



Hidak életciklus fenntarthatóságának értékelése

Dema Ahmad¹, Bencze Zsolt², Gáspár László^{1,2}

¹: Széchenyi István Egyetem, Építőmérnöki Kar, Közlekedésepítési és Vízgazdálkodási Tanszék

²: KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft.

E-mail: ahmad.dema@hallgato.sze.hu, dr.bencze.zsolt@gmail.com,
gaspar.laszlo@kti.hu

DOI: [10.36246/UL.2025.1.01](https://doi.org/10.36246/UL.2025.1.01)

KIVONAT

A közúti infrastruktúra valamely ország gazdasági életének meghatározó jelentőségű elemét képezik. Azokon belül a hidak megfelelősége is kiemelt fontosságú a nemzetgazdaság szempontjából. Újabban világszerte egyre nagyobb szerephez jutnak a fenntarthatóság (sustainability) szempontjai. Jelen cikk azt tűzi ki céljául, hogy – főleg egy készülő PhD-értekezés iroda-lomkutatási eredményeire is támaszkodva – a közúti hidakkal kapcsolatos Életciklus Fenntarthatósági Értékelés (Life Cycle Sustainability Assessment, LCSA) és az Épületinformációs Modellezés (Building Information Modeling, BIM) jelentőségét ezen a területen áttekinti. Bemutatják, hogy ezeken a területeken világszerte milyen fontosabb eredményeket értek el, illetve melyek a fő fejlesztési irányok, hol van még érdemleges kutatási hiány (research gap).

Kulcsszavak: közúti hidak, fenntarthatóság, kockázatelemzés, hídgazdálkodás, Életciklus Fenntarthatósági Értékelés (LCSA), Épületinformációs Modellezés (BIM)

ABSTRACT

Road infrastructure can be considered as a major element of national economy; the suitability of bridges has of paramount significance. Sustainability aspects have recently gained increasing importance worldwide. The aim of this article is to review the significance of Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) and Building Information Modeling (BIM) in this field, mainly based on the results of a literature review of a PhD thesis in progress. It presents the most important results achieved in these areas worldwide, the main development directions, and where there is still a significant research gap.

Keywords: highway bridges, sustainability, risk analysis, bridge management, Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA), Building Information Modeling (BIM)

Dema Ahmad

Okl. építőmérnök, MSc-jét 2020-ban Lattakiában (Szíria) szerezte, az ottani Thisreen Egyetemen óraadó és belső auditor volt, 2022. óta a győri Széchenyi István Egyetemen PhD hallgató, készülő értekezése a fenntartható fejlődéssel foglalkozik.

dr. Bencze Zsolt

okl. építőmérnök, 2010-ben a Széchenyi István Egyetemen MSc-t, 2018-ban PhD fokozatot szerzett, 2005 és 2025 januárja között a KTI Non-Profit Kft.-ben tudományos munkatárs, laboratóriumvezető, igazgatóhelyettes, 75 publikációja jelent meg.

dr. habil. Gáspár László

Okl. mérnök, okl. gazdasági mérnök, az MTA doktora, a KTI Nonprofit Kft. kutató professzora, a Széchenyi István Egyetem emeritusz professzora. 489 publikációjára 1111 ismert, független hivatkozása van.

1. BEVEZETÉS

A közlekedési infrastruktúra-hálózatok alapvető fontosságúak a társadalmi és a gazdasági vitalitás szempontjából, és a fenntartható fejlődés gerincét képezik. A hidak, mint e hálózatok kritikus alkotóelemei, pedig az egyes körzetek összekapcsolhatósága és a mobilitás biztosításában játszanak kulcsszerepet. A közúti hidak gazdasági előnyei mellett, egyre inkább a különböző országok kutatóinak látókörébe került ezeknek a nagy jelentőségű, közlekedési infrastruktúra elemeknek a fenntarthatósági jellemzői, kitérve a gazdasági, a környezeti és a társadalmi fenntarthatóságra. Ezzel a kérdéscsoporttal foglalkozik egy olyan, kidolgozás alatt levő, PhD-disszertáció [1], amelynek számos megállapítása jelen cikkben felhasználásra került.

2. A HIDAK ÉS A FENNTARTHATÓSÁG

Az ENSZ Brundtland Bizottsága úgy definiálja a fenntartható fejlődést, mint „a jelen szükségleteinek kielégítését anélkül, hogy azzal a jövő nemzedékek azon képességét veszélyeztetnénk, hogy az akkori szükségleteiket kielégíthessék” [2]. Ez a meghatározás aláhúzza a gazdasági, a társadalmi és a környezeti szempontok integrálásának szükségességét, hangsúlyozva, hogy mind a közösségi élet, mind pedig a gazdasági tevékenységek eredendően a természettől függenek [3]. Az ENSZ Fenntartható Fejlődési Céljaihoz a fenntartható közlekedési infrastruktúra fejlesztése kulcsfontosságú a közösségek természeti kihívásokkal szembeni ellenállóképességének növelése szempontjából [4]. Ezekhez a célokhoz a hidak közvetlenül hozzájárulnak azáltal, hogy megbízható összeköttetést teremtenek és csökkentik a környezeti hatásokat. A globális trendek azt jelzik, hogy a hídépítés a gazdasági terjeszkedés és a városi urbanizáció következtében felpörög [5]. A kihívások azonban a fejlett és a fejlődő országok között egymástól eltérnek. A fejlett országokban az előregedő infrastruktúra és az összetett karbantartási követelmények fenntarthatósági aggályokat vetnek fel, míg a fejlődő országok a gyors urbanizációval és a fenntartható építkezéshez szükséges források korlátozottságával küzdenek. A mobilitásban és a gazdasági integrációban betöltött döntő szerepük ellenére, a hidak, életciklusuk során, hatalmas mennyiségű anyagot és energiát igényelnek, ami a környezet leromlásához jelentős mértékben hozzájárul [6].

A legújabb statisztikai adatok a fenntartható hídkezelés globális sürgősségét mutatják. Kínában 2010 és 2023 között 64%-kal nőtt a közúti hidak száma, ami elérte az 1,08 milliós darabszámot [7]. Az Egyesült Államokban a több mint 617 000 híd 42%-a legalább 50 éves, és 7,5%-a szerkezetileg hiányosnak minősül, ami napi 178 millió felhasználót érint [8]. Hasonlóképpen, Kanada [9] és Németország jelentése [10] szerint is, hídállományuk jelentős része azonnali beavatkozást igénylő, rossz állapotban van, ami tesz szükségessé. Ezek a statisztikák rávilágítanak arra, hogy sürgősen szükség van olyan fenntartható gazdálkodási megközelítésekre, amelyek foglalkoznak az életciklus-hatásokkal, és hasznosítják a feltörekvő technológiai megoldásokat [11], [12].

Történelmileg a gazdasági megfontolások háttérbe szorították a környezeti és társadalmi tényezőket a hídépítési döntésekben, annak ellenére, hogy a fenntarthatóságban szerves szerepük van [13]. A közlekedési infrastruktúrális beruházások továbbra is globális prioritást élveznek, az elmúlt években a Világbanki hitelek több mint 20%-át erre a szektorra fordították [14]. Mindazonáltal a hidak, életciklusuk során, a CO₂-kibocsátáshoz meglehetősen nagy mértékben hozzájárulnak, ezért – a fenntartható építési és karbantartási gyakorlatok elfogadásának elősegítése érdekében – szükség van az üvegházhatást okozó gázok (ÜHG) kibocsátásának mennyiségi értékelésére [15].

A feltörekvő térinformatikai technológiák, mint például az Épületinformációs Modellezés (Building Information Modeling, BIM), a Digitális Iker technológia, a Földrajzi Információs Rendszerek (Geographic Information System, GIS) és a Tárgyak Internete (Internet of Things, IoT) alapú, monitorozó rendszerek, újszerű lehetőségeket teremtettek az infrastrukturális projektek számára. Ezek a technológiák lehetővé teszik a valós idejű adatintegrációt, a prediktív (előre becsülő) karbantartást és a komplex életciklus-elemzést, ezáltal a fenntarthatóság szempontjait az eddigieknél nagyobb mértékig segítik érvényesíteni. Az előbbiek a hídgazdálkodásban azonban továbbra is gyakorlatilag kihasználatlanok maradtak, pedig alkalmazásukkal a teljes életciklusalatti létesítménykezelés korszerűsítésére, a környezeti hatások csökkentésére és a hatékonyabb, hosszú távú fenntarthatóságra nagy lehetőségek nyíl(ná)nak [16].

A projektek kiválasztása és a tervezési döntések a híd fenntarthatóságát, természetesen, jelentős mértékig befolyásolják. A hagyományos építési módszerekre való, túlzott mértékű ragaszkodás súlyosbít(hat)ja azokat a fenntarthatósági kihívásokat, amelyek a modern, technológia által vezérelt megoldásokkal mérsékelhetők. A hídtervezés és -építés bonyolult szerkezeti kialakításokkal és kihívást jelentő környezettel jár együtt, ami pedig – a hagyományos 2D műhelyrajzok használatával – a tervezési hibák előrejelzését megnehezíti. Ezenkívül a híd teljes életciklusa során tapasztalható, nem-folyamatos információátvitel a karbantartási költségeket és az időbeli csúszásokat növeli, végső soron pedig a fenntarthatósági célok elérésére irányuló globális erőfeszítéseket akadályozza [17].

A kockázatalapú döntéshozatal elengedhetetlen a fenntartható hídkezeléshez, mivel a jelenlegi gyakorlat szerint, a kockázatoknak a híd teljes életciklusára vonatkozó értékelését gyakran nem tudják végrehajtani. Ez a hiányosság pedig nem várt költség-túllépésekhez, késedelmes karbantartáshoz és fokozott környezeti hatásokhoz vezet. Átfogó kockázatalapú módszerek alkalmazásával a sebezhetőségek korán azonosíthatók, lehetővé téve olyan proaktív stratégiákat, amelyek a rugalmasságot, a költség-hatékonyságot és a fenntarthatóságot érdemlegesen növelik [18]. A gazdasági kockázatok (költség-túllépések), a társadalmi kockázatok és a környezeti kockázatok (Üvegházhatású Gáz kibocsátása) egyaránt fenyegetik a hosszú távú fenntarthatósági célkitűzéseket. Az olyan digitális eszközök, mint a BIM és az olyan módszerek, mint az Életciklus Fenntarthatósági Értékelés (lásd a 3. pontot) alkalmazása lehetővé teszi ezeknek a kockázatoknak a korai felismerését és mérséklését, a híd teljes életciklusa alatt [19]. A hidak karbantartása-felújítása önmagában a hidak teljes környezeti hatásának 66%-át teszi ki, elsősorban a forgalom elterelése (50%), a hídfelszerkezet felújítása (12%) és a szerkezeti megerősítés (4%) miatt [20].

Megállapítható, hogy világszerte meglehetősen kevés kutatási munka folyt az Életciklus Fenntarthatósági Értékelés és a kockázatalapú döntéshozatalnak a hídgazdálkodási rendszerekbe (Bridge Management, System, BMS) való tervezett beépítése kapcsán, különösen a hidak fenntartásával összefüggő, környezeti hatások tekintetében.

A gazdasági hatékonyság, a környezeti felelősség és a társadalmi méltányosság közötti egyensúly elérése érdekében, a hídprojektekre irányuló gazdálkodásban célszerű innovatív megközelítéseket alkalmazni. A fenntarthatóság biztosításához az életciklus minden szakaszában – a tervezéstől az építésig, az üzemeltetésig, a karbantartásig, a felújításig és leszerelésig – olyan holisztikus keretre van szükség, amely a modern technológiát, a kockázatértékelést és az LCSA alapú döntéshozatalt integrálja [1].

3. ÉLETCIKLUS FENNTARTHATÓSÁGI ÉRTÉKELÉS (LCSA)

3.1. AZ LCSA FOGALMA, ELŐNYEI ÉS KIHÍVÁSAI

Az ENSZ Környezetvédelmi Programja az 1992-es, Rio de Janeiro-i Föld-csúcstalálkozón a fenntarthatóságot a globális fejlődés alapvető politikai céljaként ismerte el. A fenntarthatóság három fő pillér – környezeti, gazdasági és társadalmi dimenzió – köré épül, amelyeket a termékfejlesztési és döntéshozatali folyamatok során indokolt figyelembe venni [21]. Az elmúlt évtizedekben az éghajlatváltozással, a biológiai sokféleség csökkenésével és az ipar technológiaátalakítási és/vagy

termelésvisszafogási kompromisszumaival kapcsolatos globális tudatosság még inkább előtérbe hozta az integrált fenntarthatósági értékelések szükségességét. Ez vezetett az Életciklus Fenntarthatósági Értékelés (LCSA) kidolgozásához; ez a keretrendszer a termékek és a folyamatok környezeti, gazdasági és társadalmi hatásait értékeli, azok teljes életciklusa során [22].

Az LCSA koncepciójával a szakirodalom már több mint 15 éve tárgyalja, és egyre több tanulmány javasol különféle értékelési módszereket. Kezdetben Klöpffer [23] az LCSA-t olyan megközelítésként vezette be, amely a következő három életciklus-értékelési technikát integrálja:

- Környezeti életciklus-értékelés (Environmental Life Cycle Assessment, E-LCA), amely a termék környezeti lábnyomára összpontosít, beleértve az erőforrás-felhasználást, a károsanyag-kibocsátást és a hulladéktermelést,
- Életciklus-költségszámítás (Life Cycle Costing, LCC), amely a termék gazdasági életképességét, valamint a termeléssel, valamint az életciklus végével és a selejtezéssel kapcsolatos költségeket méri fel;
- Társadalmi szintű életciklus-értékelés (Social Life Cycle Assessment, S-LCA), amely egy terméknek a munkavállalókra, a közösségekre és a fogyasztókra gyakorolt társadalmi hatásait vizsgálja, biztosítva az etikus termelést és a tisztességes munkavégzési gyakorlatot.

Ez a három módszer együttesen alkotja az LCSA keretrendszert, amely a fenntartható döntéshozatalhoz holisztikus megközelítést biztosít [24].

Az LCSA módszertanát folyamatosan finomítják, és gyakorlatban való alkalmazhatóságát is javítják [25]. Az eljárás széles körben elterjedt a különböző iparágakban, beleértve az építőipart, a szállítást, az energetikát, a gyártást, a mezőgazdaságot és a hulladékgazdálkodást [26]. Az LCSA egyik legjelentősebb alkalmazása a körforgásos gazdaság (Circular Economy, CE) népszerűsítése olyan fenntartható, termelési és fogyasztási modell révén, amely az anyagok újra felhasználását, állapotjavítását, felújítását és újra hasznosítását helyezi előtérbe, a hulladékmennyiségnek és az üvegházhatású gázok kibocsátásának minimalizálása érdekében [27]. Nemzetközi szinten, az LCSA módszertanok globális szabványok előírásait követik, biztosítva a fenntarthatósági értékelések következetességét [28]. Az LCA-t eredetileg a termékek környezeti (karbon)lábnyomának felmérésére fejlesztették ki, felmérve az erőforrás-áramlásokat és a károsanyag-kibocsátást meghatározott rendszerhatárok között. Idővel a gazdasági fenntarthatóság fontosságának köszönhetően, az LCC került előtérbe, vizsgálva a cash flow-t (pénzforgalmat), a költségstruktúrát és az életciklus alatti költségeket. Az utolsó komponenst, az S-LCA-t a különböző iparágak társadalmi hatásainak mérésére vezették be, helyi, nemzeti és globális szinten, ebben olyan szempontokat értékelnek, mint a munkakörülmények, az emberi jogok és a közösségi jólét [29]. Bár az LCSA komplex fenntarthatósági értékelési eszköz, azonban számos kihívás is jelentkezik. Ezek közül a legfontosabbak az adatgyűjtési nehézségek, a készletelosztási problémák, a módszertani ellentmondások, valamint a kockázatértékelésnek az LCA-számításokba való integrálása [30]. Az LCC módszerek a gazdasági modellezés tekintetében meglehetősen bizonytalanok, míg az S-LCA esetében, a társadalmi mutatók egységesített számszerűsítése okoz nehézségeket. Az 1. táblázat az LCA legfontosabb előnyeit és kihívásait foglalja össze.

1. táblázat: Az LCSA előnyei és kihívásai [4], [6], [29], [30], [31], [32].

Előnyök	Kihívások
Az LCA segítségével kiválaszthatók egy szervezet környezeti viselkedésének fő mutatói, beleértve a környezetállapot felmérésével kapcsolatos mérési és értékelési eljárások	Az LCA alkalmazását jelentős mértékben akadályozhatja a megfelelő és megbízható adatok gyűjtésének nehézségei.
Az LCA olyan iparági vagy kormányzati szervezeti döntéseket feltételez, amelyek meghatározzák a stratégiai tervezési prioritásokat és irányt, a termék- vagy folyamattervezést és ezeken a területeken az esetleges változásokat.	Az LCA-nak nehézségei vannak az adatleltár létrehozásával, beleértve az allokációt és a késleltetett károsanyag-kibocsátásokat.

Az LCC fontos felhasználási területe az egyes változatok gazdasági jövedelmezőségének és tőkebefektetésének összehasonlítása.	Az LCA-nak a hatásvizsgálatban gyakori problémája, például, a földhasználat és a keletkező szagok figyelembevétele.
Az LCC számos olyan költséget mutat ki, amelyek a különböző típusú eszközök egész élettartamuk alatti birtoklásából és használatából származnak.	Az LCA-nak jelentős nehézségei származnak a kockázatértékelési elemeknek a számításba integrálása során.
Az S-LCA bevonja az érdekelt feleket a célok és a vizsgálati tárgykör meghatározásába, az adatgyűjtésbe és az értékelésbe.	Az LCC-nek egyes iparágakba való bevezetése problematikus lehet, mert módszertana gyakran ütközik más olyan kapcsolódó elképzelésekkel, mint, például, a "teljes költségelszámolás".
Az S-LCA társadalmi információkat nyújt a döntéshozóknak, megkönnyíti a társadalom egyes területein élő emberek számára a termelésről és a fogyasztásról alkotott elképzelések megismerését, hatékonyabbá teszi a munkájukat, és végül, minden érdekelt félnek próbál segíteni.	Az LCSA-megközelítés bonyolultsága, amely állítólag a fenntarthatósági teljesítmény megbízható mérését lehetővé teszi, a döntéshozók számára, kihívást jelent.
Az S-LCA segíti a döntéshozókat az erőforrások fontossági sorrendjének meghatározásában és azok felhasználásában ott, ahol a jó eredményeknek és a kisebb negatív eredményeknek nagyobb a valószínűsége.	Vita van arról, hogy az LCC-nek a költségszinten kell-e maradnia, vagy a hagyományos LCC-keretet meg kell-e változtatni, hogy a gazdaság tágabb szemléletét részesíti előnyben.
Az S-LCA innovációra ösztönzi a vállalati és az értéklánc szereplőit.	Az S-LCA jelentős problémája a társadalmi mutatók hatáskategóriákhoz és kedvezőtlen kimenetekhez való viszonyítása.
Az átlátható S-LCA információs kommunikáció segíti a cégeket bizalmuk növelésében.	Az S-LCA jelzéseket számszerűsített értékekké konvertálni nehéz, ami az eredmények értékelését túl bonyolulttá teszi.
Az S-LCA segít a szakembereknek a bonyolult, környezeti, gazdasági és társadalmi tények és adatok rendszerezésében.	Az S-LCA további továbbfejlesztést igényel ahhoz, hogy a társadalmi mutatók pontosabban tudja megállapítani.
Az S-LCA felhívja az értéklánc szereplőinek figyelmét a fenntarthatósággal kapcsolatos kérdésekre felhívja.	Az S-LCA-tól eltérően, az LCC-ből hiányoznak az ok-okozati ciklust követő hatásútvonalak.

Az 1. táblázatban feltüntetett kihívások ellenére, az LCSA továbbra is alapvető fontosságú eszköz ahhoz, hogy a fenntarthatóságot a döntéshozatalba integrálják; az adatgyűjtés, a hatásvizsgálat és a digitális modellezés terén történő, folyamatos fejlesztések a fenntartható fejlődés irányításának hatékonyságát egyre inkább fokozzák [24], [30].

3.2. AZ LCSA ALKALMAZÁSA A HÍDGAZDÁLKODÁSBAN

Az Életciklus Fenntarthatósági Értékelést (LCSA) a különböző építőipari ágazatokban széles körben alkalmazzák, de a hídprojektekben továbbra is korlátozottan kerül előtérbe. Általában az LCSA minden egyes összetevőjét (E-LCA, LCC és S-LCA) külön-külön alkalmazzák, nem pedig integráltan. Kezdetben a hídépítés során használt anyagok környezeti hatásának értékelésére életciklus-értékelést (LCA) alkalmaztak. Az egyik legkorábbi tanulmány [33] szerzői általános LCA-módszert dolgoztak ki az új közlekedési infrastruktúra értékelésére. Tanulmányukban a hagyományos felépítésű hidak élettartamát hasonlították össze egy minimális tartómeretűhíddal, acél tartóssági vizsgálatok eredményeit hasznosítva szerkezeti élettartamuk felmérésekor. Másik vizsgálat során, két hídpályarendszer életciklus-teljesítményét elemezték 60 éves élettartamuk alatt, ezek közül az egyik hagyományos anyagokat, a másik pedig cement kötésű kompozitokat tartalmazott. Modelljük célja a hídpálya élettartamának meghosszabbítása volt, a karbantartási költségek és a környezeti hatások minimalizálása mellett [34].

Du és Karoumi [6] a vasúti hidak környezeti hatásának felmérésére, rendszerszemléleten alapuló LCA-modellt vezettek be. Arra a következtetésre jutottak, hogy az anyaggyártás a legnagyobb környezetterhelésért felelős, míg az építőipari gépek ez irányú hatása csekély. Emellett öt nagy fesztávú híd tervét hasonlították össze, 20 környezeti hatásmutató segítségével, különös figyelemmel a

betontípusokra, az acél újra hasznosítási arányára és az anyagválasztásra, mint a környezeti teljesítményt meghatározó kulcstényezőkre.

A hídprojektekben végzett LCA-alkalmazásokkal kapcsolatos kiterjedt kutatás ellenére, az LCC-t továbbra sem alkalmazzák sűrűn, és az S-LCA-t is ritkán építik be a fenntarthatósági értékelésekbe. A jelenlegi tanulmányok elsősorban a környezeti hatásokra és a költségértékelésekre összpontosítanak, de a társadalmi fenntarthatósági szempontokat (pl. közösségi hatás, munkakörülmények) gyakran figyelmen kívül hagyják. A jövőbeli kutatásnak előtérbe kellene helyeznie a teljesen integrált LCSA-modelleket, biztosítva a környezeti, gazdasági és társadalmi dimenziók kiegyensúlyozott megközelítését. A holisztikus fenntarthatósági keretrendszerek kidolgozásával, elérhető lehet, hogy a hídgazdálkodás az életciklus-hatékonyságot javíthatja, a környezeti lábnyomokat csökkentheti, és a hosszú távú költségeket optimalizálhatja.

Hazai viszonylatban az amerikai PONTIS hídgazdálkodási rendszer (BMS) magyar viszonyokra történő adaptációja a hídfenntartási és a vagyonkezelési stratégiák korszerűsítésében jelentős szerepet játszott [35]. A magyar ötéves hídfenntartási és -rehabilitációs program alkalmazásával tovább fejlesztették a hídkezelési modellt, korszerű értékelési eszközök és indikátorok rendszerbe történő integrálásával [36]. Ezek a kezdeményezések rávilágítanak a BMS folyamatos frissítésének fontosságára, a fejlődő infrastrukturális igények és a technológiai fejlesztések nyomán követése érdekében.

4. ÉPÜLETINFORMÁCIÓS MODELLEZÉS (BIM) A HÍDÜGYBEN

Az Épületinformációs Modellezés (BIM) viszonylag új technológia a hídépítésben, de – a szerkezeti elemek pontos, numerikus ábrázolását biztosító 3D modellek használatával – a tervezési pontosságot, az együttműködést és a megépíthetőséget jelentős mértékben javíthatja [37]. Számos tanulmány igazolta, hogy a BIM képes javítani az infrastruktúrát, különösen a nagy mértékű részletességet és összetettséget igénylő hídprojekteket. A több életciklus-fázis közötti interoperabilitás elősegítése érdekében bővíthető hídinformációs sémát fejlesztettek ki, amely a tervezési, építési és fenntartási folyamatokat javítja [38].

Amerikai kutatók bevezették a BrIM (Bridge Information Modeling, Híd Információs Modellezés) keretrendszert, amely integrálja a Bridge Management System (BMS), Hídgazdálkodási Rendszer olyan funkcionális elemeit kapcsolja össze, mint az adatbázisok, az ellenőrzési modulok és az állapotértékelési eszközök. Később automatizált költség- és időgazdálkodási rendszert is fejlesztettek ki a hidakhoz; ez lehetővé teszi teljesítményük nyomon követését, a költségbecslést és a projekt valós idejű megfigyelését előre meghatározott vagy pedig a felhasználó által beállítható paraméterek segítségével [39].

Dawood az elvi és a részletes hídtervezés optimalizálásához, az építkezések sorrendjéhez, az építésmenedzsmenthez, az ütemezéshez és a valós idejű folyamatfigyeléshez BIM-alapú megoldásokat vezetett be annak érdekében, hogy a projekt teljes életciklusa alatt jobb hatékonyságot érjenek el. A BIM és a modern képalkotási és -számítási technológiák integrálásával újszerű keretrendszert javasoltak a híd vagyonkezelésének javítására, különösen pedig a lézeres szkennelés és a modern textúrafelismerés felhasználásával a szerkezeti hibák, például repedés, süllyedés és korrózió kimutatására. Ezeken túlmenően, a BIM-et a hídfenntartási és -javítási programok fejlesztésére is használják. Vizuális keretrendszert dolgoztak ki a betonhídelemek állapotának nyomon követésére, az Excel segítségével a számszerű elemzéshez és a Revit alkalmazásával a vizualizációhoz, automatizált valós idejű információcsere-platfornot hoztak létre az egyes hídelemek romlási arányainak nyomon követésére és a karbantartási ütemezés optimalizálására [40].

Kínai kutatók egyesítették a BIM-et és a GIS-t (Térinformatikai Rendszert), döntéstámogató platfornot biztosítva a hídkarbantartáshoz. Megközelítésük abból állt, hogy az IFC formátumú BIM modelleket térinformatikai modellekké alakították át. Ezt a megközelítést aztán webalapú, térinformatikai rendszerbe integrált, hídkezelő rendszerbe alkalmazták, amelyekkel a BIM-modellek valós hídfelügyeleti alkalmazásokhoz módosíthatók [41].

A biztonsági ellenőrzés és a fenntartási döntéshozatal javítása érdekében, a hídinformáció-kezelés integrált keretrendszerét is javasolták, biztosítva a szerkezet biztonsági előírásainak betartását. Ennek

továbbfejlesztéseként, intelligens hídkezelési és -karbantartási rendszert vezettek be, amely, a szerkezeti problémák proaktív észlelésére és megoldására, valós idejű megfigyelő eszközöket használ, csökkentve ezzel a leromló hidakon a balesetek bekövetkezésének valószínűségét [42].

Újabban BIM alapú Bridge Maintenance System (BMS) rendszert fejlesztettek ki a hibakezelés digitalizálására. Módszerük 3D-s hídhiba-könyvtár (BIM3D) létrehozását, a hibainformációk osztályozását és kódolását, és ezen adatok átfogó vizsgálati adatbázisba történő integrálását foglalta magában. Ez a digitalizált megközelítés lehetővé teszi a gyorsabb hibaazonosítást, a strukturált karbantartási tervezést és – végeredményben – a híd hosszabb élettartamát [43].

Míg számos tanulmány tárta fel a BIM-alkalmazásokat a hídkezelésben, még további kutatásokra van szükség a gyakorlati megvalósítási stratégiák finomítása, a BIM és más digitális eszközök közötti interoperabilitás javítása, valamint a BIM hídprojektekben történő alkalmazásakor, a hosszú távú költséghatékonyság felmérése érdekében. E területek kezelése hozzájárul a BIM technológia fejlesztéséhez és a fenntartható infrastruktúra-fejlesztésben betöltött szerepének optimalizálásához.

5. NÉHÁNY ÖSSZEFOGLALÓ MEGJEGYZÉS

Az előbbieken a fenntarthatóságnak egyik lényeges és időszerű alkalmazási területével, a közúti hidakkal foglalkoztunk. A közlekedési infrastruktúrának ezen nagy jelentőségű eleme sok kutatási munka témáját adta, rámutatva a nemzetgazdaságban betöltött szerepére, az általa nyújtott gazdasági előnyökre, valamint azokra a veszteségekre, amelyekkel a forgalomból való időleges kiesése vagy funkcióinak kényszerű korlátozása esetében kell számolnunk. Újabban világszerte egyre sokasodnak azok a vizsgálatok, illetve azok eredményei alapján kifejlesztett modellek, amelyek a jelen gazdasági előnyeivel esetenként akár szembe állítva, a fenntarthatóság olyan kérdéseit vetik fel, mint az utánunk következő nemzedékek irányában megnyilvánuló társadalmi felelősségérzetet.

6. IRODALOM

- [1]: Ahmad, D.M. (2025). Development of a Sustainable Bridge Management Model (SBMM) integrating Risk Management, BIM, and LCSA. PhD Thesis. Doctoral School of Multidisciplinary Engineering Sciences, Széchenyi István University, Győr (under review)
- [2]: United Nations. 1989. Report of the World Commission on Environment and Development: resolution / adopted by the General Assembly. 42nd session (1987-1988). <https://www.un.org/en/ga/cpc/dec/42450.pdf>
- [3]: Llatas, C., Quiñones, R., et al. 2022. Environmental Impact Assessment of Construction Waste Recycling versus Disposal Scenarios Using an LCA-BIM Tool during the Design Stage. *Recycling*, 7(6), 82. <https://doi.org/10.3390/recycling7060082>
- [4]: United Nations. 2015. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations General Assembly. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- [5]: Zhao, Z., et al. 2019. Integrating BIM and IoT for smart bridge management. IOP Conf. Series: *Earth and Environmental Science* 371 (022034), <https://doi.org/10.1088/1755-1315/371/2/022034>
- [6]: Du, G., Karoumi, R. 2013. Life cycle assessment of a railway bridge: comparison of two superstructure designs. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9:11, 1149-1160, <https://doi.org/10.1080/15732479.2012.670250>
- [7]: Statista.2024.
- [8]: American Infrastructure Report Card, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2021. <https://infrastructurereportcard.org/>
- [9]: Canadian Infrastructure Report Card, Monitoring the State of Canada's Core Public Infrastructure, 2019. <http://canadianinfrastructure.ca/en/municipal-roads.html>
- [10]: Federal Statistical Office of Germany (Statistisches Bundesamt), 2021. https://www.destatis.de/EN/Press/2021/07/PE21_N048_61.html
- [11]: Feghhi, M., Khedmatgozar Dolati, S. S., et al. 2024. A New Framework for Condition and Risk Assessment for Sustainable Management of PT Bridges. *Sustainability*, 16(22), 9703. <https://doi.org/10.3390/su16229703>

- [12]: Shivam, S. 2024. Efficient Bridge Management System: A Comprehensive Approach for Sustainability of Bridge. *Journal of Chemical Health Risks*, 14(3), 1831-1845. <https://www.jchr.org/index.php/JCHR/article/view/4842>
- [13]: Penadés-Plà, V., García-Segura, T., et al. 2016. A Review of Multi-Criteria Decision-Making Methods Applied to the Sustainable Bridge Design. *Sustainability*, 8, 1295. <https://doi.org/10.3390/su8121295>
- [14]: Navarro, I., Yepes, V., et al. 2021. Sustainability life cycle design of bridges in aggressive environments considering social impacts. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 9(2) 93-107. <https://doi.org/10.2495/CMEM-V9-N2-93-107>
- [15]: Milić, I., & Bleiziffer, J. 2024. Life cycle assessment of the sustainability of bridges: methodology, literature review and knowledge gaps. *Frontiers in Built Environment*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1410798>
- [16]: Pelden, S., Banihashemi, S., et al. 2025. Enhancing infrastructure planning and design through BIM-GIS integration. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*. <https://doi.org/10.1080/15732479.2025.2461629>
- [17]: Saback de Freitas Bello, V., Popescu, C., et al. 2022. Framework for Bridge Management Systems (BMS) Using Digital Twins. In: Pellegrino, C., Faleschini, F., et al. (eds) Proceedings of the 1st Conference of the European Association on Quality Control of Bridges and Structures. *EUROSTRUCT 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 200. 687–694. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91877-4_78
- [18]: Lee SH, An LS, et al. 2025. Risk-based bridge life cycle cost and environmental impact assessment considering climate change effects. *Sci Rep.* 3;15(1):725. PMID: 39753640; PMCID: PMC11698832, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82568-4>
- [19]: Raeisi, F., Algoi, B., et al. 2021. Reducing carbon dioxide emissions through structural health monitoring of bridges. *J Civil Struct Health Monit*, 11, 679–689. <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00474-z>
- [20]: Pang, B., Yang, D., et al. 2015. Life cycle environmental impact assessment of a bridge with different strengthening schemes. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20(9) 1300-1311. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0936-1>
- [21]: Klopffer, W. 2008. Life cycle sustainability assessment of products. *Int J Life Cycle Assess* 13, 89. <https://doi.org/10.1065/lca2008.02.376>
- [22]: Valdivia, S., Ugaya, C.M.L., et al. 2013. A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment – our contribution to Rio+20. *Int J Life Cycle Assess* vol. 18, 1673–1685. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0529-1>
- [23]: Schramm, A., Richter, F., et al. (2020). Life Cycle Sustainability Assessment for manufacturing – analysis of existing approaches. *Procedia Manufacturing*, vol. 43, 712-719. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.115>
- [24]: Larsen, V. G., Tollin, N., et al. 2022. What are the challenges in assessing circular economy for the built environment? A literature review on integrating LCA, LCC and S-LCA in life cycle sustainability assessment, LCSA. *Journal of Building Engineering*, 50, 104203 <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104203>
- [25]: Pradip P. K., Deepjyoti D. 2020. Advancing Life Cycle Sustainability Assessment Using Multiple Criteria Decision Making, Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making, *ScienceDirect* In the book: Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making 205-224. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818355-7.00010-5>
- [26]: Mondello, G., Salomone, R. 2020. Assessing green processes through life cycle assessment and other LCA related methods. *Studies in Surface Science and Catalysis*, vol. 179, 159-185. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64337-7.00010-0>
- [27]: Anastasiades, K., Blom, J. et al. 2020. Translating the circular economy to bridge construction: Lessons learnt from a critical literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109522>
- [28]: Balasbaneh, A.T., Marsono, A.K.B. 2020. Applying multi-criteria decision-making on alternatives for earthretaining walls: LCA, LCC, and S-LCA. *Int J Life Cycle Assess* 25, 2140–2153. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01825-6>
- [29]: Finkbeiner, M. 2014. The International Standards as the Constitution of Life Cycle Assessment: The ISO 14040 Series and its Offspring. In: Klöpffer, W. (eds) Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment. *LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment*. Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8697-3>
- [30]: Valdivia, S., Ugaya, C.M.L., et al. 2013. A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment – our contribution to Rio+20. *Int J Life Cycle Assess* vol. 18, 1673–1685. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0529-1>

- [31]: Finkbeiner M, Schau EM, et al. 2010. Towards Life Cycle Sustainability Assessment. *Sustainability*. vol. 2(10) 3309-3322. <https://doi.org/10.3390/su2103309>
- [32]: Chang, Y. J., Neugebauer, S., et al. 2017. Life cycle sustainability assessment approaches for manufacturing. In the book: *Sustainable Manufacturing*, 221-237. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48514-0_14
- [33]: Itoh, Y., Kitagawa, T. (2003). Using CO₂ emission quantities in bridge lifecycle analysis. *Engineering Structures*, vol. 25, 565-577. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00167-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00167-0)
- [34]: Keoleian, G., Kendall, A., et al. 2005. Life Cycle Modeling of Concrete Bridge Design: Comparison of Engineered Cementitious Composite Link Slabs and Conventional Steel Expansion Joints. *Journal of Infrastructure System*, vol. 11. ASCE. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2005\)11:1\(51\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:1(51))
- [35]: Agárdy, G., Gáspár, L., et al. 2000. Adaptation of PONTIS BMS to Hungarian conditions. *4th Bridge Engineering Conference*, Adelaide, Australia. 61-70.
- [36]: Molnár, I., Gáspár, L., et al. 2002. Hungarian 5-year Bridge Maintenance and Rehabilitation Program, as a part of Asset Management. *IABSE Symposium Report*. Vol. 86. 34-42. <https://doi.org/10.2749/222137802796336180>
- [37]: Rolfsen, C. N., Lassen, A. K., et al. 2021. In the book: ECPPM 2021 - eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction, Chapter: The use of the BIM-model and scanning quality assurance of bridge constructions. 1st edition, Taylor & Francis Group. 4 p.
- [38]: Shim, C., Yun, N., et al. 2011. Application of 3D Bridge Information Modeling to Design and Construction of Bridges. *Procedia Engineering*, vol. 14, 95-99. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.010>
- [39]: Marzouk, M. M., Hisham, M. 2014. Implementing earned value management using bridge information modeling. *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 18, 1302–1313. <https://doi.org/10.1007/s12205014-0455-9>
- [40]: Dawood, M. 2018. BIM Based Bridge Management System. In: Şahin, S. (eds) 8th International Conference on Engineering, Project, and Product Management (EPPM 2017). EPPM 2017. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-74123-917>
- [41]: Wan, C., Zhou, Z., et al. 2019. Development of a Bridge Management System Based on the Building Information Modeling Technology. *Sustainability*, 11, 4583. <https://doi.org/10.3390/su11174583>
- [42]: Zhou, Z. 2022. An Intelligent Bridge Management and Maintenance Model Using BIM Technology. *Mobile Information Systems*, vol. 2022, Article ID 7130546, 9 p. <https://doi.org/10.1155/2022/7130546>
- [43]: Li, S., Zhang, Z., et al. 2023. Development of a BIM-based bridge maintenance system (BMS) for managing defect data. *Sci Rep* 13, 846. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27924-6>



Az éghajlatváltozás és az útburkolatok

Gáspár László

Széchenyi István Egyetem, Építőmérnöki Kar, Közlekedésépítési és
Vízgazdálkodási Tanszék és a KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft.

E-mail: gaspar.laszlo@kti.hu

DOI: [10.36246/UL.2025.1.02](https://doi.org/10.36246/UL.2025.1.02)

KIVONAT

A nagyrészt emberi tényezők által is kiváltott globális éghajlatváltozás, egyebek mellett, a köz-úti közlekedést és annak infrastruktúráját befolyásolja. A szerző a klímaváltozás útburkolatokra hatást gyakorló legfontosabb elemeit áttekinti, kitérve a lehetséges válaszokra is. A hazai tapasztalatokat és esettanulmányokat külföldi eredményekkel együtt ismerteti.

Kulcsszavak: éghajlatváltozás, aszfaltburkolatok, betonburkolat, útburkolat leromlása, útépitési technológiák

ABSTRACT

Global climate change, which induced largely by human factors, affects road transport and its infrastructure among other things. The author reviews the most important elements of climate change affecting road surfaces, including possible responses. He presents domestic experiences and case studies together with some foreign results.

Keywords: climate change, asphalt pavements, concrete pavement, pavement deterioration, road construction technologies

dr. habil. Gáspár László

Okl. mérnök, okl. gazdasági mérnök, az MTA doktora, a KTI Nonprofit Kft. kutató professzora, a Széchenyi István Egyetem emeritusz professzora. 489 publikációjára 1111 ismert, független hivatkozása van.

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt időszakot a Föld éghajlatának a korábban tapasztaltaknál szélsőségesebb változékonysága jellemezte. Emellett az éghajlatnak azt a – sok jelből ítélve – tartós tendenciájú változását is regisztrálták, amelyet általában a „globális felmelegedés” elnevezéssel illetnek [1]. Újabban azonban világossá vált, hogy a tapasztalt jelenség ennél szélesebb körű, hiszen eb-ben az esetben a szélsőséges időjárási tényezőknek (hőség, zord hideg, özvízszerű esőzés, tartós havazás, aszály, orkánszerű szél stb.) a korábbiaknál jóval sűrűbben előforduló következményeivel kell megküzdeni.

Hazánkban 2003-ban indult a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, valamint a Magyar Tudományos Akadémia közös égisze alatt a hároméves időtartamú VAHAVA (Klímaváltozás–Hatások–Válaszok) komplex kutatási program [2]. Ennek a programnak részeként, a nemzet-gazdaság

fő közlekedési infrastruktúráját, a közúthálózatot, azon belül is az útburkolatot (út-pályaszerkezetet) is vizsgálták a klímaváltozás szempontjából [3]. Világossá vált, hogy az a társadalmi elvárás (gazdasági érdek plusz életminőség), hogy a mobilitási igényeket szélsőséges időjárási körülmények között is ki kell elégíteni – lehetőleg az egyre nagyobb hangsúlyhoz jutó, fenntarthatósági követelmények érvényre juttatásával egyidőben.

2025. március 27-én ebben a tárgykörben szervezték a BME-ben a Reziliens Útpályaszerkezetek Konferenciát, ahol jelen cikk szerzője, „A klíma hatása az útburkolatok élettartamára” címmel előadást tartott; ez a cikk az előadáson elhangzottakat foglalja össze.

2. AZ ÉGHAJLATVÁLTOZÁSRÓL

Az elmúlt évtizedekben a tudomány és a politika egyre nagyobb figyelmet fordít a természet és a társadalom közötti kapcsolatokra. Több új irányzat jelent meg, mint, például, a környezetvédelem, a fenntartható fejlődés koncepciója, valamint a globális klímaváltozás szempontrendszerei, amelyek a környezet és a társadalmi-gazdasági fejlődés viszonyával kapcsolatban számos új összefüggésre és kölcsönhatásra mutattak rá [4].

Az éghajlat fokozatos – a jövőre vonatkozóan már többé-kevésbé pontosan leírható – változásával az említett kedvezőtlen időjárási hatások csak súlyosbodnak [5]. Világszerte már több évtizede intenzív kutatási munka folyik egyrészt a közlekedéshez kapcsolódóan az éghajlatváltozás folyamatának a lassítására irányuló intézkedések kidolgozására (ún. mitigációs tevékenység), másrészt pedig az elkerülhetetlennek tekintett, a közlekedést érintő kedvezőtlen klímaváltozási hatások kivédésére, vagy legalább is csökkentésére irányuló döntések előkészítésére (ún. adaptációs tevékenység) [6].

A világ tudósainak többsége egyetért abban, hogy megkezdődött a globális felmelegedés időszaka. A Föld átlagos felszíni hőmérséklete a XX. század folyamán $0,6 \pm 0,2$ °C értékkel emelkedett. Ezen belül 1998 volt a legmelegebb év. Az éghajlatváltozással foglalkozó tudósok abban is megegyeznek, hogy a Földnek a tengerszint magasságában mérhető átlagos hőmérséklete az 1750-es értékről legfeljebb 2,0 °C értékkel növekedhet katasztrofális következmények nélkül. A felmelegedés további folyamatát ezért nemzetközileg koordinált intézkedésekkel feltétlenül le kell lassítani. A tárgyban végzett előre becsléseket nehezíti, hogy a károsanyag-kibocsátás és a klímaváltozás időpontja között hosszú idő telik el, valamint, hogy a légkörbe kerülő széndioxid csupán korlátozott ideig (50-200 évig) fejti ki hatását [7].

Műholdfelvételek igazolják, hogy az 1960-as évek vége óta a Föld hóval borított része közel 10 %-nyival visszaszorult, ugyanakkor az északi féltekén a tavakat és a vízfolyásokat két héttel rövidebb ideig borítja jégta- karó. A tengerek átlagos szintje az elmúlt század folyamán 0,1-0,2 m-rel emelkedett. Az északi féltekén a XX. század második felében a nagyon intenzív – esetenként özvízszerű – esőzések gyakorisága 2-4 %-kal megnövekedett. Az 1970-es évek óta az „El Nino”-jelenség jelentős mértékben gyakoribbá vált a Csendes-óceán trópusi és szubtrópusi körzeteiben. (Említést érdemel néhány olyan terület is, amely – a mérések eredményei szerint – az elmúlt száz évben érdemleges változást nem szenvedett: a déli félteke óceáni és antarktiszi része nem melegedett, ugyanitt a tengerek jégta- karójának vastagsága változatlan marad, illetve a tornádók és a viharos napok gyakorisága sem változott). Egyértelműen bebizonyosodott, hogy az üvegházhatású gázok légkörben tapasztalt koncentrációjának növekedése a földfelszín felmelegedését váltja ki, ugyanakkor az aeroszol típusú szennyezés ellentétes hatása.

A légkör széndioxid-koncentrációja 1750 óta 31 %-kal növekedett. Az emberi tevékenységhez kapcsolódó CO₂-kibocsátásnak mintegy 3/4-ed része a fosszilis üzemanyagok elégetéséből származik. A többiért főleg az erdőirtás felelős. Az elmúlt két évtizedben a légkör CO₂-koncentrációja évenként, átlagosan, 0,4 %-kal nőtt.

A globális éghajlatváltozást már viszonylag komplex számítógépes modellekkel szimulálni tudják, azonban folynak a kutatások a modellek továbbfejlesztésére, megbízhatóbbá tételére.

Az előre becslések szerint az említett „káros” emberi hatás a XXI. század folyamán sem fog csökkenni. Az egyes szcenáriók csupán ennek mértékében térnek el egymástól. Így számítani lehet arra,

hogy a jövőben a globális klímaváltozásból származó – egyes vonatkozásokban az embereket közvetlen érintő – negatív következmények súlyosbodnak.

A szélsőséges hőmérsékleti viszonyok az előrejelzések – a regionális klímamodellek – aszerint Közép- és Kelet-Európában jelentősen éreztetik majd hatásukat. A csökkenő nyári csapadékmennyiséggel együtt növekedhet az aszályok kockázata, nyáron pedig az energiafelhasználás. A téli nagyobb csapadékmennyiség várhatóan növeli a télen és tavasszal (különböző régiókban) bekövetkező folyami árvizek intenzitását és gyakoriságát. Az éghajlatváltozás miatt a termés hozam ingadozásának növekedésére és az erdőtüzek gyakoribbá válására lehet számítani.

Ezek a tények és előrejelzések világszerte koordinált adaptációs stratégiák kialakítását teszik szükségessé. Ilyen céllal került sor 2003-tól hazánkban a művelésére, „A globális klímaváltozás: hazai hatások és válaszok” című VAHAVA-projekt művelésére, amelynek elsődleges célja a globális klímaváltozás – negatív és esetenként pozitív – hatásaira történő felkészülés, a különféle károk megelőzése, mérséklése és a helyreállítás előmozdítása érdekében; emellett célul tűzték ki a hazai klímapolitika megalapozását is. Ez utóbbi a csökkentésre (mitigáció) és az alkalmazkodásra (adaptáció), mint két alappillérré támaszkodik. A számos szakterület képviselői között a cikk szerzője is részt vett ebben a munkában, a közúti közlekedésre és az útpályaszerkezetekre gyakorolt éghajlatváltozási hatásokkal és az azokra adható lehetséges válaszokkal foglalkozott [3, 6, 8, 9].

3. VAHAVA-PROJEKT

Korábban öt olyan jelentős környezetpolitikai eseményre került sor, amely a hazai VAHAVA-projekt előzményének tekinthető [10]:

- ENSZ Konferencia az Emberi Környezetről (Stockholm, 1972).
- Környezet és Fejlődés Világbizottsága (Brundtland Bizottság, 1984-1987).
- Éghajlatváltozási Kormányközi Testület, IPCC (1988 óta).
- ENSZ Konferencia a Környezetről és a Fejlődésről (Rio de Janeiro, 1992).
- A Kiotói Jegyzőkönyv (1997).

Ez a Jegyzőkönyv a károsanyag-kibocsátások szabályozását érintő kötelezettségeket rögzített, de ezek kizárólag a fejlett országokra, illetve a piacgazdaságra áttérő, ún. „átmeneti gazdaságú” közép- és kelet-európai országokra vonatkoztak. Az említett országok – jogilag kötelező érvénnyel – vállalták, hogy az üvegházhatású gázok kibocsátását a 2008 és 2012 közötti időszak alatt, az 1990-es szinthez képest, átlagosan 5,2 %-kal csökkentik. (Magyarország esetében a viszonyítási időszak 1985 és 1987 közé esik).

2003-ban a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, valamint a Magyar Tudományos Akadémia közös kezdeményezésére indult a VAHAVA-projekt, amelynek vezetésére Láng István akadémikus kapott megbízást. A hároméves időtartamú VAHAVA (Klímaváltozás–Hatások–Válaszok) elősegítette a felkészülést olyan változás hatásainak megfelelő kezelésére, amelynek bekövetkezése nagy valószínűséggel várható, valamint a klímaváltozással összefüggő vitákat koordinálják. Olyan stratégiai jellegű javaslatok kidolgozására törekszenek, amelyek különböző időjárási variánsok esetében egyaránt eredményesek lehetnek. A projekt nem csupán a hosszú távú változásra való felkészülést tekinti célkitűzésének, hanem munkájában a rövid távon bizonyosan jelentkező időjárási események megelőzése és az okozott károk felszámolása is komoly hangsúlyt kap. Mindezek alapján a VAHAVA projekt két stratégiai célja a következő:

- a magyar társadalom felkészítése a valószínűsíthetően melegebb és szárazabb időszakra,
- olyan gyorsan reagáló technikai, pénzügyi és szervezési feltételek létrehozása, amelyek a váratlanul jelentkező kezelésre alkalmasaknak, szélsőséges időjárási események káros hatásainak megelőzésére, illetve bizonyulhatnak.

A projekt által vizsgált nemzetgazdasági területek közül a legfontosabbak a következők voltak: meteorológia, mezőgazdaság, talajtan, vadgazdálkodás, egészségügy, vízgazdálkodás, turizmus, katasztrófavédelem, építészet, közlekedés.

A következőkben – mint a VAHAVA-projekt egyik résztvevője – a klímaváltozás közlekedési, azon belül is az útügyi hatásaival foglalkozom.

4. AZ ÉGHAJLAT(VÁLTOZÁS) ÚTBURKOLATOKRA GYAKOROLT HATÁSA

4.1. KORAI KUTATÁSI EREDMÉNYEK

Európa-szerte is élenjáróan hazánkban az Útügyi Kutató Intézet vezető kutatója már az 1950-es évek első felében elkezdett az útügy és a közúti munkák meteorológiai vonatkozásait kutatni [11-13]. Ez a kutatási munka először Magyarország éghajlatával, az éghajlati elemek százalékos arányával, valamint tájegységük alapján történő éghajlati felosztásával foglalkozott. Majd a külföldi szakirodalom hazai viszonylatban történő alkalmazási lehetőségeinek elbírálása céljából az egyes világrészek éghajlati elemeit (januári és júliusi középhőmérsékletet, valamint csapadékviszonyait) vette vizsgálat alá. Ezután az akkori jellegzetes burkolattípus – a vízzel kötött makadámburkolat – tartósságával összefüggő kérdéseket boncolgatta. Ezenkívül a hőmérséklet és a csapadék egyes hazai szélső és valószínű értékeit tárgyalta, és felhívta a figyelmet egyes adatok közúti vonatkozású alkalmazási lehetőségeire. Ezenkívül az év egyes napjain, illetve hónapjaiban, a léghőmérséklet közép- és abszolút szélső értékeire vonatkozólag 50-75 éves megfigyelési adatsorokat vizsgált. A közúti munkavégzés számára káros fülledtség valószínű időtartamáról szintén sokéves idősorok feldolgozásával nyújtott tájékoztatást. Ezt követően a csapadéknak az útfenntartás egyes tevékenységeire gyakorolt hatását vizsgálta, kitérve az év egyes napjain a csapadék valószínűségére, a tavaszi és az őszi hónapokban a csapadékos napok számára, továbbá a felső talajréteg víztartalom-változásának bemutatására. A kutatási munka befejező része – figyelemmel az ország egyes vidékei között észlelhető, érdemleges időjárási eltérésekre – a rendelkezésre álló talajhőmérsékleti és téli hőmérsékleti adatok alapján útépitési fagyhatárzónák bevezetésének a célszerűségét is felveti. Ezzel kapcsolatban a fagyveszély elleni védekezésül beépített talajjavító réteg vastagságának megállapítására javaslatot tesz. Az ország nagy számú meteorológiai állomásán végzett sok évtizedes talajhőmérséklet-mérés eredményei alapján megállapította, hogy a 80 cm-es fagyhatárt csak a leghidegebb vidékekre kell az útpályaszerkezetek tervezésekor alapul venni, máshol a 60-70 cm-es érték is elegendő biztonságot nyújt. Ezt a leghidegebb zónát, ahol 80 cm-es a fagyhatár, az Észak-Hegyvidék és Szabolcs-Szatmár-Bereg megye képezi, míg a legmelegebbnek a Dél-Alföld, a Dél-Dunántúl és a Kis-Alföld bizonyult.

4.2. A KLÍMAVÁLTOZÁS ÚTBURKOLATRA HATÓ ELEMEI

A globális klímaváltozás számos eleme közül a következőknek van olyan érdemleges hatása az útburkolatokra, amelyekre hazánkban is indokolt – (il)lett volna már eddig is – felkészülni:

- globális felmelegedés,
- túl sok csapadék,
- túl kevés csapadék
- szélsőséges időjárás: heves esőzések,
- szélsőséges időjárás: zord téli időjárás,
- több fagyás-felengedés ciklus.

Ahogy az 1. táblázat is összefoglalja, az egyes klímaváltozási elemeknek különböző befolyása van (vagy lehet a közeljövőben), amelyekre a hazai mérnököknek megfelelő válaszokat kell keresni, és lehetőleg, találni is.

1. táblázat: Az éghajlatváltozás útburkolatra való hatása és a lehetséges reakciók.

Klimaváltozás elemei	Hatás	Válasz
Globális felmelegedés	Nyáron felmelegedett burkolat (deformációveszély)	Betonburkolat
		Nagymodulusú aszfalt

	Napsugárzás hatására fény-visszaverődés a pályán (balesetveszély)	Betonburkolat
		Makroérdes felületű burkolatok
		Világos adalékanyagú aszfaltburkolat
Túl sok eső	Csúszós útpálya (balesetveszély)	Mikroérdes kőanyag a kopórétegben
		Makroérdes útpálya
	Árvíz (út lezárása, a földmű elnedvedése)	Magas töltések építése
		Teherbíró töltéstest
		Burkolt (közel vízzáró) rézsű
		Hatékony vízelvezetési rendszer
	Belvíz (az út lezárása, a földmű elnedvedése)	Magas töltések építése
		Teherbíró töltéstest
		Burkolt (közel vízzáró) rézsű
		Hatékony vízelvezetési rendszer
Túl kevés csapadék	Földmű/rézsű összerepedezése	Burkolt rézsű
		Speciális füvesítésű rézsű
Szélsőséges időjárás (heves esőzés)	Rézsűkimosódás	Rézsűvédelem
	Padkabomlás (balesetveszély)	Burkolt padka
	Víz felhalmozódása az útpályán (balesetveszély)	Megfelelő hosszesés tervezése
		Megfelelő oldalesés tervezése
		Alakváltozásnak ellenálló aszfaltrétegek
	Vízbehatolás a pályaszerkezetbe	Kis hézagtartalmú (tömör) rétegek
		Drénaszfaltok
	Árkok és/vagy csőátereszek eltömődése	Nagy teljesítményű vízelvezető rendszer
		A vízelvezető rendszer karbantartása
Szélsőséges időjárás (zord téli időjárás)	Jeges, csúszós pálya (balesetveszély)	Előzetes olvasztósózás
		Kopóréteg elektromos melegítése
		Makroérdes útpálya
	Nagy mennyiségű hó az útpályán (a forgalom lelassulása vagy akár megbénulása)	Nagy teljesítményű hóeltakarító járművek
		Hófogó erdősávok telepítése
		Hóvédművek a hótörleszkek ellen
		Napelemek az aszfalt kopórétegben
		Szemcsés talajból készülő, tömör földmű
Gyakori fagyás-felengedési ciklusok	Földmű elnedvedése (teherbírásvésztes)	
	Pályaszerkezet összerepedezése, kátyúsodása	Vastag pályaszerkezet
		Nagy húzószilárdságú pályaszerkezeti anyagok építése

Az 1. táblázatból kitűnik, hogy a klímaváltozás egyik megnyilvánulási formája, a globális felmelegedés, a burkolat alakváltozásához vezethet, illetve az útpálya intenzív fényvisszaverése gyakran fokozott balesetveszélyt okoz. Az első probléma ellensúlyozására merev burkolatok tervezése (építése), illetve az aszfaltburkolatok nagy modulusú változatának elterjesztése lehet a válasz.

Amennyiben a korábbiaknál jóval több csapadékra kell számítani, akkor gyakrabban lesz nedves, így balesetveszélyesebb az útburkolat felülete (az útpálya), szélső esetben pedig az utat árvíz és belvíz is fenyegetheti. Célszerű válaszként szóba jöhet az érdes útpálya kialakítása, illetve magas (teherbíró) töltések építése, burkolt rézsűvel, és főleg hatékony vízelvezető rendszer kialakítása, majd annak folyamatos, hatékony fenntartása.

A túl kevés csapadék (az aszályos időszak) a földmű, valamint a rézsű összerepedezéséhez vezethet, amelynek ellensúlyozására burkolt, esetleg speciális füvesítésű rézsű készülhet.

A heves esőzések hátrányos következményei közül a rézsű kimosódása, a padkabomlás, a burkolatfelületen víz felhalmozódása, a pályaszerkezetbe víz behatolása, illetve a vízelvezető rendszer hatékonyságának csökkenése (megszűnése) emelhető ki. Válaszként vízzáró padka és rézsű, gondos

geometriai tervezés, korszerű aszfalttechnológia és nagy teljesítő képességű, karbantartott vízelvezető rendszer létesítése ajánlható.

A nagyon zord időjárás a jeges, csúszós pálya és a forgalmat akadályozó kötőanyag miatt lehet a közúti közlekedést akadályozó körülmény. A hátrányokat enyhítheti a korszerű aszfalttechnológia alkalmazása és a hatékony téli útüzemeltetés.

Ha a fagyás-felengedési ciklusok gyakorisága megnő, akkor a földmű teherbírásának csökkenésére és a télvégi-tavaszi burkolatkároknak a súlyosbodására lehet számítani. A problémára szemcsés talajból készült, tömör földmű, illetve nagy húzószilárdságú anyagokból épült vastag pályaszerkezet jelenthet megoldást.

A következőkben az 1. táblázatban szereplő tárgykörök közül egyesekkel foglalkozom röviden.

5. PÁLYASZERKEZET-TÍPUS VÁLASZTÁSA ÉS AZ ÉGHAJLAT

Az 1900-as évek eleje óta világszerte két útburkolattípus terjed: az aszfalt- és a betonburkolat. Bár mindkettőnek ugyanaz a szerepe – az áruk és a személyek gazdaságos, kényelmes és biztonságos szállításához történő hozzájárulás –, azonban számos jellemzőjük mégis meglehetősen eltérő.

A hazai gyakorlatban is az úttervezők döntés elé kerülnek, hogy adott kiindulási feltételek mellett az aszfalt- vagy a betonburkolatot – illetve a hajlékony, a merev vagy a félig merev pályaszerkezetet – részesítsék-e előnyben. Ennek során nyilvánvalóan nagyon sok szempontot kell figyelembe venniük, de azok közül a környezeti tényezők, benne az éghajlati szempontok egyáltalán nem elhanyagolhatók.

Magyarországon 1976-ban szakminisztériumi döntés született arról, hogy autópályáink aszfaltburkolattal készülnek. (Az addig épített M7-es autópálya betonburkolattal épült). Ennek következtében a kisebb forgalmú utak betonburkolattal történő készítése is abbamaradt, mindenhol valamilyen típusú aszfaltburkolat készítésére került sor [14].

2000 körül aztán nyilvánvalóvá vált, hogy a különösen nagy tengelyterhelésű gépjármű-forgalom tartós elviselésére a leginkább deformációnak ellenálló aszfaltburkolat-típusok sem alkalmasak. Az M0-s autópálynak az M1-es autópálya és az M5-ös autópálya közötti szakaszán a kopóréteget sűrűn fel kellett újítani, mert azon ismételt balesetveszélyes mélységű keréknyomvályúk keletkeztek. (A nyári melegben a viszonylag lassan haladó, gyakori fékezésre kényszerített nehéz tehergépkocsik és kamionok intenzív forgalmát az aszfaltburkolat nem volt képes deformáció nélkül levezetni). Mivel nemcsak a felújítás tetemes költsége, hanem az állapotjavító beavatkozással együtt járó kényeszerű forgalomzavarás is komoly sajtó-visszhangot kapott, a szakminisztérium döntött abban a tekintetben, hogy a legnagyobb forgalmú újabb autópálya-szakaszokon – így az M0-s körgyűrű autópályaként történő tovább építéskor is – betonburkolat mellett teszi le a voksát. Több kísérleti szakasz után, 2005-ben az M0-s autópályának az M5-ös autópálya és a 4. út közötti szakasza már hézagolt betonburkolattal készült, valamint az M3-as autópálya irányában épülő újabb szakasznak is merev a pályaszerkezete [15]. Ebben a döntésben a hazai klimatikus viszonyoknak egyértelmű szerepük van. Azóta már számos, új építésű, gyorsforgalmi útszakasz tervezési pályázatán, az aszfaltburkolatú, hajlékony pályaszerkezetek mellett újra megjelent a merev pályaszerkezet, mint alternatíva – meglehetősen ritkán sikerrel.

Az Egyesült Államokban az óránként meghatározott burkolat-hőmérsékletek 30 éves idősorának feldolgozásával komplex Integrált Éghajlati Modellt fejlesztettek ki [16]. Az eredmények alapján levont néhány következtetés:

- egyes körzetekben növekszik az aszfaltburkolatban a keréknyom kialakulásának veszélye,
- számos körzetben megnőtt a fáradási repedések megjelenésének valószínűsége,
- egyes területeken a pozitív hőmérsékleti gradiens a betonburkolatok keresztirányú fáradási repedéseit okozhatja, míg a másutt tapasztalt negatív hőmérsékleti gradiens sarok- és hosszirányú repedésekhez vezethet,
- három éghajlati zónában a téli és a nyári burkolathőmérséklet közötti nagyobb eltérés a betonburkolatok teherátadási hatékonyságát csökkenti,
- félig merev pályaszerkezetekben, a téli és a nyári szélsőségek közötti nagyobb hőmérséklet-különbség következtében, a reflexiós repedések megjelenésének esélye megnövekszik.

6. A VÍZ ÚTELEMEKRE GYAKOROLT HATÁSA

Amennyiben az aszfalt kopóréteg jó állapotban van, akkor általában a víz arra érdemleges hatást nem gyakorol. Ha a kopóréteg túlzottan nagy hézagtartalommal rendelkezik, akkor az útpályára kerülő csapadékvíz beszivárog a réteg(ek)be, ahol rövidebb-hosszabb időn belül bomlást okozhat [17]. Egyenetlen pálya esetében, az oda kerülő víz hosszabb ideig panghat, a burkolatfelületen zúzalék-kipergést hozva létre. Repedések vagy kátyúk a csapadéknak a pályaszerkezet belsejébe való káros beszivárgását teszik lehetővé. Ezeknek a burkolat gyorsított leromlásával veszélyeztető hibáknak a hatását felgyorsítja az út vízelvezető rendszerének (a pálya oldalesése, padka, árok, csőáteresz, befogadó, a bevágás víztelenítése) tervezési és/vagy fenntartási hiányosságai.

A pályaszerkezet alsó rétegeinek esetében sem kell a víz hátrányos hatásaival számolni, ha azok zárt rendszer elemeit képezik. Hidraulikus vagy termoplasztikus kötőanyag, alsó rétegekben az odajutó csapadékvíz, talajvíz, belvíz vagy árvíz lassú bomlást indíthat meg, a réteg hézagtartalmának és/vagy vízerzékenységeinek a függvényében. A kötőanyag nélküli pályaszerkezeti rétegbe jutó víz azok teherbírását rontja, finomrészük függvényében.

A közúti töltések vagy bevágások vízzel szembeni érzékenysége talajfajtájuknak függvénye. Akár az oda bejutó csapadékvíz, akár talajvíz, belvíz vagy árvíz a szemcsés anyagú földműre csak rövid idejű hatást gyakorol, szinte érzéketlen vele szemben. Kötött talaj, illetve még inkább

az átmeneti talajok (iszap, homokliszt, lösz stb.) esetében vízhatásra érdemleges teherbírásvesztés és a rajta levő pályaszerkezet romlása következhet be.

A szélsőséges csapadékmennyiség utakat romboló hatására példákat szemléltet az 1. és a 2. ábra. 2010. május 19-én az M1-es autópálya bal pályájának burkolata Győr előtt, mintegy 10 m²-es felületen beszakadt. A jelenség okát abban találták meg, hogy a napokon keresztül tartó eső az autópálya alatti híd háttöltését kimosta, annak úszólemeze leszakadt, és ezzel a pályaszerkezet alátámasztását veszítette (1. ábra). Következésképpen, az ideiglenes javítás idejére, mintegy 50 órányi időtartamra az autópálya forgalmát teljesen lezárták, majd – a végleges helyreállítás időigényének megfelelően – a burkolat beszakadásának környezetében, 120 napon keresztül minden áthaladó járműtípusra 60 km/h-s sebességkorlátozást rendeltek el. Ennek a burkolatromlásnak a káros következményeként, az utólagos számítások 1,5 milliárd Ft körüli, nemzet-gazdasági szintű veszteséget mutattak ki [18]. A másik példa egy frissen átadott autópályára vonatkozik, ahol a leállósáv mintegy 2 m²-nyi része beszakadt, a rézsű anyagának egy részét is magával rántva (2. ábra). Az okokat feltáró vizsgálat – a heves esőzésen kívül – a gyenge építési minőség szerepére is rámutatott.



1. ábra: Burkolatbeszakadás az M1-es autópályán.



2. ábra: A leállósáv leszakadása az M6-os autópályán.

7. NÉHÁNY ÖSSZEFOGLALÓ MEGÁLLAPÍTÁS

A légköri csapadék és az utak kapcsolatának vizsgálatából összefoglalóan a következők állapíthatók meg:

- a csapadék minden formája az utak állagára és/vagy teljesítményére – rendszerint negatív – hatást gyakorol,
- az útkezelők számára megoldandó feladatként általában az útnak a víz káros hatásaitól történő mentesítése jelentkezik, de előfordul az is, hogy a lehullott csapadékot mezőgazdasági célra hasznosított területekre irányítják át,
- burkolatlan utak esetében különösen közvetlenül jelentkezik a víz hatása, ellene korlátozott mértékű védelmet a megfelelően megválasztott geometriai jellemzők és a kapcsolódó vízelvezető rendszer jelenthet,
- a nagyobb forgalmat levezető, burkolattal ellátott utak „vízérzékenységét”, a burkolatlan utaknál említetteken túlmenően, az egyes pályaszerkezeti rétegek – elsősorban a gépjárművek gumibroncsával közvetlenül érintkező kopórét – mennyiségi és minőségi paraméterei befolyásolják,
- a hó formájában lehulló csapadék, a közutak teljesítőképességének folyamatos biztosítása érdekében, különleges kezelői intézkedéseket igényel,
- az éghajlatváltozás következményeként tapasztalt, gyakoribb szélsőséges időjárási események közül a légköri csapadékkal kapcsolatosak az utak kezelőit is különleges kihívások elé állítják.

8. IRODALOM

- [1]: Papp, Z. 2005. A klímaváltozás mérnöki aspektusai (I). Mérnök Újság 10 (10), pp. 12-14.
- [2]: Láng, I. 2005. Éghajlat és időjárás: változás-hatás-válaszadás. „AGRO-21” Füzetek Klíma-változás – Hatások – Válaszok. 43. szám, pp. 3-10.
- [3]: Gáspár, L. 2006. A klímaváltozás útburkolatokra gyakorolt hatása. „AGRO-21” Füzetek Klímaváltozás – Hatások – Válaszok. 47. szám, pp. 31-39.
- [4]: A globális klímaváltozás: hazai hatások és válaszok (2006). KvVM-MTA „VAHAVA” projekt összefoglalása. A magyarországi klímapolitika alapjai. Budapest. 66 p.
- [5]: Bodor, P.A. & Gáspár, L. 2009. Intézkedési terv a hazai közlekedés éghajlatváltozásra való felkészítéséhez. A KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. 252-041-1-9 számú témájának zárójelentése. Budapest, 31 p.
- [6]: Gáspár, L. 2007. A klímaváltozás és az útburkolatok. Közúti és Mélyépítési Szemle 3, pp. 1-6.

- [7]: Scientific Facts on Climate Change and Global Warming (2006). http://www.greenfacts.org/studiesclimate_change
- [8]: Gáspár, L. 2006. Az útburkolatok és a klímaváltozás. (Panel-beszélgetés a VAHAVA-projekt zárókonferenciáján). „AGRO-21” Füzetek Klímaváltozás – Hatások - Változások. 28. szám. pp. 49-52
- [9]: Gáspár, L. 2006. Az éghajlatváltozás utakra gyakorolt hatása (feladatok, tapasztalatok) „Agro-21” Füzetek Klímaváltozás – Hatások – Válaszok. 47. szám, pp. 31-39.
- [10]: Láng, I. 2006. A klímaváltozásra való felkészülés hazai feladatai. „AGRO-21” Füzetek Klímaváltozás – Hatások – Válaszok 48. szám pp. 7-9.
- [11]: Gáspár, L. id. 1953. Az útügy meteorológiai vonatkozásairól. Mélyépítési Szemle 2 (10), pp. 502-511.
- [12]: Gáspár L. id. 1953. Az útügy meteorológiai vonatkozásai. Mélyépítéstudományi Szemle 2 (11-12), pp. 565-569.
- [13]: Gáspár L. id. 1955. A közúti munkák egyes meteorológiai vonatkozásai. Mérnöki Továbbképző Intézet 3276. számú előadássorozata, Budapest, 82 p.
- [14]: Liptay, A. & Karsainé, L. K. 2000. A betonburkolatú pályaszerkezetek alkalmazási lehetőségei Magyarországon. Közúti és Mélyépítési Szemle 50(9), pp. 301-308.
- [15]: Gáspár, L. & Karsai, K. 2005. Cement concrete pavements in the Hungarian road policy. 8th International Conference of Cement Concrete Pavements. Colorado Springs, Col. (USA), Proceedings Vol. 1. pp. 39-60.
- [16]: Ongel, A. & Harvey, J. 2004. Analysis of 30 Years of Pavement Temperatures using the Enhanced Integrated Climate Model (EICM). Report prepared for the California Department of Transportation. Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.
- [17]: Gáspár, L. 2017. A közlekedési felületek és a légköri csapadék. Útügyi Lapok 5. évf., 10. szám, december, pp. 80-87.
- [18]: Timár, A. 2010. Impacts of climate change on the Hungarian road infrastructure. Pollack Periodica 5(1), pp. 37-52.



Segélykiáltás – Hibás-e a közúti hidak pályaszerkezet-tervezési gyakorlatunk?

Hajós Bence

Nemzeti Közszerológati Egyetem, Katonai Műszaki Doktori Iskola, doktorandusz.

E-mail: elsolanchid@elsolanchid.hu

DOI: [10.36246/UL.2025.1.03](https://doi.org/10.36246/UL.2025.1.03)

KIVONAT

Az elmúlt időszakban a hazai hídépítési gyakorlatban a műtárgyakhoz kapcsolódó utak aszfalt rétegeivel szinkronban vastagabb rétegeket alkalmazunk. Ugyanakkor a nemzetközi gyakorlatban jellemző a vékonyabb aszfaltburkolat alkalmazása. A beton és aszfalt rétegekben lévő víztartalom a réteg gyors károsodását okozza és adott esetben a forgalombiztonságot is veszélyezteti. A tanulmány javasolja a meglévő problémák alapos vizsgálatát és az úttervező és hídtervező mérnökök együttműködését a jó megoldás érdekében.

Kulcsszavak: közúti híd, pályaszerkezet, vízszigetelés, meghibásodás

ABSTRACT

In recent years, Hungarian bridge construction practice has seen the use of thicker layers of asphalt in sync with the asphalt layers of the roads connected to the structures. However, international practice typically involves the use of thinner asphalt pavement. The water content in the concrete and asphalt layers causes rapid damage to the layer and, in some cases, also endangers traffic safety. This study recommends a thorough investigation of the existing problems and cooperation between road and bridge engineers in order to find a good solution.

Keywords: road bridge, pavement structure, waterproofing, failure

Hajós Bence

Okleveles építőmérnök, okleveles mérnök tanár. Hídszakértő, hídtervező. Korábban az állami közútkezelő hidász mérnöke volt. Elsődleges szakterülete a híd vizsgálat, hidak teherbírás vizsgálata.

1. ELŐJÁRÓBAN

Kevés figyelmet szokott kapni a hídépítés egy-egy részletkérdése, s ez különösen is igaz műszaki határterületek esetén. Ezek közé tartozik a közúti hidakon átvezetett kocsipálya pályaszerkezetének tervezése, üzemeltetése is. Jelen tanulmány csupán figyelem felkeltő „segélykiáltás” kíván lenni. Az alábbiakban igyekszünk megfogalmazni a problémafelvetést. A válaszokhoz széles körű együttgondolkodás szükséges nemcsak tervező, kivitelező és üzemeltető között, hanem hídépítési és útépítési területeken jártas szakemberek között is.

A vitaindítónak szánt írásunk elkészítésének katalizátora a Szilikátipari Tudományos Egyesület Beton szakosztálya, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Magasépítés Tanszéke és Út és Vasútépítési Tanszéke, a Budapesti és Pest Vármegyei Mérnöki Kamara, valamint a Nemzetközi Betonszövetség Magyar Tagozata együttes szervezésében lezajlott 2025. március 27-i

rendezvény volt I. Reziliens Útpályaszerkezetek Konferenciája címmel, Szélsőséges időjárási körülményeknek kitett útpályák tervezése, építése, fenntartása alcímmel. Elsősorban útépitési szakterület konferenciáján dicséretes módon Bartus Róbert (Unitef⁸³ Zrt.) Egyben épült nagyszilárdságú betonszerkezet és burkolat hidaknál című előadásában megjelent a pályaszerkezetek hidakon való átvezetésének kérdésköre is, ráadásul a hazai gyakorlattól eltérő műszaki megoldást elemezve.

2. RÖVID TÖRTÉNELMI VISSZATEKINTÉS

A hídépítés történetének korai szakaszára jellemző föld, fa és kő anyagú burkolatok korát követően elterjedt a ma is használatos beton- és aszfaltburkolat. A burkolatok tervezésekor kiemelt szempont volt az önsúly minimalizálása.

A hidak szigetelése előtti időszakban tipikus pályaszerkezeti megoldás volt a vasbeton pályalemezzel frissen egybebetonozott 4-5 cm vastag kopóbeton burkolat. Ma is számos ilyen híd üzemel, elsősorban mezőgazdasági utakon. Kellően markáns kocsipálya esésviszonyok mellett, sózás hiányában tartós burkolatot nyerhettünk.

A hidak víz elleni szigetelése az 1960-as évektől vált általános gyakorlattá, hogy megóvjuk a tartószerkezetet a beszivárgó víztől, majd a sózás miatt sós víztől, ami jelentősen gyorsítja a korróziót. (Épültek szigetelt hidak már az 1910-es években is, de az nem volt általánosan elterjedt gyakorlat.)

A kocsipályák szigetelését követően kezdetben 5 cm szigetelést védő betonburkolat és azon 4 cm kopóréteg aszfalt volt évtizedekig a járatos műszaki megoldás. Ezt váltotta fel először a védőbeton aszfaltra cserélése, azaz a szigetelésen két rétegű aszfaltburkolat építése, majd a ma is általános gyakorlatnak számító három rétegű aszfaltburkolat.

3. A JELENLEG HATÁLYOS ÚTÜGYI MŰSZAKI ELŐÍRÁSOK

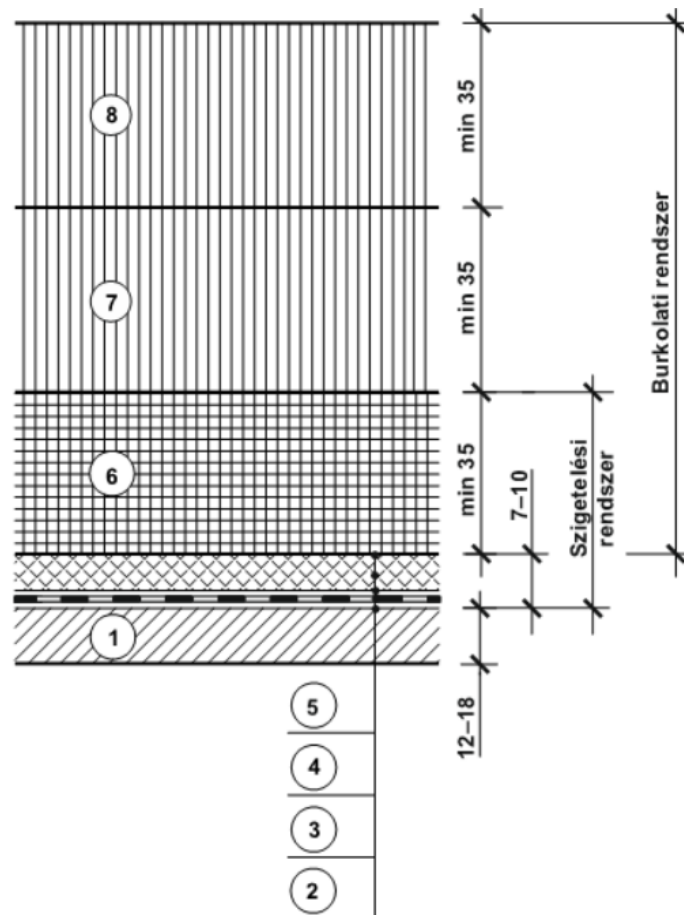
Az általános hídtervezési követelményeket tartalmazó 07.01.11 Közúti hidak tervezése (KHT) 1. kötetének [1] 4.4 pontja szerint: „A csatlakozó út forgalmi sávjainak kopórétegét a hídon forgalombiztonsági szempontból (pl. érdesség, szín) változatlan megjelenésben kell átvezetni.” E jelenleg hatályos előírásnak kritikájaként elegendő azt megjegyezni, hogy az előírás közvetlen megjelenésre váró új kiadásában, amelyet az Útügyi Műszaki Szabályozási Bizottság is jóváhagyott, ez a mondat már nem szerepel. Számos esetben alkalmaztunk kopóréteg váltást kifejezetten a hidak miatt, s ez nem eredményezett sehol sem forgalombiztonsági kockázatot (természetesen a kopórétegre vonatkozó előírásokat, mint az érdességet is, be kell tartani.)

Az acél pályalemezű hidak burkolatának részletszabályait a 07.03.23 számú előírás [2] tartalmazza. Eszerint „Az új építésű acélszerkezetű közúti hidak acél pályalemezének burkolati rendszere három aszfaltrétegből álljon: a szigetelési rendszert védő aszfaltból, kötőrétegből, valamint aszfalt kopórétegből.” (1. ábra)

„Meglévő hidak felújítása esetén a magassági és teherviselési kötöttségek miatt egyedi burkolati rendszer is kialakítható, de ennek tervezése külön technológiai szakvélemény alapján történjen, ami kitér a vékonyabb aszfaltszerkezet miatti többlet igénybevételek számítására és az ebből következő technológiai és keveréktervezési megoldásokra is.”

A vasbeton pályalemezű hidak burkolatával foglalkozó 07.03.25 számú Útügyi Műszaki Előírás [3] részletesebb követelményeket rögzít. Főszabály itt is a háromrétegű burkolati rendszer: szigetelés védőréteg, kötőréteg és kopóréteg. A pályaszerkezeti rétegekre vonatkozó igénybevételi kategóriák, alkalmazandó aszfalttípusok és azok beépítési vastagságaira vonatkozóan azonban ez az előírás a 06.03.21 számú Útpályaszerkezetek aszfaltburkolati rétegeinek követelményei című előírásra hivatkozik [4].

A hidakon szignifikánsan mások a pályaburkolattal szembeni műszaki követelmények, mint általános útpályaszerkezetek esetén.



1. ábra: Az acél pályalemezes hidak burkolatrendszere [2].

Jelmagyarázat: 1: acél pályalemez; 2: korróziógátló alapozóréteg; 3: szigetelőréteg; 4: masztixkitöltésű felső tapadóhíd; 5: beágyazott impregnált zúzalék; 6: védőaszfalt; 7: aszfalt kötőréteg; 8: aszfalt kopóréteg.

A burkolattal szemben elsődleges kíváncsi, hogy legyen egyenletes felületű, kellő érdességű, és természetesen jó teherbírású. Ezek közül a teherbírás tekintetében van alapvető különbség út és híd között. Útépítésnél olyan pályaszerkezet szükséges, ami kellőképpen szétosztja a járművek kerékterhelését az alátámasztó alépítményre (földműre). Ezzel szemben hidak esetében a pályalemez – akár acél, de különösen is vasbeton esetében – kvázi végtelen teherbírású a kerékterhelés lokális hatásaival szemben. Hídon a burkolati rétegek vonatkozásában nem cél a teherelosztás. Új követelmény hídon a szigetelési rendszerrel való kompatibilitás és ezen belül a teherbírás megfelelősége, elsősorban vízszintes terhelésre vonatkozóan.

Számos külföldi gyakorlat említhető, a magyar burkolatnál vékonyabb műszaki megoldással. Teljesen azonos, ha nem kedvezőtlenebb klimatikus tulajdonságú Szlovákiában általános gyakorlat a 9 cm vastag pályaburkolat. Szintén két rétegű rendszereket részesítenek előnyben Romániában is. Tanulságos lenne kiterjedt adatgyűjtéssel elemezni az egyes országok gyakorlatát.

4. ÁLTALÁNOS GYAKORLAT SZERINTI ALKALMAZÁSOK

A háromrétegű burkolat összvastagsága az előírás szerint legalább 12 cm vastag kell legyen. Évtizedeken keresztül tipikusan mindhárom réteget 4-4 cm vastagságban alkalmaztuk.

Acél pályalemezes hidak esetén napjainkban tervezett pályaburkolati rétegrend tipikusan 4 cm MA11 szigetelést védő réteg, 5 cm AC16 kötő kötőréteg és 4 cm AC11 kopó kopóréteg. Az összvastagsága tehát 13 cm.

Vasbeton pályalemezes hidak esetén napjainkban tervezett pályaburkolati rétegrend tipikusan 4 cm MA11 szigetelést védő réteg, 7 cm AC22 kopó kötőréteg és 4 cm AC11 kopó kopóréteg. Az összvastagsága tehát 15 cm (de találunk megépült hazai példát ennél vastagabb pályaszerkezetre is).

A hidakon alkalmazott burkolatok az elmúlt években jellemzően vastagabbak lettek. A változás az út pályaszerkezetére optimalizált előírások generálták, amit a hídépítés kontroll nélkül vett át.

5. ALTERNATÍV PÁLYASZERKEZETI MEGOLDÁSOK

A leggyakoribb három rétegű pályaszerkezettől eltérő műszaki megoldásokkal a meglévő hidak felújításánál találkozhatunk. Egy eredetileg egy vagy két rétegű burkolattal tervezett hídon a többlet burkolati réteg jelentősen csökkenti a hasznos teherbírást (4 cm többlet burkolat önsúlya alapértéken 1 kN/m² megoszló terhelést jelent).

Minél nagyobb hasznos teherbírás érdekében a beton pályalemezen készített kopószigeteléssel készült el a tiszakóródi Túr-csatorna-híd felújítása 2000-ben, a buji Lónyay-főcsatorna-híd felújítása 2013-ban. Mindkét híd ma is üzemel. Hasonló pályaszerkezet volt a vásárosnaményi II. Rákóczi Ferenc Tisza-hídnak is a 2012. évi teljes átépítésig.

Jól vizsgázott egyedi megoldásnak mindenképpen említést érdemel a tokai Erzsébet királyné Tisza-híd lokális burkolat javítása. 2006-ban dilatációcsere miatt kis szakaszon új burkolatot kellett építeni. A geometriai és teherbírási kötöttségek miatt csak két rétegű, 8 cm vastag pályaszerkezet jöhetett számításba. Egyedi vizsgálattal és keverék tervezéssel mindkét réteg öntöttaszfaltból épült meg. A burkolat próbája elsősorban az M3 autópálya építéséhez kapcsolódó óriási volumenű kőanyag szállítás volt. Az intenzív nehézgépjármű terhelést az öntöttaszfalt burkolati szakasz deformáció, repedés és minden károsodás nélkül elviselte egészen a híd 2021. évi felújításáig.

Új hídépítésre vonatkozó pozitív példa a szigetelés nélküli, a burkolat szerepét is betöltő nagy teljesítőképességű beton felszerkezettel megépült M7 autópálya feletti kísérleti hídszerkezet a 6707 jelű összekötő út 2+778 km szelvényében (törzsszáma: 6235; építési szám: S65) [5] [6] [7] [8]. A híd szigetelés nélküli felszerkezete alkotja a pályaszintet is, külön ráépített kopóbeton nélkül. Ez a kísérleti építés ma már nagykorúként, 18 év után is hiba nélkül üzemel [9]. Burkolatkárosodás, átázás nincsen.

Az M7-es feletti S65 építési számú burkolat nélküli nagy teljesítőképességű betonból épült híd tervezési és építési tapasztalatainak összegzéseként a Magyar Útügyi Társaság 2010-ben külön tervezési útmutatót adott ki [10].

6. PÁLYASZERKEZETBEN LÉVŐ VÍZTARTALOM

Egy-egy új útszakasz átadását követően több esetben megfigyelhető volt, hogy az első burkolatkárok a hidakon jelentkeztek, ahol pályaszerkezeti teherbírási hiányosságról nem beszélhetünk. Nem ritka, hogy ezek a meghibásodások már a jótállási időszakban kialakultak.

A hidakon lévő pályaszerkezet tönkremenetelének legfőbb okát a rétegen belüli víztartalommal hozhatjuk összefüggésbe. A burkolat megbomlása előtt sok esetben megfigyelhető pályaszerkezetből kilépő víz, nedvesség. Ez könnyebben észlelhető hajnali időszakban, mikor a kocsipályán megjelenő nedvességfoltok előre jelzik a burkolat későbbi károsodási helyeit.

A burkolatból kilépő vízcsurgások fokozott hibát mutatnak, ami akár vízfilmként, akár megfagyva a közlekedésbiztonság is veszélyezteti.

A 2. ábrán aszfalt pályaszerkezetre látunk példát egy 8 esztendő híd szerkezeten. Ugyanezen híd többi részét már jótállási időszakban többszörösen kopóréteg kátyúzással javították, amivel a hiba oka nem szűnt meg.

A 3. ábrán beton burkolattal épült 10 esztendő hídra látunk negatív példát, ahol a legutóbbi csapadék után több, mint 48 órával is szabályos forrásként tör elő a víz a burkolat alól.



2. ábra: Aszfalt burkolatú pályaszerkezetből kilépő víz (szerző felvétele).



3. ábra: Beton burkolatú pályaszerkezetből kilépő víz esésirányába nézve (szerző felvétele).

A pályaszerkezetbe jutó víz belső elvezetésére hivatott és általánosan alkalmazott (a két fenti példában is) burkolatszivárgó önmagában nem elegendő a belső vizek elvezetésére.

A burkolatból kilépő vízcsurgások gyakrabban fordulnak elő a híd magaspontjának környezetében, ahol a pálya eredő esése a legkisebb. A kicsi eredő esés lassítja a burkolatban lévő vizek szivárgását az elvezetésre szolgáló burkolatszivárgó felé. Aszfalt pályaszerkezetek esetén jellemző a keréknyomokban való vízkilépés jelensége, ami a kerékterhelés okozta kapillaris víznyomással magyarázható. A

kerékterhelés a vizet a burkolatból kipumpálja, roncsolva az aszfalt réteg belső kohézióját. Emiatt viszont a burkolat kátyúsodás pont a keréknyomokban kezdődik el.

A pályaszerkezet folyópálya esetén alulról a földmű irányában „nyitott”. A szerkezetbe beszivárgó nedvesség lefelé tud távozni, tipikusan egymás alatt egyre nagyobb hézagtartalmú aszfaltrétegek vannak. Ezzel szemben hidakon a vízszigetelés megakadályozza a vizek távozását. Öntöttaszfalt szigetelést védő réteg is kvázi vízzárónak tekinthető. Így hidakon a zártabb felületű és kisebb hézagtartalmú kopórétegen átszivárgó víz az aszfalt réteghatárookra és a kötőrétegbe szorul.

A leírt károsodás ellen több esetben készült javítás a burkolat felső rétegeibe épített hossz- és keresztirányú miniszivárgókkal. Ezekkel érdemben csökkenthető a vízkilépés jelensége, javítva a forgalombiztonságot, ugyanakkor a pályaszerkezet élettartalmát bizonyosan rontja a sűrű szivárgórendszer.

7. ÖSSZEFOGLALÓ, JAVASLATOK

A hidakon alkalmazott burkolati rendszer kialakítása napjainkban a hatályos előírások és a csatlakozó út pályaszerkezete determinálja, külön híd szerkezettervezési megfontolások nélkül. A pályaszerkezet önsúlya jellemzően nem befolyásolja a hídtervezőt döntésében, kivéve a különösen nagy támaszközü hidakat és a meglévő régi hidak felújítását. Ez utóbbi esetben a vastagabb többlet burkolati önsúly emésztí a híd jellemzően amúgy is szűkös teherbírási képességét.

Jelen írásban a hidakon lévő pályaszerkezet belső víztelenítési hiányosságával kapcsolatos problémakörre kívántuk felhívni a figyelmet. A kérdéskör részletes elemzést és együttműködést igényel tervező, kivitelező és üzemeltető között az út- és hídépítési szakma együttműködésével. Indokolt megvizsgálni a külföldi gyakorlatokat is, hiszen számos országban a hidakon csak egy-, vagy kétrétegű pályaburkolatot építenek.

Célszerű olyan burkolatot tervezni, ami minél zártabb felületű, nem engedi be a vizet. Emellett előnyös, ha a burkolat a lehető legvékonyabb, így kevesebb anyag szükséges és javítása esetén is kisebb beavatkozással jár. Láthattuk, a burkolat „vastagsága” nagy teljesítőképességű beton felszerkezet esetén akár zérus is lehet.

Javasolt összegyűjteni a mai általános alkalmazási gyakorlattal kapcsolatos problémákat, meghibásodásokat. Összegezni kell a már kipróbált hazai és nemzetközi alternatív példákat. Szakmai konszenzus esetén felül kell vizsgálni a műszaki szabályozásunkat, megtéve a szükséges módosításokat.

8. HIVATKOZÁSOK

- [1]: 07.01.11 Közúti hidak tervezése (KHT) 1. (2011. augusztus) Útügyi Műszaki Előírás
- [2]: 07.03.23 Acél pályalemezű hidak szigetelése és aszfaltburkolata (Az 1. sz. módosítással egységes szerkezetbe foglalva) (2022. szeptember) Útügyi Műszaki Előírás
- [3]: 07.03.25 Vasbeton pályalemezű hidak szigetelése és kocsipálya-burkolata (2020. október) Útügyi Műszaki Előírás
- [4]: 06.03.21 Útpályaszerkezetek aszfaltburkolati rétegeinek követelményei (Az 1. sz. módosítással egységes szerkezetbe foglalva) (2021. december) Útügyi Műszaki Előírás
- [5]: Dr. Farkas János, Kocsis Ildikó, Németh Imre, Bodor Jenő, Bán Lajos: Nagyszilárdságú–nagytejesítményű betonok alkalmazása az M7 autópálya S65-ös jelű aluljárója felszerkezetének építésénél. In Közúti és Mélyépítési Szemle 2006/3
- [6]: Farkas, J., Kocsis, I., Németh, I., Bodor, J. & Bán, L. 2007. Az S65 aluljáró felszerkezete nagy teljesítőképességű betonból I. In Beton 2007/3
- [7]: Farkas, J., Kocsis, I., Németh, I., Bodor, J. & Bán, L. 2007. Az S65 aluljáró felszerkezete nagy teljesítőképességű betonból II. In Beton 2007/4
- [8]: Farkas, J., Németh, I., Korpás, R. & Kovács, T. 2009- Nagy teljesítőképességű betonhidak tervezése. In Vasbetonépítés 2009/4
- [9]: Kovács, E. 2025. Burkolat és szigetelés nélküli vasbeton közúti hídfelszerkezet alkalmazási lehetőségei. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Hidak és Szerkezetek Tanszék, diplomamunka
- [10]: e-ÚT 07.01.17 Szigetelés- és aszfaltburkolat nélküli, NT-betonból készülő hídfelszerkezetek tervezése és építése tervezési útmutató. Magyar Útügyi Társaság



**Pályaszerkezet
meghatározása
segítségével;**

**tulajdonságainak
FWD
Harmadik
készülék
rész:**

Pályaszerkezeti rétegek

Karoliny Márton

E-mail: karolinymarton@hotmail.hu

DOI: [10.36246/UL.2025.1.04](https://doi.org/10.36246/UL.2025.1.04)

KIVONAT

A cikksorozat harmadik része az FWD technológia lehetőségeit mutatja be a pályaszerkezet rétegeinek vizsgálatánál. A rétegek vizsgálata az általános állapotértékelésnél és a felújítandó pályaszerkezetek technológiatervezésének megalapozásánál, a megbízói diszpozíciók elkészítésénél ad jó lehetőségeket. A rétegek állapotát befolyásoló, a kivitelezésnél elkövetett hibák vizsgálata is jól lehetséges az ejtősúlyos technológiával.

Kulcsszavak: ejtősúlyos berendezés, rétegmerevségek, rétegek tovább használhatósága, minőség-ellenőrzés

ABSTRACT

The third part of the article series presents the possibilities of FWD technology in examining the layers of pavement structures. The analysis of these layers provides valuable opportunities for general condition assessments, for laying the foundation of technological planning for pavement structures in need of renovation, and for preparing client directives. The investigation of errors made during construction that affect the condition of the layers is also effectively possible using the falling weight deflectometer technology.

Keywords: Falling Weight Deflectometer (FWD), layer stiffness, continued usability of layers, quality control

Karoliny Márton

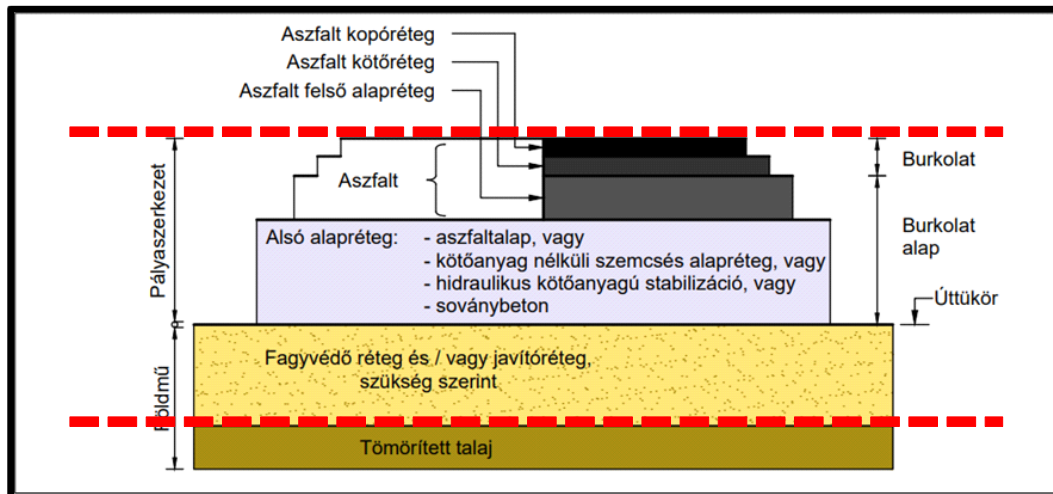
Okleveles építőmérnök, okleveles mérnök-tanár. Hídszakértő, hídtervező. Korábban az állami közútkezelő hidász-mérnöke volt. Elsődleges szakterülete a hídvizsgálat, hidak teherbírás vizsgálata. Okleveles építőmérnök, szakmérnök, mérnök-közgazdász. Jelenleg aktív, szakmai tanácsadással foglalkozó nyugdíjas. Pályájának első részében közútkezelőként (hídmérnök, majd fejlesztési osztályvezető) majd a kivitelező építőiparban műszaki igazgatóként, illetve ügyvezetőként dolgozott. 1993-tól a többszörös átalakuláson átment, ma STRABAG-ként nevezhető konszern technológiafejlesztési, minőségellenőrzési, illetve innovációs egységét vezette 2008-ig, azóta a jelenlegi foglalkozását űzi. Számos konszern belüli és külső megbízásra végrehajtott műszaki fejlesztési projekt vezetésében közvetlenül is részt vett. Alapvető szakmai érdeklődési területe az útpályaszerkezetek méretezési, technológiatervezési és minőségbiztosítási kérdései. Írott publikációinak száma több, mint 50, évente 4-5 konferencián, workshopon előadásokat tart.

1. BEVEZETÉS

1.1. MIBŐL ÁLL A PÁLYASZERKEZET, AMIT VIZSGÁLNI AKARUNK?

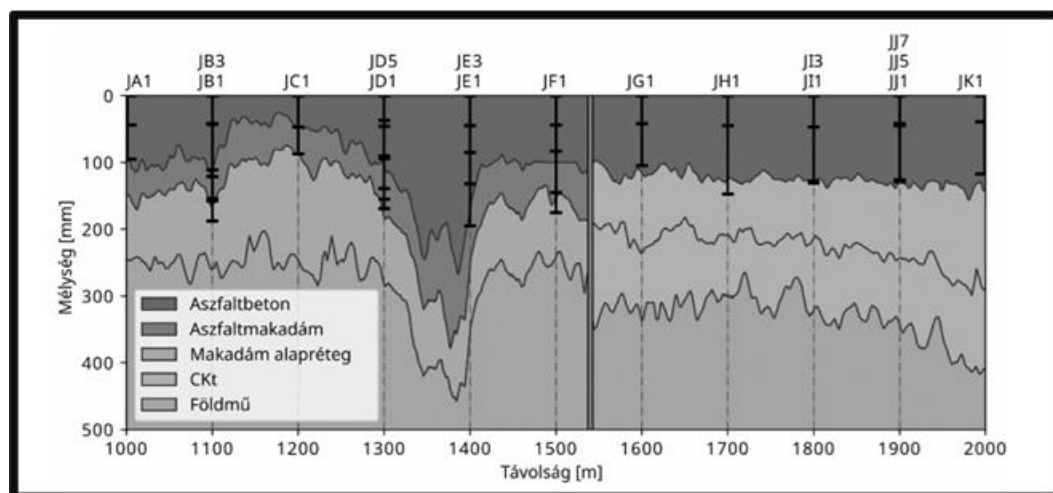
A földműről és a pályaszerkezetről szóló cikkben a földmű fogalmát a hazai konvenciótól **eltérően** definiáltuk.

Ebből következik, hogy a **felette** lévő rész a pályaszerkezet, ami különböző (funkciójú és anyagú) rétegekből áll.



1. ábra: Elméleti pályaszerkezet-felépítés.

A valóság persze kicsit másképpen néz ki, mint a fenti ábra; vizsgáljunk meg az [1] alapján, egy valódi pályaszerkezetet, földradar által készített felmérésben (2. ábra).



2. ábra: Valós pályaszerkezet-felépítés, [1] alapján.

Jól látható, hogy meglévő pályaszerkezeteink felépítése mind a rétegek **anyaga**, mind a **geometriai jellemzői** (vastagsága) szempontjából meglehetősen bizonytalan.

Be kell látni, hogy a valóság bonyolultabb, a **rétegek** szerinti vizsgálódást ezért célszerű olyan útszakaszokon végezni, ahol az előzetes információk kellően **megbízhatók**. Ebből a szempontból a gyorsforgalmú úthálózat előnyben van, ahol az útszakaszok „története” jobban dokumentált.

A rétegeket pedig célszerű anyaguk (és nem funkciójuk) szerint megkülönböztetni, így vannak

- szemcsés rétegek,

- hidraulikusan (cementtel) kötött rétegek,
- aszfaltrétegek,

amelyeknek tényleges képességeit az FWD technológiával vizsgáljuk.

1.2. MIÉRT KELL VIZSGÁLNI?

Alapvetően három célból:

- a rétegek általános állapotának jellemzése,
- pályaszerkezet felújítás/megerősítés esetében, tervezési/méretezési inputadatok gyűjtése,
- különleges feladatok (pl. kutatás, speciális, főleg jóállási ügyekben adatgyűjtés, fejlesztési feladatok) megalapozása.

Az általános állapotjellemezésre az országos közúthálózaton szabályozott [2] körülmények között rendszeresen sor kerül. A lényegesen hosszabb helyi közúthálózaton ezt nem hajtják végre; ezt pedig a használat és a gazdálkodás sínyli meg.

A felújítás/megerősítés érvényes szabályozása [3] a központi behajlásértéken alapul, ezáltal nem képes a pályaszerkezeti rétegeket külön-külön értékelni, továbbá, alap esetben, a pályaszerkezet vastagításával (ráépítéssel) operál.

A „különleges” feladatok esetében, a szakértő eszközeit és a meteorológiai körülményeket maga választja meg.

Jelen írás alapvetően a gyorsforgalmú úthálózaton a rétegek állapotértékelését és a felújítási esetekben, a közútkezelő/tervező páros számára hasznos információk nyújtását tűzi ki céljául.

2. NAGYKÉP: PÁLYASZERKEZETEK ÁLLAPOTÁNAK JELLEMZÉSE A RÉTEGMEREVSÉGEKKEL

A behajlásméréssel meghatározott teknőadatokból lehetséges a pályaszerkezeti rétegek merevségének meghatározása; erre számos szoftver és/vagy a teknőadatokból levezetett képlet használható.

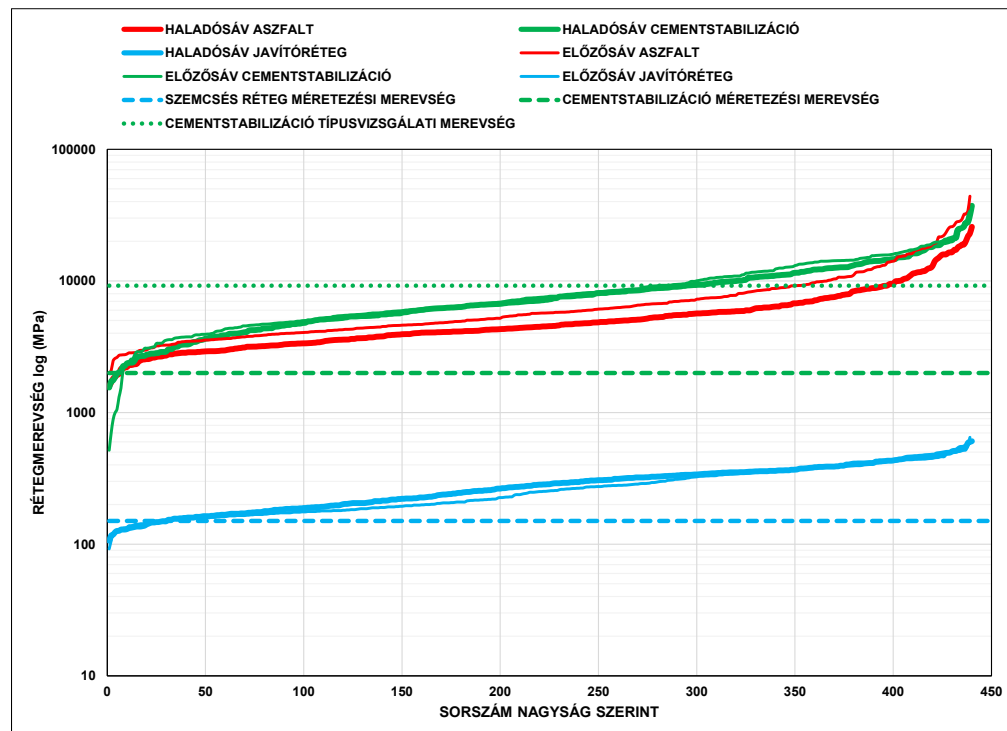
Megjegyzendő, hogy minden ezzel foglalkozó eljárás meglehetősen érzékeny a rétegvastagságokra, de a választott gyorsforgalmi elemek esetében, a számított merevségértékek – a nagyszámú mérési pont miatt – a roncsolásos eljárásoknál reprezentatívabbak lehetnek.

Az így nyert adatok alkalmasak általános értékelésekre, illetve részletesebb elemzésekkel, fontos szakmai döntések megalapozására.

Mindezek bemutatásához három autópályaszakasz behajlásmérési eredményeit használjuk fel. Itt előnyös, hogy a forgalmi sávok eredeti tulajdonságai jellemzően azonosak és a terhelt/nem terhelt sávok összehasonlítása hasznos információkhoz segít hozzá.

2.1. ÚJ ÁLLAPOTÚ PÁLYASZERKEZET

Egy gyorsforgalmi úton, az átadás előtt lehetőség nyílt valamennyi forgalmi sávon behajlásmérésre; ennek alapján készült el a 3. ábra.



3. ábra: Új pályaszerkezet rétegeinek visszaszámolt merevsége.

Az új állapotú pályaszerkezetekre vonatkozó következtetések a következők:

- jól felismerhető, hogy még nincs különbség a sávok között, a merevségek vonalai gyakorlatilag összeérnek mind a haladó, mind pedig az előzősávon,
- vegyük észre, hogy mind a cementstabilizáció, mind pedig a szemcsés réteg esetében, a tapasztalt merevségek a tervezési (mértezési) értékeket *lényegesen* meghaladják,
- a cementstabilizáció visszaszámított merevsége ugyanakkor a típusvizsgálatban megadott szilárdsági értékből számítható merevségtől érdemlegesen elmarad.

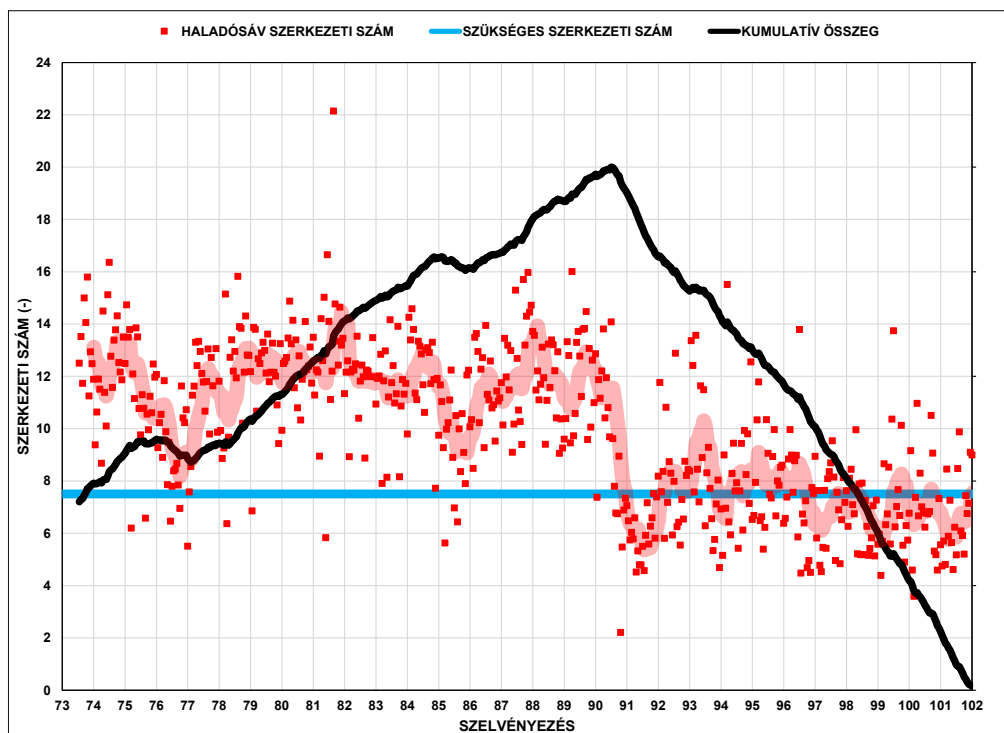
Mindezekre a későbbiekben még visszatérünk.

2.2. AZ „ÉLETE DELÉN” JÁRÓ PÁLYASZERKEZET

A 4. ábra kiugróan nagy forgalomfejlődést „átélő” autópályaszakaszon, a behajlásértékekből meghatározott **szerkezeti számokat** mutatja be, a haladósávra vonatkozó kumulatív összeggel együtt.

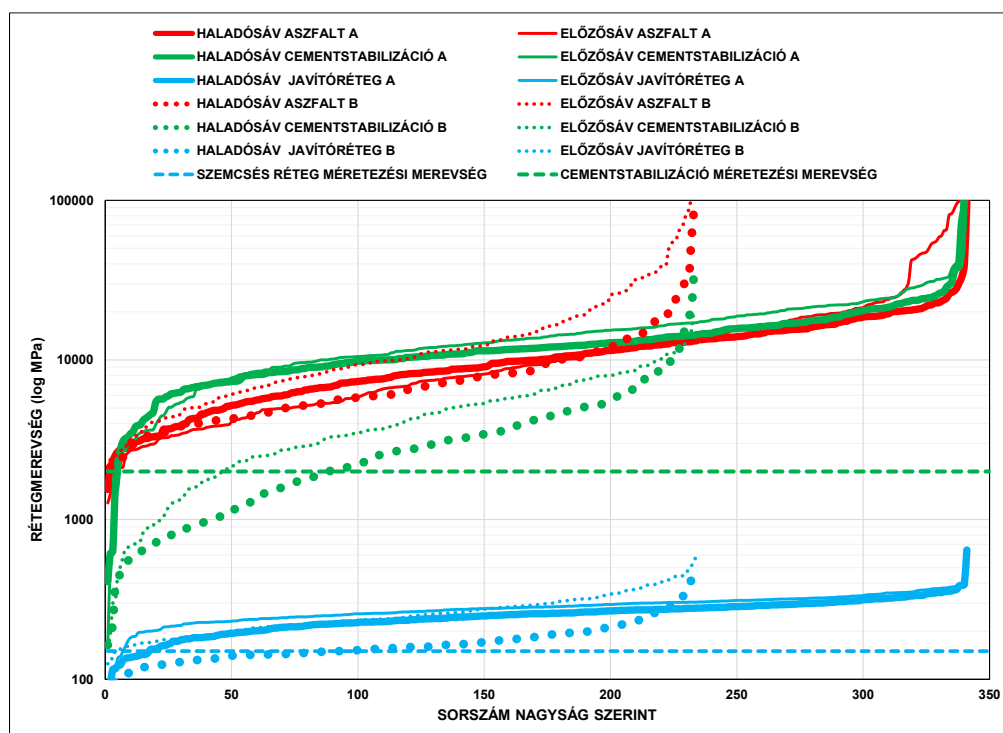
A szakasz lényeges tulajdonságai a következők:

- a teljes szakasz nehéz forgalma **azonos**,
- a szakaszon az eredeti tervezési forgalom közel másfélszerese futott le, a tervezési időtartam kb. 80 %-a alatt,
- a teljes szakasz a kiépítéskor a kumulatív összeg szelvényhatárainak megfelelő részsakaszokban épült (azaz külön vezetővel és kivitelező csoporttal),
- valamennyi pályaszerkezeti réteg ugyanolyan összetétellel és keverékeik azonos keverőtelepen készültek, a keverékeket ugyanaz a géplánc építette be → az esetleges különbségek emberi/vezetési dolgokra vezethetők vissza.



4. ábra: Szerkezeti számok „élete delén” járó autópályaszakaszon.

Jól látható, hogy a kumulatív összeg a vizsgált szakaszt két, egymástól jelentősen eltérő részre osztja. Az első részen a szerkezeti számok a szükséges értéket nagymértékben meghaladják, a másodikon lényegesen alacsonyabb értékeket mutatnak. Vizsgáljuk meg az egyes rétegek merevségeinek részszerkezetként külön-külön sorrendbe állított értékeit.



5. ábra: „Élete delén” járó pályaszerkezet rétegmerevségei.

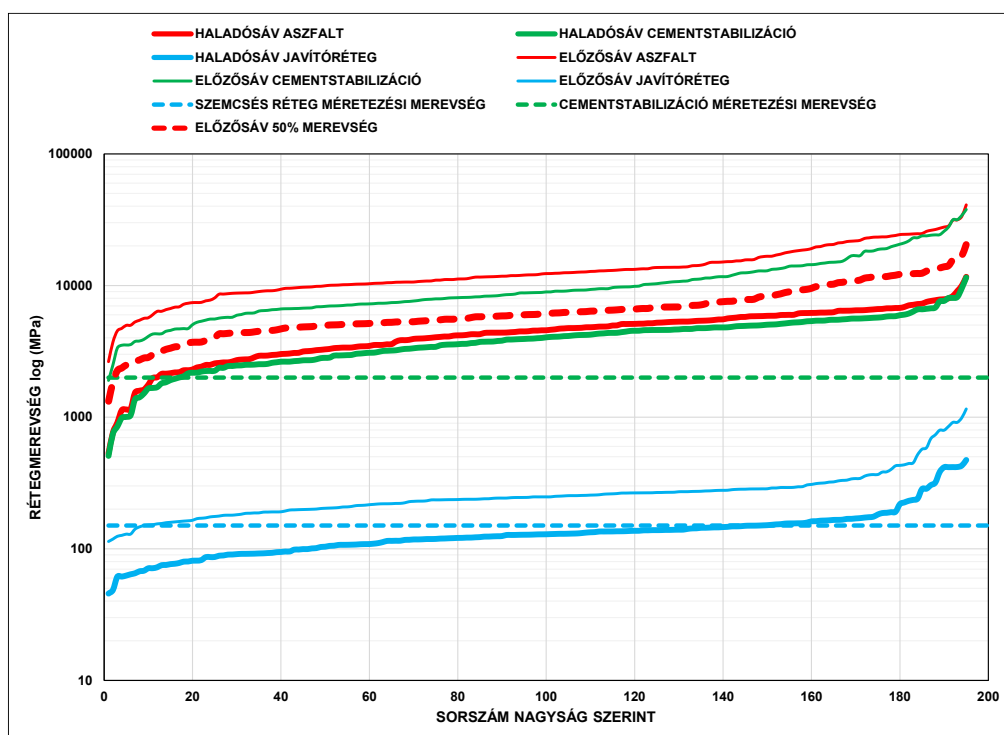
Az 5. ábra alapján levonható fő következtetések:

- az „A” (magasabb szerkezeti számot mutató) szakaszon az említett, lényegesen nagyobb forgalomnövekedés ellenére, mindhárom rétegnél a terhelt rétegek merevsége meglehetősen közel van a nem terhelt rétegekéhez, azaz a **fáradás nem jelentős**,
- a „B” szakaszon a cementstabilizáció merevsége nagymértékben alatta marad az „A” szakaszon tapasztaltaknak, mind a terhelt, mind pedig a terheletlen sávon (megjegyzendő, hogy a mérési pontok közel 40%-ánál a merevség a méretezési értéknél **kisebb**, ami kiugróan rossz eredmény),
- a szemcsés réteg merevsége a „B” szakaszon nagymértékben elmarad az „A” szakaszétól és a méretezési merevséget nem kevés helyen alulmúlja.

Ezek az eredmények magyarázatot igényelnek, további információk birtokában.

2.3. ELHASZNÁLÓDOTT PÁLYASZERKEZET

Végül vizsgáljuk meg (alapvetően a haladósávon) elhasználdott pályaszerkezet rétegmerevségeit.



6. ábra: Elhasználdott pályaszerkezet rétegmerevségei.

A levonható következtetések:

- mindhárom rétegnél határozott különbség látható a „használt” és a „nem használt” sávok merevségértékei között, ami nyilvánvalóan, a sokkal nagyobb terhelésszám miatti **fáradás** következménye,
- a cementstabilizációs és részben a szemcsés réteg merevségei jellemzően **nagyobbak**, mint a méretezésnél használt értékek.

Az eddigi – hasznos – következtetéseken túl, további fontos tények tárhatók fel, némi pályaszerkezet-mechanikai ismeret hasznosításával.

3. AZ EGYES RÉTEGEK MECHANIKAI TULAJDONSÁGAI

A „nagykép” után vizsgáljuk meg a részleteket is, és anyagonként tárjuk fel, hogy az FWD technológia segítségével, milyen további információkat nyerhetünk.

Ezek a következők:

- a rétegre vonatkozó (forgalmi és meteorológiai) igénybevételek,

- a réteg anyagára vonatkozó **anyagtörvények** sajátosságai,
- az igénybevételekkel szembeni, az FWD-vel meghatározható ellenállási képességek.

A pályaszerkezetméretezési gyakorlat ma a szilárd (rugalmas) anyag, a jellemzően két-irányban végtelen többrétegű lemez feltételezésével él. A határkritérium pedig a rugalmas állapot megszűnése.

Ezek a feltételezések sok szempontból nem igazak, de segítségükkel, alapvető információk megszerzésére, viszonylag egyszerű eljárások alkalmazhatók.

Az egyes rétegekben a **járműterhelésből keletkező** hatások (feszültségek/alakváltozások) a behajlási teknő adataiból számíthatók [4], [5].

Meteorológiai terhelések (ezek alapvetően hőmérsékletváltozások) a hidraulikus kötőanyagú és az aszfaltrétegeknél jelentkezők.

A jobb érthetőség kedvéért, a szerző szintetikus pályaszerkezet-gyűjteményt hozott létre, amelyben a legfontosabb (járműterhelésből származó) igénybevételek és az anyagtulajdonságokból számítható **ellenállási képességek** számíthatók.

Az eredményeket a hazai érvényes forgalmi kategóriákhoz kapcsolható, **megengedett behajlások** függvényében lehet ábrázolni, ezeket mutatjuk be a következőkben.

3.1. SZEMCSÉS RÉTEGEK

Hazai gyakorlatunk a szemcsés rétegeket leginkább a védő/javító funkcióban használja, és a meglévő pályaszerkezetek esetében, jellemzően nem foglalkoznak vele külön; látni fogjuk, hogy ez a gyakorlat hibákhoz vezethet.

3.1.1. MILYEN A SZEMCSÉS RÉTEGEK MECHANIKÁJA?

A szemcsés rétegek pályaszerkezeti viselkedése alapvetően empirikus képleteken, eljárásokon alapul [6].

Vizsgáljuk meg a **szilárd és a rugalmas hipotézis** érvényességét szemcsés rétegen. A szemcsés rétegen két mérési pontot jelöltünk ki, és könnyű ejtősúlyos berendezéssel ismételt ejtéseket hajtottunk végre. A behajlásokból számított rétegmerevségeket a 7. ábrán tüntettük fel.

A piros kiegyenlítővonallal rendelkező pontthalmaz „felkeményedési” folyamatot mutat. Ez ismert a hazai gyakorlatban, a HUMU [7] a pályaszerkezetek megerősítésénél, a **meglévő** szemcsés alaprég egyenértékűtényezőjét **magasabbra** határozta meg, mint az új esetben, figyelembe véve a „tömörödést”.

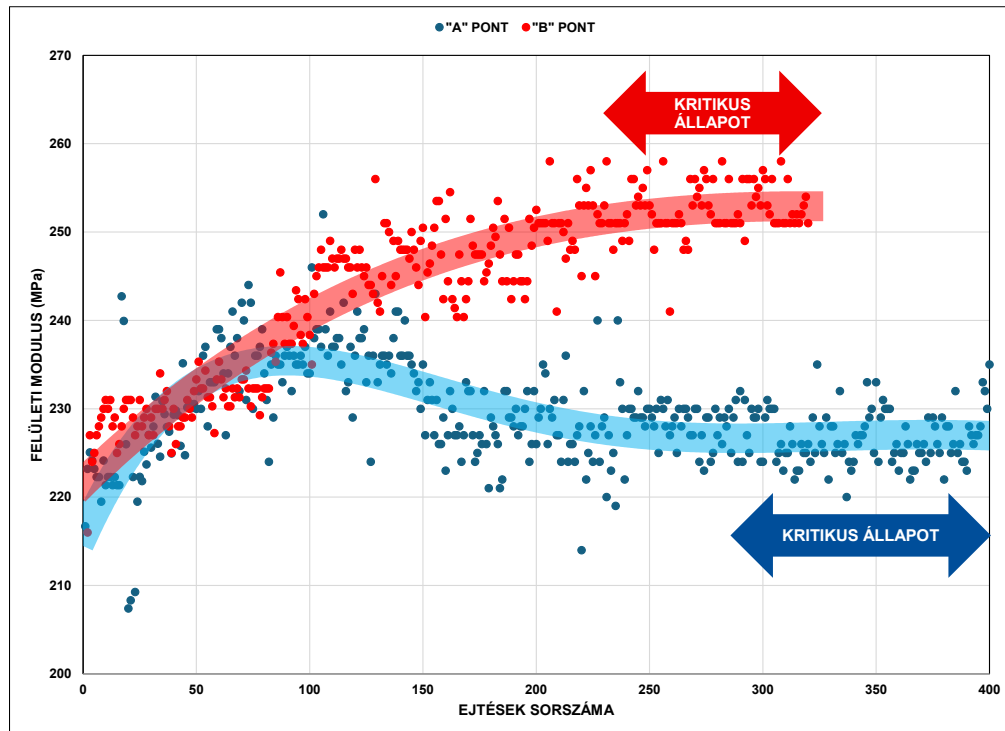
Az „A” (kék színű vonal) pontthalmaza esetében, a merevség először **növekedett**, majd csökkenés után állandó érték alakult ki.

Nos, ez a viselkedést a **szilárd anyag** feltételezés nem tudja megmagyarázni, a szemcsés szerkezetek **más modell** szerint viselkednek; többféle megközelítés ismeretes [8]. A legjobban kidolgozott és validált modell az úgynevezett **hipoplasztikus** anyagtörvény, aminek frappáns bemutatását [9] tartalmazza.

A szemcsés szerkezetek speciális tulajdonságainak felsorolásából – a [10] alapján – néhányat kiemelünk:

a deformáció **nem rugalmas**, azaz a terhelés és annak eltávolítása után, a **szemcsés szerkezet alakja megváltozik**,

elég nagy monoton, nyírási deformáció után (állandó nyomással) a szemcsés szerkezet **térfogata** már nem változik; ezt az állapotot **kritikusnak** nevezik,



7. ábra: Szemcsés réteg merevségének változása, ismételt terhelések hatására.

- mivel a szemcsés szerkezet **nem rugalmas**, merevsége a deformáció történetétől függ, a korábbi történések „emléke” elvész, azaz **nincs a szilárd testeknél értelmezhető fáradás**.

Az anyagtörvény segítségével a fenti tulajdonságok szemcsés szerkezetre vizsgálhatók és tervezhetők, amivel a réteg teljesítményét (merevségét és deformációmentességét) reális tartományban fokozni lehet.

Nem véletlenül az útpályaszerkezetek kapcsán is folynak kutatások a használatra [11], de az egyre szaporodó térkőburkolatok szemcsés alaprégeinél – lásd a 8. ábrát – is szükség lenne szakmailag megalapozottabb megoldásokra, ez az elmélet arra is alkalmas.

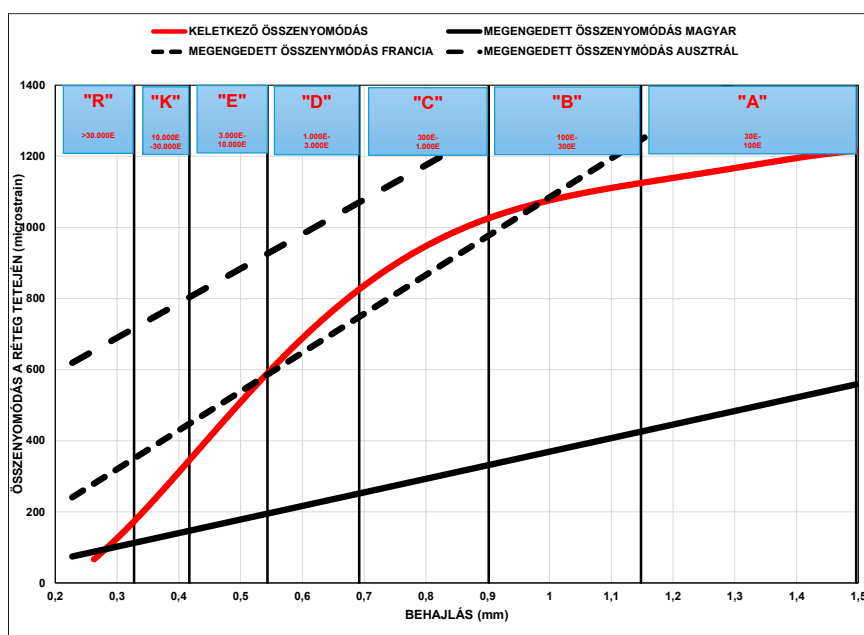


8. ábra: Térfőburkolat alatti szemcsés alaprég tönkremenetele.

3.1.2. SZEMCSÉS ALAPRÉTEGEK TOVÁBBHASZNÁLHATÓSÁGA

A szemcsés anyagok (földmű, javítórég, alaprég) esetében a pályaszerkezet-méretezés szempontjából igénybevételnek a réteg felületén keletkező összenyomódást (fajlagos alakváltozás)

tekintjük. Határigénybevételnek pedig jellemzően empirikus eredetű képlettel meghatározható, **megengedett összenyomódást** [12] használunk. Ezeket lehet a 9. ábrán tanulmányozni. Az ábrán – összehasonlításként – feltüntettük az érvényes francia és ausztrál szabályozás hasonló értékét, a megengedett tengelyterhelés megfelelő korrekciójával.



9. ábra: Szemcsés réteg igénybevétele és tönkremeneteli kritériuma.

Megvizsgálva a 9. ábrát, azonnal feltűnik, hogy a forgalmi terheléshez tartozó hazai, megengedett összenyomódás **jóval kisebb**, mint a behajlási teknő alapján számított, azaz a kritérium **nem teljesül** (ugyanakkor a két külföldi előírás megfelelőnek látszik). Meglévő pályaszerkezetek esetében, ez azt jelenti, hogy a ma használt behajlási kritérium **nem biztosítja** a szemcsés rétegek deformációellenállását; itt további vizsgálatokra és elemzésekre van szükség.

Az Útügyi lapokban közelmúltban jelent meg egy írás, amely a kérdésnek a hazai szabályozásokban levő elégtelen előírásokat kritizálva, mutat be a hipoplasztikus anyagtörvényen alapuló korszerű eljárást, amelynek tanulmányozását javasolja a szerző.

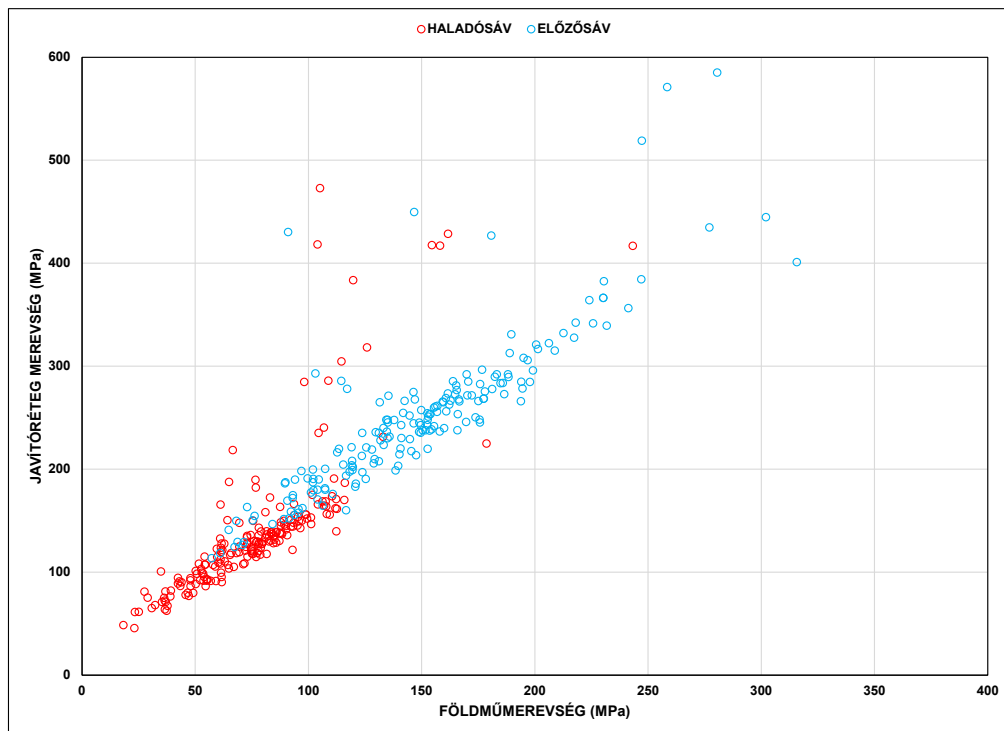
3.1.3. SZEMCSÉS ALAPRÉTEG TOVÁBBHASZNÁLHATÓSÁGA

Meglévő pályaszerkezeteink esetében kézenfekvő lehet a vizsgált réteg **továbbhasználhatósága**, azaz képes-e károsodás stb. nélkül elviselni a **további** terheléseket.

A kérdés a hazai gyakorlatban ellenőrizhető módon viszonylag ritkán fordul elő [14] egy, a tervezést megalapozó vizsgálat eredményeihez lehet kapcsolódni.

A 7. ábrán szereplő autópályaszakasz az előző hivatkozásban „érintett” volt, a diszpozíció a szemcsés (és a később tárgyalandó) cementstabilizáció eltávolítását javasolta.

Megjegyzendő, hogy a kérdést számos egyéb (forgalomtechnikai, a teljes pályaszerkezet gazdasági vizsgálatával is alátámasztott cseréje stb.) tényező is befolyásolta, de a meglévő gyorsforgalmi utak esetében, sok hasonló helyzet miatt, néhány szempontra érdemes kitérni.



10. ábra: Földmű és javítórét merevségének kapcsolata élettartama végén járó autópálya esetében.

A 10. ábrán világosan látszik, hogy az előzősávon lényegében hiánytalanul, a haladósávon pedig a mérési pontok jelentős részében a szemcsés réteg **merevsége** kellő mértékű.

A kockázatosnak tekinthető helyeken, a nem megfelelő értékek a **földmű** nem kielégítő képességére utalnak, azaz az alacsonyabb földműmerekesség a szemcsés réteg alacsonyabb merevségének oka. Ezeken a helyeken további vizsgálatok és/vagy a földmű javítását célzó intézkedések szükségesek. Ugyanakkor a teljes javítórét eltávolítása (természetesen, pl. geometriai szempontok is létezhetnek) **nem tűnik gazdaságosnak**.

Vegyük azt még figyelembe, hogy a szemcsés rendszerek tulajdonságait leíró hivatkozásban [10] szerepel, hogy:

a szemcsés rendszerek **nem fáradnak**, tehát ez nem ad okot a „cserére”,

a szemcsés rétegek az eredeti beépítés és a forgalmi terhelés hatására, nagy valószínűséggel, a **kritikus állapotba** kerültek, további térfogatváltozásuk (keréknyomképződés) nem valószínű,

a felette lévő rétegek esetleges eltávolítása után a réteg újra tömörítése (megfelelő vizsgálatok után) a kritikus állapot elérését lehetővé teszi.

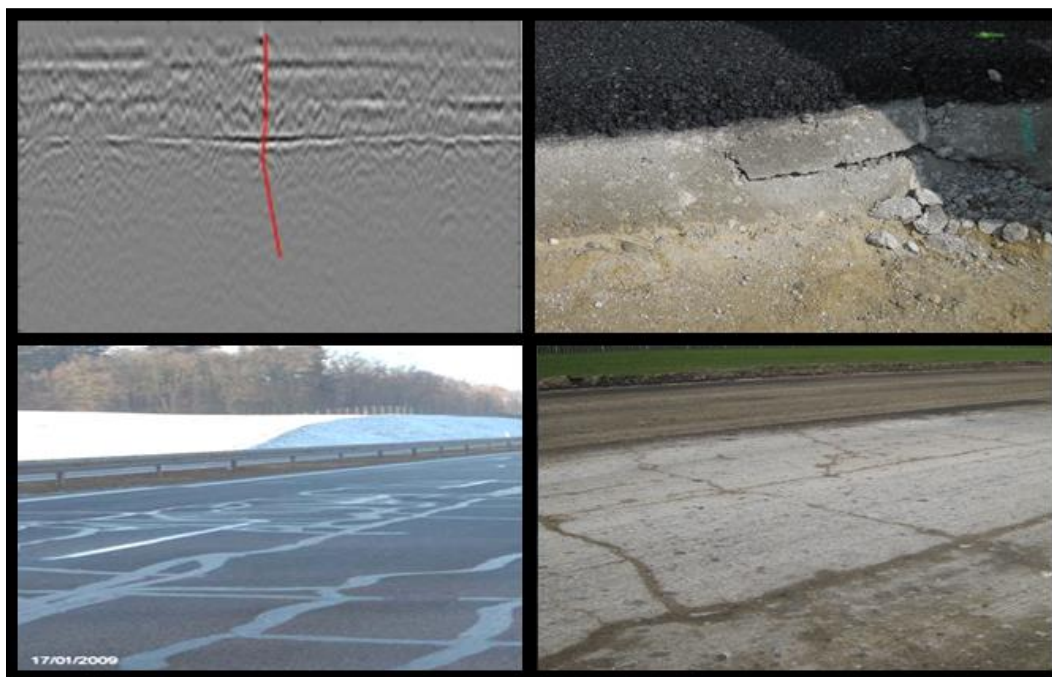
Ezen elméleti jellegű megfontolások után, ismételten felhívjuk a figyelmet arra, hogy hazai korábbi szabályozásunk [7] lényegében ezeket figyelembe vette. Azaz mérési eredményeink alapján, csak a réteg tulajdonságait nézve, sokkal gazdaságosabb megoldásra van lehetőség.

3.2. HIDRAULIKUSAN KÖTÖTT RÉTEGEK

A hidraulikusan kötött rétegek, alapréteggént, a motorizációval együtt kiépülő pályaszerkezetekben nagy karriert futottak be.

Ezek viselkedését a hazai szakirodalom főleg Nemesdy [15] alapján ítélte meg, aki az akkoriban szokásos cementadagolás mellett egy hálósan összeropedezett, kvázi hajlékony, jó teherbírású alaprétegről írt, mivel ekkor a cementstabilizáció a mai cementadagolás fele körüli értékekkel készült.

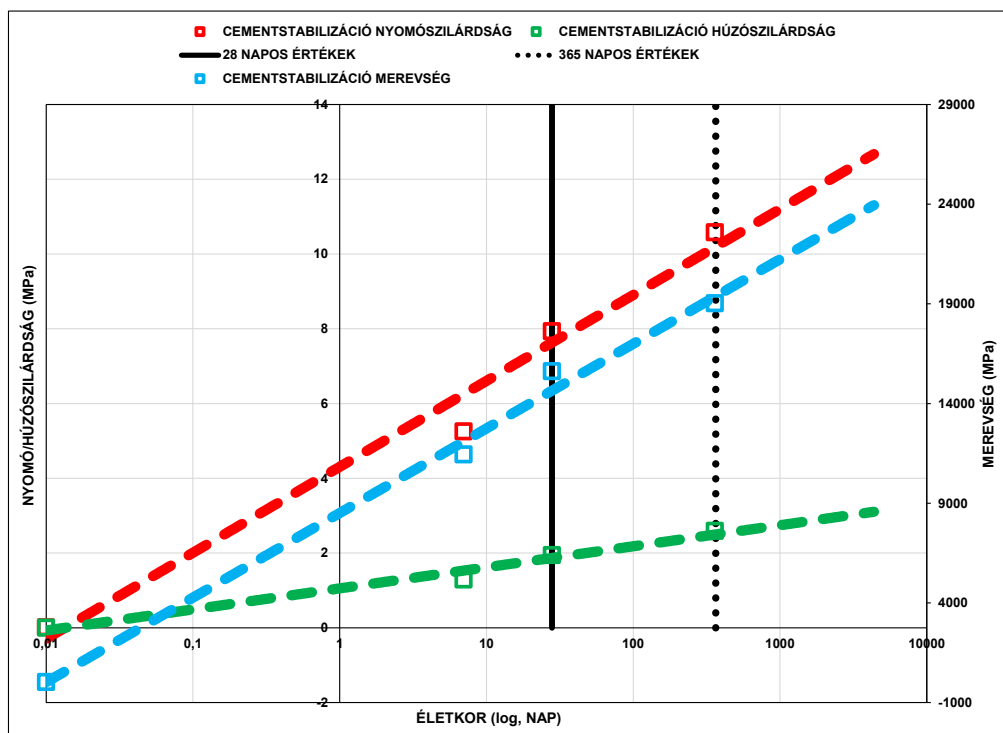
Az utolsó évtizedekben a lehetséges keverék választék a hazai gyakorlatban az egyre nagyobb cement adagolású, egyre igényesebb adalékot igénylő típusok irányába tolódott. Ezek ugyanakkor számos, a hidraulikus kötéstől származó problémát felerősítettek. A 11. ábrán ezen problémák egy része felismerhető, a „félíg merev, félíg hajlékony” hipotézist megkérdőjelezve.



11. ábra: Tönkrement, hidraulikus alaprégű pályaszerkezetek.

3.2.1. A CEMENTSTABILIZÁCIÓ SZILÁRDSÁGI JELLEMZŐI

Hazai gyakorlatunkban a hidraulikusan kötött alaprétegek (egyébként előírásaink szerint is nagyon gazdag) választékából a C $\frac{3}{4}$ szilárdsági osztályú a legelterjedtebb, ezért ennek szilárdsági jellemzőit mutatjuk be.



12. ábra: Cementstabilizáció szilárdsági jellemzőinek változása, a beépítéstől kezdve.

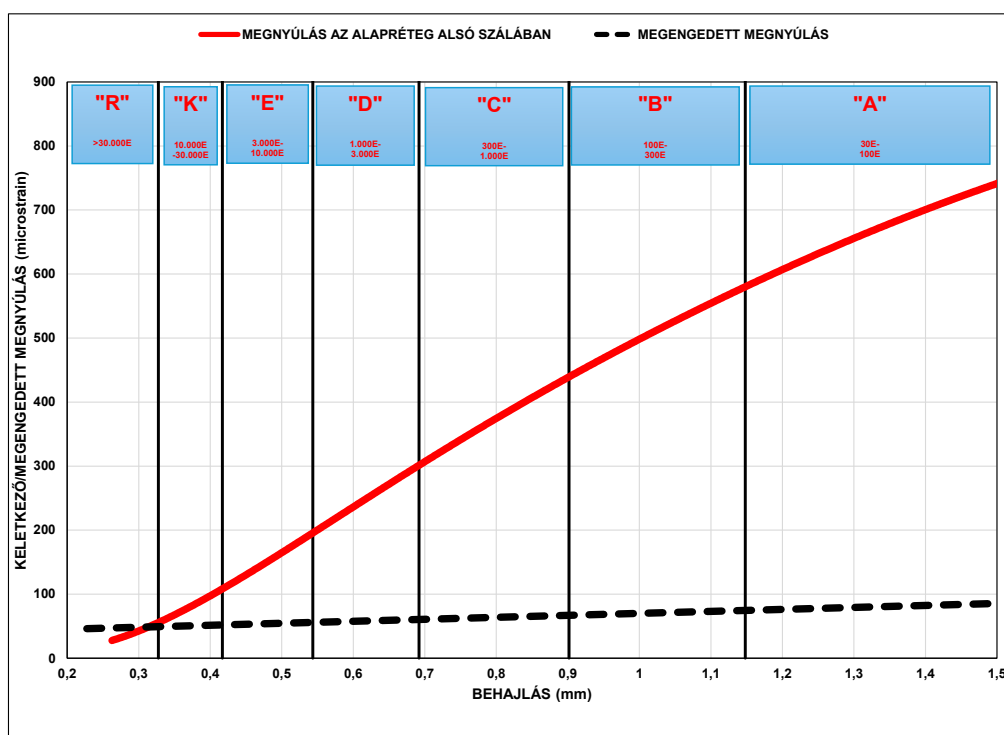
A 12. ábrán egy nagyobb építésnél készült próbatestek átlagszilárdságából számított merevségek és nyomó/húzószilárdságok láthatók. A különböző időpontokban végrehajtott törésvizsgálatok egyértelmű, a szokásos 28 napon túl is folytatódó értékeket mutatnak; ez szakmánkban ismert, de gyakran figyelmen kívül hagyott jelenség. Felhívjuk a figyelmet a valós eredmények jelentős szórására.

3.2.2. CEMENTSTABILIZÁCIÓ IGÉNYBEVÉTELEI

A cementstabilizációt hazai méretezési gyakorlatunk **húzószilárdság nélküli** anyagként kezeli, ami azt jelenti, hogy a pályaszerkezet-méretezésben nincs kritérium a húzószilárdság túllépésére, azaz viszonylag alacsony merevségértéket vesznek a méretezésnél figyelembe. Ez látható a három autópályaszakasz merevségeit bemutató ábrán.

A nemzetközi gyakorlatban nagyon hasznos módszert ismertet a [16], ahol bármelyik hidraulikus kötőanyagú réteg megengedett megnyúlása a réteg merevségének és a terhelések darabszámának függvényében számítható.

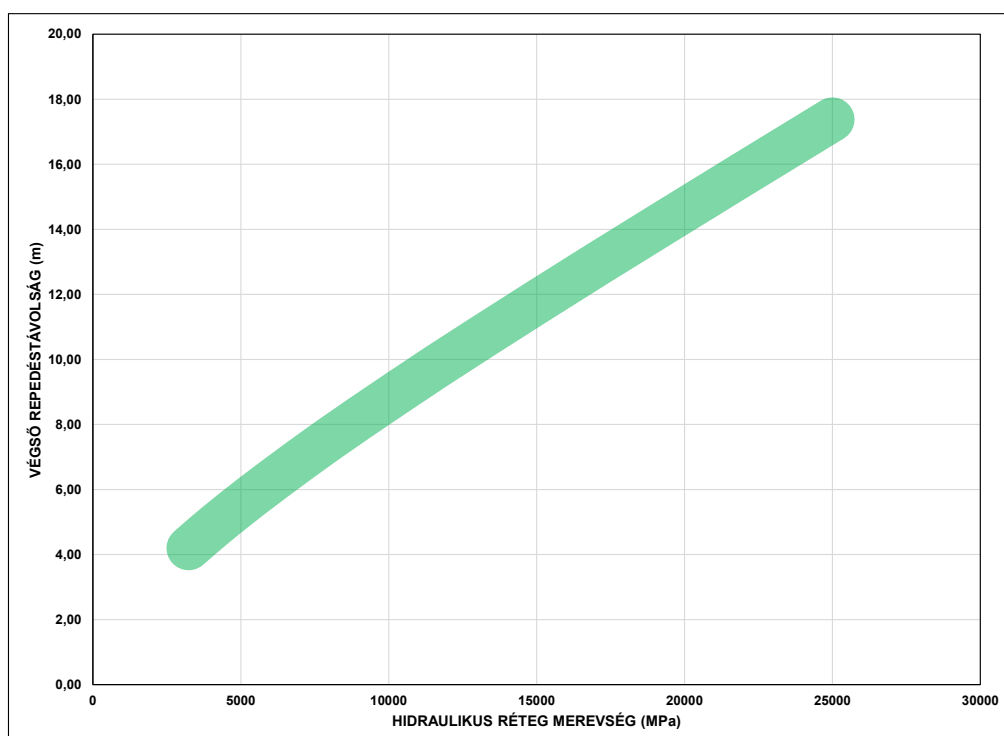
A 13. ábrán a már ismert diagramformában feltüntettük a keletkező és a hivatkozott (ausztrál) szabályozás szerinti megengedett megnyúlásértékeket; látszik, hogy a forgalmi kategória behajlásaihoz a megengedettnél jóval nagyobb **számított** megnyúlás tartozik. Ez lényegében altámasztja a húzószilárdság nélküli koncepciót, legfeljebb az a kérdés merül fel, hogy akkor miért alkalmazunk érdemi húzószilárdságra is képes keverékfajtát.



13. ábra: Cementstabilizáció igénybevétele a járműterhelésből és a határigénybevétel.

A járműterhelésen kívül nagyon jelentős hatása van a meteorológiai terhelésnek, ezen belül a **hőmérsékletváltozásnak**. A [8] szerint a hőmérsékletváltozás osztódási folyamatot generál, ami alapvetően **keresztirányú** repedéseket eredményez.

A [17] alapján végrehajtott számítás mutatja, hogy a hazai anyagok, meteorológia stb. függvényében az osztódás kb. 4 és 15 m közötti repedéstávolságnál **befejeződik**, ahogyan a 14. ábra szemlélteti.



14. ábra: Hidraulikus réteg végleges repedéstávolsága, a rétegmerevség függvényében.

3.2.3. CEMENTSTABILIZÁCIÓ TOVÁBBHASZNÁLHATÓSÁGA

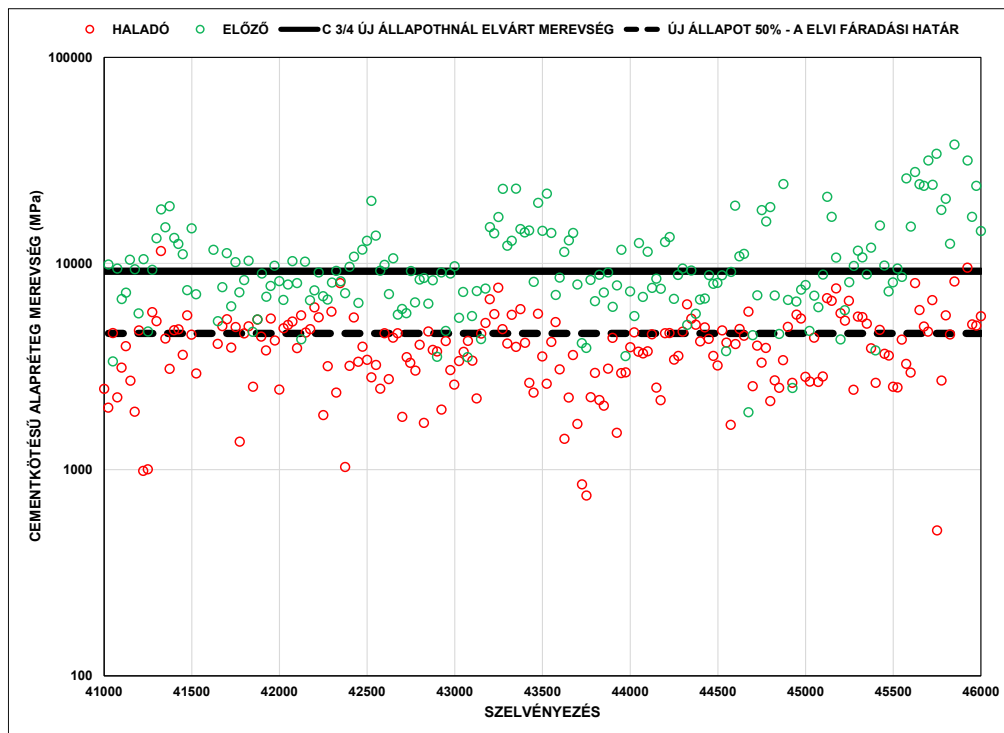
Hazai gyakorlatunkban felújítási/megerősítési feladatok esetében nagyon ritkán fordul elő, hogy a cementstabilizáció külön vizsgálat tárgya lenne, a már hivatkozott [14] esetben a hidraulikus réteg eltávolítására tettek javaslatot. Vizsgáljuk meg a 6. ábrán szereplő gyorsforgalmi szakaszt ebből a szempontból.

3.2.3.1. Meteorológiai igénybevételek

A 14. ábrán látható, hogy a hidraulikus alapréteg „osztódásos” repedéseinek van korlátja, azaz a folyamat egy idő után befejeződik; ez az idő, a számítás érzékenységvizsgálata alapján, lényegesen rövidebb, mint a járműterhelésből bekövetkező fáradás miatti repedések megjelenéséig eltelő idő. Ebben az esetben mindkét sávon kellően hosszú idő telt el ahhoz, hogy további osztódás ne következzen be. Ez pedig azt jelenti, hogy a statikai váz végleges, a mérésekből számítható merevségek emiatt már nem változnak.

3.2.3.2. Merevségek

A 6. ábrán látható merevségek most a szelvényezés függvényében, néhány kiegészítő adattal együtt vizsgálhatók a 15. ábrán.



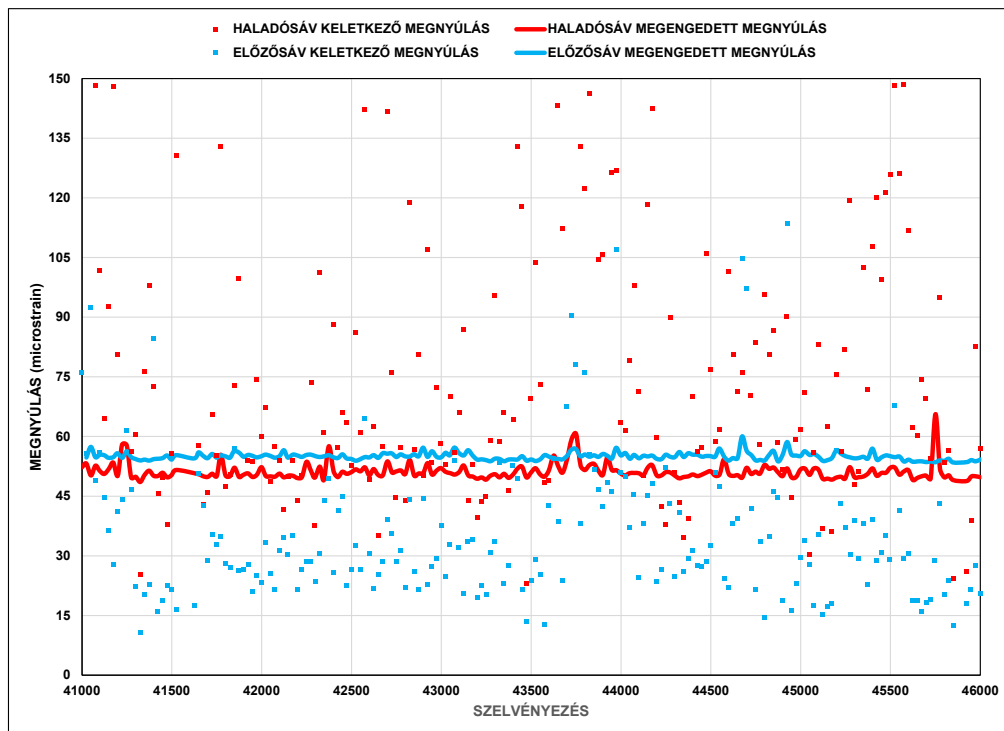
15. ábra: Elhasználódott autópálya hidraulikus rétegeinek merevségi viszonyai.

A 15. ábrán jól felismerhető, hogy a haladósáv merevségértékei lényegesen alacsonyabbak. Az eredeti alaprég keverékadatai nem ismertek, ezért, referenciaként a CKt $\frac{3}{4}$ szilárdsági osztály minősítő szilárdságából számítható merevségértéket, továbbá ennek 50%-át is feltüntettük. Jól látható, hogy az előzősáv merevségei egyrészt átlagosan a minősítő merevséget elérik, másrészt **nagyobbak**, mint az elvi fáradási határ (50%) értékei. Mindezekből adódóan:

- az előzősáv rétege kellő biztonsággal **továbbhasználható**,
- a haladósáv esetében az eltávolítás/újépítés **megfelelő** döntés lehet.

3.2.3.3. Meglévő alaprég további járműterhelése

A [16] alapján számítottuk a haladó és az előzősáv további járműterhelése esetére megengedett megnyúlás értékét. A 16. ábrán tanulmányozható, hogy az előzősáv megengedett megnyúlása magasabb, mint a számított, tehát a sáv továbbhasználatra **alkalmas**. A haladósáv hasonló értékei a merevségértékekből levonható következtetéseket alátámasztják. Látható, hogy az FWD technológia a közútkezelő/tervező információbázisát jelentős mértékben kiterjeszti, és ezzel gazdaságosabb megoldásokat tesz lehetővé.



16. ábra: Megengedett és keletkező cementstabilizáció-megnyúlás elhasználódott autópálya alaprégében.

3.3. ASZFALTRÉTEGEK

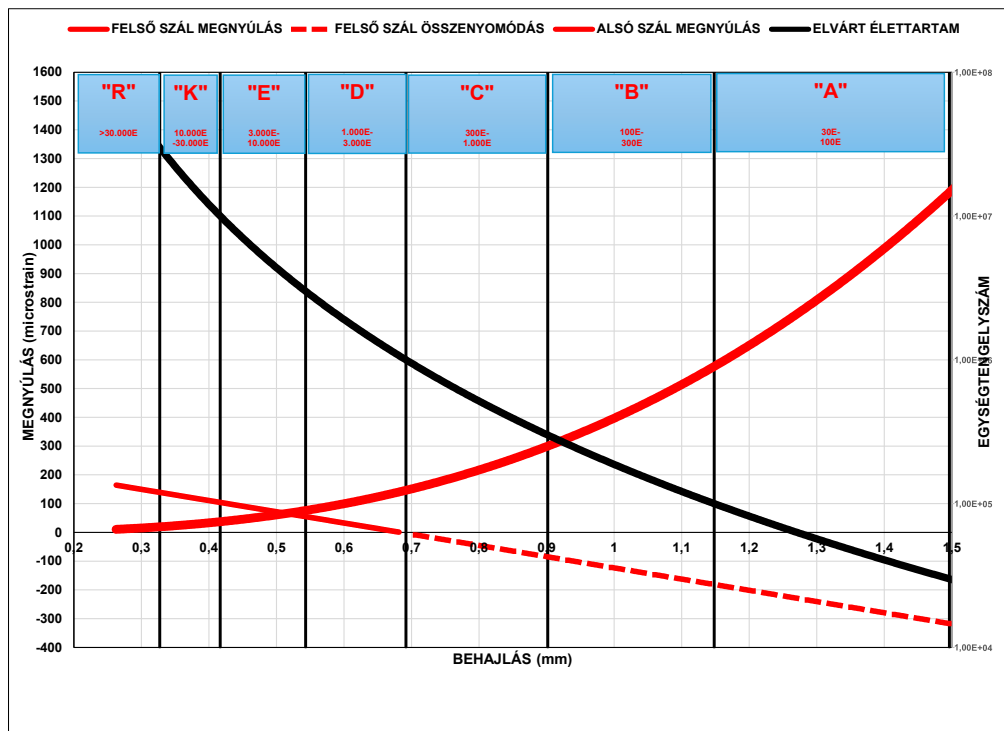
Az aszfaltrétegek pályaszerkezeteink legfontosabb elemei, viselkedésük alapvetően befolyásolja a közlekedés biztonságát, kényelmét és gazdaságosságát; ezért fontos, hogy a használat során bekövetkező képességváltozásokról a közútkezelőknek releváns információi legyenek, ezeket az FWD technológia szolgáltatni tudja.

3.3.1. ASZFALTRÉTEGEK IGÉNYBEVÉTELEI

Az aszfaltok igénybevételén itt a pályaszerkezet-méretezés használatos eljárásaiban számolt, továbbá figyelembe vehető igénybevételeket értjük.

3.3.1.1. Igénybevétel a járműforgalomból

A méretezési eljárások alapvetően a járműterhelések által kiváltott alakváltozásokon alapulnak, az aszfaltok esetében ezek **megnyúlások**, amiket a többrétegű rendszerek elméletével tudunk számolni. A 17. ábrán az aszfaltréteg alsó, illetve felső szálában keletkező megnyúlások láthatók a korábbiakban már használt diagramon.



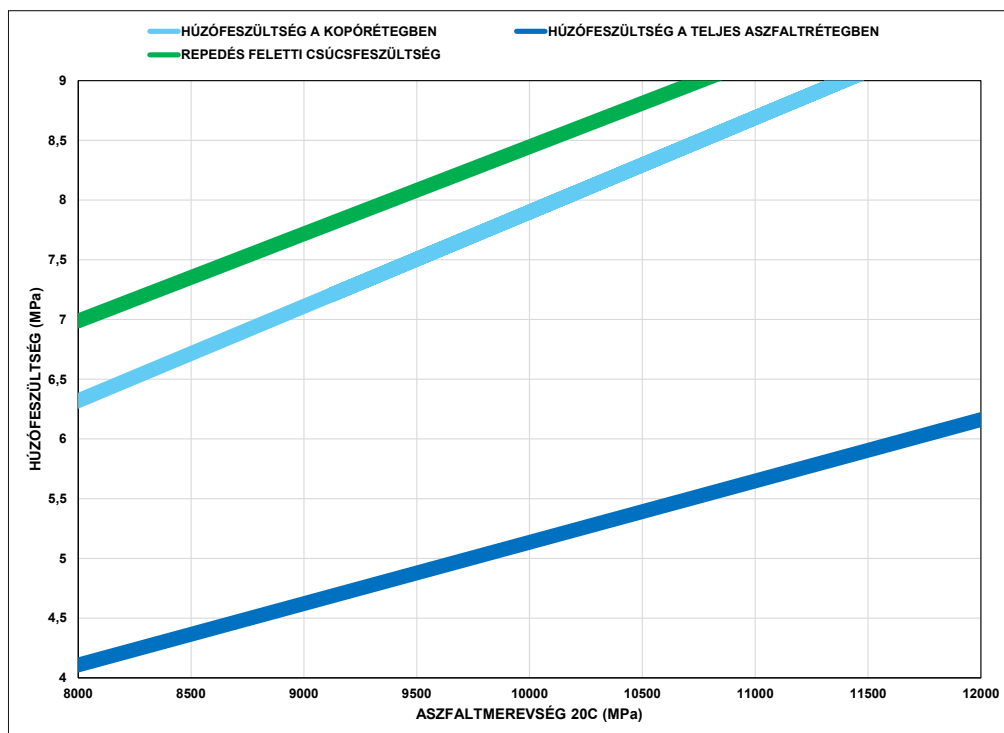
17. ábra: Aszfaltréteg alsó/felsőszál igénybevétele járműterhelésből és az elvárt élettartam.

3.3.1.2. Meteorológiai igénybevételek

A meteorológiai igénybevételek alapvetően lehűlésekből és a gátolt alakváltozásból következnek. Háromféle igénybevétel létezik:

- a kopórétegben jellemzően a fagyponthoz közeli értékekig terjedő lehűlések indukálnak húzófeszültségeket, ezekre nagyon gyakran a kerékterhelések szélein keletkező húzófeszültségek ráhalmozódnak,
- a teljes aszfaltszerkezetben, elsősorban hidraulikus alaprétegek esetében, az erősen eltérő hőtechnikai tulajdonságok miatt indukálódnak húzófeszültségek,
- végül, a szükségképpen megrepedő, hidraulikus alaprétegek repedései fölött keletkeznek csúcsfeszültségek (ezek az előző pontban tárgyalt feszültségekkel együtt keletkeznek).

Mindhárom feszültségérték számítható, bár a sok független változó miatt, a számítás elég bonyolult. Mivel az aszfalt merevsége minden számítási eljárásban szerepel, az igénybevételeket annak függvényében láthatjuk a 18. ábrán, az értékek jó tájékoztató értékeknek tekinthetők.



18. ábra: Aszfaltréteg meteorológiai hatásból keletkező igénybevételei.

3.3.2. ASZFALTRÉTEGEK KÉPESSÉGEI

A pályaszerkezeti rétegek közül a mérnököket messze az aszfalt érdekli legjobban. A meglévő pályaszerkezetek esetében – ne felejtsük, hogy az FWD technológiáról beszélünk – a többrétegű, rugalmas teherhordó szerkezetben a fontos képességek a következők:

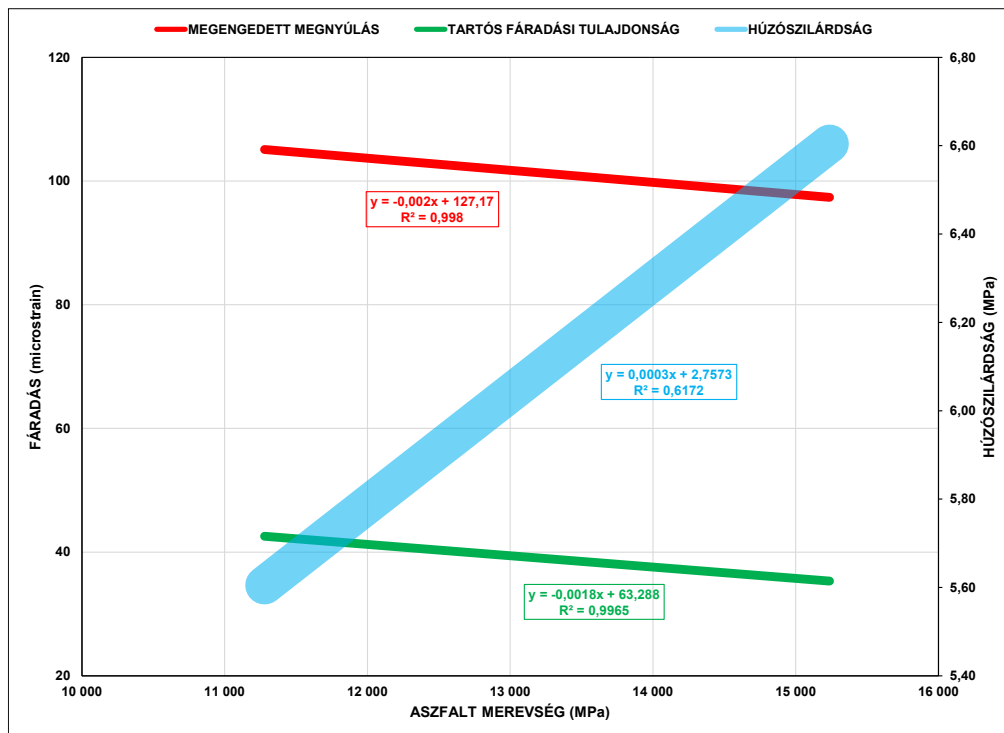
- **aszfaltmerevség**, ami a pályaszerkezeti alakváltozások korlátozásában fontos,
- **aszfalt fáradási** képesség, ami az ismételt járműterhelésekkel szembeni repedésmentességet biztosítja,
- **aszfalthúzószilárdság**, ami a főleg meteorológiai hatásokból keletkező statikus jellegű igénybevételekkel szembeni ellenállást biztosítja,
- **tartós** fáradási képesség az a határérték, amelynél **kisebb** megnyúlások esetében, a fáradási folyamat lényegében megáll.

Az ismertett igénybevételekhez ezek a képességek kapcsolhatók. Ezek közül a **merevség** a visszaszámolással meghatározható. A meglévő szerkezetek vizsgálatokor tanulmányozásra javasolhatók a következő irodalmakban ismertett számítási módszerek:

- az aszfalt fáradására [18],
- az aszfalt húzószilárdságára [19],
- a tartós fáradási képességre [20].

A választott eljárások az asfaltmerevségen kívül a VFA (hézagkitöltöttség) értékét használják; ez vagy az építési iratokból rendelkezésre áll, vagy pedig viszonylag egyszerű aszfaltvizsgálatokkal meghatározható.

Nagyobb (kb. 6 millió tonna aszfaltmennyiséget képviselő) adatgyűjtésből számítottunk **reprezentatívnak** tekinthető VFA értékeket, a 19. ábrán tanulmányozhatóan, ezzel állapítottunk meg aszfaltképeességeket. A 19. ábrán látható értékek a valós tendenciákkal egyeznek; szerkezeti rétegekhez jó tájékoztató értéknek tekinthetők.



19. ábra: Aszfaltképeségek függése a rétegmerevségtől.

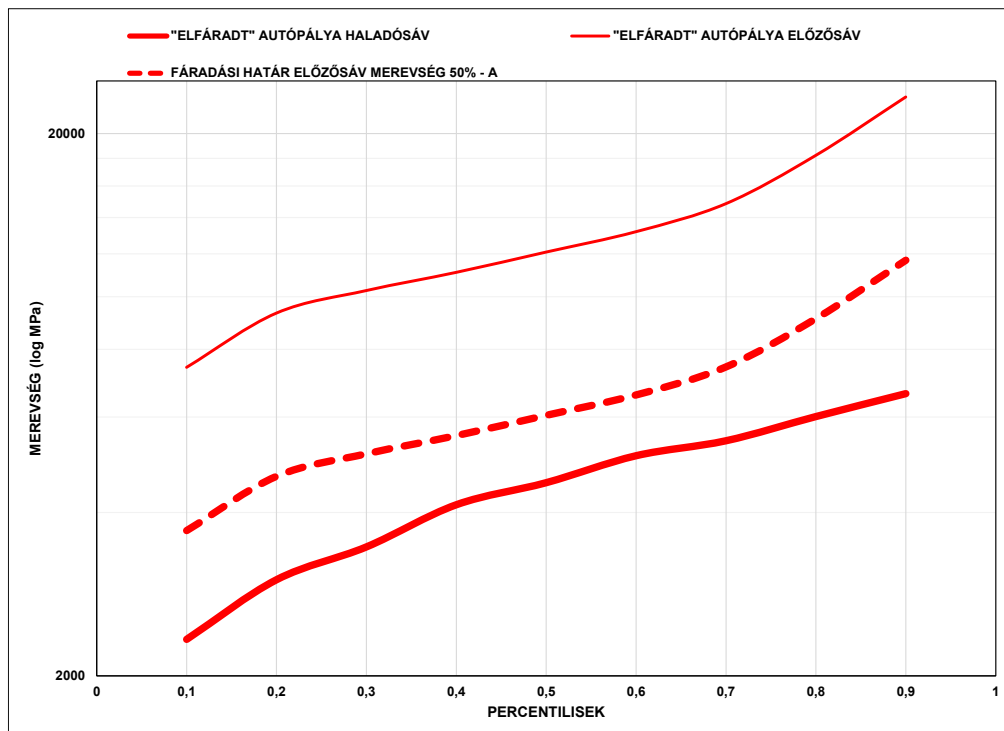
3.3.3. ASZFALTRÉTEGEK TOVÁBBHASZNÁLHATÓSÁGA

Itt ki kell emelni a **réteg** szót, az aszfalt anyagának újrahasznosíthatósága evidencia.

Az (aszfalt)réteg alkalmasságának nagyon sok szempontja szerepel a [2] alatti gyűjteményben, ezek külön vizsgálat alapján lehetnek a továbbhasználhatóság szempontjából jelentősek.

Az FWD technológia segítségével most vizsgáljuk meg a szemcsés és a hidraulikus rétegnél is elemzett autópályaszakasz aszfaltját. Teherhordó szerkezeti szempontból, mindenféle átalakítás nélkül, FWD technológiával vizsgálható módon, az aszfaltréteg **merevsége** lehet perdöntő.

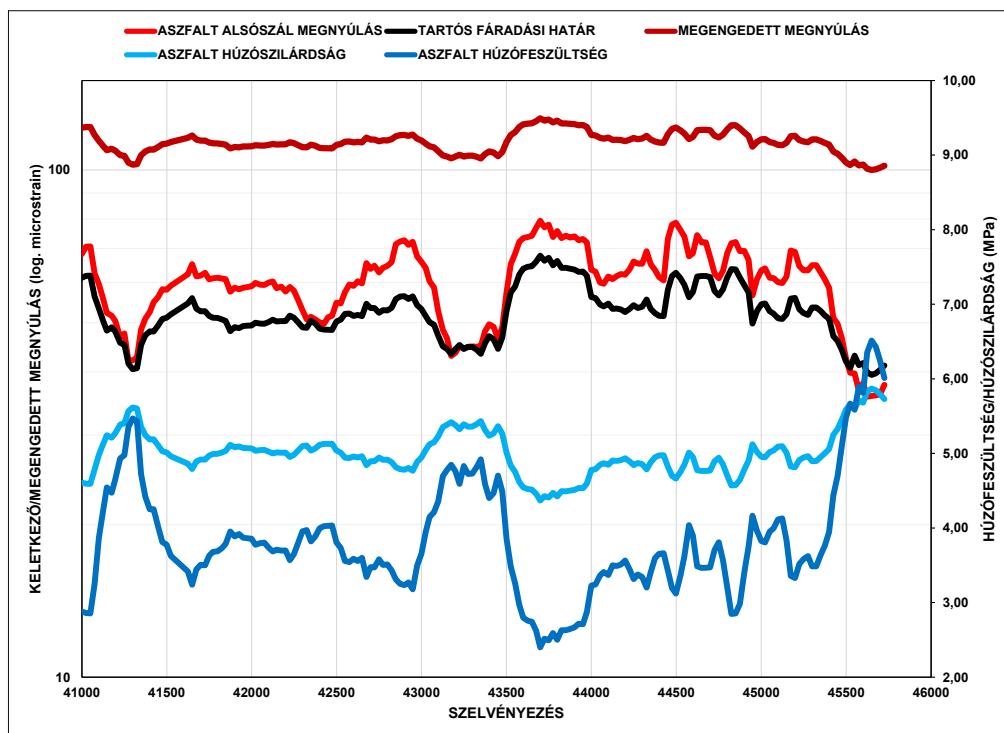
Konvenciónak ismerik, de [21] szerint **megalapozott kutatások** mondják ki, hogy az aszfalt fáradás szempontjából tönkrement, ha a merevsége az eredeti merevség 50%-ára csökken. Ezt, az FWD technológiával úgy lehet (a biztonság javára való közelítéssel) megállapítani, hogy terhelt és terheletlen felületen (pl. haladásáv/előzősáv, keréknyom/keréknyomok között) hajtjuk a vizsgálatot végre.



20. ábra: „Elfáradt” autópályaszakasz előző- és haladósávján az aszfaltréteg merevségeinek percentilisei.

A fentieket vizsgáljuk meg egy feldolgozás segítségével. Jól látható, hogy a haladósáv merevség percentilisei érdemben kisebbek, mint az – elvileg csak minimális forgalommal terhelt – előzősáv merevségek 50%-a. Megjegyzendő, hogy a forgalommal terhelt/nem terhelt sávok aszfaltrétegét anyag, felépítés és megvalósítási idő szempontjából azonosnak tételezzük fel. Ez a módszer tehát alkalmas a döntés megalapozására; a haladósáv aszfaltrétegét ebből a szempontból **fáradtnak** lehet tekinteni, változatlan állapotban nem használható. Az előzősáv esetében ez a kritérium megfelelőnek mondható, de az FED technológia segítségével további, a döntést megalapozó elemzés is végrehajtható.

A 19. ábrán bemutattuk az aszfalt képességeit, határozzuk meg ezeket az előzősávra. A 21. ábrán az aszfalt tartós fáradási képességét és a húzószilárdságát tüntettük fel, és mindkettőhöz a hozzá rendelhető igénybevétel értékét is számoltuk (a 17. és a 18. ábrának megfelelően, a konkrét forgalmi sáv aszfaltmerevségével, illetve a mért D0-D300 értékek felhasználásával). A meglévő réteg merevsége kielégítő, így a merevség ismeretében számítható, fáradási és húzószilárdsági képességei valósak. A tartós fáradási képesség és a számított aszfaltnyúlás értékek nagyon közel vannak egymáshoz, azaz feltehető, hogy a rétegnek – a forgalmi terhelés és a felújító technológia függvényében – érdemi fáradási képessége van. A számított megengedett megnyúlás érték, konkrét tervezés esetében, aszfaltvizsgálatokkal ellenőrizendő, de korrekt becslés az is, ha a fáradási tulajdonságot a két számolt érték közé vesszük fel.



21. ábra: Az előzősáv igénybevételei és az ahhoz kapcsolódó képességei.

A húzószilárdsági képességnél figyelembe veendő, hogy a réteg a **csúcshúzószilárdság** (az alapréteg repedései fölött) helyeken valószínűleg már elrepedt, viszont a teljes rétegben keletkező aszfalthúzószilárdság felvételére nagyon jó eséllyel alkalmas.

Ez a rövid elemzés mutatja, hogy a behajlásértékek birtokában felújítási feladathoz meglepően sok kiinduló információ nyerhető, amivel a feladat gazdaságossága jelentősen javulhat.

4. A NAGYKÉP RÉSZLETEI

A 2. fejezetben vizsgált, nagyság szerint sorba rakott rétegmerevségek számos hasznos információval szolgáltattak; ezek egy részére az előző fejezetben kitértünk.

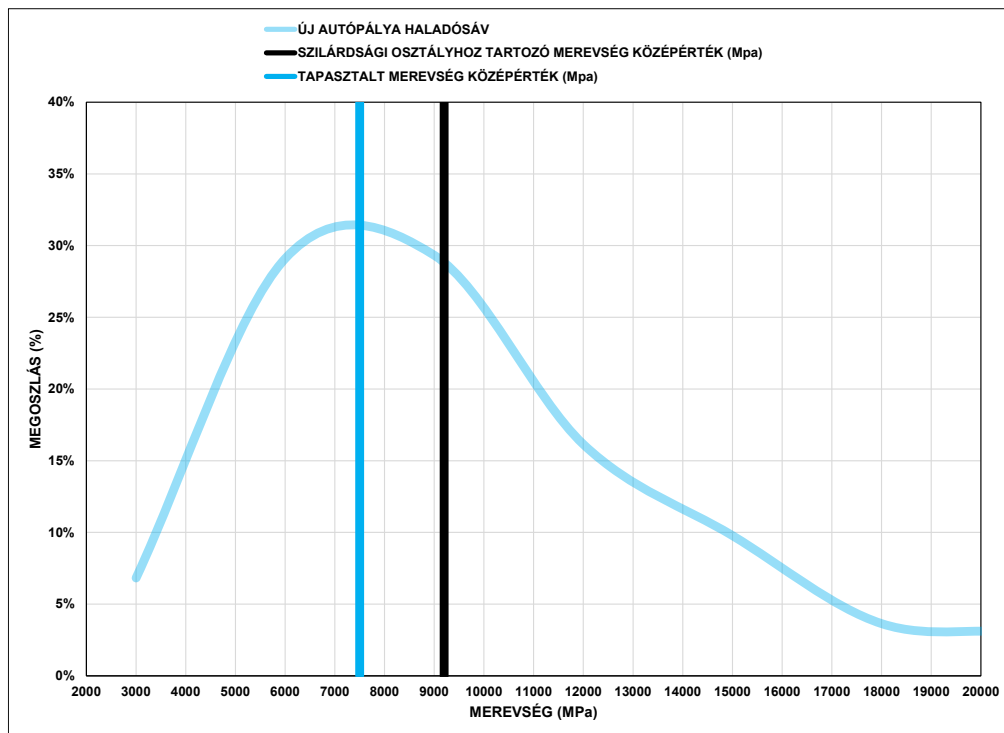
4.1. ÚJ ÁLLAPOTÚ CEMENTSTABILIZÁCIÓ MEREVSÉGÉNEK „ÜZENETE”

A 3. ábrán látható, új állapotú gyorsforgalmi szakasznál a megállapításokban szó volt a cementstabilizáció merevségének a **tervezett** állapothoz képest lévő alacsonyabb értékéről. Vizsgáljuk meg kicsit részletesebben a kérdést.

A tervezett merevséget [15] alapján a 28 napos előírt nyomószilárdságból lehet számítani (gyakorlatilag függvényyszerű összefüggéssel), és figyelembe kell venni, hogy a behajlásmérés időpontjában a szilárdulás még viszonylag gyors, a megállapítást ennek megfelelően kell értelmezni.

A 22. ábrán ábrázoltuk a tapasztalati sűrűségfüggvényt, a középértéket és a minősítő szilárdságból számított merevséget; jól látható, hogy a halmaz jelentős része ez alatt helyezkedik el.

Egyszerű – és itt nem részletezett – számítással megállapítható, hogy a tényleges nyomószilárdság kb. 1 MPa értékkel kisebb, ez pedig majdnem egy osztállyal alacsonyabb kategória, ami a tervezettnél alacsonyabb cementadagolást sejtet. Ez felveti az FWD technológia minőségellenőrzési alkalmazásának lehetőségét.



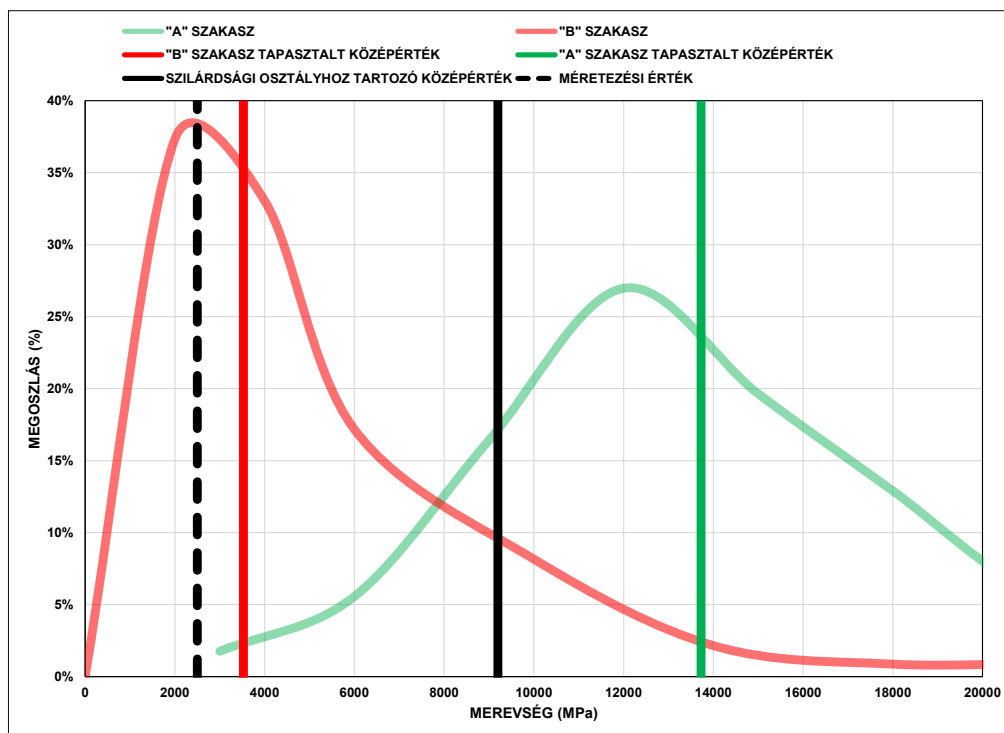
22. ábra: Cementstabilizáció merevségének tapasztalati sűrűségfüggvénye.

4.2. AZ ÉLETÜK „DELÉN” JÁRÓ SZAKASZOK CEMENTSTABILIZÁCIÓI

Az 5. ábrán bemutatott rétegmerevségek a szerkezeti szám szerint is két, egymástól nagymértékben különböző részt mutatnak. A 22. ábrához hasonlóan, kiszerkesztettük a haladósávok tapasztalati sűrűségfüggvényeit, a tartalmában lényegében azonos ábra a két szakasz különbözőségét még világosabban mutatja. Az „A” szakasz középértéke jelentősen meghaladja a szilárdsági osztályból levezethető merevségértéket, és gyakorlatilag a teljes görbe alatti terület a méretezési merevségérték fölött helyezkedik el.

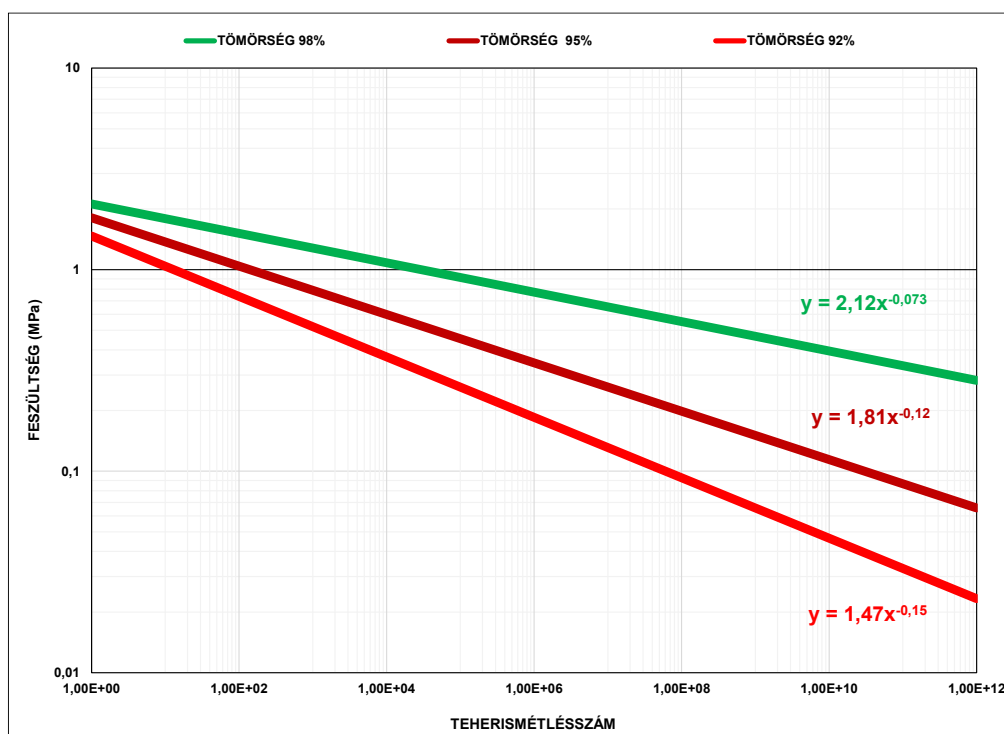
Említettük, hogy a szakaszon a tervezési forgalom másfélszerese lefutott, azaz valamilyen mértékben, de fáradt a réteg, viszont bizonyosan jelen volt (van) a továbbbszilárdulás is, ezek eredőjeként teljesítőképesebb réteget mutatnak az eredmények. A „B” szakasz a szerkezeti szám által mutatott, még éppen megfelelő érték a cementstabilizáció nem megfelelő viselkedésének eredménye (a szakasz felépítése és forgalma azonos az „A” szakaszéval). A tapasztalati középérték messze elmarad a szilárdsági osztályból várható merevségtől és az eredmények jelentős része a méretezési érték alatti. A különbség okára vonatkozóan az FWD mérésekből nem egyszerű következtetni, de a szerzőnek van „bennfentes” információja.

Ez pedig arról szól, hogy a megbízó nevében is eljáró szervezet a reflexiós repedések elleni küzdelem jegyében korlátozta a beépítésnél elérendő tömörséget. Az „A” szakasz építésvezetőjét hidegen hagyta az előírás és a megszokott eljárást követte, míg a „B” szakasz esetében az építésvezető nem ezt tette, az eredmény látható.



23. ábra: Cementstabilizáció merevségek sűrűségfüggvényei.

A 24. ábrán francia kutatás eredményét látjuk, jól felismerhető, hogy a tömörség csökkenésével mind a minősítő szilárdság, mind pedig a fáradási egyenes hajlása rossz irányba változik.



24. ábra: Különböző tömörségű cementstabilizációk fáradási vonalai.

A szakmailag teljesen hibás beavatkozás az építési folyamatba pusztító eredménnyel járt, és az egyébként szükséges felújítás jelentős többletköltségeket jelentett.

5. BEFEJEZŐ GONDOLATOK

A háromrészes cikksorozat végén az olvasó engedjen meg némi személyes gondolatot. Amióta a szerző a behajlásmérést megismerte, elég sok munkakörben, különböző helyzetekben használta, alkalmazta. Ehhez pedig olyan indíttatás kellett, amit a szerző minden, a szakmáját szerető mérnöknek kíván. A 23. ábrán látható a cementstabilizációra vonatkozó méretezési merevségérték (fekete szaggatott vonal). Ez dr. Boromisza Tibor vizsgálatának eredménye, ahol viszonylag új állapotú pályaszerkezet-korrektúra miatti elbontása adott – még Benkelmann gerendával való – mérésekre lehetőséget. A méréseket a teljes pályaszerkezeten, majd a bontás során minden rétegen hajtották végre és ezekből az adatokból lehetőség nyílt (Odemark eljárásával) a rétegmerevségek meghatározására. Az így nyert cementstabilizáció merevség került be aztán a méretezési utasításba [15]. Az értéket többen – így köztük a szerző is – alacsonynak tartották, és többször nyílt lehetőség „jóízű” szakmai vitára dr. Boromisza Tiborral. A szakmai részen túl a szerzőnek a vitapartner nagy tudása, türelme és következetessége adott olyan élményeket, ami a kérdésterület minél nagyobb megismerésére sarkallta. Ez az, amit csak köszönni lehet Neki, és ha ezzel valamit hozzá tudott a szerző tenni szakmánk problémáinak megoldásához, azért elsősorban dr. Boromisza Tibornak jár köszönet.

6. IRODALOMJEGYZÉK

- [1]: Primusz, P. & Tóth, Cs.: Virtuális inerciapont módszeren alapuló útpályaszerkezet diagnosztikai eljárás validálása. Útügyi Lapok, 11. évf. 18. szám, 2023, <https://doi.org/10.36246/UL.2023.2.05>
- [2]: Országos Közúti Adatbank: <https://internet.kozut.hu/kozerdeku-adatok/orszagos-kozuti-adatbank/az-allami-kozuthalozatrol>
- [3]: ÚT 2-1.202 [e-UT 06.03.13] Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezése és megerősítése
- [4]: Park, H.M. 2001. Use of Falling Weight Deflectometer multi-load level data for pavement strength estimation. PhD dissertation, North Carolina State University.
- [5]: Van, Gorp, C.A.P.M. & Wennink, P.M. 1997. Design, structural evaluation an overlay design of rural roads (in Dutch) KOAC – WMD consultants; Apeldoorn.
- [6]: Karoliny, M. 2013. Közlekedési pályák teherbíró-képessége – Az alaprétegek hatásai. Útügyi Lapok 1. évfolyam, 2. szám.
- [7]: KPM (Közlekedés- és Postaügyi Minisztérium): Hajlékony Útpályaszerkezetek Méretezési Utasítása (HUMU), 1971.
- [8]: Fellin, W.: Hypoplasticity for beginners. <https://www2.uibk.ac.at/downloads/igt/publications>
- [9]: Kolymbas, D. 2022. A Primer on Theoretical Soil Mechanics. 55 p. ISBN:9781009210331 Published online by Cambridge University Press.
- [10]: Herle, I. 1997. Hypoplastizität und Granulometrie einfacher Korngerüste. PhD Dissertation Universität Karlsruhe.
- [11]: Rondon, H. A. et al. 2007. Hypoplastic material constants for a well-graded granular material (UGM) for base and subbase layers of flexible pavements. Acta Geotechnica, Vol. 1, No. 2, pp. 113-126.
- [12]: Nyomvonal 2008 Mérnökiroda Kft. 2016. Közlekedésfejlesztési Koordinációs Központ Alternatív méretezési eljárásokra vonatkozó tanulmány és az alternatív módszerek bevezetését segítő irányelv, (Kézirat).
- [13]: Vámos, M. & Szendefy, J. 2024. Magyar német típus-pályaszerkezetek várható süllyedésének összehasonlítása Útügyi Lapok 12. évf. 20. szám. <https://doi.org/10.36246/UL.2024.2.06>
- [14]: Gáspár L. & Keleti, I. et al. 2010. Az M1-es autópálya Törökbálint és Tata közötti szakasza kapacitásbővítő rekonstrukciójához készült tervezési diszpozíció. Közlekedésépítési Szemle 60. évf. 6. szám, pp. 15-27.
- [15]: Nemesdy, E. 1992. Az új magyar típus – útpályaszerkezetek mechanikai méretezésének hátttere. Közlekedés és Mélyépítéstudományi Szemle 62. évf. 8. szám.
- [16]: AUSTRROADS. 2004. Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design Sydney.
- [17]: de Bondt, A. H. 1999. Anti-reflective cracking design of (reinforced) asphaltic overlays. PhD dissertation; Delft University of Technology, Delft.
- [18]: Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement structures, Draft Part 2-Design Inputs Chapter 2 Material characterisation. ERES Division of ARA, Inc., Champaign, Illinois, 2001.

- [19]: Molenaar, A. A. A., & Li, N. 2014. Prediction of compressive and tensile strength of asphalt concrete. International Journal of Pavement Research and Technology, 7, pp. 324-331. [https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2014.7\(5\).324](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2014.7(5).324)
- [20]: Sullivan, B.W. 2015. Development of a Long Life Design Procedure for Australian Asphalt Pavements. PhD dissertation, Curtin University.
- [21]: Pellinen, T. K., Christensen, D.W., Rowe, G. M. 2004. Sharrock M.: Fatigue-Transfer Functions, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board 1896(1), pp. 77-87.



Légköri korrózióálló acél sókorróziós vizsgálata hídszerkezetnél

Megyeri Anna Boglárka¹, Kővári Ákos¹

¹UNITEF'83 Zrt.

E-mail: kovariakos1@gmail.com, megyerib@unitef.hu

DOI: [10.36246/UL.2025.1.05](https://doi.org/10.36246/UL.2025.1.05)

KIVONAT

A környezetünket terhelő károsanyag kibocsátás csökkentés céljából hídépítés tekintetében kiemelt fontosságú az anyagválasztás. Acélszerkezetek esetében előnyös az időjárásálló acélok alkalmazása, mivel a szerkezet korrózióvédelmével (bevonatok), valamint ezek kivitelezésével, gyártásával és karbantartásával járó karbonlábnyom kiküszöbölhető. Magyarországon ezen hidak alkalmazása csak most kezdődik. Az UNITEF'83 Zrt.-nél már számos alkalommal javasoltuk a beruházóknak ilyen acélok alkalmazását. Tanulmány- engedélyezési- és kiviteli terveket is készítettünk már időjárásálló acélok alkalmazásával Magyarországon. A megrendelő, üzemeltetők részéről rendszeres kérdésként vetődik fel az acélanyag sókorróziós viselkedése, ill. az ezzel kapcsolatos gyakorlati tapasztalatok. Jelen cikkben parametrikus végelelemes modell segítségével vizsgáljuk a korrózió hídszerkezetekre történő hatását szakirodalomban található laboratóriumi és helyszíni mérések alapján egy öszvér hídgerenda esetén.

Kulcsszavak: időjárásálló acél, hídépítés, sókorrózió, fenntarthatóság

ABSTRACT

The choice of materials for bridge construction is a priority in order to reduce emissions to the environment. In the case of steel structures, the use of weathering steels is preferable, as the carbon footprint of the structure can be eliminated through corrosion protection (coatings) and their design, manufacture and maintenance. The use of these bridges is only just beginning in Hungary. At UNITEF'83 Zrt. we have already recommended the use of such steels to investors on several occasions. We have also prepared study-, permit- and construction designs using weather-resistant steels in Hungary. Customers and operators regularly raise the question of the salt corrosion behaviour of the steel material and the practical experience with it. In the present paper, the effects of corrosion on bridge structures are investigated using a parametric finite element model based on laboratory and field measurements of a mule bridge girder.

Megyeri Anna Boglárka

Megyeri Anna Boglárka (2001) MSc okl. szerkezet-építőmérnök (BME Építőmérnöki kar, Hidak és Szerkezetek Tanszék, 2025), statikus gyakornok (UNITEF'83 Műszaki Tervező és Fejlesztő Zrt.) Érdeklődési területei: hidak erőtanai modellezése, VEM modellezés, vasbeton- és acélszerkezetek, a hídépítés hatása a klímaváltozás folyamataira. A 2024. évi „Minden építés alapja – Betonpályázat” I. díjasa anyag és technológia kategóriában.

Kővári Ákos

Kővári Ákos (1987) MSc okl. szerkezet-építőmérnök (BME Építőmérnöki kar, 2011) hídépítési irányító tervező 2020-tól (UNITEF'83 Műszaki Tervező és Fejlesztő Zrt.) Érdeklődési területei: hidak és szerkezetek tervezése, környezettudatos híd- és szerkezetépítés, vasbeton- és acélszerkezetek, szabványosítási kérdések. Az év fiatal mérnöke (2017) Construsoft BIM Awards (2019) Közelekdési Innovációs Díj (2023) pályamunka címe: A „Csökkentett CO₂ kibocsátású kerékpárhidak fejlesztése”.

1. BEVEZETÉS

Az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére világszerte egyre nagyobb figyelmet fordítanak. Az építőipar jelentős részese a CO₂ kibocsátásnak, így ezen a területen is intézkedések szükségesek. Hidak esetében a fenntarthatóság szempontjából kulcsfontosságú a felhasznált építőanyag megválasztása. Az egyik ígéretes szerkezeti anyag a korrózióálló acél. Magyarországon azonban bizonyos fenntartások merülnek fel ezen hidak alkalmazásával kapcsolatban. Ismeretes, hogy az időjárásálló acél légköri nedvesség hatására megfelelő korrózióvédelmet biztosít. A hídüzemeltetők részéről kérdésként merül fel, hogy kloridion jelenléte a légköri nedvességben milyen hatással van az időjárásálló acélok tulajdonságaira. Elsősorban az útszóró só jelenléte várható hídszerkezetek környezetében. A korrózió a szelvény keresztmetszeti fogyásával és egyenetlen felület kialakulásával jár, ami nagy hatással lehet az anyag mechanikai tulajdonságaira, ezért fontos számításba venni a szerkezetek méretezésekor.

2. SÓKORRÓZIÓS ESETTANULMÁNYOK

Az időjárásálló acél korróziója és a levegő kloridtartalma közötti összefüggést több külföldi tanulmány során is vizsgálták. Készültek helyszíni, hosszú távú mérések és gyorsított korróziós vizsgálatok is.

2.1 CSEHORSZÁGI MÉRÉSEK

Csehország Ostrava városában több éves, helyszíni kísérlet során három, már meglévő híd gerendáira helyeztek ki S355J2W anyagú, 150×100×1.5 mm³ méretű, időjárásálló acél mintadarabokat. [1] [2] B1 híd egy télen sózott, nagy forgalmú autópálya felett ível át és kialakítása alagútszerű, míg B2 híd B1 hídtól 200 méterre vasút felett vezet át. B3 híd a B1 híddal hasonlóan ugyanazon autópálya felett vezet át, kialakítása azonban nem alagútszerű, nagyobb hossz/szélesség aránnyal rendelkezik.

A mérések során külső és belső hídgerendák gerincére és övére helyeztek ki S355J2W időjárásálló acél mintadarabokat. A lerakódó klorid mennyiséget két szabványos (EN ISO 9225) módszerrel, a „wet candle” és a „dry plate” módszerrel mérték. A „dry plate” módszer előnye, hogy külön tudták vizsgálni a függőleges és a vízszintes felületre rakódó klór mennyiséget.

Egy év eltelte után megmérték többek között a korróziós veszteségeket a próbatesteken, továbbá „Scotch-tape” módszerrel lenyomatot készítettek a próbatestek felületéről és megvizsgálták a patinaréteg jellemzőit is: a rozsdás részek átmérőjét, eloszlását. Az 1 mm-nél kisebb, egyenletes eloszlású rozsdás részek megfelelően kialakult patinarétegre utalnak, az 5 mm-nél nagyobbak tipikusan a nem megfelelően kialakult, nem jól védő patinára utalnak.

A mérések eredményei jól mutatják, hogy a korróziós folyamat alakulásában nagy szerepet játszik a vizsgált lemez irányultsága: a vízszintes felületeken lényegesen nagyobb (3-4-szer) klorid mennyiség rakódik le, ezért 2-3-szor nagyobb a korróziós veszteség is, és mélyebbek a kialakult korróziós gödrök, mint a függőleges felületeken.

A felületek irányultsága mellett befolyásolta a kísérlet eredményeit az elhelyezkedés is: a külső gerendák felületén a patina réteg megfelelően alakult ki, homogén és egyenletes volt, míg a belső gerendákon egyenetlenebb, több helyen leválásra hajlamos réteg volt megfigyelhető, annak ellenére, hogy a külső gerendákon mért klorid tartalom nagyobb volt a belső gerendákon mérténél. Ez azzal magyarázható, hogy a külső gerendákat jobban éri a sós víz felferődése az autópályáról, de utána hamarabb tisztulnak meg eső és szél hatására, míg a belső gerendákat hiába éri kisebb mennyiségű klór, nem tudnak megfelelően tisztulni, így rosszabb állapotú patina réteg alakul ki felületükön.

A patina réteg kialakulását befolyásolja a híd elhelyezkedése és kialakítása is, amit a három hídon mért eredmények közti eltérések bizonyítják. Mivel a B2 híd vasút felett halad át az autópálya felett áthaladó B1 híddal ellentétben és kialakítása is kedvezőbb az alagútszerű, B1 híddal képest, a patina

réteg kialakulása is jobban zajlódt le, kevesebb klorid rakódott le a hídra, ezáltal a korróziós veszteségek is kisebbek voltak. A kialakítás szerepét bizonyítja továbbá, hogy a B3 hídon mért lerakódott klorid mennyisége jóval kisebb volt, akár harmada a B1 hídon lerakódott mennyiségnek, annak ellenére, hogy ugyanazon autópálya felett vezetnek át. Ennek az az oka, hogy a B1 híd alagútszerűen kialakított, míg a B3 híd előnyösebb kialakítású.

2.2 KÍNAI MÉRÉSEK

Kínában egy tanulmány [3] során két időjárásálló acéltípuson végeztek vizsgálatokat, a Q345CNH Kínában gyakori (folyáshatára 345 MPa) és a HPS 70 W (folyáshatára 485 MPa) Egyesült Államokban elterjedt acélokon. A kísérlet két részből állt: először ciklikus gyorsított korróziós vizsgálattal figyelték a korrózió alakulását, majd a korrodált elemeket fáradási vizsgálatnak vetették alá. A korrózió két típusát lehet elkülöníteni: a felület mentén egyenletesen alakuló korróziót és a gödrös korróziót. Utóbbinak fáradás szempontjából van nagyobb jelentősége, ugyanis a fáradási repedések a korróziós gödrökből indulnak ki, ahol vékonyabb az anyag. A korróziós vizsgálat körülményei megfeleltek Qionghai (C3 korróziós osztályú) tengerpart közeli város klímájának¹, ahol korábban már készültek hosszú távú korróziós vizsgálatok, így a gyorsított korróziós vizsgálat eredményeit össze lehetett hasonlítani valós körülmények során nyert adatokkal. A gyorsított korróziós vizsgálat és a hosszú távú korróziós vizsgálat között a korróziós veszteség teremt kapcsolatot, aminek köszönhetően a laboratóriumi vizsgálatok megfeleltethetők helyszíni, valós vizsgálatoknak megfelelő korróziós modellel és adatokkal.

A gyorsított korróziós vizsgálat során 30x60x12 mm méretű acéllemezeket alkalmaztak és a kísérletet az ISO 16539 szabványnak megfelelően hajtották végre.

A bizonyos ciklusszámoknál tömegben mért korróziós veszteségeket az (1) egyenlet alapján számították át korróziós vastagsággá:

$$C = \frac{W}{\rho \cdot \text{area}} \cdot 1000 [\mu\text{m}] \quad (1)$$

Ahol:

- $C [\mu\text{m}]$ a korróziós veszteség vastagsága
- $W [g]$ a korróziós veszteség tömegben
- $\text{area} [\text{mm}^2]$ a korrózióknak kitett felület
- $\rho [g / \text{mm}^3]$ az acél sűrűsége

A mérések során megfigyelhető volt, hogy a korróziós folyamat lelassul miután elkezdődik a korróziós réteg kialakulása, vagyis a korróziósveszteség időfüggő. A korróziós folyamat leírására több modell létezik. Mivel a korrózió mértéke kialakulása elején jelentősen különbözik a hosszabb idő elteltével jelentkező korrózió mértékétől, célszerű az alábbi, nem lineáris modell (2. egyenlet) alkalmazása.

$$C = A \cdot t^b \quad (2)$$

Ahol:

- $C [mm]$ a korróziós veszteség
- A a korrózió mértéke az első évben [mm]
- t az eltelt idő
- b a korróziós kitevő [-]

¹ Több tanulmány állapította meg, hogy a sózásból származó korrózió hasonló a tenger közelében épült hidaknál megfigyelt korrózió mértékéhez [1].

Minél kisebb a korróziós kitevő (b), annál jobb a korrózióállósága az anyagnak. A légköri korrózióálló acélnek kb. 33%-kal kisebb a korróziós kitevő értéke, mint a szokványos szerkezeti acélnek. A kísérlet során a 2. egyenlet változóit az idő függvényében ábrázolt korróziós veszteségekre a legkisebb négyzetek módszerével illesztett görbe határozta meg. Az így meghatározott korróziós modellek a két acéltípus esetén (ahol t a korróziós ciklus száma):

$$\bullet \text{ HPS70W: } C [\mu\text{m}] = 42,0 \cdot t^{0.3406} \quad (3)$$

$$\bullet \text{ Q345CNH: } C [\mu\text{m}] = 32,9 \cdot t^{0.4013} \quad (4)$$

A hosszú távú, valós körülmények között lejátszódó természetes korróziós folyamat is leírható a 2. egyenlet segítségével, ezért, ha abból indulunk ki, hogy a korróziós veszteségeknek (C) meg kell egyezniük, a természetes és a gyorsított korróziós folyamat között az alábbi összefüggés áll fent:

$$T = \left(\frac{A_n}{A_a}\right)^{1/b_a} \cdot t^{b_n/b_a} \quad (5)$$

Ahol az „ n ” paraméter a természetes korróziós folyamatra, az „ a ” paraméter a gyorsított korróziós vizsgálatra utal, „ T ” a ciklusszámot, „ t ” a természetes korróziós folyamat idejét, A a korrózió mértékét (első évben) jelenti. Jelen kísérletben a gyorsított korróziós vizsgálat modellje jól közelíti a tenger közelében lévő Qionghai városban korábbi mérések alapján meghatározott korróziós modellt.

Az egyenletes korrózió mellett a rozsdaréteg eltávolítása után megvizsgálták a korróziós gödrök alakulását is. A ciklusszám növekedésével a korróziós gödrök sűrűsége és mérete is nő. A gödrös korrózió mélysége és a korróziós folyamat ideje közötti összefüggés leírására az alábbi összefüggés alkalmazható:

$$a = \alpha \cdot t^\gamma \quad (6)$$

Ahol:

a a korróziós gödör mélység

α és γ a gödrös korrózióhoz tartozó kitevők ($\gamma = 1/3$ acél esetén)

A két acéltípus esetén meghatározott gödrös korrózió modellje:

$$\text{HPS70W: } A [\mu\text{m}] = 89,91 \cdot T^{1/3} \quad (7)$$

$$\text{Q345CNH: } A [\mu\text{m}] = 101,3 \cdot T^{1/3} \quad (8)$$

Ahol:

$A [\mu\text{m}]$ – a maximális korróziós gödör mélység

$T [-]$ – ciklusszám

Jelen esetben egy ciklus megfeleltethető egy eltelt évnek. Látható, hogy idővel a kialakult korróziós gödrök mélysége egyre növekszik, ami kedvezőtlen hatással lehet a fáradásra és a lokális stabilitásra is.

2.3 TOVÁBBI MÉRÉSEK

A jégolvasztó sózás időjárásálló acélra való hatásának vizsgálatára más országokban is végeztek méréseket. Egy 1992-es német kísérletben [4] sózott autópályák vezetőkorlátjára helyeztek időjárásálló acél próbatesteket melyeken öt évig minden évben megmérték a korróziós veszteséget. A próbatestek kétféle anyagból, Resista HRL 37 és COR-TEN B időjárásálló acélból készültek. A tanulmány során az

autópályáktól távolabb is elhelyeztek referencia próbatesteket, melyeket nem ért só. Több tényező hatását vizsgálták a korrózió mértékére: hőmérséklet, relatív páratartalom, éves csapadékmennyiség, éves napsütéses órák száma, valamint az átlagos napi forgalom nagysága. A mérések során azt tapasztalták, hogy a korrózió fogyásának mértékére leginkább a napsütéses órák száma (negatív korreláció) és a relatív páratartalom (pozitív korreláció) volt hatással, míg a hőmérséklet nem igazán befolyásolta a korrózió mértékét. A 7 helyszínen mért korróziós fogyás évenkénti átlagát mutatja a 2. ábra sárga színnel.

Az időjárásálló acél korróziós fogyásának mértékére Finnországban is végeztek méréseket [5] több időjárásálló acélból készült hídnál. Az egyes hidakra COR-TEN B típusú acél próbatesteket helyeztek függőlegesen és a korróziós fogyás mértékét vizsgálták kb. 10 évente 32 éven keresztül 2014-ig. Az egyik vizsgált híd az Itäkeskus gyalogos híd Helsinkiben, ami alatt télen jégolvasztó sózásnak kitett út halad át. Ezen hídra kihelyezett próbatesteken mért korróziós veszteségről 32 év után van adatunk.

A [5] tanulmányban bemutatják egy Dániában végzett mérés eredményeit is, ahol tengeri körülményeknek megfelelő hídon végeztek méréseket a korróziós fogyást illetően. A próbatestek 28 évig voltak kihelyezve és több év mért adatai is rendelkezésünkre állnak. A mérések alapján a híd környezete C3-as korróziós osztályba sorolható az ISO 9223 szabványnak megfelelően, ami megegyezik az útsózásnak kitett hidak belső gerendáinak besorolásával. A mért korróziós fogyásokat és az illesztett korróziós görbéket mutatja az 1. és 2. ábra.

3. KORRÓZIÓ ERŐTANI MODELLEZÉSE

A korrózió előrehaladtával csökken a keresztmetszeti terület és egyenetlen felület alakul ki, amik feszültségkoncentrációhoz és az anyag mechanikai tulajdonságainak romlásához vezetnek. [6] A korrózió mértéke és a mechanikai tulajdonságok romlása közötti összefüggésre több vizsgálatot is végeztek. Az egyik ilyen tanulmány [7] során megfigyelték, hogy 15% alatti korróziós fogyásnál az anyag duktilitása csökkent jelentősen, míg 15% feletti korróziós fogyásnál a duktilitás mellett a folyáshatár és a szakítószilárdság is jelentősen lecsökkent. Esetünkben a korrózió mértéke jóval 15% alatt van, így a duktilitás csökkenésével kell számolnunk, amit a szakadónyúlás csökkentésével veszünk figyelembe a modellezés során.

Ahhoz, hogy kellően pontos végeselemes vizsgálatokat végezzünk, ismernünk kell a korróziós veszteség időbeli alakulását. Az előbbieken bemutatott különböző, sózott körülmények mellett végzett korróziós mérések eredményei alapján felépítünk egy egyenletes és egy gödrös korróziós modellt, amit később a végeselemes modell során fogunk alkalmazni.

A Kínában végzett kísérletek anyagai közül az általunk vizsgált S355W típusú acél anyagtulajdonságaihoz a kísérletben alkalmazott Q345CNH acél tulajdonságai állnak a legközelebb. Az egyenletes korróziós fogyást Qionghai-ban végzett valós korróziós teszt korróziós fogyásának modelljével vesszük figyelembe, ami jól közelítette a Q345CNH acél gyorsított korróziós modelljét. A korróziós fogyás a [3] alapján:

$$C [\mu m] = 32,175 \cdot t^{0.4385} \quad (9)$$

Ahol $C [\mu m]$ a korróziós fogyás, t az eltelt évek száma.

A 2.3 fejezetben bemutatott dániai mérés nem útsózásból eredő korróziós fogyást vizsgált ugyan, hanem tengeri körülményeknek megfelelőt, ami nagyon hasonló az útsózásból eredő korróziós fogyásnak. A dániai mérési eredményekre illesztett korróziós modell:

$$C [\mu m] = 50 \cdot t^{0.33} \quad (10)$$

A mérési eredmények alapján megadtak továbbá egy felső becslést is a korróziós fogyásra:

$$C [\mu m] = 60 \cdot t^{0.5} \quad (11)$$

A kínai és dániai kísérlet alapján felállított egyenletes korrózió modelljeit 0-100 év között az egyes kísérletek alapján a 1. ábra mutatja. Látható, hogy a kínai és a dániai illesztett modell közel állnak egymáshoz.

A 2.3 fejezetben bemutatott német mérés eredményei alapján a korróziós fogyást a 2. ábra sárga vonala szemlélteti. Ezen mérés során a próbatesteket nem hídgerendára, hanem a sózott út vezetőkorlátjára helyezték, amire jóval több só csapódik fel, mint egy hídgerendára, így a hidakon alkalmazott szelvények korróziós fogyását jelentősen túlbecsüli. A 2. ábrán megfigyelhető, hogy a német mérési adatok jól illeszkednek a dániai felülbecsült korróziós modellre. A német mérések és a dániai felülbecsült korróziós modell alapján a korróziós fogyás kb. 2,3-szorosa a kínai és dániai illesztett korróziós modell alapján meghatározott korróziós fogyásnak.

A cseh mérések csak egy éves korróziós fogyásra adnak eredményt. A mérések során külön vizsgálták a külső és belső gerendákon, valamint a vízszintesen és függőlegesen elhelyezett próbatesteken keletkező korróziós fogyást. A vízszintes és függőleges pozíciójú próbatesteken mért fogyások átlaga:

- külső gerendán: 33,625 [μm]
- belső gerendán: 34,05 [μm]

Az átlagok nagyon jól közelítik a kínai mérések egyenletes korróziós modelljéből származó egy éves fogyás mértékét, ami 32,175 [μm].

A finnországi mérésekről csak 32 év után mért adat áll rendelkezésünkre. A mérések során a próbatesteket csak függőlegesen helyezték el és elkülönítették a külső és belső gerendákon mért eredményeket. A 32 év után külső és belső gerendákon mért korróziós fogyás értéke a 2. ábrán látható. A finnországi belső gerendákon mért fogyás 88%-a, a külső gerendákon mért fogyás csak 67%-a a kínai egyenletes korróziós modell értékeinek. Ennek oka többek között az lehet, hogy a finnországi méréseknél függőlegesen helyezték el a próbatesteket és függőleges felületen kisebb fogyás alakul ki, mint vízszintesen.

A gödrös korrózió mértékére csak a cseh és kínai kísérletek során végeztek méréseket, több éves modellt pedig csak a kínai mérések alapján lehet felállítani. A gödrös korrózió modellje a 2.2. bekezdésben bemutatott kínai mérések alapján:

$$A [\mu\text{m}] = 101,3 \cdot T^{1/3} \quad (12)$$

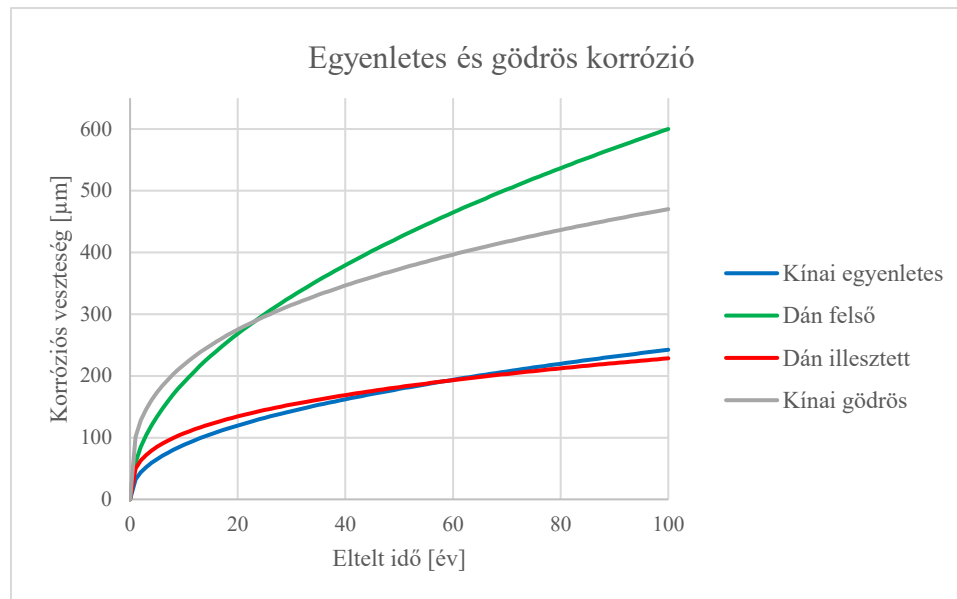
Ahol $A [\mu\text{m}]$ a maximális korróziós gödör mélység, $T [-]$ a ciklusszám, ami jelen esetben megfelel az eltelt évek számának.

Ez a modell a maximális gödörmélység alakulását adja meg az eltelt évek függvényében (lásd: 1. ábra).

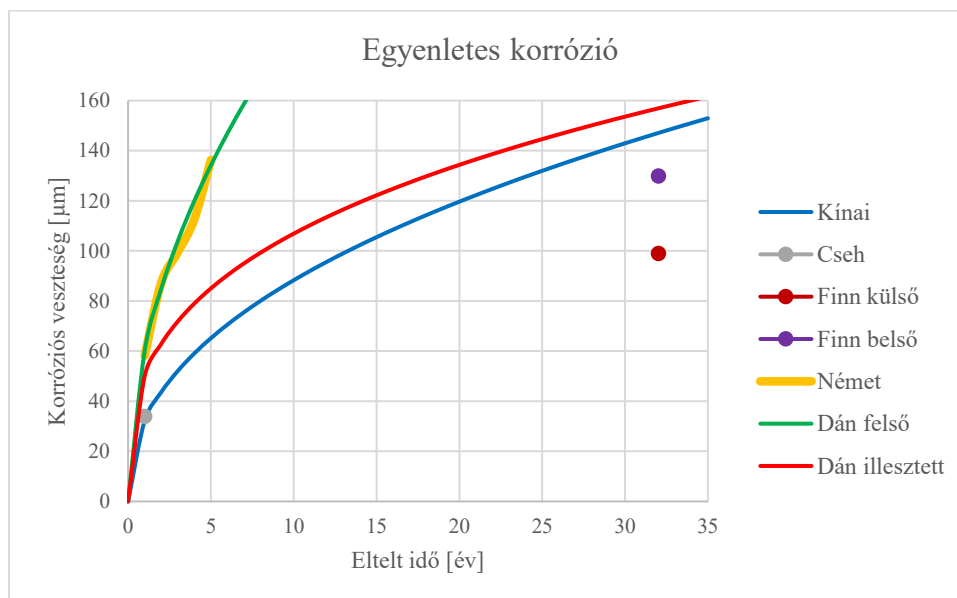
A cseh mérések során a vízszintes pozíciójú próbatesteken mért átlagos gödörmélységek:

- külső gerendán: 61 [μm];
- belső gerendán: 51,5 [μm]

Ezek az átlagos értékek a kínai gödrös korróziós modell 1 év elteltével kialakult maximális gödörmélységének (101,3 [μm]) közelítőleg a fele.



1. ábra: Egyenletes és gödrös korróziós 0-100 év között.



2. ábra: Egyenletes korrózió 0-35 év között.

A végeselemes modell során összehasonlításuk megvizsgáljuk a modellezett szelvény korróziós fogyását úgy is, hogy hagyományos, nem időjárásálló acél anyagot alkalmazunk. A szerkezeti acél korróziós fogyásának meghatározására egy olyan modellt alkalmazunk, melyet tengeri teherhajókon végzett korróziós mérésekből származtattak, így megfelel a sós körülmények kritériumának, de az útsózásból eredő korrózió mértékét valószínűleg felülbecsüli. Bizonyos idő elteltével a nem időjárásálló szerkezeti acél korróziós szelvényfogyása is lelassul, mivel a rozsdaréteg itt se válik el teljesen a felülettől, ezáltal védve azt. Ezt a teherhajókon végzett tanulmány [8] során is figyelembe veszik és egy olyan korróziós modellt (Guedes Soares és Garbatov) alkalmaznak, mely három részre osztja a korróziós folyamatot: az első fázisban nincs korrózió a felületi védelemnek (festés) köszönhetően, a második fázisban elkezdődik a korrózió a védőréteg megsérülésével és nő a korróziós veszteség, a harmadik fázisban pedig a korróziós folyamat lelassul és végül megáll.

Esetünkhöz a teherhajó fedélzetének korróziója áll a legközelebb, melyet Guedes Soares és Garbatov egy másik tanulmánya [9] során ismertet részletesebben:

A korróziós fogyás átlagértéke:

$$d(t) = 1,85 \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{t-10,54}{11,14} \right) \right) \right] \quad (13)$$

A korróziós fogyás szórása:

$$d(t) = 0,384 \cdot \ln(t) - 0,71 \quad (14)$$

Ezen modell során azt feltételezzük, hogy az acélt ~10 évig védi a bevonat, így addig nem korrodálódik. Guedes Soares és Garbatov a tanulmányaik során a korrózió során kialakult maximális gödörmélységet 50 év használat után állapították meg, így ezen modell csak 0-50 év között ad megfelelő eredményt a számítások során.

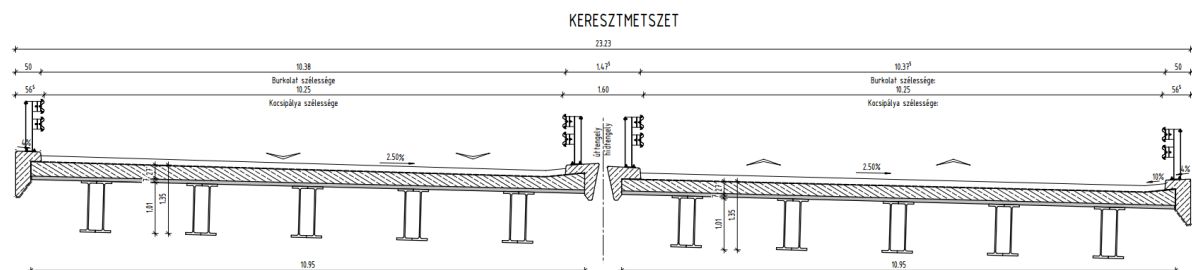
4. VÉGESELEM MODELL

4.1 MODELL BEMUTATÁSA

A végeselemes számítások során egy sózott út felett átvezető híd egy időjárásálló öszvérszerkezetű gerendáját modellezzük ANSYS általános végeselemes programban. A VEM vizsgálat során ezen gerenda korróziós fogyását modellezzük az idő függvényében, majd a korrózió hídgerenda tönkremenetelére (stabilitás) történő hatását vizsgáljuk.

A hídgerenda dupla HEM 1000 szelvényű, S355W időjárásálló acél anyagú.

A VEM modell során a gerenda stabilitásvesztését vizsgáljuk. Mivel a gerenda zárt keresztmetszetű, a globális stabilitásvesztés (kifordulás) nem mértékadó, a szerkezet lokális stabilitásvesztésre érzékeny. A lokális stabilitásvesztés a szelvény nyomott részén található korróziós gödrökből indulhat ki. Mivel a gerenda felső öve a vasbeton pályalemez által megtámasztott, stabilitásvesztés szempontjából az alsó nyomott zóna (nem megtámasztott alsó öv miatt) lesz a kritikus, ami többtámaszú tartó esetén a közbenső támasz felett alakul ki.



3. ábra: Vizsgált hídkeresztmetszet.

Az ANSYS programban az acélgerendát az alul nyomott hosszon SOLID185 térfogatelemekkel, míg a további hosszon BEAM188 rúdelemmel modellezzük. Az együttdolgozó vasbeton pályalemez különösen definiált, SHELL181 héjelemmel kerül modellezésre. A modellt az EN-1991-2 [26] szerint terheljük, állandó és hasznos forgalmi terhekkel.

A gerendát függőleges és keresztirányban mindkét végén megtámasztjuk, hosszirányban csak az egyik végénél, továbbá mindkét végén meggátoljuk a hossz tengely körüli elfordulást. Ezen felül a közbenső támasz feletti végkeresztmetszetenél és a vasbeton pályalemez belső szélén szimmetriát feltételezünk.

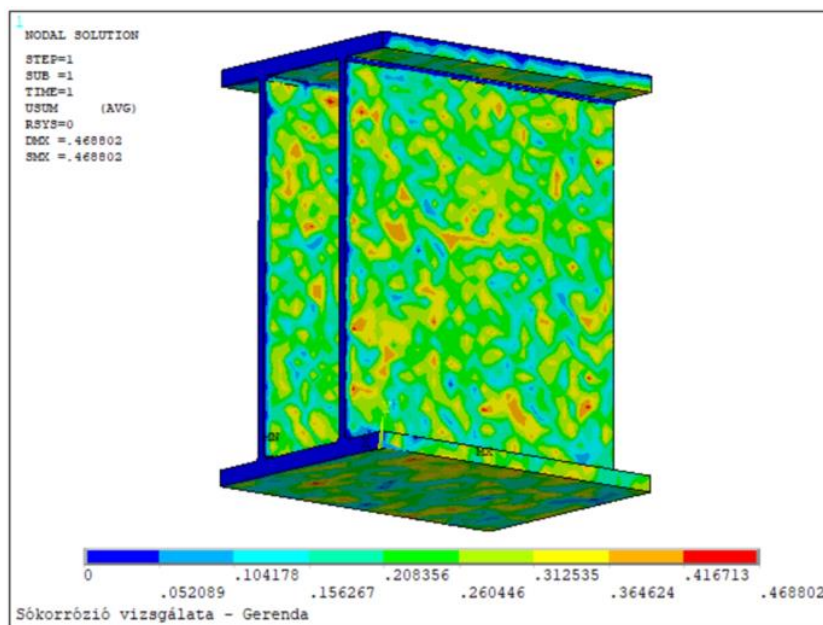
4.1.1 KORRÓZIÓS MODELL

A korróziót a modellben a szelvény „fogyásával” vesszük figyelembe a 3. fejezetben ismertetett modellekkel. A modellezés során a korrózió két típusát különítjük el: modellezzük egyenletes korróziót,

mikor a szelvény lemezeinek vastagságát csökkentjük egyenletesen (a rúdelemekkel és a testelemekkel modellezett részen is), és gödrös korróziót, mikor a szelvényen korróziós gödröket feltételezünk (csak a testelemekkel modellezett részen alkalmazható). A korrózió mértékét mindkét esetben az eltelt évek számának függvényében adjuk meg.

A gödrös korróziót az egyenleteshez hasonlóan a kínai modell alapján vesszük fel. A VEM modellben a gödrös korróziót úgy modellezzük, hogy a szelvény felületén lévő egyes végelemek pontokat különböző mértékben „benyomjuk”, ezzel egy egyenetlen felületet előállítva. A harántkontrakció megakadályozása érdekében a végelemek pontok benyomásakor ideiglenes megtámasztásokat alkalmazunk, melyek a pontokat csak a benyomás irányába engedik elmozdulni. A benyomásból keletkező feszültségek kiküszöböléséhez a benyomás során az anyag rugalmassági modulusát a tízezredére csökkentettük. A kis rugalmassági modulus miatt a keletkező feszültség elhanyagolható mértékű lesz.

A benyomás mértékét időjárásálló acél esetén nulla és a maximális korróziós gödör mélység közötti random számmal vesszük fel. Ezzel a modellezéssel a gödörmélység átlaga várhatóan a maximális érték fele lesz, amire jól illeszkedik a cseh modell alapján meghatározott 1 éves korrózióhoz tartozó átlagos gödörmélység. A gödrös korróziót a testelemmel modellezett szelvényrész egészen működtetjük a felső öv felső részét kivéve, mivel ott a pályalemez miatt nem korrodál a szelvény. A hagyományos (nem időjárásálló) acél esetében a korróziós fogyást a 3. fejezetben bemutatott korróziós modellel (Guedes Soares és Garbatov) vesszük figyelembe. Ez a modell átlagos gödörmélységgel és szórással jellemzi a fogyást, ezért az ANSYS modellen a rúdelemekkel modellezett szakaszon mindenütt az átlagos fogyást feltételezzük, míg a testelemekkel modellezett szakaszon gödrös korróziót modellezzünk és az átlagértéket, valamint a szórást ismerve Gauss-eloszlással adjuk meg a korróziós fogyást. A biztonság javára a gerenda belső részén is definiáltunk korróziós gödröket. Az így előállított és a további számításokhoz kiindulási alapul vett korrodált geometriát mutatja a 4. ábra 100 éves felső becslésű modellt alkalmazva.



4. ábra: Gödrös korrózió geometriája.

4.1.2 ANYAGMODELL, ANALÍZIS

A modellünk során valódi feszültség-nyúlás modellt alkalmazunk és a korrózió hatását a szakítónyúlás csökkentésével vesszük figyelembe az alábbi képlet segítségével [6]:

$$\varepsilon_u = 0,20 - 0,00459 \cdot cr[\%] \quad (15)$$

Ahol ε_u [-] a szakadó nyúlás, és cr [%] a korrózió mértéke, melyet a korrodált térfogat és a kiinduló térfogat arányával határozzunk meg.

A vizsgálat során geometriailag és anyagilag nemlineáris imperfekt (GMNI) analízist végzünk. Nagy elmozdulásokat veszünk figyelembe, valamint a geometriai imperfekciót az EN 1993-1-5 [10] alapján határozzuk meg. A stabilitásvizsgálat alapján az első alak a gerinc lokális horpadása, így a kezdeti imperfekció amplitúdó értéke gerincmagasság/200.

A stabilitásvizsgálat után nemlineáris analízist végzünk, mely során a kiinduló teher lineáris stabilitásvizsgálatból származtatott kritikus teherszorzóval felszorozott értékét működtetjük több lépésben a szerkezeten.

5. EREDMÉNYEK

A végeselemes vizsgálatot elvégezzük a kezdeti, korróziómentes szelvényen, a 3. bekezdésben ismertetett normál lezajlású (kínai) korróziós modell alapján és a korróziót felülbecslő (dániai) modell alapján $t=50$ és $t=100$ évre. A vizsgálatot továbbá elvégezzük hagyományos, nem időjárásálló szerkezeti acél korróziós modelljével is $t=50$ évre.

5.1 NEMLINEÁRIS ANALÍZIS

A tehervezérelt, nemlineáris analízis során előállított teher-elmozdulás diagramokat mutatja a 5. és 6. ábra az utolsó, még konvergált lépésig. A teherszorzó értéke minden esetben megfelel az Eurocode szerinti mértékadó terhelés adott számú többszörösével, míg az elmozdulás értéke a horpadás irányába történő elmozdulást jelenti, ami jelen esetben a gerinc keresztirányú kitérése.

A különböző vizsgálatokhoz tartozó adatokat (korrózió mértéke [%], szakadó nyúlás értéke [-], az utolsó konvergált lépéshez tartozó teherszorzó értéke [-], valamint a lokális horpadás irányába történő elmozdulás értéke [mm]) mutatja az 1. táblázat. Alkalmazott jelölések: t_{III} az időjárásálló acél illesztett korróziós modelljével végzett vizsgálat eredménye, t_{fel} az időjárásálló acél felső becslésű korróziós modelljével végzett vizsgálat eredménye, t_{norm} a hagyományos, nem időjárásálló acél vizsgálatához tartozó eredmény.

Az 1. táblázat azt mutatja, hogy a korrózió mértéke az időjárásálló acél esetén illesztett korróziós modellt alkalmazva 100 év elteltével is 1% alatti térfogatvesztéssel jár. Ez az érték a felső becslésű modellt alkalmazva 100 év alatt 2,2 %-ra emelkedik. A korrózió a hagyományos, (nem időjárásálló acél) esetén a legjelentősebb, ~7% térfogatvesztéssel jár 50 év után. Megfigyelhető, hogy a korrózió az első 50 évben gyorsabb, mint 50 és 100 év között, mikor a kialakult patinaréteg már védi az anyagot.

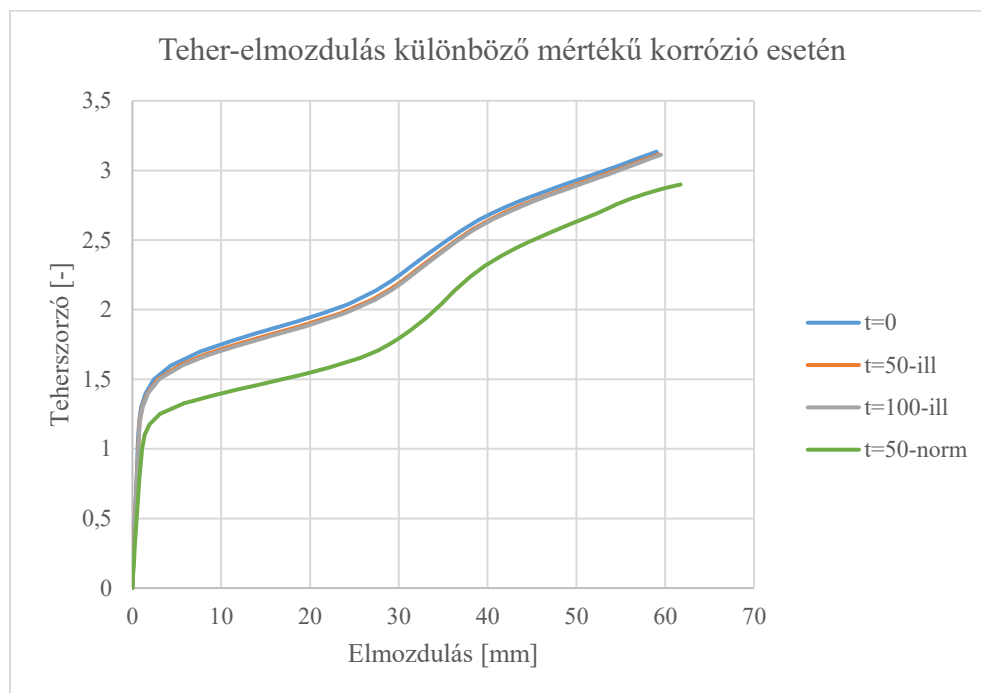
1. táblázat: Eredmények.

idő [év]	korrózió mértéke [%]	szakadó nyúlás ε_u [-]	teherszorzó [-]	teherszorzó $t=0$ év-hez viszonyítva [%]
$t=0$	0,000	0,200	3,135	100,00
$t_{III}=50$	0,577	0,197	3,116	99,39
$t_{III}=100$	0,763	0,197	3,112	99,27
$t_{fel}=50$	1,562	0,193	3,084	98,37
$t_{fel}=100$	2,222	0,190	3,057	97,51
$t_{norm}=50$	6,949	0,168	2,899	92,47

5.1.1 ILLESZTETT KORRÓZIÓS MODELL

A $t=0$ év (kiinduló, korróziómentes), illesztett korróziós modellel előállított $t=50$ év és $t=100$ év, valamint a hagyományos, nem időjárásálló acél $t=50$ év elteltével előállított teher-elmozdulás

diagramokat mutatja a 5. ábra. A diagramon látható, hogy az időjárásálló acél normál korróziós modellel történt vizsgálata során a teher-elmozdulás diagramok szinte egybeesnek, főleg az 50 és 100 év közötti változás eredményei. A nem időjárásálló acél esetén a teherbíráscsökkenés már 50 év után is látványos (~7,5%).



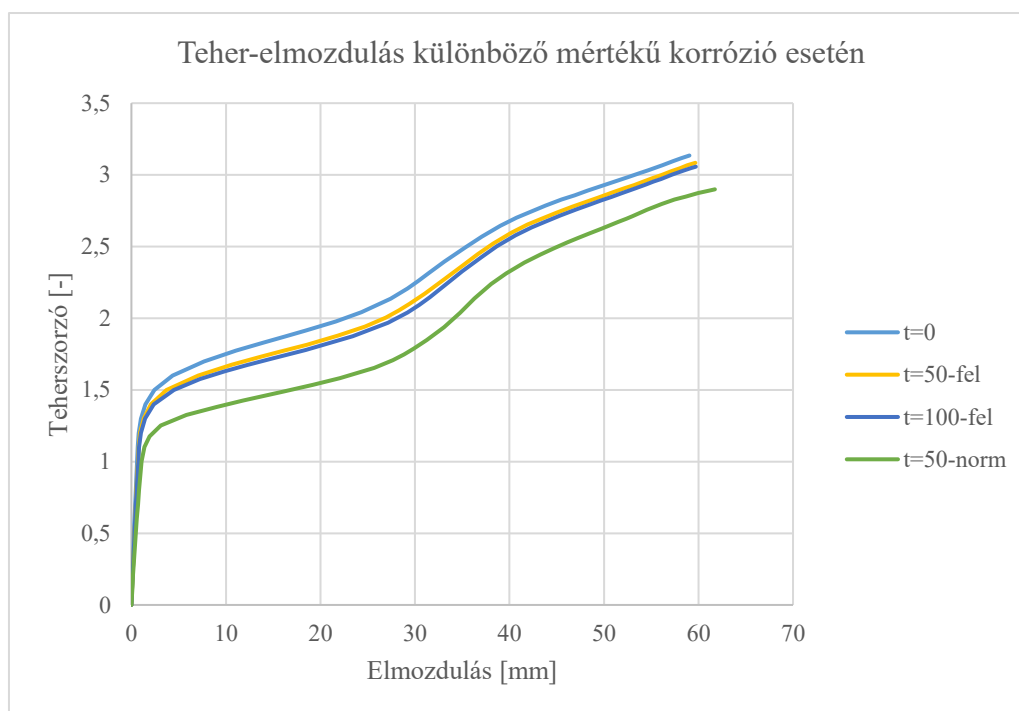
5. ábra: Teher-elmozdulás diagram illesztett sókorróziós modellt alkalmazva [1].

A $t=0$ (korróziómentes) időpontban a szelvény a folyáshatárt a teher ~1,3-szorosánál éri el, a stabilitási tönkremenetel pedig a teher ~3,13-szorosánál következik be.

A $t=50$ év időpontban vizsgált, nem időjárásálló acél szelvény a folyáshatárt a teher ~1,1-szeresénél éri el, ami ~15%-kal csökkent a kezdeti, $t=0$ évben vizsgált szelvénynél származtatott értékhez képest. A stabilitási tönkremenetel pedig a teher ~2,90-szeresénél következik be, ami ~8%-os csökkenést jelent a $t=0$ évben vizsgált eredményhez képest.

5.1.2 FELSŐ BECSLÉSŰ KORRÓZIÓS MODELL

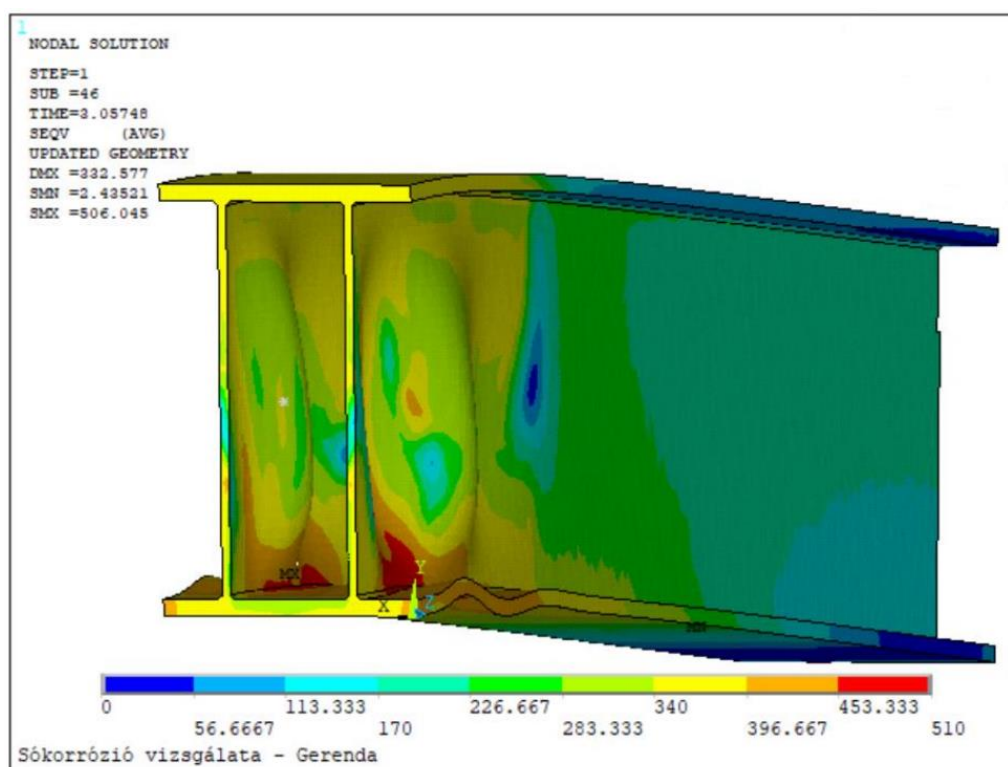
A $t=0$ (korróziómentes) időpontban, felső becslésű korróziós modellel előállított $t=50$ év és $t=100$ év, valamint a hagyományos, nem időjárásálló acél $t=50$ év elteltével előállított teher-elmozdulás diagramot mutatja az 6. ábra.



6. ábra: Teher elmozdulás diagram felső becslésű sókorróziós modellt alkalmazva.

A diagramon látható, hogy az időjárásálló acél felső becslésű korróziós modellel történt vizsgálata során a teher-elmozdulás diagramok már jobban eltérnek, mint az illesztett korróziós modellel végzett vizsgálatok esetén előállított diagramok, főleg 0 és 50 év között, de az 50 év alatti ~1,5%-os teherbírás csökkenés még mindig nem olyan jelentős, mint a nem időjárásálló acél esetén megfigyelt ~7,5%.

A $t=100$ év időpontban felső becslésű korróziós modellel vizsgált, időjárásálló acél szelvény tönkremenetelhez tartozó von Mises feszültségét mutatja a 7. ábra. Az ábrán a gerenda elmozdulása 1,5-szeres nagyítással szerepel. Az elmozdult alakon megfigyelhető a gödrös korrózió okozta egyenetlen felület. A szelvény a folyáshatárt a teher ~1,2-szeresénél éri el, ami ~8%-kal csökkent a kezdeti, $t=0$ évben vizsgált szelvénynél származtatott értékhez képest. A stabilitási tönkremenetel a teher ~3,06-szorosánál következik be, ami ~2,5%-os csökkenést jelent a $t=0$ évben vizsgált eredményhez képest.



7. ábra: Von Mises feszültség az utolsó konvergált lépésnél.

6. KÖVETKEZTETÉSEK

A végeleemes számítások eredményein látható, hogy az idő múlásával és a korrózió előrehaladtával csökken a szelvény a teherbírása. Megfigyelhető, hogy ez a csökkenés 0-50 között nagyobb, mint 50-100 év között, ami időjárásálló acél esetén az idővel kialakult patinaréteg védelmének, nem időjárásálló acél esetén pedig a szelvényen maradó rozsdadarabok „védő szerepének” köszönhető. A teherbírás csökkenés mértéke nagyban függ a korróziós modelltől: az időjárásálló acél esetén az illesztett korróziós modellel végzett mérések során alig csökkent a teherbírás, 100 év után is csak 0,7%-ot, felső becslésű modellel alkalmazva (ami a sózott út vezetőkorlátjának korrózióját jellemzi), is csak 2,5 % a teherbírás csökkenés. Nem időjárásálló acél esetén a teherbírás csökkenés értéke már 50 év után is jelentősebb, 8%.

A gerinc horpadása minden esetben a közbenső támasz közelében alakult ki, az alsó övtől kiindulva (ez a legjobban nyomott rész). Megfigyelhető, hogy hol az egyik gerinc horpadt előbb, hol a másik, aminek oka, hogy különböző helyen, és különböző mélységgel jöttek létre korróziós gödrök.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen cikk az egyik szerző (Megyeri Anna Boglárka) diplomamunkájának kivonata, így ezúton is köszönjük Dr. Kollár Dénes (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi egyetem, Hidak és Szerkezetek Tanszék, adjunktus) konzulensi támogatását és segítségét. A végeleemes futtatások a diplomamunka során az ANSYS Student program használatával készültek.

8. HIVATKOZÁSOK

[1]: Krivy, V., Kubzova M., Kreislova, K. & Konečný P. 2019. Corrosion Processes on Weathering Steel Bridges Influenced by Deposition of Deicing Salt. *Materials*. 2019; 12(7):1089. <https://doi.org/10.3390/ma12071089>

- [2]: Krivy V., Kubzova M., Kreislova K. & Hong H. P. T. 2019. Amount of Chlorides in Corrosion Products of Weathering Steel. *Transportation Research Procedia*, Volume 40, 2019, Pages 751-758, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.106>
- [3]: Zhang, Y., Zheng, K., Jin, Z., Ming, L. & Xioyang, F. 2021. Research on corrosion and fatigue performance of weathering steel and High-Performance steel for bridges. *Construction and Building Materials*, Volume 289, 2021, 123108, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123108>
- [4]: Hemmert-Halswick 1992. Weitergehende statistische Auswertung der Untersuchung zum Korrosionsverhalten von WT-Stählen unter Tausalzbeanspruchung. Bundesanstalt für Straßenwesen.
- [5]: Virolainen, E. & Sayeenathan, M. 2022. The use of weathering steel in different environments.
- [6]: Guang-chong, Q., Shan-hua, X., Dao-qiang, Y. & Zong-xing Z. 2016. Study on the degradation of mechanical properties of corroded steel plates based on surface topography. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 125, 2016, Pages 205-217, ISSN 0143-974X, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.06.018>
- [7]: Qin, S. & Cui, W. 2003. Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements. *Marine Structures*, (15-34).
- [8]: Garbatov, Y. & Soares, C. G. 2011. Corrosion Modeling in Marine Structures. In book: *Marine Technology and Engineering* (pp.1121-1156), Publisher: Taylor & Francis Group Editors: Guedes Soares, C, Garbatov, Y, Fonseca, N. & Teixeira, A. P., <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2136.4722>
- [9]: Saad-Eldeen, S., Garbatov, Y. & Soares, C. G. 2011. Experimental assessment of the ultimate strength of a box girder subjected to severe corrosion. *Marine Structures*. Proc 11th Int. Symp. on Practical Design of Ships and other Floating, <https://doi.org/10.13140/2.1.2952.5446>
- [10]: „Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements”



Reziliens útpályaszerkezetek méretezése

Primusz Péter, Kisfaludi Balázs

Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet

E-mail: primusz.peter@uni-sopron.hu, kisfaludi.balazs@uni-sopron.hu

DOI: [10.36246/UL.2025.1.06](https://doi.org/10.36246/UL.2025.1.06)

KIVONAT

Az útpályaszerkezetek tervezése napjainkban már nem csupán a forgalmi terhelés és költséghatékonyság figyelembevételével történik, hanem a fenntarthatóság és a reziliencia elvei mentén is. A reziliencia – azaz az infrastruktúra ellenálló- és alkalmazkodóképessége – a klímaváltozás, a növekvő hálózati terhelés és az egyre gyakoribb zavaró hatások (pl. extrém időjárás) miatt vált hangsúlyossá. A korszerű útpálya-gazdálkodásban (PMS) a reziliencia célja nemcsak a károsodások elkerülése, hanem a gyors helyreállítás biztosítása, társadalmi és gazdasági következmények minimalizálása mellett.

A tanulmány célja egy olyan mechanikai-empirikus méretezési megközelítés kialakítása, amely integrálja a reziliencia négy kulcs-dimenzióját: robusztusság, gyorsaság, redundancia és erőforrás-mobilizáció. A szerzők a „reziliencia háromszög” analitikus modelljén keresztül mutatják be, miként számszerűsíthető a pályaszerkezet működőképességének időbeli alakulása egy zavaró esemény után. Az új megközelítés célja, hogy a klasszikus méretezési eljárások kibővítésével hozzájáruljon az ellenállóbb és adaptívabb úthálózatok tervezéséhez.

Kulcsszavak: reziliencia, útpályaszerkezet-méretezés, fenntartható infrastruktúra, klímaváltozás, adaptáció

ABSTRACT

Contemporary pavement design encompasses considerations beyond traffic load and cost-efficiency, with an increasing emphasis on sustainability and resilience principles. The term "resilience" is defined as the infrastructure's ability to withstand and adapt to various challenges. This concept has gained prominence due to the impact of climate change, increasing network loads, and the growing frequency of disruptive events, such as extreme weather conditions. In contemporary pavement management systems (PMS), the objective of resilience is twofold: firstly, to prevent damage, and secondly, to ensure rapid recovery while minimising social and economic consequences.

The objective of this study is to develop a mechanistic-empirical design approach that integrates the four key dimensions of resilience: robustness, rapidity, redundancy, and resource mobilisation. Utilising the analytical model of the "resilience triangle," the authors demonstrate the quantification of the temporal evolution of pavement functionality following a disruptive event. This novel approach aims to extend classical design methodologies to facilitate the planning of more resilient and adaptive road networks.

Keywords: resilience, pavement design, sustainable infrastructure, climate change, adaptation

Dr. Primusz Péter

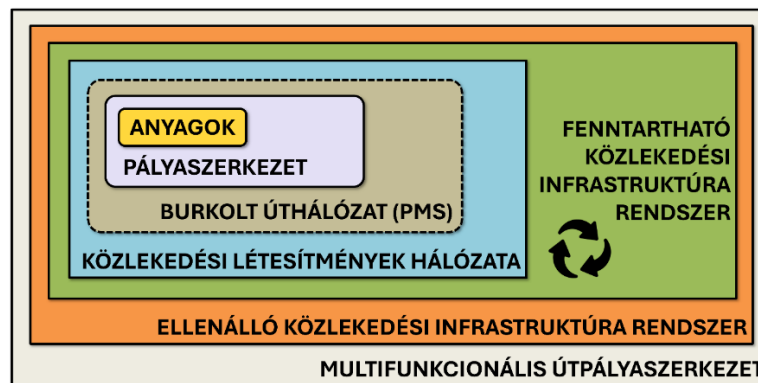
A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet munkatársa. Fő kutatási területe az útfenntartás és az útpályaszerkezetek méretezése, megerősítése. PhD hallgató a BME Út és Vasútépítési Tanszéken.

Dr. Kisfaludi Balázs

A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet munkatársa. Elsődlegesen erdészeti utak forgalomelemzésével foglalkozott, emellett részt vett talajstabilizációval, illetve úthálózatok vizsgálatával foglalkozó kutatásokban.

1. BEVEZETÉS

Az útpályaszerkezetek méretezése, építése és fenntartása kezdetben elsősorban a járműforgalom biztonságos lebonyolítására és a gazdasági szempontból hatékony kivitelezésre, illetve üzemeltetésre összpontosított. A technológia és a tudományos ismeretek fejlődésével azonban a mérnöki célok és a pályaszerkezetekkel szemben támasztott elvárások folyamatosan bővültek, ami egyúttal a rendszerhatárok újra definiálását is szükségessé tette [1].



1. ábra. Útpályaszerkezet rendszerhatárváltozások az elmúlt 100 évben, szerkesztve [1] alapján.

Míg a 20. század elején a hangsúly az altalaj teherbíró képességének meghatározásán és a különböző útépitési anyagok szerkezeti teljesítményén volt, a közúthálózat kiépítésével a figyelem kiterjedt a burkolattípusok és -szerkezetek optimalizálására. A hálózatok kiépülését követően a fő cél a meglévő infrastruktúra fenntartása és felújítása lett, elsősorban költséghatékonysági és közlekedésbiztonsági szempontok szerint. Az elmúlt évtizedekben ehhez társult a fenntarthatóság szempontja is, amely a környezeti hatások, az erőforrás-felhasználás, valamint a társadalmi igények figyelembevételével bővítette az útpályaszerkezetekkel kapcsolatos mérnöki gondolkodás kereteit [1].

A komplex közlekedési rendszerekbe való integráció, a munkaterületek okozta forgalmi zavarok csökkentése, valamint az éghajlatváltozás hatásaival szembeni alkalmazkodási igény nyomán mára a fenntarthatóság mellett egyre hangsúlyosabban jelenik meg a reziliencia fogalma, ami szoros kapcsolatban áll a pályaszerkezet gazdálkodási rendszerrel (Pavement Management Systems, PMS). A PMS eszköztáránt szolgál az útpályák állapotának nyomon követéséhez, elemzéséhez és karbantartásához, figyelembe veszi a forgalmi terhelést, az éghajlati viszonyokat és a költségvetési korlátokat is, ezáltal támogatja a hosszú távú teljesítmény optimalizálását és az úthálózat ellenállóbbá tételét. A reziliens infrastruktúra így nem csupán a fenntartás hatékonyságát növeli, hanem hozzájárul a közlekedési rendszer egészének megbízhatóságához és alkalmazkodóképességéhez is.

2. A REZILIENCIA FOGALMA

A rugalmas ellenálló képesség (reziliencia) fogalma viszonylag újnak tekinthető és folyamatosan fejlődik, bár első meghatározása már az 1970-es évekre nyúlik vissza. A fogalom meghatározása a két fő fejlődési irányzat szerint lehet **fogalmi** és **analitikus** [2].

A fogalmi meghatározások egyik legkorábbi és legismertebb példája [3] munkájához kapcsolódik, aki az ökológiai rendszerek kontextusában vizsgálta az ellenállóképességet. Az ő megközelítése szerint az ellenállóképesség mértéke az a zavarás, amelyet egy rendszer képes elviselni anélkül, hogy

összeomlana. Egy másik fontos definíció [4] nevéhez fűződik, amelyet ma is széles körben alkalmaznak. Az ellenállóképességet az emberi közösségek azon képességeként határozta meg, amely lehetővé teszi számukra, hogy elviseljék az infrastruktúrájukat érő külső hatásokat, majd képesek legyenek helyreállni ezekből a zavarokból. Ez a meghatározás két kulcsfontosságú elemet vezetett be:

1. Az ellenállóképesség nem csupán az egyes szerkezetek vagy infrastruktúrák, hanem a közösségek tulajdonsága.
2. Az ellenállóképesség nemcsak az ellenállás képességét jelenti, hanem a gyors és hatékony helyreállítási folyamat biztosítását is.

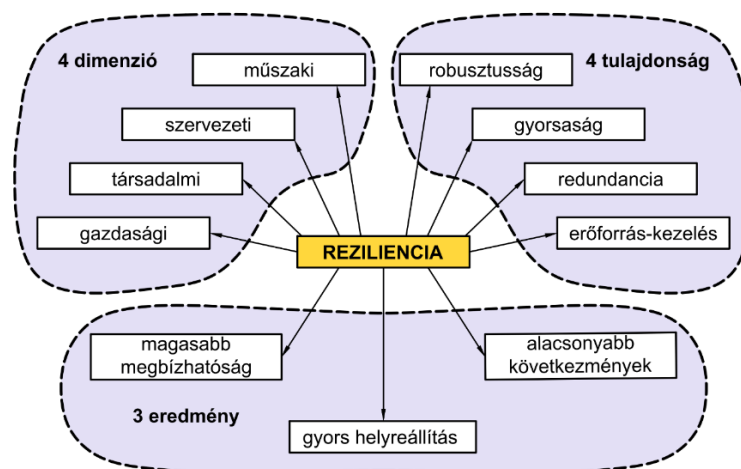
A fenti két aspektus szorosan összefügg egymással. Például egy híd szerkezeti ellenállóképessége nagyrészt a műszaki jellemzőitől függ, míg a helyreállítás folyamata már erősen befolyásolt a társadalom technológiai, gazdasági és politikai feltételeitől is. A helyreállítási képesség fontosságát [5] tovább hangsúlyozta, aki szerint az ellenállóképesség azon múlik, milyen gyorsan térnek vissza a vizsgált változók az egyensúlyi állapotukhoz egy zavaró hatást követően. A rugalmas ellenálló képesség minden meghatározásában megjelenik a robusztusság (azaz az ellenállás egy külső sokkhatással szemben) és a gyors helyreállítás képessége. [6] egy keretrendszert alkottak, amely szerint az infrastruktúrák ellenállóképességének négy dimenziója van:

1. Műszaki dimenzió: az építési és technológiai jellemzők.
2. Szervezeti dimenzió: a menedzsment, karbantartás és vészhelyzeti reakciók.
3. Társadalmi dimenzió: a közösségre gyakorolt hatások és azok mérséklése.
4. Gazdasági dimenzió: az infrastruktúra működőképességének csökkenésével és helyreállításával kapcsolatos költségek.

Ezeket túl az ellenállóképességet négy tulajdonság jellemzi:

1. Robusztusság: a rendszer azon képessége, hogy egy szélsőséges eseményt követően is fenntartsa működését.
2. Gyorsaság: az infrastruktúra funkcionalitásának helyreállítási sebessége.
3. Redundancia: a rendszer elemeinek és komponenseinek helyettesíthetősége.
4. Erőforrás-mobilizáció: a problémák azonosítása, a prioritások meghatározása és a szükséges erőforrások mozgósítása.

A robusztusság és a gyors helyreállítás az ellenállóképesség fő céljai, míg a redundancia és az erőforrás-mobilizáció ezek elérésének eszközei.



2. ábra. Az ellenállóképesség meghatározásában figyelembe vett szempontok [2].

Az ellenállóképesség három fő **eredménye** a következő:

1. Nagyobb megbízhatóság: csökkenti annak valószínűségét, hogy a rendszer kritikus állapotba kerüljön.
2. Gyors helyreállítás: minimalizálja a működéskiesés időtartamát.
3. Alacsony társadalmi-gazdasági következmények: mérsékli az extrém események társadalmi és gazdasági hatásait, ezzel csökkentve az ezekhez kapcsolódó kockázatokat is.

Bruneau és mtsai. (2003) [6] meghatározása az egyik legszélesebb körben alkalmazott megközelítés maradt, bár számos további definíció született, amelyek különböző infrastrukturális rendszerekre és alkalmazási területekre összpontosítanak.

Az Egyesült Államok Szövetségi Autópálya Igazgatósága (FHWA) szerint egy közlekedési rendszer rezilienciája azt jelenti, hogy képes előre látni, felkészülni és alkalmazkodni a változó körülményekhez, valamint ellenállni, reagálni és gyorsan helyreállni a zavaró hatások után. Ez magában foglalja [7]:

(A) a veszélyekkel szembeni ellenállást vagy a szélsőséges időjárási események és természeti katasztrófák hatásainak elviselését, illetve a zavaró időjárási események vagy természeti katasztrófák hatásának mértékének vagy időtartamának csökkentését egy projektre nézve; és

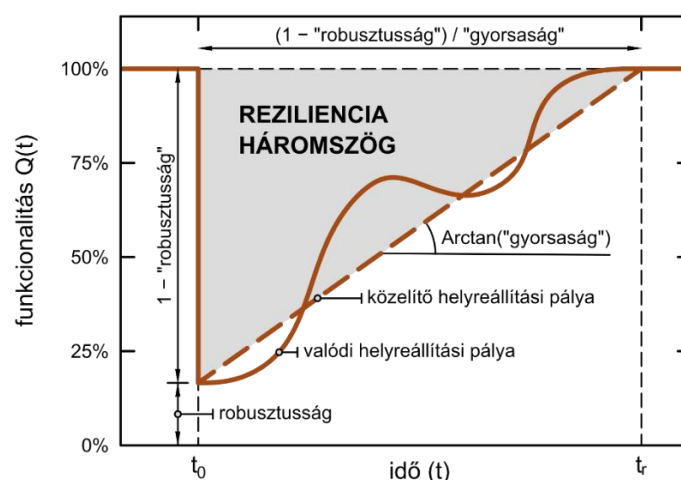
(B) azt a képességet, hogy a projekt rendelkezzen elnyelő-, alkalmazkodó- és helyreállító kapacitással, amely csökkenti annak sérülékenységet az időjárási eseményekkel vagy egyéb természeti katasztrófákkal szemben.

A reziliencia fogalma tehát nem csupán az infrastruktúra megerősítését jelenti, hanem magában foglalja az alkalmazkodóképességet és a reagálási képességet is. Az aszfalt útpályaszerkezetek esetében ez különböző kötőanyagok alkalmazását, a „Perpetual Pavement” tervezési megközelítést vagy a várható zavaró eseményeket figyelembe vevő tervezési módszereket jelentheti.

3. AZ ELLENÁLLÓKÉPESSÉG ANALITIKAI ÉRTELMEZÉSE

Az eddigi kutatások szerint a reziliencia négy tulajdonsága közül a robusztusság és redundancia határozza meg a funkcióvesztés mértékét, míg a gyorsaság és erőforrások befolyásolják a helyreállítás időtartamát. Ez a világos megfeleltetés a funkcionalitás és az idő dimenzióinak szempontjából különösen alkalmasnak bizonyul a reziliencia szisztematikus, vizsgálatára. Ennek megfelelően a továbbiakban a reziliencia vizsgálata két dimenzióra – funkcionalitás és idő – koncentrál, míg a négy részterületet e két dimenzióhoz párosítva elemzi.

Az analitikai rugalmas ellenállóképesség (reziliencia) egy széles körben használt koncepcionális meghatározása [6] munkájára vezethető vissza, amely bevezette a „reziliencia háromszög” fogalmát. Ez a modell leírja a reziliencia csökkenését egy szélsőséges esemény hatására, és összekapcsolja a reziliencia számszerűsítését a funkcionalitás időbeli változásával.



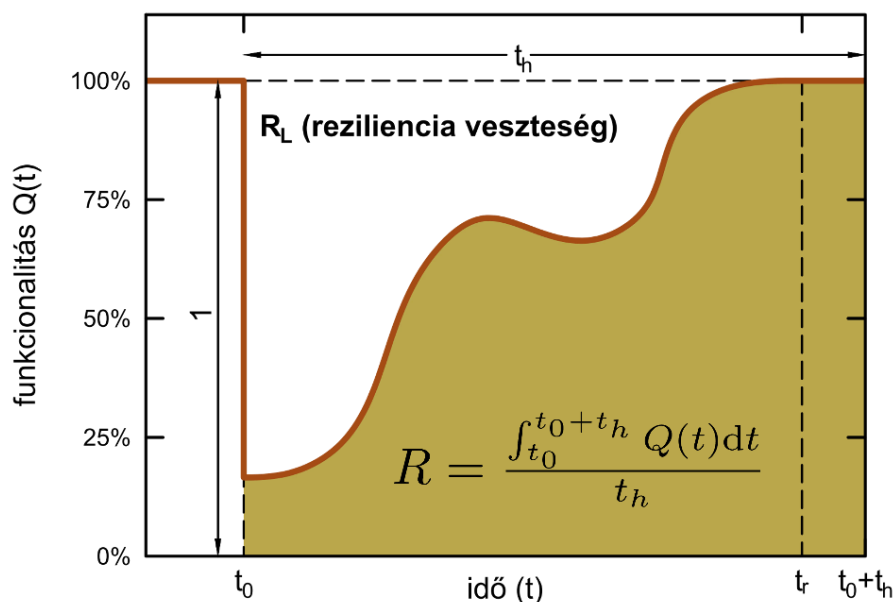
3. ábra. Rugalmassági háromszög (árnyékolt terület); $t = t_0$ -nál a külső sokk bekövetkezik, és $t = t_r$ -nél a helyreállítás befejeződik [2].

A reziliencia háromszög egyik oldala a funkcionalitásvesztést méri (1 – robusztusság), a második oldal a teljes helyreállítási időt jelöli, míg az átló a funkcionalitás helyreállításának közelítő egyenesét adja meg. A 3. ábrának megfelelően a reziliencia növekedése a funkcióvesztés időbeli alakulását ábrázoló szürke terület minimalizálásával jár együtt. Ez az egyszerű analitikai modell később több kutatás alapjául szolgált.

Az alábbi egyenlet egyetlen ún. reziliencia indexben (R) egyesíti a rugalmas ellenállóképesség összes dimenzióját, tulajdonságát és eredményét:

$$R = \frac{\int_{t_0}^{t_0+t_h} Q(t)dt}{t_h} \quad (1)$$

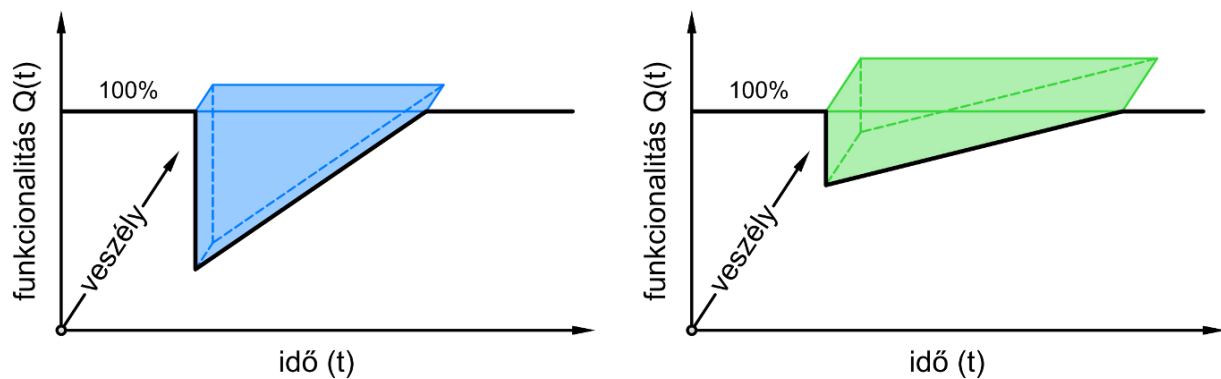
ahol R a reziliencia-index $[0,1]$ intervallumon, $Q(t)$ a rendszer százalékos „működőképessége” (vagy „használhatósága”) a t időpillanatban, t_h pedig az elemzés által vizsgált időhorizont. A fenti egyenlet számlálója a $Q(t)$ helyreállítási pálya alatti területet jelöli, míg a nevező az esemény hatása nélküli ellenállóképesség értékét mutatja, mivel $100\% \cdot t_h = t_h$. Az egyenlet grafikus értelmezését a 4. ábra mutatja be.



4. ábra. Az 1. egyenlet számlálója a helyreállítási görbe alatti színezett terület, a nevező pedig a teljes terület, ahol a szélesség = t_h a magasság = 1 [2].

Az (1) egyenlet előnye, hogy a reziliencia minden dimenzióját, tulajdonságát és eredményét egyetlen skaláris mutatóban egyesíti, amely a $[0;1]$ intervallumon értelmezett. Ez különösen értékes eredmény a jelenlegi infrastruktúra-fenntarthatósági értékelési rendszerekhez képest, amelyekben a kvantitatív mutatók alkalmazása még mindig fejlesztés alatt áll. Ugyanakkor kérdéses, mennyire indokolt a reziliens infrastruktúrát meghatározó különböző jellemzőket egyetlen összetett indexszé sűríteni [2], [8].

Többféle veszélyforrás esetén, fontos szem előtt tartani, hogy a különböző veszélyek eltérő hatással lehetnek a rezilienciára, továbbá ezek a hatások eltérően érinthetik a funkcionalitást és az időt. Ezt a 5. ábra egy háromdimenziós ábrázolással szemlélteti: az egyik veszélyforrás (jobb oldali kép) kisebb funkcióvesztést okoz, viszont hosszabb helyreállítási időt igényel, míg egy másik veszélyforrás (bal oldali kép) nagyobb funkcióvesztéssel jár, de gyorsabban helyreállítható.



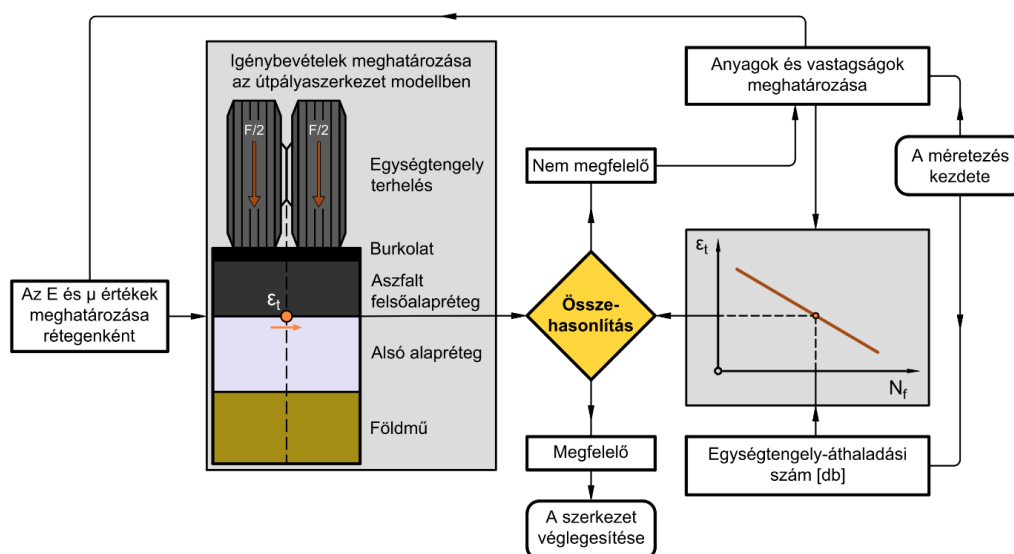
5. ábra. A testek „mélységéből” jól látható, hogy a veszély által okozott kockázat hol nagyobb [9].

A reziliencia értékelésénél érdemes tehát harmadik dimenzióként figyelembe venni a veszélyeztetettség mértékét is. Így a terület térfogattá alakul, ami a vizsgált szerkezet sérülékenységet jelzi: minél kisebb a reziliencia és minél nagyobb a veszély relevanciája, annál nagyobb a térfogat. Ugyanakkor ez egyben reziliencia potenciált is mutat, vagyis azt, hogy a reziliencia növelésére fordított befektetések milyen hatékonysággal csökkenthetik a kockázatokat [9].

A reziliencia értékelését veszélyenként külön-külön végző számítási eljárás lehetővé teszi, hogy az adott objektum rezilienciáját minden egyes veszélyforrás tekintetében külön mutassuk ki. Ennek egyik előnye, hogy az alkalmazók számára olyan mutatószámok állnak rendelkezésre, amelyek pontosan meghatározzák, mely veszélyekkel szemben mutat alacsony rezilienciát az adott rendszer. Amennyiben egy összesített reziliencia-indexet alkalmazunk, amely az összes figyelembe vett veszélyforrást egyesíti egy mutatóban, fontos figyelembe venni az egyes veszélyek tényleges kockázati súlyát.

4. HAGYOMÁNYOS PÁLYASZERKEZET MÉRETEZÉS

A mechanikai-empirikus (M-E) útpályaszerkezet méretezés elve egyszerű, és megfelel bármely más tartószerkezet méretezési gyakorlatának. A külső kerékterhelés által okozott kritikus igénybevételeket összehasonlítják azokkal a határigénybevételekkel, amelyeket a rétegek az anyagi tulajdonságaik alapján képesek elviselni. A határigénybevételeket, amelyek általában a forgalom függvényében alakulnak, laboratóriumi vizsgálatok vagy kísérleti útszakaszokon végzett hosszútávú megfigyelések empirikus teljesítményegyenletei, ún. leromlási modellek alapján számolják ki.



6. ábra. A hagyományos mechanikai-empirikus (M-E) útpályaszerkezet méretezés folyamata.

A méretezés fő lépései a következők:

1. Kiindulási adatok meghatározása: A tervezési időtartam, a forgalom nagysága (nehéz járművek egységtengelye), a talajvizsgálat alapján meghatározott földműteherbírás és **klimatikus jellemzők** (pl. hőmérséklet, csapadék).
2. Előzetes útpályaszerkezet összeállítása a forgalom és földműteherbírás figyelembevételével.
3. Rugalmasságtani számítások a kerékterhelés következtében ébredő kritikus feszültségek, alakváltozások és elmozdulások meghatározására, többféle forgatókönyv figyelembevételével.
4. Ellenőrzés határigénybevételekkel: Az anyagfajták határigénybevételeit az egységtengelyáthaladási szám függvényében vizsgálják.
5. Szerkezeti adatok véglegesítése az útpítési technológia figyelembevételével.

Az egyes lépéseket grafikusán a 6. folyamatábra mutatja be.

Az (1) pontban jól látható, hogy az M-E méretezési módszer fontos bemeneti adatai közé tartoznak a klimatikus jellemzők, mint amilyen pl. a hőmérséklet és a csapadék. A csapadék hatással van az útpályaszerkezet szemcsés rétegeinek és a földműnek a teljesítményére, mivel ezek csak megfelelő víztartalom mellett teherbíróak, míg a hőmérséklet elsősorban az aszfaltrétegek merevségét befolyásolja. Az M-E méretezési módszerek általában múltbeli éghajlati adatokra támaszkodnak. Azonban a következő évszázadban várható jelentős éghajlati változások fényében a történeti éghajlati adatok alkalmazása a jövőbeli események előrejelzésében, azok súlyosságának vagy gyakoriságának meghatározásában már nem feltétlenül fogja biztosítani a szerkezettől elvárt élettartamot.

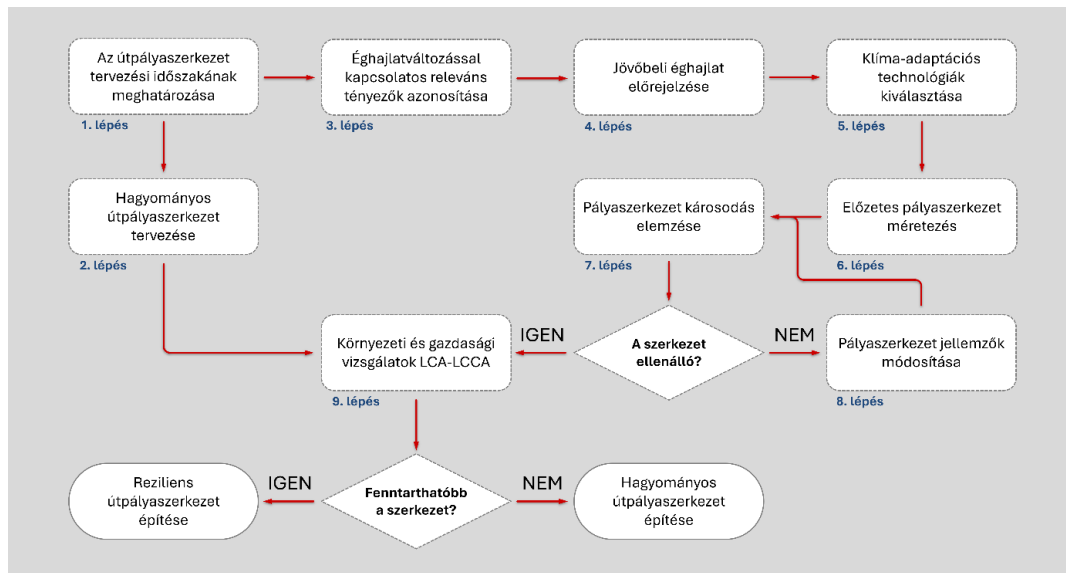
5. REZILIENS PÁLYASZERKEZET MÉRETEZÉS

Az eddigiek alapján megállapítható, hogy szükségszerű az M-E méretezési keretrendszer kiegészítése a reziliens tervezési megközelítéssel, amely már tekintettel van a jövőbeni éghajlati viszonyokra is. Ez azt jelenti, hogy az útpályaszerkezet tervezésénél a történeti adatok helyett prediktív éghajlati modellekből származó adatokat kell használni, vagyis az útpályaszerkezet-tervező szoftverek történeti éghajlati adatbázisait egyre inkább prediktív modellekkel kell felváltani. Továbbá a hajlékony útpályaszerkezetek M-E méretezési módszerét ki kell egészíteni az extrém eseményekkel kapcsolatos kockázatok kezelésének képességével, valamint már a méretezés kezdeti fázisban érvényesíteni kell a reziliencia szempontjait.

A 7. ábra bemutat egy kilenclépcsős módszertant, amely szervesen integrálja magában az M-E méretezési eljárást mellett az életciklus-értékelés (LCA) és az életciklus-költségelemzés (LCCA) feladatait is. A módszertan lépései a következők [10]:

1. Tervezési időszak meghatározása: Az útpályaszerkezet élettartamának meghatározása a vonatkozó jogszabályok és előírások alapján. A hagyományos szerkezetek tervezési élettartama általában 20–30 év, míg a „perpetual” burkolatoké 50–60 év.
2. Hagyományos útpályaszerkezet tervezése: Ennek célja egy referenciaérték meghatározása az összehasonlításhoz.
3. Éghajlati tényezők azonosítása: Az adott földrajzi térséghez kapcsolódó éghajlatváltozási jelenségek meghatározása, például hőmérséklet-emelkedés, hőhullámok, extrém téli hidegek, áradások vagy városi hősziget-hatás.
4. Jövőbeli éghajlat előrejelzése: Éghajlati modellezés a tervezési időszak végéig, beleértve az extrém időjárási eseményeket.
5. Klíma-adaptációs technológiák alkalmazása: A rugalmas ellenállóképességet a kívánt szintre növelő technológiák kiválasztása.
6. Előzetes pályaszerkezet méretezés: Az M-E méretezési módszerre támaszkodva a kellő ellenálló képességgel rendelkező útpályaszerkezet létrehozása.
7. Pályaszerkezet károsodás elemzés: Az útpályaszerkezet viselkedésének modellezése a teljes élettartam alatt, beleértve az aléptítményt is. A klimatikus hatások hatékony vizsgálatához sokszor végelemek- (FEA) vagy egyéb numerikus módszereket alkalmaznak.

8. Pályaszerkezet jellemzők módosítása: Amennyiben a vizsgálatok szerint az előzetes útpályaszerkezet nem képes ellenállni a klímaváltozással kapcsolatos hatásoknak, a szerkezeti rétegek vastagságát vagy anyagát szükséges módosítani.
9. Fenntarthatósági értékelések (LCA és LCCA) elvégzése: A teljes életciklusra kiterjedő környezeti és gazdasági vizsgálat alapján annak meghatározása, hogy az elvárt ellenálló képességre méretezett útpályaszerkezet fenntarthatóbb-e a hagyományos változatnál. Ha igen, a reziliens útpályaszerkezet építése javasolt, ellenkező esetben a hagyományos szerkezet előnyösebb.



7. ábra. Reziliens útpályaszerkezet méretezés folyamata [10].

A 7. ábrát vizsgálva láthatjuk, hogy a 7. lépés után döntenünk kell arról, hogy a méretezett útpályaszerkezet ellenálló képessége megfelel-e a klímaváltozással kapcsolatos kihívásoknak. Ennek egyik lehetséges módja, hogy az egyes pályaszerkezet alternatívák ellenálló képesség szintjét az extrém események hatására bekövetkező szerkezet-romlás valószínűségével (p) fejezzük ki. Ha $p = 0$, akkor az útpályaszerkezet rezilienciája magas (robustus), ha $p > 0$, akkor pedig még mindig a hagyományos viselkedés érvényesül. Ez utóbbi esetben szükséges a klíma-adaptációs technológiáknak megfelelően a szerkezeti rétegek vastagságát vagy azok anyagát módosítani [11].

Az aszfalt útpályaszerkezetek rezilienciájának vizsgálatában a végeselemes modellezés kiemelt szerepet tölt be, mivel lehetőséget ad a különböző mechanikai és klimatikus hatások — például forgalmi terhelés, hőmérséklet-ingadozás, csapadék vagy fagyás–olvadás ciklusok — pontos szimulációjára. E modellek révén vizsgálható, hogyan változik a pályaszerkezet viselkedése időben és térben, illetve hogyan hatnak rá a különböző éghajlati forgatókönyvek, például a hosszabb ideig tartó extrém hőhullámok vagy az intenzív csapadékesemények, áradások [12]. Szerencsére már hazai kutatási eredmények is rendelkezésre állnak ezen a téren, különösen a hajlékony útpályaszerkezetek hőmérsékletprofil alapú méretezése témakörben, ami jelentős előrelépést jelent a klímaadaptív tervezés irányába [13], [14], [15]. Ezek az eredmények megalapozzák a rezilienciát előtérbe helyező, hosszú távon fenntarthatóbb útpályaszerkezetek hazai fejlesztését és alkalmazását.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikkben részletesen tárgyaltuk az útpályaszerkezetek rezilienciájának elméleti és gyakorlati vonatkozásait, különös tekintettel a klimatikus kihívásokra adott anyag- és szerkezettervezési válaszokra. Az alábbiakban a legfontosabb megállapításokat foglaljuk össze, kiemelve azokat a kockázatokat és alkalmazkodási lehetőségeket, amelyek meghatározzák a jövőbeli infrastruktúra-

ellenállóképesség irányait. Általános egyetértés van az útpályaszerkezetek éghajlati stresszhatásokkal szembeni sebezhetőségéről [7]:

- **Hőmérséklet-emelkedés:** Alkalmazkodási stratégiák nélkül az útpályaszerkezetek élettartama jelentősen csökken, ami hosszú távon költségnövekedéshez vezet. A kutatások elsősorban az aszfalt kötőanyagok hőmérséklet-függő tulajdonságaira és a betonburkolatok hő okozta alakváltozásaira összpontosítanak.
- **Elöntés és áradás:** A megnövekedett vízmennyiség károsíthatja az útpályaszerkezetet, mivel az elárasztás gyorsan telíti az alépítményt, gyengíti a szerkezeti elemeket és növeli a sérülékenységet az áradások idején és közvetlenül utána. A talajvízszint emelkedésének hatásai kevésbé kutatott területet jelentenek. Általánosságban elmondható, hogy a vastagabb szerkezetek ellenállóbbak az elöntéssel szemben.
A kutatások egyetértenek bizonyos megoldási lehetőségekben is:
- **Pályaszerkezet méretezés:** Az éghajlati előrejelzéseket be kell építeni a tervezési modellekbe a történeti adatok részleges vagy teljes helyettesítésével. Ez eltérő anyagok és szerkezetek alkalmazásához vezethet a jelenlegi műszaki előírásokhoz képest.
- **Ellenállóbb anyagok:** Meglévő anyagok, például magasabb PG (Performance Grade) fokozatú kötőanyagok és nedvességállóbb alaprétegek használhatók az ellenállóbb szerkezetek kialakítására.

Az irodalomban számos olyan alkalmazkodási javaslat jelenik meg, amelyek gyakorlati bevezetése még nem tekinthető általánosan elfogadottnak vagy kellően alátámasztottnak. Ilyenek például a pályaszintek megemlése, az alépítmények stabilizálása és elöntési érzékenységeinek részletes vizsgálata, a vastagabb és merevebb szerkezeti rétegrendek alkalmazása, a hatékonyabb vízelvezetési rendszerek kialakítása, valamint az elárasztott útszakaszok újbóli megnyitására vonatkozó protokollok kidolgozása. E megközelítések értékelésére és fejlesztésére kiváló alapot nyújt a mechanikus-empirikus útpályaszerkezet-méretezés, amely a fizikai-mechanikai modellezést és a tapasztalati összefüggéseket ötvözve jól adaptálható rezilienciára fókuszáló, kockázatalapú elemzésekhez. Ez a keretrendszer véleményünk szerint lehetővé teszi a veszélyek bekövetkezési valószínűségének és azok következményeinek számszerűsítését, ezáltal támogatva a preventív tervezést, az éghajlati alkalmazkodást és a hosszú távon fenntartható útfenntartási stratégiák kialakítását.

7. NYILATKOZAT

A cikk tartalma a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Magasépítés Tanszéke és Út- és Vasútépítési Tanszéke, a Budapesti és Pest Vármegyei Mérnöki Kamara, valamint a Nemzetközi Betonszövetség Magyar Tagozata közös szervezésében megrendezett I. REZILIENS ÚTPÁLYASZERKEZETEK KONFERENCIA – Szélsőséges időjárási körülményeknek kitett útpályák tervezése, építése, fenntartása című szakmai eseményen elhangzott előadás alapján készült.

8. HIVATKOZÁSOK

- [1]: Harvey, John. 2023. „Keynote Presentation: Improving Pavement Sustainability through Integrated Design, Construction, Asset Management, LCA, LCCA, and S-LCA”. In The Second International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Constructed Infrastructure Facilities (MAIREINFRA2), 69. MDPI. <https://doi.org/10.3390/engproc2023036069>
- [2]: Bocchini, Paolo, Dan M. Frangopol, Thomas Ummenhofer, és Tim Zinke. 2014. „Resilience and Sustainability of Civil Infrastructure: Toward a Unified Approach”. Journal of Infrastructure Systems 20 (2): 04014004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000177](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000177)
- [3]: Holling, C S. 1973. „Resilience and Stability of Ecological Systems”. Annual Review of Ecology and Systematics 4 (1): 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- [4]: Timmerman, P. 1981. Vulnerability, resilience and the collapse of society: a review of models and possible climatic applications. Environmental monography / Institute for Environmental Studies, University of Toronto, no. 1. Toronto: Institute for Environmental Studies, University of Toronto.

- [5]: Pimm, Stuart L. 1984. „The Complexity and Stability of Ecosystems”. *Nature* 307 (5949): 321–26. <https://doi.org/10.1038/307321a0>
- [6]: Bruneau, Michel, Stephanie E. Chang, Ronald T. Eguchi, George C. Lee, Thomas D. O'Rourke, Andrei M. Reinhorn, Masanobu Shinozuka, Kathleen Tierney, William A. Wallace, és Detlof Von Winterfeldt. 2003. „A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities”. *Earthquake Spectra* 19 (4): 733–52. <https://doi.org/10.1193/1.1623497>
- [7]: Muench, Steve, Tom Van Dam, Prashant Ram, és Kurt Smith. 2023. „Pavement Resilience: State of the Practice”. Final Report FHWA-HIF-23-006. United States. Department of Transportation. Federal Highway Administration.
- [8]: Nickdoost, Navid, Mohammad Javad Shooshtari, Juyeong Choi, Dennis Smith, és Yassir AbdelRazig. 2024. „A Composite Index Framework for Quantitative Resilience Assessment of Road Infrastructure Systems”. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 131 (június):104180. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104180>
- [9]: Eichinger-Vill, Eva M., Robert Veit-Egerer, Theresa Reimoser, Alois Vorwagner, Christian Gasser, Alfred Weninger-Vycudil, és Johann Litzka. 2022. „REMAIN – Resilient Motorway Infrastructure: Ergebnisbericht”. Projektbericht VIF2020. Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG). https://projekte.ffg.at/anhang/63d0ee2370a1d_REMAIN_Ergebnisbericht.pdf
- [10]: Duque, Jose, Gilberto Martinez-Arguelles, Yelenka Nuñez, Rita Peñabaena-Niebles, és Rodrigo Polo-Mendoza. 2024. „Designing Climate Change (CC)-Resilient Asphalt Pavement Structures: A Comprehensive Literature Review on Adaptation Measures and Advanced Soil Constitutive Models”. *Results in Engineering* 24 (december):103648. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103648>
- [11]: Asres, Enyew, Tewodros Ghebrab, és Stephen Ekwaro-Osire. 2021. „Framework for Design of Sustainable Flexible Pavement”. *Infrastructures* 7 (1): 6. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7010006>
- [12]: Nivedya, M. K., Mingjiang Tao, Rajib B. Mallick, Jo Sias Daniel, és Jennifer M. Jacobs. 2020. „A Framework for the Assessment of Contribution of Base Layer Performance Towards Resilience of Flexible Pavement to Flooding”. *International Journal of Pavement Engineering* 21 (10): 1223–34. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1533637>
- [13]: Seoyoung, Cho, László Pethő, Csaba Tóth, és Éva Lakatos. 2020. „Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezése hőmérséklet profil alapján”. *Útügyi Lapok* 8 (14): 105–16. <https://doi.org/10.36246/UL.2020.2.07>
- [14]: Tóth, Csaba, Éva Lakatos, László Pethő, és Seoyoung Cho. 2021. „Temperature Profile Modelling in Flexible Pavement Design”. *International Journal of Urban and Civil Engineering* 15 (2): 84–89.
- [15]: Cho, Seoyoung, és Éva Lakatos. 2022. „Finite Element and Fatigue Analysis of Flexible Pavements Based on Temperature Profile Modeling”. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty* 21 (2): 103–16. <https://doi.org/10.7409/rabdim.022.006>