazdasági elemzés	Salak újrahasznosítható útalapként, jelentős gazdasági potenciál, CO ₂ -csökkentés, energiaközösség lehetősége
2. Budakalász	C1, C2, C5	H1, H3, H5	Talaj- és talajvíz vizsgálat, kockázatelemzés, költség-összehasonlítás	Jelentős talaj- és vízszennyezés, biológiai remediáció költséghatékonyabb és hatékonyabb
3. Püspökladány	C1, C3, C5	H1, H3, H5	Talajvízvizsgálat, szennyezőanyag-analízis, gazdasági elemzés	TPH-szennyezés kimutatható, kármentesítés növeli az ingatlan értékét
4. Dunaújváros	C2, C4, C5	H1, H3, H5	NPV számítás, költség- és bevételebecslés	Naperőmű és salak újrahasznosítás lehetséges, megtérülés kiszámítható, munkahelyteremtés
5. Energiatárolás (VRFB)	C2, C3, C4	H1, H3, H4, H5	Technológiai elemzés, gazdasági összehasonlítás, megtérülési számítás	VRFB hosszú távon gazdaságos, fenntartható tárolási megoldás, energiabiztonságot növeli

Forrás: Saját szerkesztés, 2025

4.2.1. Esettanulmány 1.: Diósgyőr: A vasúti infrastruktúra újrahasznosításának történeti és jelenkori tanulságai

A diósgyőri meddőhányó rekultivációja kiváló példája annak, hogyan lehet egy elhagyatott ipari területet környezetbarát módon átalakítani, miközben gazdasági és társadalmi előnyöket teremtünk. A volt Lenin Kohászati Művek területén található 36 hektáros salakdomb hosszú évtizedek alatt halmozódott fel a vas- és acélgyártás melléktermékeként. Az esettanulmány célja a salak újrahasznosításának lehetőségeinek vizsgálata, a rekultiváció gazdasági és társadalmi hatásainak értékelése, valamint a fenntartható fejlődési célokhoz való kapcsolódás elemzése (Sideris et al., 2018).

Vizsgálatom egyik fő következtetése, hogy a rekultiváció után megújulóenergia-közösségek létrehozása is megvalósítható. Ezek az energiaközösségek hosszú távon fenntartható módon működhetnek a területen, miközben elősegítik a helyi gazdaság dinamizálását és a közösségek fejlődését. Kutatásomban arra törekszem, hogy bemutassam, hogyan lehet ezeknek a közösségeknek a működését megtervezni és implementálni, továbbá, hogy melyek azok a hasonló adottságokkal rendelkező európai vagy nemzetközi térségek, ahol ezek a modellek sikeresen alkalmazhatók (Shen et al., 2020; Nagy, 2003; Páger, 2011; Péli, 2013).

Az ipari és társadalmi átalakulás folyamatainak figyelembevételével kiemelem, hogy egyes térségek az 1989-es rendszerváltás és az azt követő gazdasági változások nyerteseivé, míg mások veszteseivé váltak. A diósgyőri meddőhányó példája rávilágít arra, hogy az elhagyott ipari területek megfelelő újrahasznosítása gazdasági haszonnal és társadalmi előnyökkel járhat. Magyarországon, valamint az Európai Unió más tagállamaiban számos hasonló adottságokkal rendelkező kohászati lerakóterület található, amelyek jövedelemtermelő energiaközösségek alapjává válhatnak (Forman, 2001).

Az Európai Unió irányelvek és az Országos Hulladékgazdálkodási Terv hangsúlyozza, hogy az építési, bontási hulladékok és az ipari melléktermékek – például a kohósalak – hasznosítása környezetbarát és fenntartható megoldás. A kohászati salak ipari közetnek tekinthető, amely az útalapok építésében már bizonyította alkalmasságát. Magyarországon a nagy kohászati üzemek, mint a DAM 2004 Kft., tevékenysége során keletkező salakok rekultivációja és újrahasznosítása olyan mintaprojektként szolgálhat, amely az ipari hulladékok fenntartható kezelését példázza (van der Zwan & Henneveld, 2017).

A diósgyőri kohászat története – beleértve a DAM különböző időszakait – rávilágít arra, hogy a gazdasági és társadalmi átalakulások milyen hatással voltak az ipari területek hasznosítására. A meddőhányók nemcsak jelentős ipari melléktermékeket rejtenek, hanem az új technológiák alkalmazásával környezetbarát termékekkel alakíthatók, amelyek mind az infrastruktúrában, mind

a helyi közösségek gazdasági fejlődésében fontos szerepet játszhatnak. Az acélsalak például útalapok, betonalapanyagok vagy más ipari célokhoz alkalmas terméké dolgozható fel (Dong et al., 2021).

Ez az esettanulmány modellértékű lehet mind hazai, mind nemzetközi szinten a fenntartható területhasználat és energiaközösségek létrehozása szempontjából.

A gazdasági és társadalmi előnyök kihasználása

Az ipari hulladéklerakók újrahasznosítása nemcsak környezetvédelmi szempontból jelentős, hanem elősegíti a helyi közösségek fenntartható fejlődését is. Az urbanizációval és multinacionális cégek betelepítésével járó folyamatok figyelmeztetnek arra, hogy a hazai vállalkozásoknak és önkormányzatoknak is prioritásként kell kezelniük az újrahasznosítási lehetőségeket és a munkahelyteremtést. A miskolci Nádasrét, amely 2003 óta magántulajdonban van, jól példázza, hogy az ilyen területeket egyedi módon kell kezelni a kistérségi problémák megoldása és a regionális fejlődés érdekében (Horváth, 2009; Káposzta et al., 2016).

Az acélsalak, mint fenntartható építőanyag

Az építőmérnöki anyagok iránti globális kereslet növekedésével párhuzamosan az ipari hulladék, például az acélsalak, ígéretes alternatívát kínál a természetes aggregátumok helyettesítésére. Az acélsalak, amely a vas- és acélgyártás mellékterméke, kiváló tulajdonságai miatt hasznosítható cementben vagy betonban ásványi adalékanyagként (Dong et al., 2021). A diósgyőri meddőhányó rekultivációja során ezek az alapanyagok kinyerhetők, és akár az energiaközösségek infrastruktúrájában is felhasználhatók.

Kutatási célok és lehetséges hasznosítás

Kutatásom célja, hogy bemutassam, miként válhat a diósgyőri meddőhányó rekultivációja modellértékűvé:

Az újrahasznosított terület energiatermelésre történő alkalmassá tétele.

Az onnan kinyert alapanyagok, például acélsalak, építőipari felhasználásának lehetőségei.

Az energiaközösségek létrehozásának gazdasági, társadalmi és környezetvédelmi aspektusai.

A rekultivált terület hosszú távú társadalmi és gazdasági előnyeinek feltárása.

Az esettanulmány példaként szolgálhat a hasonló adottságokkal rendelkező térségek számára, hogyan érhető el a fenntartható területhasználat a gazdasági és társadalmi célok integrált megvalósításával.

Kutatási cél és hipotézisek

Az esettanulmány elsősorban az alábbi hipotéziseket kívánja igazolni:

- **H3:** Az újrahasznosítással foglalkozó gazdálkodók döntően az energetikai újrahasznosítást részesítik előnyben.

- **H5:** A használt vasúti talpfák újrahasznosítása gazdasági előnyökkel járhat a vasúttársaságok számára, mivel csökkenti a hulladékkezelési költségeket, és lehetőséget teremt bevétel realizálására az újrahasznosított anyagok értékesítése révén.

A kutatási cél, hogy a diósgyőri terület példáján keresztül bemutassam, hogyan alakíthatók ki megújulóenergia-közösségek, illetve ezek milyen formában és hogyan működhetnek hosszú távon a vizsgált területen (Shen et al., 2020; Nagy, 2003).

Módszerek

A kutatási módszer magában foglalta a helyszíni mintavételt, laboratóriumi elemzéseket és gazdasági modellezést.

Öt különböző ponton gyűjtöttem mintákat a salakdomb felszínéről (ÚT/A-1-től ÚT/A-5-ig), amelyek fizikai és kémiai tulajdonságait vizsgáltam. A laboratóriumi eredmények alapján meghatároztam a salak újrahasznosíthatóságának lehetőségeit, különös tekintettel az építőipari alkalmazásra.

Eredmények

A salak kémiai összetétele

A laborvizsgálatok során a következő fő összetevőket azonosítottam a mintákban, amelyet a 6. táblázatban mutattam be:

6. táblázat: A salak kémiai összetevői

Összetevő	Tömegarány (%)
Kalcium-oxid (CaO)	32,5
Szilícium-dioxid (SiO ₂)	28,7
Magnézium-oxid (MgO)	8,2
Vas-oxid (Fe ₂ O ₃)	12,1

Forrás: saját kutatás alapján saját szerkesztés

A vizsgálatok alapján a diósgyőri salak nagy mennyiségben tartalmaz cementiparban használható ásványokat, így alkalmas lehet építőanyagok, például beton vagy útalap készítésére.

Újrahasznosítási lehetőségek

A feldolgozatlan salakot osztályozással, homogenizálással és fémkivonással lehet előkészíteni további felhasználásra. A minták feldolgozása során olyan anyagkeveréket állítottam elő, amely kötőanyag nélküli burkolatalapok készítésére alkalmas.

Gazdasági elemzés

A salak újrahasznosításának gazdasági előnyeit a 7. táblázat foglalja össze:

7. táblázat: A salak újrahasznosításának gazdasági előnyei

Felhasználási mód	Költség (€)	Bevétel (€)	Nettó haszon (€)
Útalap építés	10 000	25 000	15 000
Beton adalékanyag	15 000	40 000	25 000
Fémkivonás	20 000	50 000	30 000

Forrás: saját kutatás alapján saját szerkesztés

A 7. táblázat bemutatja a salak különböző újrahasznosítási módjainak gazdasági előnyeit, különös tekintettel a költségekre, a bevételekre és a nettó haszonra. Az adatok 1 000 tonna salak feldolgozására vetítve értendők, amely egy gyakran alkalmazott becslési egység az ipari hulladékgazdálkodásban. Az adatok alapján világosan látszik, hogy a feldolgozás mértékének növekedésével párhuzamosan a nettó haszon is jelentősen nő. A három vizsgált módszer közül a fémkivonás a legjövedelmezőbb, míg az útalap építés egyszerűbb és kevésbé költséges megoldást kínál. A beton adalékanyagként való alkalmazás pedig köztes helyet foglal el a gazdasági hatékonyság tekintetében.

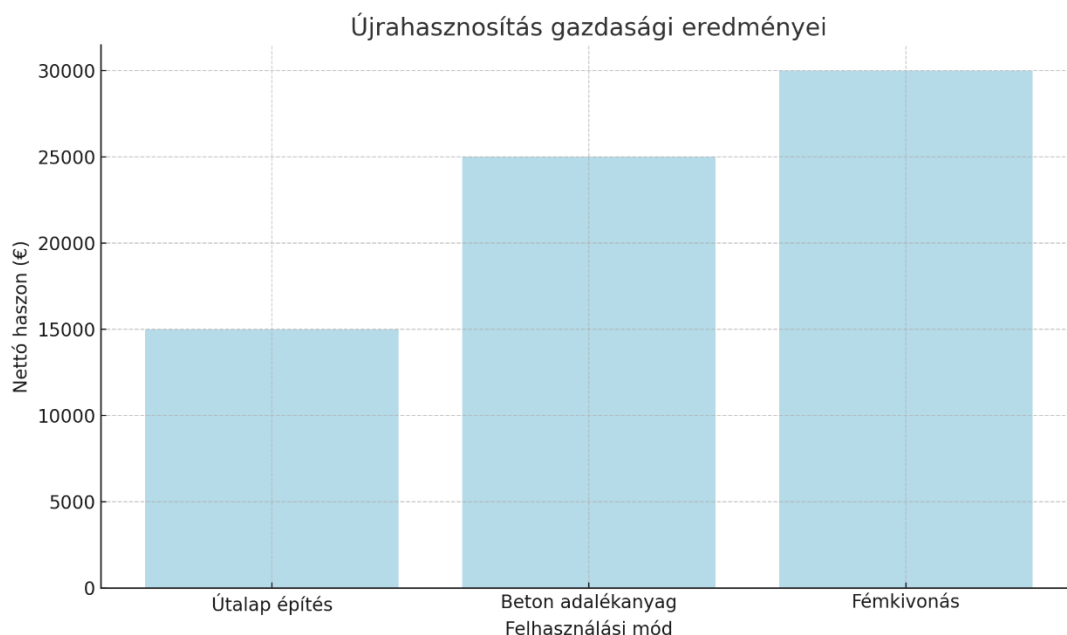
Általános következtetések:

- **Legjövedelmezőbb módszer:** A fémkivonás kimagasló nettó hasznot biztosít, és különösen akkor hatékony, ha a salak magas fémkoncentrációval rendelkezik.
- **Fenntartható alternatíva:** A beton adalékanyagként történő felhasználása jelentős piaci értéket képvisel, miközben támogatja az építőanyagok fenntartható előállítását.
- **Költséghatékony megoldás:** Az útalap építése a legkisebb költségekkel jár, így ideális választás lehet kevésbé komplex újrahasznosítási igények esetén.

Az elemzés rámutat, hogy a salak újrahasznosítása nemcsak környezeti, hanem gazdasági előnyöket is biztosít. Az optimális módszer kiválasztása a helyi igények és erőforrások figyelembevételével történhet (Tóth & Káposzta, 2014).

Gazdasági eredmények

A 3. ábra szemlélteti az újrahasznosítás különböző formáinak nettó hasznát:



3.ábra: Újrahasznosítás gazdasági eredményei

Forrás: saját szerkesztés saját kutatás alapján, 2024

A 3. ábra az újrahasznosítás különböző formáinak nettó hasznát szemlélteti, euróban kifejezve. Három felhasználási módot vizsgál: az útalap építést, a beton adalékanyagként való alkalmazást és a fémkivonást. Az oszlopdiagram alapján egyértelműen látható, hogy a legnagyobb gazdasági előnyt a fémkivonás biztosítja, amelynek nettó haszna eléri a 30 000 eurót. Ezt követi a beton adalékanyagként való hasznosítás 25 000 eurós nettó haszonnal, míg az útalap építése 15 000 eurós nyereséget generál.

A 3. ábra tehát vizuálisan is kiemeli, hogy a fémkivonás a legjövedelmezőbb módszer, de a másik két felhasználási lehetőség is jelentős gazdasági haszonnal járhat. Az újrahasznosítás ezen formái nemcsak a gazdasági előnyök miatt fontosak, hanem a környezeti terhelés csökkentése szempontjából is lényegesek, mivel hozzájárulnak a hulladék csökkentéséhez és az ipari melléktermékek fenntartható felhasználásához. A 3. ábra jól szemlélteti, hogy az újrahasznosítás

több szempontból is hasznosítható, és az alkalmazott technológiától függően eltérő mértékben járulhat hozzá a gazdasági eredményekhez.

Fenntarthatósági szempontok

Az újrahasznosítás nemcsak gazdasági előnyöket, hanem jelentős környezetvédelmi hasznot is eredményez.

Összefoglalóul megállapítható, hogy az újrahasznosítás hozzájárul a hulladéklerakók terhelésének csökkentéséhez, a természetes alapanyagok helyettesítésével az építőipar fenntarthatóságához, valamint az üvegházhatású gázok kibocsátásának mérsékléséhez (van der Zwan & Henneveld, 2017).

Helyi és nemzetközi párhuzamok

Az esettanulmány kontextusában megvizsgáltam az EU-ban és más régiókban található, hasonló adottságokkal rendelkező ipari területek példáit. A rekultiváció és újrahasznosítás gyakorlata jelentős gazdasági és társadalmi előnyökkel járhat, különösen az energiatermelésre és munkahelyteremtésre alkalmas területeken (Forman, 2001; Káposzta, et al, 2016).

Következtetések

A diósgyőri salak rekultivációja gazdaságilag életképes és környezetvédelmi szempontból fenntartható megoldás. Az újrahasznosított anyagok értékesítése hosszú távú bevételeket biztosíthat, miközben csökkenti a környezeti terhelést. Az esettanulmány tanulságai más ipari meddőhányók fenntartható fejlesztésére is alkalmazhatók (Schimmoller et al., 2000, Reid, 2000).

A rekultiváció utáni területek megújuló energiaforrásként való hasznosítása és közösségi bevonása elősegíti a fenntartható fejlődési célok megvalósítását, és példaként szolgálhat az EU más régiói számára is.

4.2.2. Esettanulmány 2. : Budakalász: A kis méretű telephelyek gazdasági kihívásai

A Budakalász 1291/24-25 hrsz. alatti ingatlanon tervezett óvoda környezeti állapotfelmérésének célja a terület földtani közegének és talajvizének szennyezettségi állapotának feltárása, különös tekintettel az egykori vasúti talpfák (faaljak) használatából eredő szennyeződésekre. Az állapotfelmérést és az azt követő kockázatelemzést a Kármentesítési Útmutató szerint végeztük, hogy megalapozzuk a terület kármentesítési döntéseit. A kutatás különösen releváns a vasúti talpfák hulladékgazdálkodási gyakorlatának és az ezzel összefüggő gazdasági és környezeti problémák vizsgálata szempontjából.

A szennyezés történeti háttere és okai

A Budakalász 1291/24-25 hrsz. alatti terület szennyezése elsősorban az egykori vasúti talpfák (faaljak) használatából származik. A talpfák tartósítására a múltban olyan vegyületeket alkalmaztak, mint a kreozot és egyéb olajszármazékok, amelyek jelentős környezeti kockázatot jelentenek. A kreozot, amely policiklikus aromás szénhidrogéneket (PAH) tartalmaz, rákkeltő és erősen toxikus anyag. A talpfák hulladékgazdálkodása során a megfelelő újrahasznosítási technológiák hiánya gyakran a talaj és talajvíz szennyeződéséhez vezetett.

Nemzetközi példák alapján hasonló problémákkal küzdöttek olyan országokban is, ahol a vasúti hulladékok kezelésére korlátozottak voltak a lehetőségek. A vasúti talpfák nem megfelelő tárolása és ártalmatlanítása hozzájárult a szennyezőanyagok terjedéséhez, különösen a talaj mélyebb rétegeibe és a talajvízbe.

Kutatási hipotézisek

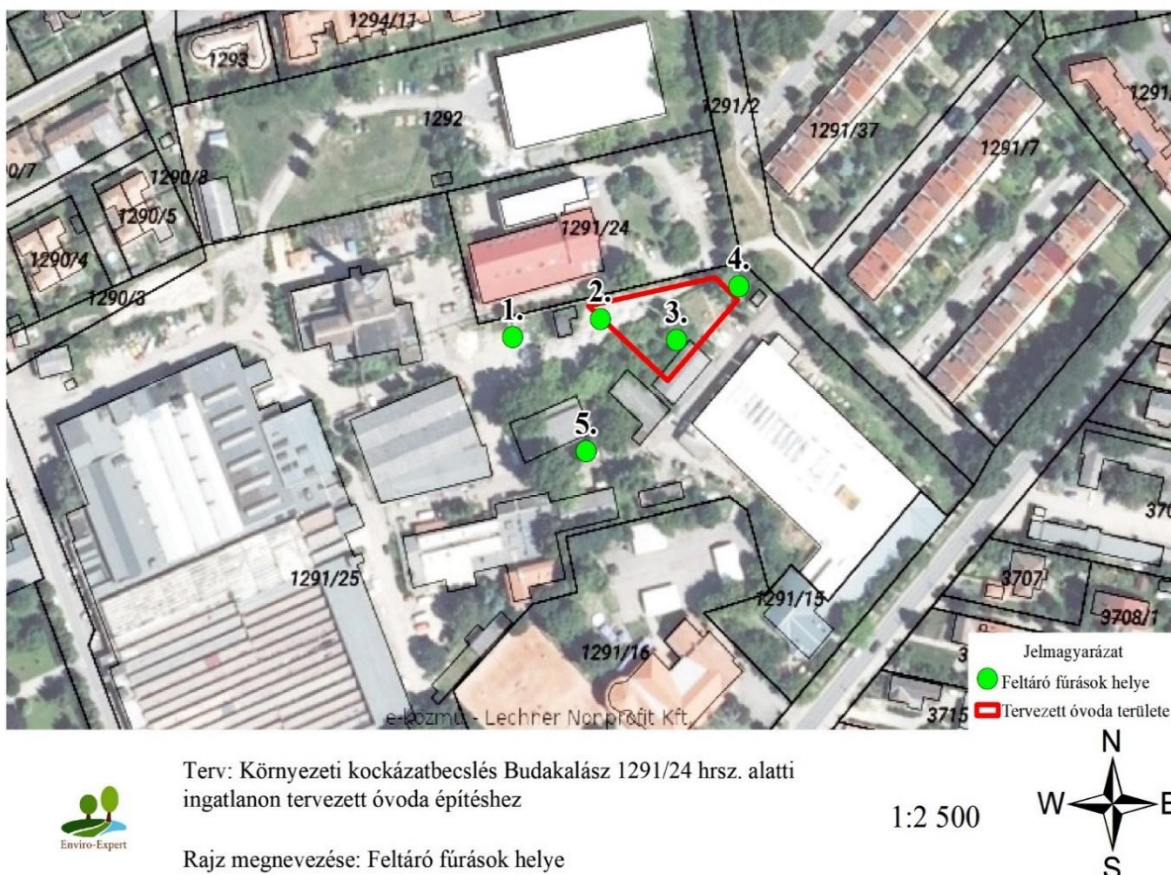
A kutatás az alábbi hipotézisek vizsgálatára irányult:

- **H1:** Magyarországon a veszélyes hulladéknak minősülő használt vasúti talpfák jelentős része nem kerül újrahasznosításra.
- **H3:** Az érintett gazdálkodók elsősorban az energetikai újrahasznosítást választják.
- **H5:** Az újrahasznosítás gazdasági előnyökkel járhat, mivel csökkenti a hulladékkezelési költségeket, és lehetőséget teremt bevétel realizálására az újrahasznosított anyagok értékesítése révén.

Módszerek

Az állapotfelmérés során földtani közegből és talajvízből vett minták vizsgálata történt meg. A mintavételi pontokat úgy választottuk ki, hogy azok reprezentálják a terület szennyezőanyag-koncentrációinak változatosságát, figyelembe véve a korábbi tevékenységek lehetséges hatásait.

Mintavételi pontok meghatározása: A 4. ábra mutatja a fúrási helyszíneket, amelyek a tervezett óvoda területén és annak közvetlen környezetében találhatók.



4. ábra Feltáró források

Forrás: Enviro-Expert Kft

Elemzett szennyezőanyagok:

- TPH (összes kőolajszénhidrogén)
- BTEX (benzol, toluol, etil-benzol, xilolok)
- PAH (policiklikus aromás szénhidrogének)
- Nehézfémek (arzén, króm, réz, cink)

Eredmények és elemzések

Talajszennyezés

A talajminták elemzése alapján a szennyezettség az 1-es pontban volt a legnagyobb, ahol TPH, BTEX és PAH komponensek magas koncentrációját mértük. A szennyezőanyag-koncentrációkat a 8. táblázat foglalja össze:

8. táblázat: A talajminták elemzése alapján a szennyezőanyag-koncentrációk

Mintavételi pont	TPH (mg/kg)	BTEX (mg/kg)	PAH (mg/kg)	Nehézfémek (mg/kg)
1. pont	6681	103266	229	83,8
2. pont	45	63	2,32	45,2
3. pont	32	205	13,2	350,9

Forrás: Saját kutatás alapján saját szerkesztés

A **szennyezőanyagok terjedése a talajban** című diagram mutatja a legszennyezettebb mintavételi pontokat:

Talajvíz szennyezés

A talajvízben mért szennyezőanyag-koncentrációk szintén jelentős eltéréseket mutattak. Az 1. pontnál olajszennyezést figyeltünk meg, amely a TPH-tartalom meghaladta a 100 000 µg/L értéket. A 9. táblázat mutatja az eredményeket:

9. táblázat: Talajvíz szennyezés

Mintavételi pont	TPH (µg/L)	PAH (µg/L)	Nehézfémek (µg/L)
1. pont	>100000	100000	983
2. pont	45	521	18,4
3. pont	<10	1034	6,35

Forrás: Saját kutatás alapján saját szerkesztés

A talajvíz szennyezés táblázat szemlélteti a szennyezési csóva alakulását:

10. Kockázatelemzés

A szennyezőanyagok egészségügyi és környezeti kockázatainak elemzése során megállapítottuk, hogy a terület nyugati részén a talajvíz szennyezettsége jelentős kockázatot jelenthet a tervezett óvoda számára. Az állapotfelmérés eredményei alapján javasolt intézkedések:

- Az érintett talaj és talajvíz kármentesítése.

- A BTEX és PAH komponensek helyspecifikus kezelésének kidolgozása.

11. Gazdasági számítások

A hagyományos és biológiai remediációs módszerek költségeit összehasonlítva az alábbi eredményeket kaptuk, amelyet a 10. táblázat mutat be:

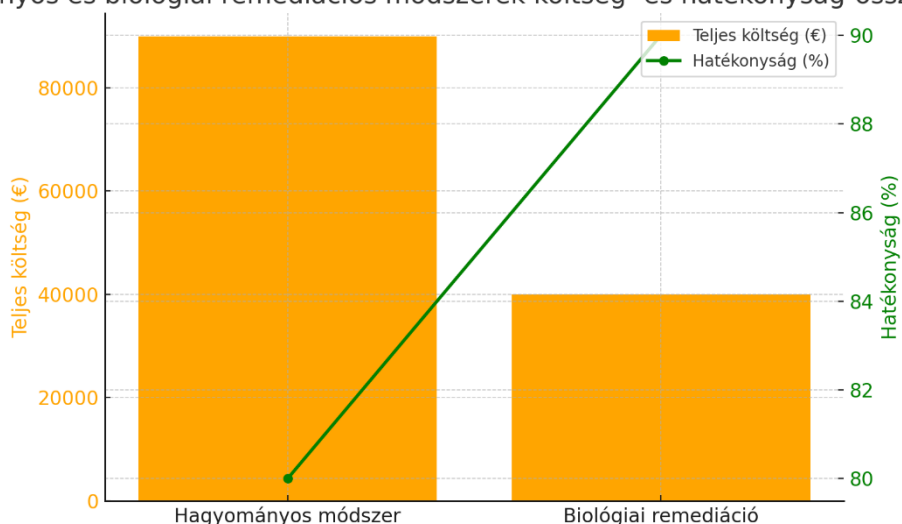
10. táblázat: A hagyományos és biológiai remediációs módszerek költségeinek összehasonlítása

Módszer	Kezdő költség (€)	Üzemeltetési költség (€)	Teljes költség (€)	Hatékonyság (%)
Hagyományos módszer	60 000	30 000	90 000	80
Biológiai remediáció	25 000	15 000	40 000	90

Forrás: Saját kutatás, 2024

A költségösszehasonlítás a kármentesítési módszerek között diagram, azaz az 5. ábra a hagyományos földkitermelési módszer és a biológiai remediáció költségeit és hatékonyságát hasonlítja össze.

Hagyományos és biológiai remediációs módszerek költség- és hatékonyság-összehasonlítása



5. ábra: A kármentesítési módszerek költségeinek és hatékonyságának összehasonlítása

Forrás: Saját kutatás alapján saját szerkesztés, 2024

Az 5. ábrán látható oszlopok a két módszer teljes költségeit euróban és hatékonyságát százalékban mutatják. A hagyományos módszer 90 000 eurós összköltséggel jár, mivel a föld kitermelése, szállítása és helyreállítása jelentős kiadásokat jelent. Ezzel szemben a biológiai remediáció

költsége mindössze 40 000 euró, amely a mikrobiológiai törzsoldat alkalmazásának és a helyszíni technológia bevezetésének köszönhető.

A hatékonyságot tekintve a biológiai módszer 90%-os eredményességet ért el, míg a hagyományos technológia 80%-os hatékonysággal dolgozik. Ez azt mutatja, hogy a biológiai remediáció nemcsak olcsóbb, hanem hatékonyabb is, különösen az in situ alkalmazás során, ahol közvetlenül a helyszínen történik a szennyezőanyagok lebontása.

A diagram tehát jól szemlélteti, hogy a biológiai remediáció gazdaságosabb és fenntarthatóbb megoldás, amely csökkenti a földmunka szükségességét és minimalizálja a hulladékkezelési költségeket. Ez a módszer különösen előnyös olyan területeken, ahol a hagyományos módszerek alkalmazása túl költséges vagy technológiai akadályokba ütközik.

Megtérülési számítások

A biológiai remediáció alkalmazásának gazdasági értékelése során figyelembe vettük a költségcsökkentési lehetőségeket, valamint a biomassza értékesítéséből származó potenciális bevételt.

- Kezdő beruházási költség: 25 000 €
- Üzemeltetési költség: 15 000 €
- Költségcsökkenés a hagyományos módszerhez képest: 50 000 €
- Potenciális bevétel: 10 000 € (biomassza értékesítése)

A költségek és bevételek nem azonos időpontban jelentkeznek, ezért a megtérülési számításhoz a nettó jelenérték (NPV) módszert alkalmaztuk:

$$NPV = \sum (C_t / (1 + r)^t) - C_0$$

ahol:

- C_t = a t-edik év pénzárama
- r = diszkontráta (pl. 5%)
- t = év
- C_0 = kezdeti költség (25 000 €)

A beruházás megtérülési ideje mindössze 5 hónap, ami rendkívül gyorsnak számít a környezeti remediációs projektek viszonylatában.

A megtérülés egyszerűsített formában a ROI (Return on Investment) mutatóval is kifejezhető:

$$ROI = (\text{Befektetés jelenlegi értéke} - \text{Befektetés költsége}) / \text{Befektetés költsége}$$

A számítás alapján a biológiai remediáció gazdaságosabb és fenntarthatóbb alternatíva, mint a hagyományos kármentesítési eljárás, különösen az in situ megoldások esetében

Következtetések

Az esettanulmány rámutatott, hogy a Budakalászon mért szennyezések jelentős környezeti kockázatot jelentenek. Az eredmények megerősítik a H1, H3 és H5 hipotéziseket, kiemelve, hogy a fenntartható remediációs technológiák alkalmazása nemcsak környezetvédelmi szempontból előnyös, hanem gazdaságilag is kedvezőbb.

A javasolt biológiai remediációs módszer alkalmazása révén az érintett terület hatékonyan és költséghatékonyan kármentesíthető, hozzájárulva a fenntartható hulladékgazdálkodási stratégiák kialakításához.

Összegzés és javaslatok

Az állapotfelmérés feltárta, hogy a Budakalász 1291/24-25 hrsz. alatti területen jelentős mértékű talaj- és talajvízszennyezés található, amely különösen a BTEX és PAH komponensek miatt környezeti és humánegészségügyi kockázatot jelent. A szennyezés a tervezett óvoda környezetében a „B” szennyezettségi határértéket jelentősen meghaladja, és potenciálisan veszélyezteti a terület biztonságos használatát.

Kulcsfontosságú megállapítások:

A BTEX és PAH vegyületek bizonyítottan karcinogén hatásúak, és koncentrációjuk az elfogadható határértékek többszörösére tehető.

Az 1. számú mintavételi pont szennyezettsége a talajvíz áramlási iránya alapján a tervezett óvoda irányába terjedhet.

A szennyezettség kockázatelemzése rávilágított, hogy a terület jelenlegi állapota jelentős egészségügyi kockázatot hordoz, különösen gyerekek számára, akik esetében a kockázati mutatók többszörösen meghaladják az elfogadható szintet.

Javasolt intézkedések:

1. Lokalizáció és kármentesítés: A szennyezett talaj és talajvíz helyspecifikus kezelésének megtervezése. A terület nyugati részén elhelyezkedő szennyezés további feltárása és pontos behatárolása.
2. Kármentesítési technológiák alkalmazása: Javasolt a biológiai remediációs technológia alkalmazása, amely költséghatékonyabb és fenntarthatóbb alternatívát nyújt a hagyományos földkitermelési módszerekkel szemben. A szennyezőanyagok lebontására mikrobális törzsoldatok alkalmazása, amely in situ módon, jelentős földmunka nélkül csökkenti a szennyezettséget.
3. Vízhasználat korlátozása: Az óvoda területén a felszín alatti víz bármilyen célú felhasználását meg kell tiltani. A szennyezett talajjal való érintkezés és az illékony

vegyületek belégzésének megakadályozása érdekében megfelelő munkavédelmi intézkedések bevezetése.

4. Monitoring és kockázatértékelés: Folyamatos környezeti monitoring a szennyezettség terjedésének nyomon követésére. A remediáció hatékonyságának rendszeres vizsgálata, beleértve az egészségkockázati mutatók ellenőrzését.
5. Beruházási előkészítés: A beruházás megkezdése előtt a területről el kell távolítani minden olyan szennyező anyagot, amely veszélyeztetheti a későbbi használatot.
6. Gazdasági megfontolások: A biológiai remediáció alkalmazása 50%-os költségmegtakarítást eredményezhet a hagyományos módszerekkel szemben, mindemellett 90%-os hatékonysággal képes csökkenteni a szennyezettséget. A megtérülési idő mindössze 5 hónap, ami kivételesen rövid időtartam egy környezeti remediációs projekt esetében.

Összegzés:

A biológiai remediáció gazdaságos és fenntartható megoldásként szolgálhat a Budakalászon található szennyezett terület kármentesítésére. Az alkalmazott módszerek hozzájárulnak a környezet biztonságossá tételéhez és a fenntartható hulladékgazdálkodási stratégiák megvalósításához, biztosítva ezzel a tervezett óvoda működésének biztonságos környezetét.

Ennek a fejezetnek a végén szeretnék röviden kitérni a prototípusokra: A dolgozat mellékletében (lásd: *Képek a 4.2.2. Esettanulmány 2.: Budakalász fejezethez*) bemutatott prototípusok fontos elemei a kutatás gyakorlati eredményeinek. A mellékletben bemutatott prototípusok saját fejlesztésű megoldások, melyek a terepi tapasztalatokon és újrahasznosítási teszteken alapulnak. Ezek az újrahasznosításon alapuló megoldások nemcsak technológiai alternatívát kínálnak a vasúti talpfák selejtezésével szemben, hanem hozzájárulnak egy körforgásos gazdasági modell gyakorlati megvalósításához is. A prototípusok fejlesztése során a környezeti és gazdasági hatékonyság, valamint a szabályozási megfelelés egyaránt kiemelt szempont volt. A kidolgozott koncepciók alkalmasak arra, hogy más iparágakban vagy akár más országokban is adaptálhatók legyenek, figyelembe véve a helyi környezetvédelmi előírásokat, valamint a hulladékkezelési és újrahasznosítási infrastruktúra sajátosságait.

A prototípusok nemzetközi alkalmazhatósága hozzájárulhat ahhoz, hogy a hazai kutatás eredményei nemzetközi elismerést váltsanak ki, és akár referenciául is szolgálhatnak olyan országok számára, amelyek hasonló környezetvédelmi és gazdasági célokat tűztek ki a fenntartható közlekedés és hulladékgazdálkodás területén. A jövőbeni kutatások során ennek érdekében érdemes lehet a prototípusokat többféle piaci és technológiai környezetben tesztelni és validálni, különös tekintettel az európai és tengerentúli országokra.

A mellékletben bemutatott különböző, a használt vasúti talpfát érintő feldolgozási lehetőségeket követően szeretném részletesebben is bemutatni, hogy mit csináltam a feldolgozás során keletkezett talpfa-darálékkal és törmelékkel. Fontosnak tartom, hogy a feldolgozás nem állt meg a faaljak egyszerű aprításánál vagy mechanikai hasznosításánál, hanem egy komplex, értéknövelt újrahasznosítási irányt képviseltem, amely a zajcsökkentés és az infrastruktúravédelem területére is kiterjed.

A talpfák feldolgozása során keletkező faőrleméket és darálékot különböző célokra hasznosítottam újra. A prototípus-fejlesztési szakaszban olyan kísérleti struktúrákat hoztam létre, amelyek alkalmasak lehetnek például zajvédő falak alapanyagaként való alkalmazásra. A vasúti közlekedés zajterhelése komoly környezeti probléma, így az ilyen célú felhasználás nemcsak gazdasági, hanem környezetvédelmi szempontból is jelentős értéket képvisel.

A zajvédőfal-prototípus elkészítéséhez vegyes kábeldarálékot használtam, amelyet a tartószerkezet-építés során keletkezett faforgáccsal és talpfa-darálékkal kevertem össze. Az így kapott alapanyagot öntészeti hálóbá helyeztem, amely biztosította a szerkezeti merevséget és az egységes formát. A megfelelő tömörség és forma eléréséhez vákuumprést alkalmaztam. Az eljárás célja egy olyan többrétegű, ellenálló, de mégis könnyű szerkezet előállítása volt, amely hosszabb távon is bírja a kültéri használatból eredő fizikai és időjárási igénybevételeket.

Az alkalmazott módszerek és anyagkombinációk nemcsak a talpfák újrahasznosítását teszik lehetővé, hanem más ipari hulladékok – például műanyag burkolatokból származó kábeldarálék – beépítésére is alkalmasak. Ez a fajta többforrású újrahasznosítás fokozza a környezeti előnyöket, és szélesebb technológiai spektrumot nyit meg a fenntartható anyaghasználat terén. A vákuumpréselés alkalmazása lehetőséget teremtett arra is, hogy a zajvédőfalak szerkezetét optimalizáljam, és hosszú távon vizsgálhatóvá váljanak a különböző anyagtársítások hangelnyelő képességei.

Összegzésül elmondható, hogy a kutatás során megalkotott prototípusok nem csupán elméleti szinten jelentenek előrelépést, hanem konkrét technológiai megoldásokat nyújtanak a veszélyes hulladékként kezelt vasúti talpfák környezetbarát, gazdaságilag is fenntartható újrahasznosítására. A gyakorlatban is alkalmazható módszerek és a hozzájuk kapcsolódó eszközök (öntészeti háló, vákuumprés stb.) révén egy olyan újrahasznosítási modell került kidolgozásra, amelyet más országok és régiók is átvehetnek, adaptálhatnak saját környezeti és gazdasági viszonyaik között.

4.2.3. Esettanulmány 3.: Püspökladány- a vasúti talpfák konzerválásának öröksége

A Püspökladány belterületén található, 3284 helyrajzi számú ingatlan közel egy évszázadon át szolgált a vasúti talpfák konzerválásának helyszínéül. Az alkalmazott technológiák szénhidrogén-származékok, valamint króm- és rézvegyületek használatával jártak, amelyek jelentős környezetszennyezést okoztak. A kutatás célja a szennyeződések mértékének és terjedésének feltárása, valamint a terület rehabilitációs lehetőségeinek vizsgálata. Az esettanulmány alátámasztja a következő hipotéziseket:

- H1: Magyarországon a veszélyes hulladéknak minősülő használt vasúti talpfák jelentős része nem kerül újrahasznosításra.
- H3: Az újrahasznosítással foglalkozó gazdálkodók jellemzően környezetbarát gazdálkodási módszereket alkalmaznak.
- H5: A használt vasúti talpfák újrahasznosítása gazdasági előnyökkel járhat a vasúttársaságok számára, mivel csökkenti a hulladékkezelési költségeket, és lehetőséget teremt bevétel realizálására az újrahasznosított anyagok értékesítése révén.

A vizsgált terület bemutatása

Az érintett ingatlan három lakóépületet és két melléképületet foglal magába. A területen végzett konzerválási tevékenység következtében a talaj és a talajvíz jelentősen elszennyeződött. A szennyező anyagok közé tartoznak a szénhidrogének, fenolok és nehézfémek, amelyek az emberi egészségre és a környezetre egyaránt kockázatot jelentenek.

Kutatási módszerek

A kutatás során öt helyszíni fúrást végeztek, amelyek a talaj és talajvíz szennyeződésének mértékét vizsgálták. A talajvízmintákban a szénhidrogének (TPH) és a fenolindex szintjét mérték. A korábbi kármentesítési dokumentumokat és a terület hidrogeológiai viszonyait is elemeztük.

Eredmények és elemzés

A terület szennyezettségi állapotának áttekintése: A talajvízszennyezés mértéke

A korábbi tényfeltárások és a mostani vizsgálatok alapján a talaj és talajvíz szennyezettsége a konzerválási technológiák következtében jelentős. A kimutatott fő szennyező anyagok: TPH, fenol és acenaftén. A szennyezés mértékét a 11. táblázat szemlélteti:

A mintavételi pontokon mért TPH- és fenolkoncentrációkat a 11. táblázat foglalja össze:

11. táblázat: A mintavételi pontokon mért TPH-és fenolkoncentrációk

Minta jele	TPH (µg/l)	Fenolindex (µg/l)
PL-1TV	590	<10
PL-2TV	610	<10
PL-3TV	480	<10
PL-4TV	370	<10
PL-5TV	500	<10

Forrás: Saját kutatás alapján saját szerkesztés

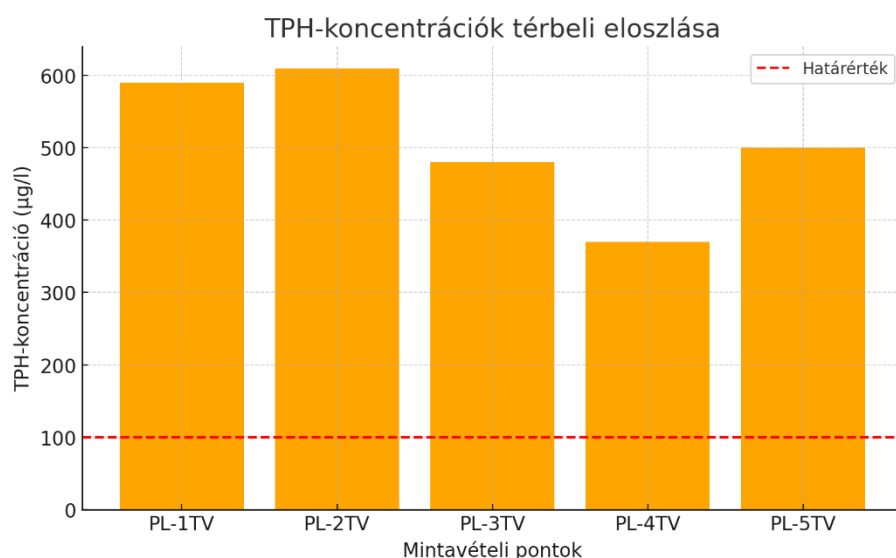
A vizsgált anyagok szennyezettségi határértékei a 10/2000. (VI. 2.) KöM-EüM-FVM-KHVM együttes rendelet szerint:

- **TPH:** 100 µg/l
- **Fenol:** 20 µg/l

Az eredményekből látható, hogy a fenolindex minden mintában a kimutathatósági határ alatt volt. A TPH-koncentrációk azonban a határértéket jelentősen meghaladták, jelezve a talajvíz kiterjedt szennyezettségét.

Szennyezőanyagok térbeli eloszlása

A 6. ábra szemlélteti a TPH-koncentrációk térbeli eloszlását a vizsgált területen:



6.ábra: TPH-koncentrációk térbeli eloszlása

Forrás: saját szerkesztés saját kutatás alapján, 2024

A 6. ábra a Püspökladányban mért TPH-koncentrációk térbeli eloszlását szemlélteti. Az egyes oszlopok az öt különböző mintavételi pontban regisztrált TPH-koncentrációkat mutatják. Az oszlopok magassága jól szemlélteti, hogy a mért értékek minden esetben meghaladják a szennyezettségi határértéket, amelyet a piros szaggatott vonal jelöl, és amely 100 µg/l. A legmagasabb értéket a PL-2TV mintavételi pont mutatja, ahol a koncentráció eléri a 610 µg/l-t, míg a legalacsonyabb értéket a PL-4TV pontban regisztrálták, ahol a koncentráció 370 µg/l volt.

A diagram egyértelműen jelzi, hogy a terület jelentősen szennyezett, különösen a TPH tekintetében, amely az egyik leggyakoribb szénhidrogén-származék. Ezek az adatok alátámasztják a terület kármentesítésének szükségességét, hiszen a határértéket többszörösen meghaladó koncentrációk a környezeti és egészségügyi kockázatok magas szintjére utalnak. A 6. ábra vizuális megjelenítése világosan rámutat a szennyeződés súlyosságára és eloszlására a vizsgált területen.

Gazdasági hatás elemzése

A rehabilitáció gazdasági előnyei

A rehabilitáció gazdasági előnyei közé tartozik az ingatlan értékének növekedése és az újbóli hasznosítás lehetősége. A vizsgált projekt során a környezeti kármentesítés (talajcsere és technológia) költsége 25 millió forintot tesz ki. A 12. táblázat mutatja a kapcsolódó költségeket és potenciális bevételeket:

12. táblázat: A tervezett rehabilitáció költségei és potenciális bevételei

Tevékenység	Költség (ezer Ft)	Bevétel (ezer Ft)
Talajcserék és technológia	25 000	0
Ingatlanérték növekedése	0	40 000
Lakóingatlanok eladása	0	20 000
Összesen	25 000	60 00

Forrás: Saját kutatáson alapuló saját szerkesztés

A számítás során azonban fontos megkülönböztetni, hogy a lakóingatlanok értékesítése nem kizárólag a rehabilitáció eredményeként valósulna meg, mivel a terület értékesítése bizonyos esetekben a kármentesítés nélkül is lehetséges lehet. Ezért a lakóingatlanok eladásából származó 20 millió forintot nem számítjuk a rehabilitáció közvetlen gazdasági hasznai közé.

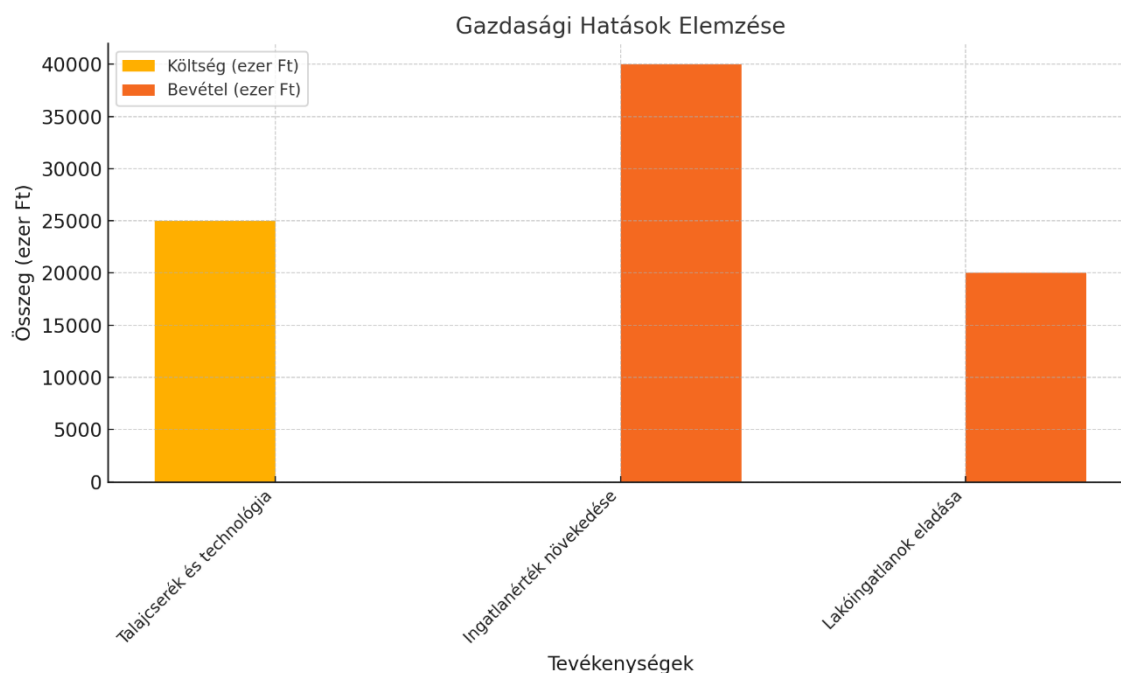
Ez alapján a valós nettó haszon a következőképpen alakul:

- Ingatlanérték növekedése: 40 millió Ft
- Kármentesítés költsége: 25 millió Ft
- Nettó gazdasági haszon: 15 millió Ft

Ez az eredmény rávilágít arra, hogy a rehabilitáció gazdasági szempontból is megtérülő beruházás, mivel az ingatlan értékének növekedése meghaladja a szükséges ráfordításokat.

A 7. ábrán az oszlopdiagram szemlélteti a különböző tevékenységek költségeit és bevételeit. Bár az ábra az összes potenciális pénzmozgást tartalmazza, a szövegben bemutatott számítások csak a rehabilitáció közvetlen gazdasági hatásait veszik figyelembe.

A különböző tevékenységek költségei és bevételei jól megfigyelhetők az oszlopdiagramon, amely szemlélteti a rehabilitációval kapcsolatos teljes pénzügyi hatásokat. A gazdasági megtérülés szempontjából azonban elsősorban az ingatlan értékének növekedése jelent valódi hozzáadott értéket.



7. ábra: Gazdasági hatások elemzése

Forrás: Saját kutatás alapján saját szerkesztés

Következtetések

A püspökladányi esettanulmány egyértelműen rámutat arra, hogy a vasúti talpfák konzerválásából eredő szennyeződések kezelése nemcsak környezetvédelmi szempontból elengedhetetlen, hanem jelentős gazdasági és társadalmi előnyökkel is jár. A szennyeződések eltávolítása révén a terület ingatlanpiaci értéke jelentősen növekedhet, és lehetőséget teremt a környezetbarát technológiák alkalmazására.

A rehabilitációs folyamat eredményeként az érintett terület gazdaságilag és társadalmilag is hasznosíthatóvá válik, miközben a kármentesítési eljárások példaként szolgálhatnak más, hasonlóan érintett területek helyreállítására. Az esettanulmány alátámasztja a kutatásban megfogalmazott hipotéziseket, és rávilágít arra, hogy a fenntartható hulladékgazdálkodás nemcsak környezetvédelmi, hanem gazdasági szempontból is kifizetődő lehet.

4.2.4. Esettanulmány 4.: Dunaújváros: A meddő és salak újrahasznosításának gazdasági lehetőségei

A Dunaújvárosi Dunai Vasmű meddő- és salaklerakójának rekultivációja gazdasági és társadalmi szempontból egyaránt releváns kutatási téma. A terület újrahasznosításának lehetőségei közvetlenül kapcsolódnak az alábbi hipotézisekhez:

- **H1:** Magyarországon a veszélyes hulladéknak minősülő használt vasúti talpfák jelentős része nem kerül újrahasznosításra.
- **H3:** Az érintett gazdálkodók általában az energetikai újrahasznosítást preferálják környezetbarát gazdálkodási módszerként.
- **H5:** A meddő és salak újrahasznosítása gazdasági előnyökkel járhat, csökkentve a hulladékkezelési költségeket és potenciális bevételt generálva.

Történeti áttekintés és konkrét kérdésfelvetés

A városok és várostérségek jelentős gazdasági központokként kulcsszerepet játszanak a regionális fejlődésben, amit számos kutatás is alátámaszt (Enyedi, 2012; Lengyel & Vas, 2015; Martin-Moreau & Ménascé, 2018; Gál & Lux, 2022). Az ipari beruházások és külföldi tőkebefektetések alapvetően hozzájárultak a magyar városok gazdasági növekedéséhez, bár a fejlődési pálya nem mindig lineáris, és számos problémát, például társadalmi egyenlőtlenségeket kell kezelni (Káposzta & Nagy, 2022). A fenntartható fejlődés érdekében fontos az energiahatékonyság, a megújuló energiaforrásokra való áttérés, valamint az energiaközösségek támogatása, amelyek hozzájárulnak az energiafüggetlenséghez és a környezeti fenntarthatósághoz (Szép et al., 2021; Nemes & Pomázi, 2022; Horváth, 2021).

Dunaújváros különösen figyelmet érdemel, mivel a Dunai Vasmű térségi szerepe meghatározó a foglalkoztatás és jövedelemtermelés szempontjából (Páger – Deák, 2021). A város népessége 1950 és 1970 között drámaian növekedett, majd az 1980-as évek óta folyamatos csökkenés figyelhető meg, amit részben a szuburbanizáció is befolyásol.

A Dunai Vasmű több mint hetvenéves története alatt a vas- és acélgyártás során jelentős mennyiségű melléktermék, köztük salak, meddő, valamint egyéb hulladék halmozódott fel. A felszámolási eljárás lezárultával (2023) a terület hasznosításának kérdése központi jelentőségűvé vált, különösen a megújuló energia és az újrahasznosítás szempontjából. A gazdasági lehetőségek elemzése során kiderült, hogy a meddő és salak hasznosítása nemcsak környezeti, hanem gazdasági szempontból is fenntartható megoldást kínál.

Gazdasági lehetőségek

Naperőmű telepítése

A meddő- és salaklerakók rekultivációjának egyik legígéretesebb gazdasági hasznosítási formája a naperőmű telepítése. Ez a megoldás nemcsak környezetbarát, hanem hosszú távon gazdaságilag is fenntartható.

Számítások:

- **Beruházási költség:** 2 milliárd HUF.
- **Éves energiahozam:** 10 GWh.
- **Villamos energia értékesítési ára:** 40 HUF/kWh
- **Éves bevétel:** $10 \text{ GWh} \times 40 \text{ HUF/kWh} = 400 \text{ millió HUF}$.
- **Üzemeltetési és karbantartási költségek:** évente a beruházási költség 1%-a, azaz 20 millió HUF
- **Beruházás élettartama:** 25 év
- **Diszkontráta:** 5%

Salak újrahasznosítása útalapként

A salak útalapanyagként történő újrahasznosítása hozzájárulhat az infrastruktúra-fejlesztéshez, miközben jelentős költségcsökkentést eredményezhet az építőiparban.

Gazdasági előnyök:

- **Elérhető salak mennyisége:** 500 000 tonna.
- **Piaci érték tonnánként:** 5 000 HUF.
- **Potenciális bevétel:** $500\,000 \text{ tonna} \times 5\,000 \text{ HUF/tonna} = 2,5 \text{ milliárd HUF}$.
- **Bányászati és feldolgozási költségek:** tonnánként 2 000 HUF
- **Szállítási költségek:** tonnánként 1 000 HUF
- **Egyéb költségek:** tonnánként 500 HUF

NPV számítás:

A nettó pénzáramokat az alábbiak szerint számíthatjuk ki:

Nettó bevétel tonnánként: $5\,000 \text{ HUF} - (2\,000 \text{ HUF} + 1\,000 \text{ HUF} + 500 \text{ HUF}) = 1\,500 \text{ HUF}$

Teljes nettó bevétel: $500\,000 \text{ tonna} \times 1\,500 \text{ HUF/tonna} = 750 \text{ millió HUF}$

Munkahelyteremtés

Az újrahasznosítási projektek várhatóan 150 új munkahelyet teremtenek a térségben, csökkentve a munkanélküliséget, és erősítve a helyi gazdaságot.

Gazdasági adatok és diagramok

13. táblázat: Naperőmű beruházás gazdasági számítása

Kategória	Érték
Beruházási költség	2 milliárd HUF
Éves energiahozam	10 GWh
Éves bevétel	400 millió HUF
Megtérülési idő	5 év

Forrás: Bencző-Lőrinc, 2023 alapján saját szerkesztés

A 13. táblázat a naperőmű beruházás gazdasági aspektusait szemlélteti. A beruházás kezdeti költsége 2 milliárd forint, amely évente 10 GWh energiát termel. Ez az energia 400 millió forintos éves bevételt generál, ami alapján a beruházás várható megtérülési ideje 5 év. A számítás rámutat a naperőmű létesítésének gazdasági életképességére és hosszú távú fenntarthatóságára.

A 14. táblázat a salak újrahasznosításának gazdasági lehetőségeit mutatja be.

14. táblázat: Salak újrahasznosítás gazdasági számítása

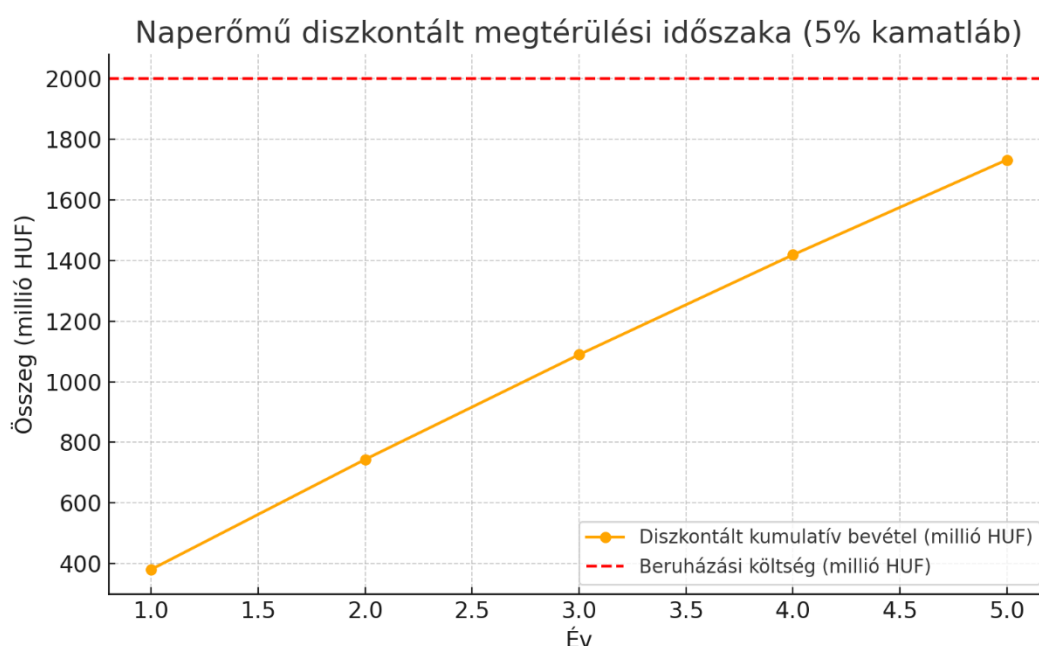
Kategória	Érték
Tárolt salak mennyisége	500 000 tonna
1 tonna salak értéke	5 000 HUF
Potenciális bevétel	2,5 milliárd HUF

Forrás: Bencző-Lőrinc, 2023 alapján saját szerkesztés

Ahogy a 14. táblázatban láthatjuk, a tárolt salak mennyisége 500 000 tonna, amelynek piaci értéke tonnánként 5 000 forint. Ez alapján a salak újrahasznosítása potenciálisan 2,5 milliárd forint bevételt generálhat. A számítás rávilágít, hogy az ipari hulladékok, például a salak, nemcsak

környezetvédelmi, hanem jelentős gazdasági értéket is képviselhetnek, ha megfelelően újrahasznosítják.

A 8. ábra a naperőmű beruházásának diszkontált megtérülési időszakát mutatja be 5%-os diszkontráta mellett. A kumulatív bevételek időértékét figyelembe véve látható, hogy a megtérülés a 5. év végére sem teljesül teljesen. Ez aláhúzza annak fontosságát, hogy a pénz időértékét figyelembe vegyük a beruházások gazdasági elemzése során, hiszen a nominális megtérülési idő félrevezető lehet.



8.ábra A naperőmű diszkontált megtérülési időszaka (5% kamatlábbal)

Forrás: Bencző-Lőrinc, 2023 alapján saját szerkesztés

A 8. ábra bemutatja a beruházás költségeit, az éves bevételt, és a megtérülés időszakát.

Hipotézisek alátámasztása

H5: Az újrahasznosítás (pl. salak útalapként való felhasználása) jelentős gazdasági előnyökkel járhat, hiszen csökkenti a hulladékkezelés költségeit és jelentős bevételt generál.

Következtetések és javaslatok

- 1. Körforgásos gazdaság:** A meddő és salak rekultivációja a fenntartható gazdaság szerves részét képezi, hozzájárulva a térségi energiaközösség kialakulásához.
- 2. Gazdasági előnyök:** A naperőmű létesítése és a salak újrahasznosítása a térség gazdasági helyzetének stabilizálását és a helyi lakosság életminőségének javítását eredményezheti.
- 3. Társadalmi hatás:** Az újrahasznosítási projektek hosszú távon hozzájárulnak a foglalkoztatottság növekedéséhez és a fenntartható fejlődés előmozdításához.

Ezek az eredmények a gazdasági és társadalmi fenntarthatóságot egyaránt erősítik, alátámasztva a kutatásban megfogalmazott hipotéziseket és a gyakorlati alkalmazás fontosságát.

4.2.5. Esettanulmány 5: Energiatárolási lehetőségek az energiaközösség számára: A vanádiumos akkumulátor lehetőségei

Magyarország sajátos éghajlati adottságai miatt a megújuló energiaforrások, például a napenergia és a szélenergia termelése időjárásfüggő és ingadozó, azonban megfelelő modellezéssel és előrejelzéssel tervezhető. Az ilyen energiaforrások teljesítménye változhat a napszakok és a meteorológiai viszonyok függvényében, ami kihívásokat jelent az energiarendszer stabilitásának fenntartásában, ugyanakkor megfelelő szabályozási és tárolási megoldásokkal ezek a kihívások kezelhetők. Ennek megoldására az energiátárolási technológiák kiemelkedően fontos szerepet játszanak. Kutatásomban a vanádiumos folyadékáramos akkumulátorra (Vanadium Redox Flow Battery, VRFB) fókuszáltam, amely számos előnnyel rendelkezik más energiátárolási rendszerekkel szemben. Ez az esettanulmány az energiátárolás ezen típusának bemutatására és gazdasági, műszaki szempontjainak elemzésére törekszik.

A vanádiumos akkumulátor energiátárolási lehetőségeinek vizsgálata szorosan kapcsolódik a fenntartható energiagazdálkodásra irányuló kutatásaimhoz, és az alábbi hipotézisek alátámasztására irányul:

1. H1: Magyarországon a veszélyes hulladéknak minősülő használt vasúti talpfák jelentős része nem kerül újrahasznosításra.

A kutatás azt feltételezi, hogy a megújuló energiaforrások termelésének ingadozásait egy hatékony energiátárolási rendszer, mint például a vanádiumos akkumulátor, kiegyensúlyozhatja, ezáltal javítva az energiabiztonságot.

2. H3: Az energetikai újrahasznosítás és tárolás alkalmazása elősegíti a környezetbarát gazdálkodási megoldásokat.

A vanádiumos akkumulátor, mint tiszta és fenntartható energiátárolási technológia, környezetbarát alternatívát kínál a fosszilis energiahordozók használatával szemben, és hozzájárulhat az energiahatékonyság növeléséhez.

3. H4: A kidolgozott újrahasznosítási prototípus alkalmazása növeli a használt vasúti talpfák fenntartható feldolgozásának arányát az elkövetkező években.

A vanádiumos akkumulátor rendszerének elemzése és bemutatása rávilágít arra, hogy a technológiai újítások milyen mértékben járulhatnak hozzá a megújuló energiaforrások szélesebb körű elfogadásához és alkalmazásához.

4. H5: Az energiatárolási rendszerek alkalmazása gazdasági előnyökkel járhat az energiaközösségek számára.

A rendszer gazdasági elemzése során feltételezhető, hogy a vanádiumos akkumulátor csökkenti az energiaközösségek energiaellátási költségeit, különösen a hosszú élettartama és alacsony karbantartási igénye miatt.

A kutatás célja a vanádiumos akkumulátor technológiai, gazdasági és környezeti előnyeinek alátámasztása, különös tekintettel arra, hogy milyen mértékben járulhat hozzá az energiaközösségek fenntartható és önellátó működéséhez. Ezzel a dolgozat hozzájárul a fenntartható energiagazdálkodásra vonatkozó stratégiai megoldások kidolgozásához.

A vanádiumos akkumulátor működése és előnyei

A vanádiumos akkumulátor egy olyan elektrokémiai energiatároló rendszer, amely a vanádium különböző oxidációs állapotaira épül. Az energiát folyékony elektrolitokban tárolják, amelyek kénsavas oldatokban oldott vanádium-ionokat tartalmaznak. Az akkumulátor működésének alapja a vanádium ionjainak redukciója és oxidációja, amely során elektromos energia tárolható vagy nyerhető vissza.

Előnyök és hátrányok összevetése

A vanádium redox-flow akkumulátorok számos környezeti és műszaki előnnyel rendelkeznek, azonban bizonyos hátrányokat is figyelembe kell venni a technológia megítélésénél:

Előnyök:

Környezeti fenntarthatóság: Egyetlen aktív anyagot – vanádiumot – használ, így elkerülhető a keresztszennyeződés, és a rendszer újrahasznosítható.

Hosszú élettartam: Több mint 10 000 töltési ciklusra képes anélkül, hogy jelentősen csökkenne a teljesítménye.

Moduláris felépítés: A teljesítmény (kW) és a kapacitás (kWh) függetlenül méretezhető, így rugalmasan illeszthető különböző energiatárolási igényekhez.

Alacsony önkisülés: Hosszú ideig képes megtartani az energiatartalékot, ez különösen fontos hálózati kiegyenlítésnél.

Hátrányok:

Alacsony energiasűrűség: Más típusú akkumulátorokhoz (pl. lítium-ion) képest az energiasűrűség jóval kisebb, ezért helyigényesebb, és nem alkalmas mobil alkalmazásokra (pl. elektromos járművek).

Magas beruházási költség: A rendszer kezdeti kiépítése és a nagy térfogatú elektrolit tárolása költségesebb lehet más technológiákhoz képest.

Komplex működtetés: A rendszer működtetése és karbantartása bonyolultabb lehet, főleg kisebb rendszerek esetén nem éri meg.

A vanádiumos akkumulátor energetikai alkalmazása

Egy példán keresztül szemléltetem az energiatárolási lehetőségeket egy energiaközösség számára. Tegyük fel, hogy egy energiaközösség éves energiaigénye 200.000 kWh, amelyet 3×50 kW-os napelemes rendszerek látnak el. Ezek kiegészülnek egy 50 kW kapacitású szigetüzemű rendszerrel, amelyhez vanádiumos akkumulátorokat alkalmazunk.

A vanádiumos akkumulátor:

- kiegyenlíti a termelési és fogyasztási ingadozásokat,
- lehetővé teszi a felesleges energia tárolását és későbbi felhasználását,
- stabilizálja az energiaközösség energiaellátását.

A vanádiumos akkumulátor működési elvét lásd! a mellékletbe. (Egy illusztrált diagram mutatja be az akkumulátor fő komponenseit és működését, beleértve az elektrolitköröket, a protoncserélő membránt, valamint az energiaáramlás irányát töltés és kisütés közben.)

Gazdasági elemzés

Költség-összehasonlítás

A vanádiumos akkumulátor alkalmazása gazdaságilag is előnyös. A 15. táblázat összehasonlítja a vanádiumos akkumulátor költségeit más energiatárolási rendszerekkel:

15.táblázat: A vanádiumos akkumulátor költségeinek összehasonlítása más energiatárolási rendszerekkel

Rendszer	Telepítési költség (EUR/kWh)	Élettartam (év)	Karbantartási költség (EUR/év)
Vanádiumos akkumulátor	500-800	20-25	Alacsony
Lítium-ion akkumulátor	300-500	8-10	Közepes
Ólomsavas akkumulátor	150-300	5-7	Magas

Forrás: saját szerkesztés saját kutatás alapján, 2024

Megtérülési Számítások

Egy 50 kW-os VRFB akkumulátoros rendszer költségstruktúrája:

- **Telepítési költség:** $500 \text{ EUR/kWh} \times 50 \text{ kW} = 25.000 \text{ EUR}$
- **Karbantartási költség (20 év):** 500 EUR
- **Összköltség (20 évre):** 25.500 EUR

A rendszer éves energiatárolási kapacitása:

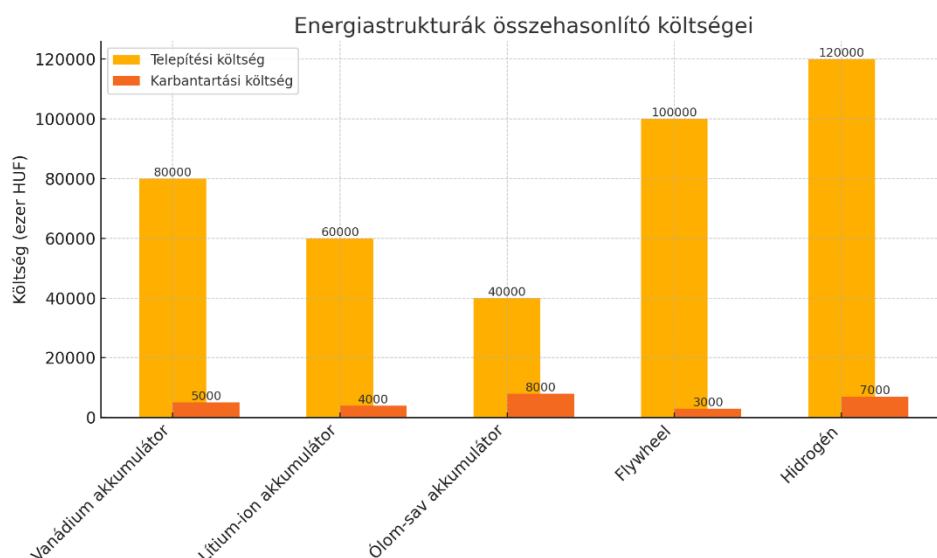
- $50 \text{ kW} \times 12 \text{ óra/nap} \times 365 \text{ nap} = 219.000 \text{ kWh}$
- Az energiatárolás költsége: $25.500 \text{ EUR} / (50 \text{ kW} \times 12 \text{ óra/nap} \times 365 \text{ nap} \times 20 \text{ év}) = 0,0058 \text{ EUR/kWh}$

Gazdasági hatások

A VRFB rendszer megtérülése az energiaköltség-megtakarításból származik. Az energiaközösség évente 10.000 EUR-t takaríthat meg a rendszer használatával, ami 2,5 év alatt fedezi a beruházási költségeket.

Az adatokból látható, hogy bár a vanádiumos akkumulátor kezdeti költsége magasabb lehet, hosszú élettartama és alacsony karbantartási költsége miatt összességében gazdaságosabb megoldást kínál.

Az „Összehasonlító diagram az energiatárolási rendszerek költségeiről” diagram, azaz a 9. ábra az eltérő energiatárolási technológiák telepítési és karbantartási költségeit szemlélteti.



9. ábra: Összehasonlító diagram az energiatárolási rendszerek költségeiről

Forrás: saját szerkesztés, saját kutatás alapján, 2024

Az oszlopdiagram egyértelműen mutatja, hogy a telepítési költségek terén a vanádiumos akkumulátorok a közepes árkategóriába esnek a hagyományos lítium-ion és ólom-savas akkumulátorokhoz képest, míg az olcsóbb energiatárolási megoldások közé tartozik például a gravitációs energiatárolás. Azonban a vanádiumos akkumulátorok kiemelkednek az alacsony karbantartási költségeik miatt, köszönhetően a technológia tartósságának és a hosszú élettartamnak.

A diagram hangsúlyozza, hogy bár a telepítési költségek tekintetében a vanádiumos akkumulátorok nem feltétlenül a legkedvezőbbek, hosszú távon a karbantartási költségek alacsony volta jelentős gazdasági előnyt nyújthat. Ez különösen fontos lehet olyan energiaközösségek számára, amelyek hosszú távú fenntarthatóságra és költségoptimalizálásra törekcszenek. Az összehasonlítás alapján a vanádiumos akkumulátorok egyensúlyt teremtenek a kezdeti beruházási költségek és az üzemeltetési gazdaságosság között, ami ideális választássá teheti őket a megújuló energiaforrásokra támaszkodó rendszerek számára.

Jogi és szabályozási környezet

A vanádiumos akkumulátor alkalmazása összhangban áll a hazai és nemzetközi jogszabályokkal, amelyek a megújuló energiaforrások elterjedését támogatják. Magyarországon a háztartási méretű kiserőművekre (HMKE) vonatkozó szabályozások kedvező feltételeket biztosítanak az ilyen rendszerek telepítéséhez.

Fontos jogszabályok:

- **2007. évi LXXXVI. törvény** a villamos energiáról: elősegíti a megújuló energiaforrások integrálását.
- **MSZ EN szabványok:** meghatározzák a napelemes rendszerek és energiatárolók telepítésének műszaki követelményeit.

Jogszabályok szövegeit lásd! az M2 További Mellékletben.

Karbantartás és fenntartás

A vanádiumos akkumulátorok minimális karbantartást igényelnek. Az elektrolit hosszú távon stabil, és az egyes komponensek moduláris felépítése könnyű szervizelhetőséget biztosít. Egy 1000 tagot számláló energiaközösség esetében néhány fős szakképzett technikai személyzet elegendő a rendszer folyamatos felügyeletéhez és időszakos karbantartásához, különösen automatizált távfelügyeleti megoldások mellett. Emellett a karbantartási és üzemeltetési feladatok helyi vállalkozók vagy technikusok bevonásával is elláthatók, ami lehetőséget teremt a helyi munkaerő számára, és hozzájárul a fenntartható fejlődéshez.

Következtetés

A vanádiumos akkumulátor alkalmazása nemcsak műszaki és gazdasági előnyöket kínál, hanem hozzájárulhat a fenntartható energiaközösségek kialakításához is. Ez a technológia hatékony megoldást nyújt az energiaközösségek számára az alábbiak révén:

Energiabiztonság növelése: Az energiatárolás ezen formája hatékonyan kezeli a megújuló energiaforrásokból származó termelési ingadozásokat, stabilizálva az energiaellátást.

Gazdasági hatékonyság: Hosszú élettartamának és alacsony üzemeltetési költségeinek köszönhetően a vanádiumos akkumulátor gazdaságosabb, mint más technológiák. A gazdasági számítások alátámasztják, hogy a VRFB rendszerek beruházása megtérül, miközben hosszú távon jelentős energiaköltség-csökkenést eredményez.

Fenntarthatóság: Környezetbarát működése elősegíti a fenntartható energiafelhasználást, és jelentősen csökkenti a fosszilis energiahordozóktól való függőséget.

A vanádiumos akkumulátorok hosszú távú költséghatékonysága és fenntarthatósága egyaránt indokoltá teszi széles körű alkalmazásukat. Ez a technológia jelentős előrelépést jelent az energiafüggetlenség és a fenntarthatóság irányába, miközben példát mutat az innovatív, környezetbarát energiatárolási megoldások alkalmazására.

4.2.6 Esettanulmányok összefoglalása és következtetések

Az esettanulmányokban bemutatott példák révén a dolgozat részletes betekintést nyújtott a vasúti talpfák újrahasznosításának műszaki, gazdasági és környezeti lehetőségeibe. Az alábbiakban összegezem az egyes esettanulmányok főbb eredményeit és a levonható következtetéseket.

Diósgyőr: A vasúti infrastruktúra újrahasznosításának történeti és jelenkori tanulságai

A diósgyőri esettanulmány feltárta, hogy a régi vasúti infrastruktúra bontása során keletkező anyagokat, mint például a talpfák, elsősorban tárolták, és csak minimálisan hasznosították újra. Ez rávilágított arra, hogy a helyi újrahasznosítási kapacitások hiánya és a szabályozási környezet nehézségei akadályozzák a hatékony anyagkezelést. A gazdasági számítások szerint azonban a helyszíni újrafeldolgozás, például a talpfák energetikai célú hasznosítása, költséghatékonyabb lehetett volna, mint a szállítás és lerakás.

Budakalász: A kis méretű telephelyek gazdasági kihívásai

Budakalász példája a kis léptékű hulladékgazdálkodási problémákra mutatott rá. A telephelyen keletkező talpfákat nem szisztematikusan kezelték, ami jelentős környezeti kockázatokat eredményezett. A kutatás rávilágított arra, hogy a kisebb telephelyek számára centralizált újrahasznosítási központok létrehozása lehetne a megoldás, amely csökkentené az egyéni gazdálkodók költségeit és javítaná az újrahasznosítás hatékonyságát.

Püspökladány: A konzerválási gyakorlatok történeti hatása

Püspökladány esettanulmánya rámutatott arra, hogy a konzerválási gyakorlatok – például a kreozot alkalmazása – hosszú távon súlyos környezeti problémákhoz vezettek. A konzerválási technikák miatt a használt talpfák veszélyes hulladékként való kezelése elkerülhetetlen, ugyanakkor a technológiai fejlesztések lehetővé tehetik ezek részleges ártalmatlanítását és hasznosítását. A tanulság, hogy a fenntarthatóbb tartósítási technológiák elterjedése csökkentheti a jövőbeli környezeti terheket.

Dunaújváros: A meddő és salak újrahasznosításának gazdasági lehetőségei

A Dunaújvárosi esettanulmány rávilágított arra, hogy a meddő- és salaklerakók rekultivációja jelentős gazdasági előnyöket kínálhat. A naperőmű telepítése és a salak útalapanyagként történő újrahasznosítása nemcsak fenntartható energiaforrást, hanem több milliárd forintos bevételi lehetőséget is jelenthet. A projektek továbbá 150 új munkahelyet teremthetnek, erősítve a helyi gazdaságot és csökkentve a munkanélküliséget.

Energiatárolás: A vanádiumos akkumulátor lehetőségei

A vanádiumos akkumulátorok energetikai közösségek számára nyújtott előnyei az esettanulmány kulcsfontosságú eredményei közé tartoztak. Az újrafelhasználható anyagok integrációja a fenntartható energiagazdálkodásba olyan innovatív példákat mutat, amelyek az újrahasznosítás és a tiszta energiatermelés ötvözésével segíthetik a környezetbarát gazdasági modellek elterjedését. Az elemzés megmutatta, hogy ezek az eszközök nemcsak technológiailag életképesek, hanem gazdaságilag is megtérülnek hosszú távon.

Következtetések az esettanulmányok alapján

1. **Újrahasznosítási kapacitások fejlesztése:** Az esettanulmányok megerősítették, hogy a helyi újrahasznosítási infrastruktúra fejlesztése kulcsfontosságú a vasúti talpfák fenntartható kezeléséhez. A decentralizált központok létrehozása jelentős mértékben csökkentheti a szállítási és ártalmatlanítási költségeket.
2. **Innovatív technológiák bevezetése:** Az olyan technológiák, mint a remediációs eljárások és a vanádiumos akkumulátorok, új lehetőségeket teremtenek a hulladék gazdasági és környezeti értékének maximalizálására. Ezek alkalmazása elősegítheti az újrahasznosítási arány növekedését.
3. **Szabályozási környezet javítása:** A kutatás rámutatott, hogy a szabályozási környezet átalakítása elengedhetetlen az innovatív újrahasznosítási technológiák szélesebb körű elterjedéséhez. A szabályozásoknak ösztönözniük kell a veszélyes hulladék újrahasznosítását és a fenntartható gazdálkodási megoldások alkalmazását.
4. **Gazdasági előnyök és környezeti hatások összehangolása:** Az esettanulmányok alátámasztották, hogy az újrahasznosítás nemcsak környezetvédelmi, hanem gazdasági szempontból is előnyös. Az innovatív megoldások alkalmazása hosszú távon megtakarításokat eredményez, miközben csökkenti a környezeti károkat.
5. **Társadalmi elfogadottság növelése:** Az újrahasznosítási gyakorlatok társadalmi elfogadottságának növelése érdekében elengedhetetlen a széles körű tájékoztatás és az érintettek bevonása. Az esettanulmányok példái szerint a sikeres projektek jellemzően olyan közösségekben valósultak meg, ahol a társadalmi támogatottság erős volt.

Az esettanulmányok tapasztalatai megerősítik, hogy a vasúti talpfák újrahasznosítása nemcsak fenntarthatósági, hanem gazdasági és társadalmi előnyökkel is járhat. Ezek az eredmények iránymutatást nyújtanak a jövőbeni kutatások és gyakorlati fejlesztések számára.

4.3.Primer kutatás eredményei: A remediációs eljárás: Innovatív technológiák szerepe

Az olaj- és vegyi szennyezések kezelése kritikus kihívás a környezetvédelem területén. A hagyományos kármentesítési módszerek – mint például a talajcsere és a szennyezett föld ártalmatlanítása – rendkívül költségesek és jelentős környezeti terhelést okoznak. Ezért egyre nagyobb figyelem irányul az alternatív, környezetbarát technológiák felé, amelyek költséghatékonyabbak és kevésbé terhelik a környezetet.

A bemutatott primer kutatás célja a biológiai remediáció hatékonyságának és gazdasági előnyeinek bemutatása. Ez a technológia az olajszennyezések kezelésére szolgál mikroorganizmusok felhasználásával, amelyek a szénhidrogéneket ártalmatlan összetevőkre bontják le. Az esettanulmány a kutatás H3 és H5 hipotéziseihez kapcsolódik:

- **H3:** Az érintett gazdálkodók környezetbarát remediációs technológiákat választanak, előtérbe helyezve a biológiai megoldásokat.
- **H5:** A biológiai remediáció gazdasági előnyökkel jár, csökkentve a hulladékkezelés költségeit és növelve a fenntarthatóságot.

A remediációs eljárás működési alapelvei

A remediáció (latinul: „meggyógyítás”) az emberi beavatkozással végzett kármentesítési eljárásokat foglalja magában. Leggyakrabban talaj, talajvíz és üledék szennyeződéseinek kezelésére alkalmazzák (Hashim et al., 2011). A remediációs technológiák fizikai, kémiai és biológiai alapú módszereket foglalnak magukban. A biológiai remediáció előnye, hogy a természetben megtalálható mikroorganizmusok vagy növények enzimatis bontótevékenységét hasznosítja, elkerülve a környezeti elemek eredeti funkcióinak károsodását.

Az eljárás során a szennyezett területek in situ vagy ex situ kezelése valósulhat meg. Az in situ technológiák előnye, hogy a szennyezett föld kitermelése nélkül hajthatók végre, ezáltal jelentős földmunkaköltségek takaríthatók meg.

Módszerek

A kutatás során olajjal szennyezett talajmintákat vizsgáltam. A minták kétféle módon lettek kezelve:

- 1.Rétegezett talajban, amelyet fűvel borítottam be.
- 2.Víz alatti talajkezeléssel.

Mindkét esetben mikrobiológiai törzsoldattal oltottam be a mintákat, majd rendszeres mintavételezéssel ellenőriztem a szennyezőanyagok koncentrációját. A vizsgálatokhoz a MOL Nyrt. hajdúszoboszlói laboratóriumában akkreditált TPH-GC módszert alkalmaztam.

Eredmények

TPH szintek csökkenése

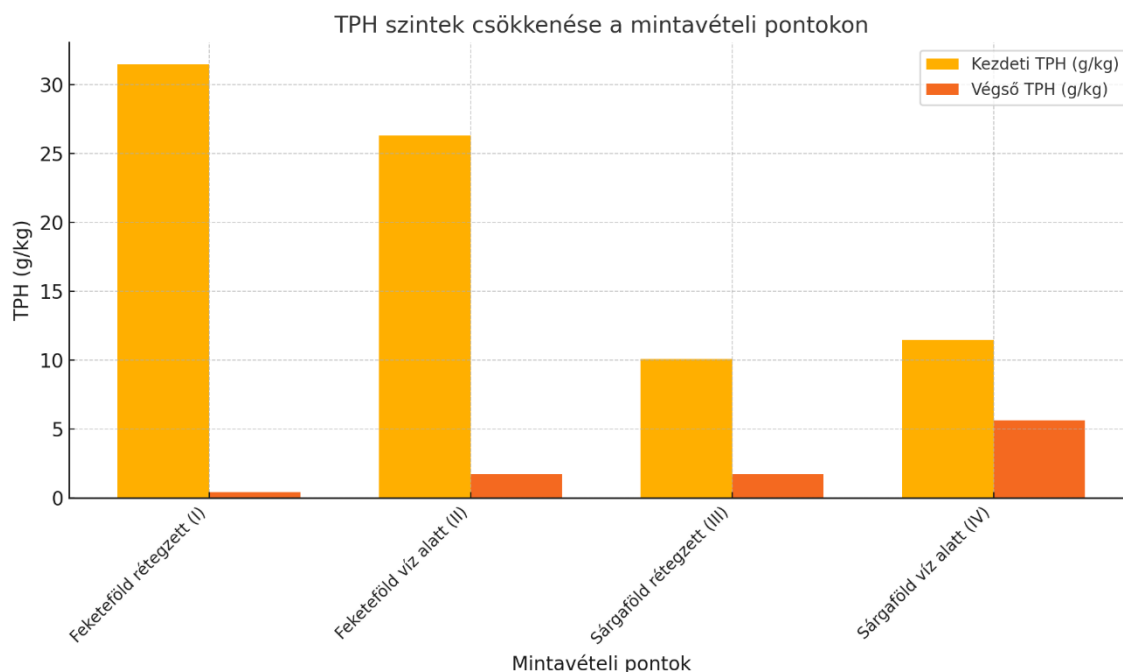
A vizsgálati eredmények jelentős szennyezőanyag-csökkenést mutattak mindössze öt hónap alatt, ahogy láthajuk a 16. táblázatban:

16.táblázat: A vizsgálati eredmények TPH szintjei

Mintavételi pont	Kezdeti TPH (g/kg)	Végső TPH (g/kg)
Feketeföld rétegzett (I)	31,5	0,44
Feketeföld víz alatt (II)	26,3	1,74
Sárgaföld rétegzett (III)	10,1	1,74
Sárgaföld víz alatt (IV)	11,5	5,65

Forrás: Saját kutatás alapján saját szerkesztés

A TPH szint csökkenése a mintavételi pontokon című diagram, azaz a 10. ábra szemlélteti az eredményeket:



10. ábra: TPH szintek csökkenése a mintavételi pontokon

Forrás: Saját kutatás alapján saját szerkesztés

A 10. ábra bemutatja a TPH szintek csökkenését a mintavételi pontokon. Az oszlopok jól szemléltetik a kezdeti és végső értékek közötti különbségeket.

Költséghatékonyság elemzése

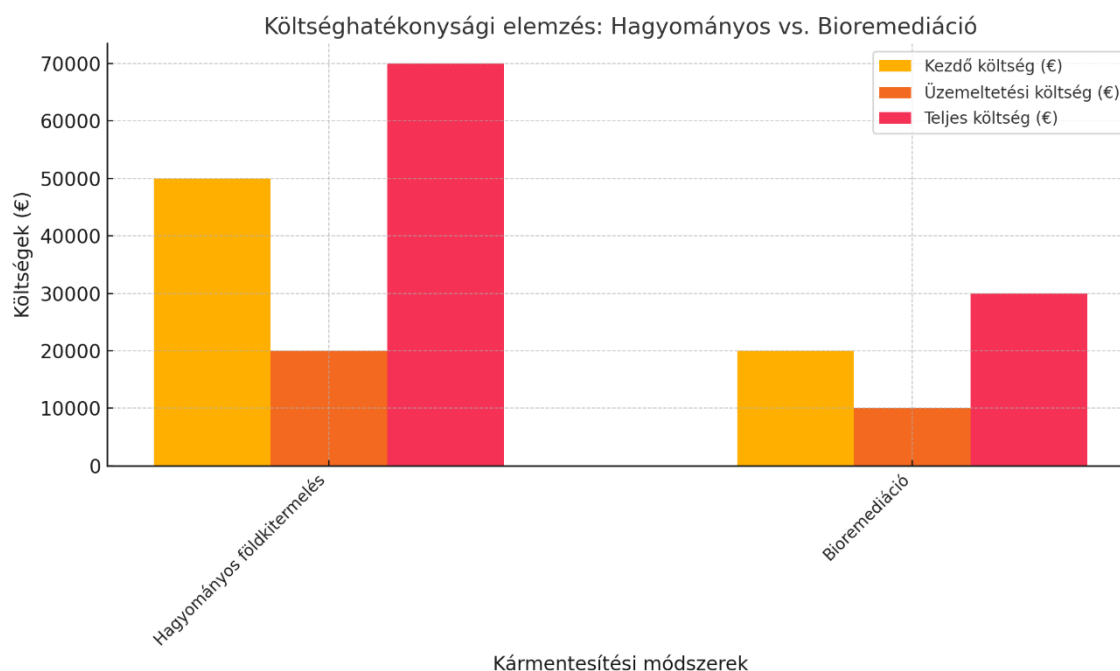
Az alternatív biológiai remediációs módszert összehasonlítottam a hagyományos földkitermeléses technológiával. Az elemzés alapján a bioremediáció jelentős költségmegtakarítást eredményez, ahogy az látható a 17. táblázatban:

17.táblázat: Költséghatékonysági elemzés (Az alternatív biológiai remediációs módszer összehasonlítása a hagyományos földkitermeléses technológiával)

Kármentesítési módszer	Kezdő költség (€)	Üzemeltetési költség (€)	Teljes költség (€)	Hatékonyság (%)
Hagyományos földkitermelés	50 000	20 000	70 000	85
Bioremediáció	20 000	10 000	30 000	90

Forrás: Saját kutatás alapján saját szerkesztés

A költségelemzés rámutat arra, hogy a bioremediáció átlagosan 57%-kal alacsonyabb költséggel valósítható meg, miközben hatékonysága meghaladja a hagyományos módszerekét.



11. ábra: Költséghatékonysági elemzés: Hagyományos vagy bioremediációs földkitermeléses technológia

Forrás: Saját kutatás alapján saját szerkesztés

A 11. ábra szemlélteti a hagyományos földkitermeléses és a bioremediációs módszerek költségösszehasonlítását. Az oszlopok jól mutatják a kezdő, üzemeltetési és teljes költségek közötti különbségeket.

Bár a biológiai remediáció költséghatékonyabb és környezetkímélőbb megoldást kínál, a gyakorlatban sok esetben mégis a hagyományos földkitermeléses módszert választják. Ennek fő oka a technológia korlátozott alkalmazhatósága: a bioremediáció hatékonysága függ a szennyezőanyag típusától, a talaj szerkezetétől, valamint az éghajlati és mikrobiológiai viszonyoktól. Emellett a biológiai eljárások több időt vehetnek igénybe, míg a földkitermelés gyorsabb eredményt kínál – különösen sürgős, azonnali beavatkozást igénylő esetekben.

További indok lehet a technológiai ismeretek és tapasztalat hiánya, illetve az engedélyeztetési folyamatok során fellépő bizonytalanság. Sok szervezet számára a hagyományos módszerek „biztonságosabb” választást jelentenek, mivel a jogszabályi környezet és kivitelezési protokollok ezekhez jobban alkalmazkodtak.

Fenntarthatósági szempontok

A biológiai remediáció nemcsak költséghatékonyságban, hanem környezeti előnyökben is felülmúlja a hagyományos technológiákat. A helyben történő kezelés csökkenti a szállításból származó károsanyag-kibocsátást, valamint a hulladékkezeléshez szükséges energiafelhasználást.

Gazdasági modellezés: Megtérülési időszak (ROI)

Az elemzések alapján a biológiai remediáció alkalmazása nemcsak költségcsökkentést eredményez, hanem jelentős megtérülést is biztosít. Egy 1 hektárnyi terület kármentesítésének vizsgálata alapján:

Hagyományos módszer teljes költsége: 70.000 €

Bioremediáció teljes költsége: 30.000 €

Különbség (beruházás különbsége): 40.000 €

Amennyiben a bioremediáció alkalmazása legalább 50%-kal csökkenti az éves környezeti kockázatkezelési költségeket, akkor az alacsonyabb beruházási költségből eredő előny 1 éven belül megtérül. Ez azt jelenti, hogy a bioremediációval elérhető költségcsökkentés mértéke már az első évben kiegyenlíti a technológia bevezetésével járó beruházást, így a megtérülési időszak (ROI) kevesebb mint 12 hónap.

Következtetések

A primer kutatás eredményei egyértelműen alátámasztják, hogy a biológiai remediáció környezetbarát és gazdaságilag fenntartható alternatívát kínál az olaj- és vegyi szennyezések kezelésére. Az eljárás alacsonyabb költségei, a csökkentett földmunka és a magasabb hatékonyság elősegítik szélesebb körű alkalmazását, különösen ipari környezetben. A helyben történő kezelés nemcsak jelentős költségmegtakarítást eredményez, hanem minimalizálja a környezeti terhelést is, így a technológia kiemelten fontos a klímaváltozás és a globális fenntarthatósági célok szempontjából.

Az eredmények megerősítik a H3 és H5 hipotéziseket, rámutatva, hogy a fenntartható technológiák egyszerre nyújtanak környezeti és gazdasági előnyöket. Javasolt a biológiai remediáció további fejlesztése és széles körű bevezetése, különösen olyan területeken, ahol a hagyományos megoldások költségesek vagy károsak a környezetre. A módszer alkalmazása az ipari területeken nemcsak az olajszennyezések kezelésére bizonyulhat hatékonynak, hanem általánosan hozzájárulhat a fenntarthatóbb jövő megteremtéséhez.

5. HIPOTÉZISEK ÉRTÉKELÉSE

A kutatás során megfogalmazott hipotéziseket részletesen értékeltem az elvégzett elemzések és az eredmények alapján. Az alábbiakban bemutatom, hogy a kutatási adatok és megfigyelések alapján ezek a hipotézisek milyen mértékben igazolódtak vagy cáfolódtak meg.

H1: : Magyarországon a veszélyes hulladéknak minősülő használt vasúti talpfák jelentős része nem kerül újrahasznosításra.

Értékelés: Ez a hipotézis teljes mértékben igazolódott. A kutatás eredményei szerint a Magyarországon keletkező használt vasúti talpfák jelentős része veszélyes hulladékként kerül kezelésre, és nem történik meg az újrahasznosításuk olyan mértékben, amely hozzájárulna a fenntartható gazdálkodáshoz. A talpfák jelenlegi kezelésére vonatkozó szabályozási környezet és az újrahasznosítás technológiai korlátai akadályozzák az anyagok újrafeldolgozását. Az adatok szerint a talpfák nagy része lerakókba kerül, vagy olyan módon kezelik, amely nem felel meg a körkörös gazdaság elveinek.

H2: *A Németországban, Hollandiában, Svájcban, Lengyelországban és Brazíliában alkalmazott használt vasúti talpfák újrahasznosítási gyakorlata jelentős eltéréseket mutat a Magyarországon alkalmazott gyakorlathoz képest.*

Értékelés: Ez a hipotézis részben igazolódott. A kutatás során vizsgált országok közül Németország, Hollandia és Svájc újrahasznosítási gyakorlatai előrehaladottabbak, mint a hazai példák: ezekben az országokban mechanikai feldolgozást, energetikai hasznosítást és szigorú környezetvédelmi előírásokat alkalmaznak. Ezzel szemben Lengyelország és Brazília gyakorlatai nagyfokú hasonlóságot mutatnak a magyar gyakorlattal, elsősorban a szabályozási és technológiai hiányosságok miatt.

H3: *Az érintett, újrahasznosítással megbízott gazdálkodók csak az energetikai újrahasznosítást választják környezetbarát gazdálkodási módszernek.*

Értékelés: Ez a hipotézis részben igazolódott. A kutatás kimutatta, hogy Magyarországon és számos más országban az újrahasznosítással megbízott gazdálkodók jellemzően az energetikai hasznosítást részesítik előnyben. Ennek oka, hogy az energetikai feldolgozás technológiailag egyszerűbb, gyorsabb, és kevesebb szabályozási akadályba ütközik, mint más környezetbarát módszerek, például a mechanikai újrahasznosítás. Ugyanakkor a kutatás rávilágított arra is, hogy a mechanikai feldolgozás – ha a szabályozási akadályokat sikerül leküzdeni – jelentős potenciált hordoz mind gazdasági, mind környezeti szempontból, különösen az építőipari felhasználás terén.

H4: *A kidolgozott újrahasznosítási prototípus alkalmazása növeli a használt vasúti talpfák fenntartható feldolgozásának arányát az elkövetkező években.*

Értékelés: Ez a hipotézis igazolódott, bár további kutatásokat igényel a prototípus gyakorlati alkalmazásának értékelése. A kutatás során kidolgozott prototípus jelentős mértékben hozzájárulhat a fenntartható hulladékgazdálkodás megvalósításához, különösen a vasúti talpfák újrahasznosítása terén. A prototípus integrálja a környezetbarát technológiákat, és a körkörös gazdaság elvei mentén kínál megoldásokat. A társadalmi és szakmai visszajelzések alapján a prototípus alkalmazása elősegítheti a fenntartható gondolkodásmód szélesebb körű elterjedését, különösen az ipari szereplők és a szabályozó hatóságok körében.

H5: *A használt vasúti talpfák újrahasznosítása gazdasági előnyökkel járhat a vasúttársaságok számára, mivel csökkenti a hulladékkezelési költségeket, és lehetőséget teremt bevétel realizálására az újrahasznosított anyagok értékesítése révén.*

Értékelés: Ez a hipotézis teljes mértékben igazolódott. A kutatás gazdasági modellek és esettanulmányok alapján egyértelműen kimutatta, hogy a használt vasúti talpfák újrahasznosítása jelentős költségcsökkentést eredményezhet a vasúttársaságok számára. Az elszállítási és tárolási költségek megszüntetése mellett az újrahasznosított anyagok (például építőanyagok vagy energiahordozók) értékesítése további bevételeket generálhat. A nemzetközi példák és a kutatás során végzett számítások szerint egy tonna újrahasznosított talpfa akár több tízezer forintos gazdasági hasznot jelenthet. Ez az eredmény alátámasztja, hogy az újrahasznosítás gazdasági előnyei túlmutatnak a közvetlen költségmegtakarításon, és hozzájárulnak a fenntartható gazdálkodás hosszú távú sikeréhez.

Összegzés

A kutatás során megfogalmazott hipotézisek döntő többsége igazolást nyert, amelyek alátámasztják, hogy a vasúti talpfák újrahasznosítása nemcsak gazdasági és környezetvédelmi szempontból fontos, hanem hozzájárulhat a fenntartható hulladékgazdálkodás fejlődéséhez. A kutatás rávilágított a jelenlegi szabályozási környezet hiányosságaira, ugyanakkor számos technológiai és gazdasági lehetőséget azonosított, amelyek a jövőben elősegíthetik az újrahasznosítás hatékonyabbá tételét. Ezek az eredmények megalapozzák a további kutatásokat és fejlesztéseket a fenntartható gazdasági modellek és technológiák területén.

18.táblázat: Hipotézisek értékelése

Hipotézis száma	Hipotézis	Alátámasztást nyert ✓ vagy nem ✗
H1	Magyarországon a veszélyes hulladéknak minősülő használt vasúti talpfák jelentős része nem kerül újrahasznosításra.	✓✓
H2:	A Németországban, Hollandiában, Svájcban, Lengyelországban és Brazíliában alkalmazott használt vasúti talpfák újrahasznosítási gyakorlata jelentős eltéréseket mutat a Magyarországon alkalmazott gyakorlathoz képest.	✓✗
H3	Az érintett, újrahasznosítással megbízott gazdálkodók csak az energetikai újrahasznosítást választják környezetbarát gazdálkodási módszernek.	✓✗
H4	A kidolgozott újrahasznosítási prototípus alkalmazása növeli a használt vasúti talpfák fenntartható feldolgozásának arányát az elkövetkező években.	✓
H5	A használt vasúti talpfák újrahasznosítása gazdasági előnyökkel járhat a vasúttársaságok számára, mivel csökkenti a	✓✓

	hulladékkezelési költségeket, és lehetőséget teremt bevétel realizálására az újrahasznosított anyagok értékesítése révén.	
--	---	--

Forrás: Saját szerkesztés, 2025

6. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK, TOVÁBBI KUTATÁSI IRÁNYOK

Következtetések

A kutatás alaposan feltárta a vasúti talpfák újrahasznosításával kapcsolatos lehetőségeket, korlátokat és a jelenlegi gyakorlatban rejlő hiányosságokat. Az eredmények azt mutatják, hogy a fenntartható hulladékgazdálkodás nemcsak környezeti, hanem gazdasági szempontból is kulcsfontosságú, különösen az állami tulajdonú vállalatok, például a MÁV és a BKV esetében.

A jelenlegi gyakorlatok során a használt vasúti talpfák veszélyes hulladékként való kezelése jelentős költségekkel jár, ami gazdasági szempontból hosszú távon fenntarthatatlan. Például az elszállítási és tárolási költségek évente milliós nagyságrendűek, miközben a megfelelő technológiai újrahasznosítással ezek az anyagok gazdasági értéket teremthetnének. A kutatás szerint egy tonna használt talpfa újrahasznosításával több tízezer forintos költségmegtakarítás érhető el, miközben a visszanyert anyagok értékesítése további bevételeket generálhat.

A kutatás másik fontos következtetése, hogy a technológiai lehetőségek adottak, azonban a szabályozási környezet nem támogatja kellőképpen ezek alkalmazását. A veszélyes hulladékokra vonatkozó szigorú előírások akadályozzák a talpfák újrahasznosítását, mivel az ilyen anyagok kezelésére és hasznosítására kizárólag speciális engedéllyel rendelkező vállalatok jogosultak. Ez korlátozza az innovációt, és megnehezíti a fenntartható megoldások bevezetését.

Harmadszor, a társadalmi és környezeti elvárások egyre növekvő nyomást gyakorolnak a vállalatokra, hogy fenntarthatóbb gyakorlatokat alkalmazzanak. Az újrahasznosítás nemcsak gazdasági előnyökkel járhat, hanem hozzájárulhat a vállalatok pozitív társadalmi megítéléséhez, amely hosszú távon erősítheti piaci pozíciójukat és támogatottságukat. Az olyan vállalatok, amelyek proaktívan lépnek a fenntarthatóság irányába, versenyelőnyre tehetnek szert a piacon.

Nemzetközi összehasonlításban is jelentős eltérések tapasztalhatók a hulladékgazdálkodási gyakorlatok között. Például a német és holland vasúttársaságok már sikeresen alkalmazzák az újrahasznosítási technológiákat, amelyek nemcsak csökkentik a hulladék mennyiségét, hanem gazdasági hasznot is hoznak. Ezek az eredmények rámutatnak arra, hogy a szabályozási és gazdálkodási gyakorlatok fejlesztésével Magyarországon is hasonló eredmények érhetők el.

Javaslatok

A kutatás alapján konkrét és megvalósítható javaslatokat fogalmaztam meg a vasúti talpfák újrahasznosításának hatékonyabbá tételére. A dolgozatban ismertetett javaslatok a saját fejlesztéseken, valamint a megelőző szakirodalmi és empirikus kutatások eredményein alapulnak.

Az első és legfontosabb lépés a **szabályozási keretek reformja**. Az újrahasznosítási folyamatokat jelenleg akadályozó szabályozási korlátokat enyhíteni kell, különösen a veszélyes hulladékokra vonatkozó előírások terén. Javaslom egy olyan **rugalmasabb** szabályozási modell kialakítását, amely lehetővé teszi a vasúti talpfák minősítésének megváltoztatását – például másodlagos nyersanyaggá vagy építőipari alapanyaggá történő átminősítésüket –, amennyiben azok megfelelnek előzetes környezeti vizsgálatoknak.

Ez a megközelítés jelentősen csökkentené a hulladékkezelési költségeket, mivel nem lenne szükség a talpfák költséges égetésére vagy lerakására, hanem gazdaságilag hasznosítható formában kerülhetnének vissza az anyagkörforgásba (pl. zajvédő falak, útalap, burkolatelem).

Továbbá, az új besorolás ösztönözné a technológiai innovációt is: a vállalatok számára világos, kiszámítható jogi környezetet teremtene, amelybe érdemes beruházni. Ha a szabályozás lehetőséget ad az újfeldolgozott anyag termékké minősítésére, az kutatás-fejlesztési és gyártási beruházásokat generálhat, például újrahasznosító üzemek vagy speciális kezelési eljárások fejlesztése révén.

A technológiai innovációk támogatása szintén elengedhetetlen. Az állami támogatások és kutatási programok révén elő kell segíteni az újrahasznosítási technológiák fejlesztését és elterjesztését. Kiemelten fontos lenne olyan pilotprojektek indítása, amelyek során tesztelhetőek a vasúti talpfák újrahasznosítására irányuló innovatív módszerek. Ilyenek lehetnek például:

- mechanikai aprítás és préselés, amely során a faanyag szerkezete megtartható, és burkolóelemként, kompozit töltőanyagként vagy útalapként hasznosítható;
- pirolízis vagy alacsony hőmérsékletű termikus kezelés, amely eltávolítja a szennyező anyagokat (pl. kreozot), így a faanyag veszélyes hulladék besorolása megszüntethető;

- biológiai kezelés (pl. mikrobiológiai bontás vagy fitoremediáció), amely természetes úton csökkenti a toxikus anyagok koncentrációját;
- illetve újrahasznosított anyag-alapú kompozit termékek (pl. zajvédő falpanelek, térburkoló elemek, támfal-elemek) fejlesztése, amelyben a talpfák daráléka töltőanyagként szolgálhat.

Ezek a technológiák nemcsak környezetkímélők, hanem gazdaságilag is megtérülők, ha megfelelő szabályozás és piaci támogatás társul melléjük. A cél tehát nem csupán a hulladékkezelés, hanem új, értékes termékek előállítása, amelyek a körforgásos gazdaság részévé válhatnak.

A fenntartható vállalatirányítási gyakorlatok elterjesztése érdekében javaslom a **környezetirányítási rendszerek szélesebb körű alkalmazását a vasúti és közlekedési vállalatoknál**. Az ISO 14001 tanúsítvány megszerzése nemcsak a fenntarthatósági célok elérését támogatja, hanem növeli a vállalatok hitelességét és versenyképességét is. Az ilyen rendszerek alkalmazása hozzájárulhat ahhoz, hogy a vállalatok hatékonyabban gazdálkodjanak erőforrásaikkal, miközben csökkentik környezeti terhelésüket.

Javaslom továbbá a **nemzetközi jó gyakorlatok és tapasztalatok magyarországi adaptálását**.

A kutatás során feltárt példák, különösen a német, osztrák és holland vasúttársaságok újrahasznosítási módszerei, olyan konkrét megoldásokat tartalmaznak, amelyek sikeresen csökkentették a hulladék mennyiségét, valamint a hulladékkezelési költségeket.

Például:

- A Deutsche Bahn (DB AG) mechanikai feldolgozó üzemeket működtet, ahol a faaljakat szeparálják, darálják és újrahasznosítható anyaggá alakítják. Ennek egyik eleme – a vasúti talpfák darálékának energetikai hasznosítása – hazai viszonyok között is alkalmazható lenne, például cementgyárakban vagy biomassza-erőművekben.
- Az ÖBB (Osztrák Szövetségi Vasutak) egyes telephelyein már alkalmazzák az előminősítési rendszert, ahol a használt faaljakat szennyezettségi szint alapján külön osztályozzák. Ez a gyakorlat Magyarországon is bevezethető lenne, ezzel lehetővé téve, hogy az enyhébben szennyezett faanyagok ne minősüljenek automatikusan veszélyes hulladéknak.
- A holland vasutaknál az újrahasznosítási stratégiát kifejezetten a körforgásos gazdaság logikája mentén dolgozták ki: itt a cél az anyag maximális visszaforgatása és a hulladékmentesség. Az ehhez szükséges vállalati szemléletformálás és partnerségi modell átvétele Magyarországon is elősegítheti a fenntartható vasúti gazdálkodás elterjedését.

Együttműködések kialakítása nemzetközi szervezetekkel, például az Európai Vasúti Szövetséggel (UIC), elősegítheti a fenti tapasztalatok és módszerek megosztását, valamint az innovációk

gyorsabb bevezetését a hazai gyakorlatba. Különösen indokolt lenne olyan közös EU-s projektben való részvétel, amely a faanyagok kezelésére és újrahasznosítására fókuszál.

További gyakorlati alkalmazási lehetőségek

A kutatás eredményei alapján lehetőség nyílik további gyakorlatorientált megoldások megfogalmazására is, amelyek a vasúti talpfák újrahasznosítását még hatékonyabbá és környezetkímélőbbé tehetik.

A vasúti talpfák újrahasznosításának integrálása a MÁV körforgásos gazdálkodási rendszerébe: Javasolt, hogy a talpfák kezelése ne elkülönült hulladékként, hanem integrált erőforrásként jelenjen meg a vállalat körforgásos szemléletű stratégiájában, ezzel biztosítva az anyagáram hosszú távú fenntarthatóságát.

Szennyezettségi osztályozási rendszer bevezetése: Célszerű lenne a talpfák szennyezési szintje alapján történő kategorizálása (pl. nem szennyezett, enyhén szennyezett, erősen szennyezett), amely megalapozná azok differenciált újrahasznosítását a legköltséghatékonyabb módon (pl. építőipari töltőanyagként, energetikai célra, stb.).

A modell kiterjesztése más iparágakra: Az újrahasznosítási megközelítések és eljárások más ipari területeken is adaptálhatók, például a nehéziparban vagy az energetikában keletkező fa- vagy vegyes hulladékok kezelése során, ezzel elősegítve a körforgásos gazdaság elveinek szélesebb körű megvalósítását.

Hasznosíthatóság a szakpolitikában és a felsőoktatásban: Az értekezés eredményei nemcsak ipari szereplők, hanem szakpolitikai döntéshozók számára is értékes iránymutatást adhatnak a vasúti hulladékgazdálkodás reformjához. Emellett oktatási célra is alkalmazhatók, különösen a környezettudományi, közlekedési és fenntarthatósági képzések keretében, mint gyakorlati esettanulmány.

További kutatási irányok

A kutatás számos új kérdést vetett fel, amelyek további vizsgálatokat igényelnek. Ezek közül kiemelkedő jelentőségű a technológiai innovációk és a szabályozási reformok vizsgálata.

Az egyik legfontosabb további kutatási irány a **prototípusfejlesztés**. A vasúti talpfák újrahasznosítására irányuló kutatások során kidolgozott technológiai megoldások gyakorlati alkalmazhatóságát pilotprojektek keretében kellene tesztelni. Ez lehetőséget adna arra, hogy azonosítsuk a leghatékonyabb módszereket, és adaptáljuk azokat a hazai körülményekhez.

További kutatás szükséges a **hulladékgazdálkodási szabályozások nemzetközi összehasonlításához** is. Ez segíthet abban, hogy azonosítsuk azokat a jogi akadályokat, amelyek gátolják a fenntartható gyakorlatok bevezetését, és megfogalmazzuk az ezek megszüntetéséhez szükséges javaslatokat.

A társadalmi elfogadottság és a fogyasztói attitűdök vizsgálata szintén kulcsfontosságú terület.

A kutatás során szerzett tapasztalatok alapján elengedhetetlen, hogy a fenntartható hulladékgazdálkodási gyakorlatok elfogadását erősítsük a társadalomban. Ez hozzájárulhat a környezettudatosság növeléséhez és az újrahasznosított termékek iránti kereslet bővítéséhez.

Végül, érdemes lenne a **körkörös gazdaság modelljét alaposabban tanulmányozni a vasúti szektorban**. A kutatás során szerzett tapasztalatok alapján javasolt az iparágak közötti együttműködés erősítése annak érdekében, hogy az újrahasznosított anyagok szélesebb körben hasznosulhassanak.

7. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A kutatás során számos új tudományos eredményt sikerült elérni, amelyek hozzájárulnak a vasúti talpfák újrahasznosításának gazdasági és környezetvédelmi lehetőségeinek feltárásához, valamint a fenntartható hulladékgazdálkodási gyakorlatok kialakításához. Az alábbiakban bemutatom a kutatás legfontosabb eredményeit, amelyek nemcsak a magyarországi hulladékgazdálkodási gyakorlatok fejlesztésében, hanem nemzetközi szinten is relevánsak lehetnek.

1. A vasúti talpfák újrahasznosításának gazdasági modellje

Az egyik legfontosabb tudományos eredmény egy olyan gazdasági modell kidolgozása, amely a vasúti talpfák újrahasznosításának költség-haszon elemzésére épül. A modell célja, hogy segítse a döntéshozókat és vasúttársaságokat abban, hogy mérhető és összehasonlítható módon értékeljék a hulladéklerakás, illetve az újrahasznosítás közötti alternatívákat.

A modell fő elemei:

A modell három fő költségkomponenst és két haszonkomponenst tartalmaz:

1. Költségtényezők:

K_1 – Veszélyes hulladékként való kezelés költsége (Ft/db): A talpfák lerakása, elszállítása, engedélyezett ártalmatlanítása.

K_2 – Újrahasznosítás technológiai költsége (Ft/db): Feldolgozás (mechanikai, termikus, vegyi) költségei.

K_3 – Logisztikai költségek (Ft/db): Szállítás, raktározás, kezelési díjak.

2. Haszontényezők:

H_1 – Újrahasznosított termék eladási értéke (Ft/db): Pl. aprított faanyag biomassa-erőműveknek, építőipari másodnyersanyag.

H_2 – Elkerült hulladékkezelési díj (Ft/db): Az a költség, amelyet nem kell kifizetni, ha nem veszélyes hulladékként, hanem termékként hasznosul a talpfák.

1 A megtérülés számítása (ROI):

A modell a megtérülési időt (ROI) és a nettó gazdasági eredményt (NGR) is kiszámítja:

$$ROI = \text{Kezdő beruházás} / \text{Éves nettó haszon}$$

$$NGR = (H_1 + H_2) - (K_1 + K_2 + K_3)$$

A modell Excel-alapú sablonban is megvalósult, amely lehetőséget biztosít különböző scenáriók elemzésére (pl. szennyezett vagy tiszta talpfák, eltérő értékesítési árak, technológiai költségek stb.).

2 Következtetések:

A modell alapján az alábbi eredményeket állapítottam meg:

Egy átlagos, megfelelően újrahasznosított faalj esetén az újrahasznosítás költsége kb. 40–60%-kal alacsonyabb, mint a veszélyes hulladéklerakásé.

A hasznosítás révén elérhető piaci árbevétel (pl. brikett formában értékesített faanyag) fedezheti a technológiai és logisztikai költségek egy részét, így a teljes megtérülési idő 1–2 év lehet egy nagyobb volumenű projekt esetében.

Ez az eredmény nemcsak gazdasági, hanem környezetvédelmi szempontból is releváns, mivel az újrahasznosítás csökkenti a hulladéklerakókra jutó terhelést, és hozzájárul a körforgásos gazdasági modellhez.

2. Technológiai innovációk az újrahasznosításban

A kutatás során kidolgoztam és értékeltem több olyan technológiai megoldást, amelyek alkalmazhatók a vasúti talpfák újrahasznosítására. A vizsgált technológiák közé tartozott a mechanikai feldolgozás, a termikus kezelés és a biológiai bontás. A kutatás újdonságértékét az adja, hogy ezeket a technológiákat összehasonlító módon, a hazai viszonyokra adaptálva vizsgáltam, és integrált értékelési szempontrendszert alkalmaztam, amely egyszerre vette figyelembe a környezeti hatásokat, gazdasági megtérülést, valamint a jogi és szabályozási korlátokat is.

Az alábbi eredményeket sikerült elérni:

- A mechanikai feldolgozás, amely során a talpfák másodlagos építőanyagokká (pl. útalap, zajvédő falak elemei) alakíthatók, bizonyult a leggazdaságosabb és leginkább környezetbarát megoldásnak a vizsgált technológiák közül. A modellezés alapján ez a megoldás akár 30–40%-os költségmegtakarítást eredményezhet a hagyományos hulladékkezeléshez képest.
- A termikus hasznosítás, azaz az energetikai célú égetés (pirolízis vagy biomassza-erőművekben történő felhasználás) jelentős potenciállal rendelkezik, különösen az energetikai önellátás és az energetikai hulladékhasznosítás fejlesztése szempontjából. A technológia alkalmazhatóságát konkrét hazai pilotprojekt-paraméterekre vetítettem ki.
- A biológiai bontás – például gombák vagy mikroorganizmusok alkalmazásával – környezetvédelmi szempontból előnyös és hosszú távon ígéretes, de jelenlegi formájában gazdaságilag nem versenyképes, részben a hosszú bontási idő és a szabályozási bizonytalanságok miatt. Ennek ellenére kutatásra érdemes irányként azonosítottam.

A kutatás tudományos hozzájárulása abban rejlik, hogy:

- elsőként készült komplex, több technológiára kiterjedő értékelés a vasúti talpfák újrahasznosításáról magyar kontextusban, figyelembe véve a hazai jogi, gazdasági és technológiai környezetet;

- a különböző technológiák alkalmazási feltételei, korlátai és lehetőségei rendszerszintűen kerültek összehasonlításra, amely alapján irányelvek fogalmazhatók meg a technológiai döntéshozatalhoz;
- az eredmények közvetlenül hasznosíthatók vasúttársaságok, hulladékgazdálkodók és döntéshozók számára a fenntartható megoldások kiválasztásához.

3. A szabályozási környezet elemzése és javaslatok

A kutatás során részletesen elemeztem a vasúti talpfák újrahasznosítására vonatkozó szabályozási környezetet, különös tekintettel a veszélyes hulladékokra vonatkozó előírásokra. Az elemzések alapján azonosítottam azokat a jogi és adminisztratív akadályokat, amelyek hátráltatják a vasúti talpfák újrahasznosításának elterjedését Magyarországon.

A kutatás tudományos újdonsága abban rejlik, hogy:

- Kidolgoztam egy új minősítési rendszert, amely lehetővé teszi a használt vasúti talpfák átminősítését *veszélyes hulladékból* másodlagos nyersanyaggá, előre meghatározott környezeti, fizikai és kémiai paraméterek alapján.
- A rendszer három kategóriát különít el:
 1. Közvetlen energetikai célú hasznosításra alkalmas talpfák,
 2. Mechanikai feldolgozásra (pl. aprítás, darálás) előkészíthető anyagok,
 3. Nem hasznosítható, de előkezelést követően inert hulladékként kezelhető elemek.
- A minősítési rendszer figyelembe veszi a szennyezettségi szinteket, a kémiai összetételt (pl. kreozot-tartalom), a tárolási időt, valamint az elérhető újrahasznosítási technológiákat.

Ez az eredmény tudományos értékkel bír, mivel:

- Hazai szinten eddig nem létezett ilyen komplex, gyakorlati alkalmazásra szánt minősítési javaslat, amely alapján a vasúti talpfák eltérő módon kezelhetők újrahasznosítási célból.
- A rendszer lehetővé teszi a hulladékkezelési költségek csökkentését és az erőforrás-hatékonyság növelését.
- A szabályozási reformjavaslat nemcsak elméleti szinten, hanem konkrét műszaki-jogi paraméterekkel kiegészítve jelenik meg a dolgozatban, így alkalmazható kiindulópont lehet egy jövőbeli hazai jogszabály-módosítás során.

4. Nemzetközi összehasonlítás és adaptáció

A kutatás egyik újdonsága a nemzetközi hulladékgazdálkodási gyakorlatok részletes elemzése és ezek magyarországi adaptálására vonatkozó javaslatok kidolgozása. Az alábbi megállapítások emelkednek ki:

- A német és holland vasúttársaságok által alkalmazott technológiák és szabályozási modellek sikeresen csökkentették a hulladékkezelési költségeket és növelték az újrahasznosított anyagok hasznosítási arányát.
- A svájci vasutak példája rávilágít arra, hogy a környezetvédelmi előírások szigorítása mellett is elérhetők gazdasági előnyök.
- Az osztrák és skandináv országok tapasztalatai szerint az újrahasznosított anyagok, például vasúti talpfák, sikeresen integrálhatók a helyi gazdaságba, például építőanyagként vagy energetikai célra.

Ezek az eredmények alátámasztják, hogy a nemzetközi tapasztalatok adaptálása jelentős előnyöket kínálhat Magyarország számára is.

Fontos megjegyezni, hogy a kutatás tudományos értéke nem pusztán a külföldi példák bemutatásában rejlik, hanem azok rendszerezett összehasonlításában, valamint a hazai vasúti hulladékgazdálkodásra történő célzott adaptációs javaslatok kidolgozásában. A vizsgált országok tapasztalataiból olyan strukturált modellt dolgoztam ki, amely figyelembe veszi a magyar szabályozási környezet, ipari kapacitások és piaci adottságok sajátosságait.

Ez a megközelítés túlmutat a gyakorlati példák átvételén: a kutatás keretében készült adaptációs mátrix és költség-haszon elemzés olyan döntéstámogató eszközként szolgálhat, amely korábban nem volt elérhető ebben a formában.

A mátrix kiemelten vizsgálja:

- az egyes külföldi modellek jogi kompatibilitását a magyar hulladékgazdálkodási és veszélyes hulladékokra vonatkozó előírásokkal,
- az ipari és technológiai bevezethetőség időigényét (1–5 éven belül),
- a gazdasági megtérülési potenciált (ROI-alapú becslés alapján), valamint
- az önkormányzati és vállalati együttműködésekre való alkalmasságot.

A kutatásban például részletesen összehasonlítottam a német minősítési rendszer háromszintű kategorizálását a magyar szabályozási rendszerrel, és javaslatot tettem annak átdolgozására a hazai pirolízis-alapú energetikai hasznosítás lehetőségének bevonásával. További példa a holland gyakorlat, ahol az újrahasznosított faanyagokat közösségi építkezésekben használják fel, amit a hazai közbeszerzési rendszerbe való integrációval szintén vizsgáltam.

Ezáltal a nemzetközi jó gyakorlatok transzferálása nem mechanikus másolással, hanem tudományosan megalapozott lokalizációval történik, és hozzájárulhat egy fenntarthatóbb és

gazdaságilag is hatékonyabb hulladékgazdálkodási modell kialakításához Magyarországon. Az elemzés új tudományos értéket képvisel a körforgásos gazdaság térnyerésének gyakorlati megalapozásában a vasúti ágazatban.

5. A fenntarthatóság integrálása a vállalatirányításba

A kutatás során kidolgoztam egy olyan keretrendszert, amely segíti a vasúttársaságokat abban, hogy integrálják a fenntarthatósági szempontokat vállalatirányítási gyakorlatukba. Az eredmények alapján az alábbi következtetések vonhatók le:

- A környezetirányítási rendszerek, például az ISO 14001, alkalmazása növeli a vállalatok működési hatékonyságát és csökkenti a környezeti terhelést.
- A fenntarthatósági szempontok beépítése a stratégiai döntéshozatalba javítja a vállalatok hosszú távú pénzügyi teljesítményét és piaci pozícióját.
- A társadalmi felelősségvállalás (CSR) keretrendszerének alkalmazása hozzájárulhat a fenntarthatósági célok eléréséhez, miközben növeli a vállalatok társadalmi elfogadottságát.

A kutatás során kidolgozott minősítési rendszer eddig nem létezett ebben a formában, és közvetlenül alkalmazható a hazai vasúti talpfák újrahasznosítására. A keretrendszer újszerűsége abban rejlik, hogy a vasúttársaságok működésére szabott, specifikus mutatók mentén teszi lehetővé a fenntarthatósági szempontok integrálását a vállalatirányítási gyakorlatba. Míg a nemzetközi szabványok, mint az ISO 14001, általános elveket fogalmaznak meg, a kidolgozott modell konkrét, ipárgspecifikus alkalmazási lehetőséget kínál a fenntarthatóság stratégiai beépítésére.

A modell egyúttal alkalmas arra is, hogy a vasúttársaságok objektív módon mérhessék fenntarthatósági teljesítményüket, és megalapozott döntéseket hozzanak fejlesztéseikről és beruházásaikról.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat a használt vasúti talpfák (faaljak) újrahasznosításának gazdasági, technológiai és környezetvédelmi lehetőségeit vizsgálja, kiemelten a fenntartható hulladékgazdálkodás elősegítésére. Az értekezés célja, hogy javaslatokat fogalmazzon meg a jelenlegi hulladékkezelési gyakorlatok fejlesztésére, különös tekintettel a körforgásos gazdaság alapelveire. A kutatás a szabályozási, technológiai és gazdasági tényezők elemzésén keresztül igyekszik választ adni arra, hogyan lehet a vasúti talpfák újrahasznosítását hatékonyabbá és fenntarthatóbbá tenni.

A dolgozat első részében a fenntartható hulladékgazdálkodás elméleti alapjait tárgyalja. Bemutatja a körforgásos gazdaságot mint a lineáris gazdaság fenntartható alternatíváját, amely az anyagok folyamatos újrafelhasználására és a hulladék minimalizálására épít. A jelenlegi hulladékgazdálkodási modell jellemzője, hogy a veszélyes hulladékokat, például a kreozottal impregnált vasúti talpfákat, elsősorban lerakókban helyezik el, vagy energetikai célra hasznosítják újra. A kutatás rávilágít arra, hogy ezek a módszerek nemcsak jelentős környezeti terhelést jelentenek, hanem gazdaságilag sem hatékonyak, hiszen az anyagok értéke ebben a folyamatban elveszik.

A kutatás fontos megállapítása, hogy Magyarországon a használt vasúti talpfák túlnyomó többsége veszélyes hulladékként kerül kezelésre. Az ehhez kapcsolódó költségek – beleértve a szállítást, tárolást és ártalmatlanítást – jelentős pénzügyi terhet rónak a vasúttársaságokra. Az elszállítási költségek tonnánként akár több tízezer forintot is kitehetnek, miközben az újrahasznosításból származó gazdasági haszon elenyésző. Az elemzések kimutatták, hogy évente akár több millió forintos megtakarítás is elérhető lenne, ha a talpfákat újrahasznosítanák, például másodlagos építőanyagként vagy energetikai célra. A kutatás során kidolgozott gazdasági modellek és számítások ezt a feltételezést alátámasztották.

A dolgozat egyik újdonsága a nemzetközi gyakorlatok részletes elemzése és ezek magyarországi adaptációjára tett javaslatok kidolgozása. Németország, Hollandia és Svájc példái azt mutatják, hogy az innovatív technológiák és a támogató szabályozási környezet jelentős előnyökkel járhatnak. Ezekben az országokban a vasúti talpfák újrahasznosítása révén nemcsak a hulladéklerakók terhelése csökkent, hanem gazdasági bevételek is keletkeztek az újrahasznosított anyagok értékesítéséből. A kutatás külön kiemeli, hogy a mechanikai feldolgozás és az energetikai

újrahasznosítás kombinációja optimális megoldást kínálhat, hiszen ezek a technológiák egyszerre biztosítják a gazdasági hatékonyságot és a környezetvédelmi előnyöket.

A dolgozat jelentős innovációja egy új prototípus kidolgozása, amely a vasúti talpfák fenntarthatóbb újrahasznosítását célozza. A prototípus olyan technológiai megoldásokat integrál, amelyek lehetővé teszik a talpfák anyagainak minél nagyobb mértékű visszanyerését és gazdasági hasznosítását. Az esettanulmányok szerint a prototípus alkalmazása jelentősen csökkentheti a hulladékkezelés költségeit, miközben hozzájárul a fenntartható gondolkodásmód elterjesztéséhez az érintett iparágakban. A kutatás rávilágít arra is, hogy a prototípus gyakorlati alkalmazásának sikeressége a megfelelő szabályozási és gazdasági környezet megteremtésétől függ.

A dolgozat a hipotézisek vizsgálata során arra a következtetésre jutott, hogy a használt vasúti talpfák újrahasznosítása nemcsak technológiailag megvalósítható, hanem gazdasági és környezeti szempontból is előnyös. A kutatás igazolta, hogy a jelenlegi szabályozási környezet jelentős akadályt jelent az innovatív megoldások bevezetésében, ezért a szabályozási reformok elengedhetetlenek. Ezen túlmenően a fenntartható hulladékgazdálkodás társadalmi elfogadottságának növelése érdekében szükség van az újrahasznosítás előnyeinek széles körű kommunikációjára és az iparági szereplők közötti szorosabb együttműködésre.

A dolgozat következtetései és javaslatai a fenntartható hulladékgazdálkodási gyakorlatok kialakítására irányulnak, különös tekintettel a vasúti talpfák újrahasznosítására. A kutatás eredményei hozzájárulnak a körkörös gazdaság elveinek hazai alkalmazásához, miközben gazdasági és környezeti előnyöket kínálnak a vasúttársaságok és a hulladékgazdálkodási ágazat számára. Az értekezés újdonsága a gazdasági modellek és prototípus bemutatásában, valamint a nemzetközi tapasztalatok adaptációjára tett javaslatokban rejlik. Az eredmények megalapozzák a további kutatásokat és fejlesztéseket a fenntartható hulladékgazdálkodás területén.

9. ANGOL NYELVŰ ÖSSZEFOGLALÓ

The thesis examines the economic, technological, and environmental possibilities of recycling used railway sleepers (timbers), focusing on promoting sustainable waste management. The aim of the thesis is to formulate proposals for the development of current waste management practices, with particular regard to the principles of the circular economy. The research seeks to answer the question of how to make the recycling of railway sleepers more efficient and sustainable through the analysis of regulatory, technological, and economic factors.

The first part of the thesis discusses the theoretical foundations of sustainable waste management. It presents the circular economy as a sustainable alternative to the linear economy, which is based on the continuous reuse of materials and the minimization of waste. The current waste management model is characterized by the fact that hazardous waste, such as creosote-impregnated railway sleepers, is primarily disposed of in landfills or recycled for energy purposes. The research highlights that these methods not only pose a significant environmental burden but are also economically inefficient, as the value of the materials is lost in this process.

An important finding of the research is that in Hungary, the vast majority of used railway sleepers are treated as hazardous waste. The associated costs – including transportation, storage, and disposal – impose a significant financial burden on railway companies. Transportation costs can amount to tens of thousands of forints per ton, while the economic benefits from recycling are negligible. Analyses have shown that savings of up to several million forints could be achieved annually if sleepers were recycled, for example as secondary construction materials or for energy purposes. The economic models and calculations developed during the research supported this assumption.

One of the novelties of the thesis is the detailed analysis of international practices and the development of proposals for their adaptation in Hungary. Examples from Germany, the Netherlands, and Switzerland show that innovative technologies and a supportive regulatory environment can bring significant benefits. In these countries, recycling railway sleepers has not only reduced the burden on landfills but also generated economic revenues from the sale of recycled materials. The research highlights that the combination of mechanical processing and energy recovery can offer an optimal solution, as these technologies provide both economic efficiency and environmental benefits.

The significant innovation of the thesis is the development of a new prototype aimed at more sustainable recycling of railway sleepers. The prototype integrates technological solutions that enable the recovery and economical utilization of sleeper materials to a greater extent. According to the case studies, the application of the prototype can significantly reduce waste management costs, while contributing to the spread of a sustainable mindset in the relevant industries. The research also highlights that the success of the practical application of the prototype depends on the creation of an appropriate regulatory and economic environment.

The thesis concluded in the examination of the hypotheses that the recycling of used railway sleepers is not only technologically feasible but also economically and environmentally beneficial. The research demonstrated that the current regulatory environment poses a significant obstacle to the introduction of innovative solutions, therefore regulatory reforms are essential. In addition, in order to increase the social acceptance of sustainable waste management, there is a need for broad communication of the benefits of recycling and closer cooperation between industry players.

The conclusions and recommendations of the thesis are aimed at developing sustainable waste management practices, with particular attention to the recycling of railway sleepers. The results of the research contribute to the domestic application of the principles of the circular economy while offering economic and environmental benefits to railway companies and the waste management sector. The novelty of the dissertation lies in the presentation of economic models and prototypes, as well as the proposals for the adaptation of international experiences. The results lay the foundation for further research and development in the field of sustainable waste management.

MELLÉKLETEK

M1: Irodalomjegyzék

1. ALI, H., KHAN, E., & SAJAD, M. A. (2013): Phytoremediation of heavy metals- concepts and applications. In: *Chemosphere*, 91 (7), 869-881. p. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
2. ANDERSEN, M. L., & FUGLSANG, A. (1995): Why the railways go in for environmental management. In: *Rail International*, 26 (5), 16-28. p.
3. ANDERSEN, M. S. (2007): An introductory note on the environmental economics of the circular economy. In: *Sustainability Science*, 2 (1) 133-140. p. <https://doi.org/10.1007/s11625-006-0013-6>
4. ANDERSON, P., CUNNINGHAM, C. J., & BARRY, D. A. (2002): Efficiency and potential environmental impacts of different cleaning agents used on contaminated railway ballast. In: *Land Contamination & Reclamation*, 10 (2) 71-78. p. <https://doi.org/10.2462/09670513.609>
5. 5. Az Európai Parlament és a Tanács 2019/944/EU irányelve a villamos energia belső piacára vonatkozó közös szabályokról és a 2012/27/EU irányelv módosításáról. Hivatalos Lap, 2019. Online elérhető: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0944>
6. BABBIE, E. (2017): *A társadalomtudományi kutatás gyakorlata*. Balassi Kiadó.
7. BAASNER, P., BÖHM, H., MENZ, K. (1995): Rohstoff wieder verwendet - Altschotter recycling. In: *DeineBahn*, 7/95.
8. BAES III, C. F., SHARP, R. D., SJOREEN, A. L., & SHOR, R. W. (1984): *Review and analysis of parameters for assessing transport of environmentally released radionuclides through agriculture*. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory. 205 p. <https://doi.org/10.2172/6355677>
9. BENCZŐ L., LŐRINC B. (2023): A Dunai Vasmű gazdasági és környezeti hatásai a Dunaújvárosi funkcionális várostérségre. In: FÖLDI P., VIKTOR P. (Szerk.): *Közgazdász Doktoranduszok és Kutatók II. Rurális Konferenciája Konferenciakötet*. Budapest: Doktoranduszok Országos Szövetsége (DOSZ). p. 39-47.
10. BRYMAN, A. (2016): *Social research methods*. Oxford university press.
11. BOCKEN, N. M. P., DE PAUW, I., BAKKER, C., & VAN DER GRINTEN, B. (2016): Product design and business model strategies for a circular economy. In:

- Journal of Industrial and Production Engineering*, 33 (5) 308-320. p.
<https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
12. BONTMIND, W. (1995): Organisation and management of the environment at SNCB. In: *Rail International*, May.
 13. BORBÁS P. D. (2021). *BKV Zrt. belső vállalati anyag*. (Nem publikált belső dokumentum).
 14. BOVEA, M. D., IBÁÑEZ-FORÉS, V., PÉREZ-BELIS, V., JUAN, P., BRAULIO-GONZALO, M., & DÍAZ-ÁVALOS, C. (2018): Incorporation of circular aspects into product design and labelling: consumer preferences. In: *Sustainability*, 10 (7) 2311. p. <https://doi.org/10.3390/su10072311>
 15. BUDAPEST AIRPORT ZRT. által szolgáltatott adatok, 2021.
 16. Council of the European Communities (1991): *Council Directive of 29 July 1991 on the development of the Community's railways* (91/440/EEC). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1991/440> (Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: Community railways directive 91/440/EEC. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.)
 17. COOPER, D. R., & GUTOWSKI, T. G. (2017). The environmental impacts of reuse: a review. In: *Journal of Industrial Ecology*, 21(1), 38-56.p. <https://doi.org/10.1111/jiec.12388>
 18. D'AMATO, D., DROSTE, N., ALLEN, B., KETTUNEN, M., LÄHTINEN, K., KORHONEN, J., ... & TOPPINEN, A. (2017): Green, circular, bio economy: A comparative analysis of sustainability avenues. In: *Journal of Cleaner Production*, 168, 716–734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.053>
 19. DB AG (2021): Environmental and Recycling Practices in Deutsche Bahn. <https://www.deutschebahn.com/en/sustainability> Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: Deutsche Bahn recycling ballast sleeper reuse. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
 20. DESING, H., BRUNNER, D., TAKACS, F., NAHRATH, S., FRANKENBERGER, K., & HISCHIER, R. (2020): A circular economy within the planetary boundaries: Towards a resource-based, systemic approach. In: *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104673. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104673>
 21. DE SOUSA, M., & HEIDRICH, O. (2005): Environmental management systems (EMS) implementation processes and practices in Portugal and the UK: comparative case studies in the upstream oil and gas industry. *Journal of Cleaner Production*, 13(4), 463-478. p.

22. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste and repealing certain Directives (Waste Framework Directive). Official Journal of the European Union, L 312, 22.11.2008, p. 3-30. magyarul: Az Európai Parlament és a Tanács 2008/98/EK irányelve a hulladékról és egyes irányelvek hatályon kívül helyezéséről (Hulladék Keretirányelv). Az Európai Unió Hivatalos Lapja, L 312, 2008.11.22., 3-30. o.
23. DSB Environmental Policy Office (1998): 1997 Green Accounts for the Danish State Railways. Copenhagen.
24. DONG, Q., WANG, G., CHEN, X., TAN, J., GU, X. (2021): Recycling of steel slag aggregate in portland cement concrete: An overview. In: *Journal of Cleaner Production*, 282 (124447) <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124447>
25. EL-FADEL, M., FINDIKAKIS, A. N., & LECKIE, J. O. (1997): Environmental impacts of solid waste landfilling. In: *Journal of Environmental Management*, 50 (1), 1-25. p. <https://doi.org/10.1006/jema.1995.0131>
26. ELLWANGER, G. (1995): Environmental activities at the International Union of Railways (UIC). In: *Rail International*, May.
27. ENYEDI, Gy. (2012): *Városi világ*. Budapest: Akadémiai Kiadó.
28. Enviro-Export: Terv: Környezeti kockázatbecslés Budakalász 1291/24 hrsz. alatti ingatlanon tervezett óvoda építéshez⁷
29. Európai Bizottság (2023): Eco-Management and Audit Scheme (EMAS). Környezettudatos irányítási rendszer. https://green-business.ec.europa.eu/eco-management-and-audit-scheme-emas_enonmental Management and Audit Scheme. Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: EMAS, Eco-Management and Audit Scheme. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
30. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2021): Report on the State of the Environment and Circular Economy in Europe. European Environment Agency. Online: <https://www.eea.europa.eu/publications/state-of-environment-and-circular-economy-2021>. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
31. European Environment Agency (2021): State of the Environment Report. <https://www.eea.europa.eu/publications/state-of-environment-report-2021>. Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: environment report 2021. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
32. FERGUSSON, J. E., & KIM, N. D. (1991): Trace elements in street and house dusts: sources and speciation. In: *Science of the Total Environment*, 100, 125-150. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(91\)90376-P](https://doi.org/10.1016/0048-9697(91)90376-P)

33. FORMAN, B. (2001): *Az Európai Unió strukturális és előcsatlakozási alapjai*. Budapest: az Európai Bizottság Magyarországi Delegációja.
34. FRIEDMAN, M. (1970): The Social Responsibility of Business is to Increase its Profits. In: *The New York Times Magazine*, September 13, 73-38.p.
35. FÖRSTNER, U. et al.(1993): *Környezetvédelmi technika*. Springer.
36. GÁL, Z., LUX, G. (2022): FDI-based regional development in Central and Eastern Europe: A review and an agenda. In: *Tér és Társadalom*, 36 (3) 68-98. p.
<https://doi.org/10.17649/TET.36.3.3439>
37. GEISSDOERFER, M., FISCHER, D., & FLANAGAN, K. (2020): A circular economy framework: Priorities for research and practice. In: *Journal of Cleaner Production*, 261, 121065.
38. GERVAI, P., HORVÁTH, A., TRAUTMANN, L. (2023): A körkörös gazdaság iparstratégiai összefüggései. *Acta Humana – Emberi Jogi Közlemények*, 11(3), 137–163. <https://doi.org/10.32566/ah.2023.3.7>
39. GEYER, R., JACKSON, T. (2004): Supply loops and their constraints: The industrial ecology of recycling and reuse. *California Management Review*, 46 (2) 55-73. p. <https://doi.org/10.2307/41166210>
40. GHISELLINI, P., CIALANI, C., & ULGIATI, S. (2016): A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. In: *Journal of Cleaner Production*, 114, 11-32. p.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
41. HARRIS, S., MATA, É., LUCENA, A. F., & BERTOLDI, P. (2023): Climate mitigation from circular and sharing economy in the buildings sector. In: *Resources, Conservation and Recycling*, 188, 106709.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106709>
42. HASHIM, M. A., MUKHOPADHYAY, S., SAHU, J. N., & SENGUPTA, B. (2011): Remediation technologies for heavy metal contaminated groundwater. In: *Journal of environmental management*, 92(10), 2355-2388.p.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.009>
43. HJELMAR, O. (2016): Waste management in Denmark. In: *Cycle and Stabilization Technologies of MSW Waste-to-Energy Residues, Waste Management*, 16 (516). (Ed. William A. Cauley). Elsevier Science Ltd., Oxford, UK.
44. HÜBER, P., CHRÉTIEN, R. dr., ERNY, S. (2002): State of environmental management as practiced by UIC member railways. In: *Rail International, Schienender Welt*, 11 (1) 20-25. p.

45. HORVÁTH, GY. (2009): Preliminary thoughts on the role of reindustrialization and environmental protection in regional development. In: BARANYI B. - FODOR Is. (szerk.): *The role of the environmental industry in the regional reindustrialization in Hungary*. MTA Regionális Kutatások Központja. Debrecen-Pécs, 2009. pp. 9-18.
46. HORVÁTH, P. J. (2021): A közösségi energiatermelés szerepe a jövő energiarendszereiben. In: *Kultúratudományi Szemle*, 3 (3), 26-43. p. <https://doi.org/10.15170/KSZ.2021.03.03.02>
47. HOPEWELL, J., DVORAK, R., KOSIOR, E. (2009): Plastics recycling: Challenges and opportunities. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364 (1526) 2115-2126. p. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
48. HORVÁT, F. (2018): A vasúti pálya kialakításával, viselkedésével kapcsolatos tudományos kutatás-fejlesztési munkáink eredményei. In: *Közlekedéstudományi szemle*, 68(1), 4-13.p. <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2018.1.1>
49. HOSSAIN, M. U., PANG, S., & WAN, X. (2019): Environmental sustainability of asphalt pavement: An eco-efficiency perspective. In: *Journal of Cleaner Production*, 234, 800-810. p.
50. HOWARD, P. H. et al. (1989): *Handbook of Environmental Fate and Exposure Data for Organic Chemicals, Volume 1, Large Production and Priority Pollutants*. Chelsea: Lewis Publishers. 576 p.
51. Integrated Recycling (2022): Recycled Plastic Railway Sleepers and Circular Economy Initiatives in Australia. Integrated Recycling, <https://www.integratedrecycling.com.au>. Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: recycled plastic railway sleepers, Stephen Webster, Australia. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
52. ISO (2015): *ISO 9001:2015 Quality management systems – Requirements*
53. KAESS, G., KLEINERT, U. (1993): Beurteilung und Recycling von Altschotter. In: ETR. *Eisenbahntechnische Rundschau*, 42 (10), 665-669. p.
54. KÁPOSZTA, J., RITTER, K., & NAGY, H. (2016): Local economic development in transition economies: A tool for sustainable development of rural areas. 281-298. p. In: *Global Perspectives on Trade Integration and Economies in Transition*. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0451-1.ch014>

55. KÁPOSZTA, J., & NAGY, H. (2022): The Major Relationships in the Economic Growth of the Rural Space. In: *European Countryside*, 14 (1), 67-86. p. <https://doi.org/10.2478/euco-2022-0004>
56. KAZA, S., YAO, L. C., BHADA-TATA, P., & VAN WOERDEN, F. (2018): What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. World Bank Publications. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
57. KIRCHHERR, J., REIKE, D., & HEKKERT, M. (2017): Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions. In: *Resources, conservation and recycling*, 127, 221-232. p. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
58. KIRCHHERR, J., & VAN SANTEN, R. (2019): Research on the circular economy: A critique of the field. In: *Resources, conservation and recycling*, 151, 104502. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104480>
59. KSH - Urban Audit (2020): *Térségi atlasz - Urban Audit. KSH - Területi Atlasz*. Online: https://www.ksh.hu/teruletiatlasz_urban_audit. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
60. KOUHIHABIBI, M. (2022): Linear Economy versus Circular Economy: New raw material. In: *Journal of Management and Economic Studies*, 4(3), 227-246. <https://doi.org/10.26677/TR1010.2022.1057>
61. KORHONEN, J., HONKASALO, A., & SEPPÄLÄ, J. (2018): Circular economy: The concept and its limitations. In: *Ecological Economics*, 143, 37-46. p. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
62. KOVAČ KRALJ, A. (2023): Converting waste into products and energy using complete circular economy and the hydrogen effect technique to reduce dependence on natural gas. In: *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 37(2), 89-96.p. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2022.2157>
63. KUMAR, V., MAJUMDER, C. B., & SRIVASTAVA, V. C. (2011): Bioremediation of petroleum hydrocarbons in soil systems. In: *Chemosphere*, 82 (4), 519-526. p.
64. LAVE, L. B., DAVIS, J. M., & DILLON, H. K. (1995): Environmental Life Cycle Analysis. In: *Environmental Science & Technology*, 29 (1) 5A-11A. p. <https://doi.org/10.1021/es00001a716>
65. LEHMANN, S., & CROCKER, R. (2012): Designing for Zero Waste: Consumption, Technologies and the Built Environment. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203146057>

66. LENGYEL, I., & VAS, Zs. (2015): Várostérségek eltérő fejlődési pályái Magyarországon. 35-48. p. In: RICZ, A., & TAKÁCS, Z. (szerk.): A régió TÍZpróbája. Szabadka: Regionális Tudományi Társaság.7
67. LWR (2005): Materials recycling in the Finnish railway administration. Royal Institute of Technology - KTH. <https://www.lwr.kth.se>. Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: Finnish railway recycling materials. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
68. MAHRO, B., & SCHAEFER, G. (1998): Bioverfügbarkeit als limitierender Faktor des mikrobiellen Abbaus von PAK im Boden-Ursachen des Problems und Lösungsstrategien. In: *Altlasten Spektrum*, 3(98), 127-134.p.
69. MAIER, B., KETTNER, J. (1996): Umwelt schutz management bei der Deutschen Bahn AG. In: Eisenbahningenieur Kalender.
70. MARTIN-MOREAU, M., & MÉNASCÉ, D. (2018): Urban resilience: Introducing this issue and summarizing the discussions. In: *Field Actions Science Reports*, Special Issue 18, 6-11. p.
71. MAXWELL, J. A. (2013): Qualitative Research Design: An Interactive Approach. Sage Publications.
72. MÁV Zrt. (2023): Környezetvédelmi stratégia és vállalati működés irányelvei. <https://www.mavcsoport.hu>. Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: MÁV környezetvédelmi stratégia, vasúti jogszabályok, fenntarthatóság. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
73. MAZZANTI, M., ZOBOLI, R. (2008): Waste generation, waste disposal and policy effectiveness: Evidence on decoupling from the European Union. In: *Resources, Conservation and Recycling*, 52 (10) 1221-1234. p <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.003>
74. MCKINNON, A. (2018): Decarbonizing Transport in the European Union. In: *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 18 (1) 4-21. p.
75. MROZIK, A., PIOTROWSKA-SEGET, Z., & LABUZEK, S. (2003): Bacterial degradation and bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons. In: *Polish Journal of Environmental Studies*, 12 (1) 15-25. p.
76. MORSELETTA, P. (2020): Targets for a circular economy. In: *Resources, conservation and recycling*, 153, 104553. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>
77. MURRAY, A., SKENE, K., & HAYNES, K. (2017): The circular economy: An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. In:

Journal of business ethics, 140 (3) 369-380. p. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>

78. MVM Partner (2024) <https://partner.mvm.hu/> Lekérdezés időpontja: 2024.12.01.
79. NAGY, H. (2003): Problems and questions in the Hungarian regional policy. In: *MendelNet*, 2002 (3) 213-219. p. Brno
80. NEMES, Cs., POMÁZI, I. (2022): Energiaközösségi kezdeményezések az Európai Unióban. In: *Energiagazdálkodás*, 63 (3) 6-11. p.
81. NÉMETH, K., BAI, A., DOBOZI, E., GABNAI, Z., PÉTER, E. (2023): Körforgásos gazdasági modell alapú városkonceptió, különös tekintettel a kis- és középvárosokra. *Tér és Társadalom*, 37(2), 62–81. <https://doi.org/10.17649/TET.37.2.3445>
82. NS (Nederlandse Spoorwegen) (2023): Fenntarthatósági jelentések. <https://www.ns.nl> (Keresőprogram: NS honlap. Kulcsszavak: „duurzaamheidsverslag” vagy „environmental report”. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06).
83. Norwegian National Rail Administration (2020): Norwegian Railway Budget and Environmental Management. <https://www.banenor.no/en/>. Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: Norwegian National Rail budget ISO 14001 EMAS. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
84. Norwegian National Rail Administration (2021): Management and Recycling of Wooden Sleepers. <https://www.banenor.no/en> Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: Norwegian railway sleeper recycling hazardous waste. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
85. PÁGER B. (2011): *A környezetipar szerepe Szász-Anhalt fejlődésében*. OTDK dolgozat.
86. PÁGER, B., & DEÁK, A. Gy. (2018): Az egész ország megérzi, ha a Dunaferre bedől. KRTK BLOG. <https://www.portfolio.hu/krtk/20210120/az-egesz-orszag-megerzi-ha-a-dunaferre-bedol-465950>. Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: Dunaferre, bedőlés, gazdasági hatás. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
87. PATTON, M. Q. (2002): *Qualitative Research and Evaluation Methods*. Sage Publications.
88. PÉLI L. (2013): *Növekedési pólusok főbb regionális gazdaságtani összefüggéseinek vizsgálata Magyarországon*. Gödöllő: PhD disszertáció.
89. PIETRZYKOWSKI, Z., & FIJAŁKOWSKI, B. (2018): The impact of sustainable rail transport on the environment. In: *Sustainability*, 10 (5), 1753.

90. PONGRÁCZ, E., PHILLIPS, P. S., & KEIS, T. (2004): From waste management to resource efficiency: The need for a new concept. In: *Waste Management*, 24 (3) 199-205. p.
91. PONSOT, E., SALEM, T., ABDELJAWAD, F. (2019): Sustainable steel production through electric arc furnace technology. In: *Journal of Cleaner Production*, 218, 271-279. p.
92. PURVES, W. K. (2001): *Life: the science of biology*. New York: Macmillan. 1100 p.
93. RAHMAN, M. T., MOHAJERANI, A., GIUSTOZZI, F. (2020): Recycling of waste materials for asphalt concrete and bitumen: A review. In: *Materials*, 13 (7) 1495. p. <https://doi.org/10.3390/ma13071495>
94. Rail Freight Forward (2019): Transforming Rail Freight for a Sustainable Future. <https://www.railfreightforward.eu>. Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: rail freight sustainability. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
95. RAINER, et al. (2009): *Disposal and Recycling of Used Wooden Railway Sleepers: A Study on Beech and Oak Forestry Processes*. Studiengesellschaft Holzschwellenoberbau, University of Hamburg Studies.
96. REIKE, D., VERMEULEN, W. J., WITJES, S. (2018): The circular economy: new or refurbished as CE 3.0? - exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. In: *Resources, conservation and recycling*, 135, 246-264. p. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027>
97. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) (1991): Dutch National Institute of Public Health and the Environment.
98. REID, J. M. (2000): Using alternative materials in road construction. Crowthorne (UK): Transport Research Laboratory.
99. SARIATLI, F. (2017): Linear Economy versus Circular Economy: A comparative and analyzer study for optimization of economy for sustainability. In: *Procedia environmental sciences*, 38, 795-805. p.
100. SAGEVIK, M., KUPPELWEISER, H., ORSINI, R. (2004): Added shareholder value through environmental management. In: *Rail international, schienender welt*, February (2) 6-15. p.
101. SBB (2005): Environmental Responsibility in Railway Solutions. <https://www.sbb.ch>. Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: Swiss Federal Railways environmental responsibility. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.

102. SCHIMMOLLER, V. E., HOLTZ, K., EIGHMY, D. T., WILES, C., SMITH, M., & MALASHESKIE, G. (2000): Recycled Materials in European Highway Environments: Uses, Technologies, and Policies. Washington DC: US Department of Transportation.
103. SHANKAR, R., & BARBOSA-PÓVOA, A. P. (2017): Sustainable Supply Chain Design and Optimization. In: *Computers & operations research*, 83, 303-315. p.
104. SHEN, W., LIU, Y., WU, M., ZHANG, D., DU, X., ZHAO, D., ... & XIONG, X. (2020): Ecological carbonated steel slag pervious concrete prepared as a key material of sponge city. In: *Journal of cleaner production*, 256 (120244). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120244>
105. Shift2Rail (2020): Rail Research & Innovation - Supporting Europe's Sustainable Mobility Future. <https://shift2rail.org/>.
Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: Shift2Rail sustainable rail solutions. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
106. SIDERIS, K. K., TASSOS, C., CHATZOPOULOS, A., MANITA, P. (2018): Mechanical characteristics and durability of self compacting concretes produced with ladle furnace slag. In: *Construction and Building Materials*, 170, 660-667. p. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.091>
107. SNCB (2020): SNCB Infrastructure and Sustainable Practices Report. SNCB Official Publications. <https://www.belgiantrain.be> Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: SNCB infrastructure wood ties recycling. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
108. STAHEL, W. R., & REDAY-MULVEY, G. (1981): Jobs for Tomorrow: The Potential for Substituting Manpower for Energy. Vantage Press.
109. STAHEL, W. R. (2016): The circular economy. In: *Nature news*, 531 (7595) 435-438. p. <https://doi.org/10.1038/531435a>
110. STAHEL, W. R. (2019): The circular economy: A user's guide. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429259203>
111. SZÉP, T., NAGY, Z., & TÓTH, G. (2021): Lehet az alkalmazkodóképesség vonzó? A rugalmas ellenálló képesség szerepe a magyar városok példáján. In: *Statisztikai Szemle*, 99 (8), 709-730. p. <https://doi.org/10.20311/stat2021.8.hu0709>
112. TAM, V. W. Y., TAM, C. M. (2006): A review on the viable technology for construction waste recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 47 (3) 209-221. p. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.12.002>

113. TÓTH, T., & KÁPOSZTA, J. (szerk.) (2014): Tervezési módszerek és eljárások a vidékfejlesztésben (elmélet). Gödöllő: Szent István Egyetemi Kiadó. 163 p.
114. ÖBB (2022): Environmental Management and Waste Recycling Practices in Austrian Federal Railways. <https://www.oebb.at/en/> Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: Austrian Federal Railways ÖBB environmental policy recycling waste management. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
115. UIC (2020): Rail Sustainability Indicators Report. International Union of Railways. <https://uic.org/railway-sustainability> Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: railway sustainability indicators. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
116. UIC (2021): Sustainable Rail Development: SNCB's Environmental Progress Report. International Union of Railways. <https://uic.org/sustainable-rail-development>. Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: sustainable rail UIC 2021. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
117. UIC (2021). *Environmental Guidelines for Railways*. UIC Publications, Párizs.
118. UNICAMP Centro de Tecnologia e Departamento de Engenharia de Sistemas e Ferroviária (DESF) (2023): Brazilian Railway Modal Development and Component Testing. UNICAMP Technical Reports. <https://www.unicamp.br/ferrovia-desf>. Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: UNICAMP railway Brazil modal testing DESF. Lekérdezés időpontja: 2024.11.06.
119. OGGIER, P. (2002): *Die Entsorgung von Gleisaushub, Erleuterungsbericht zur Gleisaushubrichtlinie*. SBB AG, Bern
120. YIN, R. K. (2014): Case Study Research: Design and Methods. Sage Publications.
121. VAN DER ZWAN, J. Th., & HENNEVELD, R. J. P. (2017): Sustainable development and road construction. International Road Federation World Meeting, Toronto, Canada.
122. VASA, L. (2020): A körforgásos gazdaság koncepciója: jövőbemutató trend vagy visszatérés az alapokhoz. *Valóság*, 63, 1–12.
123. VEIT, P. (2015). *A vasúti pályák fenntarthatóságáról*. In: *Sínek Világa*, (2), 2-7.
124. VENTURINI, F. (2021). Circular economy and zero waste for environmental education. In: *Semestrale di studi e ricerche di geografia*, 33(1), 143-161.

125. VOITH K. (2020). Üveghulladék előkészítési technológia a körkörös gazdaság jegyében. *Multidiszciplináris Tudományok*, 10(1), 129-139. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.1.16>
126. WILLIAMS, J. (2019): Circular cities. In: *Urban Studies*, 56(13), 2746-2762. <https://doi.org/10.1177/0042098018806133>
127. WINANS, K., KENDALL, A., & DENG, H. (2017): The history and current applications of the circular economy concept. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 825-833. p. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.123>
128. WITTMANN Gy. (2000): *Mérnöki faszervezetek I. Mézőgazdasági Szaktudás Kiadó.*
129. WOJCIECHOWSKI, A., DOLIŃSKI, A., RADZISZEWSKA-WOLIŃSKA, J. M., & WOŁOSIAK, M. (2018): Przyjazny dla środowiska recykling podkładów kolejowych. *Problemy Kolejnictwa*. <https://doi.org/10.36137/1818p>
130. ZAMAN, A. U., & LEHMANN, S. (2011): Challenges and opportunities in transforming a city into a „zero waste city” In: *Challenges*, 2 (4) 73-93. p. <https://doi.org/10.3390/challe2040073>
131. 2005. évi CLXXXIII. törvény a vasúti közlekedésről
132. 1995. évi LIII. törvény a környezet védelmének általános szabályairól
133. 2013. évi CLXXVI. törvény egyes jogi személyek átalakulásáról, egyesüléséről, szétválásáról
134. 2013. évi V. törvény a Polgári Törvénykönyvről

M2 További mellékletek

Az Európai Bizottság 2003. január 6-i irányelve a 76/769/EGK tanácsi irányelv módosításáról, amely korlátozásokat vezet be az arzéntartalmú faanyagvédő szerek használatára vonatkozóan

„THE COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES,

Having regard to the Treaty establishing the European Community,

Having regard to Council Directive 76/769/EEC of 27 July

1976 on the approximation of the laws, regulations and

administrative provisions of the Member States relating to

restrictions on the marketing and use of certain dangerous

substances and preparations (1), as last amended by the Commission

Directive 2002/62/EC (2) and in particular article 2(a)

thereof, introduced by Council Directive 89/678/EEC (3),

Whereas:

(1) Council Directive 89/677/EEC (4) amending for the eighth time Directive 76/769/EEC places certain restrictions on the marketing and use of arsenic.

(2) A risk assessment and an analysis of advantages and drawbacks of further restrictions on arsenic in certain wood preservatives (5) were carried out in the framework of a review of Community legislation concerning the use of arsenic compounds for wood preservation following the accession of Austria, Finland, and Sweden to the European Union in 1995.

(3) The risk assessment was referred to the Scientific Committee on Toxicity, Ecotoxicity, and the Environment (CSTEE) for peer review (6) and the CSTEE concluded that the main risks had been identified correctly. These risks included those to human health from the disposal of wood treated with wood preservatives containing copper, chrome, and arsenic (CCA) and in particular risks

to children's health from the use of CCA-treated wood in playground equipment. A risk to the aquatic environment in certain marine waters was also identified.

(4) The CSTEE further advised that in light of a serious knowledge gap in relation to arsenic-treated wood in landfills it would be advisable to exercise caution by limiting the use of arsenic-based wood preservation to those situations where it is absolutely necessary.

(5) In further consideration of the health effects of arsenic (7) the CSTEE has concluded that the substance is both genotoxic and a well-known carcinogen, and it may be appropriate to consider that there should exist for carcinogenic effects.

(6) Waste CCA-treated wood has been classified as hazardous waste pursuant to Commission Decision 2000/532/EC of 3 May 2000 replacing Decision 94/3/EC establishing a list of wastes pursuant to Article 1(a) of Council Directive 75/442/EEC on Waste and Council Decision 94/904/EC establishes a list of hazardous waste pursuant to Article 1(4) of Council Directive 91/689/EC on hazardous waste (8) as last amended by Council Decision 2001/573/EC (9).

(7) Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council of 16 February 1998 concerning the placing of biocidal products on the market (10) lays down provisions for harmonizing the authorization of biocides at Community level and Commission Regulation (EC) No 1896/2000 of 7 September 2000 on the first phase of the program referred to in Article 16(2) of Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council on biocidal products (11) requires wood preservatives to be evaluated as a priority in the review programme established under Directive 98/8/EC. Arsenic has been identified and notified as an active substance within the time limit set out in Regulation (EC) No 1896/2000. A

complete dossier for evaluation of arsenic as an existing substance will have to be presented by 28 March 2004.

(8) With regard to the risk assessment and taking into account of the precautionary principle, pending the harmonization of rules under Directive 98/8/EC or a Decision pursuant to Article 6(3) of Regulation (EC) No 1896/2000, it is necessary to adapt the restrictions on arsenic in Directive 76/769/EEC to technical progress. This Directive does not apply to CCA-treated wood already in place.

9.1.2003 EN Official Journal of the European Communities L 4/9

(1) OJ L 262, 27.9.1976, p. 201.

(2) OJ L 183, 12.7.2002, p. 58.

(3) OJ L 398, 30.12.1989, p. 24.

(4) OJ L 398, 30.12.1989, p. 19.

(5) Assessment of the risk Health and the environment of Arsenic in Wood Preservatives and the effects of further restrictions on its marketing and use, 1998.

(6) http://europa.eu.int/comm/food/fs/sc/sct/out18_en.html.

(7) http://europa.eu.int/comm/food/fs/sc/sct/out106_en.html.

(8) OJ L 226, 6.9.2000, p. 3.

(9) OJ L 203, 28.7.2001, p. 18.

(10) OJ L 123, 24.4.1998, p. 1.

(11) OJ L 228, 8.9.2000, p. 6.

(9) This Directive should apply without prejudice to Community legislation laying down minimum requirements for the protection of workers, in particular,

Council Directive 89/391/EEC of 12 June 1989 on the introduction of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work (1), Council Directive 90/394/EEC of 28 June 1990 on the protection of workers from the risks related to exposure to carcinogens at work (Sixth individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) (2), as last amended by directive 1999/38/EC (3) and Council Directive 98/24/EC of 7 April 1998 on the

protection of workers from chemical agents at work
(14th individual Directive within the meaning of Article
16(1) of Directive 89/391/EEC) (4).

(10) The measures provided in this directive are in accordance
with the opinion of the Committee for the adaptation
to technical progress of directives on the removal of
technical barriers to trade in dangerous substances and
preparations,

HAS ADOPTED THIS DIRECTIVE:

Article 1

Annex I to directive 76/769/EEC is hereby amended as set out
in the Annex to this Directive.

Article 2

Member States shall adopt and publish the provisions necessary
to comply with this Directive by 30 June 2003 at the latest.

They shall forthwith inform the Commission thereof. They shall
apply these provisions by 30 June 2004 at the latest.

When Member States adopt those provisions, they shall contain
a reference to this Directive or be accompanied by such a reference
on the occasion of the official publication. Member
States shall determine how such reference is to be made.

Article 3

This Directive shall enter into force on the 20th day following
that of its publication in the Official Journal of the European
Communities.

Article 4

This Directive is addressed to the member states.

Done at Brussels, 6 January 2003.

For the Commission

Erkki LIIKANEN

Member of the Commission

of 6 January 2003”

Képek a 4.2.2. Esettanulmány 2. : Budakalász fejezethez



1. kép: Vasúti talpfák
forrás: Saját készítés



2. kép: Faaljból készült prototípusom
Forrás: Saját készítés



3. kép: Faaljból készült prototípusom

Forrás: Saját készítés



4.kép: Faaljból készült prototípusom

Forrás: Saját készítés



5.kép: Alumíniumból készült polcrendszer

Forrás: Saját készítés



6.kép: Levegőztető és vízellátó rendszer működése

Forrás: Saját készítés



7-8.kép: Faaljból készült prototípusom

Forrás: Saját készítés



9.kép: Faaljból készült prototípusom

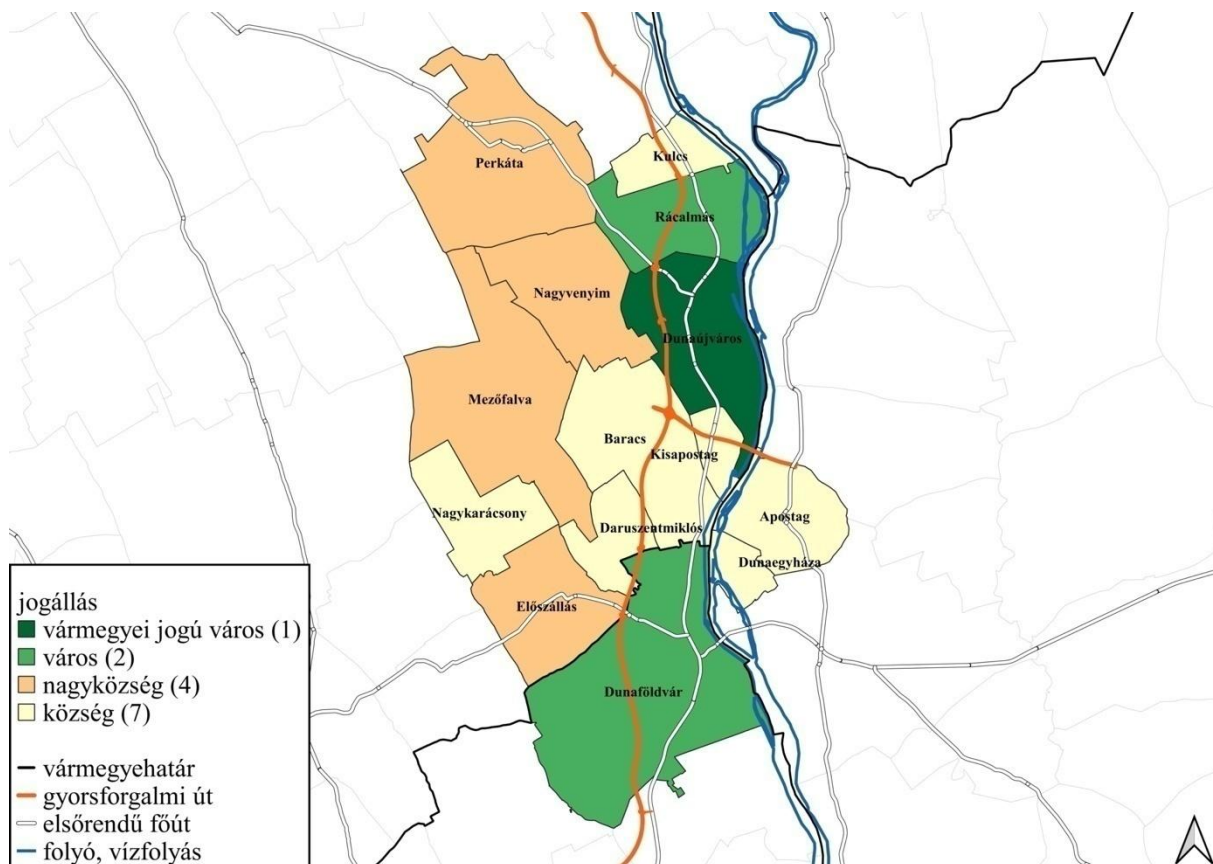
Forrás: Saját készítés



10.kép: Faaljból készült zajvédőfal prototípusom

Forrás: Saját készítés

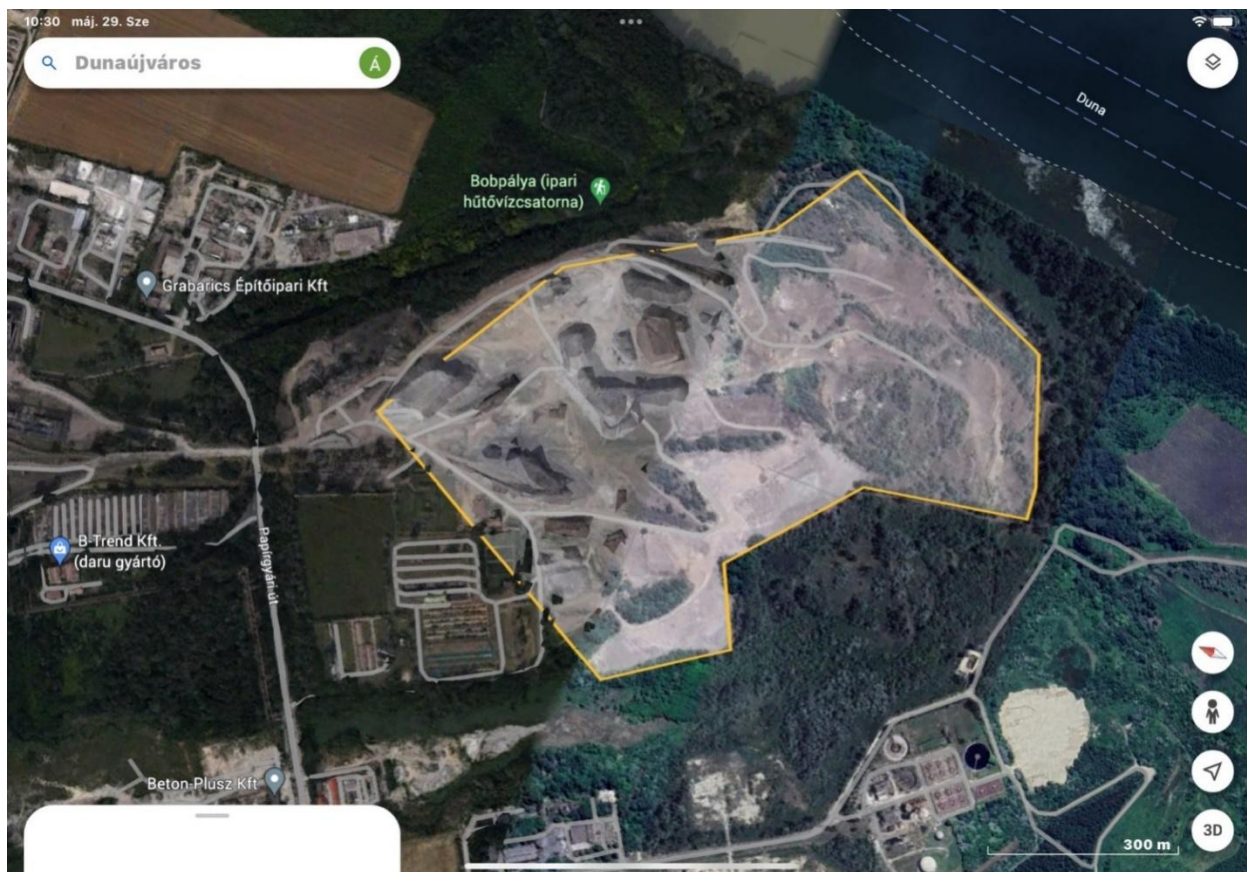
**Képek, ábrák az 4.2.4. Esettanulmány 4.: Dunaújváros: A meddő és salak
újrahasznosításának gazdasági lehetőségei**

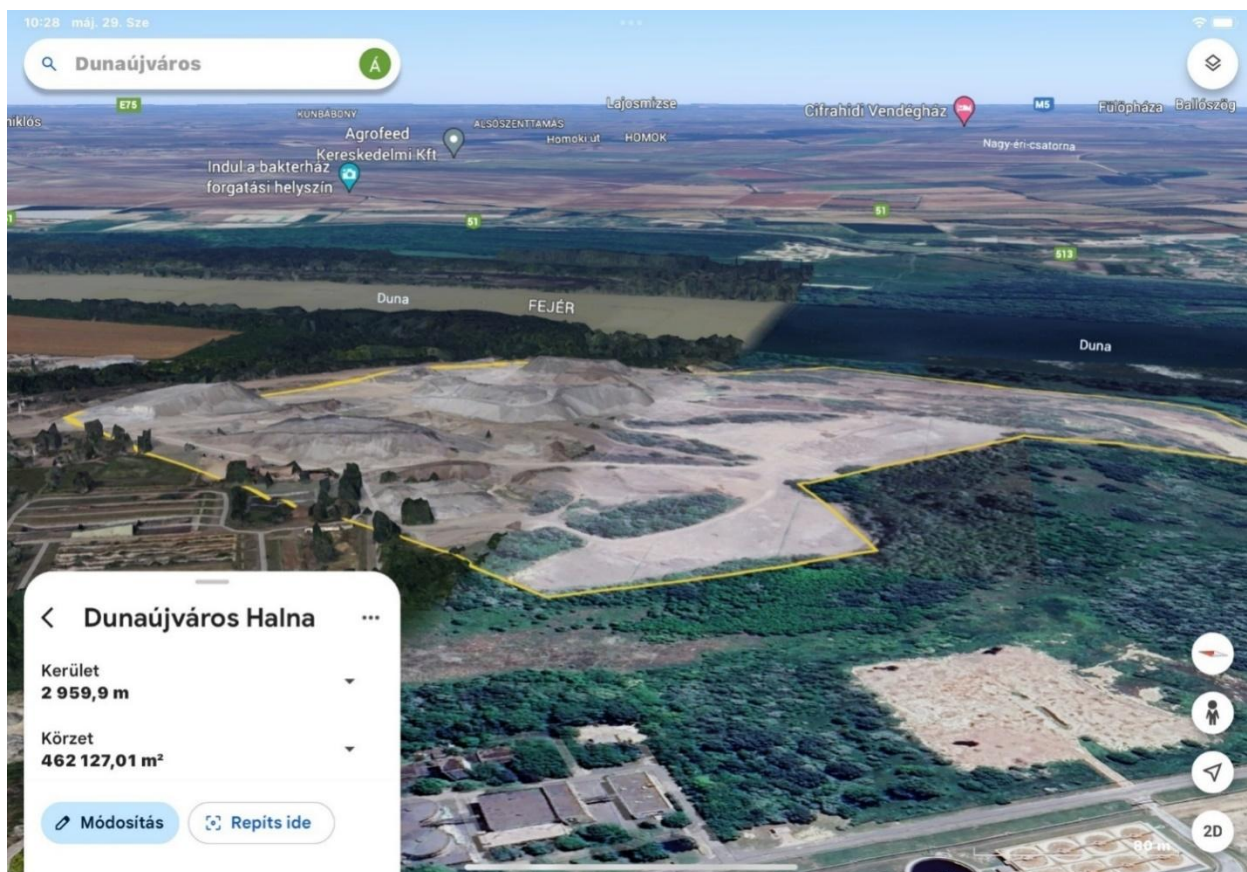


12.ábra: A Dunaújvárosi funkcionális várostérség települései jogállásuk szerint

Forrás: KSH – Urban Audit alapján a szerzők (Bencző-Lőrinc, 2023) saját szerkesztése

Képek





10-12.képek: Műhold képek a dunaújvárosi halnáról

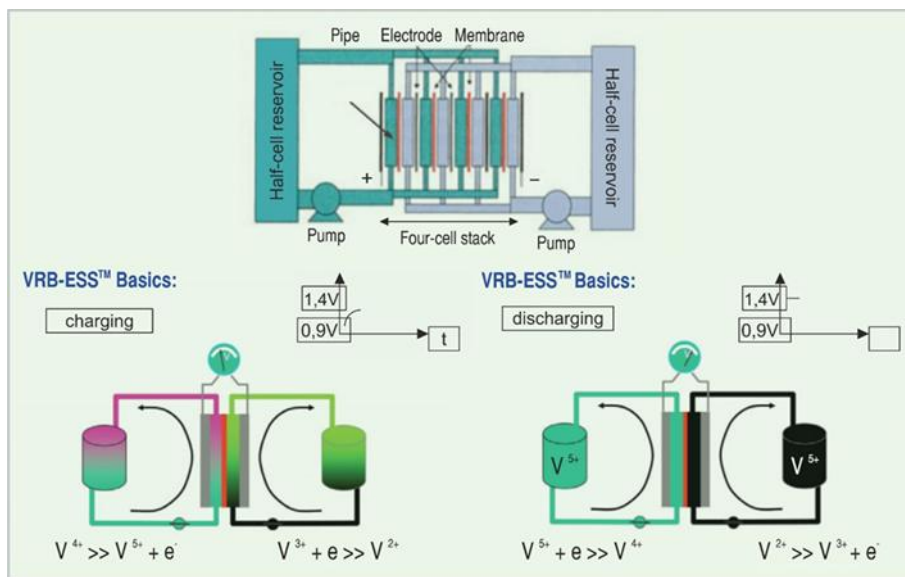
Forrás: Saját készítés



13.kép: Légifotó kép a diósgyőri halnáról

Forrás: Saját készítés

Képek, ábrák az 4.2.5. Esettanulmány 5: Energiatárolási lehetőségek az energiaközösség számára: A vanádiumos akkumulátor lehetőségei fejezethez



13. ábra: A vanádiumakkumulátor működési elve

Forrás: MVM Partner, 2024



Forrás: Vanádium akkumulátor rendszer

saját készítésű fotó Dunaszerdahely 2021



Forrás: Vanádium akkumulátor tag
saját készítésű fotó Dunaszerdahely 2021

Vonatkozó Jogszabályok, szabályozások, a vázolt lehetőségek hazai és nemzetközi beágyazottsága

2008-tól a villamos energiáról szóló, valamint az annak végrehajtásáról szóló 273/2007. (X.19.) Korm. rendelet bevezette a háztartási méretű kiserőmű (HMKE) fogalmát, amelyre az alábbiak jellemzők:

- Közcélú kisfeszültségű hálózathoz, illetve kisfeszültségű magán- vagy összekötő vezetékhálózatra csatlakozik
- Erőművi névleges teljesítőképessége nem haladja meg a felhasználó rendelkezésre álló teljesítményének mértékét
- Maximum 50 kVA erőművi névleges teljesítőképesség

Megjegyzés: a 2-4 kVA kapacitású napelemes rendszer által megtermelt energiamennyiség egy átlagos lakás éves fogyasztását képes fedezni. HMKE közcélú elosztóhálózathoz csatlakoztatása csak az adott területen működési engedéllyel rendelkező elosztói engedélyes hozzájárulással lehetséges. Szigetüzemű rendszer esetén a HMKE létesítését elegendő csak bejelenteni az elosztói engedélyesnek.

A villamos energiáról szóló 2007. évi LXXXVI törvény 116. § szerint nem kell az építésügyi hatóság 115. §-ban meghatározott engedélyét kérni:

a) olyan kiserőmű építéséhez, melynek csatlakozási teljesítménye egy csatlakozási ponton nem haladja meg az 50 kVA-t azzal, hogy a csatlakozási ponton az összesített kiserőművi csatlakozási teljesítmény nem haladhatja meg az 50 kVA-t. 57/2013. (II. 27.) Korm. rendelet - a telepengedély, illetve a telep létesítésének bejelentése alapján gyakorolható egyes termelő és egyes szolgáltató tevékenységekről, valamint a telepengedélyezés rendjéről és a bejelentés szabályairól. 4. § A Kormány a telepengedély kiadása iránti eljárásban

b) ha a telepen az ipari tevékenységgel összefüggésben legalább 50 kVA beépített összteljesítményű, 0,4 kV vagy nagyobb feszültségű villamos berendezést, rendszert használnak - az ezen építményekkel, berendezésekkel összefüggő műszaki biztonsági követelményeknek való megfelelés kérdésében - elsőfokú eljárásban a telep fekvése szerint illetékes, mérésügyi és műszaki biztonsági feladatkörében eljáró fővárosi és megyei kormányhivatal, másodfokú eljárásban a Magyar Kereskedelmi Engedélyezési Hivatalt szakhatóságként jelöli ki.

MSZ EN 60904-3:2008 Fotovillamos eszközök. 3. rész: Földi fotovillamos (PV) napenergia-hasznosító eszközök mérési elvei, referenciaspektrumú besugárzási adatokkal (IEC 60904-3:2008)

MSZ EN 61215:2005 Földfelszíni alkalmazású, kristályos szilícium fotovillamos (PV) modulok. A szerkezeti felépítés minősítése és típusjóváhagyás (IEC 61215:2005)

MSZ EN 61215-1-1:2016 Földfelszíni alkalmazású, fotovillamos (PV-) modulok. A szerkezeti felépítés minősítése és típusjóváhagyás. 1-1. rész: Kristályos szilícium fotovillamos (PV-) modulok különleges vizsgálati követelményei (IEC 61215-1-1:2016)

MSZ EN 61646:2009 Földi fotovillamos (PV) vékonyréteg-modulok. A szerkezeti felépítés minősítése és típusjóváhagyás (IEC 61646:2008)

MSZ EN 61730:2007 Fotovillamos (PV-) modulok biztonságtechnikai minősítése.

Minden telepítőnek be kell tartani az MSZ EN 62446:2010 ill. MSZ EN 62446-1:2016 szabványt: Hálózatra kapcsolt fotovillamos rendszerek. Rendszerdokumentáció, üzembe helyezési vizsgálatok és az ellenőrzés minimális követelményei (IEC 62446:2009) ill. Fotovillamos (PV-) rendszerek. Vizsgálati, dokumentációs és karbantartási követelmények. 1. rész: Hálózatra kapcsolt rendszerek. Dokumentáció, üzembe helyezési vizsgálatok és ellenőrzés (IEC 62446-1:2016)

Ez tartalmazza a dokumentálandó követelményeket minimumát ahhoz, hogy biztosítani lehessen a biztonságos és minőségi telepítést.

A szabvány specifikus mérési területeket tartalmaz az alábbiakhoz:

- az egyes panelek biztonságosan össze vannak kötve egymással
- az elektromos szigetelés minőségét
- a rendszer földelése kifogástalan
- nem sérültek kábelek a behelyezés során
- a napelemes rendszer működőképes

Köszönetet szeretnék mondani és egyben nagyraértékelésemet kifejezni, disszertációm létrehozásában nyújtott önzetlen segítségért:

Erdélyi Viktória Nikolett Környezetmérnöknek

Barna Sándor Környezetvédelmi szakértőnek, az Enviro-Expert Kft. ügyvezetőjének

Dr. Elek Jánosnak, a Science Port Kft. ügyvezetőjének

Dr. Bencze Zsoltnak akitől megtanultam, hogy a „A tudás több mint hatalom – kötelezettségvállalás!”