

Infrastrukturális reziliencia és ellátásbiztonság: a zöld közbeszerzés nem látott kockázatai az útéépítésben

Tóth Csaba 

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar,
Út és Vasútépítési Tanszék, Budapest, Magyarország
Levelező szerző, e-mail: toth.csaba@emk.bme.hu

Beérkezett: 2026. március 6.; elfogadva: 2026. június 30.

Összefoglalás

A közúti infrastruktúra anyagválasztási döntéseit egyetlen mutató uralja: a beépített szén-dioxid-kibocsátás. Ez a mitigációdomináns logika, amelyet az EPD-alapú zöld közbeszerzési rendszerek intézményesítettek, szisztematikusan alulsúlyozza a hosszú élettartamú infrastruktúra biztonsági dimenzióit. A cikk négy strukturális vakfoltot azonosít: 1) az aszfaltburkolatok klímaérzékenységből fakadó infrastruktúra-biztonsági kockázatokat; 2) a bitumenfüggőség energiabiztonsági és stratégiai anyagfüggőségi következményeit; 3) az EPD cradle-to-gate módszertan döntési torzítását; 4) a determinisztikus LCCA kockázatmenedzsment-hiányát. A tanulmány integrált értékelési keretet javasol, amely a mitigációt, az adaptációt, az ellátásbiztonságot és a forgatókönyv-alapú gazdasági elemzést egységes döntéstámogatási rendszerbe foglalja.

Kulcsszavak: infrastruktúra-biztonság, energiabiztonság, bitumen-ellátásbiztonság, klímareziliencia, életciklus-elemzés

Infrastructure resilience and supply security: The hidden risks of green procurement in road construction

Csaba Tóth

Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Civil Engineering,
Department of Highway and Railway Engineering, Budapest, Hungary

Summary

Material selection decisions in road infrastructure are increasingly dominated by a single metric: embodied carbon dioxide emissions. This mitigation-dominant logic, institutionalised through EPD-based (Environmental Product Declaration) green procurement frameworks, systematically underweights the safety dimensions of long-lived infrastructure. The article identifies four structural blind spots and proposes an integrated evaluation framework.

The shift toward asphalt reflects a rational — if incomplete — response to decarbonisation pressures. Since asphalt's cradle-to-gate (A1–A3) carbon footprint is roughly 35–70 kg CO₂e/tonne compared to 80–130 kg CO₂e/tonne for Portland cement concrete, EPD-based procurement structurally favours asphalt. However, this omits use-phase emissions driven by vehicle-pavement interaction, which account for 70–90% of asphalt's full life cycle carbon footprint.

The first blind spot is climate resilience. Asphalt's viscoelastic binder is highly temperature-sensitive: above 35–40 °C it shifts toward viscous flow, causing rutting that undermines drainage and structural integrity. Climate modelling projects a 9–40% increase in rutting over twenty years. During floods, bitumen-aggregate bond loss can be severe — the 2021 Ahrtal Valley disaster in Germany damaged over 74 km of road infrastructure and destroyed 62 of 112 bridges. Concrete offers greater stiffness under thermal loading and higher flood resilience due to its rigid matrix.

The second blind spot is supply security. Bitumen — a petroleum refinery residual — faces structural pressure as global oil demand peaks around 2030 and European refineries close. Central and Eastern European asphalt plants,

many of which relied on Russian pipeline gas before 2022, face dual geopolitical exposure in both raw material and thermal energy supply. Cement kilns are multi-fuel compatible, with over 40% of EU cement energy already sourced from waste-derived fuels or biomass. Biobitumen alternatives remain at laboratory scale: kraft-lignin production capacity stands at ~265,000 tonnes/year against 100–120 million tonnes of annual bitumen demand.

The third blind spot is methodological distortion. Cradle-to-gate EPD assessments ignore use-phase performance. Life cycle scenario analyses show that concrete's full carbon balance — accounting for albedo correction, less frequent maintenance, and longer service life — may be more favourable than asphalt's in warmer climates. Procuring more climate-vulnerable materials in the name of carbon reduction inadvertently undermines the resilience of critical networks.

The fourth blind spot is the risk management gap in deterministic life cycle cost analysis (LCCA). Standard models use fixed parameters, failing to capture energy price volatility, supply disruption risk, or deferred maintenance costs over a 35–50 year horizon.

The article proposes an integrated framework combining full life cycle carbon accounting (with albedo-corrected radiative forcing), standardised climate resilience indicators, bitumen supply chain vulnerability analysis under energy transition scenarios, and scenario-based LCCA ranked by robustness across at least three futures. The core argument is that decarbonisation which neglects adaptation, discounts supply security, and ignores deep uncertainty may produce infrastructure that fails precisely when climate stress is greatest.

Keywords: infrastructure safety, energy security, bitumen supply security, climate resilience, life cycle assessment

Bevezetés: amikor a mitigáció biztonsági kockázatot teremt

Felmerül a kérdés: vajon a szén-dioxid-kibocsátás csökkentése iránti törekvésünk nem éppen azokat az utakat teszi kevésbé ellenállóvá, amelyekkel a klímaváltozás okozta zavarokat szeretnénk megelőzni? Ez nem retorikai fordulat, hanem egy sürgető kérdés, amellyel az infrastruktúra-tervezők egyre inkább szembesülnek. Miközben az útgazdálkodók igazodnak az EU Zöld Megállapodásához és a nettó zero vállalásokhoz, egy aggasztó mintázat rajzolódik ki: a mitigációs törekvések elnyomják az adaptációs és ellátásbiztonsági szempontokat.

A közúti infrastruktúra klimatikus és energetikai döntési keretrendszere az elmúlt évtizedben látványosan átrendeződött. A szén-dioxid-számvitel három egymást erősítő csatornán keresztül vált domináns döntési szemponttá: az EU-taxonómia karbonintenzitási küszöbei, az ESG-reporting keretrendszerei és az EPD-alapú közbeszerzési rendszerek révén. E három csatorna egyike sem tekint ki az infrastruktúra-biztonság, az energiabiztonság vagy a forgatókönyvfüggő gazdasági elemzés dimenziójára.

Jelen tanulmány nem az aszfalt mint anyag ellen érvel, és nem a beton feltétel nélküli preferenciáját javasolja. Az érvelés strukturális: az egymutatós EPD-alapú optimalizálás négy biztonsági vakfoltot teremt, amelyek a jelenlegi döntési keretrendszerben rendszerszinten láthatatlanok.

Megjegyzés a magyarországi kontextushoz. A cikkben tárgyalt értékelési rendszerek – a környezeti terméknilylatkozatok (EPD), a zöld közbeszerzési keretrendszerek (LEED, CO₂ Performance Ladder) és az életciklus-költségelemzés (LCCA) – olyan nyugat-európai és észak-amerikai szabályozási környe-

zetben fejlődtek ki, ahol ezek az eszközök az útépítési döntéshozatal mindennapi részévé váltak. Magyarországon ezek a módszerek egyelőre nem részei sem a tervezési, sem a közbeszerzési gyakorlatnak. Ez az elmaradás azonban nem csupán hátrány: egyúttal ritka lehetőség is. Ha most, a hazai rendszerépítés kezdetén beépítjük az értékelési keretekbe a teljes életciklust, a klímaadaptációs szempontokat és a forgatókönyv-alapú gazdasági elemzést, olyan eszközöket hozhatunk létre, amelyek nem csupán a jelenlegi nemzetközi standardokat másolják, hanem túlmutatnak azokon.

A mitigációdomináns paradigma: hogyan vált a szén-dioxid a döntéshozatal egyetlen mércéjévé

A betonburkolatok jelenkori háttérbe szorulása a közlekedési infrastruktúrában nem véletlenszerű. Egy logikus – bár hiányos – válaszreakciót tükröz: a cementipar a globális CO₂-kibocsátás mintegy 7-8 százalékáért felelős (Ige-Kabeya 2025), így a betonburkolatok természetes célpontjai a szén-dioxid-csökkentési stratégiáknak. Az aszfaltkeverék cradle-to-gate (A1–A3) üvegházhatású gázkibocsátása hozzávetőlegesen 35–70 kg CO₂e/tonna, a portlandcement-alapú betoné 80–130 kg CO₂e/tonna, mindkét esetben erős függést mutatva a kötőanyag-tartalomtól és a gyártási technológiától (Moins et al. 2025; NRMCA 2022). Ez a jelentős különbség közvetlenül megjelenik a közbeszerzési döntésekben és a fenntarthatósági minősítésekben.

Az intézményi mechanizmusok ezeket a percepciókat szakpolitikai kényszerpályává alakítják. Az EU Fenntartható Tevékenységek Taxonómiája szigorú karbonintenzitási küszöbértékeket határoz meg, amelyek rendszer-

szinten hátrányosan érintik a betonburkolatokat. Az ESG-keretrendszerek a Scope 3 kibocsátások nyomán az anyagválasztást a rövid távon alacsonyabb karbonmérleget mutató megoldások felé terelik, függetlenül azok hosszú távú alkalmazkodási vagy ellátásbiztonsági teljesítményétől.

A zöld közbeszerzési rendszerek azonban döntően az EPD-k cradle-to-gate (A1–A3) fázisára támaszkodnak. Ez a módszertani szűkítés strukturálisan kedvez az aszfaltnak. Az MIT Concrete Sustainability Hub kutatásai szerint az aszfaltburkolat teljes életciklus-kibocsátásának 70–90 százaléka a használati fázisban keletkezik, főként a jármű-burkolat kölcsönhatásból (PVI) eredő többlet-üzemanyag-fogyasztás révén. Ez az arány a forgalomterheléssel együtt növekszik (Li et al. 2024), éppen ott, ahol az EPD-alapú értékelés vak. A beton tehát nem közvetlen büntetés, hanem egy olyan értékelési logika áldozata, amely a rövid távú gyártási lábnyomot jutalmazza, és ezzel strukturálisan hátrányba hozza a tartósabb, de gyártáskor CO₂-intenzívebb anyagokat.

Infrastruktúra-biztonság: a mitigáció-adaptáció paradoxon

A biztonságstudomány szempontjából a legkritikusabb kérdés: milyen fizikai ellenálló képességgel bírnak a preferált anyagok a klímaváltozás által egyre erősebbé váló, szélsőséges eseményekkel szemben? A válasz az aszfalt és a beton esetében szisztematikusan eltér.

Hőterhelés: szerkezeti sérülékenységi szélsőséges hőmérsékleteken

Az aszfaltburkolatok hőterheléssel szembeni sérülékenysége empirikusan jól dokumentált. Az aszfalt rugalmasságát biztosító bitumen viszkoelasztikus kötőanyag: mechanikai tulajdonságai erősen hőmérsékletfüggők. Amikor a léghőmérséklet tartósan meghaladja a 35–40 °C-ot – ami a jelenkori hőhullámok során egyre gyakoribb –, az anyag a rugalmas szilárdból a viszkózus folyadék irányába tolódik. Ennek következménye a nyomványúsodás: maradó alakváltozás, amely rontja a víz-elvezetést, csökkenti a csúszásellenállást, és felgyorsítja a további károsodásokat.

Klíma-modellezési vizsgálatok szerint az aszfaltburkolatok nyomványúsodása a hőmérséklet-emelkedés hatására 9–40 százalékkal növekedhet húsz év alatt, a klímamodellől és az alkalmazott predikciós modelltől függően (Gudipudi et al. 2017; Sias et al. 2025). Sötét felületű aszfaltok hőhullámok idején 60–80 °C-ra melegedhetnek fel, olyan hőmérsékleten, amelyen az anyag szó szerint nyomot hagy a gumiabroncsok alatt. Ez a sérülékenység kritikus infrastruktúra-biztonsági vetülettel bír: hőhullám idején – amikor a mentési és ellátási útvonalak terhelése a legnagyobb – az aszfaltburkolat éppen a legnagyobb szükség idején válhat üzemképtelenné.

A betonburkolat ezzel szemben merev kompozit: mechanikai tulajdonságai az üzemi hőmérséklet-tartományban kevésbé érzékenyek a hőmérséklet-változásra. A beton albedója (0,25–0,40) lényegesen magasabb a hagyományos aszfalténál (0,05–0,10), ami azonos nap-sugárzás mellett számottevően alacsonyabb felszíni hőmérsékletet eredményez (Alshayeb et al. 2021).

Árvízi ellenálló képesség és katasztrófabehelyzetek

Az intenzívebbé váló csapadékesemények kettős fenyegetést jelentenek az aszfaltburkolatokra. A repedéseken beszivárgó víz megbontja a bitumen-kőanyag kötést, a telített alaprétegek teherbírása pedig jelentősen csökken. Sultana és munkatársai kimutatták, hogy az árvízi előntés az alapréteg CBR-értékét akár 67 százalékkal csökkentheti, és az érintett szakaszokon korai rehabilitáció válik szükségessé (Sultana et al. 2016).

A 2021-es németországi árvizek nagy léptékben demonstrálták ezt a sérülékenységet: az Ahrtal 40 km-es előntött szakaszán összesen több mint 74 km közlekedési infrastruktúra (utak, ösvények és hidak) szenvedett kritikus károsodást, a 112 hídból 62 megsemmisült, a helyreállítás az egyes szakaszokon hónapokat, a vasúti és közúti infrastruktúra legsúlyosabban érintett elemein éveket vett igénybe (Koks et al. 2022). A merev beton-szerkezet – amennyiben az altalaj nem mosódott ki – a szilárdság visszaállása után kisebb beavatkozással üzemképesé tehető. Katasztrófavédelmi szempontból ez alapvető különbség: az aszfaltburkolat helyreállítása a bitumenellátási láncától függ, és rendszerint teljes szerkezeti beavatkozást igényel, míg a betonburkolat előntéses árvíz után hamarabb visszaadható a forgalomnak.

Energiabiztonság és stratégiai anyagfüggőség: a bitumen Achilles-sarka

Az aszfalt bitumentől való függése – amely a kőolaj-finomítás mellékterméke – stratégiai sérülékenység, amelyet a jelenlegi burkolatpolitika szisztematikusan figyelmen kívül hagy. Miközben a globális energiarendszer az olajkereslet csúcsa felé tart, az útépitést ellátó bitumenellátási lánc egyre erősebb nyomás alá kerül.

Az olajkereslet csúcsa, a finomítói bezárások és a kettős energetikai kockázat

A Nemzetközi Energiaügynökség előrejelzése szerint a globális olajkereslet 2030 körül mintegy 105,5 millió hordó/nap szinten tetőzik, majd csökkenhet (IEA 2025). Az IEA 2030-ig mintegy 1,6 millió hordó/nap finomítói kapacitás bezárását prognosztizálja, elsősorban Európában és Észak-Amerikában – éppen azokban a régiókban, ahol fejlett úthálózatok és magas aszfaltfelhasználás jellemző. A bitumen a kőolaj-finomítás legkisebb hozzáadott értékű maradéktermékei közé tartozik, és az

optimalizálási nyomás – a finomítók a jövedelmezőbb benzin- és dízelfrakciókat részesítik előnyben – folyamatosan szűkíti a bitumentermelés gazdasági mozgásterét. Az IEA előrejelzése szerint az európai és észak-amerikai finomítók strukturális visszaszorulása tovább nehezíti a stabil bitumenkínálat fenntartását ezeken a piacokon.

Az aszfaltgyártás energetikai kitettsége nem merül ki a bitumen alapanyag kőolaj-kitettségében. A közép-kelet-európai aszfaltkeverők nagy hányada 2022 előtt olcsó orosz csővezetékes földgázra támaszkodott. Ennek kiesése után az iparág egyszerre több korlátozott alternatíva között navigál: a nem orosz LNG strukturálisan drágább és infrastruktúra-függő; a fűtőolajra való visszatérés növeli az EU ETS-terheket; a biomassza-alapú megoldások regionálisan korlátozott kapacitásúak; a hidrogéntüzelés 2030–2035 előtt nem lépi át az ipari alkalmazhatóság küszöbét. Ez az aszfaltgyártás esetében kettős geopolitikai sebezhetőséget jelent – mind a nyersanyag-, mind a hőenergia-ellátás tekintetében –, amelyet a standard LCCA-modellek determinisztikus szerkezete nem képes számszerűsíteni.

Ezzel éles ellentétben áll a beton anyagbázisa és energiaellátása. A cementkemencék magas égési hőmérséklete miatt multi-fuel-kompatibilisek: az EU-ban az energiaszükséglet több mint 40 százaléka ma már hulladékból előállított tüzelőanyagból vagy biomasszából származik, egyes optimalizált létesítményekben ez az arány pedig a 80 százalékot is meghaladja. A mészkőkészletek évszázadokra elegendőek. A cementipar dekarbonizációs kihívása valós, de éghajlatvédelmi jellegű, nem ellátásbiztonsági.

A biobitumen-alternatíva korlátai

Az aszfalt mellett érvelők rendszerint a fejlesztés alatt álló biobitumen-alternatívákra hivatkoznak. Ezek az innovációk valóságos és támogatásra érdemesek, de a felskálázás kihívásai óriásiak: a jelenlegi biobitumen-termelés laboratóriumi léptékű, például a hasznosított kraft-lignin globális termelési kapacitása mindössze ~265 000 tonna/év (Dessbesell et al. 2020), miközben a globális aszfaltipar hozzávetőlegesen 100–120 millió tonna hagyományos bitument használ fel évente. Az európai aszfaltipari szövetség saját dekarbonizációs forgatókönyvében a bioalapú kötőanyagok arányát 2050-re is csupán 10 százaléknak tételi, ami a teljes kibocsátáscsökkentés mindössze 5,2 százalékát adná (EAPA 2024). Az az elképzelés, miszerint a biobitumen a század közepéig zökkenőmentesen kiváltja a kőolaj-bitument, optimista becslés.

EPD-módszertani vakfoltok és közbeszerzési döntési torzítás

A cradle-to-gate mérés strukturális torzítása

A jelenlegi EPD-alapú zöld közbeszerzési rendszerek egy módszertani szűkítésre épülnek: kizárólag az A1–A3 (gyártásig tartó) fázis emisszióit mérik. Ez a döntés

szisztematikusan félrevezető képet ad a hosszú élettartamú infrastrukturális anyagokról. Döntően a jármű-út-pálya interakció határozza meg a használati fázis emisszióit, amelyek az aszfalt esetében szignifikánsan nagyobbak, de az EPD-alapú értékelésben láthatatlanok.

Kontextusfüggő szenárióelemzések szerint a betonburkolat teljes életciklus-karbonlábnyoma – a kezdeti beépített CO₂ ellenére – kedvezőbb lehet az aszfalthoz képest, amennyiben figyelembe vesszük az albedó-korrekciót, a ritkább fenntartási beavatkozások szénlábnyomát és a hosszabb élettartamot. AzariJafari és szerzőtársai városi léptékű elemzése kimutatta, hogy forró éghajlaton a betonburkolat életciklus-szintű CO₂-egyenlege az aszfalthoz képest kedvezőbb, ha az albedóhatást is figyelembe vesszük (AzariJafari et al. 2021).

A közbeszerzési döntési torzítás következményei

Az EPD cradle-to-gate módszertanának korlátaiból eredő közbeszerzési döntési torzítás olyan értékelési keretet hoz létre, amelyben az anyagválasztás szisztematikusan az alacsonyabb kezdeti gyártási szénlábnyomú megoldások felé tolódik, függetlenül azok hosszú távú infrastruktúra-biztonsági, energiabiztonsági és gazdasági teljesítményétől. Ez a torzítás különösen aggasztó a kritikus infrastruktúra-védelmi kontextusban: amikor az EPD-alapú értékelés a hőhullámokkal és árvizekkel szemben sérülékenyebb anyagot preferálja, a közbeszerzési rendszer óhatatlanul csökkenti a kritikus közlekedési hálózatok ellenálló képességét.

Forgatókönyv-alapú LCCA mint kockázatmenedzsment-eszköz

A determinisztikus LCCA korlátai

Az LCCA a burkolati döntések standardizált gazdasági értékelési eszköze az európai és észak-amerikai hatóságoknál, amely a versengő alternatívák nettó jelenértékét hasonlítja össze 35–50 éves időtávon. Stabil piaci feltételek mellett az aszfalt jellemzően kedvezőbb LCCA-eredményt mutat, mivel az alacsonyabb kezdeti beruházási költség – autópálya-projektekben általában 10–25 százalékkal kevesebb, mint a betonburkolatnál – ellensúlyozza a sűrűbb felújítási ciklusok diszkontált kiadásait.

Ez az előny azonban érzékeny feltételezéseken nyugszik. A hagyományos melegaszfalt-technológia 150–180 °C-os keverési hőmérséklete és a bitumen kőolajhoz kötött ára együttesen energiaár-kockázatot teremt, amelyet a determinisztikus LCCA strukturálisan figyelmen kívül hagy: a jövőbeli karbantartási beavatkozásokat rögzített időpontokra és rögzített költségekre tervezi, miközben az energiaár-volatilitás, az anyagellátási kockázatok és a felfüggesztett karbantartásból eredő pályaromlás mind aszimmetrikusan rontják az aszfalt hosszú távú gazdasági pozícióját. Egy olyan 35–50 éves döntési horizonton,

amelyben az energiaátmenetnek nagyjából le kell zajlania, a „business as usual” LCCA-eredmény inkább a jelenlegi árviszonyok statikus vetítése, semmint megbízható kockázatbecslés.

A forgatókönyv-alapú megközelítés indokoltsága

A kockázatmenedzsment irodalmában széles körben elfogadott elv, hogy a hosszú élettartamú infrastrukturális döntéseket ne egyetlen jövőre optimalizálják, hanem a lehetséges jövőök széles terén biztosítsanak elfogadható teljesítményt. A bizonytalanság rendszerezett kezelésének fogalmi alapjait Walker és szerzőtársai rakták le (*Walker et al. 2003*). Az aszfalt gazdasági érvrendszere ezzel szemben egy hallgatólagos feltételezésen nyugszik: azon, hogy a gyakori, energiaigényes fenntartási beavatkozások több évtizeden keresztül megfizethetők és kivitelezhetők maradnak. A betonburkolat magasabb kezdeti beruházási költsége e feltételezések bizonytalansága ellen nyújthat részleges fedezetet.

A ma meghozott burkolati döntések 2070–2080-ig rögzítik az infrastruktúrát, potenciálisan átfedve az olajkereslet csúcsát, klimatikus billenőpontokat és geopolitikai átrendeződéseket. Ezen az időtávon a feltételek nem prognosztizálhatók kellő pontossággal. Az infrastrukturális előrejelzések már 10–30 éves horizonton is rendszeres és strukturális torzításokat mutatnak (*Flyvbjerg et al. 2003*), és az ötvenéves időtáv tovább mélyíti ezt a bizonytalanságot. A determinisztikus LCCA ebből következően nem semleges eszköz. Rögzített paraméterei implicit forgatókönyv-választást rejtenek, amely szisztematikusan kedvez az alacsony kezdeti beruházási költségű, de magasabb jövőbeli energiakitettséggű megoldásnak, és mindeközben sem a beton lock-in kockázatait, sem az aszfalt ellátási kockázatait nem kezeli explicit módon.

Integrált értékelési keret: biztonsági és reziliencia-szempontok beépítése

Az azonosított vakfoltok nem az EPD vagy az LCCA mint módszertan elvetését indokolják, hanem az értékelési tér kiterjesztését. Az 1. táblázat összefoglalja a jelen-

1. táblázat | A jelenlegi és a javasolt értékelési keretek összehasonlítása

Döntési dimenzió	Jelenlegi keretrendszer (EPD/ESG)	Javasolt integrált keretrendszer
Elsődleges mutató	Beépített CO ₂ (A1–A3)	CO ₂ + élettartam + reziliencia
Karbonszámítás hatóköre	Cradle-to-gate (A1–A3)	Cradle-to-grave (A1–C4 + D), albedóval
Gazdasági elemzés	Determinisztikus LCCA	Forgatókönyv-alapú LCCA (minimum három szcenárió)
Klimatikus kockázat	Nem számszerűsített	Standardizált reziliencia-mutatók
Ellátásbiztonsági elem	Hiányzik	Ellátási lánc sérülékenységi elemzése
Döntési logika	Egymutató-optimalizálás	Többkritériumos (MCDA, robusztusság)

legi és a javasolt értékelési keretek közötti különbségeket.

A javasolt integrált értékelési keret négy egymást kiegészítő pillérre épül. Az első pillér a teljes életciklus-karbonszámítás (cradle-to-grave, A1–C4 modulok és D), amely magában foglalja az albedóval korrigált sugárzási kényszert, ami a melegebb éghajlatú régiókban részben vagy egészében ellensúlyozhatja a beton kezdeti szénhátrányát. A második pillér a standardizált reziliencia-mutatók kidolgozása: nyomvályúsodási hajlam a várható hőhullám-gyakoriság függvényében; árvízi sérülékenység az elöntési tűrőképesség alapján; hőfáradással szembeni ellenállás. A harmadik pillér az ellátási lánc sérülékenységi elemzése: a bitumen rendelkezésre állásának modellezése az energiaátmeneti forgatókönyvek tükrében, a finomítói bezárási trendek és a biobitumen felskálázhatósága korlátainak figyelembevételével. A negyedik pillér a forgatókönyv-alapú LCCA: legalább három jövőállapot vizsgálata (BAU, irányított átmenet, zavarokkal terhelt jövő), az alternatívák rangsorolása nem egyetlen jövőbeni teljesítmény, hanem robusztusság alapján.

A 2. táblázat a két anyag főbb teljesítményjellemzőit hasonlítja össze biztonsági relevancia szerint.

2. táblázat | Az aszfalt és a beton összehasonlítása a biztonsági dimenziókban

Biztonsági dimenzió	Aszfalt	Beton	Szakpolitikai relevancia
Beépített CO ₂ (A1–A3)	~35–70 kg/tonna	~80–130 kg/tonna	Az EPD-alapú rendszerek az aszfaltot preferálják
Hőterhelés-érzékenység	Magas (nyomvályú 60–80 °C felett)	Alacsony (merev szerkezet)	Az EPD-rendszerek nem mérik
Árvízi ellenálló képesség	Alacsony (kötésgyengülés)	Közepes–magas (merev mátrix)	Az EPD-rendszerek nem mérik
Bitumenfüggőség	Teljes (kőolaj-finomítás mellékterméke)	Nulla	Az EPD-rendszerek nem mérik
Keverési hőenergia-ellátás	Gáz/olaj (kettős geopolitikai kockázat)	Multi-fuel-kompatibilis (TSR > 40%)	Az EPD-rendszerek nem mérik
Nyersanyag-ellátásbiztonság	Bitumen: csökkenő finomítói kapacitás	Mészkő: évszázados készletek	Az EPD-rendszerek nem mérik
Forgatókönyv-robusztusság	BAU-forgatókönyvben erős	Energiakorlátban erős	A standard LCCA nem modellezi

BAU: business as usual, TSR: termikus helyettesítési arány

A különböző mértékegységű kritériumok – szén-dioxid, reziliencia-pontszámok, ellátási kockázati indexek, euró különböző forgatókönyvekben – szintézisét a többkritériumos döntéstámogatás (MCDA) módszer-családjá biztosítja. Az AHP (Analytic Hierarchy Process) páros összehasonlítások révén meghatározza a súlyokat, és ellenőrzi azok konzisztenciáját; az ELECTRE és PROMETHEE outranking-módszerek kezelik a nem összevethető kritériumokat, anélkül, hogy erős összemérhetőséget feltételeznének. A módszer nem helyettesíti a normatív döntést, csupán láthatóvá teszi, hogy „mennyi reziliencia mennyi szén-dioxidot ér”, és az ellátásbiztonság milyen helyzetekben írja felül a költségminimalizálást.

Szakpolitikai következmények és ajánlások

Az elemzésből hat konkrét szakpolitikai ajánlás következik, az azonnal alkalmazható intézkedésektől a struktúrális reformok felé haladva.

1. Forgatókönyv-alapú LCCA kötelezővé tétele. Nagyobb infrastrukturális projektekben – különösen kritikus infrastruktúra-kategóriájú útszakaszokon – elő kell írni, hogy a burkolati alternatívákat legalább három gazdasági jövőre értékeljék (stabil környezet, mérsékelt zavarok, súlyos zavarok), nem csupán egyetlen determinisztikus előrejelzés alapján.
2. Nemzeti bitumenellátás-biztonsági auditok rendszer elvégzése. A közlekedési hatóságoknak és az energiabiztonságért felelős szervezeteknek közösen kell elvégezniük a belföldi és import bitumen 2050-ig várható elérhetőségének elemzését, számszerűsítve az ellátási koncentráció kockázatait és az árvolatilitás kitettségét.
3. Az értékelés kiterjesztése a teljes életciklusra. Az A1–A3 fázisú EPD-adatok kizárólagos használata helyett olyan projektszintű életciklus-értékelés előírása szükséges, amely a használati fázis emisszióit – járműüzemanyag-fogyasztás, fenntartási beavatkozások szénlábnyma, albedóhatás – is számszerűsíti, összhangban az EN 15804+A2 és az EN 17472 szabvány teljes hatókörével.
4. Tüzelőanyag-diverzifikáció ösztönzése az aszfaltszektorban. A közbeszerzési feltételrendszerbe be kell építeni az aszfaltkeverő üzemek tüzelőanyag-rugalmasságának igazolását: a pályázók igazolják, hogy keverőüzemük legalább két független tüzelőanyagforrásra képes átváltani, vagy hogy a termikus helyettesítési arány (TSR) eléri a meghatározott minimumküszöböt.
5. Rezilienciaindítók integrálása az értékelési rendszerekbe. Az EU-taxonómia kötelező érvényű uniós jogi eszköz, ezért ebben az esetben a módosítás jogalkotási úton, a fenntartható infrastruktúra technikai vizsgálati kritériumainak felülvizsgálatán keresztül érhető el. A hőtürési, árvízi ellenállási és élettartam-mutatók beépítése a folyamat keretében javasolható.

6. Térbeli differenciálás a kritikus infrastruktúra védelmében. A beton előnyben részesítése indokolt olyan útszakaszokon, amelyeket a nemzeti kritikus infrastruktúra-nyilvántartás kiürítési útvonalként vagy elsőbbségi helyreállítási folyosóként azonosít; illetve olyan városi főutakon, ahol az önkormányzat hősziget-mérséklési stratégiája ezt előírja.

A 3. táblázat foglalja össze az anyagválasztás forgatókönyvfüggő logikáját.

3. táblázat | Anyagválasztási logika alternatív jövőforgatókönyvekben

Forgatókönyv	Energiaárak	Ellátásstabilitás	Preferált értékelési logika
BAU (szokásos üzletmenet)	Stabil	Stabil	Karbonminimalizálás (A1–A3)
Irányított átmenet	Mérsékelt emelkedő	Bizonytalan	Vegyes kritériumok
Zavarokkal terhelt jövő	Volatilis	Töredezett	Robusztusság, ellátásbiztonság

Következtetések

A ma meghozott közúti infrastrukturális döntések 2070–2080-ig meghatározzák. A biztonságtudomány perspektívájából az egymutatós, EPD-alapú döntési logika implicit kockázatvállalást jelent: arra fogad, hogy az energiaátmenet zökkenőmentes lesz, az erőforrás-ellátás stabil marad, és a klímahatások kezelhetők lesznek. Éppen ezek az előfeltevések indították el a dekarbonizációs törekvéseket.

Az útburkolat-politika biztonsági megközelítése annak felismerése, hogy a hosszú élettartamú kritikus infrastruktúrák anyagválasztása egyszerre döntés a mitigációról, az adaptációról, az ellátásbiztonságról és a gazdasági robusztusságról. A jelenlegi keretrendszer ebből a négy dimenzióból csak az elsőt veszi számba, és ezzel akaratlanul is aláássa a döntések minőségét a többi háromban.

A dekarbonizáció nem alku tárgya. De az a dekarbonizáció, amely elhanyagolja az adaptációt, leértékeli az ellátásbiztonságot, és nem kezeli a mély bizonytalanságot, rosszul végrehajtott dekarbonizáció: olyan infrastruktúrát teremt, amely éppen akkor vallhat kudarcot, amikor a klímaterhelés a legnagyobb.

Irodalomjegyzék

- Alshayeb, M. et al. (2021) Effects of Albedo and Thermal Inertia on Pavement Surface Temperatures with Convective Boundary Conditions – A CFD Study. *Processes*, Vol. 9. No. 11. Article No. 2078. <https://doi.org/10.3390/pr9112078>
- AzariJafari, H., Xu, X., Gregory, J. & Kirchain, R. (2021) Urban-scale evaluation of cool pavement impacts on the urban heat island effect and climate change. *Environmental Science & Technology*, Vol. 55. No. 17. pp. 11501–11510. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00664>

- Dessbesell, L., Paleologou, M., Leitch, M., Pulkki, R. & Xu, C. C. (2020) Global lignin supply overview and kraft lignin potential as an alternative for petroleum-based polymers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 123. Article No. 109768. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109768>
- EAPA (2024) Towards Net Zero: A Decarbonisation Roadmap for the Asphalt Pavement Industry. European Asphalt Pavement Association. <https://eapa.org/towards-net-zero-view-online> [Letöltve: 2026. 03. 05.]
- Flyvbjerg, B., Bruzelius, N. & Rothengatter, W. (2003) *Megaprojects and Risk: An Anatomy of Ambition*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107050891>
- Gudipudi, P. P., Underwood, B. S. & Zalgout, A. (2017) Impact of climate change on pavement structural performance in the United States. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 57. No. 1. pp. 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.022>
- IEA (2025) *Oil 2025: Analysis and Forecast to 2030*. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/oil-2025> [Letöltve: 2026. 03. 05.]
- Ige, O. E. & Kabeya, M. (2025) Decarbonizing the Cement Industry: Technological, Economic, and Policy Barriers to CO₂ Mitigation Adoption. *Clean Technology*, Vol. 7. No. 4. Article No. 85. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7040085>
- Koks, E. E., van Ginkel, K. C. H., van Marle, M. J. E. & Lemnitzer, A. (2022) Brief communication: Critical infrastructure impacts of the 2021 mid-July Western European flood event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 22. No. 12. pp. 3831–3838. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-3831-2022>
- Li, H., AzariJafari, H., Gregory, J. & Kirchain, R. (2024) Development of a streamlined framework for probabilistic and comparative life cycle assessment of road pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 209. Article No. 107802. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107802>
- Moins, B., Hernando, D., Seghers, D., Van den Bergh, W. & Audenaert, A. (2025) Establishing greenhouse gas emission benchmarks for the asphalt industry – Are short-term reduction targets feasible using current practice or are more extensive measures needed? *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 212. Article No. 107994. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107994>
- NRMCA (2022) *A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Ready-Mixed Concrete – LCA Report Version 3.2*. National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, MD. *NRMCA_LCAReportV3-2_20220224.pdf* [Letöltve: 2026. 03. 05.]
- Sias, J. E. et al. (2025) Climate change impacts on roadways. *Nature Reviews Earth & Environment*, Vol. 6. pp. 555–573. <https://doi.org/10.1038/s43017-025-00711-9>
- Sultana, M., Chai, G., Chowdhury, S. & Martin, T. (2016) Deterioration of flood affected Queensland roads – An investigative study. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 9. No. 6. pp. 424–435. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.10.002>
- Walker, W. E., Harremoes, P., Rotmans, J., Van der Sluijs, J. P., Van Asselt, M. B. A., Janssen, P. & Kreyer von Krauss, M. P. (2003) Defining uncertainty: A conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integrated Assessment*, Vol. 4. No. 1. pp. 5–17. <https://doi.org/10.1076/iaij.4.1.5.16466>