

Az Aszfalt

A Magyar Aszfalttipari Egyesülés

híradó

hivatalos lapja

XXXIII. ÉVFOLYAM 2026/1. szám



A Finn Út Kft. maró gépe munka közben. Részletek a 28. oldalon.



Asphalt 100% recyclable



Az aszfalt 100%-ban
újrahasznosítható

2026
június

Tisztelt cégvezető kollégák, HAPA tagok, fiatal útépítők, mérnökök!

Tizenkilencedik alkalommal invitáljuk, pályakezdő kollégáinkat a HAPA

FIATAL MÉRNÖKÖK FÓRUMÁRA

**2026 november 17-én kedden,
a budaörsi Hotel Holiday Inn konferenciatermébe.**

Eredeti célkitűzésünk nem változott! Prezentációs lehetőséget kívánunk biztosítani a frissen, vagy néhány éve végzett, 35 évnél fiatalabb mérnökök, útépítéssel, vizsgálatokkal tervezéssel foglalkozó technikusok, szakemberek számára.

Az előadók között, a közönség szavazatai alapján öt díjat adunk ki, amelyek jellemzően szakmai tanulmányutakat, vagy külföldi és hazai szakmai rendezvényen való térítésmentes részvételt jelentenek.

Kérem tagvállalatainkat, hogy ösztönözzék a fiatal szakembereiket előadás tartására, mert úgy gondoljuk, hogy a rendezvénynek a hagyományos céljainkon túl, szakmában tartó hatása is van.

Jelentkezés, érdeklődés esetén kérem hívja a **+36 30 93 62 743** telefonszámot, vagy írjon az **info@hapa.hu** e-mail címre.

Az online jelentkezési lehetőséget hamarosan közre adjuk, illetve a HAPA honlapján is megjelentetjük. Onnan letöltve lehet elküldeni az előadói, illetve a részvételi jelentkezéseket.

Egyúttal szeretném felhívni a figyelmet a XXVII.Nemzetközi HAPA Konferenciára, melyet szintén a szokásos helyszínen a siófoki Azúr Hotelben tervezünk megtartani, **2027. február 16-17-én**. Kérem, jegyezzék elő a dátumot!

A fő témákat hamarosan közzé tesszük, hogy az előadók készülni tudjanak

Üdvözlettel
Veress Tibor
igazgató
Magyar Aszfaltipari Egyesülés





A Magyar Aszfaltipari Egyesülés (HAPA) hivatalos szakmai lapja.

Szerkesztőség:

Magyar Aszfaltipari Egyesülés
H-1119, Budapest Etele u. 59-61.
Telefon: +36 1 7821-893
Fax: +36 1 7822-008
E-level: info@hapa.hu
Internet: <http://www.hapa.hu>

Alapító főszerkesztő:

Dr. Bodnár Géza

Főszerkesztő: Veress Tibor

Nyomdai előkészítés és nyomás:
COLOR Reklámstúdió-www.silbernyomda.hu

Hirdetésfelvétel:

Magyarországon a szerkesztőségben

Terjesztés: a szerkesztőségen keresztül
2500 Ft/példány+postaköltség

ISSN 1217-7830

TARTALOMJEGYZÉK

Szabó Ákos —

Városi hőszigetek klimatikus hatásainak mérséklési lehetőségei 4

Rosta Szabocs —

Viszkózitásalapú mérési módszerek összehasonlító elemzése az útépitési bitumenek magas használati hőmérsékleti tulajdonságainak meghatározására 29

Karoliny Márton —

A nagy tömörségű aszfaltokról 37

Anja Sörensen —

Bitumen életciklus-értékelése 58

dr. Tóth Csaba – dr. Primusz Péter —

Autópályák hálózati szintű teherbíróképesség-értékelése
Curviameter és FWD mérések alapján 64

Troják Csaba —

Bitumen tapadóképségének vizsgálata és digitalizálása 73

Kedves Kollégák!

Az elmúlt évben Magyarország aszfalt termelése 3.486 ezer tonna volt, aminél kevesebbet utoljára 2017-ben gyártottunk. Ez a csökkenő termelés a HAPA tagoknál is érezhető volt, ami nagyon fontos a tagsági díjak enyhe csökkenése miatt is. Mi a tagjaink által fizetett tagdíjakból élünk, és az Önök teljesítménye a mi bevételeinkre is hatással lehet. Minden tagunknak sikeresebb évet kívánunk 2026-ra.

Mi magunk óvatos gazdálkodással vészeltük át a 2025-ös évet. Mindkét konferenciánkat sikerült megtartanunk. A 19. Fiatal Mérnökök Fórumán 105 fő vett részt, a XXVI. HAPA konferenciára pedig 227 -en voltak kíváncsiak. A Konferenciáink is jól szolgálták a céljainkat, a műszaki fejlődésünk támogatását.

Az újságunk 800 példányban készül, de nem csak papír ala-

pon, hanem a honlapunkon is megtekinthető, amit minden érdeklődő szabadon letölthet.

Köszöntöm az új tagunkat, a STRABAG Aszfalt Kft.-t!

Két tervezett programunkra szeretném a figyelmüket felhívni, melynek beharangozója a lapunk második oldalán látható:

- A 20. Fiatal Mérnökök Fórumára, amelynek helyszíne a Budaörsi Holiday Inn Hotel lesz, 2026. november 17.-én kedden.
- Már most jegyezzék elő a HAPA XXVII. konferenciájának időpontját, amit 2027. február 16-17.-én tervezünk megtartani.

Veress Tibor
igazgató

Városi hőszigetek klimatikus hatásainak mérséklési lehetőségei

Szabó Ákos

Úttervező mérnök
Ittész Mérnökiroda Kft.



1. Bevezetés

A városi hősziget jelensége napjaink egyik kiemelkedő klimatikus problémája, amely jelentős hatással van az emberi életminőségre, a környezeti állapotra és az infrastruktúrára (Uzzoli et al., 2019; Santamouris, 2015; Chen et al., 2009). Ez az effektus az épített környezetek és a természetes felületek arányának a módosításából, valamint az emberi tevékenységek által kibocsátott hulladékhőből ered. Ezek együttes hatására a városi területeken magasabb hőmérséklet alakul ki a környező vidéki régiókhoz képest (Ibrahim et al., 2018). A témakör különböző területein készült kutatások rávilágítanak arra, hogy ez a megnövekedett átlaghőmérséklet a háztartások víz-, és energiaigényének a fokozódását is előidézi, emellett pedig az emberi szervezetre is káros hatást gyakorol (Aggarwal et al., 2012; Santamouris et al., 2015; Páldy és Bobvos, 2008). Tovább fokozza a

probléma mértékét az urbanizáció erősödése, mivel a jobb megélhetés reményében egyre többen költöznek be a nagyvárosokba, aminek hatására nő az érintettek aránya (Stempihar et al., 2012).

Ennek a jelenségnek a negatív hatásai hazánkban is egyre inkább megfigyelhetők. Emellett a klímaváltozás kapcsán készült mérések azt az eredményt mutatják, miszerint az átlaghőmérséklet emelkedése Európában gyorsabb ütemben zajlik a globális átlaghoz képest, ami miatt fontos, hogy mielőbb megoldást találjunk ezekre a problémákra. Ezt jól mutatja az is, hogy a legutóbbi 40 évben például a hóhullámos napok száma (a napi átlaghőmérséklet eléri a 25 °C-ot) a dél-alföldi régióban két héttel megnövekedett, de az ország teljes területén jelentős melegedés figyelhető meg (Wagner et al., 2021).

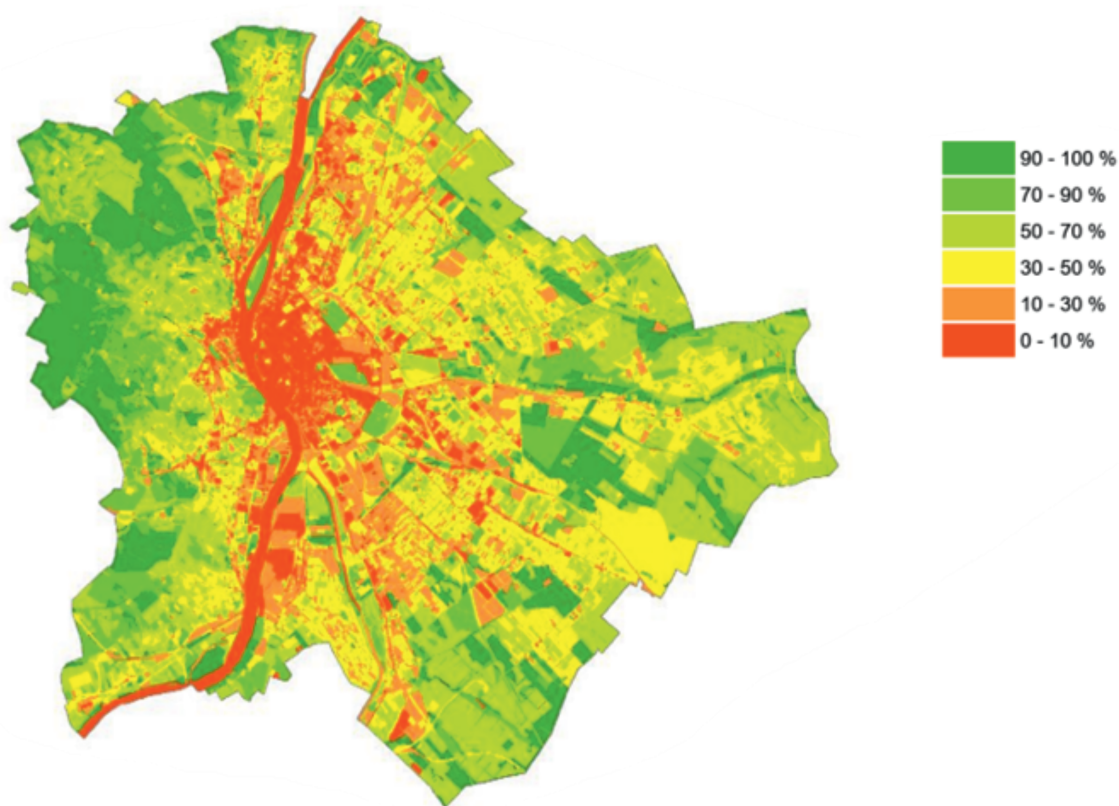
2. Városi hősziget jelensége

Az éghajlatváltozás önmagában egy természetes folyamatnak tekinthető, ellenben a mai kor embere egyre inkább szembesül a felismeréssel, hogy a környezetre gyakorolt hatások ezt a változást nem csak felgyorsítják, de lokálisan képesek felerősíteni is annak hatását (Santamouris, 2015). Ilyen lokális hatás a városi hősziget (VHSZ) jelensége is, ami egy vízszintes, függőleges és időbeli dimenzióval rendelkező hőanomália, amely jellemzően az urbanizált terü-

leteken jelentkezik (Oke, 1982). Azonban ez a probléma nem csak hazánkat fenyegeti. Globálisan több, mint 400 nagyváros szenved a városi hősziget hatásától (Santamouris, 2015), ami átlagosan 2-8 °C-os többlethőmérsékletet jelent adott területen (Gorsevski et al., 1998). A megfigyelések és mérési eredmények alapján jól látszódik, hogy ennek a jelenségnek a létrejötté elsősorban az urbanizációval hozható összefüggésbe. Ezt Luke Howard is észre-

vette már az 1818-as évben, amikor London klímáját tanulmányozta (Gartland, 2012). Megállapította, hogy a városban az emberi tevékenységek és beépítettség következtében melegebb van, mint a vidéki régiókban. Ugyanerre a felfedezésre jutott Emilien Renou a 19. század második felében Párizsban (Ibrahim et al. 2018). Ahogy a népesség száma folyamatosan növekszik és világszerte megfigyelhető a tendencia a városokba történő beköltözés tekintetében, úgy egyre fontosabbá válnak a természeti környezetbe való emberi beavatkozások hatásai. Általánosságban elmondható, hogy az emberi tevékenységek az anyagok és az energia körforgásának nagymértékű megváltoztatásával módosítják a természetes ökoszisztémát. Az eredetileg füves és erdős területeket jellemzően valamilyen burkolt felület váltja fel, legyen az aszfalt-, betonburkolat vagy az épületek tető-

fedő anyagai. Ennek következtében az eredetileg látens hő (halmazállapotváltozás során felszabaduló vagy elnyelt energia, mely nem okoz hőmérsékletváltozást az adott anyagban) tartalmazó anyagokat, látens hőt nem tartalmazó, de nagy fajlagos hőkapacitással rendelkező anyagok váltják fel (Oke, 1982). Ezt jól szemlélteti a 2015-ben közzétett kutatási eredmény, miszerint Budapest esetében a zöldterület intenzitás aránya átlagosan 52 %-ra tehető, ami a belvárosi részekben még ettől is kritikusabb, körülbelül 0-30 % közötti érték (Budapest Fővárosi Önkormányzat, 2020). Ennek a zöldfelületi intenzitásnak az eloszlását szemlélteti az 1. ábra:



1. ábra: Zöldfelületek intenzitása Budapest területén 2019-2020.
[Forrás: Budapest Fővárosi Önkormányzat, 2020]

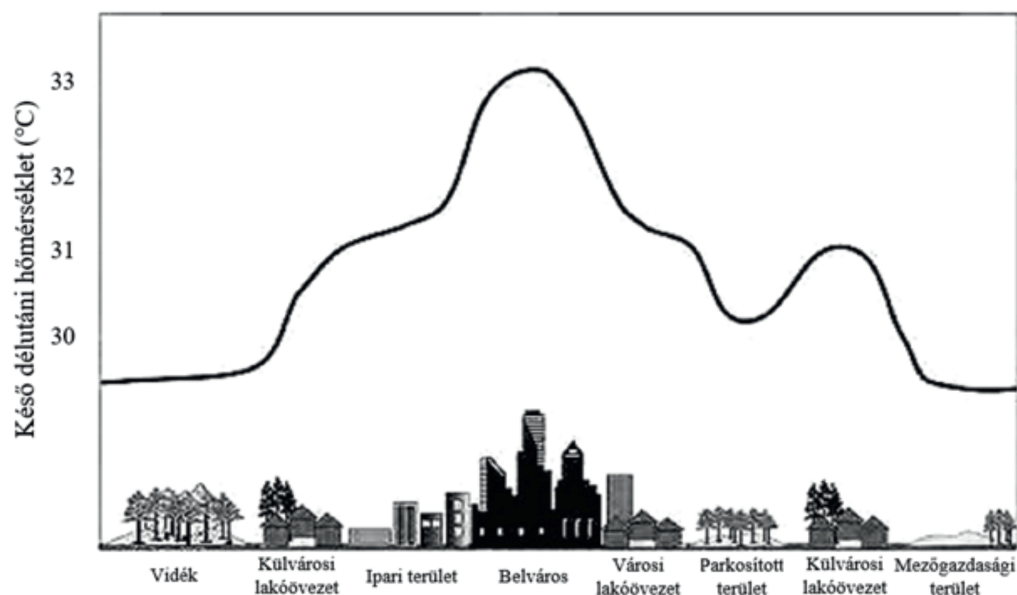
A közvetlen napsugárzásnak kitett sötét, száraz burkolatok, amelyek ezeket a területeket nagy mértékben borítják, akár 70°C-os hőmérsékletet is elérhetnek a legmelegebb órákban, ami 1 másodperc leforgása alatt képes égési sérülést okozni, ha szabad bőrfelülettel érintkezik (American Concrete Pavement Association, 2009). Ezzel szemben a növényzettel borított nedves talajok hasonló feltételek mellett mindössze 18°C-os hőmérsékletet érnek el (Gartland, 2012).

Jól látható, hogy a városi hősziget jelenségének kialakulása egy adott területen rendkívül összetett, sok egymástól függetlennek látszó tényezőnek az együttes hatása generál ilyen kiugróan magas hőmérséklet különbségeket. Mint azt már korábban is említettem az egyik ilyen fő tényező a városi környezet kialakítására használt építőanyagok és bur-

kolatok típusa és területi kiterjedése. Ezek az anyagok jellemzően alacsony albedóval (a felületről visszavert sugárzás és a rá érkező sugárzás hányadosa, aminek értéke 0 és 1 közötti lehet, mivel a felületre érkező sugárzás mennyisége soha nem lehet több, mint a rá érkező sugárzás mennyisége) rendelkeznek. Ez az érték az aszfalt esetében 0,05 és 0,27 közötti, míg a beton esetében valamennyivel magasabb 0,10 és 0,35 között változik (Stewart és Mills, 2021). Elég szemléletesen tükrözi az adott anyagokkal szemben megfigalmazott problémát ez a mérőszám, hiszen egy rendkívül kedvezőtlen aszfalt kopóréteg képes a beérkező napsugárzás 95%-át is elnyelni. Ez az elnyelt hőmennyiség a nappali órákban az adott pályaszerkezetet fokozatosan átmelegíti, így az alsóbb rétegek is elősegítik a tárolást. Amikor a beérkező sugárzás megszűnik és a külső hőmérséklet csökkenni

kezd, akkor a nappali órákban elraktározott hőmennyiséget a pályaszerkezet elkezd visszacsugározni a levegőbe, ezzel is nehezítve az éjszakai lehűlést a városokban (Katzschner, 2009). Tovább nehezíti ezt a helyzetet az is, hogy a felszínre érkező csapadék a lehető leggyorsabb módon, többnyire egyesített rendszerekben kerül elvezetésre a városi területeken. Ennek következtében a párolgás szinte el sem tud kezdődni, vagy olyan hamar végbemegy annak a minimálisan fennmaradó mennyiségnek az elpárolgásával, hogy a burkolatot nem képes kellőképpen lehűteni (Bartholy et al., 2013).

Megfigyelhető tehát, hogy a városi hősziget jelensége jellemzően a sűrűn beépített területeken és a külvárosi részen feje ki hatását. Ennek intenzitása azonban nem egyenletesen oszlik meg a településeken belül. Egy, a vizsgálat tárgyát képező nagyvárosban belül is érzékelhető, hogy a nagyobb kiterjedésű parkok és tavak területei jellemzően hűvösebbek, mint az azt körülvevő utcák. Ezek a területek úgy viselkednek a városi környezetben belül, mint az oázisok a sivatagokban. Megerősítve ezen állításokat a 2. ábra jól szemlélteti, hogy adott területek között mekkora hőmérsékletkülönbségek adódhatnak.



2. ábra: Városi hősziget előfordulási helyei
[Forrás: Katzschner, 2009]

Ez a különbség nem csak a nappali hőmérsékletben mutatkozik meg. Az éjszakai lehűlés során is mértékadó eltérések figyelhetők meg, hiszen a zöldfelületek és a

mesterséges burkolatok eltérő mennyiségű hőenergiát raktároznak el a nappali órákban, amit később visszacsugároznak a levegőbe (Ibrahim et al., 2018).

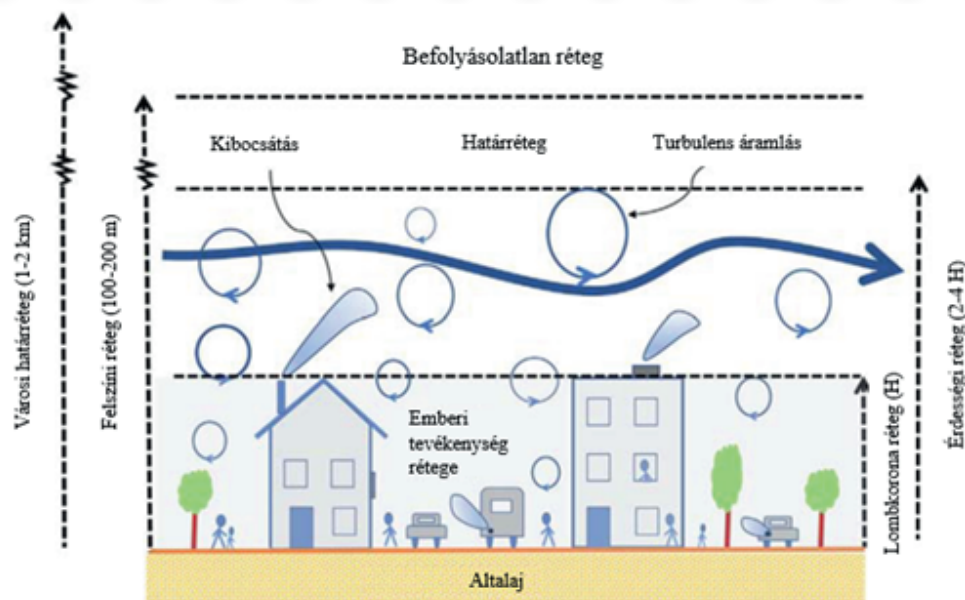
2.1. Városi hősziget rétegei

A városi hősziget legegyszerűbb módon úgy definiálható, miszerint ez a jelenség megmutatja számunkra a városi-, és a környező természetes területek hőmérséklete közti különbséget. Ez azon az elven alapul, hogy a referenciaként vett természetes táj képviseli azt a hőmérsékletet, ami a város helyén lenne, ha nem történt volna urbanizáció. Mivel ez a jelenség egy területileg nagy kiterjedéssel rendelkező tartományon mozog, ezért több olyan rétegre bontható fel, ami a működésének megértését és a pontos mérési lehetőségek megteremtését szolgálja:

1. A lombkorona szintű VHSZ a tetőmagasság alatt mért felszínközeli levegő hőmérsékletén alapul;
2. A határszintű VHSZ a városokban az épületek magassága felett jóval magasabban mért levegő hőmérsékletén alapul;

3. A felszíni VHSZ a háromdimenziós városi felszín – azaz a talaj, a falak és a tetők – hőmérsékletén alapul;
4. Az aljzati VHSZ a talajfelszín alatti talaj hőmérsékletén alapul.

A felsorolt rétegek közül az emberi tevékenységek szempontjából a legfontosabb a lombkorona szintű VHSZ. Ezt a talajszinttől mért 2,0 méteres magasságban tanulmányozzák, mivel a hétköznapi cselekedetek jellemzően ezen a magassági tartományon kapnak teret, így ez a réteg az, ami napi szinten hatást gyakorol az emberi életre (Roesler és Sen, 2016).



3. ábra: Városi hősziget rétegei
[Stewart és Mills, 2021]

Azonban a 3. ábra jól szemlélteti, hogy a városi hőszigetek hatására sajátos városi szélrendszer alakulhat ki, ez az ún. „friss levegőt hozó szellő”. Ez egy termikusan indukált helyi szélrendszer, amit a városi és a vidéki területek energiaháztartásbeli eltérése által keletkező nyomáskülönbségek hoznak létre (Probáld, 1974). Ezen felül a légáramlás sajátosságainak tekintetében az is megfigyelhető, hogy a sűrűn beépített épületek és szűk utcák, egyfajta kanyonhatást képesek generálni, ami akadályozza a természetes szellőzést, így a szennyező anyagok és a hő felhalmozódik ezeken a területeken (Akbari et al., 2016). Az épületek emellett az évi átlagos szélességet is befolyásolják a felszín közelében, megközelítőleg 20-30 %-kal csökkentve azt. A heves szellőkések esetében ez az érték valamivel kisebb, 10-20 %

körüli. Ez azonban nem mindig érzékelhető, hiszen a nagytérségű szél sebességének csökkenésével, a város által okozott nagyobb termikus különbségek hatására megnövekszik a függőleges kicserélődést végrehajtó légáramlat intenzitása, amely a felszín közeli szélességet növeli. A budapesti mérések alapján ez a csökkenés abban az esetben érzékelhető a tetőszint feletti szélesség esetében, ha a városkörnyéki érték meghaladja a 1,5-3,5 m/s-os sebességet (Probáld, 1974). Megfigyelhetjük tehát, hogy a városi hősziget kialakulásának a lehetősége és annak intenzitása nagyban függ a szélességtől. Budapest esetében az az érték, ami mellett nincs lehetőség arra, hogy önálló városi hősziget jöjjön létre kb. 10 m/s körül alakul (Szepesti és Schirokné, 1999).

2.2. A városi hősziget hatása

A városi hőszigetekről korábbiakban felvázolt kép alapján jól látható tehát, hogy egy rendkívül összetett és egyre gyakoribb jelenségről beszélünk. Fő kiváltó okának bizonyult az urbanizációs törekvések során kialakított léttér, mely jellemzően sűrűn beépített, összefüggő burkolt felületekben nyilvánul meg. Azt is megfigyelhetjük, hogy ez a probléma kihatással van a mindennapi emberi tevékenységekre, hiszen területileg olyan helyeken alakul ki, ahol nagy számban élnek életvitel szinten, és saját bőrükön tapasztalják ennek a jelenségnek a negatív hozadékát. Az egyik ilyen észrevehetően kiugró változás az energiafelhasználás terén jelentkezett. Megfigyelhető, hogy a megnövekedett átlagos hőmérséklet a városi területeken megközelítőleg 0,45-4,60 %-kal növeli a felhasznált energiamennyiséget minden 1°C után. Ez, ha belegondolunk abba, hogy napjainkban átlagosan 2-8 $^{\circ}\text{C}$ körül adódik a városi hősziget okozta többlethőmérséklet, akkor könnyen kiszámítható, hogy egy szélsőséges esetben akár 37%-os többletenergiát is jelenthet adott területen (Santamoris et al., 2015). Az energiaigény megnövekedése mellett az

is megfigyelhető, hogy a városi hősziget napnyugta után 2-3 órával elkezd kifejteni a hatását, ezzel gátolva az éjszakai lehűlést, akkor a használati víz mennyiségét is növeli a háztartásokban. Ennek értéke minden 1°C -os többlethőmérséklet után 2,5-5%-kal növekszik (Aggarwal et al., 2012). Ez jellemzően az általános hőérzet csökkentésére irányuló törekvések-re vezethető vissza.

Jól látható, hogy a klímaváltozás és a városi hősziget jelenségének együttes hatása rendkívül sok területen jár negatív hozadékokkal. Mindazok mellett, melyek a korábbiakban már említésre kerültek, talán az egyik legfontosabb problémának az emberi egészségre gyakorolt hatás tekinthető. Az ENSZ Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) jelentése alapján, a már bizonyított hatások a lehetséges jövőbeli változások és alkalmazkodási lehetőségek figyelembevétele mellett az éghajlatváltozást a 21. század legnagyobb környezet-egészségügyi veszélyének tekinti, mely a világ országait és a helyi közösségeket egyaránt érinti (IPCC 2014).

Már a 20. század második felében is megfigyelhető volt, hogy a hőhullámok száma és gyakorisága jelentősen megnőtt Európa szerte. Ez a 2000-es év óta több tízezer korai halálesettel hozható összefüggésbe. Számos kutatás bizonyította, hogy az éghajlatváltozás okozta sérülékenység egyik formája a hőmérséklet-emelkedéssel járó hőhullámok számának, gyakoriságának és hosszának növekedése, ami az elkövetkezendő évtizedekben még tovább fog súlyosbodni (Trenberth et al., 2012).

A közvetlen és közvetett egészséghatások minden lakost egyaránt érintenek, de vannak a társadalomban olyan rétegek, melyek ezekre a hatásokra jóval érzékenyebbek. Ide sorolhatók például az 5 év alatti gyermekek, a 60 év feletti idősök, a krónikus betegségekben szenvedők, de akár a szabadban dolgozó munkások is (Uzzoli et al., 2019). Megfigyelhető, hogy a tartós hőhullámok esetén nem csak a megbetegedési, de a halálozási valószínűségek is növekednek. 2007-ben például egy intenzív hőhullám során a többlethalalozás országos mértéke kb. 800-1000 főre volt becsülve (Páldy és Bobvos, 2008). Továbbá az is megállapításra került, hogy a napi középhőmérséklet 5°C-kal való emelkedése 6%-kal növeli a halálozást és 10%-kal a keringési rendszer betegségeinek kockázatát. 10°C-os emelkedés esetén pedig a szív- és érrendszeri betegségek miatti mentőhívások nyáron 6%-kal növekednek meg. Jól mutatják a statisztikák azt is, hogy a rosszullét kockázata minden korcsoport esetén 30%-kal nő-

vekszik ilyen szintű középhőmérséklet emelkedés mellett és a balesetek relatív kockázata is fokozódik az 5-9 évesek között 40, a 25 évesnél idősebb korosztálynál pedig 17%-kal (Páldy et al., 2004a, b; Kishonti et al. 2007; Páldy és Bobvos, 2011, 2013, 2014). Természetesen az itt felsorolt tényezők mellett még sok másik probléma is jelentkezik a társadalom egészségi állapotát tekintve. A korábban már említett közvetlen hatások között szereplő napszúrás, hőséguta és hőségörcs valószínűsége is nagyobb, de a dehidratáltság, a szédülés és migrénes problémák is nagy számban jelentkezhetnek ilyen esetekben. Ezek mellett az is jelentős problémát okoz, hogy az éjszakai lehűlés amennyiben a városi hősziget hatása miatt nem valósul meg és ennek következtében huzamosabb ideig nem megy 25-30°C alá a hőmérséklet, akkor az hőstressz kialakulásához vezethet, ami nem engedi kellő mértékben regenerálódni az emberi szervezetet, aminek hatására kimerültség, ingerültség és figyelemzavar léphet fel (Musco, 2016). Ezeknek a felsorolt problémáknak a mérséklésére a társadalmat hatékonyan kell informálni a hőhullámok egészségre gyakorolt hatásairól és gyakorlati javaslatot kell közölni a hőséguta megelőzésére. Emellett az egészségügyi rendszerek éghajlatváltozással kapcsolatos felkészültségét és alkalmazkodóképességét is lehetővé kell tenni, annak érdekében, hogy a megnövekedett kapacitásigényt a hosszan tartó kánikulák idején megfelelő feltételek mellett legyenek képesek kiszolgálni (Musco, 2016; Uzzoli et al., 2019).

3. Burkolatok szerepe a városi hősziget jelenségében

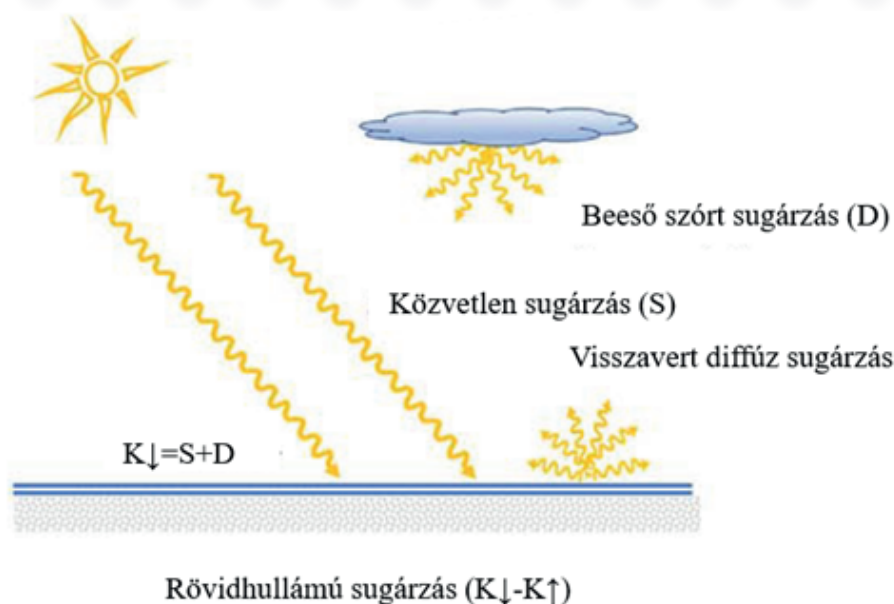
A korábbiakban már említették szerint jól látható, hogy mekkora hatást gyakorol egy-egy területen, ha a természetes talaj helyett valamilyen burkolattal borítjuk be a föld felső rétegét. Ezzel a beavatkozással nem csak az adott környezet látképe, de sok más tényező is drasztikusan meg-

változik, legyen szó az energiaháztartásról vagy akár a víz-háztartásról. Az utak, járdák és a belvárosi terek jellemzően valamilyen aszfalt, beton vagy akár térkő burkolattal kerülnek kialakításra, melyek a terület 30-40 %-át jelentik egy nagyváros esetében (Basics, U. H. I., 2011).

3.1. Energetikai alapok

Az egyik fő tényező, ami a városi hőszigetek jelenségében a legmeghatározóbb szerepet tölti be, az a sugárzás. Ez egyszerre tekinthető energiaformának és energiaátviteli módnak is. Minden olyan tárgy sugárzást bocsát ki, melynek felületi hőmérséklete -273 °C (0 Kelvin) feletti értékkel rendelkezik. Ez a sugárzás hullám formájában terjed, és intenzitása a hullámhosszával fordított arányosságban van. A Föld és az általunk vizsgált urbanizált rendszerek szempontjából is az elsődleges energiaforrást a Napból érkező sugárzás jelenti, ami hullámok sorozataként, fénysebességgel ($3 \cdot 10^8$ m/s) terjed, és nem igényel közeg, így az űr vákuumán is áthalad (Stewart és Mills, 2021). Az általa kibocsátott napenergia ultraibolya (UV) sugarakból, látható fényből és infravörös energiából tevődik össze különböző arányban. A légkör tetején a napsugárzás spektruma 300 és 3000 nm között mozog, és a látható sugárzási sávban 400 és 700 nm között van a csúcsa. A légkörön kívül a napsugárzásra merőleges felületen a rövidhullámú sugárzás értéke kb. 1370 W/m^2 , ezt nevezzük napállandónak (Basics, U. H. I., 2011; Stewart és Mills, 2021). Ez az érték a föld felszínén mérve mindig kisebb lesz. Ennek oka, hogy a felületre be-

eső közvetlen sugárzás mennyisége függ a Nap állásától, a felület geometriájától és a légkör áteresztő képességétől. Ez utóbbi azzal magyarázható, hogy a napsugárzás a légkörbe belépve, annak összetételétől és a megtett távolságtól függő mértékben szóródik. Tiszta légköri viszonyok esetén a légkörön kívül rendelkezésre álló napenergia mintegy 70 %-a jut át, de ez az arány jelentősen csökken, amennyiben rossz a levegő minősége és nagy a felszín közeli felhőborítottság. Mivel a légkör rosszul nyeli el a rövidhullámú sugárzást, ezért a fennmaradó rész, ami közvetlen sugárzásként nem jut át rajta, az szórt sugárzás formájában szóródik tovább a Föld felszíne felé. A felszínt erő diffúz napsugárzást, ami egy területről érkezik és nem vet árnyékot, úgy lehet kezelni, mintha egy egységes égboltból származna. A teljes rövidhullámú sugárzásmennyiség, ami ebben a formában eléri a felszínt, az a közvetlen és diffúz források összességé-
ként tekinthető. A felszínen visszavert rövidhullámú sugárzás tovább szóródik és a legtöbb felszín esetében diffúz napsugárzásként kezelhető. Ez alól kivételt képeznek az üvegfelületek, mivel kis beérkezési szög esetén átirányíthatják a sugárzást (Stewart és Mills, 2021).



4. ábra Rövidhullámú sugárzás cseréje a talajon
[forrás: Stewart és Mills, 2021]

A felszínre érő napenergia intenzitásának normalizált értékét szemlélteti a 4. ábra egy tiszta nyári nap esetében. A korábbiakban tárgyalt rövidhullámú sugárzás a teljes spektrum mintegy 5 %-át teszi ki a 250 és 400 nm hullámhosszával rendelkező tartományon. A beérkező napenergiának a jelentős részét a látható (43 %) és a hosszuhullámú, vagy infravörös sugárzás (52 %) alkotja, ami hő formájában érzékelhető (Basics, U. H. I., 2011). Ez a hosszuhullámú sugárzás a rövidhullámú sugárzáshoz hasonlóan diffúz jelleggel cserélődik.

A beérkező sugárzás egy adott közeggel találkozva változatlanul áthaladhat, elnyelődhet vagy szóródhat. Az adott hullámhosszúságú energia sorsa attól függ, hogy a közeg tartalmával milyen kölcsönhatásba lép. Például egy átlátszatlan szilárd anyag esetében képtelen változatlanul áthaladni, így abban vagy elnyelődik vagy szóródik. Az elnyelődés, vagy más néven abszorpció melegedést eredményez az objektumban (Stewart és Mills, 2021). Ez a jelenség kiemelt szerepet tölt be a városi hősziget hatásának a

kialakulásában. Az adott anyag abszorpciós képessége megegyezik az emissziós képességével, ami azt a határfokot mutatja meg, hogy az anyag hőenergia kibocsátási képessége mekkora 0 és 1 közötti skálán. Az az anyag, aminek az emissziós képessége 1, azt tökéletes sugárzónak tekintjük (Gillespie, 2014).

A burkolatok esetében egy másik meghatározó tulajdonság az adott anyag fényvisszaverő képessége vagy albedója. Ez a napenergia azon hányadát jelenti, amit a felület visszaver. Az albedó a burkolat felszín alatti hőmérsékletét is befolyásolja, mivel több visszavert sugárzás esetén kevesebb hőenergia áll rendelkezésre a legfelső rétegben, ami képes lenne a pályaszerkezet további rétegeit is átmelegíteni (Basics, U. H. I., 2011). A korábbiakban már láthattuk, hogy az aszfalt és a beton jellemzően milyen albedóval rendelkezik, de a következő táblázat részletesen bemutat több, a városi és a természetes élőhelyeket is jellemző anyagnak az albedóját és emissziós képességét (Stewart és Mills, 2021):

Felületek	Albedó (α)	Emisszió (ϵ)
Fű	0,16 – 0,26	0,90 – 0,98
Erdő	0,13 – 0,20	0,90 – 0,99
Víz	0,03 – 0,10	0,92 – 0,97
Sivatagi homok	0,20 – 0,45	0,84 – 0,92
Hó	0,50 – 0,90	0,82 – 0,99
Aszfalt	0,05 – 0,27	0,89 – 0,96
Tégla	0,20 – 0,60	0,90 – 0,92
Tiszta üveg	0,08	0,87 – 0,95
Beton	0,10 – 0,35	0,85 – 0,97
Csempe	0,01 – 0,35	0,90
Kátrány és kavics	0,08 – 0,18	0,92
Fehér festék	0,50 – 0,90	0,85 – 0,95
Hullámos vas (tetőfedő)	0,10 – 0,16	0,13 – 0,28

1. táblázat Természetes és mesterséges anyagok sugárzási tulajdonságai
[forrás: Stewart és Mills, 2021]

A táblázat alapján jól összehasonlíthatóak az egyes felületekre jellemző értékek. Jól látható, hogy az aszfalt és a füves vagy erdős felületek között nem adódik akkora különbség, mint amit a városi hősziget jelenségének felvázolása után vártunk volna, mégis az utóbbi természetes talajborítottságok jóval hűvösebb felületi hőmérsékletet képesek produkálni, mint a mesterséges burkolatok. Ennek oka többféle szempontból magyarázható, ezzel is megerősítve azt, hogy mennyire összetett ez a problémarendszer. Az egyik ilyen ok a nedvességtartalomra vezethető vissza. A mesterséges burkolatok jellemzően vízzáró tulajdonsággal rendelkeznek és a rájuk érkező csapadék is a lehető leggyorsabb módon elvezetésre kerül, ezzel ellehetetlenítve annak lehetőségét, hogy a víz párolgásának következtében az adott burkolat felületi hőmérséklete csökkentve legyen. Ezzel szemben a természetes talajok nedvességtartalma nem csak táplálja a rajta elhelyezkedő növényzetet, de be is vonja azokat a párologtatás folyamatába, ezzel is hűtve a felületi hőmérsékletet. Jellemzően az ilyen felületek még a levegő hőmérsékletéhez képest is hűvösebbek (Basics, U. H. I., 2011). A másik, talán a legmeghatározóbb oka ennek a hőmérsékletkülönbségnek, az

adott anyagokban eltárolt látens hő mennyisége. Ez a korábbiakban említett nedvességtartalommal is összefüggésben áll, hiszen ez a víz fizikai állapotához kapcsolódó energia, amely könnyedén képes megváltoztatni halmazállapotát szilárdból folyadékká, gőzzé vagy fordítva. A magasabb energiájú állapotba való átalakuláshoz a molekulákat összekötő kötések felbontására van szükség:

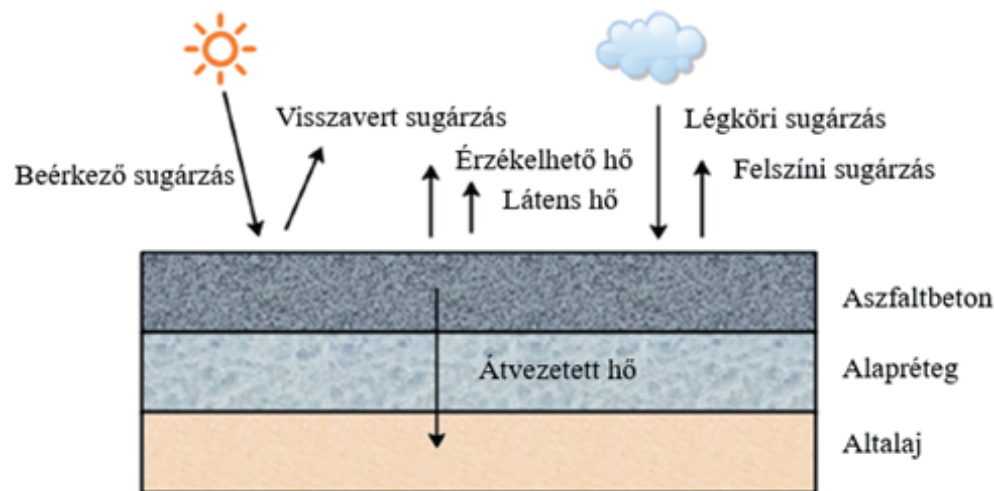
- 1 kg jég vízzé alakításához (olvadás): 0,33 MJ energia,
- 1 kg víz gőzzé alakításához (párolgás): 2,56 MJ energia szükséges.

Annak ellenére, hogy ez az energia az adott anyag térfogatában tárolódik, nem jelentkezik hőmérsékletváltozásként és az ember nem érzékeli. Jól látható ellenben, hogy a víz gőzzé való átalakulásához mennyivel több energia szükséges, mint az olvadás/ fagyás során (Stewart és Mills, 2021). Ez az eltérés jól szemlélteti azt a különbséget is, hogy a nedvességtartalommal rendelkező anyagok miért képesek jóval nagyobb mennyiségű energiát eltárolni alacsonyabb felületi hőmérséklet mellett. Ennek kulcsa a most felvázolt látens hőben rejlik.

3.2. Pályaszerkezeteket érő hatások

Látható tehát, hogy a városi hősziget jelisége nagyban függ a beérkező sugárzástól, így ennek negatív hatása jellemzően a melegebb hónapokban jelentkezik, amikor a Nap állása miatt a beesési szög a merőlegeshez közelít. Ilyenkor a városok gerincét képező infrastruktúra hálózatnak a felszínén elhelyezkedő része, főként az utak és a jár-

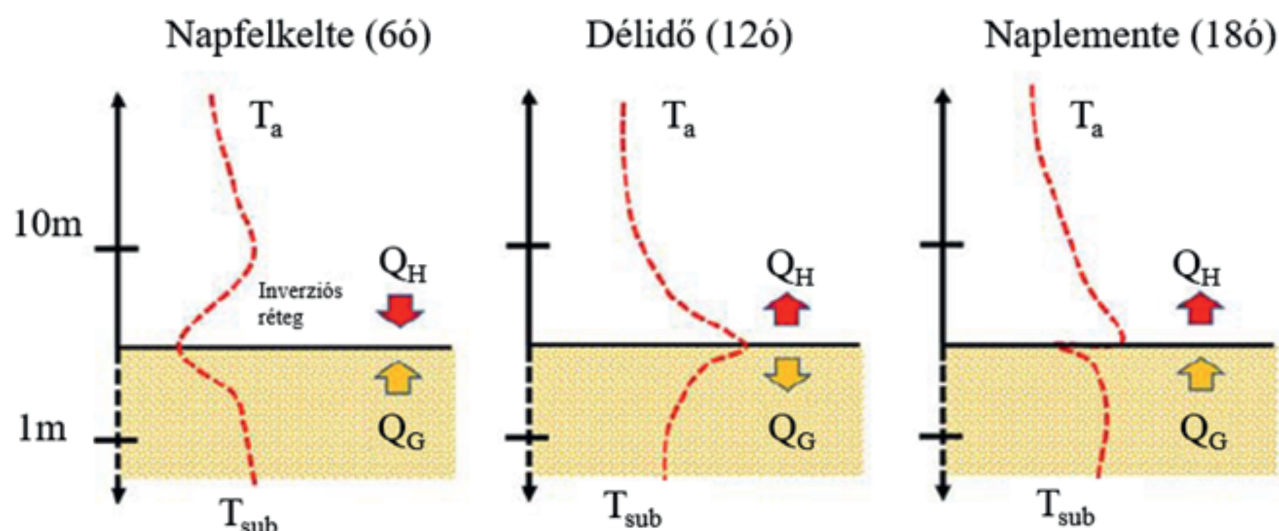
dák, melyek többnyire aszfalt borítással rendelkeznek, rendkívül nagy mértékben vannak kitéve ennek a többletsugárzásnak. Ekkor a pályaszerkezet a beérkező hőenergiát eltárolja, és napnyugta után visszasugározza azt a levegőbe, ezzel is nehezítve az éjszakai lehűlést (Stewart és Mills, 2021).



5. ábra Az útburkolat felületének optikai-termikus egyensúlya
[forrás: Xu et al., 2021]

Jól látható tehát, hogy a beérkező sugárzás azon része, ami nem verődik vissza a felületről, az belép a pályaszerkezetbe. Ezáltal a nettó sugárzás, ami a talajon rendelkezésre álló energiának tekinthető, felosztható a légkörrel való konvekciós hőcserével megvalósuló érzékelhető és látens komponensekre, valamint az aljzattal vezetés révén történő hőcserére. A pályaszerkezetek esetében a látens hőáram elhanyagolható, így a felszíni energiamérleg tovább egyszerű-

sodik. Ellenben a látens hő hiánya azt eredményezi, hogy az összes rendelkezésre álló energia érzékelhető hőáramként kerül felhasználásra. Ennek következménye, hogy a burkolat környezetében lévő levegő melegebb, mintha természetes talajborítottság lenne ugyanazon területen. Az így létrejövő energiaáramlások, mint az érzékelhető-, és az elnyelt hő késleltetett kibocsátása, a szomszédos levegő hőmérsékletének megváltozását okozzák.



6. ábra A felszínközeli légkör és az altalaj hőreakciója
[forrás: Stewart és Mills, 2021]

Megfigyelhető a kapcsolat egyes hőmérsékleti viszonyok és a létrejövő hőáramok iránya között, ami egy teljes napra vetítve megmutatja a jellegzetes folyamatokat a pályaszerkezetben. Látható, ahogy a reggeli órákban a levegő és a burkolat felszínének a hőmérséklete is lecsökken a talajszinten. Ekkor az érzékelhető hőáram és a burkolatban zajló hőcsere is ennek a hőmérsékletkülönbségnek a hatására, a felszín irányába mutat, törekedve arra, hogy a kialakult energiakülönbséget kiegyenlítse a rendszer. Ehhez képest a déli órában már jóval másabb folyamat figyelhető meg. Ilyenkor a burkolat felszíni hőmérséklete jóval nagyobb minden más tényezőhöz képest, ahogy ezt a 6. ábrán is láthattuk. Ilyenkor az érzékelhető hőáram felfelé mutat, míg az energia egy része a burkolat alsóbb rétegeit melegíti át, ezzel elraktározva a hőenergia egy jelentős részét. Ez az elraktározott talajhőáram csak akkor fordul meg, amikor a levegő hőmérséklete alacsonyabb lesz, ezzel kialakítva egy energiakülönbséget a két réteg között. Ilyenkor a burkolatban lévő hőmennyiség hosszúhullámú sugárzás formájában elhagyja a burkolatot és érzékelhető hőként jelenik meg, ami a talajszinthez közeli levegő hőmérsékletét növeli. Ezt a folyamatot láthatjuk a 18 órás verzió esetében, amikor is a burkolat-, és a léghőmérséklet között egy jelentős ugrás figyelhető meg. Ilyenkor a burkolat által nap közben elnyelt hőmennyiség kisugárzásra kerül, egészen addig, amíg az eltárolt többletenergiát le nem adja környezetének (Stewart és Mills, 2021).

Fontos megemlíteni, hogy ezek a folyamatok a pályaszerkezetek tervezett élettartamát tekintve sem előnyösek, mi-

vel a tartósan magas hőmérséklet többletfárasztóhatásként jelentkezik az anyagban. A nyári hőhullámos időszakok során, amikor akár hetekig nem megy le éjszaka sem $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ alá a burkolat felszíni hőmérséklete és nap közben pedig kiugróan nagy felületi hőmérsékletek adódnak az aszfalt esetében, akkor a nyomvályúsodás, az öregedés és a repedések kialakulásának a valószínűsége megemelkedik. Megfigyelték, hogy a nyomvályúsodás mértéke $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os léghőmérséklet és $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os felületi hőmérséklet mellett néhány milliméterre korlátozódik, de $38\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os tartós léghőmérséklet során ennek mértéke drasztikusan megnövekszik és több nap lefolyása alatt súlyos mértékben romolhat az aszfalt állapota (Chen et al., 2009). Az öregedés és a repedések kialakulásának okára hasonló tapasztalatokat publikáltak. Megállapították, hogy az aszfalt burkolatokban a magas hőmérséklet miatt jelentősen fokozódik az anyagok oxidációja és párolgása. Ennek mértéke minden $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékletemelkedés után csaknem megduplázódik. Ezek a folyamatok a rugalmasság csökkenéséhez vezetnek, ami kemény és törekeny burkolatot eredményez (Somayaji, 1994). A beton burkolatok esetében is negatív hatást gyakorol a magas hőmérséklet. Extrém melegben megnő a repedések kialakulásának valószínűsége és szélsőséges esetben még tábla kivetődés is bekövetkezhet (Nishizawa et al., 2009).

4. Alternatív burkolati megoldások

Az alternatív burkolatok célja, hogy a városi hősziget hatását mérsékeljék a felületi hőmérséklet csökkentése által. Az ilyen típusú burkolatok az angol nyelvű szakirodalomban „cool pavement” néven szerepelnek, melynek magyar megfelelőjeként a hűvös burkolat megnevezést fogom al-

kalmazni a későbbiekben. Ezeknek természetesen különböző megoldási módjai vannak, melyek részletes bemutatását szolgálja ez a fejezet (Anupam et al., 2021).

4.1. Fényvisszaverő burkolatok

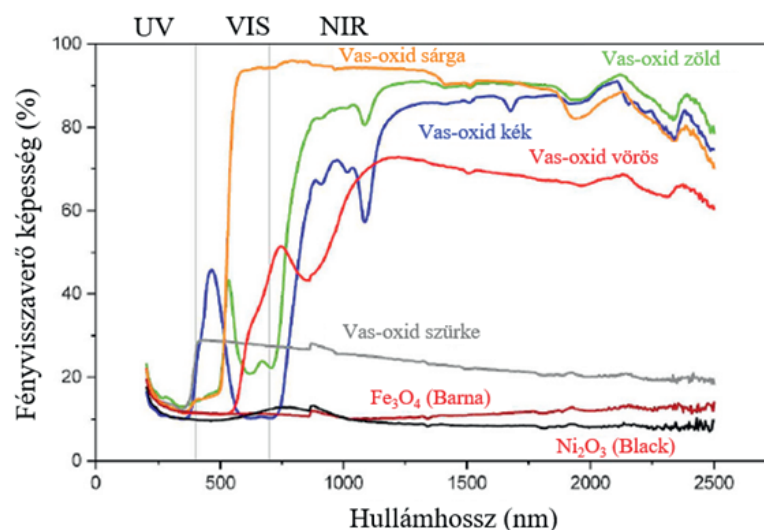
A hűvös burkolatok egyik, talán legalapvetőbb típusai közé sorolhatóak a fényvisszaverő bevonatok különféle technológiái. Az Energetikai alapok alfejezetben megismerhettük, hogy az albedó, és az azzal szoros kapcsolatban álló emissziós képesség mekkora szerepet tölt be az adott pályaszerkezet városi hősziget jelenségére gyakorolt hatásában. Ezek alapján nem meglepő, hogy az egyik megoldási lehetőségként vizsgált beavatkozás a jelenleg is használatban lévő burkolatok albedójának a növelésére irányul. Ez egy egyszerű, alacsony költséggel rendelkező megoldásként kínálkozik, amely bizonyítottan képes csökkenteni az anyagok felületi hőmérsékletét. Mindezt azzal a céllal, hogy a városokban fokozni tudják a szélsőséges hősziget szembeni ellenálló képességet, alkalmazkodjanak az éghajlatváltozáshoz, és olyan járulékos előnyöket érjenek el, mint az energiamegtakarítás és a közegészségügyi helyzet javulása (Middel et al., 2020).

A reflektív burkolatok kapcsán alapvető szempontként a magas fényvisszaverő képességre való törekvés fogalmazható meg. Ezt az albedó növelésével igyekeztek elérni a kutatások során. Ezzel, amennyiben a technológia sikeres, nem csak a visszavert sugárzás értéke növelhető, de a pályaszerkezetek által elnyelt hőmennyiséget is lehet csökkenteni. Nyilvánvaló módon a kezdeti kutatások a legegyszerűbb aspektust vizsgálták, mégpedig azt, hogy a burkolóanyag színe befolyásolja-e a felületi hőmérsékletet. Ezt egyszerű színezőanyag használatával igyekeztek elérni, de az eredmények azt mutatták, hogy így csak a napsugárzás optikai spektrumát sikerült visszaverni, a sugárzás infravörös részét ellenben nem (Santamouris, 2013).

Ennek a problémának a kiküszöbölése érdekében sötét színű, de magas fényvisszaverő képességgel rendelkező burkolatot hoztak létre, melyet a hagyományos aszfalt felületének vékony festékbevonattal való ellátásával tudnak elérni. Ez a technológia már jóval hatékonyabbnak bizonyult, hiszen az optikai spektrumon csak 23%-ban, míg az infravörös tartományon 86%-ban reflektált. Az elvégzett kísérletek alapján azt figyelték meg, hogy ez a bevonat képes volt 15 °C-kal csökkenteni a burkolat felületi hőmérsékletét a hagyományos aszfalt utakhoz képest (Kinouchi et al., 2003). Ezen bevonatok fényvisszaverő képességének növelése érdekében gyakran szervesetlen fém oxidokat használnak, mint pl. TiO_2 , ZnO , Al_2O_3 . Xie és társai (2019) által végzett tanulmányban részben ezek az anyagok is fellelhetők, de más, különböző szemcseméretű és színű pigmentet is megvizsgáltak annak érdekében, hogy a fényvisszaverő, hűvös burkolatbevonatok optikai tulajdonságainak befolyásoló tényezőit meghatározzák. Ezeket jellemzően a kereskedelembe is elérhető anyagok közül választották ki:

- fehér színű pigment: titán-dioxid (TiO_2),
- fekete/barna színű pigment: nikkel-oxid (NiO), vas-oxid (FeO),
- egyéb színű pigment: vas-oxid és annak hidrátja sárga, vörös, kék, zöld és szürke színben.

Ezek közül a titán-dioxid és a vörös vas-oxid a részecskeméret visszaverődésre gyakorolt hatásának az elemzésében kapott kitüntetett szerepet (Xie et al., 2019).



7. ábra Különböző pigmentek által visszavert spektrum
[forrás: Xie et al., 2019]

Fontos kiemelni a reflektív burkolatok esetében, hogy a fényvisszaverő képességük különböző szennyeződések hatására meglehetősen hajlamos a leromlásra. A hét hónapon át tartó vizsgálat során a megfigyelési ciklus végén azt tapasztalták, hogy az eredeti 33-38 %-os fényvisszaverő képesség 19-30%-ra csökkent. Ennek okát a felület kopására, a porfelhalmozódásra és egyéb más szennyezőanyagok je-

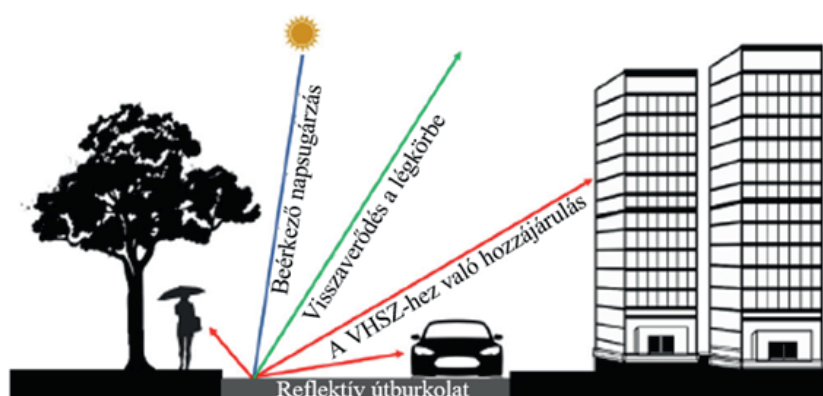
lenlétére, mint például a gumimaradványok vagy féknyomok, vezették vissza (Schneider et al., 2023).

Láthattuk, hogy a fényvisszaverő burkolatok hogyan befolyásolják a burkolat felszínének a hőmérsékletét és milyen hatással vannak erre a technológiára a különféle külső tényezők. Ezek mellett azonban az egyik legfontosabb szempontról még nem esett szó, hogy a városi hősziget je-

lenségére milyen hatást gyakorol ez a felületi bevonat. Ezt a témakört több szempontból is vizsgálták különböző kutatócsoportok (Middel et al., 2020; Schneider et al., 2023; Yaghoobian és Kleissl, 2012). A fő vizsgálati szempont ezekben a kutatásokban arra irányult, hogy megállapítsák, milyen hatással van a bevonat a lombkorona szintű hőmérsékletre, az épületek energiaháztartására és az emberek hőérzetére.

Ezekben a témakörökben végzett mérések során arra a megfigyelésre jutottak, hogy a reflektív burkolatok valóban hűvösebb felületi hőmérsékletet produkáltak a nappali órákban, ami akár 16 °C-kal alacsonyabb lehetett a hagyományos burkolatokhoz képest.

Ellenben ez a különbség a lombkorona szinten nem okozott jelentősebb változást a levegő hőmérsékletében (0,4 °C). Ennek okát abban látták, hogy a magasabb albedó több sugárzást vert vissza, mindent a korábbiakban felvázolt diffúz módon. Ennek következtében ez a visszavert sugárzás a környező épületekre és tereptárgyakra szóródott tovább, ami azt eredményezte, hogy ez a sugárzásmennyiség továbbra is bent maradt a rendszerben, annyi különbséggel, hogy a többlethőmérsékletet nem a pályaszerkezetben, hanem az épületek falaiban és belső tereiben okozta (Middel et al., 2020; Schneider et al., 2023; Yaghoobian és Kleissl, 2012).



8. ábra Reflektív burkolatok fényvisszaverő képessége
[Forrás: Anupam et al., 2021]

Megfigyelték azt is, hogy ez a megnövekedett sugárzás nyáron fokozza a hűtési igényt, ellenben télen nem csökken érdemben a fűtési energiaszükséglet, ami az alacsony beérkező sugárzással magyarázható (Yaghoobian és Kleissl, 2012).

A fényvisszaverő burkolat egy másik negatív tényezőként jelentkezett az emberi szervezetre gyakorolt hatása. A gyalogosok hőterhelését általában az átlagos sugárzási hőmérséklettel jellemzik, amely az emberi test sugárzási terhelését számszerűsíti. Ez egy forró, száraz környezetben a hőkomfort fő tényezője. Különböző mérések készültek annak érdekében, hogy ezt az értéket meghatározzák a reflektív burkolatok esetében, ezzel bizonyítva annak negatív

velejáróját. Ezen mérések eredményei azt mutatták, hogy a felületi hőmérséklet jellemzően hűvösebb volt a hagyományos burkolatokhoz képest, de ez jelentősen nem befolyásolta a levegő hőmérsékletét, ellenben az átlagos sugárzási hőmérséklet, ami az emberi szervezetre többletterhelésként jelentkezik, az a fényvisszaverő bevonatok esetében 4 °C-kal nagyobb volt a déli, és 2 °C-kal a délutáni órákban. Ezek az eredmények azt sugallják, hogy az erősen fényvisszaverő burkolatok nem helyettesíthetik a városfejlesztés miatt elvesztett növényzet mikroklímát szabályozó hatását, különösen a gyalogosok hőszigetnek való kitettségét csökkentő árnyékolási előnyöket (Middel et al., 2020).

4.2. Párolgást fokozó vízáteresztő burkolatok

A hagyományos vízáteresztő pályaszerkezetek jellemzően három fő részre oszthatók. Ezek közül az egyik a felszíni réteg, vagy más néven kopóréteg, ami többféle kialakítású lehet. A jellegzetesebb típusok közös tulajdonsága viszont az, hogy nagy porozitással rendelkező anyagokat használnak annak érdekében, hogy a felületre érkező csapadék a leghatékonyabban szivároгjon be a pályaszerkezet alsóbb rétegeibe. Ezt követően a felszíni réteg alatt helyezkedik el egy ágyazó és egy alapréteg, majd egyes típusoknál geotextíliát is alkalmaznak még az alap és az altalaj határán (Wang et al., 2018; Tziampou et al., 2020; Scholz és Grabowiecki, 2007).

Számunkra ezen burkolatok kapcsán a legfontosabb szempont az, hogy a városi hősziget hatását képesek-e mér-

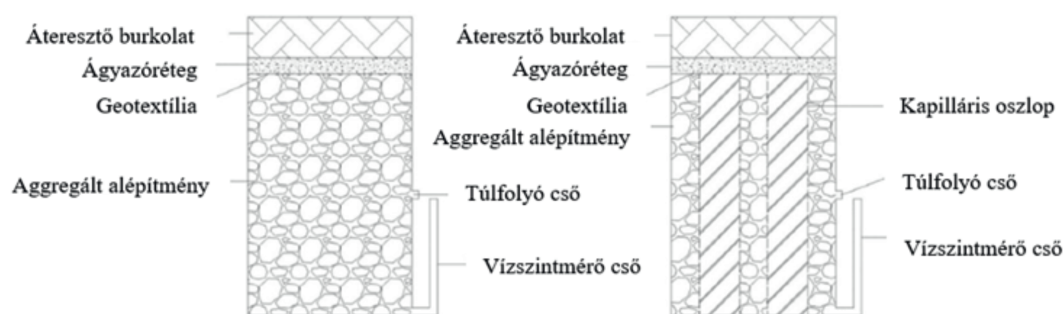
sékelni és ha igen, akkor azt milyen feltételek mellett és mekkora mértékben teszik. Erre több kutatás is kitért, melyekben száraz és nedves körülmények között is megvizsgálták a felületi hőmérsékletüket és a környezetre gyakorolt hatásukat (Wang et al., 2018; Tziampou et al., 2020; Chen et al., 2019). Megfigyelték, hogy a vízáteresztő burkolatok párologtató hatása összefügg a felszíni réteg fényvisszaverő képességével és erre nagy hatással van az adott anyag színe és pórusgeometriája. Ez annak köszönhető, hogy alacsonyabb albedó mellett a burkolat által elnyelt hőmennyiség nagyobb lesz, ami a pályaszerkezetben tárolt vizet intenzívebben képes párolgztatni a rendelkezésre álló energia-többlet miatt (Starke et al., 2010; Santamouris, 2013). A mérések során azonban azt is megállapították, hogy ez a

megnövekedett párolgás végeredményben nem vezet alacsonyabb felületi hőmérséklethez. Ennek oka, hogy az alacsony albedó alapvetően egy magasabb felületi hőmérsékletet eredményez a porózus burkolatokban, amit a párolgás fokozódása csak kompenzálni képes a világosabb anyagok hőmérsékletéhez viszonyítva, ahol az elnyelt hőmennyiség, így a párolgás intenzitása is alacsonyabb (Santamouris, 2013).

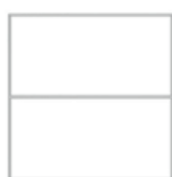
Annak érdekében, hogy ezeknek a rendszereknek a hatása fokozható legyen, kifejlesztették a párolgásfokozó vízáteresztő burkolatot. Ennek alapelve, hogy az aggregátumba olyan kapilláris oszlopokat építenek be, melyeknek anyaga hidrofíl természetű. Külön fontos az is, hogy a felszíni rétegek is hasonló tulajdonsággal rendelkezzenek, legyen szó a geotextiliáról, a finomhomokos ágyazórétről vagy a víztartó burkolólapról. Ennek azért van kiemelkedő szerepe, mivel az oszlopok által kapilláris úton felemelt vízszint így egyszerűbben a felszínre tud jutni. A vizsgálatot végző Liu és társai (2018) ehhez figuline-ból készült kapilláris oszlopokat használtak, egy a kínai tartományban található téglagyárból beszerezve, melyek jellemző méretei $300 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ (hosszúság, szélesség, magasság) voltak. A pályaszerkezet kiszáraitását követően azokat állandó 10 mm vízmélységű tartályba helyezték és megmérték a legfonto-

sabb tulajdonságaikat. Azt figyelték meg, hogy az oszlopok által felszívott víz mennyisége kezdetben gyorsan nőtt és 6 óra elteltével telítődtek meg. Az átlagos adszorpciósi képességre minden oszlop esetében $0,14 \text{ g/cm}^3$ -t kaptak. Az eredmények azt mutatták, hogy a kapilláris oszlopok valóban képesek voltak növelni a párolgást a vízáteresztő burkolatlapokon át. A felületi hőmérséklet mérése során a hagyományos vízáteresztő rétegrendhez képest, ami nem rendelkezett kapilláris oszlopokkal, a második naptól kezdve mutatkozott érdemi különbség. Ennek oka, hogy a kontrollként mért hagyományos pályaszerkezet burkolólapja a második nap után kiszáradt és ennek következtében a hőmérséklete gyorsan emelkedett. Ehhez képest a párolgásfokozó szerkezetben a kapilláris oszlopoknak köszönhetően a felső réteg továbbra is nedves maradt, ami sokkal alacsonyabb felületi hőmérsékletet eredményezett. Ennek a különbségnek a maximális értéke $9,4 \text{ }^\circ\text{C}$ volt, de az ötödik napon is jelentős $6,7 \text{ }^\circ\text{C}$ -os eltérés mutatkozott. A mérési időszak végén a teljesen száraz burkolatok felületi hőmérséklete a beton burkolólapok esetében $43,2 \text{ }^\circ\text{C}$ volt, míg a figuline burkolólapé $47,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Ebből az a következtetés szűrhető le, hogy ez utóbbi alacsonyabb albedóval rendelkezik, ami a száraz körülmények között egy kedvezőtlenebb tulajdonságként tudható be (Liu et al., 2018).

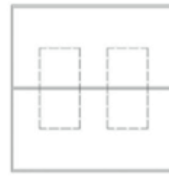
Keresztmetszet:



Függőleges metszet:



Hagyományos vízáteresztő burkolat



Párolgást fokozó vízáteresztő burkolat

9. ábra Hagyományos és párolgást fokozó vízáteresztő rendszerek metszetei
[Forrás: Liu et al., 2018]

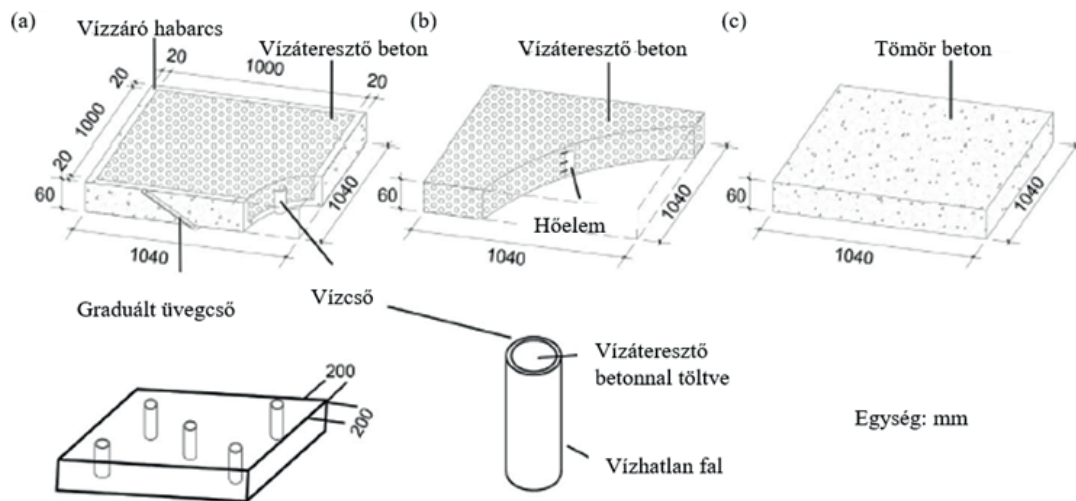
A párolgást fokozó áteresztő burkolatok széleskörű alkalmazása előtt azonban számos problémát kell még megoldani. Ezek közül a legfontosabbak, hogy a kapilláris oszlopok és a burkolólapok optimális anyagát meghatározzák. Azonban az jól látszik, hogy ez a módszer megfelelő választás lehet a városi hősziget hatásának csökkentésére olyan területeken, ahol jellemzően magas a talajvízszint (Liu et al., 2018).

Egy másik vizsgálat keretén belül egy hibrid technológiát dolgoztak ki, ami ötvözi a vízviszattartó és a vízelvezető burkolatok tulajdonságait (Bao et al., 2019). Ezt Qin és tár-

sai (2018) által készített korábbi tanulmány alapján alkották meg. Eredetileg ők egy olyan vízviszattartó blokkot javasoltak, melynek mind a négy oldala és az alja is le van zárva. Ez az új kialakítás tekintetében annyi módosult, hogy a tértömböt öt darab azonos méretű vízcsovet tartalmaz, egyet a szerkezet sarkában és egyet a közepén. Ezek mindegyike ugyanazzal az áteresztő betonkeverékkel került kitöltésre, mint ami a blokk többi részét is képezi. Az érdemi különbség abban mutatkozik meg, hogy a csövek alja nem került lezárásra a kerethez használt vízzáró habarccsal, emellett a cső magassága pedig 1 cm -rel alacsonyabb, mint

a blokk vastagsága. Ez lehetővé teszi, hogy amikor a visszatartott vízszint meghaladja a csövek tetőszintjét, akkor azokon keresztül képes legyen kifolyni a felesleges víz, ami ezáltal fel tud szívódni az altalajban. Ennek köszönhetően

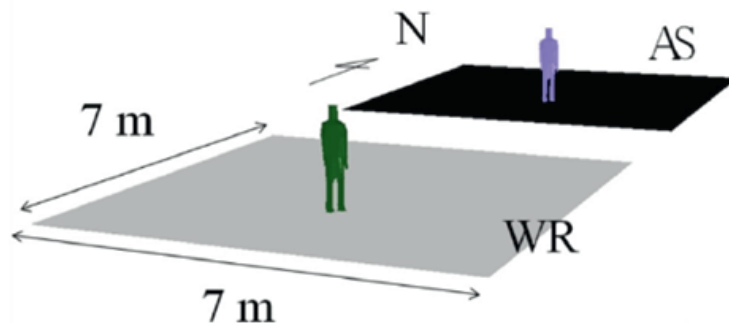
ez a kialakítás képes volt továbbfejleszteni a Qin és társai által készített vízvisszatartó blokkot, és sikeresen kiküszöbölte annak túlfolyási problémáit (Qin et al., 2018; Bao et al., 2019).



10. ábra Méréshez alkalmazott víztartó- (a), áteresztő- (b) és sűrű blokk (c) felépítése
[Forrás: Bao et al., 2019]

A vizsgálat során a 10. ábrán bemutatott típusok hidrológia és termikus teljesítményét elemezték. Ehhez a hőmérsékletet három különböző szinten mérték a szerkezeten belül 1, 3 és 5 cm-es mélységben. Eredményül azt kapták, hogy száraz állapotban is a víztartó blokkban volt a legalacsonyabb hőmérséklet, főképp a 3 és 5 cm-es mérési pontokban. Ez az öntözés után még látványosabb különbségeket eredményezett, mind a nappali, mind pedig az éjszakai órákban. A hőmérséklet maximális csökkenése nap közben 13 °C volt, míg éjszaka 3 °C. Ez az eltérés megerősíti azt a feltételezést, hogy a visszatartott víz nagy mértékben képes lehűteni a burkolat tömb hőmérsékletét a párolgás hatására. Megfigyelték azt is, hogy az érzékelhető hő mennyisége hogyan alakul a különböző pályaszerkezetek esetén. Száraz állapotban a sűrű és a vízáteresztő blokk értékei közel azonosak voltak, míg a vízvisszatartó blokkból kiáramló összesített érzékelhető hő valamivel kisebb volt. Nedves állapotban azonban a vízvisszatartó rendszer esetében jóval alacsonyabb volt a kiáramló érzékelhető hő mennyisége, mint a másik két burkolatnál, ami igazolja, hogy az új szerkezeti felépítés nem rontja a párolgási teljesítményt. Ennek oka, hogy a blokk továbbra is képes jelentős mennyiségű vizet megtartani a túlfolyó beépítésének ellenére (Bao et al., 2019).

A vízvisszatartó rendszerek emberi hőérzetre gyakorolt hatásait megvizsgálták, a városokban gyakran használt aszfalt burkolattal összehasonlítva. A két felület fényvisszaverő képességét a kezdeti fázisban megmérték. Az aszfalt esetében az albedó 0,085, míg a vízvisszatartó burkolatnál 0,253 volt. Ez közel azonos más vizsgálatok által meghatározott értékekkel. A felületi hőmérséklet különbsége a két burkolat között 9,5 °C volt, ami minden esetben az aszfalt esetében eredményezett nagyobb értéket. Azt is megfigyelték, hogy a felületi hőmérséklet-csökkenés potenciálja általában nagyobb volt, ahogy a napsugárzás intenzitása fokozódott. Ellenben a két burkolat felett a levegő hőmérséklete és a páratartalom nem különbözött jelentős mértékben, ami feltehetően annak köszönhető, hogy a vizsgálatban használt tesztburkolatok felületei nem elegendő méretűek ahhoz, hogy a környezetüket befolyásolják. Valószínűleg egy jóval nagyobb kiterjedésű burkolat nagyobb hatást gyakorolna ezekre a tényezőkre, ha az alacsonyabb felületi hőmérséklet szélesebb körben elterjedne egy városrészben belül (Shimazaki et al., 2021). Ezt a feltételezést erősíti az is, hogy egyes jelentések szerint a levegő hőmérséklete kevésbé érzékeny, mint a felszíni hőmérséklet (Nakayama és Fujita, 2010).



11. ábra Hőérzetre gyakorolt hatás vizsgálatának elrendezési elve
[Forrás: Shimazaki et al., 2021]

A vizsgálat kezdete előtt félő volt azonban, hogy a víz-visszatartó rendszer nedves, párás érzetet fog kelteni a tesztalányokban. Ezzel szemben az eredmények azt mutatták, hogy a gyalogosokban ilyen érzet nem alakult ki a párolgás folyamata mellett sem. Az érzékelhető és párolgó hőveszteség sem mutatott jelentős különbséget a két felület között, mivel a léghőmérséklet és a páratartalom a szélviszonyok miatt hasonlóak voltak. Megfigyelték azonban, hogy a vízvisszatartó burkolatról visszavert napsugárzás értéke jelentősen nagyobb volt a látható tartományban, mint az aszfalt burkolat esetében, ellenben az infravörös sugárzás kapcsán ennek az ellentétje volt elmondható. Ez azt eredményezte, hogy a hűvös burkolat jelentősen csökkentette az emberi hőterhelést. Mivel a hőérzet és a termi-

kus komfort között szoros kapcsolat áll fenn, ezért az, hogy a vízvisszatartó burkolat hűvösebb érzetet váltott ki a gyalogosokból szintén javítani tudta a komfortszintet (Shimazaki et al., 2021).

A vízáteresztő és vízvisszatartó burkolatok esetében továbbá fontos lenne vizsgálni a Magyarországon is elérhető anyagok alkalmazhatóságát is. Ez főként a pórustartalom, a fényvisszaverő képesség és a hidraulikus tulajdonságok szempontjából jelentős. Emellett az is egy fontos tényező, hogy ezek a technológiák a fagyással szemben milyen ellenálló képességet mutatnak és a mérsékelt kontinentális éghajlatra jellemző négy évszak mellett milyen tervezési élettartamot képesek biztosítani.

4.3. Energiatermelő burkolatok

Az energiatermelő burkolatok célja, hogy a beérkező napsugárzás energiáját felhasználva hűtsék a burkolat hőmérsékletét és energiát termeljenek az infrastruktúrához

kapcsolódó eszközök és a környező létesítmények számára (Kisgyörgy és Plesz, 2014).

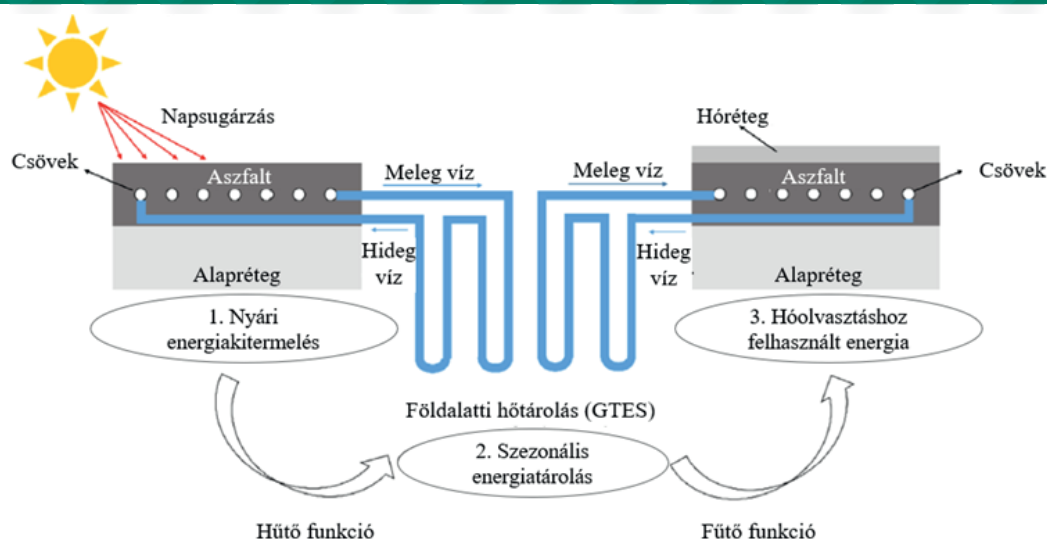
4.3.1. Folyadék keringtető rendszerek

A folyadék keringtető rendszerek (FKR) alkalmazása nem egy újkeletű dolog. Korábban már használtak ehhez hasonló technológiákat hóolvasztásra és a burkolatok jégtelenítésére. Az ilyen típusú rendszereknél elsősorban, a nagy szilárdság és vezetőképeség érdekében, fémcsöveket alkalmaztak a folyadék keringtetéséhez, de ezek hajlamosak voltak korrodálódni. Ennek következtében szivárgás keletkezett a rendszerben, ami annak teljes leállítását eredményezte. Ezen probléma kiküszöbölésének érdekében a későbbi rendszerekhez már műanyag csöveket használtak. A gyakorlati alkalmazásuk során azt is megfigyelték, hogy a csövek egyéb paraméterei, mint például az átmérő, az egymáshoz viszonyított távolság, a fektetési mélység, de még a fektetési mintázat is befolyásolta a rendszer hatékonyságát (Pan et al., 2015). Ezeknek a tényezőknek az optimalizálását követően, ez a technológia hatékonyan bizonyult a téli síkosságmentesítés esetében. Nem melléleg egy olyan környezetbarát megoldást jelentett, ami képes volt a geotermikus-, és napenergia felhasználása mellett kiszorítani a hagyományos, járművekkel működő, sószóró rendszereket, melyek bizonyítottan nagyobb szén-dioxid kibocsájtással rendelkeznek (Siebert és Zacharakis, 2010). Ez jellemzően olyan kritikus helyeken volt előnyös, ahol valamilyen okból kifolyólag a sószórás nem-, vagy csak korlátozottan volt alkalmazható. Ilyenek például a hidak, melyek szerkezetét képes roncsolni a nátrium-klorid vagy a repülőtéri terek, kifutópályák (Pan et al., 2015).

A városi hősziget jelenségének a fokozódása mellett a fejlett országok megújuló és fenntartható energiaszemléletének hatása is hozzájárult ahhoz, hogy kialakult az igény ezeknek a jégtelenítő rendszereknek a továbbfejlesztésére (Dincer, 2000; Ghalandari et al., 2021). Mivel a napenergia egy kétségtelenül kimeríthetetlen és környezetbarát ener-

giaforrás, ezért a folyadék keringtető rendszerek koncepciójában egy olyan lehetőséget láttak, mely képes az aszfaltburkolatokkal kapcsolatos számos probléma, valamint a fosszilis energiaforrás kimerülésével összefüggő nehézségek enyhítésére (Pan et al., 2015). Annak köszönhetően, hogy az utak aszfaltburkolata a nappali órákban szinte folyamatosan ki van téve a napsugárzásnak, hatalmas mennyiségű napenergiát képesek felvenni, amely hőenergia formájában eloszlik a burkolat szerkezetében (American Concrete Pavement Association, 2009; Chen et al., 2009). A folyadék keringtető rendszerek újszerű alkalmazása arra irányul, hogy az aszfaltburkolatba ágyazott csövekben cirkulált vízzel összegyűjse a pályaszerkezetben keletkező többletenergiát, amivel nem csak hűti a burkolatot, de a begyűjtött hőmennyiséget képes későbbi felhasználásra is eltárolni. Emellett egy termoelektromos rendszerrel kombinálva villamosenergia előállítására is alkalmas lehet (Bijsterveld et al., 2001).

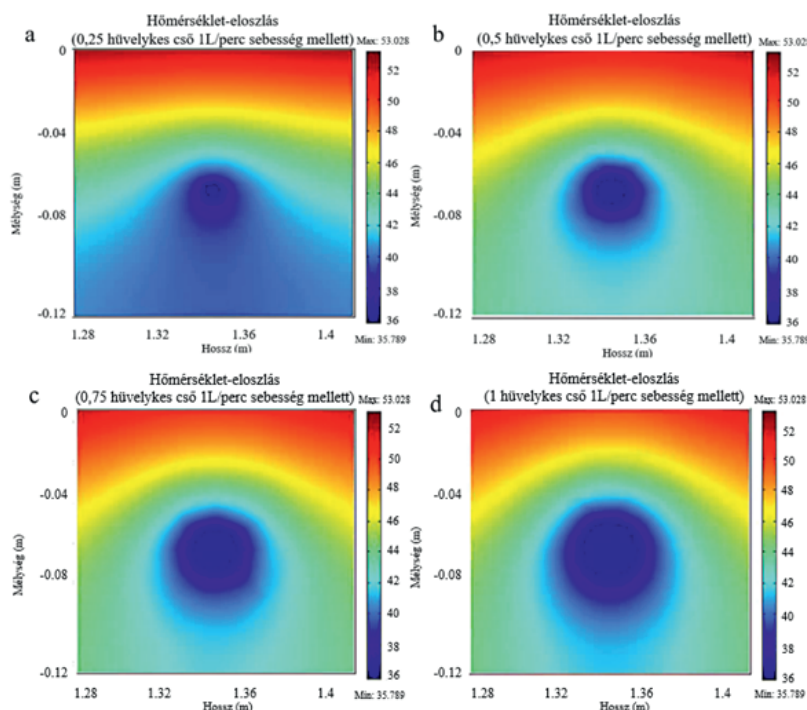
Az újszerű folyadék keringtető rendszerek jellemzően két fő funkcióval rendelkeznek. Az egyik a meleg burkolatok hűtését, míg a másik a burkolatból kivont energiával a jégtelenítést szolgálja. Ennek működési elvét mutatja be a 12. ábra (Pan et al., 2015):



12. ábra A folyadék keringtető rendszer működési elve
[Forrás: Pan et al., 2015]

A nagyméretű FKR-ek esetében megállapították, hogy a csőtávolság jellemzően 5 és 40 cm között változik. Átlagos értéke 18,91 cm-re adódott 8,64 cm-es szórással, de a rendelkezésre álló adatok alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a kivitelezés során a 10 és 20 cm-es csőtávolságot preferálják. A beágyazási mélységet illetően az adatok azt mutatták, hogy az esetek túlnyomó részében az 50 - 70 mm és a 70 - 90 mm dominált (Ghalandari et al., 2021). Ennek oka, hogy a rendszerek kialakítása során arra törekednek, hogy a megfelelő szerkezeti stabilitás mellett a leghatékonyabb energiaelnyelő hatást éri el, ami a fektetési mélységgel szoros összefüggésben van. Azt tapasztalták, hogy 5 mm-es csőmélység esetén a felület hőmérsékletét akár 22-

33 °C-kal is képes lecsökkenteni a rendszer, de ilyen esetben fennáll a csövek károsodásának az esélye. Ellenben 140 mm-es mélység esetén a hőmérséklet maximális csökkenése már csak 6 °C volt, ami a felszínen nem okozott észrevehető különbséget a hőérzetben (Bijsterveld et al., 2001). Azt is megfigyelték, hogy a nagyobb felületű csövek télen magasabb hőmérsékletet voltak képesek átadni, azonban az energiagyűjtési folyamat hatékonysága nyáron lecsökkent a csövekben lévő víz mennyiségének a növekedése miatt. Ez arra enged következtetni, hogy az energiagyűjtés tekintetében a kisebb átmérő az ideális (Chen et al., 2009.; Mallick et al., 2012). Ezt az eltérést szemlélteti a 13. ábra a változó csőátmérő hatásának következtében (Mallick et al., 2012):



13. ábra A csőátmérő hatása a folyadék keringtető rendszer energiagyűjtési folyamatára
[Forrás: Mallick et al., 2012]

A csőátmérő és a fektetési paraméterek mellett azt is megfigyelték, hogy a rendszer kulcsfontosságú pontjait képezik még a keringő folyadék hőmérséklete, az áramlási sebesség és az aszfalt termofizikai tulajdonságai (Liu et al., 2007; Bobes-Jesus et al., 2013). Ezek azonban nem azonos mértékben befolyásolják a rendszer hatékonyságát. Azt tapasztalták, hogy az áramlási sebesség hatása kevésbé volt jelentős, mint a beágyazási mélység, a csőátmérő és a csőtávolság, amelyek jóval drasztikusabb eltéréseket mutattak a teljesítmény alakulásának tekintetében (Mallick et al., 2012; Saleh et al., 2020).

A kísérletek során szinte minden vizsgálatban vizet használtak keringtetett folyadék gyanánt, melyet télen fagyálló folyadékkal dúsítottak, annak érdekében, hogy a fagyást megakadályozzák a rendszerben. Ez azért is volt fontos, mivel a környezet hőmérséklete fagyáspont alá kerülhet és a térfogatváltozás hatására, ami a fagyás során végbemegy, a rendszer tönkremenetele is kockázatot jelenthet (Pan et al., 2015).

A rendszer energiabegyűjtési teljesítménye kapcsán egyes tanulmányok eltérő értékeket javasolnak a hatékonyság figyelembevételéhez. Van olyan megfigyelés, ami az út-felületre érkező napsugárzás 50 %-át hasznosított energiaként azonosította (Zhou et al., 2013), míg más tanulmányok ettől jóval konzervatívabb értéket (20-30 %) javasolnak (Thurston et al., 1995; Ceylan et al., 2014). Emellett a tárolási hőveszteséget is érdemes figyelembe venni. A SERSO projektben nyáron mintegy 150 000 kWh

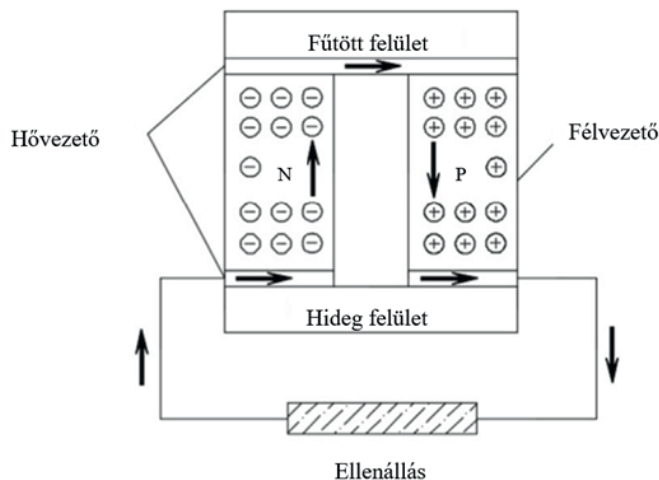
naphőt gyűjtöttek be, ami a beeső sugárzás 20 %-a volt. Ennek az energiának télre csak a 65 %-a állt rendelkezésre a hőveszteség miatt (Thurston et al., 1995). Ezeknek a rendszereknek az energiagyűjtő kapacitása a projekt földrajzi elhelyezkedésétől, a tárolókapacitástól és a kollektor méretétől függ. Az összegyűjtött hő felhasználható a rendszer működtetésére, energiatermelésre vagy akár külső alkalmazásra is, mint például a távhő. Erre tökéletes példát jelent a Zonnige Kempen projekt, ahol a kinyert energia 20 %-át jégtelenítésre, míg a fennmaradó 80 %-ot pedig a szomszédos épületek fűtési forrásaként használták (Vandevyvere és Neuckermans, 2007).

A nagyméretű folyadék keringtető rendszerek korlátozott száma a magas kezdeti költségeknek, a hosszútávú beruházások megtérülésére és a megtérülési idejére vonatkozó adatok hiányának, és a rendszer fenntarthatóságára, illetve teljesítményére adott eltérő eredményű kutatásoknak tudható be (Ghalandari et al., 2021). A FKR kezdeti költségei közé tartoznak például a rendszerhez szükséges csövek, szivattyúk, az építési munkaerő többletigényei, a szivattyúkhöz szükséges energia és az éves karbantartási költség is. Továbbá vannak olyan tisztázatlan kérdések is, melyek a sérült csövek javítási módszertanára vonatkoznak, de az aszfalt tömörödésére is további vizsgálatokat kell elvégezni, mert kis csőtávolság esetén nagy kockázat áll fent a nem megfelelő tömöríthetőség kapcsán, ami az élettartam csökkenését okozhatja (Pan et al., 2015).

4.3.2. Termoelektromos rendszerek

A termoelektromos jelenséget Thomas Johann Seebeck, német fizikus, fedezte fel 1821-ben, amit később róla neveztek el Seebeck-effektusnak. Ennek jelentősége abban rejlik, hogy két különböző, termoelektromos tulajdonsággal rendelkező fém, vagy félvezető között eltérő hőmérséklet hatására elektromos feszültség képes keletkezni (Nolas et al., 2013). Ez a városi hősziget jelensége kapcsán kiemelt figyelmet kapott a kutatók részéről, hiszen a folyamatos napsugárzásnak kitett burkolat felületi hőmérséklete rendkívül magas értéket (70°C) tud elérni, mint ahogy azt a korábbi-

akban is láthattuk (American Concrete Pavement Association, 2009). Mivel a termoelektromos generátorok teljesítménye függ a két kapcsolódási pont közötti hőmérsékletkülönbségtől is, ezért ez kedvező feltételeket biztosít egy ilyen rendszer számára. Ezt Guo és Lu (2017) is felismerte, akik az Egyesült Államokbeli Florida állam kapcsán foglalkoztak ezzel az energiatermelési módszerrel. A tanulmányukban részletezték a termoelektromos hatás alapvető elvét az energia kinyeréséhez, melyet a 14. ábra szemléltet:



14. ábra A termoelektromos generátor sematikus felépítése
[Forrás: Guo és Lu., 2017]

A termoelektromos generátorban a következő egyenletnek megfelelően képes a hőmérsékletkülönbség hatására feszültség keletkezni (Guo és Lu, 2017):

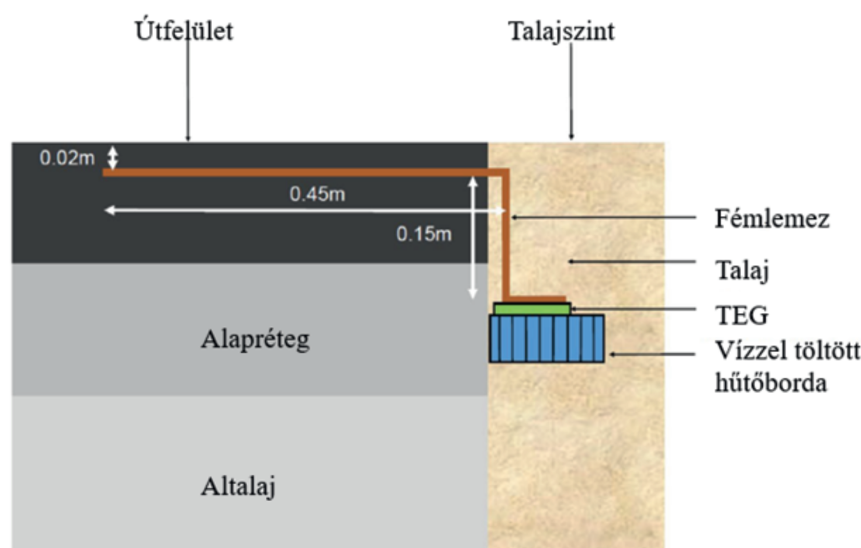
$$V = \alpha(T_h - T_c)$$

Ahol,		
V (V)	=	A két különböző fém vagy félvezető közötti feszültség
α (V/K)	=	A Seebeck-együttható
$T_h - T_c$ (K)	=	A meleg (T_h) és a hideg (T_c) oldal közötti hőmérsékletkülönbség.

Ez alapján jól látható, hogy a generátorból kinyert energia mennyisége közvetlenül függ a két oldal közötti hőmérséklet-gradienstől. Ennek következtében a termelés akkor maximális, amikor a burkolat felső és alsó része között a legnagyobb hőmérsékletkülönbség adódik (Randriantsoa et al., 2023).

Datta és társai (2017) tanulmányukban egy „Z” alakú, hőszigetelt rézlemez használtak a hőenergia továbbítására. Az általuk készített konstrukció három különböző részre bontható. Első részként egy hőgyűjtő elemet ágyaztak be 20 mm-rel a járda felülete alá, majd azt hőszállító 2,5 mm vas-

tag polivinil-klorid (PVC) bevonattal szigetelték a hőtranszport során fellépő veszteségek minimalizálásának az érdekében. A harmadik részt pedig egy hőátadó lemez jelenteti, ami a termoelektromos generátor tetejére történő átvitelt szolgáltatja. Ennek a generátornak az alját egy hűtőbordához csatlakoztatták, annak érdekében, hogy a hőmérsékletkülönbséget maximalizálják és ezáltal fokozzák a kinyerhető energiát. Annak érdekében, hogy a környezeti levegő hőmérsékletének hatása elhanyagolható legyen a generátor hideg felületén, ezt a hűtőbordát érdemes kellő mélységben elhelyezni.



15. ábra Rézlemez termoelektromos rendszer felépítése
[Forrás: Datta et al., 2017]

Az ilyen és ehhez hasonló technológiák vizsgálata során azt figyelték meg, hogy nyáron a generált feszültség értéke 0,6 és 0,7 V között változott, amikor a hőmérséklet különbsége 25-30 °C volt. Az eredményeket egy 300*300 mm-es minta alapján kapták. Ezt kiterjesztve egy tíz méter széles és egy kilométer hosszú útszakaszra, a begyűjtött energia értéke 160 kW-ot is elérhet nyolcórás napsütés mellett (Jiang et al., 2017). Fontos azonban megemlíteni, hogy ugyan úgy, mint ahogy azt a folyadék keringtető rendszerek esetében is

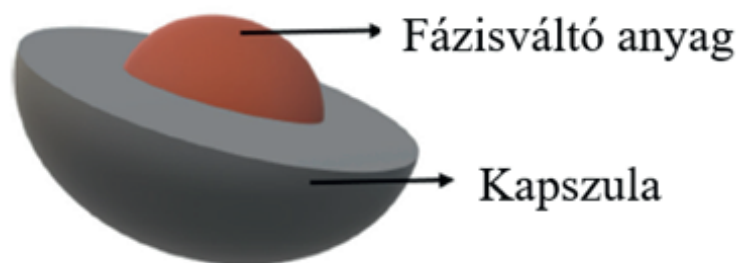
láthattuk, a 20-30 mm-es mélységben elhelyezett eszközök, legyen szó akár a hővezetésre alkalmazott fémekről, hatást gyakorolnak a pályaszerkezet teherviselésére (Tahami et al., 2020). Emellett viszont azt is ki kell emelni, hogy ezeknek a rendszereknek az alkalmazása a felületi hőmérsékletet 8-9 °C-kal csökkentette, ami a városi hősziget hatását is mérsékelheti, amennyiben szélesebb körben képes lesz elterjedni a használata (Jiang et al., 2017).

4.4. PCM burkolatok

A burkolatokba beépített fázisváltó anyagok (PCM: Phase Change Material) képesek a fizikai állapotuk megváltoztatása során hő elnyelésével és leadásával szabályozni a felületi hőmérsékletet. Ez annak köszönhető, hogy a PCM-ek magas látens fűzési hővel rendelkeznek és ezáltal jelentős mennyiségű hőenergiát képesek tárolni a hőmérséklet nagymértékű megváltoztatása nélkül (Ma et al., 2014). Ennek következtében elkerülhető lehet a rendszerben tárolt hőenergia túlzott és hirtelen ingadozása, ami csökkentheti a burkolatok károsodásának az esélyét és a városi hősziget hatásának a mértékét (Pinheiro et al., 2023).

Ezek a PCM-ek az aszfalt és a betonburkolatok esetében is felhasználhatóak a hőterhelés mérséklésének az érdekében, azonban a megfelelő típusú fázisváltó anyag megválasztása kiemelt jelentőséggel bír. A legfontosabb paraméterek, amiket figyelembe kell venni a tervezés során, az a látens hő tárolási képesség és az olvadáspont (Ma et al., 2011). Ezek közül az olvadáspont azért olyan jelentős, mert ez a tulajdonság határozza meg azt a hőmérsékleti tartományt, amelyben a PCM képes hő tárolni vagy leadni (Fatahi et al., 2022). Magas hőmérsékleten történő alkalmazás esetén egy alacsony olvadáspontú PCM instabillá válhat és gyorsan olvadhat (Qiu et al., 2020). Ez azért is jelent problémát, mivel, ha az olvadáspont $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál van és a burkolat hőmérséklete elérheti a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot, akkor az olvadást követően a PCM már nem lesz képes több hő tárolni és fázisátalakuláson fog keresztül menni, aminek hatására elkezd hő leadni. Ez végső soron túlmelegedéshez vezetne és tovább fokozná a városi hősziget hatását (Kauranen et al., 1991; Jaguemont et al., 2018). Ezzel szemben a magasabb $50\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli olvadáspontú PCM-ek alkalmasak lehetnek olyan területeken, ahol a nyári hőmérséklet túlzottan magasra emelkedhet és ezáltal ronthatja az aszfalt mechanikai tulajdonságát. Ezek a fázisváltó anyagok a nap legmelegebb óráiban lassan képesek a felesleges hő elnyelni és tárolni, ezért

jól alkalmazhatóak olyan hűvös burkolati technológiaként, ami esetében a nagy mennyiségű hőenergia megtartása elengedhetetlen. Ez az eltárolt látens hőmennyiség képes csökkenteni az aszfalt felületi hőmérsékletét, aminek köszönhetően a városi hősziget hatásának az intenzitása is mérsékelhető. További pozitívum a magas olvadáspontú PCM-ek esetében, hogy $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál magasabb hőmérséklet esetében is képesek hőstabilitást biztosítani, így olyan alkalmazási körben is használhatóak, ahol a hőmérséklet alkalom adtán meghaladja az olvadáspontjukat (Konuklu, 2018). A fázisváltó anyagok másik fontos tulajdonsága a fűzési entalpia, melyet J/g-ban mérnek. Ez azt az energiamennyiséget jelenti, ami ahhoz szükséges, hogy az adott anyag fázisa szilárdból folyadékká váljon, anélkül, hogy a hőmérséklete megváltozna. Ennek értelmében a PCM-et jellemző fűzési entalpia határozza meg azt az értéket, hogy az anyag mennyi hőenergiát képes tárolni és leadni a fázisátalakulások során (Guan et al., 2011). Ellenben fontos azt is kiemelni, hogy a PCM-ek gyakorlati alkalmazása bonyolult a szivárgásra való hajlamuk miatt, ami a fázisátmenet során szilárdból folyékony halmazállapotba történő átalakulásuk következtében lép fel. A szivárgás megakadályozására általánosan elfogadott megoldás a hordozó mátrixanyagok alkalmazása, melyek fizikai gátként szolgálnak és a PCM-et ezáltal kapszulázni képesek. Ehhez az SiO_2 -t gyakran alkalmazzák olyan népszerű PCM-ek esetében is, mint a PEG2000 (polietilén-glikol) és a PEG4000 (Hu et al., 2021; Gong et al., 2022). Azonban a burkolatokban használt PCM-nek nagy forgalmi terhelést kell elviselnie. Annak ellenére, hogy a fázisváltó anyagot kapszulázott formában építik be, a közlekedésből származó dinamikus terhelés hatására képes megrepedni. Ez a PCM szivárgásához vezet, ami kedvezőtlenül befolyásolja az aszfalt és a beton burkolatok fizikai tulajdonságait is (Du et al., 2019; Haurie et al., 2016).



16. ábra Kapszulázott fázisváltó anyag
[Forrás: Anupam et al., 2020]

A fázisváltó anyagok részecskemérete is kulcsfontosságú szerepet játszik a szivárgásveszély és a hőteljesítmény szempontjából. Ez annak is köszönhető, hogy méretük rendkívül széles skálán mozog, a $0,0002\text{ mm}$ -tól egészen a $9,5\text{ mm}$ -ig terjedhet. Az átlagos részecskeméret azonban $1,27\text{ mm}$ körüli értéknek feleltethető meg (Amini et al., 2023; Yuan et al., 2022). A korábban már említett PEG 2000 és PEG4000 esetében ez az érték $0,4\text{ mm}$ és $0,6\text{ mm}$. Ezzel kapcsolatban arra a megfigyelésre jutottak, hogy a kisebb részecskék javítják a PCM termikus teljesítményét a nagyobb felület-térfogat arányuk miatt, ugyanakkor hajlamo-

sabbak a szivárgásra, mivel a méretükből adódóan könnyebben navigálhatnak a hordozómátrixban. Ezzel szemben a nagyobb részecskék alkalmazása kisebb szivárgásveszélyt jelent, de a PCM termikus hatékonyságát negatívan befolyásolja (Pielichowska és Pielichowska, 2017).

Az aszfaltburkolatba történő beépítésük azonban többféle módon is történhet. A nedves keverési módszer során a PCM-et a kötőanyaggal egyesítik, ami egy egyszerű megközelítést jelent a keverékbe történő integráláshoz (Bueno et al., 2019). Ez a módszer az egyszerűségéből adódóan a legel-

terjedtebb technikává vált a területen (Liu et al., 2021). Emellett jellemzően egy száraz keverési módszert is alkalmaznak, mely során a PCM-et a tömörítés előtt adják az aszfalthoz, mint adalékanyagot. Ez a megoldás annak ellenére, hogy kevésbé elterjedt, egyre nagyobb teret kezd nyerni, ami a fázisváltó anyag aszfaltkeverékben való eloszlásának a jobb ellenőrizhetőségének köszönhető (Agha et al., 2023). Azonban mindkét módszernek megvannak a maga előnyei és hátrányai. A nedves módszert általában azért tekintik jobbnak, mivel az képes kiküszöbölni a további lépések szükségességét, ami a munkaigény csökkentésével jár (Han et al., 2016). Ellenben ezt a módszert felül kell vizsgálni a PCM eloszlásának a tekintetében, hogy az aszfaltkeverékben jobban szabályozható legyen. Ezzel szemben a száraz keverési módszer lehetővé teszi az eloszlás ellenőrzését, de ezáltal a munkaigény megnőhet és a homogén keverék biztosítása is kihívást jelenthet (Gao et al., 2022).

Vannak azonban más hátráltató tényezők is az aszfaltkeverékbe történő beépítés kapcsán. A korábban említett szivárgás megelőzése mellett olyan szempontból is meg kell felelni a fázisváltó anyag, hogy a keverési folyamat során fellépő magas hőmérsékletnek is ellen kell tudnia állni. Ez a gyártási folyamat esetében akár 180 °C-os hőmérsékletet is jelenthet. Ezt többnyire a kapszula anyagának a megválasztásával igyekeznek megoldani, mely képes ellenállni az

ilyen magas hőmérsékletnek is (Ma et al., 2011). Fontos kiemelni azt is, hogy miután a beépítés módszerének a megválasztása megtörtént, és erre alkalmas PCM került kiválasztásra, ami megfelel minden feltételnek, azután a hozzáadott mennyiség meghatározását is el kell végezni. Ez jellemzően a PCM típusától és a végtermék kívánt hőtani tulajdonságától függ, így minden anyag esetében egyedi módon kell elvégezni az elemzést (Du et al., 2019; Yuan et al., 2022). Ennek szerepe mechanikai szempontból is kiemelt jelentőséggel bír, mivel a módosított keverék dinamikus stabilitása és szilárdsága a PCM tartalom növekedésével csökkenhet (Hu et al., 2021; Yinfei et al., 2020). Ez az érték a kapcsolódó tanulmányok alapján az aszfaltkeverékben levő kötőanyag tömegének a 3-15 %-a közé tehető, azonban ez a mennyiségi eloszlás függ a PCM típusától, hiszen vannak olyan fázisváltó anyagok melyek jóval több látens hőt képesek tárolni, így azokból kisebb mennyiség is elegendő lehet (Dai et al., 2021; Dai et al., 2022).

Ezek alapján jól látható, hogy a technológia tervezés kiemelt jelentőséggel bír az ilyen típusú hűvös burkolatok esetében, azonban a laboratóriumi és terepi mérések azt igazolják, hogy a PCM-ek alkalmazása képes 9 °C-kal is csökkenteni az útburkolatok hőmérsékletét (Liu et al., 2020; Wei et al., 2019; Gao et al., 2022).

5. Összefoglalás

Láthattuk tehát, hogy ezek a hűvös burkolati technológiák alkalmasak a felületi hőmérséklet mérséklésére, azonban a levegő hőmérsékletét érdemben nem tudták csökkenteni a vizsgálatok során. Ennek oka, hogy a léghőmérséklet kevésbé érzékeny, mint a felületi hőmérséklet. Ezért érdemes lenne ezeket a technológiákat szélesebb körben is tesztelni, ezáltal kimutatható lehetne egy-egy városrész esetében, hogy az adott technológia milyen hatást gyakorol a városi hősziget jelenségére. Fontos azonban azt is megemlíteni, hogy ezek a hideg burkolatok nem feltétlenül járnak olyan mértékű pozitív hatással, mint amennyi pénzt és energiát igényelnek a kísérleti fázisban. Ennek okán érdemes elgon-

dolkodni egy olyan megoldási lehetőségen is, mely összehangolja az infrastruktúrát érintő és az élhető város kialakítására irányuló egyéb szakági törekvéseket egyaránt. Legyen szó akár árnyékolásról, fásításról vagy egyes városrészek teljes körű átalakításáról. Ennek első lépése, hogy a társadalom és a döntéshozói réteg felé közvetíteni kell egy megalapozott üzenetet, ami a probléma jelentőségét hivatott átadni és jól szemlélteti, hogy egy adott szakág keretein belül nem állnak rendelkezésre a megfelelő eszközök ahhoz, hogy a városi hősziget hatását mérsékelni lehessen, így egy szélesebb körben való összefogás szükséges ahhoz, hogy érdemi megoldást találjunk a problémára.

Forrás

Aggarwal, R. M., Guhathakurta, S., Grossman-Clarke, S., & Lathey, V. (2012). How do variations in Urban Heat Islands in space and time influence household water use? The case of Phoenix, Arizona. *Water Resources Research*, 48(6). <https://doi.org/10.1029/2011WR010924>

Agha, N., Hussain, A., Ali, A. S., & Qiu, Y. (2023). Performance evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) containing Polyethylene Terephthalate (PET) using wet and dry mixing techniques. *Polymers*, 15(5), 1211. <https://doi.org/10.3390/polym15051211>

Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A. L., Rossi, F., ... & Zinzi, M. (2016). Local climate change and urban heat island mitigation techniques—the state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(1), pp. 1-16. <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1111934>

American Concrete Pavement Association, (2009). Hot Pavement. (http://www.pavements4life.com/qds/environment_1heatland.asp 2024.09.16.)

Amini, N., Hayati, P., & Latifi, H. (2023). Evaluation of rutting and fatigue behavior of modified asphalt binders with nanocomposite phase change materials. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 16(3), pp. 678-692. <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00156-z>

Anupam, B. R., Sahoo, U. C., & Rath, P. (2020). Phase change materials for pavement applications: A review. *Construction and Building Materials*, 247, 118553. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118553>

Anupam, B. R., Sahoo, U. C., Chandrappa, A. K., & Rath, P. (2021). Emerging technologies in cool pavements: A review. *Construction and Building Materials*, 299, 123892. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123892>

Bao, T., Liu, Z. L., Zhang, X., & He, Y. (2019). A drainable water-retaining paver block for runoff reduction and evaporation cooling. *Journal of Cleaner Production*, 228, pp. 418-424. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.142>

Bartholy, J., Dezső, Zs., Gelybó, Gy., Kern, A., Pongrácz, R., & Radics, K. (2013). *Alkalmazott és városklimatológia, Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Budapest.*

Basics, U. H. I. (2011). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. US EPA. (<http://www.epa.gov/heatisland/resources/compendium>. 2024.10.23.).

Bobes-Jesus, V., Pascual-Muñoz, P., Castro-Fresno, D., & Rodriguez-Hernandez, J. (2013). Asphalt solar collectors: A literature review. *Applied Energy*, 102, pp. 962-970. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.050>

Budapest Fővárosi Önkormányzat (2020). Épített zöldfelületek, Budapest környezeti állapotértékelése, (https://archiv.budapest.hu/Documents/BKAE/2019-2020/12_BK%C3%81%C3%89-2020_I-2-Z%C3%B6ldfel%C3%BCletek.pdf 2024.09.15.)

Bueno, M., Kakar, M. R., Refaa, Z., Worlitschek, J., Stamatiou, A., & Partl, M. N. (2019). Modification of asphalt mixtures for cold regions using microencapsulated phase change materials. *Scientific reports*, 9(1), 20342. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56808-x>

Ceylan, H., Gopalakrishnan, K., Kim, S., & Cord, W. (2014). Heated transportation infrastructure Systems: Existing and Emerging Technologies.

Chen, B. L., Bhowmick, S., & Mallick, R. B. (2009). A laboratory study on reduction of the heat island effect of asphalt pavements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 78, pp. 209-248.

Chen, J., Chu, R., Wang, H., Zhang, L., Chen, X., & Du, Y. (2019). Alleviating urban heat island effect using high-conductivity permeable concrete pavement. *Journal of cleaner production*, 237, 117722. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117722>

Dai, J., Ma, F., Fu, Z., Li, C., Jia, M., Shi, K., ... & Wang, W. (2021). Applicability assessment of stearic acid/palmitic acid binary eutectic phase change material in cooling pavement. *Renewable Energy*, 175, pp. 748-759. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.063>

Dai, J., Ma, F., Fu, Z., Li, C., Wu, D., Shi, K., ... & Jia, M. (2022). Assessing the direct interaction of asphalt binder with stearic acid/palmitic acid binary eutectic phase change material. *Construction and Building Materials*, 320, 126251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126251>

Datta, U., Dessouky, S., & Papagiannakis, A. T. (2017). Harvesting thermoelectric energy from asphalt pavements. *Transportation Research Record*, 2628(1), pp. 12-22. <https://doi.org/10.3141/2628-02>

Dincer, I. (2000). Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 4(2), pp. 157-175. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00011-8)

Du, Y., Liu, P., Wang, J., Wang, H., Hu, S., Tian, J., & Li, Y. (2019). Laboratory investigation of phase change effect of polyethylene glycol on asphalt binder and mixture performance. *Construction and Building Materials*, 212, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.308>

Fatahi, H., Claverie, J., & Poncet, S. (2022). Thermal characterization of phase change materials by differential scanning calorimetry: A review. *Applied Sciences*, 12(23), 12019. <https://doi.org/10.3390/app122312019>

Gao, Y., Jin, J., Xiao, T., Liu, M., Liu, S., Liu, R., ... & Liu, X. (2022). Study of temperature-adjustment asphalt mixtures based on silica-based composite phase change material and its simulation. *Construction and Building Materials*, 342, 127871. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127871>

Gartland, L. M. (2012). Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas. Earthscan, London. <https://doi.org/10.4324/9781849771559>

Ghalandari, T., Hasheminejad, N., & Vuye, C. (2021). A critical review on large-scale research prototypes and actual projects of hydronic asphalt pavement systems. *Renewable Energy*, 177, pp. 1421-1437. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.010>

Gillespie, A. R. (2014). Land Surface Emissivity. *Encyclopedia of remote sensing*, 939. DOI 10.1007/978-0-387-36699-9

Gong, X., Liu, W., & Ying, H. (2022). Phase change heat-induced structure of asphalt pavement for reducing the pavement temperature. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(2), pp. 1655-1668. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00670-3>

Gorsevski, V., Taha, H., Quattrochi, D., & Luvall, J. (1998). Air pollution prevention through urban heat island mitigation: An update on the Urban Heat Island Pilot Project. *Proceedings of the ACEEE Summer Study, Asilomar, CA*, 9, pp. 23-32.

Guan, B., Ma, B., & Qin, F. (2011). Application of asphalt pavement with phase change materials to mitigate urban heat island effect. In *2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection Vol. 3*, pp. 2389-2392. IEEE. DOI: 10.1109/ISWREP.2011.5893749

Guo, L., & Lu, Q. (2017). Potentials of piezoelectric and thermoelectric technologies for harvesting energy from pavements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, pp. 761-773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.090>

Han, L., Zheng, M., & Wang, C. (2016). Current status and development of terminal blend tyre rubber modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 128, pp. 399-409. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.080>

Haurie, L., Serrano, S., Bosch, M., Fernandez, A. I., & Cabeza, L. F. (2016). Single layer mortars with microencapsulated PCM: Study of physical and thermal properties, and fire behaviour. *Energy and Buildings*, 111, pp. 393-400. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.028>

Hu, H., Chen, W., Cai, X., Xu, T., Cui, H., Zhou, X., ... & Sun, Y. (2021). Study on preparation and thermal performance improvements of composite phase change material for asphalt steel bridge deck. *Construction and Building Materials*, 310, 125255. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125255>

Ibrahim, S. H., Nurul, I. A. I., Julaihi, W., Nurakmal, A. G., Dona, R. A. K., & Mohd, N. M. N. (2018) The impact of road pavement on Urban Heat Island (UHI) phenomenon, *International Journal of Technology*, 9(8), p. 1597. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i8.2755>

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2014). *Climate Change 2014 – Synthesis Report. Summary for Policymakers. 5th Report* (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf 2024.10.19)

Jaguemont, J., Omar, N., Van den Bossche, P., & Mierlo, J. (2018). Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review. *Applied thermal engineering*, 132, pp. 308-320. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.097>

Jiang, W., Yuan, D., Xu, S., Hu, H., Xiao, J., Sha, A., & Huang, Y. (2017). Energy harvesting from asphalt pavement using thermoelectric technology. *Applied Energy*, 205, pp. 941-950. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.091>

Katzschner, L., (2009). *Urban Climate in Dense Cities*. In *Designing High-density Cities*, pp. 100-112. Routledge.

Kauranen, P., Peippo, K., & Lund, P. D. (1991). An organic PCM storage system with adjustable melting temperature. *Solar energy*, 46(5), pp. 275-278. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(91\)90094-D](https://doi.org/10.1016/0038-092X(91)90094-D)

Kinouchi, T., Yoshinaka, T., Fukae, N., & Kanda, M. (2003). 4.7 Development of cool pavement with dark colored high albedo coating. *Target*, 50(40), 40.

Kisgyörgy, L., & Plesz, B. Thermal Energy of Asphalt Pavements. *Magyar Építő*, 64(1), pp. 3-7.

Kishonti, K., Bobvos, J., & Páldy, A. (2007). A hőhullámok egészségre gyakorolt káros hatásainak ismerete Magyarországon a városi lakosság körében. *Klíma-21 Füzetek*, 50, pp. 12-27.

Konuklu, Y.; Sahan, N.; Paksoy, H. (2018) Latent Heat Storage Systems. In *Comprehensive Energy Systems*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp. 396–434. DOI:10.1016/B978-0-12-809597-3.00231-5

Liu, X., Rees, S. J., & Spitler, J. D. (2007). Modeling snow melting on heated pavement surfaces. Part I: Model development. *Applied Thermal Engineering*, 27(5-6), pp. 1115–1124. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.06.017>

Liu, Y., Li, T., & Peng, H. (2018). A new structure of permeable pavement for mitigating urban heat island. *Science of the Total Environment*, 634, pp. 1119–1125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.041>

Liu, Z., Wang, Y., Jia, J., Sun, H., Wang, H., & Qiao, H. (2020). Preparation and characterization of temperature-adjusting asphalt with diatomite-supported PEG as an additive. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(3), 04020019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003061](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003061)

Liu, Z., Wei, K., Wang, S., Ma, B., Wang, X., Shi, W., & Xu, J. (2021). Effect of high-temperature-resistant epoxy resin/polyethylene glycol 2000 composite stereotyped phase change material particles on asphalt properties. *Construction and Building Materials*, 300, 124007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124007>

Ma, B., Li, J., Wang, X. M., & Xiao, N. (2011). Effect of composite shape-stabilized phase change material on asphalt mixture temperature. *Advanced Materials Research*, 311, pp. 2151–2154. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.311-313.2151>

Ma, B., Si, W., Ren, J., Wang, H. N., Liu, F. W., & Li, J. (2014). Exploration of road temperature-adjustment material in asphalt mixture. *Road Materials and Pavement Design*, 15(3), pp. 659–673. <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.885462>

Ma, B., Wang, S. S., & Li, J. (2011). Study on application of PCM in asphalt mixture. *Advanced Materials Research*, 168, pp. 2625–2630. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.2625>

Mallick, R. B., Chen, B. L., & Bhowmick, S. (2012). Harvesting heat energy from asphalt pavements: development of and comparison between numerical models and experiment. *International Journal of Sustainable Engineering*, 5(2), pp. 159–169. <https://doi.org/10.1080/19397038.2011.574742>

Middel, A., Turner, V. K., Schneider, F. A., Zhang, Y., & Stiller, M. (2020). Solar reflective pavements—A policy panacea to heat mitigation?. *Environmental research letters*, 15(6), 064016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab87d4>

Musco, F. (2016). Counteracting urban heat island effects in a global climate change scenario. *Springer Nature, Venice*. DOI 10.1007/978-3-319-10425-6

Nakayama, T., & Fujita, T. (2010). Cooling effect of water-holding pavements made of new materials on water and heat budgets in urban areas. *Landscape and urban planning*, 96(2), pp. 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.02.003>

Nishizawa, T., Ozeki, T., Katoh, K., & Matsui, K. (2009). Finite element model analysis of thermal stresses of thick airport concrete pavement slabs. *Transportation research record*, 2095(1), pp. 3–12. <https://doi.org/10.3141/2095-01>

Nolas, G. S., Sharp, J., & Goldsmid, J. (2013). *Thermoelectrics: basic principles and new materials developments* (Vol. 45). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/2F978-3-662-04569-5>

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 108(455), pp. 1–24.

Páldy, A., & Bobvos, J. (2008). A 2007. évi magyarországi hóhullámok gyakorisága. *KLÍMA-21" Füzetek*, 52.

Páldy, A., & Bobvos, J. (2011). A klímaváltozás egészségi hatásai. Sebezhetőség–alkalmazkodóképesség In P. Tamás, & M. Bulla (Eds.), *Sebezhetőség és adaptáció–A reziliencia esélyei*, pp. 97–114.

Páldy, A., & Bobvos, J. (2013). A klímaváltozás egészségi hatásai In: EMBER, I.–PÁL, V.–TÓTH, J.(szerk.): *Egészségföldrajz* pp. 443–460. Medicina Könyvkiadó Zrt., Budapest.

Páldy, A., & Bobvos, J. (2014). Health impacts of climate change in Hungary—a review of results and possibilities to help adaptation. *Central European Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 20(1-2), pp. 51–67.

Páldy, A., Bobvos, J., Nádor, G., Erdei, E., Kishonti, & K. (2004a): A klímaváltozás egészségi hatásainak vizsgálata: nemzeti egészségügyi hatásbecslés

Páldy, A., Erdei, E., Bobvos, J., Ferenczi, E., Nádor, G., & Szabó, J. (2004b): A klímaváltozás egészségi hatásai. *Egészségtudomány* 48 (2-3): pp. 220–236.

Pan, P., Wu, S., Xiao, Y., & Liu, G. (2015). A review on hydronic asphalt pavement for energy harvesting and snow melting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, pp. 624–634. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.029>

Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2017). Phase change nanomaterials for thermal energy storage. *Nanotechnology for energy sustainability*, pp. 459–484. <https://doi.org/10.1002/9783527696109.ch20>

Pinheiro, C., Landi Jr, S., Lima Jr, O., Ribas, L., Hammes, N., Segundo, I. R., ... & Carneiro, J. (2023). Advancements in phase change materials in asphalt pavements for mitigation of urban heat island effect: Bibliometric analysis and systematic review. *Sensors*, 23(18), 7741. <https://doi.org/10.3390/s23187741>

Probáld, F. (1974). Budapest városklímája. Akadémiai Kiadó, Budapest.

Qin, Y., He, Y., Hiller, J. E., & Mei, G. (2018). A new water-retaining paver block for reducing runoff and cooling pavement. *Journal of Cleaner Production*, 199, pp. 948–956. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.250>

Qiu, J., Huo, D., & Xia, Y. (2020). Phase-change materials for controlled release and related applications. *Advanced Materials*, 32(25), 2000660. <https://doi.org/10.1002/adma.202000660>

Randriantsoa, A. N. A., Fakra, D. A. H., Rakotondrajaona, L., & Van Der Merwe Steyn, W. J. (2023). Recent advances in hybrid energy harvesting technologies using roadway pavements: a review of the technical possibility of using piezo-thermoelectrical combinations. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 16(4), pp. 796–821. <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00164-z>

Roesler, J., & Sen, S. (2016). Impact of pavements on the urban heat island. University of Illinois at Urbana-Champaign, Centre for Highway Pavement Preservation, CHPP, US Department of Transportation-Research and Innovative Technology Administration, RITA, p99.

Saleh, N. F., Zalgout, A. A., Sari Ad Din, S. A., Chehab, G. R., & Saad, G. A. (2020). Design, construction, and evaluation of energy-harvesting asphalt pavement systems. *Road Materials and Pavement Design*, 21(6), pp. 1647–1674. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1564352>

Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, pp. 224–240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>

Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions, *The Science of the Total Environment*, 512–513, pp. 582–598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.060>

Schneider, F. A., Ortiz, J. C., Vanos, J. K., Sailor, D. J., & Middel, A. (2023). Evidence-based guidance on reflective pavement for urban heat mitigation in Arizona. *Nature communications*, 14(1), 1467. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36972-5>

Scholz, M., & Grabowiecki, P. (2007). Review of permeable pavement systems. *Building and environment*, 42(11), pp. 3830–3836. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016>

Shimazaki, Y., Aoki, M., Nitta, J., Okajima, H., & Yoshida, A. (2021). Experimental determination of pedestrian thermal comfort on water-retaining pavement for UHI adaptation strategy. *Atmosphere*, 12(2), 127. <https://doi.org/10.3390/atmos12020127>

Siebert, N., & Zacharakis, E. (2010). Asphalt Solar Collector and Borehole Storage; Design study for a small residential building area, Chalmers University of Technology, Sweden.

Somayaji, S. (1994). *Civil Engineering Materials*, Prenticehall, New Jersey.

Starke, P., Göbel, P., & Coldewey, W. G. (2010). Urban evaporation rates for water-permeable pavements. *Water Science and Technology*, 62(5), pp. 1161–1169. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.390>

Stempihar, J. J., Pourshams-Manzouri, T., Kaloush, K. E., & Rodezno, M. C. (2012). Porous Asphalt Pavement Temperature Effects for Urban Heat Island Analysis. *Transportation Research Record*, 2293(1), pp. 123–130. <https://doi.org/10.3141/2293-15>

Stewart, I. D., & Mills, G. (2021). *The urban heat island*. Elsevier, Amsterdam.

Szepesi, D., & Schirokné Kriston I. (1999). A városi levegőkörnyezet tervezésének aktuális kérdései. In: Éghajlati és agrometeorológiai tanulmányok, 1. Városhklimatológiai munkaértekezlet szerk. Szalay S., Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, pp. 6-19.

Tahami, S. A., Gholikhani, M., & Dessouky, S. (2020). Thermoelectric energy harvesting system for roadway sustainability. *Transportation Research Record*, 2674(2), pp. 135-145. <https://doi.org/10.1177/0361198120905575>

Thurston, R. E., Culver, G., & Lund, J. W. (1995). Pavement snow melting in klamath falls-rehabilitation of the ODOT well. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 16(2).

Trenberth, K., Meehl, J., Masters, J., & Underground, W. (2012). Heat Waves and Climate Change. (http://danida.vnu.edu.vn/cpis/files/Refs/Heat%20Waves/Heat_Waves_and_Climate_Change.pdf. 2024.10.19.)

Tziampou, N., Coupe, S. J., Sañudo-Fontaneda, L. A., Newman, A. P., & Castro-Fresno, D. (2020). Fluid transport within permeable pavement systems: A review of evaporation processes, moisture loss measurement and the current state of knowledge. *Construction and Building Materials*, 243, 118179. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118179>

Uzzoli, A., Szilágyi, D., & Bán, A. (2019). Az éghajlatváltozás egészségkockázatai és népegészségügyi következményei-A hőhullámokkal szembeni sérülékenység területi különbségei Magyarországon. *Területi Statisztika*, 59(4), pp. 400-425. <https://doi.org/10.15196/TS590403>

Van Bijsterveld, W. T., Houben, L. J. M., Scarpas, A., & Molenaar, A. A. A. (2001). Using pavement as solar collector: effect on pavement temperature and structural response. *Transportation Research Record*, 1778(1), pp. 140-148. <https://doi.org/10.3141/1778-17>

Vandevyvere, H., & Neuckermans, H. (2007). The implementation deficit of sustainable construction in Flanders, Belgium. Estimation and proposals for enhanced strategies. In *Proceedings of the 24th International Conference on Passive and Low Energy Architecture*, NUS, Singapore.

Wagner, E., Szépszó, G., Allaga-Zsebeházi, G., Lakatos, M., Szentes, O., Taksz, L., Selmeczi, J. P., Czira, T., Csóka, G., & Baka, Gy. (2021). Éghajlatvédelmi vizsgálatok módszertana és az azt megalapozó adatbázisok alkalmazása, Magyar Mérnöki Kamara Kiadványsorozata 82., Budapest

Wang, J., Meng, Q., Tan, K., Zhang, L., & Zhang, Y. (2018). Experimental investigation on the influence of evaporative cooling of permeable pavements on outdoor thermal environment. *Building and Environment*, 140, pp. 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.033>

Wei, K., Ma, B., & Duan, S. Y. (2019). Preparation and properties of bitumen-modified polyurethane solid-solid phase change materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(8), 04019139. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002795](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002795)

Xie, N., Li, H., Abdelhady, A., & Harvey, J. (2019). Laboratorial investigation on optical and thermal properties of cool pavement nano-coatings for urban heat island mitigation. *Building and Environment*, 147, pp. 231-240. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.017>

Xie, N., Li, H., Zhao, W., Zhang, C., Yang, B., Zhang, H., & Zhang, Y. (2019). Optical and durability performance of near-infrared reflective coatings for cool pavement: Laboratorial investigation. *Building and Environment*, 163, 106334. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106334>

Xu, L., Wang, J., Xiao, F., Sherif, E. B., & Awed, A. (2021). Potential strategies to mitigate the heat island impacts of highway pavement on megacities with considerations of energy uses. *Applied Energy*, 281, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116077>

Yaghoobian, N., & Kleissl, J. (2012). Effect of reflective pavements on building energy use. *Urban Climate*, 2, pp. 25-42. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2012.09.002>

Yinfei, D., Pusheng, L., Jiacheng, W., Hancheng, D., Hao, W., & Yingtao, L. (2020). Effect of lightweight aggregate gradation on latent heat storage capacity of asphalt mixture for cooling asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 250, 118849. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118849>

Yuan, J., He, P., Li, H., Xu, X., & Sun, W. (2022). Preparation and Performance Analysis of Ceramsite Asphalt Mixture with Phase-Change Material. *Materials*, 15(17), 6021. <https://doi.org/10.3390/ma15176021>

Zhou, Z., Hu, S., Zhang, X., & Zuo, J. (2013). Characteristics and application of road absorbing solar energy. *Frontiers in Energy*, 7, pp. 525-534. DOI 10.1007/s11708-013-0278-2

BITUMEN

A MOL-csoport Közép-Kelet Európa meghatározó bitumen gyártója és értékesítője.

Termékeinkkel 16 országban vagyunk jelen, évente közel 500.000 tonna bitumént értékesítünk a régióban.



Termékcsoport: Portfólió:

ÚTI BITUMEN 20/30, 35/50, 50/70, 70/100, 160/220

MODIFIKÁLT BITUMEN 10/40-65, 25/55-65, 45/80-65, 45/80-75 RA

GUMIBITUMEN 45/80-55

IPARI BITUMEN 85/25, 85/40, 95/35, 105/25

500.000

TONNA ÉVES ELADOTT MENNYISÉG

14

BITUMEN TÍPUS

16

ORSZÁGBAN AKTÍV JELENLÉT

UTAK ÚJRAFELDOLGOZOTT ASZFALTBÓL - MOL PMB RA BITUMEN



- ▶ MOL PmB 45/80-75 RA - polimerrel modifikált bitumen
- ▶ Megnövelt modifikálószer tartalommal rendelkezik
- ▶ Visszanyert aszfalt felhasználásával készült aszfaltok gyártásához kifejlesztve a MOL kutatás-fejlesztés szakemberei által

ÚJGENERÁCIÓS ASZFALT - MOL GUMIBITUMENNEL



- ▶ MOL egyedi szabadalom, az Ütügyi Műszaki Előírások (UME) része
- ▶ 20 kt/év gyártási kapacitás a MOL Zalaegerszegi Bitumen Üzemében
- ▶ 2011 óta több mint 200 km új gumibitumenes út és autópálya szakasz itthon és a környező országokban
- ▶ Független mérési eredményekkel alátámasztott előnyök alapján a PmB alternatívája

Tartson Ön is velünk a jövő útján!

További információk





Finn gyökerek, hazai sikerek – Burkolatmarásban hasít a Finn Út Kft.

A burkolatmarásban meghatározó szereplővé váló vállalat stabil gépparkkal, tapasztalt szakembergárdával és hosszú távú fejlesztési vízióval szolgálja ki partnereit.

...mert a felújítás első lépése: a burkolatmarás!

Így hangzik a **Finn Út Kft.** jelmondata, amely egyben kijelöli a vállalat fő profilját is.

A társaság 1991-ben alakult finn–magyar közös vállalkozásként, és elsőként honosította meg itthon a Finnországban már bevált **hidegaszfalt-technológiát**. A hazai viszonyokra adaptált megoldás rövid idő alatt országos lefedettséget eredményezett.

Stabil alapokra építve

2005-től a Finn Út Kft. már 100 százalékban magyar tulajdonú, családi vállalkozásként működött tovább. 2024-ben a tulajdonosváltást követően, és a cég fókusza egyértelműen a **burkolatmarási tevékenységre** helyeződött át.

Az új tulajdonosi kör – a több mint három évtizedes út- és mélyépítési tapasztalattal rendelkező Penta Általános Építőipari Kft. és a Tarjánvölgyi Kft. szakmai háttérére támaszkodva – nem pusztán eszközöket, hanem értéket látott a Finn Út Kft.-ben: egy összeszkott csapatot, felhalmozott szaktudást és komoly piaci potenciált. *Az akvizíciót követően elsődleges cél volt a munkavállalók megtartása, a munkakörülmények további javítása és az egységes arculat kialakítása. Ezzel párhuzamosan megtörtént az eszközpark teljes műszaki felülvizsgálata és további eszközökkel történő bővítése annak érdekében, hogy a vállalat stabil alapokon vághasson neki a 2025-ös szezonnak.*

Szolgáltatásunk alapja a pontosság, megbízhatóság és kiszámíthatóság

A Finn Út Kft. ma már **7 darab nagy teljesítményű burkolatmaró géppel** áll partnerei rendelkezésére, az ország bármely pontján – sőt, igény esetén akár határon túl is. A tartalékgépek biztosítása lehetővé teszi, hogy egy váratlan meghibásodás se okozzon fennakadást a kivitelezésben, ami a burkolatmarási piacon kiemelt versenyelőnyt jelent. Ezeken túl a fejlesztések új teherautók beszerzésével is folytatódtak.

A megrendelői visszajelzések alapján az átmenet zökkenőmentesen zajlott, a cég szolgáltatásai továbbra is a minőségre épülnek: pontos szervezés, megbízható géppark és kiszámítható munkavégzés.

A gyártás elindítása is napirenden

A Finn Út Kft. missziója egyértelmű: *a burkolatmarás szűk, de kritikus szegmensében versenyképes áron, kiemelkedő minőségű szolgáltatást nyújtani.*

Ennek érdekében a vállalat folyamatosan keresi azokat a szinergiákat, amelyek az új tulajdonosi kör tapasztalatát, eszközparkját és piaci kapcsolatait a lehető legjobban hasznosítják.

A következő évek fejlesztési irányai között szerepel **kisebb szélességű, saját tulajdonú marógépek beszerzése**, valamint a nagyobb gépek szintvezérlő rendszerekkel történő felszerelése. Ez nemcsak a pontosságot növeli, hanem a digitalizációs elvárásokhoz is igazodik.

A téli időszak okozta szezonális bevételkiesés csökkentésére a vállalat a hidegaszfalt-kereskedelem újbóli erősítését tervezi, hosszabb távon pedig a **gyártás elindítása** is napirenden van.

Megkerülhetetlen szereplővé válni

A Finn Út Kft. víziója szerint az elkövetkező öt évben megkerülhetetlen szereplővé válik a burkolatmarási piacon, elsősorban a kisebb és közepes építőipari vállalkozások megbízható partnereként. Ugyanakkor gépparkja alkalmassá teszi arra is, hogy a saját marógépekkel rendelkező nagyobb kivitelezők számára kiegészítő kapacitást biztosítson.

Hosszú távon a cél a teljes körű útépitési jelenlét, akár generálkivitelezői szerepben is.

A szakmai tudás, az eszközfejlesztések és a szervezeti stabilitás mind adott ahhoz, hogy ez a terv lépésről lépésre megvalósuljon.

A Finn Út Kft. története jó példa arra, hogyan lehet egy nagy múltú vállalatot megújítani úgy, hogy közben a felhalmozott értékek nem vesznek el – sőt, új lendületet kapnak.

Viszkozitásalapú mérési módszerek összehasonlító elemzése az útépitési bitumenek magas használati hőmérsékleti tulajdonságainak meghatározására

Rosta Szabolcs

Innovációs főmérnök
Duna Aszfalt Zrt.



Szabó Zita

Duna Technológia Kft.

Dr. habil. Gáspár László

Széchenyi István Egyetem

Absztrakt

Az útépitési bitumenek reológiai jellemzőinek pontos meghatározása alapvető jelentőségű a hosszú távú pályaszerkezeti viselkedés megbízható előrejelzése szempontjából. A jelen tanulmány célja a különböző viszkozitásmeghatározási módszerek – közelítések, kapilláris módszer, forgóorsós (Brookfield) mérés, valamint dinamikus nyíróreométerrel (DSR) meghatározott komplex viszkozitás – összehasonlító vizsgálata, valamint azok egymással való kapcsolatának elemzése. Továbbá, az európai és ausztrál bitumenosztályozási szabványokat hasonlítjuk össze dinamikai viszkozitás és penetráció szempontjából, mely alapján az ausztrál bitumenek stabilabb eredményt mutatnak. A különböző módszerekkel kapott eredmények sta-

tisztikai kiértékelése a Pearson-féle korreláció elemzésére és relatív eltérések vizsgálatára épül. A kapott eredmények azt mutatják, hogy a DSR 1,6 Hz frekvencián végzett mérései állnak legszorosabb kapcsolatban a kapilláris viszkozitással, valamint leginkább ez korrelál a többi méréssel is. A Heukelom-féle összefüggés felülbecsli a dinamikai viszkozitás értékét. A Brookfield-módszer minden vizsgált esetben magasabb viszkozitást eredményez. A vizsgálat rávilágít arra, hogy a különböző mérési módszerek eredményei csak bizonyos nyírási feltételek figyelembevételével hasonlíthatók össze, és a DSR-alapú megközelítés alkalmazható lehet egy esetleges újfajta európai bitumenosztályozás bevezetésére.

1. Bevezetés

Az aszfaltburkolatok élettartamát és teljesítményét meghatározza az aszfaltkeverékek mechanikai viselkedése, amely szoros összefüggésben áll a kötőanyag (bitumen) reológiai tulajdonságaival. A forgalmi terhelések időben változó jellege, valamint a hőmérséklet és az öregedés együttes hatása miatt a bitumenek viszkoelasztikus anyagként viselkednek, így azok jellemzésére egyetlen vizsgálati paraméter önmagában nem elég. Egyre nagyobb hangsúlyt kapnak azok a laboratóriumi módszerek, amelyek képesek a kötőanyag és a keverék idő- és frekvenciafüggő viselkedésének leírására. A dinamikus nyírási reométerrel (DSR) végzett vizsgálatok képesek a komplex viszkozitás és fázisszög meghatározására. Ugyanakkor a gyakorlatban továbbra is széles körben alkalmazzák a hagyományos vizsgálatokat, mint az európai bitumenosztályozás alapját képező penetráció, és lágyuláspont mérése. Azonban a nemzetközi gyakorlat, így az ausztrál bitumenosztályozás is nagyobb hangsúlyt tesz a vákuumkapilláris módszerrel, 60 °C-on mért dinamikai viszkozitásra, mely a folyadékok belső, nyírással szembeni

ellenállását jellemzi, lehetőséget adva az útburkolat viselkedésének részletesebb jellemzésére.

A szakirodalomban számos empirikus összefüggés ismert, amelyek célja a hagyományos viszkozitásvizsgálatokból származó eredmények közelítése, illetve kapcsolatok jellemzése. Ezek alkalmazhatósága azonban gyakran korlátozott az adott vizsgálati tartományra, illetve bizonytalanságot hordoz az eltérő mérési frekvenciák és nyírási sebességek miatt. A jelen tanulmány célja, hogy különböző kötőanyag-vizsgálati módszerek eredményeit összevetse, és feltárja azok egymáshoz való viszonyát. A vizsgálatok révén hozzájárulhatunk ahhoz, hogy a hagyományos és a korszerű módszerek közötti kapcsolat pontosabban értelmezhető legyen. Tanulmányunkban megállapítjuk az ausztrál-, illetve európai bitumenosztályozás különbségeit, illetve a bitumengyártásra gyakorolt hatását. A különböző mérési módszerekkel kapott eredmények közötti összefüggést pedig előjeles eltérésekkel és Pearson-korrelációkkal vizsgáljuk, hogy megtaláljuk a legideálisabb mérési módszert.

2. Módszertan

2.1. A vákuumkapilláris viszkoziméter története és limitációi az útépitési bitumenek vizsgálata kapcsán

A vákuumkapilláris viszkoziméter a bitumenek dinamikai viszkozitásának klasszikus laboratóriumi módszere. A vizsgálat alaphelyzetben 60 °C-on és ~300 mmHg (~40 kPa) vákuum mellett történik, a Hagen–Poiseuille-törvényre épülő idő–térfogat-mérésekből számított dinamikai viszkozitás meghatározásával. A módszert az 1930-as évektől elterjedt Cannon–Manning, Asphalt Institute és Modified Koppers kapillárisok tették ipari szabvánnyá; ma az ASTM D2171/D2171M-22 [1,2] és az EN 12596:2023 [3] szabványok rögzítik a részleteket, valamint azt is, hogy nemnewtoni kötőanyagoknál az eredmény a nyírási sebességtől függő „látszólagos” érték [3].

A 60 °C-on mért viszkozitás azt mutatja meg, hogy az anyag magas hőmérsékleten mennyire ellenálló a folyással és az alakváltozással szemben. Mivel az útburkolat nyári körülmények között elérheti ezt a hőmérsékletet, ez az érték jól jelzi a megoldali deformációval (például a nyomvályusodással) szembeni ellenállást. Ezért használják a 60 °C-os viszkozitást a kötőanyagok magas hőmérsékleti teljesítményének jellemzésére. A módszer ma is széles körben használt, különösen a nagy viszkozitású és magas

elaszticitású (HVMA/HVE) kötőanyagok kutatásában és receptúra-optimalizálásában; számos friss tanulmány 60 °C-on, vákuumkapilláris módszerrel mért viszkozitással jellemzi a módosított kötőanyagokat [4-6]. Porózus, kétrétegű aszfaltokhoz készített nagy viszkozitású kötőanyagoknál a 60 °C-os viszkozitás a tapadási és kohéziós jellemzők egyik meghatározó indikátora [7].

A vákuumkapilláris viszkoziméter mérésben a hőstabil tartályban (60 ± 0,1 °C) temperált kapillárisban a vákuum „felszívja” a bitument. Az adott szakasz áthaladási idejéből és a kapilláris konstansából számítható a dinamikai viszkozitás. A módszer előnye a jó ismételhetőség newtoni (nem modifikált) kötőanyagokra és a viszonylag egyszerű eszközigény. Módosított (SBS/CR, TPS stb.) bitumeneknél ugyanakkor a mérés gyakran csak „látszólagos” viszkozitást ad, mert a nyírási sebesség nincs közvetlenül definiálva, a minta pedig nemnewtoni módon viselkedhet [2,6]. Továbbá a kalibráció, a megjelenő szennyeződések a kapillárison, és a vákuum stabilitása jelentősen befolyásolja a mérési bizonytalanságot [2,3]. Ennek folytán számos egyéb közelítő módszer került fejlesztésre.

2.2. Viszkozitást és merevséget közelítő formulák

A laboratóriumi viszkoziméteres mérések általánosan időigényesek és költségesek, ezért a szakirodalomban számos közelítő összefüggés is kialakult a viszkozitás meghatározására. Ezek az empirikus és félempirikus modellek a penetrációs érték, a hőmérséklet vagy a modulusok alapján próbálják becsülni a viszkozitást, illetve merevséget. Bár a

képletek ideális esetben gyakorlati becslésekre jól használhatók, a valós adatokhoz képest akár egy-két nagyságrenddel is tévedhetnek [8,9]. A következőkben bemutatjuk a leggyakrabban alkalmazott közelítő egyenleteket, valamint azok korlátait és hibaforrásait.

Heukelom-féle átváltás (1973)

A különböző hőmérsékleten mért viszkozitások közötti kapcsolatot a Heukelom-féle empirikus összefüggés adja meg [10]:

$$\log \eta = \log \eta_{\text{ref}} + \frac{-C_1 \cdot (T - T_{\text{ref}})}{C_2 + (T - T_{\text{ref}})}, \quad (1)$$

ahol η (Pa*s) a dinamikai viszkozitás, C_1 és C_2 a bitumentípusra jellemző konstansok, T és T_{ref} a hőmérséklet (°C), illetve referencia hőmérséklet (°C). Ez a képlet lehetővé teszi a viszkozitás átszámítását különböző hőmérsékletek között [10], így a lágyulásponton vett viszkozitásértékből becsülhetjük a 60 °C-os értéket.

Mirza és munkatársai (1995) modellje, valamint Witczak egyenlete viszkozításra

A 25 °C-on mért viszkozitás (η , Poise) és a penetráció (Pen, dmm) közötti kapcsolat a Marylandi Egyetemen fejlesztett modell alapján [11]:

$$\log \eta = 10,5012 - 2,2601 \cdot \log(\text{Pen}) + 0,00389 \cdot [\log(\text{Pen})]^2 \quad (2)$$

Ez az egyenlet 3–300 tizedmilliméter közötti penetrációs értékekre alkalmazható, és 25 °C-on adja meg a dinamikai viszkozitást [11]. Ennek átdolgozott változata a Witczak egyenlet, mely tágabb hőmérsékleti tartományban képes a viszkozitást becsülni [9]:

$$\log \log \eta = A_i + VTS_i \log T_v \quad (3)$$

A η a dinamikai viszkozitás értéke [mPa*s], VTS_i viszkozitás-hőmérséklet érzékenységi tényező, T_v a mérési hőmérséklet (°R – Rankine fok) - A_i konstans [12]. Azonban különböző aszfaltkeverék-típusokra, illetve más előregedési időtávban az A_i és VTS_i konstansok értéke változik, továbbá a viszkozitás mértékegysége is. Ezt Witczak és Fonseca [12] észrevételezte, és kifejlesztettek egy nemlineáris szigmoid

függvényt, mely kutatásuk szerint bármely nem módosított aszfalttípusra alkalmazható. A Witczak-modellek továbbá a dinamikai modulust (E^*) a kötőanyag viszkozitása és a keverék jellemzői alapján számítják. Witczak egyenleteit az idő múlásával többször módosította, valamint hozzá kapcsolódóan Mirza is írt fel számításokat a dinamikai modulus közelítésére [11].

Tex-535-C (Texas DOT, 1999) közelítő formula

A Texas Department of Transportation [13] szintén a penetráció és viszkozitás közötti kapcsolatra írt fel közelítő képletet, tapasztalat alapján:

$$\mu = (1,559719 \times 10^9) \times \ln((0,0275 / (0,0005 - 0,0114488 / P))) / P^2, \quad (4)$$

ahol μ a viszkozitás [Poise], P pedig a penetráció [0,1 mm].

Van der Poel (1954) modell merevségi modulusra

A Van der Poel nomogram a merevségi modulus (S) meghatározására alkalmas [14]. Ez pedig a következő Maxwell-típusú viskoelasztikus modell grafikus megoldása:

$$S = \eta \cdot \omega / \sqrt{1 + (\eta \cdot \omega / E)^2} \quad (5)$$

A számításban S a keresett merevségi modulus [Pa], ω a körfrekvencia, E a rugalmassági modulus [Pa], η a kötőanyag viszkozitása [Pa*s]. Ha $\eta \omega$ szignifikánsan kisebb,

mint E , akkor a viszkozitás és a frekvencia szorzata elhanyagolható a rugalmassági modulusához képest, vagyis az anyag viselkedése döntően rugalmas, és a merevségi modulus

lus közelítőleg $S \approx \eta\omega$. Ezzel szemben, ha $\eta\omega$ lényegesen nagyobb, mint E , akkor a viszkózus hatások dominálnak, az anyag inkább viszkózusan viselkedik, és a merevség a rugalmas modulushoz tart, vagyis $S \approx E$. A Van der Poel-féle nomogram éppen ezt a két szélső állapotot — a tisztán rugalmas és a tisztán viszkózus tartományt — valamint a közötti átmeneti, viszkoelasztikus viselkedésű tartományt ábrázolja és kapcsolja össze egyetlen grafikus módszerben.

Bár a fenti képletek széles körben használtak, csak bizonyos feltételek mellett adhatnak pontos eredményt. A Mirza-féle egyenlet [11] kizárólag 25 °C-on érvényes, és nem alkalmazható módosított bitumenekre, mivel azok nemnewtoni viselkedése miatt a penetráció nem arányos a viszkozitással [9]. A Tex-535-C képlet érzékeny a mérési pontatlanságokra: a penetrációs érték kis hibája a viszkozitás becslést értékében akár tízszeres eltérést is okozhat [13]. A Heukelom-egyenlet szintén korlátozott, mivel a C_1 és C_2 paraméterek csak meghatározott bitumentípusokra kalibráltak; más esetekben akár egy nagyságrenddel is alábecsülheti a viszkozitást [8].

A Witczak-Fonseca-modell magas korrelációs értéket ad ($R^2 \approx 0,95$) a mérési eredményekkel összevetve, de kizáró-

lag hagyományos aszfaltok adataira illesztették, így polimerrel módosított, gumival vagy adalékkal dúsított bitumenek esetében jelentős hibákat eredményez. Tóth (2010) magyarországi laborvizsgálatai alapján a Witczak-Hirschmodellek a 40 °C fölötti tartományban 20–30%-kal alábecsülték a keverékek merevségét, míg alacsony hőmérsékleten túlbecsültek [8].

A Van der Poel-féle modellnél a hibák különösen a nagyon alacsony (–10 °C alatti) és magas (70 °C feletti) hőmérsékleten jelentkeznek, mivel a lineáris viszkoelasztikus feltételezés ekkor már nem teljesül. Gutarra 2018-as perui kutatása szerint a nomogram alapú becslések 60 °C-on mért viszkozitás esetén akár kétszeres eltérést mutattak a kísérleti adatokhoz képest [15].

Összességében elmondható, hogy a klasszikus penetrációs és hőmérsékletfüggő modellek gyors, mérnöki szintű becslésekre alkalmasak, de a viszkozitás és a merevségi modulus értékében gyakran nagyságrendi eltéréseket adnak. A modern, neurális hálózati és mikromechanikai megközelítések ezeket a hibákat 10–15% alá képesek szorítani [16], ugyanakkor adat- és számítás igényük jelentősen nagyobb, és a háttérben gyakran túl komplex, adatspecifikus közelítések jelennek meg.

2.3 Egyéb viszkozitásmérési módszerek

Dinamikus nyíróreométer (DSR)

A DSR (dinamikus nyíróreométer) készülékkel történő komplex viszkozitás meghatározását az EN 14770:2023 szabvány [17] írja le. A vizsgálathoz szükséges minta-előkészítést az EN 12594:2025 szabvány [18] részletezi. A mintákat formákba öntik, majd bekerülnek a reométer két előmelegített, párhuzamos lemeze közé. A terhelést a felső lemez adja át a mintára, miközben az alsó lemezen jelentkező elmozdulást rögzítik. Az alkalmazott oszcilláló nyírófeszültség hatására a mintában kialakuló deformáció a terheléstől δ fázisszöggel eltolva következik be [19]. A fellépő feszültség (τ) és az alakváltozás amplitúdójának (γ) hányadosa adja a komplex nyírási modulus (G^*). A nyírási modulus (G^*) és a szögfrekvencia (ω) hányadosa adja meg

a komplex viszkozitást (η^*) [19]. A fázisszög pedig a keverék viszkoelasztikus viselkedésének jellemzésére alkalmas. Amennyiben a fázisszög (δ) értéke 0°, akkor az anyag elasztikus, ha $\delta = 90^\circ$, akkor viszkózus, 0° és 90° között pedig viszkoelasztikus viselkedésről beszélünk [20].

Guericke 2010-ben oszcillációs mérésekre alapozva, DSR-rel végzett vizsgálatok során kimutatta, hogy alacsony ($f = 0,159$ Hz) frekvencián a lágyulásponti hőmérsékleten fennálló anyagállapot a komplex viszkozitással jól jellemezhető, amelynek értéke $\eta^* = 1\,300$ Pa·s [21]. Később ezt az értéket felhasználjuk a Heukelom-egyenlettel történő különböző hőmérsékleten mért viszkozítások közötti átváltás során.

Brookfield-féle (forgó orsós) viszkoziméter

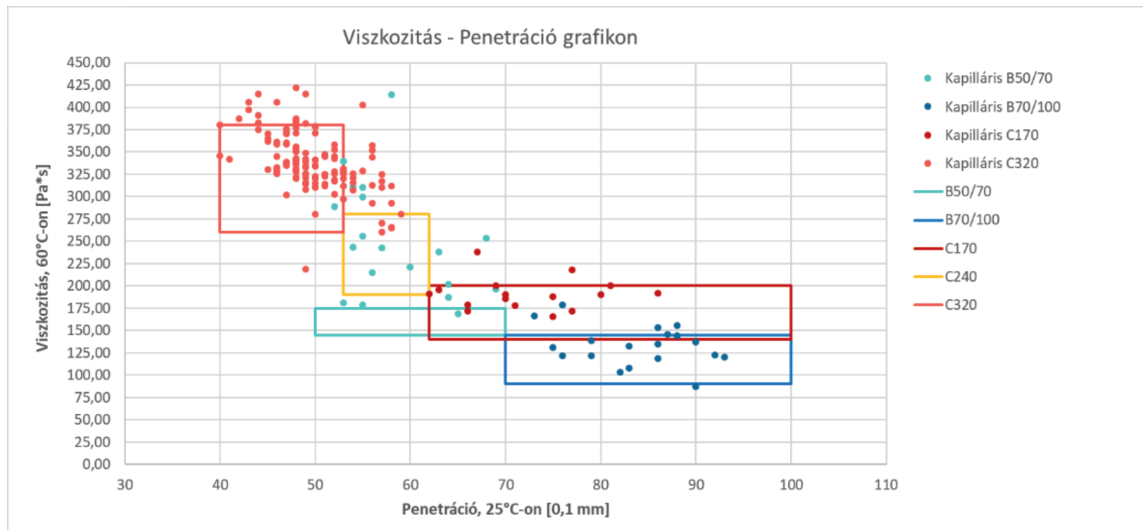
Az EN 13302:2018 szabvány a bitumenek dinamikai viszkozitásának meghatározását írja elő forgó orsós berendezéssel (Brookfield-típusú viszkoziméterrel) [22]. A módszer lényege, hogy a mintába merített orsó forgatásához szükséges nyomatékból számítható a dinamikai viszkozitás, amely nemnewtoni anyagok esetén csak azonos nyírási feltételek mellett hasonlítható össze. A forgó orsós viszkozimétert korábban több kritika érte pontatlansága miatt, azonban a modern készülékek mérési minősége ma már egyenértékűnek mondható a hagyományos módszerekkel [12]. A mérés értelmezéséhez fontos a dinamikus és a komplex viszkozitás kapcsolata. Ha a rotációs mérés nyírási sebessége megfeleltethető az oszcillációs mérés körfrekvenciájának, a komplex viszkozitás és a dinamikai

viszkozitás közel azonos a lineárisan viszkoelasztikus tartományon belül [24].

A Brookfield-készülék mérési tartományát a rugónyomaték, az orsógeometria és a fordulatszám határozza meg. Így a mérési tartomány a reométer műszaki paraméterei és az alkalmazott orsó típusának függvényében határozható meg [25]. A rugó nyomatéka csak a maximális tartomány 10–100%-a között ad megbízható eredményt, ezért a frekvenciasöpítés igen korlátozott egy adott orsóval. Ezzel szemben a Dynamic Shear Rheometer (DSR) sokkal szélesebb mérési tartományt biztosít erősebb nyomaték rugója miatt [26], bár lényegesen költségesebb. A rendelkezésre álló Brookfield DV2T készülék megfelelő orsóválasztása szükséges az adott viszkozitási tartomány mérésére.

3. Eredmények

3.1. Európai és ausztrál penetráció és viszkozitás eredmények összevetése a nemzetközi osztályozási rendszerekkel



1. Ábra. Viszkozitás-penetráció grafikon. Az y-tengelyen a dinamikai viszkozitás [Pa*s] szerepel, az x-tengelyen a 25 °C-on mért penetráció [0,1 mm]. 4-féle bitumentípus eredményeit szemléltetjük, valamint a hozzájuk tartozó ausztrál és európai bitumenosztályok határértékei vannak feltüntetve (keretek). A C170 ausztrál bitumenosztály penetrációs maximumát ausztrál gyakorlat alapján 100-nak vettük.

A vizsgálat célja a különböző bitumentípusok (B50/70, B70/100, C170, C320) penetrációjának és 60 °C-on mért kapilláris viszkozitásának összehasonlítása volt (1. Ábra). A kapott eredmények alapján a penetráció növekedésével – azaz a lágyabb kötőanyagok irányába haladva – egyértelmű viszkozitáscsökkenés figyelhető meg, ami megfelel a klaszszikus reológiai elvárásoknak. A grafikonon jól kirajzolód-

nak az egyes bitumentípusokhoz tartozó adatszórások, amelyek lehetővé teszik a különböző minőségi osztályok összevetését a szabványos előírásokkal.

Az 1. Ábra mutatja a viszkozitás [Pa*s] és penetráció [0,1 mm] értékeket, a különböző színekkel jelölt bitumentípusokra nézve, a hozzájuk tartozó szabványbeli határértékeket jelölő keretezéssel.

	P B50/70 [0,1 mm]	η B50/70 [Pa*s]	P B70/100 [0,1 mm]	η B70/100 [Pa*s]	P C170 [0,1 mm]	η C170 [Pa*s]	P C320 [0,1 mm]	η C320 [Pa*s]
átlag	58,15	253,61	84,00	133,25	72,19	191,00	50,70	325,85
szórás	5,40	64,81	5,95	21,66	6,85	17,93	3,87	32,49
variációs együttható %	9,29	25,55	7,08	16,26	9,49	9,38	7,63	9,97
szabványátlagtól vett átlagos eltérés	-1,85	93,61	-1,00	15,75	-8,81	21,00	4,20	5,85
szabványátlagtól vett átlagos eltérés %	-3,08	58,51	-1,18	13,4	-10,88	12,35	9,03	1,83

1. Táblázat. A mért, különböző bitumenosztályok viszkozitás és penetráció méréseinek statisztikai jellemzői, eltéréseik a szabványok alapján számolt átlagértékektől.

Az európai rendszer alapjai (EN 12591:2009) [27] az egyszerűen és gyorsan kivitelezhető empirikus vizsgálatok, mint penetráció (EN 1426:2025) [28], gyűrűs-golyós lágyuláspont, és a Fraass-töréspont meghatározása. Ezek alapján kerülnek a bitumenek penetrációs fokozatokba (pl. B 50/70), amelyek a termék megnevezésében is szerepelnek.

Az ausztrál AS2008-2013 [29] szabvány az útépitési bitumenek osztályozását elsősorban a 60 °C-on mért dinamikai viszkozitás alapján határozza meg, kiegészítve a 135 °C-on mért viszkozitás és a 25 °C-on mért túpenetráció vizsgálataival. A szabvány célja, hogy biztosítsa a bitumenek megfelelő feldolgozhatóságát és hosszú távú teljesítményét az útépitésben. A „C170” esetében a „C” a hagyományos útépitési bitument jelöli, míg a „170” a 60 °C-on mért dinamikai viszkozitás értékét (Pa·s).

A vizsgálati pontok jól tükrözik a kategorizálást: a B50/70 minták 50–60 közötti penetrációs tartományban, míg a B70/100 adatok 75–95 körül helyezkednek el, a viszkozitásuk pedig követi a keménységi trendet (a kisebb penetrációhoz nagyobb viszkozitás társul).

A kapott mérési pontok, különösen a C170 és C320 esetében szorosan követik ezeket a tartományokat. A grafikonon a C-osztályú bitumenek adatai kis szórással, szinte téglalapszerűen koncentrálódnak a szabványos viszkozitási sávokba, ami azt jelzi, hogy ezek a termékek reológiai szempontból homogénebbek és jobban kontrollált gyártási minőséget mutatnak (ezt az 1. táblázat is igazolja).

A B-típusú európai bitumenek szórása nagyobb a viszko-

zítás tekintetében, de sokkal jobb közelítést penetrációra sem adnak. Ezt magyarázhatja az eltérő finomítási technológia, a nagyobb érzékenység a hőmérsékleti és kémiai variációkra, illetve a viszkozításra nézve kevésbé szigorú penetrációs elvű osztályozás.

A C-típusú (ausztrál) bitumenek eredményei jóval koncentráltabbak, és a mért pontok szinte teljes mértékben a megadott viszkozitási-osztály keretekbe esnek. Ennek oka, hogy az ausztrál rendszer kifejezetten viszkozitás-alapú, így a gyártási kontroll is a nagyobb viszkozitási stabilitásra törekszik. A C320 típusnál megfigyelhető legkisebb szórás azt mutatja, hogy ez a termékkör a leginkább homogén és stabil, mely egyfajta visszajelzést is adhat az európai bitumengyártóknak. Itt fontos azt is megjegyezni, hogy a penetráció alapú európai bitumenek a viszkozításban jóval nagyobb százalékos eltéréseket mutatnak, mintsem a viszkozitásalapú ausztrál osztályok a penetrációra nézve. A legmagasabb variációs együtthatót (25,55 %) a B50/70 bitumenosztály adja, ennek a legmagasabb a szabványátlagtól vett százalékos eltérése is (58,51 %).

A vizsgált adatok megerősítik, hogy a viszkozitás-alapú osztályozási rendszer jobban tükrözi a reológiai stabilitást, míg a penetrációs rendszerű európai kötőanyagok variabilitása nagyobb. A C-típusú bitumenek szűk tartományba eső eredményei arra utalnak, hogy ezek a termékek kiszámíthatóbb viszkozitás-hőmérséklet viselkedést mutatnak, amely a meleg éghajlati övekben – mint Ausztrália – a teljesítmény szempontjából különösen előnyös.

3.2. Különböző mérési módszerekkel kapott eredmények statisztikai vizsgálata és összevetése

Az összehasonlításban a kapilláris viszkoziméter, Brookfield, és DSR mérési módszerek, valamint a Heukelom-egyenlet eredményei szerepelnek. Mirza [11] egyenletét felhasználva a 25 °C-on mért viszkozításra, majd ezt a Heukelom-egyenlettel [10] 60°C-ra váltva az eredményeink nagyságrendekkel eltértek a többi módszer eredményeitől, így az nem része az összehasonlításnak. A Tex-535-C közelítő formulára [13] hasonlóan nagy nagyságrendi eltérések születtek, így ezek az eredmények sem kerültek felhasználásra.

A Heukelom-egyenletben a lágyulásponton mért, 1300 Pa·s-nak vett viszkozításokat, mint referenciaértéket váltottuk át 60°C-on vett viszkozitás értékekké, lágyuláspont-adatsorok (mint referencia hőmérsékletek) ismeretében. Az egyenletben szereplő állandók Heukelom (1973) közelítése alapján a következők: C1=8,5; C2=110 [10].

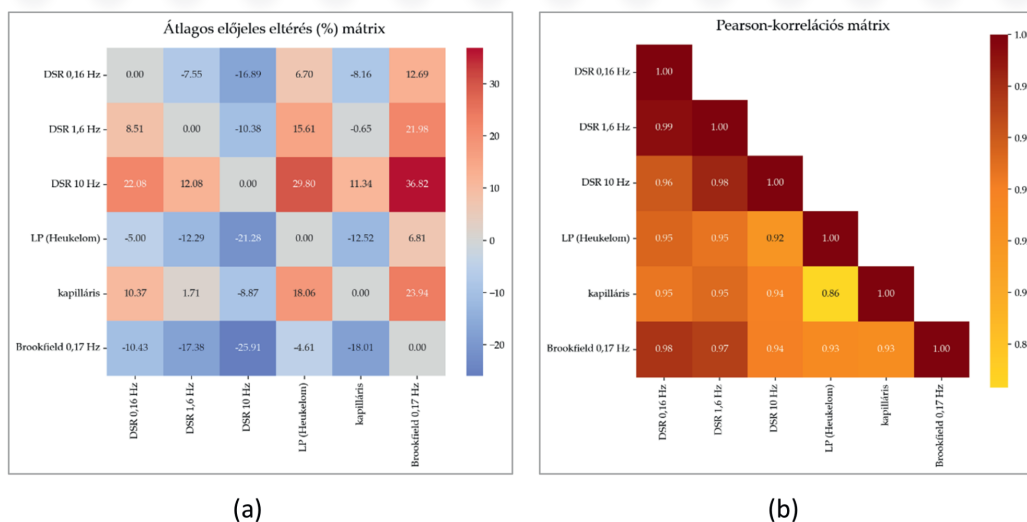
A DSR-módszerrel a frekvenciasöpérésekből az irodalom alapján legmeghatározóbb 3 különböző frekvencia mérési eredményeit használtuk fel, melyek a következők (2. Táblázat):

alacsony frekvencia	0,16 Hz $\approx$ 1 rad/s
közepes frekvencia	1,6 Hz $\approx$ 10 rad/s
magas frekvencia	10 Hz $\approx$ 62,9 rad/s

2. Táblázat. A DSR-módszerrel mért eredményekhez tartozó kiválasztott frekvencia értékek.

A Brookfield-típusú forgóorsós viszkoziméter RV DV2T típusú műszer esetében a nyírási sebességet az ausztrál irányelvben megadott tartományhoz közeli értékre állítottuk. Az RV (közepes) rugónyomaték tartományban, SC4-27 jelű orsó használatával és 0,5 RPM fordulatszám mellett

50–500 Pa·s viszkozitástartomány vált mérhetővé. E beállítások mellett a nyírási frekvencia 0,17 Hz-nek adódott, ami majdnem megegyezik a DSR-vizsgálatok során alkalmazott 0,16 Hz-es frekvenciával.



2. Ábra. A különböző mérési módszerek és közelítések által kapott viszkozitások eredményeinek összehasonlítása. (a) mátrix: A mérések közötti átlagos előjeles eltérések [%]-ban. (b) mátrix: Lineáris közelítést jellemző Pearson-korrelációk. Az adatok sorra: DSR dinamikus nyíróreométer 0,16 Hz; DSR 1,6 Hz; DSR 10 Hz; Heukelom-egyenlet (lágyuláspontból átszámított érték); kapillaris módszer; Brookfield-féle forgóorsós reométer.

Összehasonlítottuk a különböző viszkozitásmérési módszerek (DSR különböző frekvenciákon, kapillaris viszkoziméter, Brookfield-rotációs viszkoziméter, valamint a Heukelom-egyenletből származtatott értékek) közötti kapcsolatokat (2. Ábra). A Pearson-korrelációs mátrix alapján jól látható, hogy a legtöbb módszer között rendkívül erős lineáris kapcsolat áll fenn ($r = 0,86-0,99$), ami arra utal, hogy a bitumenek relatív viselkedését a vizsgálati eljárástól függetlenül hasonlóan rangsorolja a rendszer. A DSR 1,6 Hz frekvenciájú vizsgálata adja a legmagasabb korrelációs értékeket, amely minden más módszerrel 0,95 feletti összefüggést mutat. Ez arra utal, hogy az 1,6 Hz-es oszcillációs nyírási vizsgálat reprodukálja legjobban a bitumenek viszkozitási viselkedését más eszközök mérési tartományában is.

A kapillaris viszkoziméter eredményei ugyan szintén magas korrelációkat mutatnak ($r = 0,86-0,95$), de ezek alacsonyabbak, mint a DSR-mérések egymás közötti kapcsolatai. Ez azt jelzi, hogy bár a kapillaris módszer megbízhatóan

viszaadja a bitumen viszkozitásának nagyságrendjét, a nyírási sebesség és a hőmérsékletfüggés különbségei miatt szisztematikus eltérések jelenhetnek meg más technikákhoz képest. Az átlagos előjeles eltérés mátrix ezt megerősíti. A kapillaris módszerhez képest a DSR 1,6 Hz átlagosan mindössze +1,71 %-os eltérést mutat, ami a legkisebb átlagos eltérés a vizsgált módszerek közül. Elmondható, hogy a kapillaris viszkoziméterrel kapott eredményeket a DSR 1,6 Hz adja vissza a legpontosabban.

A Heukelom-egyenletből számított viszkozitások rendszerint felülbecslik a kapillaris mérési eredményeket (az átlagos eltérés +18,06 % körül), ami összhangban áll azzal, hogy az egyenlet empirikus jellegű. A Brookfield-viszkoziméter esetében ez a tendencia még jellemzőbb, a többi módszerhez képest jelentős felülmérés figyelhető meg (például a DSR 10 Hz-hez viszonyítva +36,82 %). A Brookfield-viszkoziméter eredményei a legjobb egyezést a 0,16 Hz-en vett DSR módszerbeli eredményekkel korrelálnak, ezt a korábban részletezett műszerbeállítások is indokolják.

4. Következtetések

Ausztrál és európai vákuumkapillaris viszkozitásmérések eredményeit hasonlítottuk elsőként össze, figyelembe véve az európai penetrációs, illetve az ausztrál viszkozitási osztályozás kategóriáit. Az ausztrál C-típusú bitumenek nagyobb reológiai stabilitást mutatnak, melynek okai az ausztrál AS2008-2013 [29] szabvány szerinti viszkozitásalapú osztályozásában, illetve a bitumengyártók minőségi követelményeiben keresendők.

A hagyományos kapillaris mérési módszer mellett, a viszkozitást közelítő formulák közül a Heukelom-egyenletet, illetve a további módszerekként a Brookfield-féle forgóorsós műszert, és DSR nyíróreométert használtuk fel, utóbbi eredményeit 3 különböző frekvencián (0,16; 1,6; 10 Hz). Az eredmények rámutatnak, hogy a vizsgálati módszerek

közötti eltérések a nyírási sebesség és a terhelési frekvencia különbségeiből is fakadhatnak. Az empirikus átszámítási összefüggések alkalmazása csak akkor tekinthető megbízhatóknak, ha azok érvényességi tartománya és a kapcsolódó vizsgálati feltételek egyértelműen definiáltak. Ennek köszönhetően a közelítő formulák nagyságrendeket is tévedhetnek. Az ausztrál bitumenosztályozás alapjául szolgáló, illetve az európai szabványban ajánlott reológiai tulajdonságként említett, vákuumkapillaris módszerrel mért 60° C-os dinamikai viszkozitást a lágyuláspontból átszámított Heukelom-képlettel már jól lehet közelíteni.

A vizsgálatok során megfigyelhető volt, hogy a Brookfield-féle forgóorsós viszkoziméterrel meghatározott értékek jellemzően a többinél magasabb viszkozitást

eredményeztek. A DSR vizsgálatok közül a közepes frekvenciartományban (1,6 Hz) végzett komplex viszkozitásmérések mutatták a legjobb egyezést a hagyományos kapilláris módszerrel, illetve ez a mérés mutatta átlagosan a legmagasabb korrelációt a többi módszerhez viszonyítva is.

Összességében megállapítható, hogy a hagyományos vizsgálatok továbbra is fontos szerepet töltenek be a bitumenek rutinszerű minősítésében, azonban a korszerű tervezési eljárások követelményeinek kielégítéséhez elengedhetetlen a dinamikus reológiai paraméterek figye-

lembevétele, mint a DSR műszerrel meghatározott komplex viszkozitás. A bemutatott eredmények hozzájárulnak a különböző vizsgálati módszerek közötti összefüggések pontosabb értelmezéséhez és egy egységesebb, reológiai alapú megközelítés kialakításához. A későbbiekben ajánlott az európai bitumenek viszkozitásalapú osztályozásának megfontolása, illetve a vákuumkapilláris viszkozitásmérési módszer helyett a dinamikus nyíróreométer (DSR) szélesebb körű alkalmazása.

Irodalomjegyzék

1. ASTM D2171. Standard Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2010.
2. ASTM D2171M-22. Standard Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer (SI Units); ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2022.
3. EN 12596:2023. Bitumen and bituminous binders. Determination of dynamic viscosity by vacuum capillary; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2023.
4. Wang, D.; Feng, D.; Chen, Z.; Liu, Z.; Zhang, W.; Lei, J.; Yao, D.; Yi, J.; Pei, Z. Research on TPS-SBS composite-modified asphalt with high viscosity and high elasticity in cold regions. *Coatings* 2025, 15, 108. <https://doi.org/10.3390/coatings15010108>
5. Chen, Z.; Wang, W.; Abdulkadir, A.; Lei, J.; Yi, J.; Pei, Z. C9 petroleum resin and polyethylene-based high-viscosity modified asphalt binder: Proportioning optimization and performance study. *Coatings* 2025, 15, 343. <https://doi.org/10.3390/coatings15030343>
6. Wang, W.; Chen, B.; Shen, J. Zero shear viscosity of hybrid modified asphalts and its gray correlation with other properties. *Materials* 2022, 15, 7056. <https://doi.org/10.3390/ma15207056>
7. Hu, J.; Ma, T.; Zhu, Y.; Huang, X.; Xu, J.; Chen, L. High-viscosity modified asphalt mixtures for double-layer porous asphalt pavement: Design optimization and evaluation metrics. *Constr. Build. Mater.* 2021, 270, 121893. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121893>
8. Tóth, Cs. Aszfaltkeverékek merevsége a terhelési idő, hőmérséklet és szemeloszlás függvényében. Ph.D. Thesis, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary, 2010.
9. Bíró, Sz. Kémiaiilag stabilizált gumibitumenek előállítása és vizsgálata. Ph.D. Thesis, University of Veszprém, Veszprém, Hungary, 2005.
10. Heukelom, W. Bitumen and Bituminous Mixtures; Koninklijke/Shell-Laboratorium: Amsterdam, The Netherlands, 1973.
11. Mirza, M.W.; Witczak, M.W. Predicting asphalt viscosity from penetration. In Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Reno, NV, USA, 1995.
12. Witczak, M.W.; Fonseca, O.A. Revised predictive model for dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures. *Transp. Res. Rec.* 1996, 1540, 15–23.
13. Texas Department of Transportation. Tex-535-C: Calculating Viscosity from Penetration; TxDOT: Austin, TX, USA, 1999.
14. Van der Poel, C. A general system describing the viscoelastic properties of bitumens and its relation to routine test data. *J. Appl. Chem.* 1954, 4, 221–236. <https://doi.org/10.1002/jctb.5010040501>
15. Gutarra Lara, L. Influencia de las fibras acrílicas en mezclas asfálticas en caliente. Master's Thesis, Universidad Continental, Huancayo, Peru, 2018.
16. Karki, P.; Kim, Y.R.; Little, D.N. Dynamic modulus prediction of asphalt concrete mixtures through computational micromechanics. *Transp. Res. Rec.* 2015, 2507, 1–9. <https://doi.org/10.3141/2507-01>
17. EN 14770:2023. Bitumen and bituminous binders. Determination of complex shear modulus and phase angle. Dynamic Shear Rheometer (DSR); European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2023.
18. EN 12594:2025. Bitumens and bituminous binders. Preparation of test samples; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2025.
19. Rosta, Sz.; Gáspár, L. Útépítési bitumen és visszanyert bitumen elegyének dinamikai viszkozitás számítása és előrebecslési lehetősége. *Közlekedéstud. Szle.* 2023, 73, 21–37. <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2023.1.2>
20. Sheidaei, M. Dynamic Shear Rheometer for Rheological Investigation of Bitumen in Road Applications: The Impact of Measurement Technique. Ph.D. Thesis, Lund University, Lund, Sweden, 2025.
21. Guericke, R. 100 Jahre Erweichungspunkt Ring und Kugel: Was kommt danach? *Strasse Autobahn* 2010, 61, 481–491.
22. EN 13302:2018. Bitumen and bituminous binders. Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using a rotating spindle apparatus; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2018.
23. Remisová, E.; Zatkaliková, V.; Schlosser, F. Study of rheological properties of bituminous binders in middle and high temperatures. *Civil Environ. Eng.* 2016, 12, 13–20.
24. Cox, W.P.; Merz, E.H. Correlation of dynamic and steady flow viscosities. *J. Polym. Sci.* 1958, 28, 619–622.
25. Brookfield Engineering Laboratories. More Solutions for Sticky Problems: A Guide to Getting More from Your Brookfield Viscometer and Rheometer; Brookfield Engineering Laboratories: Middleboro, MA, USA, 2014; p. 55.
26. Parhamifar, E.; Tyllgren, P. Assessment of asphalt binder viscosities with a new approach. In Proceedings of the 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague, Czech Republic, 1–3 June 2016.
27. EN 12591:2009. Bitumen and bituminous binders. Specifications for paving grade bitumens; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2009.
28. EN 1426:2025. Bitumens and bituminous binders. Determination of needle penetration; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2025.
29. AS 2008-2013. Bitumen and Bituminous Binders; Standards Australia: Sydney, NSW, Australia, 2013.

A nagy tömörségű aszfaltokról

Karoliny Márton

Nyugdíjas ügyvezető
HTPA Kft.



1. Bevezetés

A „Nagy tömörségű aszfaltok” projekt jelenlegi állapotában a KTE „Új megoldások az aszfalttechnológiában” című workshopján került a szakmai közvélemény elé.

Ezt a projektet Dr. Gajári György pl. (1) és Dr. Prof Elk Richter pl. (2) kutatásai és fejlesztései indukálták.

Azóta a projekt a szabályozás fázisába lépett, jó esélye van annak, hogy az „NT” aszfaltokról előírások az érvényes szabályozásba bekerüljenek.

A kérdés fontossága a szerző szerint megérdemli, hogy az „Az Aszfalt” közönsége is kapjon tájékoztatást a „Nagy tömörségű aszfaltokról”, ez az írás ezt célozza.

Az innováció története sokkal korábban kezdődött és vannak megemlítenő kapcsolatai a hazai aszfaltfejlesztés történetével, a szerző erre röviden ki fog térni.

2. Keréknyomokról

A keréknyomok az aszfaltos pályaszerkezetek meghibásodási/tönkremeneteli formái. A továbbiakban némi történelmi és szakmai összefoglaló következik.

2.1. Keréknyom és balesetveszély

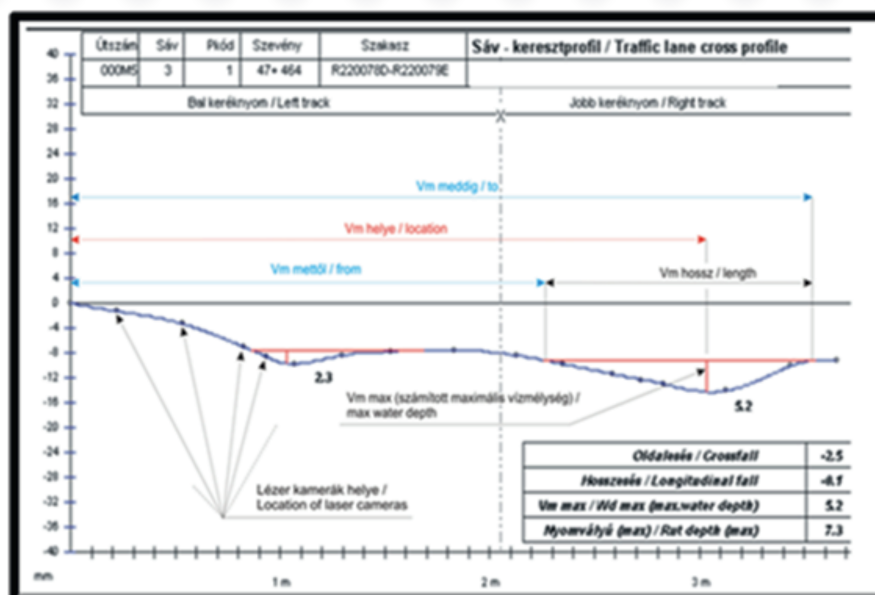
A keréknyomok súlyos balesetveszélyt jelentenek a közlekedőkre.

A rendszeres állapotfelvételeknél hazánkban nagy képes-ségű lézeres profilmérést alkalmaznak, ahol egy meghatározott algoritmus alapján a letapogatott felület adataiból szelvényenként képez egy algoritmus egy keréknyom – mélység értéket.

Megvizsgálva a következő ábrát láthatjuk, hogy a feldolgozás lehetséges pl. a nyomokban kialakuló vízfilm mélység meghatározására is.

A közlekedésbiztonsággal foglalkozó mérnökök számos olyan eljárást fejlesztettek ki, amelyek a profilfelmérés alapján komplex **biztonsági** értékelésre is képesek, pl. (3).

A szerző megkockáztatja azt a feltevést, hogy a hazai osztályozást a rendelkezésre álló adatok segítségével ilyen eljárásokkal helyettesítve **valósabb** értékelést kapva nagyobb figyelmet kaphat ez a probléma



1. ábra

2.2. Keréknyomok tipizálása

A tapasztalható keréknyomok **létrejötté** különböző hatások és tulajdonságok eredménye és a pályaszerkezeti rétegek különböző módon vesznek részt a kialakulásban. A valós mechanizmusok ismerete ugyanakkor lehetőséget ad a káros helyzetek megelőzésére.

A 2. ábrán különböző keréknyomos utakat látunk, jól láthatóan nagy különbségekkel.



2. ábra

Vegyük figyelembe, hogy a képeken egy folyamat egy időpillanatát látjuk. A diagnózishoz sokat segít egy tipizálás.

Egy egyszerű rendszerezés (4) típusait mutatja a 3. ábra.

Az egyes típusok a hivatkozott kiadvány szerint következők:

- az első **szerkezeti** meghatározású keréknyom, ami valamelyik alsó (nem aszfaltos) réteg tönkremeneteléből indul ki és lesz belőle a felületen tapasztalható **aszfaltalakváltozás**
- a második az aszfalt **tömörödésből** keletkező keréknyom

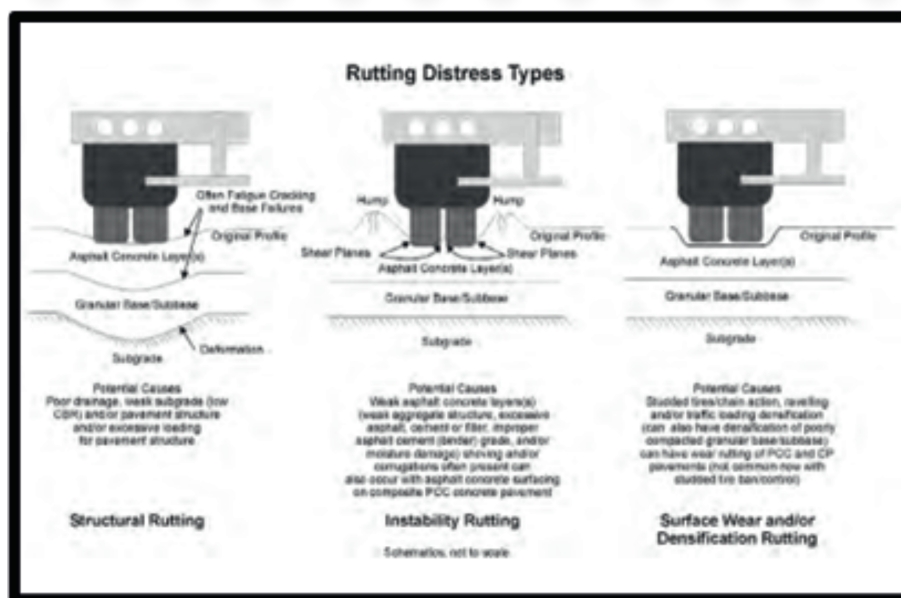
- a harmadik az aszfalt **kopásból** keletkező keréknyom

A harmadik típus, az aszfalt kopása főleg az északi országok szöges gumibroncsainak következménye, ez hazánkban tiltott és nem jellemző.

Az első típus a pályaszerkezet **méretezési** módszereivel megismerhető és elvileg kezelhető.

Itt az alsó réteg(ek) merevségének jelentős elvesztése az alapvető probléma.

Erre példa a fényképek közül a jobb alsó, ahol minden bizonnyal erős elnedvedés miatt a földmű (esetleg a szemcsés réteg is) egy **hidraulikus talajtöréssel** tönkremenetelen ment át.

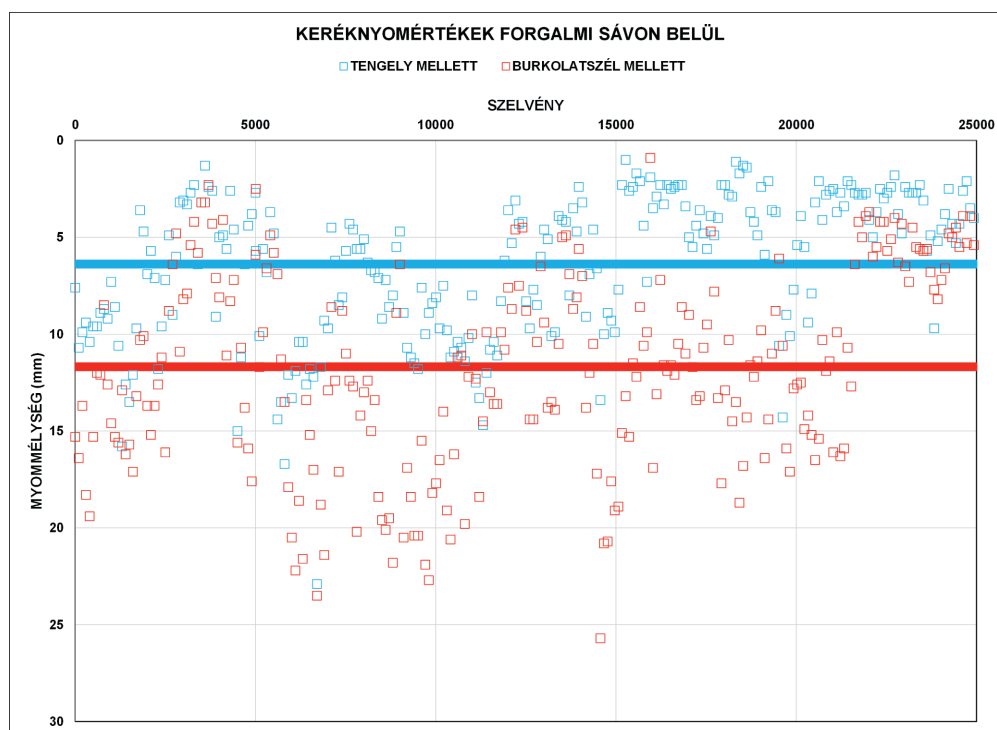


3. ábra

Ezeket a hibákat a korszerű pályaszerkezet – méretezési eljárások jellemzően a földmű felső rétegén keletkező függőleges feszültség/alakváltozás korlátozásával „kezelik”.

Hazai szabályozásunk a földmű, illetve a szemcsés réteg tetején korlátozza az összenyomódás mértékét (ezáltal a

maradó fázis nagyságát is), új pályaszerkezeteink esetében ez kielégítő védelmet mutat, meglévő – főleg régebbi építésű – szerkezeteinknél nagyon gyakoriak a burkolatszél közelében a jelentősen nagyobb keréknyomok, ahogyan ezt a 4. ábrán láthatjuk.



4. ábra

A hazai állapotfelvételnél használt lézeres mérőkocsi – mint az 1. ábrán már láttuk - **képes** a forgalmi sávon belüli két keréknyomértéket külön is megadni, célszerű lenne ennek rendszeres rögzítése, mert ezáltal a keréknyomképződés okára kellő időben lehet megbízható becslést adni.

A második halmaz az, ami az aszfalt anyagának sajátosságaival magyarázható, illetve megelőzhető.

Megjegyzendő, hogy a keréknyomok jelentős részénél az alaptípusok valamilyen **kombinációja** tapasztalható.

2.3. A fizikai magyarázat

A tönkremeneteli mechanizmus megfelelő ismerete megadja a kulcsot a tönkremenetel megakadályozásához, ami

jelen esetben az összetétel folyadék fázis mennyiségének tudatos megválasztása. A továbbiakban ezt tárgyaljuk.

2.3.1. Az aszfalt szemcsés anyag

A talajmechanikában szemcsésnek tekintjük azt a talajt, amelynek szemcséi száraz állapotban ömleszthető halmazt

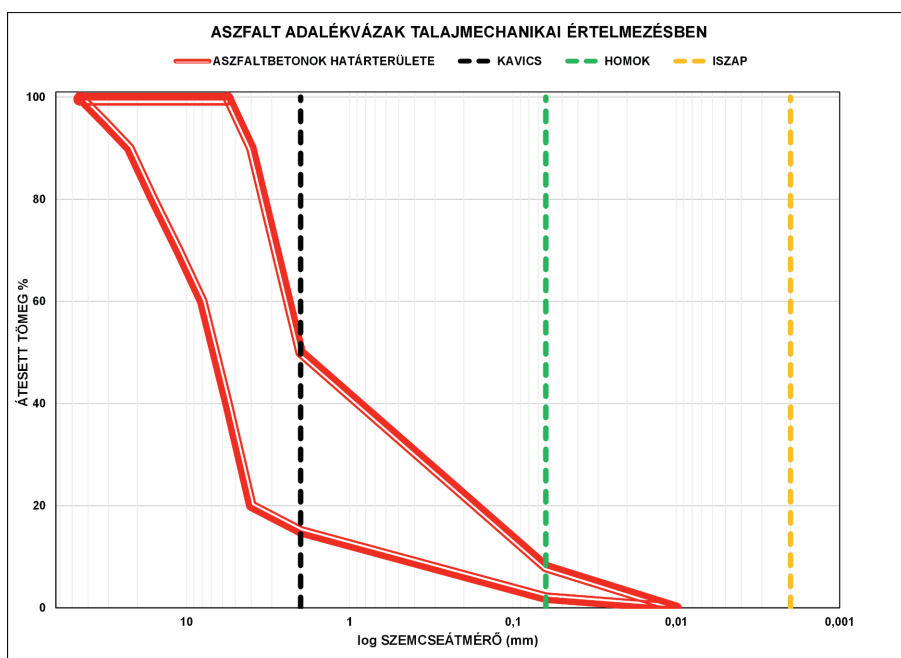
alkotnak, a 6. ábra szerint ez a kritérium teljesül.



5. ábra

Számszerűsíthetőbb a következő kritériumellenőrzés a 6. ábra szerint, itt a hazai összes aszfaltbeton egyesített határterületét láthatjuk talajmechanikai szemeloszlási diagramban. Mindezek arra jogosítanak fel bennünket, hogy az

aszfalt mechanikai viselkedését nem kontinuumként, hanem **szemcsés rendszerként** értelmezzük, annak minden következményével.



6. ábra

2.3.2. A szemcsés rendszerek működési szabályai

A szemcsés rendszereket használó mérnökök számára talán a legfontosabb a rendszer **sűrűségének** kérdése, mert ez határozza meg döntő mértékben a **nyírószilárdságot**.

A rendszer működésének szabályait Herle (6) foglalta össze, ezekből néhányat idézünk:

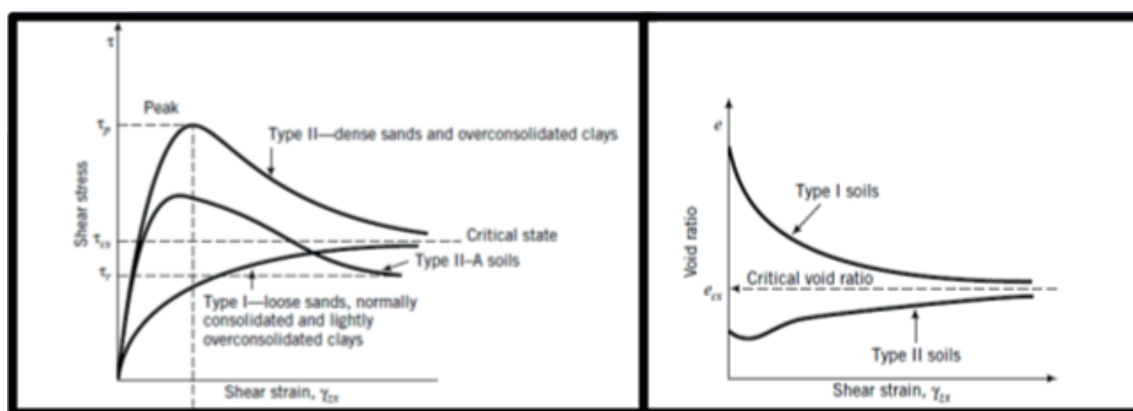
- A szemcsészerkezetek kis nyírási ciklusokkal tömöríthetők állandó átlagnyomáson. Ez lehetővé teszi a **maximális sűrűség** elérését.
- Elég nagy monoton nyírási deformáció után, állandó nyomással a szemcsészerkezet **térfogata már nem változik**. A nyírófeszültségek ekkor is állandóak maradnak. Ezt az állapotot **kritikusnak** nevezzük.

A szabály szerint **létezik és elérhető a térfogatváltozás megszűnése** (az a helyzet, amikor az aszfalt tovább nem tömörödik), ez nyilvánvalóan a maximális sűrűség elérésekor következik be.

Kialakult gyakorlatunkban az aszfaltkeverék tervezésénél a kiválasztott összetétel lényeges tulajdonságait laboratóriumi próbatestek tulajdonságai alapján rögzítjük és ezeket a tulajdonságokat kell a beépítésnél elérni.

Azaz biztosítani kell a maximális sűrűség elérését a próbatest készítésénél is, megfelelő eljárás választásával.

Vizsgáljuk meg a szabályok érvényesülését a 7. ábra segítségével.



7. ábra (forrás (7))

A talajmechanika a kiinduló „tömörség” függvényében több típusú talajt különböztet meg, a tömörítés során ezek különböző módon viselkednek, de a végeredmény mindkét

esetben **tendenciaszerűen** közelíti a kritikus állapothoz tartozó **nyírószilárdságot** (a.) és az ebben az állapotban értelmezhető **hézag tényezőt** (c).

2.3.3. Az aszfalt tömörödési tönkremenetelének mechanizmusa

A szemcsés rendszerek tömörödési tönkremenetelét demonstráljuk a következő ábrán.



8. ábra

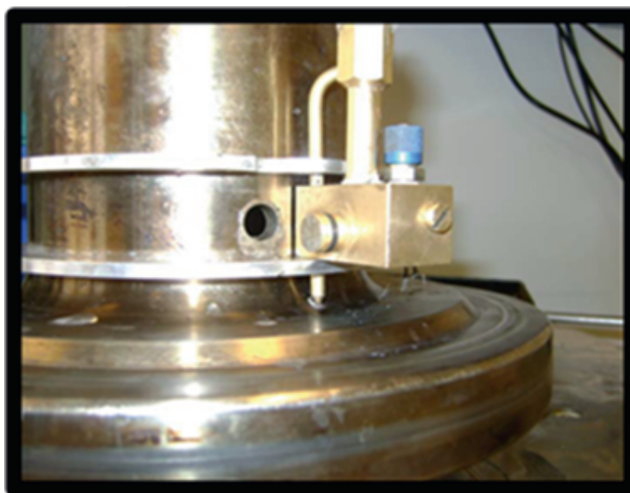
A közel telített állapotú homok egy ideig kellő szilárdságot mutatva „elbírja” a képen látható személyt, de miután további „tömörítést” kap, „megfolyósodik” és a személy majd térdig süllyed a homokba.

A teljes rendszer szilárdságát (**nyírószilárdságát**) a szemcsék közötti hatékony feszültségek biztosítják.

Terzaghi törvénye alapján a rendszer teljes feszültsége a hatékony és a semleges feszültségek összege, ezért, amikor a rendszer **tömörödik**, a térfogata csökken, a folyadékfázis

összenyomhatatlansága miatt az abban lévő semleges feszültségek (pórusnyomás) megnöve a hatékony feszültségek csökkennek, ez a szilárdság (nyírószilárdság) csökkenését – szélsőséges esetben gyakorlati megszűnését – okozza.

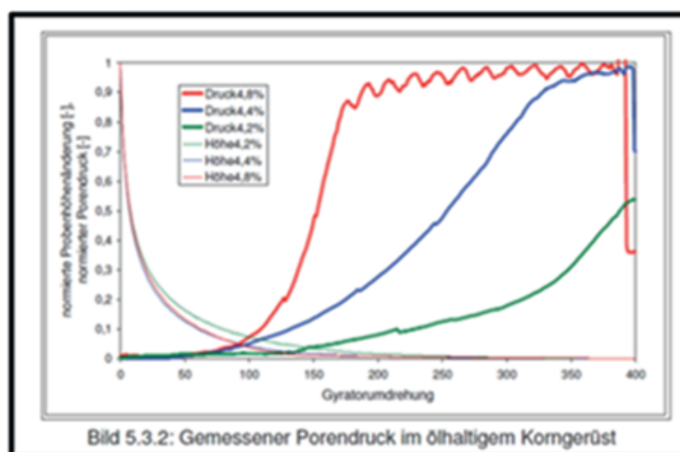
Az aszfalt esetében megfelelő, a tömörítő zsirátor kokillájához illesztett mérőeszközzel ez a pórusnyomás mérhető, Gajári úr ezt a TPA-nál megalkotta és használta, a 9. ábra szerinti elrendezésben.



9. ábra

A 10. ábrán zsirátorban mért pórusnyomás értékek láthatók különböző kötőanyagtartalmak esetén, jól felismerhető,

hogy meglepően kis kötőanyag-többletek esetén milyen nagy a pórusnyomás növekmény.



10. ábra

2.3.4. Az optimális kötőanyagtartalom elve

Az eddigiekből már látható, hogy a kellő deformációel-lenálláshoz kell a maximális (az adott szemcsés halmaz tulajdonságai által részben meghatározott) **nyírószilárdság**. Ezt úgy tudjuk elérni, hogy az adott tömörítési eljárással a **kritikus állapotba** juttatjuk el az anyagot. Az ebben az állapotban értelmezhető (kritikus) **hézagátványező** mutatja meg az elérendő sűrűséget.

A tömörítéshez viszont kell kenőanyag (kötőanyag nélküli rétegeknél víz, aszfaltnál a kötést is biztosító felmelegített, kis viszkozitású bitumen).

Azt a kenő/kötőanyag mennyiséget, amelyenél a rendszer a kritikus állapotba kerül (a hozzátartozó hézagátványezővel) nevezi Gajári szabadalmában (9) **optimálisnak**.

Csak az egyértelműség kedvéért az összefüggések:

- **egy** granulometria (szemeloszlás)
- meghatározott tömörítőeljárással és tömörítómunka mennyiséggel
- meghatároz **egy kritikus állapotot**, amit a hézagtényező jellemez

Amennyiben a kenő/kötőanyag mennyiség más aszfalt képesség (pl. fáradás) miatt nem elégséges, a granulometria

megfelelő változtatásával (a kenő/kötőanyagmennyiség növelésével) kell a szükséges képességet elérni.

Azaz az aszfaltkeverék tervezés a deformációmentes (kritikus állapotú) halmazok közötti, a fáradás, hidegviselkedés, húzószilárdság stb. szempontból megfelelő **választásra** egyszerűsödik.

Ennek tényleges meghatározását a későbbiekben ismeretjük.

3. Egy fejlesztés előtörténete

Ebben a fejezetben megszakítva a szakmai fejtegetéseket, egy rövid kitérőt teszünk abba az időbe, amikor az NT asz-

faltok fejlesztésének a szükségleti kérdése a hazai szakmai körökben megfogalmazódott.

3.1. A keréknyomok támadása

Az 1994. évi útügyi napok nagy szenzációja a keréknyomok „támadása” volt, az előadások jelentős része foglalkozott a „nyári burkolatkárokkal”.

(Néhány publikációt hivatkozik a szerző csak az internetes elérhetőséggel, (10), (11), (12), (13))

Vitathatatlan volt az, hogy néhány új építésű (és nagy forgalmú) szakaszon, továbbá **felújítások** esetében képződtek viszonylag gyorsan keréknyomok.

Nem lehet azonban szó nélkül elmenni amellett, hogy:

- az egyik problémás (autópálya) szakaszon az összesen 160 mm aszfaltból 120 mm gömbölyű szemű adalékból készült, az aszfaltok egy „fordított” pályaszerkezetben 100 mm FZKA rétegen helyezkedtek el, alatta volt telepen kevert cementstabilizáció (itt a reflexiós repedések elleni harc is napirenden volt). Megjegyzendő, hogy bár bírósági ítélet is született az ügyben, a döntést jogi érvek támasztották alá, igazából **hivatalosan** nem derült ki a tényleges ok
- a másik autópályaszakaszon a már jelentkező keréknyomprobléma miatt volt laboratóriumi nyomvályúvizsgálat 40 C° (nem tévedés) hőmérsékleten.

Az aszfaltszakma reagált, először csak az egyes nagy projekteken, majd 1996 – ban megszületett egy olyan szabályozás, ami igazából nem nagy változásokkal ma is él, a kockázatos – fokozottan terhelt – szakaszok keveréktervezésénél néhány kézenfekvő elv és - 60 C° - on – **keréknyomvizsgálat** végrehajtásával, amelyeket a felújításoknál is kötelezővé tettek.

Egy, az 1998 – tól forgalomba helyezett mintegy 1300 km. félautópálya hosszúságra kiterjedő vizsgálat 2009 – ben megjelent eredménye (14) szerint a keréknyomok gyakorlatilag **megszűntek**.

A felújítások esetében nem volt ennyire szép a helyzet, de itt a **meglévő pálya aszfaltjainak vizsgálatát** gyakran elmulasztották.

Összefoglalva, volt egy valós probléma, ami megoldható volt, meg is oldottuk, de maradt – főleg az aszfalttechnológia részleteit nem ismerők számára – a **félelem**, a lehetséges nyomosodási katasztrófáktól, ez a félelem számos, a „ló másik oldalán” elhelyezkedő problémákat okozott, de ez már az ezredforduló időszakához tartozott.

3.2. A Sharp/Superpave vita

Az időszakban jelentek meg az USA SHRP programjának első eredményei és Dr. Tóth Sándor szívós és sikeres küzdelmének eredményeként a kötőanyag osztályozási vizsgálatokra alkalmas eszközei a veszprémi laboratóriumban.

Egy alkalmi szakmai csoport kezdett foglalkozni az aszfaltra vonatkozó fejezetekkel is, amelynek aztán következménye lett egy **valódi** vita a programot pártolók és a

programmal kapcsolatos fenntartásokat hangoztatók között.

(Néhány hivatkozást a már bemutatott módon hivatkozik a szerző (15), (16), (17))

A vita tartalmának nem kis része mára már elavult, a szerző véleménye szerint ugyanakkor maga a tény volt fontos és valóban előremozdította a hazai aszfaltfejlesztést.

3.3. Az együttműködés

Feltétlenül a vita eredménye volt az is, hogy szakmai műhelyek között létrejött egy „civil” megállapodás az aszfalt-

fejlesztés koordinálásáról, aminek eredménye volt, hogy a szűkös eszközökhöz (pl. zsirátor) való hozzáférést a jobban

ellátott szervezetek lehetővé tették, továbbá bizonyos területeken kutatási célokat is egyeztettek.

Az alapítókon kívül álló okok miatt rövid életű kezdemé-

nyezésnek azért van nyoma a hazai szakirodalomban (18), (19).

4. Az aszfalttervezés próbatestjéről

Az aszfalt keveréktervezés (nagyon részletesen összefoglalja a létező eljárásokat (20)) a korai kezdetektől fogva egy próbatest valamilyen tömörítésével meghatározott térfogatú

és/vagy szilárdsági tulajdonságainak vizsgálatával történik. Az NT aszfaltok esetében egy világszerte ismert próbatest alkalmazása a javaslat, a továbbiakban erről lesz szó.

4.1. A tömörség értelmezése

A tömörség **mérése** a legtöbb pályaszerkezeti anyag esetében egy **próbatesten** értelmezhető mérőszám és a **beépítésnél** (azonos fizikai tartalmú) mérőszám összevetésével történik.

Az aszfalttechnológus a keverék tervezését a választott próbatest létrehozásával (keverés és tömörítés) hajtja végre. A választott összetétel alapján a keveréket a keverőgépen elkészítik, majd a beépítés helyén a terítés után tömörítik. Nyilvánvaló, hogy az a keveréktervezési rendszer a helyes, ahol a **kétféle** módon előállított aszfalt **használati tulajdonságai** egyeznek.

Az NT aszfaltok esetében a próbatestet a **zsirátorral** ké-

szítjük és mérőszámnak az elkészült próbatest **szabadhézag** értékét javasoljuk, amelyet a beépített rétegnél meghatározott szabadhézag értékkel vetünk össze.

A választás alapvető oka, hogy a szabadhézag lényegében **minden** fontos használati tulajdonsággal **erős** kapcsolatban van, a gyakorlatban elterjedt regressziók esetében független változóként szinte kivétel nélkül szerepel.

Fontos érv az is, hogy a zsirátoros tömörítés során a próbatest (pontosan mért) geometriájából **számítható** a szabadhézag érték, ezáltal a tervezésnél a célélérés mértéke gyorsan ellenőrizhető.

4.2. A próbatest és a beépített aszfalt tulajdonságai

Az NT aszfaltok esetében az előkészítésnél és a szabályozástervezet megalkotásánál konszenzus volt abban, hogy a próbatestet a zsirátoros eljárással készítsék és tömörítsék. Ennek egyik fő oka az volt, hogy a SUPERPAVE néven ismert USA - beli keveréktervezési eljárás bevezetése előtt megvizsgálták a lehetséges próbatest készítő eljárásokat (21).

A vizsgálat eredményét tanulmányozhatjuk a 11. ábrán.

Ennek alapján megállapították, hogy a zsirátoros próbatesten végzett mechanikai vizsgálatok eredménye közelítette meg legjobban a burkolatból kifúrt minták eredményeit, azaz ez a tömörítési eljárás **reprezentálja kellően** a valós beépítési viszonyokat.

Compaction Device	Creep Compliance at 77°F	Indirect Tensile Strength	Tensile Strain at Failure	Resilient Modulus
Arizona Compactor	0.77	0.51	0.47	0.41
Marshall Hammer	0.80	0.35	0.45	0.55
California Kneading	0.59	0.21	0.27	0.42
Steel Wheel Simulator	0.51	0.31	0.11	0.26
Texas Gyrotory Shear Compactor	0.44	0.14	0.16	0.37

Note: A zero difference indicates that the laboratory specimens had identical properties of the cores (no difference).

11. ábra

A 2.3.2 pontra kicsit visszaugorva a szerző emlékezteti az olvasót, hogy a szemcsés halmazok szabályainál fontos a kritikus állapothoz vezető tömörítés módja, a **kis nyírási ciklus**

sokkal, állandó nyomáson történő eljárás, a zsirátor erre teljes mértékben alkalmas.

4.3. Zsirátor – Marshall tömörítés összehasonlítása

A különböző időpontokban és célokkal végrehajtott vizsgálatok alapján nézzük meg, hogy a megszokott keveré-

ink laboratóriumi próbatest adatai hogyan viszonyulnak egymáshoz a zsirátor és a Marshall tömörítések esetében.

4.3.1. Kísérleti eredmények

Háromféle járatos keveréktípus esetén, különböző ásványi vázak használatával készült egy kísérletsorozat az optimális kötőanyagtartalom meghatározására a TPA különböző laboratóriumaiban.

Az eljárás először a Marshall próbatesten alapuló meg-

szokott kötőanyagtartalom tervezésével kezdődött, majd az azonos kővázak esetében zsirátor segítségével meghatározták az optimális kötőanyagtartalmat.

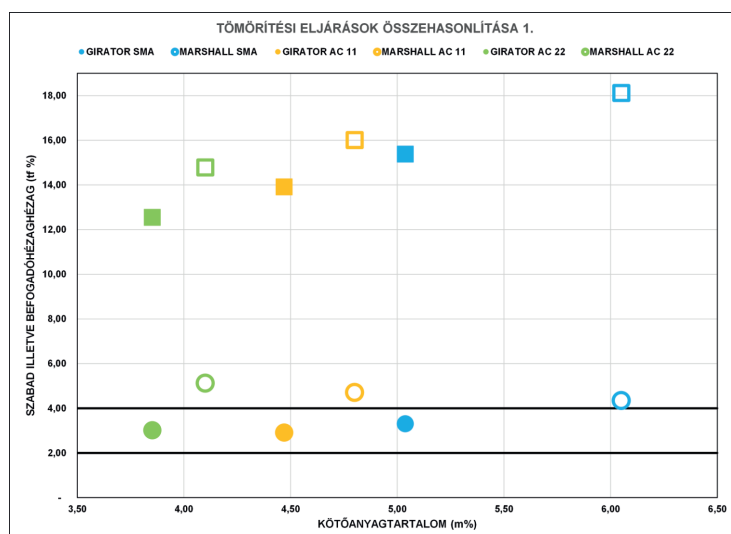
Az eredményeket a 12. ábrán tanulmányozhatjuk.

SMA KEVERÉKEK		GRATOR SAM				MARSHALL SMA			
EREDET	B%	b%	h%	k%	B%	b%	h%	k%	
1. KEVERÉK	4,46	10,31	3,56	86,13	6,00	13,20	4,90	81,90	
2. KEVERÉK	5,27	13,33	3,12	83,35	6,00	14,24	4,10	81,66	
3. KEVERÉK	5,01	11,91	4,08	84,01	6,00	13,70	4,00	82,30	
4. KEVERÉK	5,41	12,54	7,56	79,90	6,20	13,95	4,37	81,68	
ÁTLAG	5,04	12,07	4,58	83,35	6,05	13,77	4,34	81,88	
AC 11 KEVERÉKEK		GRATOR AC 11				MARSHALL AC 11			
EREDET	B%	b%	h%	k%	B%	b%	h%	k%	
1. KEVERÉK	4,51	11,67	2,61	85,72	4,70	11,65	5,01	83,34	
2. KEVERÉK	4,25	10,29	2,47	87,24	4,30	10,05	4,26	85,69	
3. KEVERÉK	4,46	11,15	1,59	87,26	4,70	11,24	4,90	83,86	
4. KEVERÉK	4,96	11,84	2,94	85,22	4,70	10,57	6,75	82,68	
5. KEVERÉK	4,30	10,19	4,16	85,65	5,60	12,99	2,70	84,31	
6. KEVERÉK	4,34	10,83	3,71	85,46	4,80	11,33	4,60	84,07	
ÁTLAG	4,47	10,39	2,91	86,09	4,80	11,30	4,70	83,99	
AC 22 KEVERÉKEK		GRATOR AC 22				MARSHALL AC 22			
EREDET	B%	b%	h%	k%	B%	b%	h%	k%	
1. KEVERÉK	4,03	10,11	1,59	88,30	3,90	9,36	4,90	85,74	
2. KEVERÉK	3,20	8,13	2,47	89,40	4,20	10,09	5,70	84,21	
3. KEVERÉK	3,96	9,95	1,45	88,60	3,60	8,59	5,30	86,11	
4. KEVERÉK	3,74	9,24	4,69	86,07	4,20	9,98	4,00	86,02	
5. KEVERÉK	4,33	10,21	3,80	85,99	4,60	10,28	5,70	84,02	
ÁTLAG	3,85	9,53	2,80	87,67	4,10	9,66	5,12	85,22	

12. ábra

Az eredményeket a későbbiekben többféle képesség összevetésére fogjuk felhasználni, a könnyebb áttekintés céljából egy, a hézagértékek alakulását mutató diagramot köz-

lünk.



13. ábra

Az egyes aszfalttípusok **átlag** eredményei szerepelnek a 13. ábrán, kör alakú jelölővel a szabadhézag, négyzettel a befogadóhézag, a kitöltött jelölők a zsírártos tömörítés eredményei a kötőanyagtartalom függvényében.

A hézagértékeknél a 2, illetve a 4% értéknél szereplő határvonal az NT aszfaltoknál a javasolt felső, illetve a célszerűségről választott alsó határt jelenti.

A hézagértékek jó közelítéssel 2% csökkenést mutatnak az átlagoknál a zsírártos esetében, a kötőanyagtartalmak változóan, de határozottan kisebbek.

Vegyük figyelembe, hogy ezek **tendenciák**, egyes esetekben lényegesen nagyobb különbségek is elképzelhetők.

4.3.2. Tömörítőmunka

Felmerül a kérdés, hogy mitől képes a zsírártos nagyobb tömörséget elérni. Vannak vélekedések, amelyek szerint a zsírártos nagyobb tömörítőmunkát végez.

A 14. ábrán egy közelítő számítás eredményét láthatjuk. Ebből kitűnik, hogy a fizikai értelemben befektetett munka a Marshall döngölőnél lényegesen nagyobb.

A fizikai tömörítőmunka nagysága ugyanakkor nem per-

döntő, a zsírártos ugyanis folyamatos, irányított deformációval – nyírással – dolgozik.

A Marshall döngölés esetében a befektetett tömörítőmunka nagyon nagy része „elvész” (hővé disszipálódik). A szakirodalomban nem lehetett találni olyan publikációt, amely érdemi kapcsolatot talált a kétféle tömörítés között.

4.3.3. A Marshall hézag eléréséhez szükséges zsírártosfordulatszám

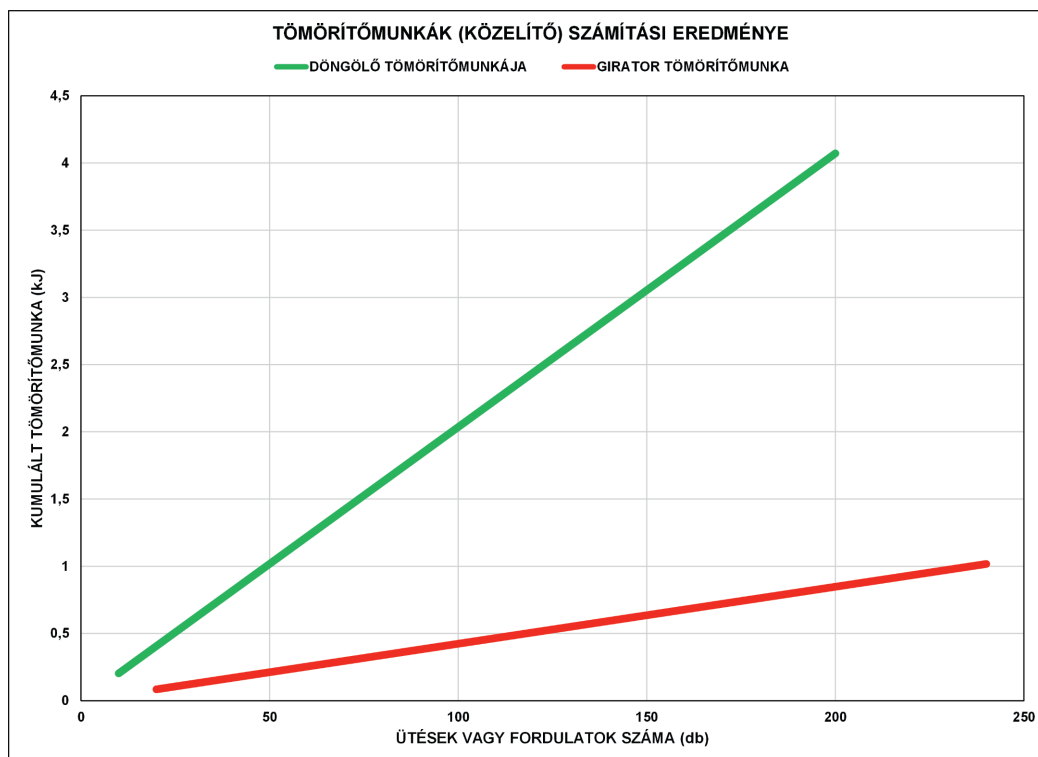
Az Aszfaltfejlesztési Együttműködés keretében egy, a 2002. évben történt (BME számára végzett) vizsgálat eredményeinek egy része látható a 15. ábrán.

A vizsgálatban hatféle aszfaltkeverék 200 fordulatos zsírártos tömörítési eredményeiből számítottuk az ugyanazon keverékek 2x75 ütési Marshall szabadhézagértékeihez szükséges zsírártosfordulatszámát.

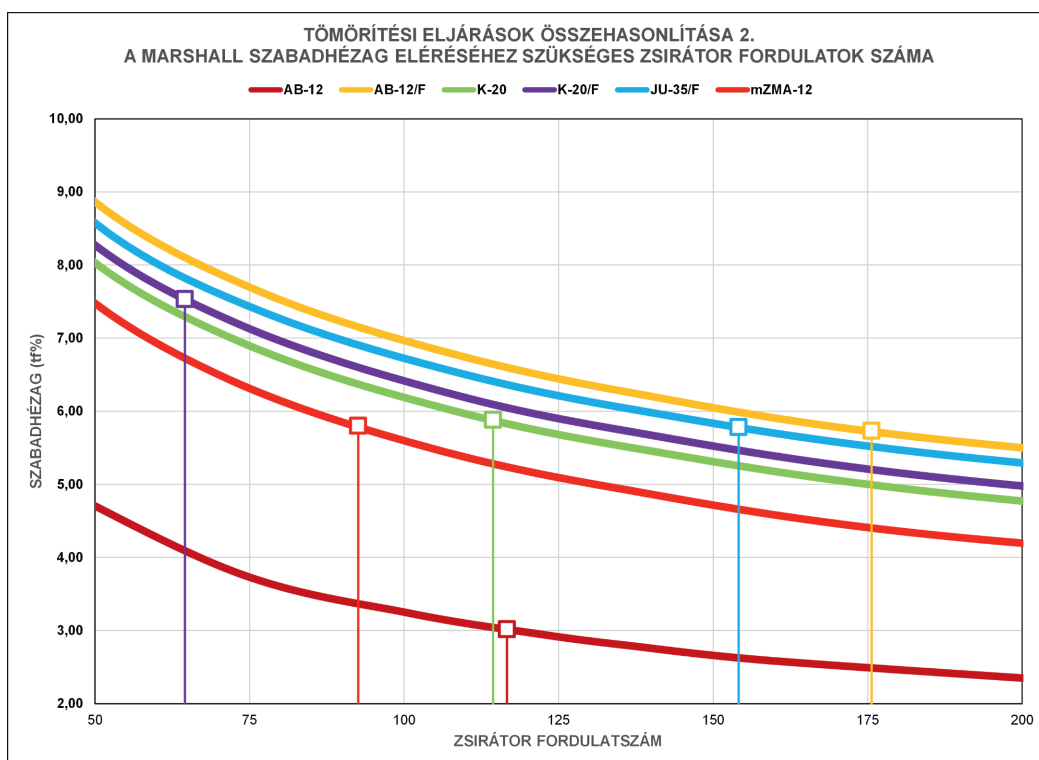
A fordulatszámok a megfelelő színekkel a függőleges tengely mellett láthatók.

Jól felismerhető, hogy a tömörítési eljárások között jelentős különbség van a zsírártos eljárás javára, azaz a Marshall eljárással **nem tudjuk elérni** a keverék maximális sűrűségét.

Ez a tömörítőmunka – a 200 zsírártosfordulat - egyébként az MSZ EN 12697-9:2003 4.2 pontja szerinti „**hagyományos legnagyobb testsűrűség**” eléréséhez szükséges.



14. ábra



15. ábra

5. A nagy tömörségű aszfaltokról

Az NT aszfaltokra vonatkozó előírásokat (jelen írás idején) függeléként tervezik csatolni az érvényes szabályozá-

sokhoz, az ezzel kapcsolatos lényegesebb kérdéseket és magyarázatukat a továbbiakban összefoglaljuk.

5.1. Szabályozástervezeti definíciók, előírások

A szabályozástervezet szerint nagy tömörségű (NT) aszfaltok nevezzük azokat a hengerelt aszfaltokat, amelyek a következő tulajdonságokkal rendelkeznek:

- a tervezési szabadhézag értékét az MSZ EN 12697-9:2003 4.2 / a pontja szerint zsirátorral, 200 fordulatú tömörítési munkával állapítják meg
- a szabadhézag értéke legfeljebb 4 tf %
- a beépítés során a tervezési szabadhézag értéket a beépítési szabályozásban rögzített módon kell elérni (a célérték azonos a tervezési értékkel).
- a deformációmentességet biztosító „optimális kötőanyagtartalmat” hazai fejlesztés alapján szabadalmaztatott eljárással határozzák meg

A szabályozásban szereplő NT aszfaltkeverékeket a fokozott és az intenzív igénybevételi kategóriáknál egyaránt lehet alkalmazni.

Az MSZ EN 13 108 szabványsorozatból alkalmazható NT aszfaltok típusai a következők:

- aszfaltbeton (AC) típusból AC 8 kopó (NT); AC 11 kopó (NT), AC 16 kötő (NT), AC 22 kötő (NT)
- zúzalékvázás masztixaszfalt (SMA) típusból SMA 8 kopó (NT), SMA 11 kopó (NT)

Kötőanyagként az e-UT 05.01.26 szerinti,

- a B jelű útépítési bitumenek közül a 70/100
- a PmB jelű polimerrel modifikált bitumenek közül a 45/80-65 fokozat

használhatók fel.

Alapesetben a B jelű útépítési bitumen használata a szükséges, modifikált bitumen használata a megrendelő kifejezett, írásban is közölt kérésére lehetséges.

5.2. Az optimális kötőanyagtartalom

Az optimális kötőanyagtartalom elvi alapjait korábban már megismertük, a továbbiakban néhány gyakorlati jellegű kérdéssel foglalkozunk.

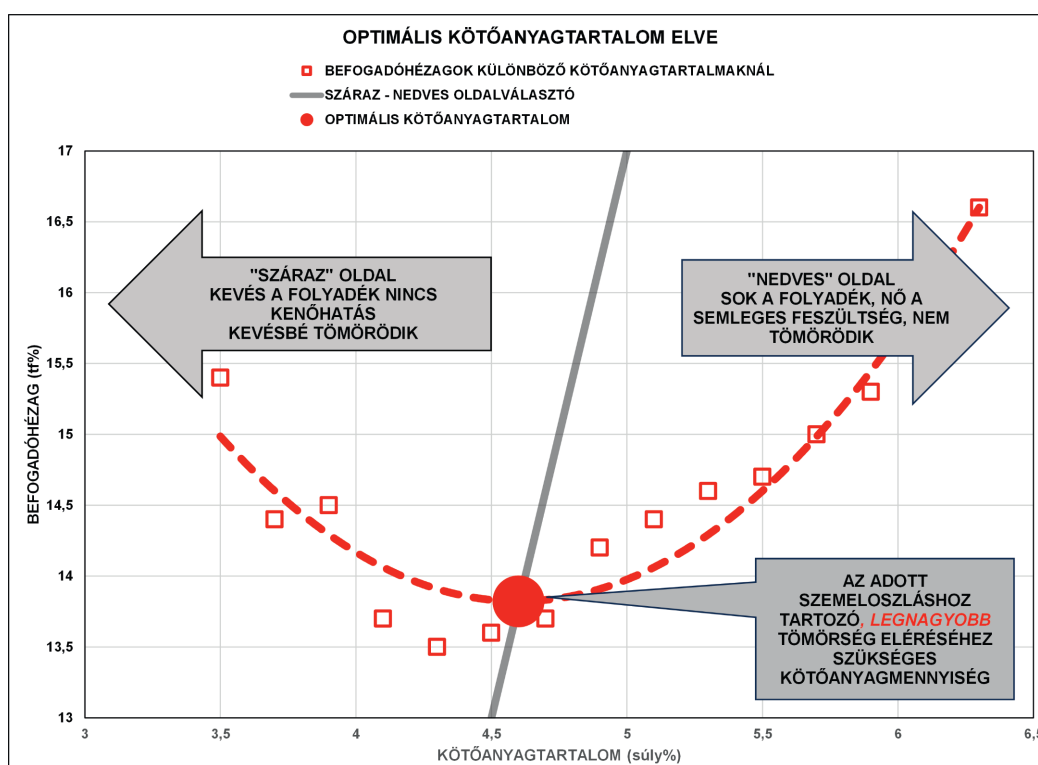
5.2.1. Az optimális kötőanyagtartalom meghatározása

Az optimális kötőanyagtartalom meghatározásához nézzük meg a 16. ábrát.

A meghatározás a következő lépésekben történik:

- a tervezett adalékfrakciókból összeállítjuk a tervezett szemeloszlást,
- meghatározzuk az egyes kötőanyagadagolások mértékét és számát,

- minden összetételnél végrehajtjuk a tömörítési vizsgálatokat, meghatározzuk a befogadóhézag értékeit, ezeket diagramban ábrázoljuk,
- meghatározzuk a befogadóhézag – kötőanyagtartalom trendvonalát,
- a befogadóhézag **minimális** értékét a trendvonal egyenletének differenciálása segítségével meghatározzuk.



16. ábra

5.2.2. Megjegyzések a gyakorlati meghatározáshoz

- Az optimális kötőanyagtartalom számítása

Az optimális kötőanyagtartalmat célszerű az egyes befogadóhézagértékeket kiegyenlítő trendvonal minimumpontjával meghatározni. Ezt egy másodfokú polinommal közelítve, annak minimumpontja számítható a trendvonal (az Excel által megadott) egyenletének első deriválása után az eredményt 0 - val egyenlővé téve a minimumpont adatai számíthatóak.

- A kiinduló kötőanyagtartalom felvétele
Tapasztalati adatok hiányában kielégítően jó a hasonló

aszfalttípusok tervezett kötőanyagtartalmából kiindulni, ezeket aszfaltbetonok esetében 1% - al, SMA keverékek esetében 1,5% - al csökkentve.

Ezt az értéket mindkét irányban 0,3 – 0,5 súly % lépcsővel három – három további pontot kapunk (összesen 7 kötőanyagtartalmat), ezekre végezzük el a tömörítési vizsgálat-sorozatot.

A cél a várható optimális érték köré egy **kellően szimmetrikus** vizsgálati sáv kialakítása.

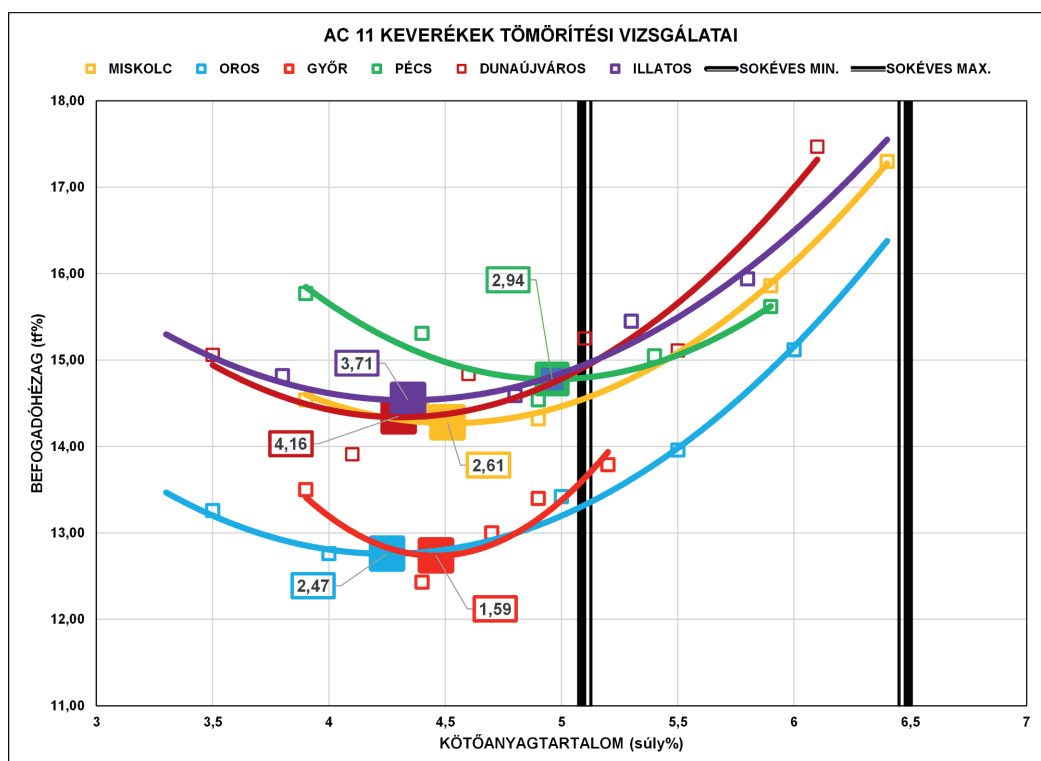
5.2.3. Esettanulmányok

Az optimális kötőanyagtartalom koncepció verifikálása érdekében a TPA laboratóriumaiban háromféle aszfaltkeverék egyenként több változatánál egy vizsgálsorozat indult, ahol a Marshall próbatestre alapozó típusvizsgálat mellett azonos szemeloszlással meghatározták az optimális kötőanyagtartalmat.

Ez azt jelenti, hogy az egyéb tulajdonságok (pl. szabadhéz-

zag) értékét az adott szemeloszláshoz értelmeztük, azaz nagysága nem volt kritérium.

A következő ábrákon ezen keverékek adatainak egy részét lehet tanulmányozni. A kötőanyagtartalomhoz referenciaként egy többéves adatgyűjtés eredményeinek egy részét használtuk.



17. ábra

A 17. ábrán az AC 11 keverékek tömörítési görbéi, az optimális kötőanyagtartalomhoz tartozó befogódóhézag értékek láthatók a kötőanyagtartalom függvényében.

Feltüntettük az optimális értékhez a próbatest szabadhézageértékeket is.

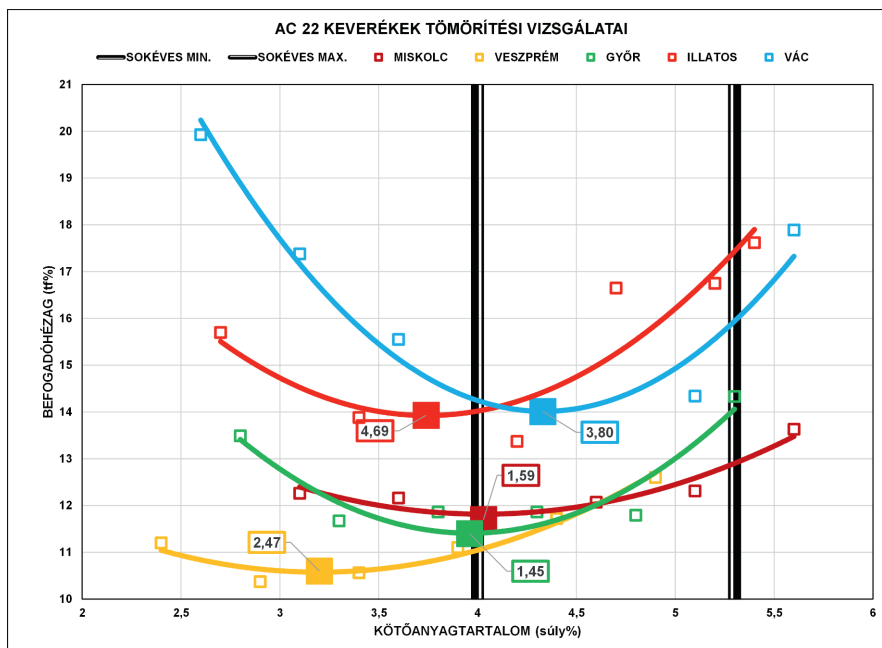
Néhány megállapítás:

- az optimális kötőanyagtartalmak a sokéves értékek tartományánál kisebbek,
- a szabadhézageértékek gyakorlatilag minden esetben megfelelnek a max 4 tf% értéknek,
- az eredmények két VMA szinten csoportosulnak, ez a kövázssűrűség hatását mutatja,
- megállapítható, hogy a „járatos” szemeloszlásokkal teljesíthető a definíció kritériuma.

Az AC 22 keverékeket a 18. ábrán vizsgálhatjuk, az ábrázolás azonos az AC 11 esetében leírtakkal.

Néhány megállapítás:

- az optimális kötőanyagtartalmak jelentős hányada a sokéves adatgyűjtés tartományába esik,
- a szabadhézage értékek lényegében itt is megfelelnek a definíció kritériumának,
- a kövázssűrűség miatti „szinteltolódás” itt is tapasztalható,
- az AC 22 keverékek „járatos” szemeloszlásaival lehet NT aszfaltot megvalósítani.



18. ábra

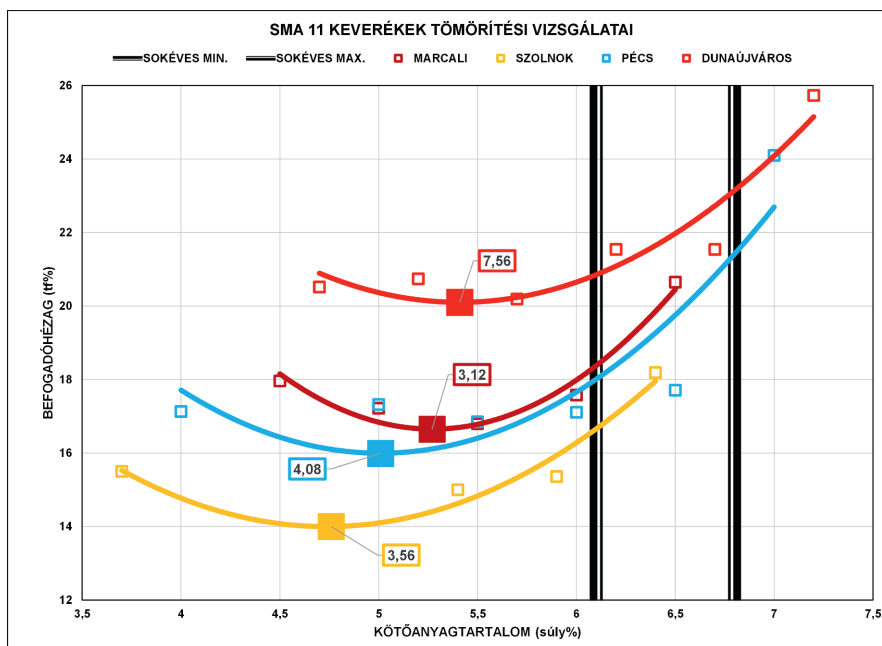
Az SMA 11 keverékek adatai a 19. ábrán láthatók, az ábrázolás rendje hasonló.

Néhány megállapítás:

- az optimális kötőanyagtartalmak jelentősen kiesnek a sokéves adatgyűjtési tartományból,
- a szabadhézag értékek megközelítik, esetenként érdemben túl is lépik a max. 4 tf% értéket, valószínűsíthető, hogy az SMA 11 esetében gyakrabban kell a szemeloszláson változtatni a szabadhézag kritérium miatt,
- az előző pont alapján megkockáztatható az a megállapítás, hogy új szemeloszlási görbéket kell tervezni.

Néhány, az összes keverék esetén tapasztalható általános megállapítás:

- az egyes adalékvázhoz tartozó tömörítési kísérlet eredmények trendvonala jól láthatóan egy felülről homorú görbe (jól illeszkedik a másodfokú polinom), ez fizikailag a „száraz” illetve a „nedves” oldal **tömöríthetőségi** tulajdonságaiból következik
- felismerhető egy, a trendvonal alakjára jellemző tendencia, ti. a „száraz” oldal alacsonyabban helyezkedik el
- a szükséges kötőanyagtartalmak darabszáma a vizsgálatokban adalékvázanként 5 – 7 volt, a szerző véleménye szerint a kellő tapasztalat felhalmozódásáig célszerű lenne a 7 darabszámhoz ragaszkodni.

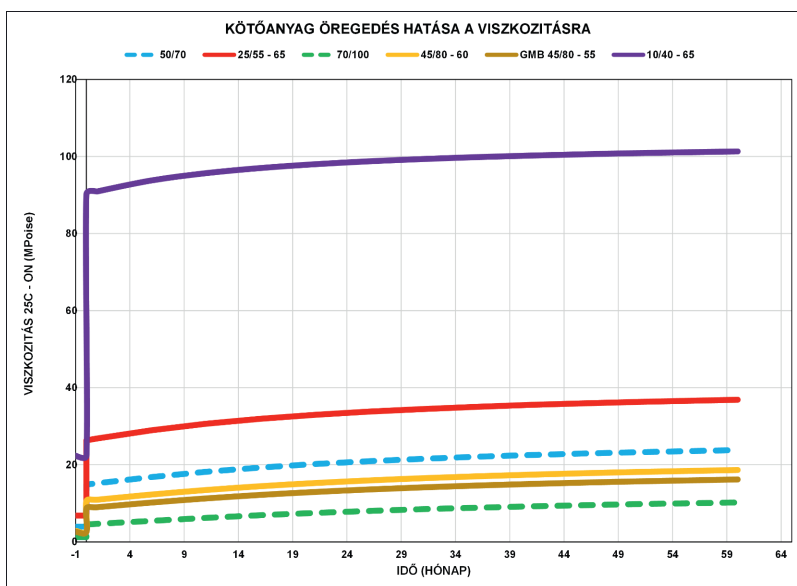


19. ábra

5.2.4. A kötőanyag tulajdonságai

Mindkét fejlesztő határozottan fogalmazott a kötőanyag tulajdonságairól, ne legyen modifikált és lágy (magas penetráció vagy alacsony viszkozitás legyen).

Ezen írás kereteit szétfeszítené a kötőanyagok képességeinek részletezése, a szerző ezért bemutat egy, az öregedési tulajdonságokat bemutató diagramot a 20. ábrán. (21)



20. ábra

Jól felismerhető, hogy mind a rövid, mind a hosszú távú öregedésben a **kiinduló** alacsony viszkozitás nagy előnyt ad. Megjegyzendő még, hogy a hazai kötőanyagokról

meglehetősen régóta született releváns kutatás, célszerű lenne ezt mielőbb pótolni.

5.3. Az NT aszfaltok használati tulajdonságai

A fejezetben megvizsgáljuk az esettanulmányokban bemutatott keverékek **használati** tulajdonságait, összehasonlítva a sokéves adatgyűjtés hasonló adataival.

Használati tulajdonságon azokat a valamilyen módon

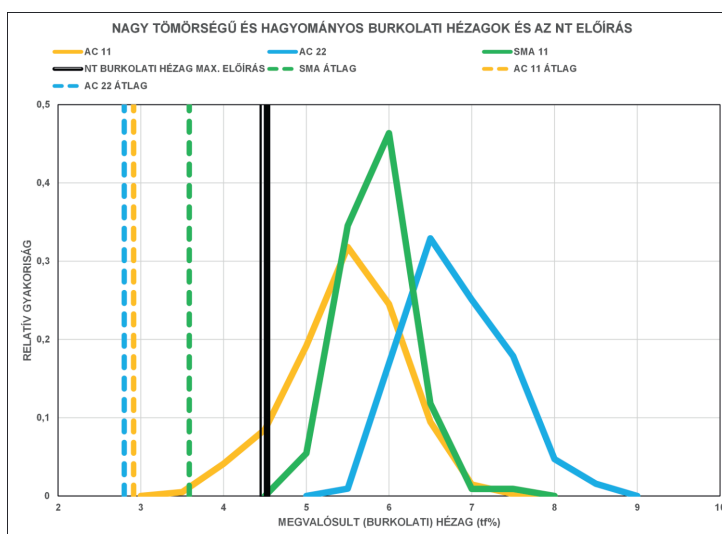
mérhető képességeket értjük, amelyek az aszfaltok pályaszerkezetben a forgalmi, meteorológiai, és időmúlásból eredő káros hatásokkal szembeni ellenállását mutatják.

5.3.1. Burkolati hézag

A burkolati hézag a tömörség egyik lehetséges mérőszáma, ami, mint a sok – sok éves tapasztalati eredményekből tudjuk, jelentősen meghatározza a kötőanyag öregedését, a kötőanyag/adalékanyag kapcsolat erősségét száraz és vizes közegben.

Szabályzataink sok évtizede a különböző tömörségi mérőszámok előírásával explicit, vagy implicit módon ezen hatások korlátozására töreksenek.

A már említett sokéves adatgyűjtés burkolati hézagra vonatkozó adatait összevetjük az NT aszfaltok szabályozási előírásával a következő ábrán.



21. ábra

5.3.2. NT aszfaltok burkolati hézaga

Az NT aszfaltok esetében a beépítési hézag **célértéke** az optimális kötőanyagtartalomhoz tartozó próbatest szabad-hézag.

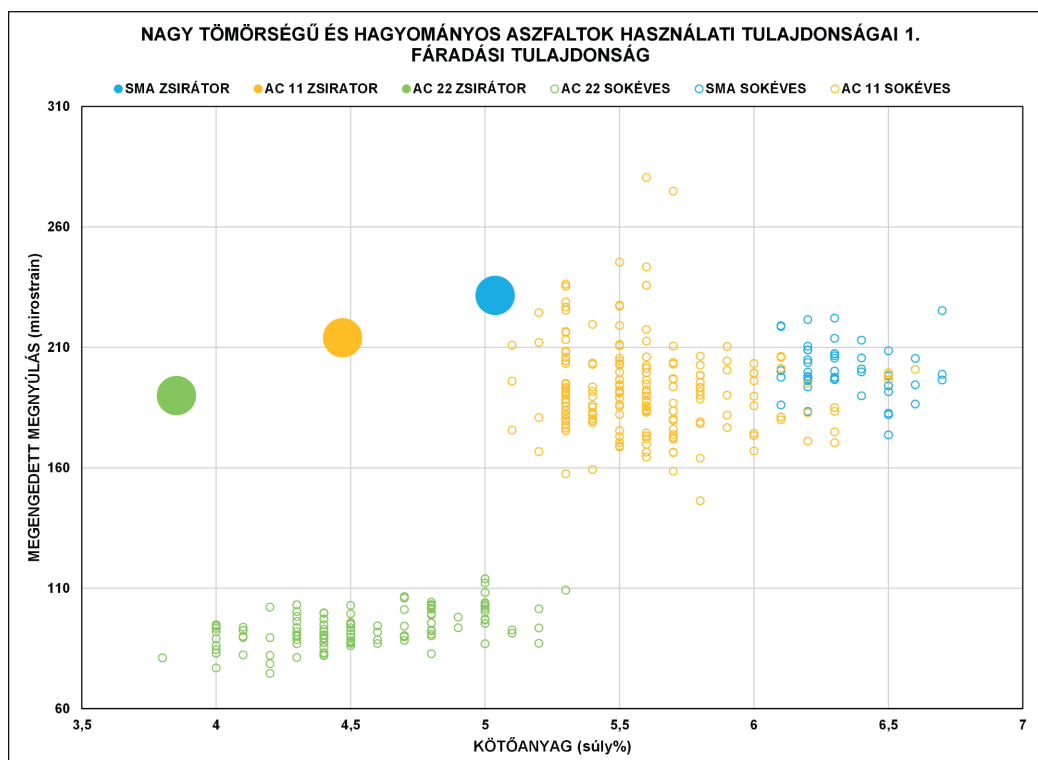
Nem szabad elfelejteni, hogy az optimális kötőanyagtartalom meghatározása éppen a tömörítéshez szükséges **legkedvezőbb folyadékfázis mennyiség** meghatározását jelenti, tehát a tervezett burkolati hézagot itt a legkönnyebb elérni.

Az eléréséhez szükséges további feltételeket a szabályozástervezet a következőképpen igyekszik biztosítani

- a fogadófelületnek kellően **merevnek** kell lenni, hogy a tömörítés **hatékony** legyen,
- a fogadófelület várható hőmérséklete alapján kell meghatározni a **hatékony tömörítésre rendelkezésre álló időt** és a beépítési technológiát ehhez kell igazítani,
- végül a külső körülmények figyelembevételénél a kockázatos időszakokban előre megtervezett technológiák (pl. felületmelegítés, kompaktaszfalt eljárás) használatát írja elő a szabályozás.

5.3.3. Fáradási tulajdonság

A fáradást a (22) szerint számítva, az eredményeket a kötőanyagtartalom függvényében ábrázolva a következő ábra szerinti eredményeket kapjuk.



22. ábra

A következő megállapítások tehetők:

- a fáradási tulajdonságok az SMA, illetve az AC 11 esetében nagyon hasonlóak, mint a sokéves adathalmaz esetében,
- Az AC 22 fáradási tulajdonsága érdemben nagyobb, mint a sokéves adathalmaz értékei,
- az NT aszfaltok a fáradási képességet érdemileg kevesebb kötőanyagtartalommal érték el,

- mindezek az eredmények nyilvánvalóan összefüggésben vannak a lényegesen kisebb hézagértékekkel.

Megjegyzendő, hogy a szabályozástervezetben az AC típusú, fáradási tulajdonságot előíró követelményeket hagyományos bitumen esetében a kötőanyagtartalom kisebb csökkenése mellett megtartottuk, modifikált bitumen esetén kb. 30 % - al növeltük.

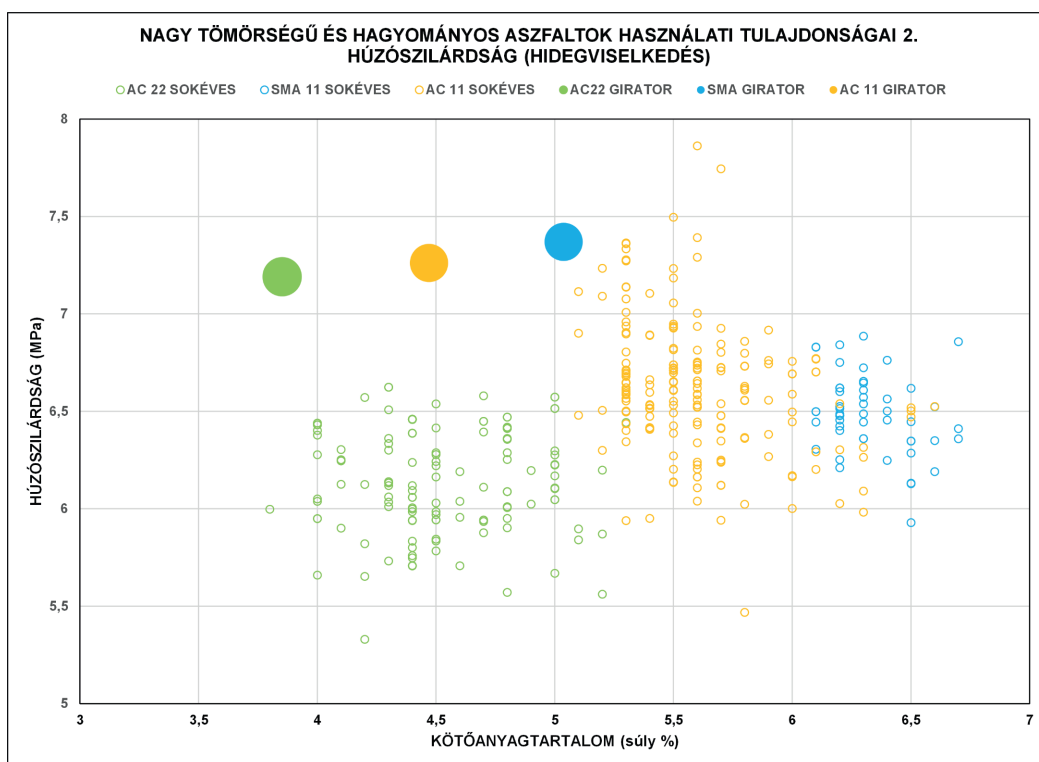
5.3.4. Húzószilárdság

A húzószilárdságot a (23) alapján határoztuk meg.

Megjegyzendő, hogy a húzószilárdság ismeretében lehetséges az aszfaltkeverék repedési hőmérsékletének a számítása is (24).

A repedési hőmérsékletet az aszfalt hidegviselkedésének

mérőszámaként használják, a szerző saját véleménye az, hogy mivel a termikus igénybevételek esetén pályaszerkezeti méretben lehetséges a keletkező húzófeszültségek számítása, a mérőszámnak a mechanikai ellenállás – húzószilárdság – lényegesen jobban megfelelné.



23. ábra

A következő megállapítások tehetők:

- az NT keverékek húzószilárdsága magasabb, mint a hagyományos aszfaltoké,
- a magasabb húzószilárdság mérsékelten kevesebb kötőanyagtartalom mellett valósult meg.

6. A tudatos aszfaltkeverék tervezésről

Az aszfaltkeverékekkel **gondolkodva** is foglalkozók már hosszabb ideje felvetik, hogy a keveréktervezés egy **dilemma**, azaz két, egymással ellentétben álló követelmény **közé** kell aszfaltjainkat tervezni.

A kötőanyagmennyiség az, aminek szükségtelen többlete

a deformációs hajlamot, hiánya a fáradási képességet rontja.

Az optimális kötőanyagtartalom meghatározásának lehetősége – azaz az, hogy a keréknyomképződés szempontjából kellően biztonságos tervezési lehetőségünk van – megadja a lehetőséget a **tudatos** aszfaltkeverék tervezésére.

6.1. Pályaszerkezeti vonatkozások

A különböző aszfaltkeverékekből pályaszerkezeti rétegeket készítünk és ezek egy teherhordó szerkezet részei.

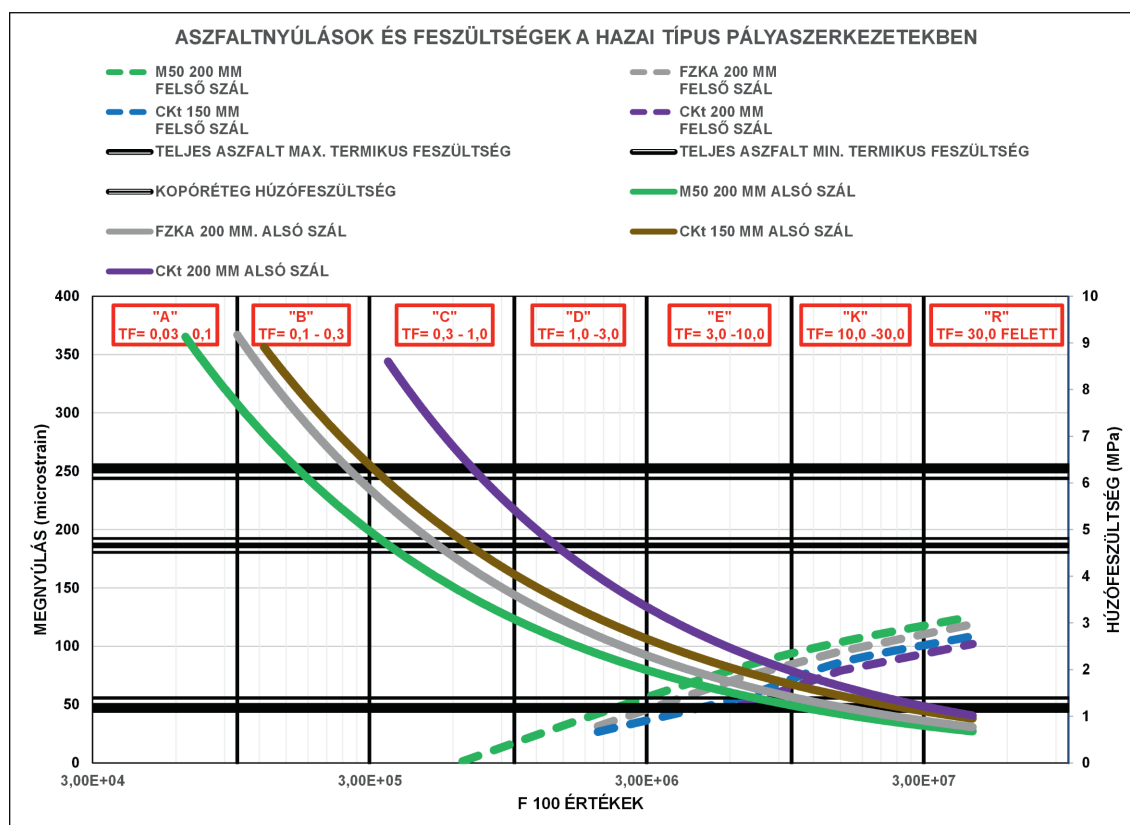
A teherhordó szerkezeteket a mérnök méretezni szokta, ami azt jelenti, hogy a konkrét körülmények figyelembevételével

- meghatározzuk a terheléseket,
- megválasztjuk a felhasználni tervezett anyagot,
- az anyag ismeretében meghatározzuk a teljesítendő re-

lációkat (számított feszültség szemben a határfeszültség, számított megnyúlás szemben a megengedett megnyúlás),

- a szerkezet azon méreteinek meghatározása, amely mellett a relációk teljesülnek.

A pályaszerkezetek forgalmi és meteorológiai terheléseiből a 24. ábra szerinti számított feszültségek/megnyúlások adódnak a hazai típus pályaszerkezetek esetében.



24. ábra

A pályaszerkezetben alkalmazni szándékolt anyagnak (aszfaltnak) ezekkel **szemben** kell képesnek lenni a reláció teljesüléséhez.

Vegyük észre, hogy a kopórétegek is jelentős megnyúlás/feszültséget szenvednek el. A messze legrosszabb állapotfel-

vétel vizsgált tulajdonság, a burkolatállapot eredményei nagy mértékben erre vezethetők vissza.

Az különösen sajnálatos, hogy a hazai méretezési szabályozás nem veszi ezt a problémát figyelembe.

6.2. Az NT aszfaltok képességeinek potenciálja

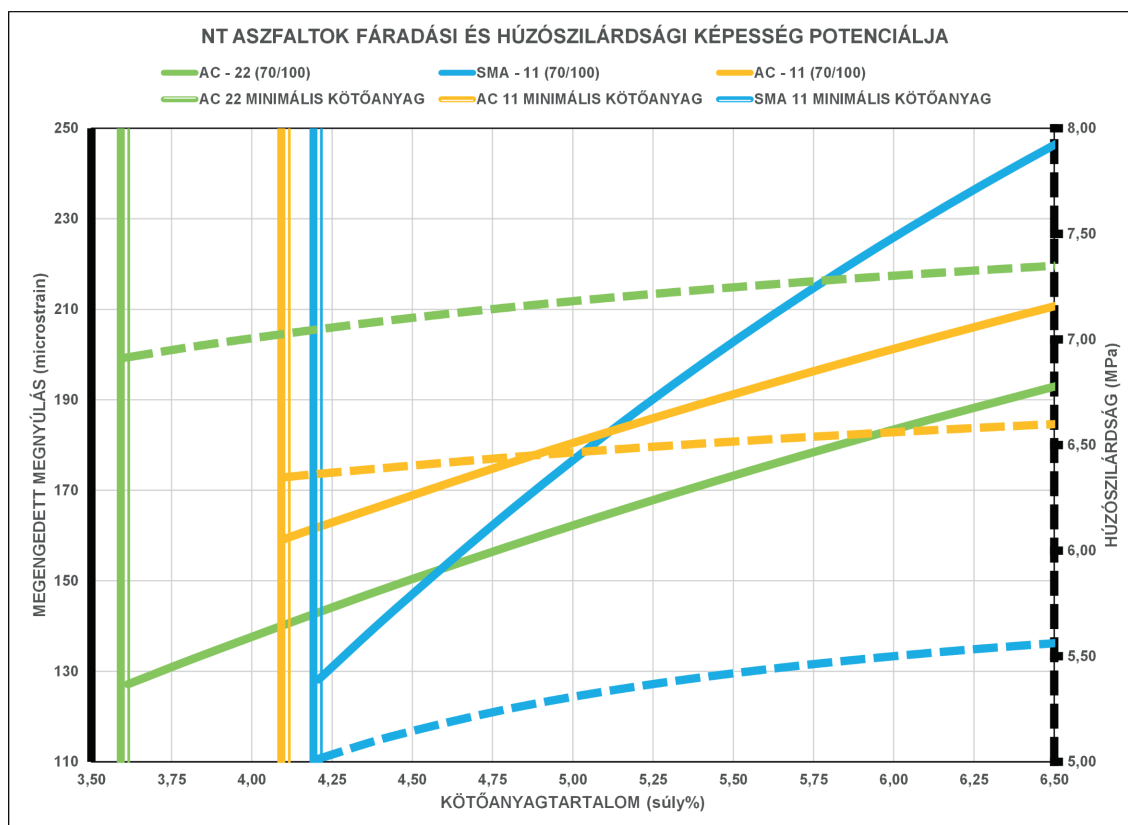
Az NT aszfaltokkal kapcsolatban kialakult egy vélekedés, hogy azok kötőanyagtartalma és ezáltal fáradási képessége alacsony.

A márt többször is említett sokéves adatgyűjtés alapján a szerző a bemutatott három hagyományos keveréktípus Marshall befogadóhézagai alapján számított minden típusra egy, az NT változatokra **érvényes** befogadóhézag tartományt.

Ebből – 4 tf% szabadhézag feltételezésével – számítható a kötőanyag térfogat % értéke, amiből egy átlagos kőváz sűrűség segítségével nyerhető a kötőanyagadagolás súly% értéke.

A befogadóhézag értékekből a már bemutatott és hivatkozott eljárásokkal lehet számítani a megengedett megnyúlás és a húzószilárdság értékeit.

Mindezeket a következő diagramon lehet tanulmányozni.



25. ábra

Az ábrán a jelzett színnel folytonos vonallal a megegedett megnyúlás (bal oldali ordinátatengelyen skálázva), szaggatott vonallal a húzószilárdság szerepel.

Mindhárom aszfaltfajtához feltüntettük a minimális kötőanyagadagolás értékeit is.

A következő megállapítások tehetők:

- az ábrázolt értékek becslések, de a számítási módszer (USA szabályozásban szerepel) kellően megbízható,
- vannak valós körülmények közötti laboratóriumi vizsgálati eredmények, azok a becslést alátámasztják,

- tervezési feladat esetén (ismerve a pályaszerkezet adatait) a **szükséges** fáradási/húzószilárdsági tartomány kijelölhető és az ehhez tartozó szükséges befogadóhézag/kötőanyagtartalom érték is megállapítható a további keveréktervezéshez,
- vegyük észre, hogy az adott összetétel a kritikus állapotban értelmezhető, ahol a **térfogatváltozási** deformáció az ismert és bemutatott fizikai törvények alapján zérus,
- ebből következik, hogy a bevezetőben említett tervezési dilemma feloldható.

6.3. Egy megvalósult példa

Egy nagyforgalmú autópálya felújítás esetében – az üzemeltető maximális támogatásával – egy „prémiumkategóriás” kopóréteg megvalósítása volt a feladat, ahol a keréknyommentesség mellett kiváló, a kopórétegre vonatkozó fáradási és hidegviselkedési képességeket is előírtak. (25)

A kopóréteg típus kiválasztása után viszonylag hamar nyilvánvalóvá vált, hogy a megszokott keverékek csak korlátozottan képesek kielégíteni a kritériumokat, ezért a Bailey módszer (26) alkalmazásával egy új, magasabb befogadóhézagú köváz lett alkalmazva.

A kétféle keverék optimális kötőanyagtartalom meghatározási tömörítéseket a 26. ábrán lehet tanulmányozni.

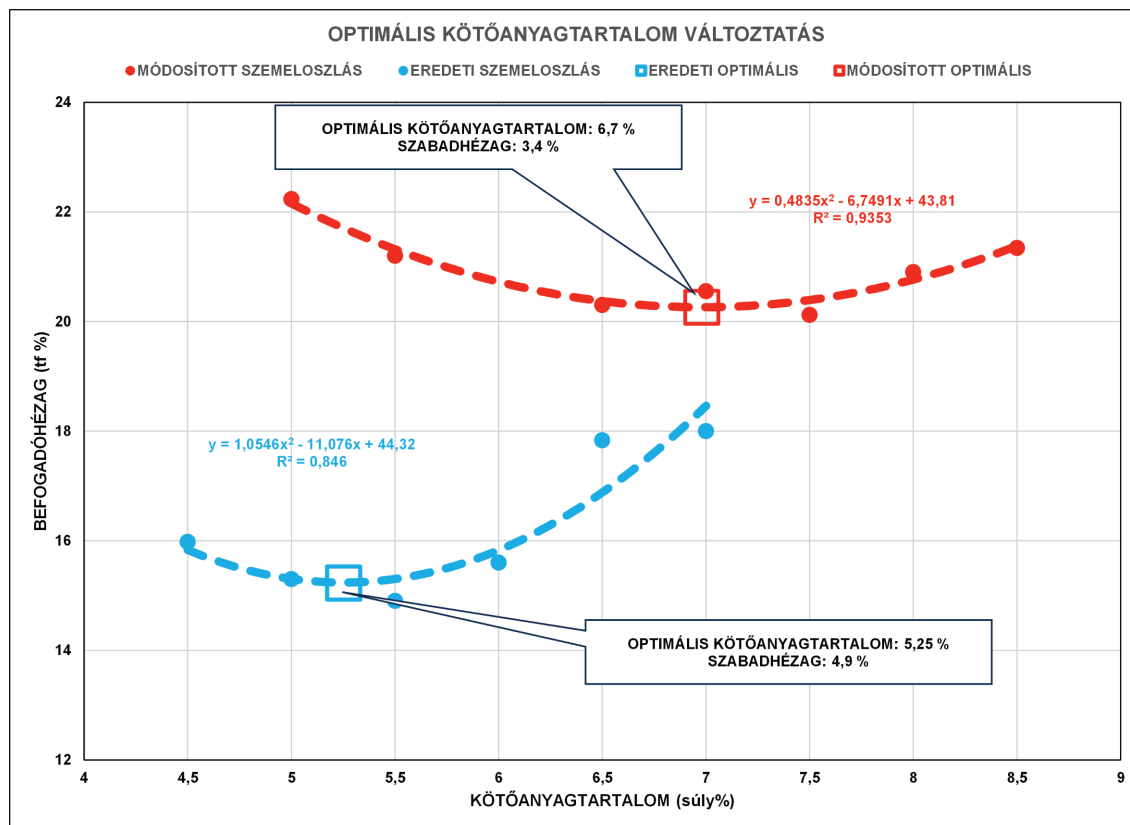
A kék színnel az eredeti, megszokott, pirossal a fejlesztett

keverék látható. A szemeloszlás változtatás hatása a befogadóhézag „megugrásában” érzékelhető és a deformációellenálló keverék egyéb tulajdonságai a magas kötőanyagtartalommal biztosítottak.

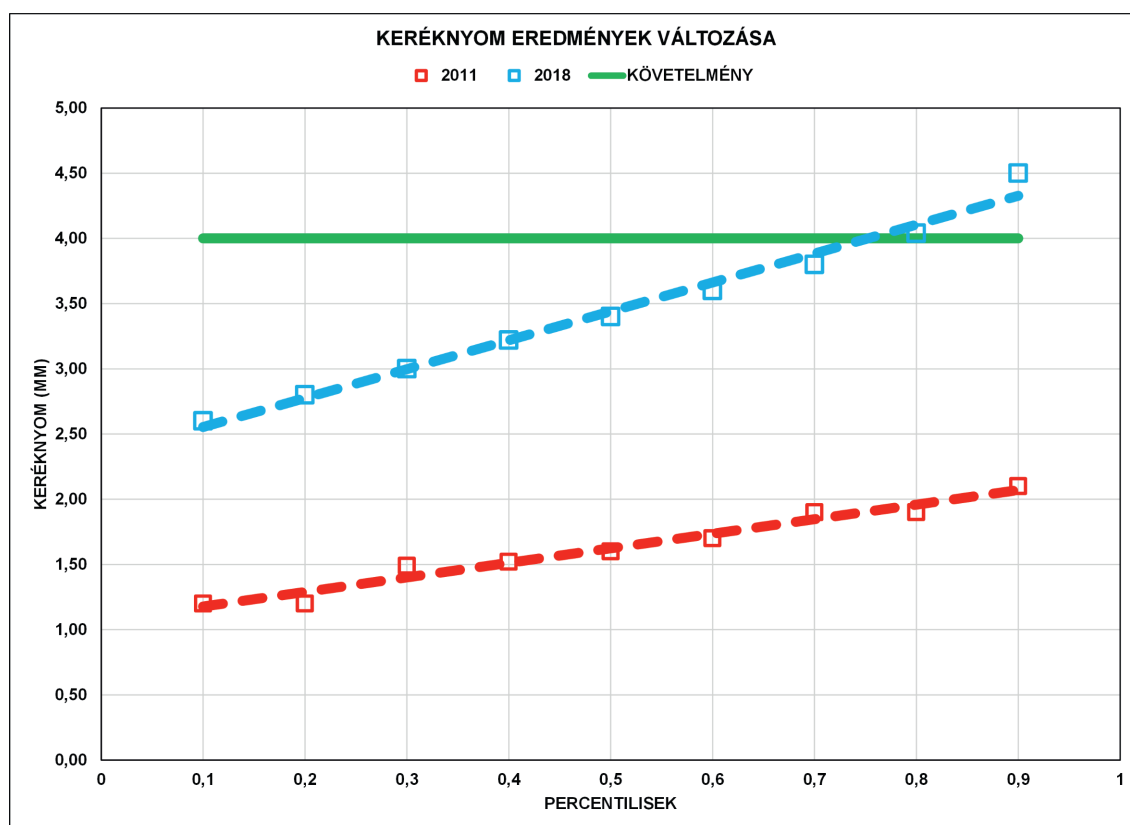
A bemutatott keverékből jelentős mennyiségű kopóréteg készült, az egyik szakasz RST mérés eredményeit vizsgálhatjuk a 27. ábrán.

A beépítéstől eltelt hét év alatt a méretezési forgalom közel kétszerese (kb. 35 millió egységtengely) hatására a keréknyomértékek átlagértékei mélyen a követelményszint alatt alakultak (amely értékben néhány mm burkolatkopás is biztosan benne van).

Azaz, a koncepció a valós körülmények között is működik.



26. ábra



27. ábra

6.4. Analitikus keveréktervezés

Az NT aszfaltok tervezésének eljárása a megszokott Marshall eljáráshoz képest bonyolult, különösen a kiinduló helyzetekben, amikor nincsenek kialakult tapasztalatok.

A **tömörítőeszköz**, a zsirátor tömörítési módja ugyanakkor alkalmas a nagy pontosságú matematikai közelítésre, ezt már elég sokan megkísérelték pl. (27), (28).

Az eljárásokkal lehetséges egy, a potenciális adalékanyag-

frakciók ismeretében egy analitikus előtervezés, amivel az optimális kötőanyagtartalom is meghatározható.

A kellő analitikus ellenőrzés **után** a megfelelő szemeloszlású adalékvalózzal a tömörítési kísérlet végrehajtható.

A szakirodalomban található fejlesztések egyértelműen előrevetítik azt, hogy belátható időn belül könnyen hozzáférhető szoftverekkel lehetséges az analitikus előtervezés.

7. Befejezés

Az írásban a szerző igyekezett közérthető módon bemutatni az NT aszfaltok alkalmazásában rejlő komoly lehetőségeket. Nem kétséges, hogy a gyakorlati alkalmazás még számos részletkérdést vet fel.

Szükségesnek látszanak olyan kutatások, amelyek a hazai járatos keverékek teljes spektrumára kiterjednek és labora-

tóriumi körülmények között kiterjesztik az alkalmazás lehetőségét.

Külön kiemeli a szerző a témával kapcsolatos képzések fontosságát, a rendszerrel kapcsolatos megbeszélések, viták során számos tudáshiányra visszavezethető téves megállapítás került elő, ez megfelelő képzésekkel erősen javítható.

Irodalomjegyzék

1. Dr. Gajári György: A hengerelt aszfalt, mint részben telített, lehülés okozta izotróp sajátfeszültséggel bíró szemcsés anyag, viszkohypoplastikus anyagmodellje AZ ASZFALT 2019/1
2. Dr. Elk Richter: Nagy tömörségű aszfalt (HVA) AZ ASZFALT 2018/1
3. A. Aleksandrov, T. Semenova: The Limiting Rut Depth by Conditions Safety of Traffic. Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. Volume 2 (pp. 883-892) November 2022-
4. Rut Mitigation Techniques at Intersections. 2003 Federation of Canadian Municipalities and National Research Council
5. Kenis, W. J. (1978). "Predictive Design Procedure, VESYS User's Manual: An
6. Interim Design Method for Flexible Pavement Using the VESYS Structural
7. Subsystem." Final Report No. FHWA-RD-77-154, Federal Highway
8. Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
9. Ivo Herle: Hypoplastizität und Granulometrie einfacher Korngerüste PHD Dissertation Karlsruhe 1997 ISSN 0453-3267
10. Talajok nyírószilárdsága Egyetemi segédlet, Széchenyi egyetem. https://se.sze.hu/images/ngb_se005_1/2016EA_HP/nyirooszil.pdf
11. Dipl. Ing. Gajári György, Modellierung bleibender Verformungen des Asphalts mit einem hypoplastischen Stoffgesetz der Bodenmechanik. Dissertation, TU Dresden Fakultät Bauingenieurwesen
12. Gajári György: Eljárás utépítési aszfalt maradó alakváltozással szembeni ellenállásának javítására. Lajstromszáma: 227471.
13. Nemesdy Ervin: Az utépítési és fenntartási technológiák aktuális problémái külföldön és Magyarországon <http://elsolanchid.hu/szemle/cikkek/1994/12.December/Cikk/040001.htm>
14. Keleti Imre: A nyári burkolatkárok jelensége <http://elsolanchid.hu/szemle/cikkek/1995/01.Január/Cikk/040001.htm>
15. Dr. Liptay András: Az aszfaltburkolatok nyomvályúképződési problémái <http://elsolanchid.hu/szemle/cikkek/1995/01.Január/Cikk/050001.htm>
16. Szakos Pál hozzászólása. <http://elsolanchid.hu/szemle/cikkek/1995/01.Január/Cikk/070001.htm>
17. Szerzői munkacsoport: Aszfaltburkolatú autópályák minőségbiztosítási
18. rendszeréhez történő hozzájárulás. Közlekedésepítési szemle 2009 július.
19. Nemesdy Ervin: Az amerikai SHRP program és várható hatása az európai és a magyar utépítésre. <http://elsolanchid.hu/szemle/cikkek/1994/06.Junius/Cikk/030001.htm>
20. Nemesdy Ervin: Európa országaiban miért nem alkalmazzák az USA – ban erősen támogatott SUPERPAVE aszfalttervezési rendszert? <http://elsolanchid.hu/szemle/cikkek/1998/06.Junius/Cikk/020001.htm>
21. Dr. Tóth Sándor és társai: A SHARP-SUPERPAVE aszfalt tervezési rendszer jövője Európában és Magyarországon <http://elsolanchid.hu/szemle/cikkek/1998/12.December/Cikk/140001.htm>
22. A magyar aszfaltfejlesztési együttműködés nyilatkozata <http://elsolanchid.hu/szemle/cikkek/2000/02.Február/Cikk/080001.htm>
23. Nemesdy Ervin: A „Magyar Aszfaltfejlesztési Együttműködésről” és a külföldi és hazai tapasztalatok egyeztetésének fontosságáról <http://elsolanchid.hu/szemle/cikkek/2000/12.December/Cikk/030001.htm>
24. MS-2 Asphalt Mix Design Methods, Asphalt Institute, Seventh Edition 2014
25. Mirza, M., Witczak, M., (1995): "Development of a Global Aging System for Short and Long Term Aging of Asphalt Cements," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 64, 1995, pp. 393-430.
26. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993, Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, 1993
27. Molenaar, A. A. A., & Li, N.: Prediction of compressive and tensile strength of asphalt concrete. International Journal of Pavement Research and Technology, 7, pp. 324-331, 2014.
28. Bagdat Teltayeva and Boris Radovskiy: Predicting thermal cracking of asphalt pavements from bitumen and mix properties Road Materials and Pavement Design, 2017
29. Karoliny Márton - Aszfaltkeverék tervezési esettanulmány Az Aszfalt, 2019/1
30. Aurelio, Pine and Lum The Bailey Method Achieving Volumetrics and HMA Compactability Fiftieth Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA) 2005
31. Teng Man; Jia-Ling Le, M.ASCE; Mihai Marasteanu; and Kimberly M. Hill: Two-Scale Discrete Element Modeling of Gyrotory Compaction of Hot Asphalt J. Eng. Mech., 2022, 148(2): 04021140
32. Baoshan Huang, Xiang Shu: DEM Simulation of Laboratory Compaction of Asphalt Mixtures Using Open Source Code Article in Journal of Materials in Civil Engineering · April 2015

Bitumen életciklus-értékelése

Anja Sörensen

HSE vezető kapcsolattartó
Németország, Svájc
European Bitumen Association
aisbl.



Megbízható és reprezentatív környezeti adatokra van szükség ahhoz, hogy figyelembe lehessen venni a közúti infrastruktúra építési és karbantartási műveleteinek környezetre gyakorolt hatását. Ennek érdekében az Eurobitume az érdekelt felek számára egy olyan bitumen életciklus-leltárt biztosít, amely több mint 25 évre visszatekintve reprezentatív az európai bitumentermelésre vonatkozóan.

A negyedik bitumen életciklus-leltár 2025 márciusában jelent meg [1]. Az életciklus-értékelési (LCA) tanulmányt a Sphera végezte az ISO 14040:2006 és az ISO 14044:2006 szabványoknak megfelelően. A részletes jelentés az Eurobi-

tume weboldalán érhető el. Ez a jelentés tartalmazza a Solingen által az ISO 14071:2024 szabványnak megfelelően végzett harmadik fél általi ellenőrzés szintézisét.

Az LCA 4.0 tanulmány (2025) felváltja az Eurobitume által 2020-ban (LCI 3.0) és 2022-ben (LCI 3.1) frissített életciklus-leltárt (LCI). Az előző tanulmány harmadik fél általi ellenőrzési fázisában két fejlesztendő területet azonosítottak: az első a nyersolaj-adatbázis kiválasztásához, a második pedig a több elsődleges adat felhasználásának lehetőségéhez kapcsolódott. Az LCA 4.0 erre a két fő megjegyzésre válaszol.

A tanulmány az egy tonna bitumen előállításával járó környezeti hatásokra összpontosít. Az eredmények felhasználhatók más bitumen alapú építőanyagok LCA-vizsgálata-

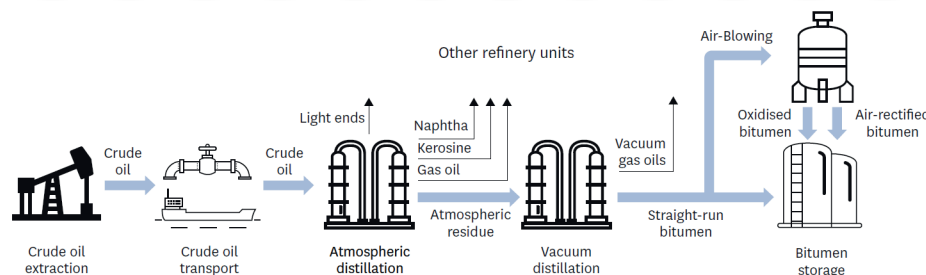
iban, például egy EN 15804+A2 [2] szabvány szerinti környezetvédelmi terméknnyilatkozat (EPD) elkészítéséhez.

A tanulmány hatóköre és reprezentativitása

- A bitumen két kategóriáját vizsgálják:
- átlagos útépitési minőségű bitumen, amelyet finomítóban válogatott nyersolajok vákuumdesztillációjával nyernek, és főként útépitési alkalmazásokban használnak;
 - átlagos oxidált bitumen, amelyet finomítóban állítanak elő a közvetlen lepárlású bitumenből és egy további bitumen oxidáló egységből. Ez a folyamat magában foglalja egy légáram átvezetését a bitumenen magas hőmérsékleten, hogy jelentősen megváltoztassa annak fizikai tulajdonságait. Az oxidált bitumént főként tetőfedésre és vízszigetelésre használnak.

A hatály a bitumen előállítását a „bölcsőtől a kapuig” lefedi, azaz figyelembe veszi a nyersolaj kitermelésével, finomítóba szállításával, a desztillációs (és esetleg oxidációs) folyamatokkal, valamint a bitumen finomítóban történő tárolásával kapcsolatos környezeti hatásokat (lásd az 1. ábrát). Ez a hatály az EN 15804+A2 szabvány A1, A2 és A3 moduljainak felel meg.

A tanulmány az Eurobitume tagok által Európában üzemeltetett 17 finomító adatain alapult. A begyűjtött és felhasznált adatok 8 EU-s és Egyesült Királyságbeli ország működését képviselik, amelyek az Eurobitume tagok bitumentermelésének több mint 75%-át teszik ki.



1. ábra. A bitumen és a bitumenes kötőanyagok egyszerűsített előállítási folyamata

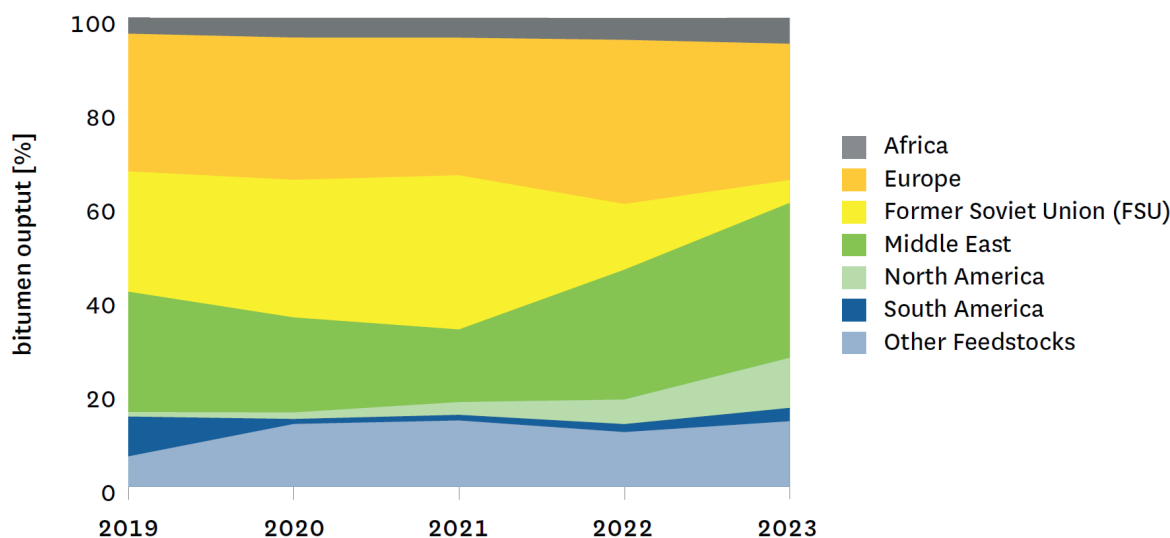
Főbb modellezési feltételezések

A modellezést a Sphera FE LCA szoftverrel végezték, az Eurobitume tagok finomítói által szolgáltatott elsődleges adatok felhasználásával, amennyiben azok rendelkezésre álltak. A Sphera 2024.1 MLC (Managed LCA Content) adatbázisból [3] származó adatokat elsősorban másodlagos adatként használták a kitermelési folyamatok, az alapanyag-szállítás, a külső forrásokból (üzemanyagok és villamos energia) származó energiaellátás és a külső forrásokból származó villamosenergia-termelés modellezéséhez.

A nyersolajtermelést szintén a Sphera MLC 2024.1 adatbázissal modellezték. Ezek az adatok a nyersolaj-kitermelés becsült hatásait képviselik az egyes származási országok-

ban, figyelembe véve az alkalmazott kitermelési technológiák kombinációját (hagyományos vagy nem hagyományos, valamint szárazföldi vagy tengeri). Azon országok relatív részesedése, ahonnan a nyersolajat importálják, idővel változhat. Ezért feltételeztük, hogy a bevont finomítók bitumentermelésével súlyozott átlagos alapanyag-keverék egy 3 éves átlag (2021-től 2023-ig), hogy csökkentsük az időbeli ingadozásokat.

A nyersolajok származási országára vonatkozó információk bizalmasságának megőrzése érdekében a súlyozott átlagot kontinentális/regionális szinten összesítettük a 2. ábrán.



2. ábra. A nyersolajkosár alakulása a 2019–2023 közötti időszakban, bitumentermeléssel súlyozva

A nyersolajtermelés környezeti hatása jelentősen eltér a származási országtól függően. Az ezeket az eltéréseket befolyásoló fő tényezők a szellőztetéshez, a fáklyázáshoz és a diffúz hulladékokhoz (VFF) kapcsolódnak. A Sphera MLC metánkibocsátásának modellezéséhez használt referencia-adatbázis a Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) által kifejlesztett „Global Methane Tracker” eszköz [4].

A nyersolaj származási országból a finomítóba történő szállítását csővezetékek és hajózás kombinációjával modellezzük. A különböző országokból származó nyersolajkeverékek mindegyikéhez egy adott kombinációt és a hozzá tartozó távolságokat határoztak meg a gyűjtött elsődleges adatok alapján.

A bitument a finomítóban egymást követő atmoszférikus és vákuumdesztillációval nyerik. A desztillációs folyamat energiafogyasztását a finomítóktól gyűjtött elsődleges adatok és energia-allokáció alkalmazásával számítják ki.

A bitumentermékeket ezután fűtött és szigetelt tartályokban tárolják a finomítóknál. Ezt a szakaszt szintén elsődleges adatokkal modellezték.

A finomítóban más folyamatokat is figyelembe vesznek:

- Áramellátás: a villamosenergia-fogyasztás egy részét (körülbelül 34%-át) jellemzően egy helyszíni kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő erőmű állítja elő. A fennmaradó rész (körülbelül 66%) az adott országos hálózathoz származik;
- Gőz- és hőtermelés: a finomítói egységekben a tüzelőanyagok közvetlen elégetése hő vagy gőz előállítására a CO₂-kibocsátást az IPCC hatodik értékelő jelentésében szereplő kibocsátási tényezők alapján számították ki [5].

Életciklus-leltár és hatásmutatók

Az életciklus-leltár (LCI) felsorolja a rendszerbe belépő és onnan kilépő elemi áramokat: az erőforrásokat és a levegőbe, vízbe és talajba történő kibocsátásokat. Mivel a teljes leltár több száz áramot tartalmaz, ebben a cikkben nem szerepel. Azoknak az LCA-szakértőknek szól, akik bitumen alapú termékeket szeretnének modellezni LCA-szoftverben. A bitumen életciklus-leltár nyilvánosan elérhető ILCD formátumban (International Life Cycle Data system) az Eurobitume weboldalán egy egyszerű igénylőlapra keresztül (https://eurobitume.eu/lci_4-0_request/). Az ILCD formátum egy semleges formátum az LCA-adatok strukturálására és cseréjére, amelyet az Európai Bizottság Közös Kutatóközpontja (JRC) fejlesztett ki. Célja az LCA-adatbázisok átláthatóságának, interoperabilitásának és minőségének előmozdítása Európában az információk szigorú, a bevett gyakorlatoknak megfelelő strukturálásával.

Az életciklus-leltár eredményei alapján különféle hatásvizsgálati módszertanok alkalmazhatók európai kontextusban. Mivel ez a tanulmány háttérinformációként használható a bitument tartalmazó termékek környezetvédelmi terméknnyilatkozataiban (EPD-k), az EN

15804+A2:2019 [2] szabvány szerinti EPD-khez előírt hatásvizsgálati módszereket alkalmazták. Az EN 15804+A2:2019 a környezeti lábnyom (EF) hatásvizsgálati módszer legújabb elérhető verziójára utal, amely jelenleg az EF 3.1. Az EF 3.1-ben szereplő jellemzési tényezőket megbízhatónak és relevánsnak tekintik az európai kontextusban, és széles körben használják és tiszteletben tartják azokat az LCA-szakemberek közösségében.

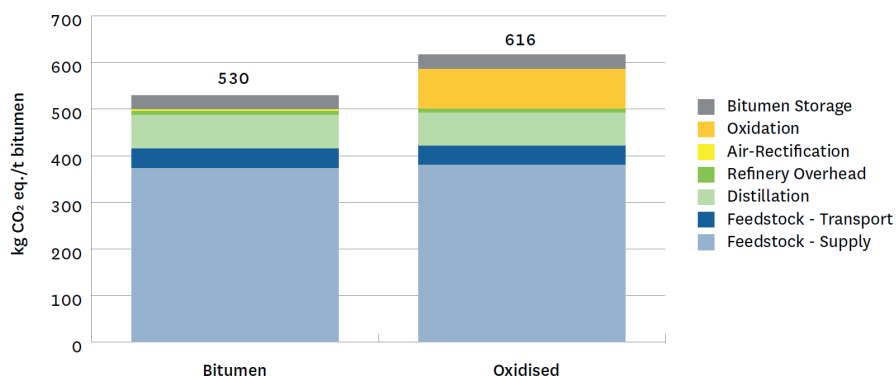
Különösen a globális felmelegedési potenciál (GWP) hatáskategóriáját a 6. Értékelő Jelentésből (AR6) [4] vett jelenlegi IPCC jellemzési tényezők alapján értékelik egy 100 éves időszakra (GWP100).

A cikk további része a GWP100 (üvegházhatású gázok kibocsátása) mutatóra összpontosít, mivel azt az úépítési érdekelt felek gyakran használják, és egyre inkább a közbeszerzési szerződések összefüggésében. Az Eurobitume által közzétett tanulmányjelentés tartalmazza az EN 15804+A2:2019 szabványban meghatározott 38 mutató (savasodás, eutrofizáció, az ózonréteg csökkenése, az erőforrások kimerülése, vízigény stb.) eredményeit a bitumengyártás minden egyes szakaszára vonatkozóan.

Üvegházhatású gázok kibocsátása

Az üvegházhatású gázok (ÜHG) kibocsátására (GWP100) vonatkozó számszerűsített eredményeket a 3. ábra mutatja.

A bitumen GWP100 értéke 530 kg CO₂-egyenérték/t bitumen. Az oxidált bitumen előállításához szükséges légbefúvó egységek bizonyos mennyiségű energiát fogyasztanak, ami körülbelül 86 kg CO₂-egyenérték/t kibocsátást eredményez az oxidációs folyamat során. Az oxidált bitumen GWP100 értéke tehát 616 kg CO₂-egyenérték/t bitumen (+16% a bitumenhez képest).

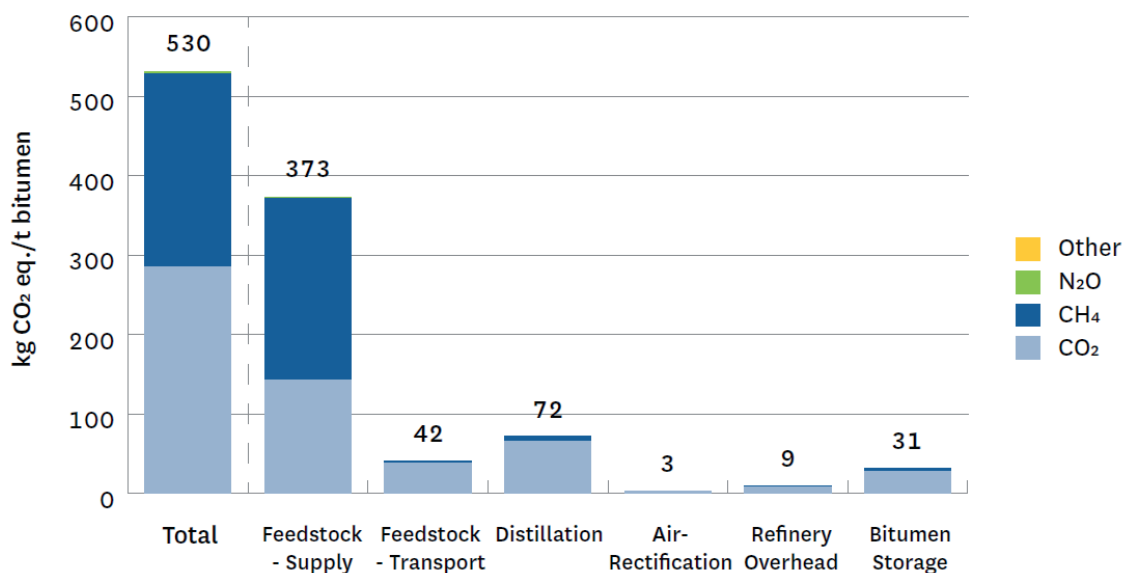


3. ábra. Bitumenes termékek GWP100 értéke súlyozva

Az üvegházhatású gázok kibocsátásához hozzájáruló fő folyamat a finomító alapanyagaként használt nyersolaj kitermelése (ami az útépitési bitumen 70%-át, illetve az oxidált bitumen 62%-át teszi ki). A nyersolaj finomítóba szállítása további 8%-kal, illetve 7%-kal járul hozzá a termékekhez. Az atmoszférikus és vákuumdesztilláció az útépitési bitumen GWP100-jának 14%-át, az oxidált bitumen 11%-át teszi ki. Végül a tárolás körülbelül 6%-ot tesz ki.

A metán (CH_4) kibocsátása a bitumen ÜHG-kibocsátásának 46%-át, míg a CO_2 -kibocsátás 54%-át teszi ki (lásd a 4. ábrát). A metánkibocsátást főként a nyersolaj-kitermelés (szellőztetés, fáklyázás és diffúz hulladék) hozzájárulása magyarázza.

A nitrogén-oxid (N_2O) és más ÜHG-kibocsátások elhanyagolhatók.

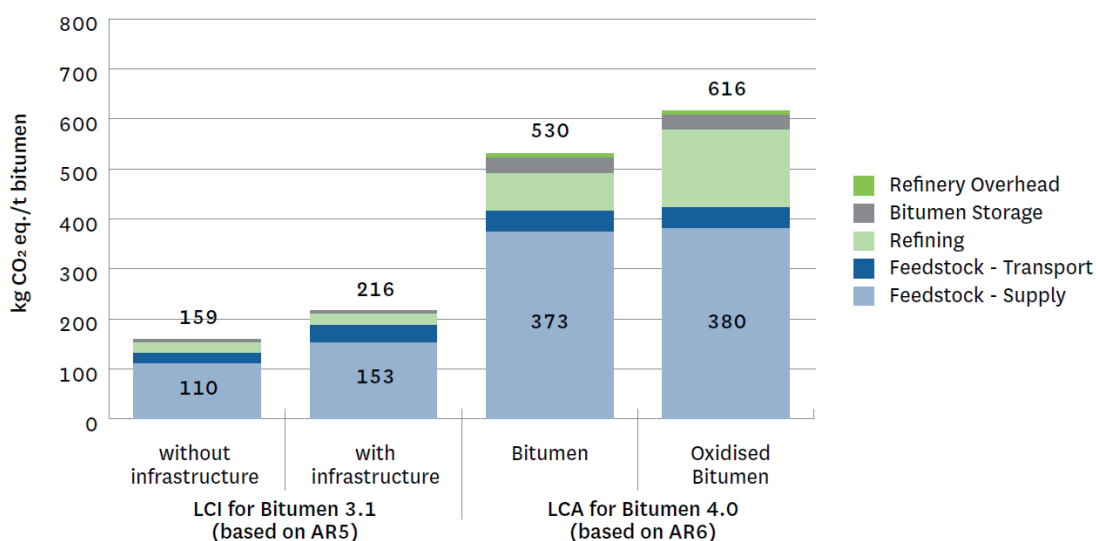


4. ábra. A bitumen GWP100-hoz tartozó egyedi ÜHG-k

Összehasonlítás az előző tanulmánnyal

Az LCI 3.1 (2022) és az LCA 4.0 (2025) GWP100 mutatójának összehasonlítását az 5. ábra mutatja. Az LCA 4.0-ban a

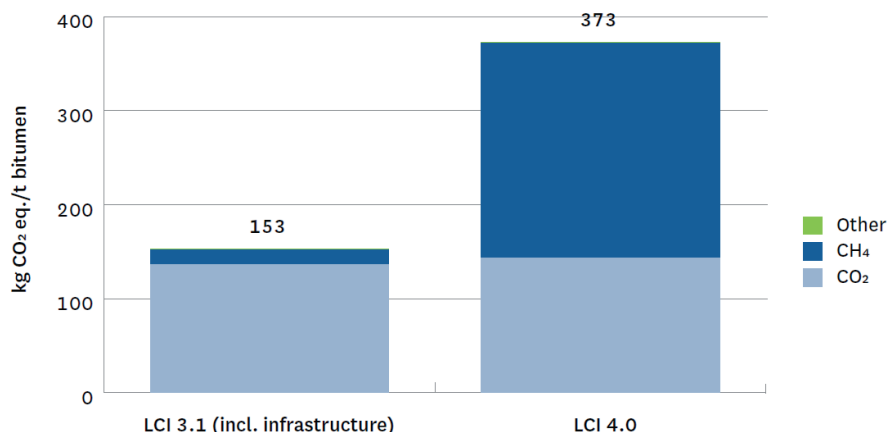
bitumen GWP100 értéke 145%-kal magasabb, mint az LCI 3.1-ben szereplő infrastruktúrával számított referenciaérték.



5. ábra. Az Eurobitume LCI 3.1 és az LCA 4.0 GWP100 összehasonlítása

Az eltérést magyarázó első tényező a nyersolajtermelés modellezésére használt módszer, amely a bitumen környezeti hatásainak nagy részét teszi ki (lásd a 6. ábrát). A nyersolajra vonatkozó környezeti adatokat most a Sphera MLC

(Managed LCA Content) adatbázisából [3] vettük, a származási ország szerinti átlagos nyersolajokon alapulva, míg az LCI 3.1 az IOGP adatbázison [6] alapult, amely a régióként vagy kontinensenként átlagolt nyersolajokra vonatkozik.



6. ábra. Az egyes ÜHG-k összehasonlítása az LCI 3.1 és az LCA 4.0 között

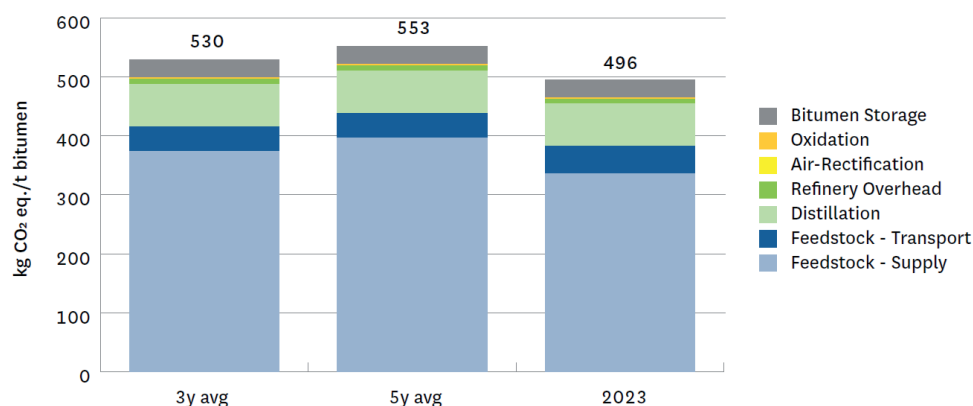
A nyersolaj-modellezés minőségét két tényező javította:

- a nyersolaj földrajzi eredet szerinti hatásának átlagolására használt részletesebb módszer;
- a nyersolajtermeléshez kapcsolódó szellőztetés, fáklyázás és diffúz kibocsátások figyelembevételére használt módszer. A Sphera MLC adatbázisban ezen kibocsátások értékeléséhez a Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) által kifejlesztett Global Methane Tracker [4] szolgál referenciaként. Az ezekkel a folyamatokkal kapcsolatos kibocsátások változékonysága országoként igen jelentős lehet.

A második tényező, amely jelentősen befolyásolja az eredményeket, az átlagos nyersolaj-keverék. Az LCA 4.0-ban ezt a származási országokénti nyersolaj-ellátási ada-

tok alapján számítják ki, amelyeket minden finomítóra gyűjtöttek és súlyoztak. Mivel a nyersolajat importáló országok aránya idővel változhat, az alapanyag-ellátási keverék referencia-forgatókönyvként egy hároméves átlagot (2021-2023) használtak.

A nyersolaj-keverék hatása nem hasonlítható össze közvetlenül az LCI 3.1 és az LCA 4.0 között, mivel a számításokhoz használt nyersolaj-adatbázis a két tanulmányban eltérő. Azonban az alapanyag-ellátás átlagos összetételében bekövetkező lehetséges változások hatásának jobb megértése érdekében érzékenységi elemzést végeztek. A referencia-alapanyag-ellátás hároméves átlagát összehasonlították (a) a 2019-2023-as ötéves átlaggal és (b) a 2023-as átlagos keverékkel (lásd az 1. ábrát). Az eredményeket a 7. ábra mutatja.



7. ábra. Az időátlagolás hatása a GWP100 mutatóra

Az időbeli átlag jelentős hatással van a GWP100 mutatóra, főként a volt Szovjetunióból (FSU) származó nyersolaj 2022-től kezdődő más régiókból származó nyersolajjal való helyettesítése miatt. A volt Szovjetunióból származó nyersolaj szénlábnyma nem különösebben magas (a spektrum közepén helyezkedik el), de többnyire alacsonyabb széndioxid-intenzitású nyersolajok váltják fel.

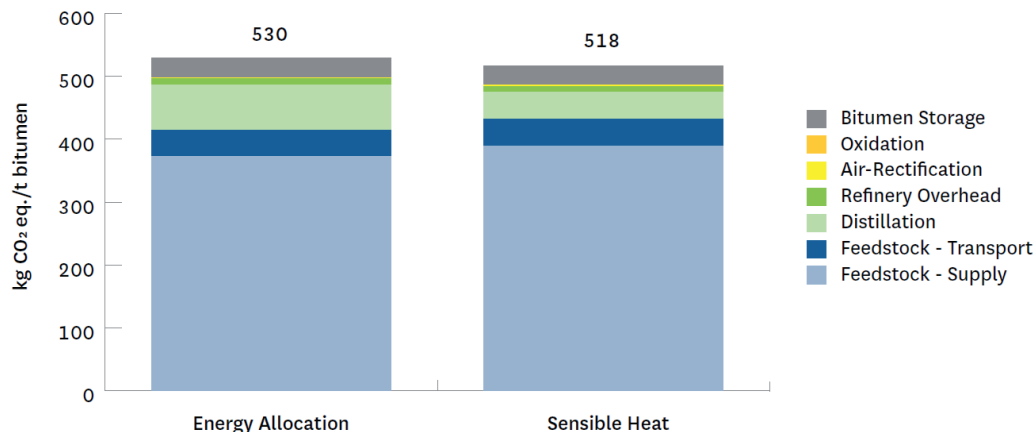
Az ötéves átlag csak nagyon részben reprezentatív az elmúlt néhány évre, amikor a volt Szovjetunióból származó nyersolajat már nem használják az átlagos keverékben. A 2023-as átlagos keverék esetleg nem veszi kellőképpen figyelembe a hosszú távú változásokat. Ennek eredményeként a hároméves átlagot jó egyensúlynak tekintették, és referencia-forgatókönyvként fogadták el.

Végül a harmadik fő tényező az LCA 4.0-ban a desztillációs folyamatok modellezésének változása az LCI 3.1-hez képest:

- Az LCA 4.0 referencia-forráskönyv a multifunkcionalitás kérdését a 17 finomítóra vonatkozóan gyűjtött elsődleges adatok alapján alkalmazott energiaeosztási módszer alkalmazásával kezeli;
- Az LCI 3.1 az érzékelhető hő módszerét alkalmazta: ez a

megközelítés feltételezi, hogy a nyersolaj bitumennek megfelelő frakciója folyékony fázisban marad, és nem változtatja meg a halmazállapotát. Ezért egy egyszerűsített termodinamikai megközelítésen alapul, amely a bitumen előállításához szükséges energiát a hőkapacitása alapján becsüli meg.

Az érzékenységvizsgálat eredményeit a 8. ábra mutatja.



8. ábra. Érzékenységi elemzés a GWP100-on, amikor a multifunkcionalitási megközelítés változik

A finomítóban alkalmazott allokációs módszernek nagyon korlátozott hatása van a bitumen GWP100 értékére: az érzékelhető hő módszer esetében 2%-os csökkenés tapasztalható az energiaeosztáson alapuló referencia-forráskönyvhöz képest. A desztillációs szakasz esetében azonban önmagában a különbség körülbelül -40%-ot je-

lent. Az LCA 4.0-ban az energiaeosztási módszert választottuk, mivel a különböző finomítási folyamatokhoz rendelkezésre állnak elsődleges adatok. A termodinamikai módszer robusztusságát nem kérdőjelezzük meg, de a jövőbeli tanulmányokban részletesebben is értékelhető.

Következtetés és kitekintés

A bitumen 4.0 életciklus-elemzésének eredményei új referenciaadatokat jelentenek Európában. Importálhatók LCA vagy öko-összehasonlító szoftverbe a bitumen alapú útinfrastruktúrák környezeti lábnyomának felmérésére és összehasonlítására.

A szakirodalomban elérhető egyéb adatokkal összehasonlítva az az előnyük, hogy a bitumengyártó finomítóktól gyűjtött reprezentatív elsődleges adatokon alapulnak.

A teljes tanulmányjelentés, beleértve az összes feltételezést és eredményt, nyilvánosan elérhető. (<https://eurobitume.eu>, and very specifically EB-LCA-4.0-2025.pdf) Kiegészül az érdekelt felek által általánosan használt éghajlatváltozási mutató összefoglalásával, valamint az előző tanulmánnyal való összehasonlító elemzéssel. A bitumen LCA 4.0 alapján az Eurobitume jelenleg a polimerrel módosított bitumenek (PMB) életciklus-értékelésén dolgozik.

Hivatkozások

- [1] Eurobitume, „Az Eurobitume életciklus-értékelése 4.0 bitumenhez”, ISBN: 978-2-39068-070-3
- [2] CEN, „EN 15804:2012+A2:2019 Építési munkák fenntarthatósága - Környezetvédelmi terméknnyilatkozatok - Az építési termékek termékkategóriájára vonatkozó alapvető szabályok”, 2019
- [3] Sphera, „Sphera Solutions Inc.: Életciklus-értékelési adatkészletek keresése - Életciklus-értékelési adatkészletek”, <https://lccadatabase.sphera.com/>
- [4] IEA (Nemzetközi Energiaügynökség), „Globális metánkövető - Dokumentáció 2022-es verzió”, <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022>, <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022>
- [5] IPCC, „Hatodik értékelő jelentés”. [Online]. Elérhető: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
- [6] IOGP (Nemzetközi Olaj- és Gáztermelők Szövetsége), „Környezetvédelmi teljesítménymutatók – 2019-es adatok”, 2020

A cikkben használt rövidítések

LCA – Életciklus-értékelés

LCI – Életciklus-leltár

EPD – Környezetvédelmi terméknnyilatkozat

MLC – Kezelt LCA tartalom

VFF – Szellőztetés, fűtélzás és diffúzió kibocsátások

GWP – Globális felmelegedési potenciál

GWP100 – A GWP 100 évre vonatkozó értéke

JRC – Közös Kutatóközpont

IOGP – Nemzetközi Olaj- és Gázipari Termékek Szövetsége

IPCC – Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (ez az Egyesült Nemzetek Szervezetének szervezete)

IEA – Nemzetközi Energia Ügynökség

FSU – Volt Szovjetunió

Autópályák hálózati szintű teherbíróképeség-értékelése Curviameter és FWD mérések alapján

dr. Tóth Csaba

docens
Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem,
Építőmérnöki Kar,
Út és Vasútépítési Tanszék



dr. Primusz Péter

docens
Soproni Egyetem,
Erdőmérnöki Kar,
Geomatikai és Kultúrmérnöki
Intézet

1. Bevezetés

A pályaszerkezet teherbíróképeségének roncsolásmentes vizsgálata a hazai útdiagnosztika egyik alapvető területe. A felszíni burkolatállapot önmagában nem mindig mutatja meg a szerkezet tényleges tartalékait: jó felület alatt is lehet a teherbírás elégtelen, míg látható hibák mögött nem feltétlenül áll szerkezeti probléma. Ezért különösen fontosak azok a mérési módszerek, amelyek a pályaszerkezet terhelés alatti behajlásából következtetnek annak állapotára.

A hazai helyszíni behajlásmérés kidolgozása az 1950-es évekre nyúlik vissza. A klasszikus billenőkaros eljárásban a terhelt tehergépkocsi ikerabroncsai alatt kialakuló rugalmas behajlást mérték; az alapelv szerint minél nagyobb a behajlás adott terhelés mellett, annál kisebb a pályaszerkezet teherbírása. Az 1961-es szabványosítás — Boromisza Tibor és Gáspár László munkásságához kapcsolódva — a módszert a magyar útdiagnosztika meghatározó eszközévé tette. A közel hatvan hazai mérőkészülék alkalmazásával gyakorlatilag lehetővé vált a teljes állami úthálózat teherbíró képességének a felmérése, az évszakos korrekciók pedig a tavaszi, kritikus állapot becslését is támogatták.

A mérési technika később tovább fejlődött: a Benkelmantartó szerepét előbb a Lacroix deflektográfok, majd a magyar gyakorlatban meghatározóvá váló KUAB FWD-

berendezések vették át. Az FWD (Falling Weight Deflectometer)) szabályozott, impulzusszerű terheléssel dolgozik, és több érzékelővel rögzíti a behajlási teknőt. Ez nemcsak a központi behajlás, hanem a teknőalak értékelését is lehetővé teszi. A KUAB FWD jelentősége ma is kiemelt, mivel a mértékadó behajlás és a hátralévő élettartam értelmezése ehhez a mérési módszerhez kapcsolódik (e-ÚT 09.02.34).

Az elmúlt években a Curviameter megjelenése új lehetőséget teremtett a hálózati szintű állapotértékelésben. A berendezés nem álló, pontszerű mérési rendszerben dolgozik, hanem haladás közben, nagy mérési sűrűséggel rögzíti a pályaszerkezet behajlási válaszát. Ez különösen értékes a pályagazdálkodás számára, mert hosszabb szakaszok szerkezeti változékonyságáról, a gyengébb zónák helyéről és a beavatkozási igények térbeli eloszlásáról ad képet.

A Curviameter adatai ugyanakkor nem tekinthetők a FWD mérési eredményekkel közvetlenül megfeleltethetőnek. Míg az FWD álló helyzetben, impulzusszerű terheléssel vizsgálja a pályaszerkezetet, addig a Curviameter mozgó járműterhelés alatt méri annak időfüggő válaszát. Ezért a cél nem az, hogy a Curviameter „FWD-ként viselkedjen”, hanem az, hogy saját mérési sajátosságait figyelembe véve illeszkedjen a hazai teherbírási értékelés rendszeréhez.

Jelen cikk azt mutatja be, hogyan használhatók fel a Curviameter nagy felbontású mérései az autópálya-hálózat teherbírási értékelésében, a gyenge szakaszok kijelölésében és a pályagazdálkodási döntések előkészítésében. Ebben a

megközelítésben a Curviameter elsősorban hálózati szintű szűrő- és rangsoroló eszköz, míg az FWD a részletes szerkezeti értelmezés, a kalibráció és a projektszintű diagnosztika alapja marad.

1.2. Kutatási célkitűzés

A kutatás célja olyan, az MKIF Zrt. igényeihez illeszkedő eljárás kidolgozása, amely a Curviameter dinamikus behajlásméréseire támaszkodva hálózati szinten becsüli a pályaszerkezet teherbírását és hátralévő élettartamát. Az eljárás a dinamikus behajlási teknőből levezetett indexeken alapul, és összhangban áll az e-ÚT 09.02.34 (KUAB) osztályozási rendszerével. A módszer lehetővé teszi az élettartam meghatározását az e-ÚT teherbírási osztályzat szerint, valamint

a pályagazdálkodási rendszer (PMS) számára releváns kiegészítő indikátorok előállítását.

A módszer indokoltságát az adja, hogy kiváltja a statikus behajlásra épülő, elavult átszámítási gyakorlatot, és egy korszerű, közvetlenül dinamikus mérési adatokon alapuló megközelítést vezet be a koncessziós követelmények teljesítésének támogatására.

2. Módszertani alapok

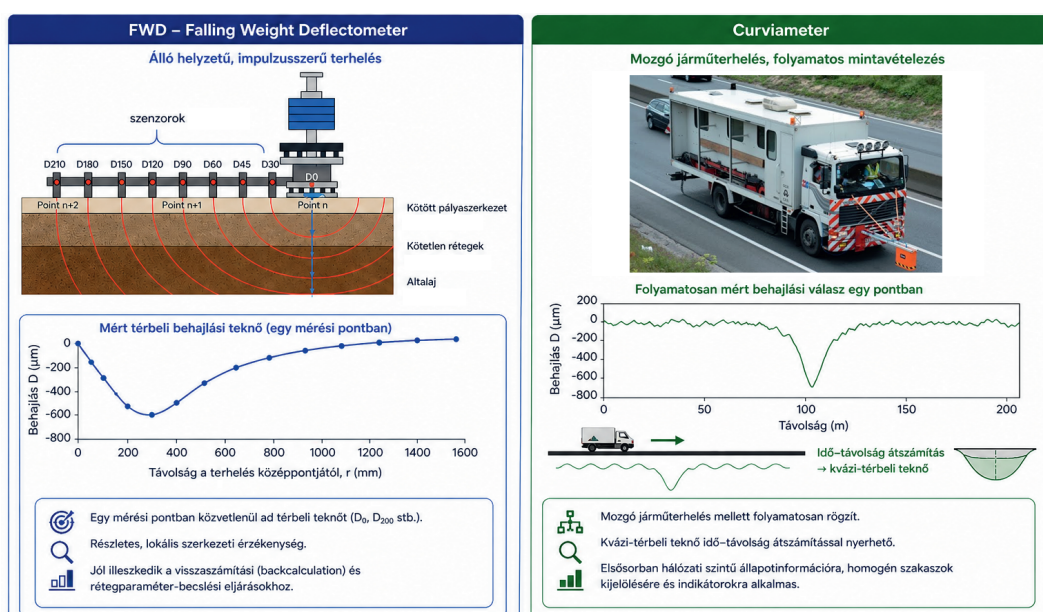
2.1. Az FWD és a Curviameter közötti elvi különbségek

Az FWD és a Curviameter ugyanazt a fizikai jelenséget – a pályaszerkezet terhelés alatti függőleges deformációját – méri, de különböző terhelési és mintavételezési geometriával (1. ábra). Emiatt a mért behajlási teknő nem azonos mennyiséget jelent:

- Az FWD álló helyzetben, impulzusszerű terheléssel és több, fix elrendezésű érzékelővel egy mérési pontban közvetlenül ad egy térbeli teknőt (D_0 , D_{200} stb.). Ez részletes, lokális szerkezeti érzékenységet biztosít, és jól illeszkedik a klasszikus visszaszámítási (backcalculation) és rétegparaméter-becslési eljárásokhoz.
- A Curviameter mozgó járműterhelés mellett folyamatosan rögzíti a behajlási választ (tipikusan egy pontban / vonal menti elrendezésben), amelyből kvázi-térbeli

teknő következtethető (idő-távolság átszámítással). Ez elsősorban hálózati szintű állapotinformációra, homogén szakaszok kijelölésére és indikátorokra alkalmas.

A szakirodalom egyértelműen hangsúlyozza, hogy a terhelés időbeli lefolyása, gyakorisága, a haladási sebesség, illetve a bitumenes rétegek viszkoelasztikus, hőmérséklet- és frekvenciafüggő tulajdonságai miatt jelentős különbségek és eltérő teknőalakok fordulhatnak elő az egyes mérési eszközök eredményeiben. Ezért közvetlen átszámítás helyett eszköz-specifikus korrekciók, indikátor-alapú összevetés (pl. görbületi/teknőparaméterek), illetve közös kalibrációs kampány (azonos szakaszon, kontrollált hőmérséklet/szabványos terhelési szintek mellett) javasolt.



1. ábra. FWD vs. Curviameter – ugyanazt a jelenséget mérik, más geometriával

Az e-ÚT 09.02.34 (KUAB) rendszer nem mérőeszközt, hanem döntési kategóriákat szabványosít. Ennek megfelelően a Curviameter akkor illeszthető szabályosan az itthon megszokott „KUAB-logikába”, ha nem FWD-értékeket utánoz, hanem olyan strukturális indikátorokat szolgáltat,

amelyek azonos szerkezeti állapotot azonos KUAB-kategóriába sorolnak. Ez a megközelítés megfelel a korszerű, koncessziós környezetben elvárt hálózati gondolkodásnak, és szakmailag védhető alternatívát kínál az elavult statikus vagy egyszerűsített átszámítási gyakorlat kiváltására.

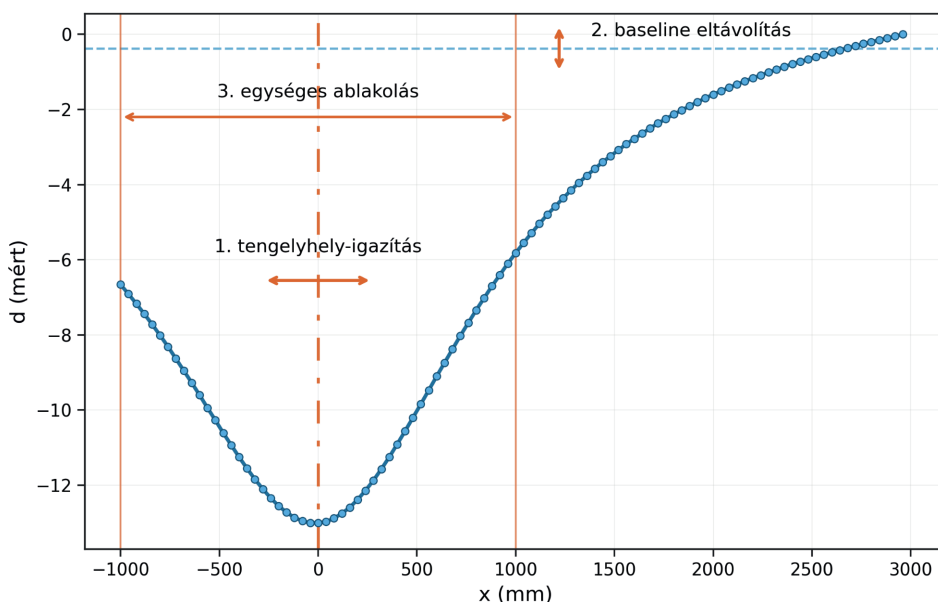
2.2. Curviameter-teknő előfeldolgozása

A Curviameter által mért behajlási jel időfüggvényként keletkezik, amelyet a jármű sebessége alapján térbeli koordinátára transzformálunk. A további feldolgozás minden mérésnél az alábbi kötelező lépésekkel történik (2. ábra):

Tengelyhely-igazítás: A teknő maximumának környezetében (± 200 mm) meghatározzuk a csúcspontot, és ezt tekintjük a relatív térbeli referencia-helyzetnek.

Egységes ablakolás: A feldolgozás az $x \in [-1000 \text{ mm}, +1000 \text{ mm}]$ tartományra korlátozódik. Ez az ablak elegendő a szerkezeti válasz jellemzésére, ugyanakkor kizárja a hosszú viskoelasztikus „utófarok” torzító hatását.

Baseline eltávolítás: A távoli zónákban ($|x| > 900$ mm) mért átlagos behajlást levonjuk a teljes görbéből. Ennek célja, hogy a teknő szélein a behajlás nullához tartson, és az integrál-alapú paraméterek kizárólag a szerkezeti válaszra legyenek érzékenyek.



2. ábra. Jellemző Curviameter behajlási teknő az előfeldolgozási lépésekkel

2.3. A CMI (Curviameter Mechanical Index) kidolgozása

A Curviameter által mért behajlási görbe nemcsak a maximális behajlás értékét tartalmazza, hanem a mozgó terhelésre adott teljes szerkezeti választ is. A teknő alakja, aszimmetriája és lecsengése arra utal, hogy a pályaszerkezet milyen mereven, milyen időbeli késéssel és milyen energianyelődő viselkedéssel reagál a terhelésre. Ezért a Curviameter-adatok értékelésénél nem célszerű kizárólag egyetlen behajlási értéket figyelembe venni.

E szempont alapján vezettük be a Curviameter Mechanical Index, röviden CMI mutatót. A CMI a maximális behaj-

lást, a teknő terhelés előtti és terhelés utáni szakaszának arányát, valamint a behajlási válasz lecsengési hosszát egy-egy összetett állapotmutatóban. Célja, hogy a Curviameter nagy mérési sűrűségű adataiból hálózati szinten értelmezhető szerkezeti információt adjon.

A fenti szempontokat figyelembe véve a szerzők az alábbi összefüggéssel vizsgálták a Curviameter teknőalakját és alkották meg az úgynevezett CMI paramétert (Curviameter Mechanical Index):

$$\text{CMI} = \left(\frac{P/P_{ref}}{D_0/D_{ref}} \right) \cdot \text{ER} \cdot \left(1 + \ln \frac{TL_{10}}{1000} \right)$$

ahol P az adott kerékre vagy ikerpárra jutó terhelés, D_0 a Curviameter-mérésből meghatározott maximális behajlás, ER a teknő terhelés utáni és terhelés előtti területének aránya, TL_{10} pedig az a pozitív irányú távolság, ahol a behajlás

jel a maximális érték 10%-ára csökken. A P_{ref} , D_{ref} és L_{ref} referenciaértékek a különböző mérések összehasonlíthatóságát és a dimenziótlanított értelmezést szolgálják. Az energiaarány az alábbi formában írható fel:

$$ER = \frac{\int_0^X w(\xi) d\xi}{\int_{-X}^0 w(\xi) d\xi}$$

ahol $d(\xi)$ a mért behajlási görbe, $w(\xi) = |d(\xi)|$ pedig annak pozitív értéként kezelt alakja. A számláló a terhelés elhaladása után mérhető görbeszakasz területét, a nevező a terhelés érkezése előtti görbeszakasz területét adja meg. Az ER így a teknő aszimmetriáját jellemzi: $ER \approx 1$ közel szimmetrikus választ, $ER > 1$ pedig elnyújtottabb, késleltetett visszaalakulást jelez a terhelés elhaladása után.

A CMI egyes tagjai eltérő fizikai tartalmat hordoznak. A P/D_0 jellegű tag a pályaszerkezet terhelésre adott elsőleges merevségi választ jellemzi: azonos terhelés mellett kisebb behajlás kedvezőbb szerkezeti állapotra utal. Az ER a teknő aszimmetriáját írja le, vagyis azt, hogy a terhelés elhaladása után a szerkezet milyen mértékben és milyen késéssel tér vissza eredeti állapotába. A TL_{10} a behajlási válasz lecsengési hosszát adja meg, tehát azt a távolságot, amelyen belül a mozgó terhelés hatása még érzékelhető marad.

Egyszerűbben megfogalmazva: a CMI azt fejezi ki, hogy a pályaszerkezet mennyire mereven, mennyire kiegyensúlyozott teknőalakokkal és milyen mértékű késleltetett vissza-

alakulással reagál a mozgó terhelésre. Ezért a CMI nem egyszerű behajlási érték, hanem a Curviameter-mérés sajátosságaihoz illeszkedő dinamikus állapotmutató.

Fontos hangsúlyozni, hogy a CMI nem FWD-paraméter, és nem tekinthető közvetlen FWD-helyettesítőnek. Elsődleges szerepe a hálózati szintű rangsorolás: segítségével kijelölhetők azok a szakaszok, amelyek szerkezeti szempontból kedvezőtlenebb állapotot mutatnak, ezért részletesebb vizsgálatot vagy célzott FWD-mérést igényelnek. Években kifejezett hátralévő élettartam csak akkor rendelhető a CMI-hez, ha rendelkezésre áll megfelelő FWD-kalibráció, rétegvastagsági információ és mechanisztikus értelmezési háttér.

Ennek megfelelően a Curviameter és az FWD szerepe nem egymást kizáró, hanem egymást kiegészítő. A Curviameter a hálózati szintű szűrést, a gyenge szakaszok azonosítását és a beavatkozási prioritások kijelölését támogatja. Az FWD ezzel szemben a részletes szerkezeti értelmezés, a visszaszámítás és az élettartam-kalibráció alapját adja.

3. Hálózati szintű alkalmazás (felhasználói modul)

A Curviameter-mérések legfontosabb gyakorlati előnye a nagy mérési sűrűség és a hálózati szintű alkalmazhatóság. A berendezés nem csupán diszkrét mérési pontokról szolgáltat információt, hanem folytonosabb képet ad a pályaszerkezet behajlási válaszában térbeli változásáról. Ez különösen értékes a pályagazdálkodási rendszer számára, mert lehetővé teszi a gyengébb szerkezeti állapotú szakaszok gyors kijelölését, a beavatkozási prioritások meghatározását és a célzottabb FWD-mérések tervezését.

A felhasználói modul célja nem az, hogy a Curviameter-adatokból közvetlenül rétegmódusokat vagy években kifejezett hátralévő élettartamot határozzon meg. Ezekhez részletesebb szerkezeti információkra, rétegvastagsági adatokra és FWD-alapú kalibrációra van szükség. A modul elsődleges feladata ezzel szemben az, hogy a Curviameter-mérésekből származó CMI értékek alapján áttekinthető, térképezhető és rangsorolható szerkezeti állapotképet adjon.

3.1. CMI-alapú hálózati rangsorolás

A CMI felszíni behajlási válaszból származtatott összetett állapotmutató. Nem tartalmaz közvetlen rétegmódus-, feszültség- vagy alakváltozási információt, ezért elsőlegesen relatív hálózati rangsorolásra alkalmas. Ez azt jelenti, hogy segítségével meghatározható, mely útszakaszok mutatnak kedvezőbb vagy kedvezőtlenebb szerkezeti viselkedést a vizsgált hálózaton belül.

A CMI értékek alapján az egyes szakaszok kategóriákba sorolhatók (1. táblázat 1-3 oszlop). Ezek a kategóriák nem közvetlenül FWD-osztályokat vagy hátralévő élettartam-éveket jelentenek, hanem a további vizsgálatok és beavatko-

zások prioritását mutatják. A kedvezőtlenebb CMI-tartományba eső szakaszokon indokolt lehet célzott FWD-mérést, részletes szerkezeti diagnosztikát vagy megerősítési igényvizsgálatot végezni.

A kategóriák határértékei a vizsgált hálózat mérési eloszlása, a korábbi állapotadatok és a rendelkezésre álló FWD-kalibráció alapján határozhatók meg (1. táblázat 4-5 oszlop). Amíg ilyen kalibráció nem áll rendelkezésre, a CMI-kategóriák elsősorban relatív hálózati összehasonlításra és szűrésre használhatók.

Teherbírási osztály	CMI tartomány	Javasolt intézkedés	FWD osztály megfeleltetés	Hátralévő élettartam, év
5 (nagyon gyenge)	$CMI < T_1$	Azonnali beavatkozás / korlátozás	FWD osztály 5	≤ 1
4 (gyenge)	$T_1 \leq CMI < T_2$	Tervezett megerősítés	FWD osztály 4	1–4,9
3 (közepes)	$T_2 \leq CMI < T_3$	Monitor + célzott javítás	FWD osztály 3	5–9,9
2 (jó)	$T_3 \leq CMI < T_4$	Fenntartás	FWD osztály 2	10–14,9
1 (nagyon jó)	$CMI \geq T_4$	Nincs teherbírási kockázat	FWD osztály 1	≥ 15
BEAVATKOZÁSOK PRIORITÁSA PMS SZÁMÁRA			!!! CSAK KALIBRÁCIÓVAL !!!	

2. ábra. Jellegzetes Curviameter behajlási teknő az előfeldolgozási lépésekkel

3.2. A felhasználói modul kimenetei

A felhasználói modul gyakorlati értéke abban áll, hogy a nagy mennyiségű Curviameter-mérési adatot döntéstámogatásra alkalmas formába rendezi. A nyers mérési pontok helyett a felhasználó olyan eredményeket kap, amelyek közvetlenül beilleszthetők a pályagazdálkodási munkafolyamatba.

A modul legfontosabb kimenete a CMI-alapú hálózati állapotkép. Ez térképes formában megmutatja, hol találhatók a szerkezeti szempontból kedvezőtlenebb szakaszok, és mely hálózati elemek tekinthetők kedvezőbb állapotúnak. A térképes megjelenítés mellett szakaszalapú eredmények is előállíthatók, amelyek homogén vagy közel homogén szerkezeti viselkedésű útrészeket jelölnek ki.

A másik fontos kimenet a beavatkozási és vizsgálati prio-

ritási lista. Ez nem végleges felújítási döntést jelent, hanem azt mutatja meg, hol indokolt további vizsgálatot végezni. A Curviameter így nem kiváltja, hanem célzottabbá teszi az FWD-mérések alkalmazását: az FWD ott vethető be, ahol a hálózati szűrés alapján valóban szükség van részletesebb szerkezeti értelmezésre.

A modul ismételt mérések esetén az időbeli változások követésére is alkalmas. Az azonos vagy hasonló mérési feladatok mellett végzett Curviameter-kampányok összehasonlításával azonosíthatók azok a szakaszok, ahol a szerkezeti válasz romlása gyorsabb az átlagosnál. Ez a PMS számára különösen fontos, mert nemcsak az aktuális állapotot, hanem az állapotváltozás ütemét is figyelembe lehet venni.

3.3. Kapcsolat az FWD-alapú értékeléssel

A CMI-alapú hálózati értékelés önmagában nem helyettesíti az FWD-alapú szerkezeti diagnosztikát. Az FWD továbbra is nélkülözhetetlen eszköz a részletesebb mechanisztikus értelmezéshez, a rétegmodulusok visszszámításához és az aszfalt alsó szálában ébredő húzóalakváltozás becsléséhez. A két mérési rendszer szerepe ezért nem azonos, hanem egymást kiegészítő.

A Curviameter nagy mérési sűrűsége alapján kijelölhetők azok a szakaszok, ahol a részletes FWD-vizsgálat indokolt. Az FWD-mérések eredményei ezt követően felhasználhatók a CMI-kategóriák kalibrálására, valamint arra, hogy a relatív hálózati rangsorolásból teherbírási osztály vagy be-

csült hátralévő élettartam legyen levezethető. Ez a lépés azonban már nem a felhasználói modul önálló eredménye, hanem a szakértői, mechanisztikus kalibráció része.

Ennek megfelelően a CMI-alapú felhasználói modul elsődleges feladata a hálózati szűrés és döntés-előkészítés. Megmutatja, hol vannak a szerkezeti szempontból kedvezőtlenebb szakaszok, hol indokolt célzott FWD-mérés, és mely hálózati elemek sorolhatók magasabb beavatkozási prioritásba. Az években kifejezett hátralévő élettartam és az e-ÚT 09.02.34 szerinti teherbírási osztályozás csak FWD-kalibrációval, rétegvastagsági információval és mechanisztikus értelmezéssel együtt adható meg megbízhatóan.

4. Mechanisztikus kalibráció (szakértői modul)

A hálózati szintű Curviameter-értékelés elsődleges feladata a szakaszok rangsorolása és a szerkezetileg kedvezőtlenebb útrészek kijelölése. Ahhoz azonban, hogy a CMI-alapú minősítés ne csak relatív állapotképet adjon, hanem teherbírási osztályhoz vagy becsült hátralévő élettartamhoz is kapcsolható legyen, mechanisztikus kalibrációra van szükség. Ezt a feladatot a szakértői modul látja el.

A szakértői modul célja, hogy kapcsolatot teremtsen a Curviameterrel mért dinamikus behajlási válasz, az FWD-mérésekből származtatott szerkezeti paraméterek és a pályaszerkezet fáradási viselkedése között. Ebben a megközelítésben a Curviameter a nagy felbontású hálózati adatforrást, az FWD pedig a részletes szerkezeti értelmezéshez szükséges kalibrációs alapot biztosítja.

4.1. FWD–Curviameter kalibráció

A CMI a pályaszerkezet felszíni behajlási válaszából származtatott összetett állapotmutató. Önmagában nem tartalmaz közvetlen információt a rétegmódulusokról, a rétegvastagságokról vagy az aszfalt alsó szálában ébredő húzóalakváltozásról. Ezek meghatározásához FWD-mérésekre, rétegvastagsági adatokra és mechanisztikus számítási modellre van szükség.

Az FWD-mérés szerepe ebben a rendszerben nem a Curviameter helyettesítése, hanem annak kalibrálása. Az FWD álló helyzetben, ismert terhelési feltételek mellett rögzíti a behajlási teknőt, amelyből rétegvastagsági információk felhasználásával visszaszámíthatók a pályaszerkezet jellemző rétegmódulusai. Ezek alapján mechanisztikus modellben becsülhető az aszfalt alsó szálában ébredő húzóalakváltozás, amely a fáradási károsodás egyik meghatározó jellemzője.

A kalibráció gyakorlati lépései a következők (3. ábra). Először olyan referencia-szakaszokat kell kijelölni, amelyek lefedik a hálózaton előforduló különböző szerkezeti állapotokat és CMI-tartományokat. Ezek a szakaszokon azonos vagy közel azonos helyen Curviameter- és FWD-méréseket kell végezni. A Curviameter-mérésekből CMI értékek, az FWD-mérésekből pedig behajlási teknők és visszaszámított szerkezeti paraméterek állíthatók elő. A két adatforrás összevetésével meghatározható, hogy az egyes CMI-tartományok milyen FWD-alapú szerkezeti állapotnak felelnek meg.

A kalibráció során különösen fontos a mérési körülmények dokumentálása. A pályaszerkezet behajlási választ a hőmérséklet, a nedvességi állapot, a terhelési szint és a ré-

tegvastagság is befolyásolja. Ezért a CMI és az FWD-alapú paraméterek közötti kapcsolat csak akkor értelmezhető megbízhatóan, ha ezek a tényezők ismert módon szerepelnek az értékelésben.



3. ábra. A validáció folyamatának főbb lépései lépésekkel

4.2. Kapcsolat az aszfalt alsó szálában ébredő húzóalakváltozással

A pályaszerkezet fáradási viselkedésének egyik legfontosabb mechanisztikus jellemzője az aszfalt alsó szálában ébredő húzóalakváltozás, amelyet általában ϵ_t -vel jelölünk. Minél nagyobb ez az alakváltozás az ismétlődő forgalmi terhelések hatására, annál gyorsabban halmozódik a fáradási károsodás.

A Curviameter közvetlenül nem méri ezt az alakválto-

zást. A CMI azonban a felszíni behajlási válaszon keresztül kapcsolatban áll a pályaszerkezet merevségi és deformációs viselkedésével, ezért megfelelő kalibráció után felhasználható a becslésére. Ez nem közvetlen fizikai mérés, hanem kalibrált mechanisztikus-empirikus kapcsolat. A kapcsolat általános formában így írható le:

$$\epsilon_t = F(CMI, h_{aszfalt}, E_i, T, M)$$

ahol $h_{aszfalt}$ az aszfaltreteg vastagságát, E_i a pályaszerkezet jellemző rétegmódulusait, T a hőmérsékleti állapotot,

M pedig a nedvességi vagy környezeti állapotot jelöli. A képlet azt fejezi ki, hogy a CMI önmagában nem elegendő

az alakváltozás pontos meghatározásához: a vastagsági, anyagtani és környezeti információk szerepe nem hagyható figyelmen kívül.

Egyszerűbb, előzetes hálózati becslésként elképzelhető olyan empirikus kapcsolat, amelyben a nagyobb CMI ked-

vezőbb szerkezeti állapotot, kisebb húzóalakváltozást és hosszabb fáradási élettartamot jelez. Az ilyen kapcsolat azonban csak a kalibrációs tartományon belül alkalmazható, és nem tekinthető általános érvényű összefüggésnek.

4.3. Hátralévő élettartam becslése

A mechanisztikus kalibráció végső célja, hogy a CMI-alapú hálózati állapotértékeléshez élettartam-értelmezés is kapcsolható legyen. Ehhez először meg kell határozni az adott pályaszerkezet várható fáradási kapacitását, majd ezt össze kell vetni a már lefutott és a jövőben várható forgalmi terheléssel.

$$N_f = F(\varepsilon_t, E_{aszfalt})$$

ahol N_f a fáradási kapacitás, ε_t az aszfalt alsó szálában ébredő húzóalakváltozás, $E_{aszfalt}$ pedig az aszfaltreteg jellemző merevsége. A hátralévő élettartam számításához a teljes fáradási kapacitásból le kell vonni a már lefutott forgalmi ter-

A fáradási kapacitás becslése általában valamely nemzetközileg elfogadott fáradási összefüggéssel történik, amely az aszfalt alsó szálában ébredő húzóalakváltozás és az aszfalt merevsége alapján adja meg a tönkremenetelig elviselhető ismételt terhelésszámot. Általános alakban:

helést. Az így kapott hátralévő terhelhetőség az éves várható forgalmi terheléssel osztva adja az években kifejezett becsült hátralévő élettartamot:

$$RL = \frac{N_f - N_{le}}{N_{év}}$$

ahol RL a hátralévő élettartam években, N_f a becsült fáradási kapacitás, N_{le} a már lefutott forgalmi terhelés $N_{év}$ pedig a várható éves terhelés.

Ez az értelmezés biztosítja, hogy a Curviameter-mérésből származó hálózati állapotkép ne önmagában, hanem mechanisztikusan értelmezhető, auditálható keretben jelenjen

meg. Fontos azonban hangsúlyozni, hogy az élettartambecslés megbízhatósága közvetlenül függ a kalibráció minőségétől, a rétegvastagsági adatok pontosságától, az FWD-mérések reprezentativitásától és a forgalmi terhelés becslésétől.

4.4. A szakértői modul szerepe a pályagazdálkodásban

A szakértői modul nem a mindennapi hálózati szűrés eszköze, hanem annak szakmai háttérét biztosítja. Feladata, hogy a Curviameterrel mért CMI-kategóriákhoz FWD-alapú szerkezeti értelmezést, szükség esetén teherbírási osztályt és becsült hátralévő élettartamot rendeljen.

Ez a kétlépcsős megközelítés gyakorlati szempontból előnyös. A Curviameter nagy mérési sűrűséggel feltárja a hálózat szerkezeti változékonyságát, és megmutatja, hol indokolt részletesebb vizsgálat. Az FWD-mérés ezekre a célzott helyekre koncentrálható, így nem a teljes hálózatot kell projektszintű részletességgel vizsgálni, hanem azokat a

szakaszokat, ahol a hálózati szűrés alapján valóban szükség van mechanisztikus értelmezésre.

A szakértői modul eredményei visszacsatolhatók a felhasználói modulba is. A kalibrált CMI-határértékek alapján pontosíthatók a hálózati kategóriák, javítható a gyenge szakaszok azonosítása, és megalapozottabbá válik a PMS-ben alkalmazott beavatkozási rangsor. Így a Curviameter és az FWD együttes alkalmazása nem párhuzamos mérési rendszert, hanem egymásra épülő, hálózati és projektszintű összekapcsoló döntéstámogató módszertant eredményez.

5. Környezeti hatások kezelése

A Curviameter- és FWD-mérések eredményeit nemcsak a pályaszerkezet tényleges szerkezeti állapota, hanem a mérés időpontjában fennálló környezeti és üzemi feltételek is befolyásolják. Ugyanaz a pályaszerkezet eltérő hőmérsékleten, más nedvességi állapot mellett vagy eltérő terhelési körülmények között különböző behajlási választ adhat anélkül, hogy közben valódi szerkezeti romlás következett volna be. Ezért a hálózati összehasonlítás, az ismételt mérés-

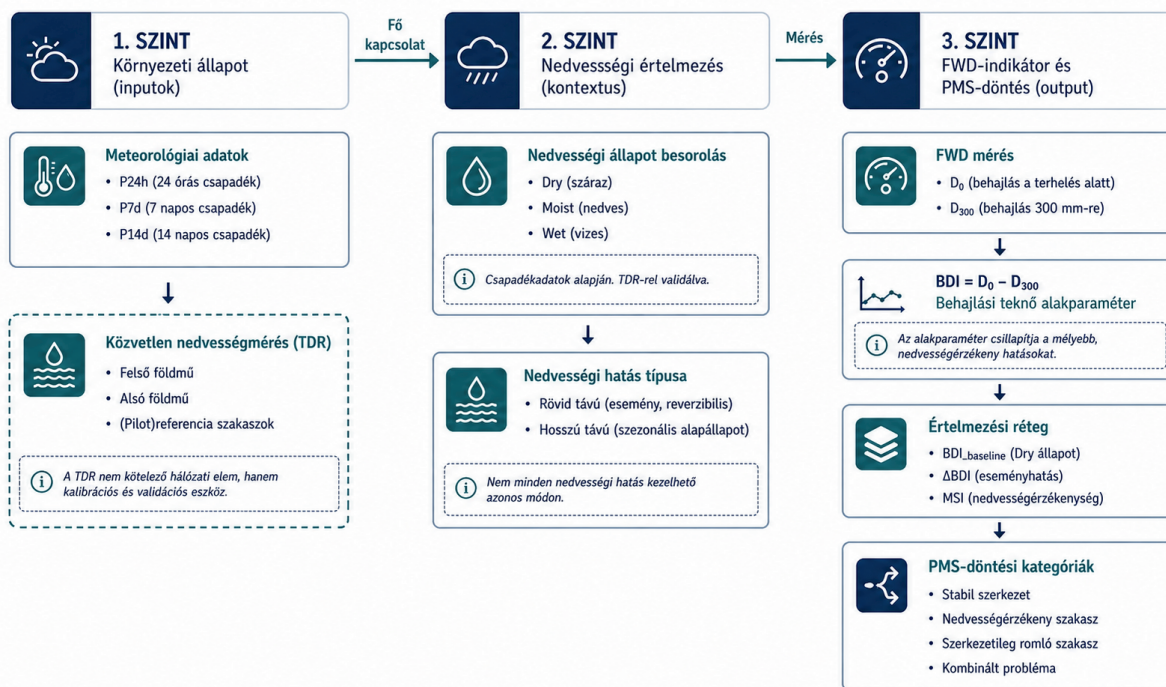
sek értékelése és a Curviameter-FWD kalibráció csak akkor értelmezhető megbízhatóan, ha a mérési körülmények szerepét figyelembe vesszük.

A környezeti hatások közül az aszfaltretek hőmérséklete a legközvetlenebbül értelmezhető tényező. A bitumenes rétegek merevsége hőmérsékletfüggő: magasabb hőmérsékleten az aszfalt lágyabb, ezért azonos terhelés mellett nagyobb behajlás mérhető; alacsonyabb hőmérsékleten a

szerkezet merevebb választ ad. Ez a hatás különösen fontos akkor, amikor különböző időpontban végzett méréseket hasonlítunk össze, vagy amikor a Curviameter és az FWD mérési eredményei között keresünk kapcsolatot. A hőmérsékleti állapot dokumentálása és szükség szerinti korrekciója ezért a kalibráció egyik alapfeltétele.

A nedvességi állapot hatása ennél összetettebb. A csapadék és a talajnedvesség változása elsősorban az alsóbb szerkezeti

rétegek és a földmű merevségét befolyásolja. Ez a hatás térben és időben erősen változó, ezért hálózati szinten nehezebben írható le egyszerű korrekciós összefüggéssel, mint a hőmérséklet. Különbséget kell tenni a rövid távú, csapadékhoz kötődő nedvesedés és a lassabban változó szezonális nedvességi állapot között. Az előbbi akár néhány nap alatt is módosíthatja a mérési eredményt, az utóbbi pedig az évek közötti összehasonlíthatóságot befolyásolhatja (4. ábra).



4. ábra. Nedvességi állapot → FWD-indikátortálasztás → PMS-döntés logikai kapcsolata

A pályagazdálkodási értékelés szempontjából ebből az következik, hogy a mért behajlási válaszokat nem szabad önmagukban, a mérési körülményektől függetlenül értelmezni. A Curviameter-alapú hálózati rangsorolásnál különösen fontos, hogy az összehasonlított szakaszok azonos mérési kampányból vagy hasonló környezeti feltételek mellett származzanak. Ismételt mérések esetén pedig külön kell választani a tényleges szerkezeti romlást attól a változástól, amelyet elsősorban a hőmérséklet vagy a nedvességi állapot okoz.

A Curviameter-FWD kapcsolat kalibrációjánál ugyanez a szempont még hangsúlyosabb. Ha a két mérés eltérő hőmérsékleti vagy nedvességi állapotban történik, akkor a különbség nem kizárólag a mérőeszközök eltérő működési

elvéből adódik, hanem részben a pályaszerkezet aktuális környezeti állapotából is. Ezért a kalibrációs méréseknél törekedni kell az időben közeli adatfelvételre, a mérési hőmérséklet dokumentálására, a csapadékviszonyok rögzítésére és lehetőség szerint az azonos vagy összehasonlítható terhelési feltételekre.

A környezeti hatások kezelése tehát nem különálló kiegészítő elem, hanem a CMI-alapú értelmezés megbízhatóságának feltétele. A hőmérséklet, a nedvességi állapot és a mérési körülmények dokumentálása lehetővé teszi, hogy a Curviameter-mérésekből származó hálózati állapotkép, valamint az FWD-alapú kalibráció ne pillanatnyi mérési állapotot, hanem valóban a pályaszerkezet szerkezeti viselkedését tükrözze.

6. Következtetések és további kutatási irányok

A Curviameter nagy mérési sűrűsége új lehetőséget ad az autópálya-hálózat szerkezeti állapotának értékelésére. A módszer előnye, hogy nemcsak elszigetelt mérési pontokról, hanem hosszabb szakaszok változékonyságáról is képet ad, így jól használható a gyengébb szerkezeti állapotú útrészek kijelölésére és a beavatkozási prioritások meghatározására.

A bemutatott CMI mutató a Curviameter-mérésből származó összetett állapotjelző. Nem tekinthető közvetlen

FWD-paraméternek, és önmagában nem ad években kifejezett hátralévő élettartamot. Elsődleges szerepe a hálózati szintű rangsorolás: megmutatja, mely szakaszok igényelnek részletesebb vizsgálatot, célzott FWD-mérést vagy fokozottabb pályagazdálkodási figyelmet.

A Curviameter és az FWD ezért nem egymást helyettesítő, hanem egymást kiegészítő mérési rendszerként értelmezhető. A Curviameter a hálózati szűrés és priorizálás

eszköze, míg az FWD a részletes szerkezeti értelmezés, a viszsaszámítás és az élettartam-kalibráció alapja. Ez a kétlépcsős megközelítés lehetővé teszi, hogy a részletesebb vizsgálatok azokra a szakaszokra koncentrálódjanak, ahol azok valóban indokoltak.

A módszer megbízható alkalmazásának feltétele a mérési körülmények következetes dokumentálása. A hőmérséklet, a nedvességi állapot, a terhelési feltételek és a rétegvastagsági információk jelentősen befolyásolják a behajlási válasz értelmezését. Ezek figyelembevétele különösen fontos a Curviameter-FWD kalibráció során.

A további kutatási irányok közé tartozik a CMI-küszöbértékek pontosítása, a különböző pályaszerkezeti típusokra

vonatkozó kalibráció bővítése, valamint az ismételt Curviameter-mérések idősoros értékelése. Kiemelt feladat a rétegvastagsági adatok bevonása, mert ezek nélkül a felszíni behajlási válaszból csak korlátozott pontossággal becsülhető a fáradási igénybevétel és a hátralévő élettartam.

Összességében a CMI-alapú Curviameter-értékelés alkalmas lehet az autópálya-hálózat szerkezeti állapotának gyors, részletes és PMS-be illeszthető áttekintésére. Megfelelő FWD-kalibrációval és rendezett mérési háttérrel olyan döntéstámogató eszközzé válhat, amely egyszerre segíti a hálózati szintű rangsorolást és a projektszintű szerkezeti diagnosztikát.

Hivatkozások

Boromisza T. – Gáspár L. (1961): Útpályaszerkezetek teherbíróképességi vizsgálatának szabványosítása. Közlekedéstudományi Szemle, XI. évfolyam, 12. szám

e-UT 09.02.34:2000 Dinamikus teherbírásmérés (KUAB) Mérési eredmények feldolgozása

Bitumen tapadókéességének vizsgálata és digitalizálása

Troják Csaba

egyetemi hallgató,
Széchenyi István Egyetem,
Építész-, Építő- és
Közlekedésmérnöki kar



1. Bevezetés

Mindennapi életünkben számtalanszor találkozunk aszfalttal: járunk rajta gyalogosan, közlekedünk rajta autóval, biciklivel, vagy éppen buszon ülve haladunk végig rajta. Ismerjük az aszfalt jellegzetes, kissé érdes felületét, tudjuk, hogyan reagál különböző időjárási körülmények között, legyen szó hőségről, esőről vagy fagyos téli napokról. Mégis kevesen gondolunk bele abba, hogy milyen összetett vizsgálatok és kísérletek előzik meg egy-egy útszakasz megépítését. Az aszfalt és annak alkotóelemei a bitumen, a kőanyag és adalékanyagok különféle vizsgálatokon esnek át annak érdekében, hogy megfeleljenek a minőségi követelményeknek. Ezek a vizsgálati eljárások lehetnek hagyományos, rég-

óta használt módszerek, de akár modern, digitális technológián alapuló megoldások is. Sajnos léteznek olyan vizsgálatok, amelyek szubjektív értékelésen alapulnak, így nem adnak pontos, ismételhető eredményt. Dolgozatomban az MSZ EN 12697:11-2020 szabvány alapján tanulmányoztam a bitumen tapadókéességének vizsgálatát, ahol egy ilyen szubjektív eljárás szerepel. A szabvány azt vizsgálja, hogy a bitumen és a kőanyag között milyen tapadás van, ezáltal a bitumen mennyire tapad a kőhöz. A szubjektív eljárás kiváltására egy objektív, mérhető és megbízható vizsgálati módszert dolgoztam ki, amely pontosabb képet adhat a bitumen és a kő minőségéről és viselkedéséről.

2. MSZ EN 12697-11:2020 szabvány bemutatása

2.1. Célja

Az MSZ EN 12697-11:2020 szabvány célja, hogy pontosan meghatározza a bitumen és a kőhalmaz közötti bevonódás, vagyis a tapadás mértékét. Ez azt mutatja meg, hogy a kőszemcsék felülete milyen mértékben vonódik be bitumennel, illetve mennyire képes a bitumen tapadni a kőfelülethez. A bevonódás mértékét százalékos formában fejezik ki, amely a bevont kőfelület és a teljes kőfelület arányából számítható ki. A vizsgálat alapján számíthatóvá és objektíven meghatározható lesz a kő és a bitumen közötti tapadás mértéke. A szab-

vány alkalmazása nemcsak a keveréktervezés során fontos, hanem lehetőséget ad a nedvesség hatásának értékelésére is. Ennek segítségével megállapítható, hogy a víz milyen módon befolyásolja a kőhalmaz és a bitumen közötti tapadás mértékét. Emellett különféle tapadásfokozó anyagok igazolására is szintén alkalmas. Ezek a tapadásfokozó anyagok lehetnek folyadékok, aminok, hidratált mész vagy cement, amelyek javíthatják a tapadást és növelhetik az aszfaltkeverék tartósságát, a kőanyag és a bitumen tapadását.

2.2. Eljárások

2.2.1. Gördülő palackos módszer

A vizsgálati minta előkészítéséhez 8/11 mm vagy 6/10 mm frakciójú kőanyagot kell használni, amely először egy alapos mosáson esik át, hogy megszabaduljunk a kő felületén lévő portól, szennyeződésektől és finom szemcséktől. Ezt követően a kőanyagokat szellőztetett sütőben tömegállandóságig kell szárítani, vagyis addig, amíg nedvességtartalmuk teljesen el nem párolog, és tömegük már nem változik. A megtisztított, száraz kőhalmazt és a meghatározott viszkozitású bitument ezután egy keverőtálban alaposan össze kell keverni mindaddig, amíg a kőszemcsék teljes felülete be nem vonódik bitumennel. A keveréket ezt követően lapos fémtálcán vagy szilikonbevonatú papíron szét kell teríteni úgy, hogy a szemcsék egymástól külön helyezkedjenek el, ne tapadjanak össze, és ne képezzenek csomókat.

Ezt a mintát 12 és 64 óra közötti időtartamban szobahőmérsékleten szükséges tárolni, pormentes helyen, hogy a bevonat stabilizálódjon. A kondicionálási idő letelte után a minta három részmintára osztódik szét, amelyeket külön vizsgálati palackokba kell tárolni. Minden palackba a szemcséket egyenként kell beletenni, majd desztillált vízzel a palackot feléig kell tölteni, és üvegpálcát helyeznek bele, amely a vizsgálat során segíti a szemcsék koptatását, mozgását. Ezután a palackok hengerlőgépen forognak, ami a víz és a mozgás hatására koptatja a kőszemcséket, ezáltal a tapadáképeséget teszi próbára. A palackhengerlést először 6 óra $\pm$ 15 perc után félbe kell szakítani, és szemrevételezéssel meg kell határozni a minta bevonódását. Az eredmény meghatározás után a palackban lévő eredeti vízbe visszake-

rülnek a szemcseminták, majd további 18 óra $\pm$ 15 perc palackhengerlés után végleg leáll a vizsgálat. Ekkor ismét meghatározzuk a bevonódás arányát.

A bevonódás mértékét ezután szemrevételezéssel állapítják meg, amit két laboráns egymástól függetlenül végez, anélkül, hogy látnák egymás eredményeit. A kapott eredményeket átlagolják, majd azt a legközelebbi 5%-ra kerekítik. Ez az eredmény adja meg az minta bevonódási arányát.

A módszer ismételhetősége 20%, míg reprodukálhatósága 30%.



1. ábra Palackhengerlő gép

Forrás: <https://www.matest.com/en/product/b022sp-bottle-roller>

2.2.2. Statikus módszer

A vizsgálati minta előkészítése megegyezik a forgópalackos eljárás során elvárt előkészítéssel. A mintákat négy részre kell szétosztani úgy, hogy egyetlen 150 darabos min-tahalmazt kapjunk.

Ezután a bevont szemcséket egy lapos aljú edénybe kell helyezni, és fel kell tölteni desztillált vízzel úgy, hogy a víz teljesen ellepje a szemcséket. A víz hőmérsékletének 19 ± 1 °C kell lennie, amiben a szemcsék 1 óra $\pm$ 5 percig pihen-

nek. A merítés után a szemcséről le kell önteni a vizet, és hagyni kell megszáradni.

A következő lépésben szemrevételezéssel meg kell határozni a bevonódás mértékét mind a négy mintának, majd ezek eredményét átlagoljuk, és kerekítjük 5 %-ra, így megkapva a végső bevonódási arányt.

A módszer ismételhetőségét és reprodukálhatóságát a szabvány nem határozza meg.

2.2.3. Forrásban lévő vízzel való eltávolításos módszer

A vizsgálati minta előkészítése megegyezik a forgópalackos eljárás során elvárt előkészítéssel. A kőszemcséket le kell mérni 0,1 gramm pontossággal. A mintát keverése után a gyors lehűlés érdekében hideg vízfürdőbe kell meríteni, miközben időnként rázni és kocogtatni szükséges azért, hogy a kötőanyag ne folyjon és a kőhalmaz ne ragadjon össze. Lehűlés után a mintát tálcára kell helyezni.

A vizsgálatához meg kell határozni a sav/bázis ekvivalenciátényezőt. A vizsgálat során végig ugyanazt a sav- és bázisoldatot kell használni. Egy teljes mérési sorozathoz körülbelül 1,7 liter savra és 0,5 liter bázisra van szükség.

A folyamat első lépése az ekvivalenciátényező (f_{eq}) meghatározása, amely biztosítja a két oldat közötti kémiai arány ismeretét. Titrálni kell 25 ml savat háromszor a megfelelő bázissal. Ezután határozzuk meg a három titrálás 0,05 ml-re pontos átlagértékét. Ezt követően ki kell számítani az f_{eq} ekvivalenciátényezőt az alábbiak szerint három tizedesjegy pontossággal.

$$f_{eq} = \frac{25}{X_0}$$

ahol X_0 a három titrálásból kapott átlagérték.

Következő lépés a csupaszítási próba. Ezen eljárás során egy mérőpohárban egy drótháló helyezkedik el, benne pedig desztillált víz. A bevont kőszemcséket bele kell tenni a mérőpohárba, ha a víz felforrt. A kőszemcsék behelyezése után a vizet intenzíven újra felforraljuk, és 10 percig hagyjuk, hogy forrásban lévő víz dolgozzon a szemcséken. A

forralás hatására a bitumen leválik a kőanyagról. A felülúszó bitument úgy kell eltávolítani, hogy hideg vízsugarat kell a főzőpohárban lévő forró víz felszíne alá vezetni. Ezután le kell önteni a vizet, és ki kell üríteni a főzőpoharat egy 7 mm-es szitára. A kőhalmazt pedig ismét le kell mérni 0,1 gramm pontossággal.

Bitumenfedettség mértékkének kiszámítása az alábbi képlettel történik:

$$A_c = 25,0 - \left(1 + \frac{M_2 - M_1}{200}\right) \times f_{eq} \times Y$$

Ahol:

- M_1 : a bevont kőhalmaz tömege (grammban), 0,1 gramm pontossággal.
- M_2 : a nedves bevonatú kőhalmaz tömege a vizsgálat után (grammban), 0,1 gramm pontossággal.
- f_{eq} : a sav/bázis ekvivalenciatényező
- Y : a 0,1 mol/ NaOH vagy 1 mol/l KOH átlagos térfogata, amely a 25 ml-es savmennyiség semlegesítéséhez szükséges (milliliterben kifejezve), 0,05 ml pontossággal

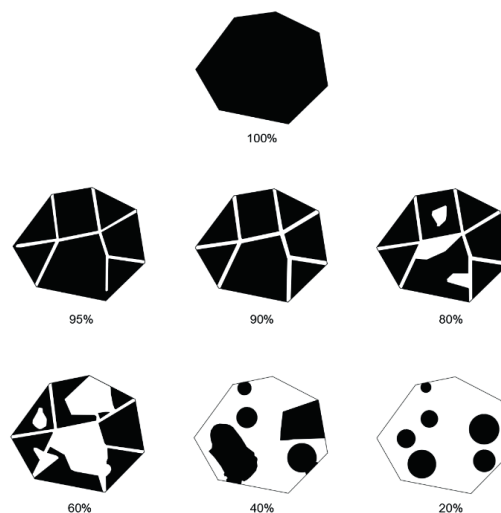
Az A_c értéket kalibrációs görbén kell ábrázolni, ahonnan azonosíthatóvá válik a bevonódás aránya.

Az eljárás ismételhetősége 15%, míg reprodukálhatósága nem ismert a szabvány szerint.

3. Probléma az MSZ EN 12697-11:2020 szabvánnyal

3.1. "A" Melléklet bemutatása

A palackhengerléses eljárás alapvetően pontos, megbízható és könnyen kivitelezhető vizsgálati módszer, amely lehetővé teszi a bitumen és a kőhalmaz közötti tapadás mértékének meghatározását. Maga a kísérleti folyamat egyszerű, azonban a minta értékelésének módja már sokkal összetettebb és kevésbé objektív. Az eredmények ugyanis nagymértékben a laboránsok személyes megítélésén és tapasztalatán alapulnak, mivel a szabvány az "A" mellékletben található vizuális útmutatót veszi alapul az értékeléshez. Ez a melléklet azonban nem pontos, hiszen az ábrán jelölt százalékok és a bevont területek nem egyeznek, ezenfelül értelmezése különbözhet személyenként. A laboránsok ítéletképességét számos tényező befolyásolhatja: a fáradtság, a gyakorlat hiánya, a látás romlása, vagy akár a pillanatnyi hangulat is torzíthatja az észlelést. Bár a szabvány előírja, hogy a vizsgálatot két független laboráns végezze, és az eredményeket átlagolják, ez a megoldás sem zárja ki teljesen az emberi hibát. Az így keletkező eltérések akár jelentősen is különbözhetnek a valós tapadási értékektől, ami megkérdőjelezi a módszer objektivitását és reprodukálhatóságát.



2. ábra "A" melléklet – Forrás: MSZ EN 12697-11

3.2. Számításos felülvizsgálat

Az "A" melléklet célja, hogy segítséget és vizuális támpontot adjon a laboránsoknak a bitumen bevonódásának megítéléséhez, azonban a gyakorlatban ez az ábra nem bizonyul elég pontosnak. Ennek igazolására AutoCAD program segítségével pontosan megrajoltam az "A" mellékletben szereplő körvonalakat, majd a program által kiszámított

területek alapján meghatároztam a tényleges bevonódási százalékokat. Az így kapott adatokat egy Excel táblázatban rögzítettem és rendszereztem.

Az 1. táblázat első oszlopa az ábrán feltüntetett, a szabvány szerinti bevonódási értéket mutatja, a második oszlopban a valós, számításal meghatározott érték szerepel, míg a

harmadik oszlopban a két adat előjeles különbsége látható. Az összehasonlításból egyértelműen kiderült, hogy jelentős eltérések mutatkoznak a valós és a szabványosított ábrán közölt értékek között. Ez azt bizonyítja, hogy az "A" melléklet ábrája nem megbízható alap a vizsgálati eredmények értékeléséhez, hiszen torzíthatja a laboránsok megítélését és hibás következtetésekhez vezethet. Emiatt fontos lenne a melléklet pontosítása vagy modern, digitális, objektív mérési módszerek bevezetése a nagyobb pontosság érdekében.

Ebből következik, hogy az ítéloképességet segítő ábra nem tölti be megfelelően a funkcióját, hiszen a pontatlansága miatt félrevezető. Ha ehhez még hozzávesszük a laboráns pillanatnyi hangulatát, fáradtságát vagy koncentrációs állapotát, a vizsgálat eredménye halmozottan torzulhat. Így végső soron teljesen téves és megbízhatatlan értékek születhetnek, amelyek nem tükrözik a valós bevonódási mértéket. Ez komoly problémát jelenthet az aszfalt minősítésében, hiszen a döntések alapját hibás adatok képezhetik.

Ábra bevonódás	Valós bevonódás	Eltérés
95%	87,67	-7,33
90%	84,14	-5,86
80%	76,81	-3,19
60%	53,55	-6,45
40%	38,86	-1,14
20%	20,38	+0,38

1. táblázat "A" melléklet felülvizsgálati eredménye

3.3. Szemrevételezés pontossága

3.3.1. Felmérés bemutatása

A felső pontokon keresztül tudjuk, hogy a laboránsok nem kapnak pontos iránymutatást a szemrevételezéshez. De felmerülhet a lehetősége annak, hogy a félrevezető melléklet ellenére a meghatározott bevonódási értékek pontosak, így maguk a végeredmények pontosak lehetnek. Ezért, készítettem egy kérdőívet, amivel azt vizsgáltam, hogy az emberek pontosan tudják-e meghatározni a bevonódás mértékét.

A kérdőívben 10 mintát vizsgáltak a kitöltők. A minták fotón voltak láthatóak, így minden kitöltő ugyanazokat a képeket vizsgálta, ugyanabból a szögből, ugyanolyan távolságból, ugyanolyan megvilágítási körülmények között. A

fotókon szerepeltek kisebb és nagyobb bitumen borítottságú kövek, illetve szerepeltek folyami és vulkanikus eredetű kövek. A kérdőívhez csatoltam az "A" mellékletet is, iránymutatásként. Az eredmények a kitöltők a saját becslésük alapján történt, nem előre megírt választható opciókból. A kitöltők által adott szemrevételezéses becsléseket összehasonlítottam a saját programomon keresztül kapott eredménnyel.

A bevonódás meghatározása mellett foglalkoztatott, hogy mi a véleményük a kitöltőknek, így szóveges értékeléssel és egy négyfokozatú skálán is értékelték az eljárást.

3.3.2. Felmérés eredményei

A 10 minta és a hozzájuk tartozó kitöltések színes képet adtak a becslésről. Voltak egyhangú eredmények, voltak eredmények, amelyek átlagolást kívántak, valamint egyértelmű képet kaptam a vulkanikus és folyami kövek becsléséről.

3 minta esetén többnyire egyhangú eredmények érkeztek. Annak ellenére, hogy egyhangúan becsülték meg a kitöltők a bevonódás mértékét, sajnos egy minta során határozták meg 5 % belüli pontossággal a bitumen borítottságot. A másik két esetben az eredmények nem elfogadhatóak. Ezen vizsgálatok során 9 % és 10 % eltérést láthatunk a valós és a becsült értékek között.

A másik 7 minta esetében, ahol átlagolásra volt már szükség, a 2 legnépszerűbb becslések között a tartomány 20 % volt. Bár előfordult, hogy ezek a 20 % tartományú értékek átlagolva és 5 %-ra kerekítve - mint ahogy a szabvány által előírt eredményekkel számolni kell - kielégítően pontos eredményt mutatottak, nem szabad erre támaszkodnunk. Ennek az az oka, hogy 7 mintából 3 vizsgálat során ad 5 %-os pontossággal elfogadható értéket a szemrevételezés, átlago-

lással és kerekítéssel. Ezen három eredmény esetén is a két legnépszerűbb válasz két esetben a kitöltők 40 %-át, egy esetben a kitöltők 60 %-át fedte le. Így az esély, hogy a legnépszerűbb becslési eredményektől eltér a vizsgáló személy magas.

7 mintából 2 vizsgálat során a két legnépszerűbb becslési eredmény megvezető volt. Egyik esetben a 2 legnépszerűbb eredményt a kitöltők 60 %-a választotta. Az eltérés a valós bevonódási értéktől pedig 11 % volt, míg a két főbb becslések közötti tartomány ez esetben is 20 % volt. Másik esetben a kitöltők 80 %-a választotta a 2 legnépszerűbb becslést, melyek közötti tartomány szintén 20 % volt. Ezen vizsgálat során az látható, hogy két egyenlően támogatott bevonódási érték mellett, kisebb összesített tartománnyal, élesen elhatárolható borítottság mellett is lehet pontatlan eredményt kapni. A becslések átlagolt, kerekített értéke 16 %-kal tér el a pontos bevonódási értéktől.

Ebbe a 7 esetben esik a 2 vulkanikus eredetű kőzetminták is. Teljesen jogosan felmerül a kérdés, hogy miért becslesek ennyire elkülönítve a vulkanikus mintákról. A válasz

roppant egyszerű, hiszen a vulkanikus eredetű kövek sötét színnel bírnak. Így amikor egy sötét kőszemcsén vizsgáljuk a fekete bitument, akkor hamar elbizonytalanodunk a becslésünk pontosságában. Hiszen az esetek többségében a fehér kőszemcsétől könnyen el tudjuk különíteni a fekete bitument. Ellenben, ha a kőszemcsénk is fekete, akkor már



3. ábra Vulkanikus minta – Forrás: Saját kép

nem lesz olyan kontrasztos a bevont és bevonatlan felületek aránya. Ez a jelenség pedig abszolút megmutatkozik a vulkanikus mintáknál, hiszen az átlagolt becslések értéke 43 %-kal és 36 %-kal tér el a valós, pontos bevonódási értéktől. A válaszadóknak csupán 6 és 8 %-a adott 5 % pontosságon belüli eredményt.



4. ábra Mészköves minta – Forrás: Saját kép

A fenti eredményekből arra a következtetésre jutottam, hogy a vulkanikus kőzetek során elengedhetetlen a szoftveres feldolgozás, mert szemrevételezéssel a pontatlanság mértéke korrigálhatatlanul óriási. Az átlagolt, majd kerekített eredmények bár tudnak kielégítőek lenni, a módszer

pontossága nem garantálható statisztikailag sem. Így minden bevonódási vizsgálatnál indokoltnak tartom a digitális képfeldolgozás használatát, az ismételhetőség és reprodukálhatóság érdekében.

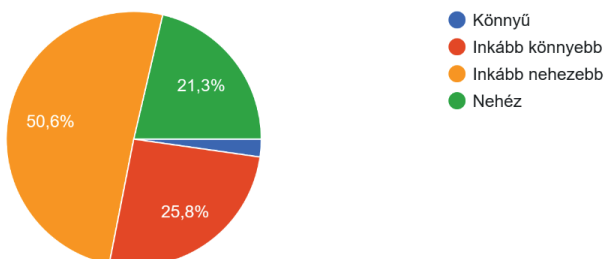
3.3.3. Kitöltők egyéni véleménye a vizsgálatról

A felmérés végén megkérdeztem a kitöltőket, hogy mennyire érezték nehéznek a bevonódás mértékének meghatározását. A válaszadók 72 % nehéznek vagy inkább nehéznek ítélte meg a szemrevételezést. Legnagyobb nehézséget a minták darabszáma és a bitumenes és köves felü-

letek elkülönítése okozott. Ezenfelül több kitöltő érezte problémának, hogy vannak szemcsék, melyek teljesen bevontak, míg másik szemcsék csak részben bevontak. Így nehezen tudtak bevonódási értéket becsülni, mert ezeket a szemcséket igyekeztek súlyozni többség szerint.

Milyennek éreztetted a bevonódás meghatározását?

89 válasz



5. ábra Kitöltők véleménye a bevonódás vizsgálatról – Forrás: Saját kép

4. Vizsgálat szerepe

4.1. Vizsgálat szerepe beépítés előtt

4.1.1. Nedvességérzékenység előszűrése

Különböző vizsgálatok, kísérletek épülnek az EN 12697-11 szabványra. Elsősorban megvizsgálják a kőanyag és a bitumen közötti tapadás mértékét víz jelenlétében, amit a gördülő palackos eljárás és a statikus eljárás is tükröz. Ezután nagyobb keverékeken végeznek el vizsgálatokat a szemrevételezés alapján meghatározott tapadásra alapozva. Sajnos a szemrevételezés pontatlanságából adódik, hogy kezdeti hibát visznek a mérésbe, majd ezekkel a téves értékekkel folytatják a kutatást vagy a kísérleteket. Így sokkal

nagyobb és költségesebb vizsgálatokat végeznek laboratóriumok, ahol az eredmény nem teljesen a valóságot tükrözi és egy pontos meghatározással megelőzhető lehet egy vizsgálat elvégzése. Hiszen, ha a bevonódás vizsgálat során kiderül, hogy a tapadás gyenge, akkor következtethetünk arra is, hogy a keverék érzékeny fagyási-olvadási ciklusokra vagy, hogy ITSR vizsgálat során nem fog az elvártnak megfelelő módon teljesíteni a keverékünk.

4.1.2. Adalékok és tapadásfokozók igazolása

Ha a kő és a bitumen közötti tapadás nem megfelelő, gyakran különböző adalékot, tapadásfokozót vagy hidratált meszet adnak a bitumenhez a tapadás növelése érdekében. Ezeket az adalékoknak a hatását az EN 12697-11 alapján igazolják aszerint, hogy mennyivel nőtt a bitumenes bevonódás mértéke. Szintén az EN 12697-11 alapján vizsgálják a módosított bitumeneknél, melegebb vagy csökkentett hő-

mérsékletű aszfaltoknál (WMA), hogy maga az alkotóelemek közötti tapadás változott-e, és ha igen, milyen mértékben. A szemrevételezés pontatlansága itt többszörösen is problémát okoz. A becsült bevonódási százalékok különbsége alapján határozzák meg az adalékok hatását, és szükségességét. Így maga a tapadásfokozók vagy adalékok hitelesítése nem teljes mértékben történik megfelelően.

4.1.3. Új vagy problémás kőanyagok minősítése

Ha egy új bányából érkezik kőanyag, vagy egy problémás kőanyagból szeretnénk aszfaltot építeni, annak sok megelőző vizsgálata van, köztük a bevonódás képessége is kérdéses. Ilyenkor a tapadóképesség vizsgálata szintén az EN 12697-11 alapján történik. Könnyen felmerülhet, hogy ada-

lekanyagokra, tapadásfokozókra van szükség, ahol szintén felmerülnek az előbbieken felsorolt problémák. A minősítéshez elengedhetetlen a pontos bevonódási képesség meghatározása.

4.2. Pontatlan bevonódás meghatározásból eredő aszfalthibák

A fentiekből adódóan, ha a keverék bevonódásának mértékét nem sikerül pontosan meghatározni, az komoly következményekkel járhat. A hibás értékelés aszfaltminőségi

problémákhoz, tapadási hiányosságokhoz és idő előtti burkolatkárosodáshoz vezethet, ami végső soron a közlekedésbiztonságot is veszélyeztetheti.

4.2.1. Kopás

A palackhengerléses vizsgálat során a kezdetben 100%-os bevonódással rendelkező minta a koptatóhatás következtében fokozatosan veszít a tapadásából. Ez a folyamat jól szemlélteti, hogy a valós körülmények között, az aszfaltburkolat csúszásellenállása az idő előrehaladtával eltérően csökkenhet attól, mint amit a tervezési fázisban előzetesen feltételeztek. Amennyiben az útfelület tapadása jelentősen lecsökken, az komoly közlekedésbiztonsági kockázatokat jelenthet, különösen nedves, csapadékos vagy jeges időjárási viszonyok között, amikor a járművek tapadása kritikus

szerpetet játszik. A probléma még súlyosabbá válik mészkővázas aszfaltkeverékek esetében, mivel a mészkő természeténél fogva puhább és kopásra hajlamosabb kőzet, így gyorsabban veszít tapadóképességéből. Ennek következtében, ha a bevonódás vagy a kopásállóság mértéke nem egyezik meg a tervezés során meghatározott értékekkel, az útburkolat vártnál hamarabb elveszítheti csúszásellenállását, ami balesetveszélyes helyzeteket idézhet elő és lerövidíti az út élettartamát.

4.2.2. Kipergés

Amennyiben a tapadóképeséget nem a valóságnak megfelelően határozzuk meg, az komoly következményekkel járhat az aszfaltburkolat minőségére és tartósságára nézve. Ha a bitumen és a kőszemcsék közötti kötés ereje gyengébb, mint amit a tervezés során feltételeztünk, akkor a keverék nem lesz kellően összetartó. Ennek következtében a kopórétegben található kőszemcsék könnyebben kipereghetnek a felületről, mivel a bitumen nem biztosítja számukra a megfelelő tapadást és stabilitást. A szemcsék kipergése pedig láncreakciószerűen rontja az útburkolat szerkezetét, ami repedések, felületi károsodások, majd később kátyúk kialakulásához vezethet. Mindez nemcsak az út élettartamát csökkenti, hanem a közlekedésbiztonságot is veszélyezteti, hiszen a burkolat egyenetlenné válik, növelve a balesetek kockázatát.



6. ábra Kipergés

4.2.3. Repedési hibák

A nem megfelelő bevonódás mértéke jelentős hatással van az aszfaltburkolat szerkezeti épségére, mivel elősegíti különböző repedéstípusok, például hajszálrepedések és csúszási repedések kialakulását. A hajszálrepedések apró, gyakran szabad szemmel alig észrevehető felületi hibák, amelyek a kőszemcsék közötti elégtelen tapadás következtében alakulnak ki. Kezdetben nem okoznak közvetlen problémát, azonban az idő előrehaladtával ezek a apró repedések lehetőséget adnak a víz és a fagy bejutására, ami nagyobb repedéseknek ad helyet. A csúszási repedések ezzel szemben főként olyan helyeken fordulnak elő, ahol a járművek fékeznek vagy gyorsítanak, például kereszteződésekben, stop tábláknál és emelkedőkön. Ezek a pontokon a járművek által közvetített horizontális erők fokozatosan „széthúzzák” az aszfaltot, ami a burkolat deformációjához vezet. Ha a bevonódás nem megfelelő, vagy a bitumen és a kőszemcsék közötti adhézió gyenge, a burkolat nem képes hatékonyan felvenni a feszültségeket, így az út gyorsabban elhasználódik, és korábban jelennek meg a súlyosabb szerkezeti hibák.



7. ábra Aszfaltfelület hálós repedése

4.2.4. Fagyási – olvadási ciklusok

A fentiekben ismertetett hibák, mint a hajszálrepedések és csúszási repedések nem csupán önállóan károsítják az útburkolatot, hanem hosszú távon további romlási folyamatokat indítanak el. A repedések és hézagok révén a csapadékvíz a téli fagyási és olvadási ciklusok során a víz térfogatváltozása fokozatosan tágítja a réseket, ezáltal egyre súlyosabb szerkezeti károsodásokat okozva.

További problémát jelent a téli útüzemeltetés, különösen a sózás, amely során az útfelület folyamatosan ki van téve a só és a nedvesség kémiai roncsolóhatásának. A só nemcsak a bitumént károsíthatja, hanem gyengíti a kőszemcsék közötti kötéseket, felgyorsítva az aszfalt öregedését és a tapadásvesztést. Bár Magyarországon az utóbbi években a sóhasználat csökkent, hiszen egyre kevesebb sózásra van szükség a kevesebb és kevesebb hó miatt, nem szabad meg-



8. ábra Sószóró autó

feledkezni arról, hogy az MSZ EN 12697-11:2020 szabvány európai szabvány. Így más, hidegebb éghajlatú országokban, ahol a szózás gyakrabban és nagyobb mértékben történik ezek a kis pontatlanságok a bevonódás vizsgálatában

sokkal súlyosabb károkat eredményezhetnek. Ez is rámutat arra, hogy a pontos tapadási értékelés kulcsfontosságú a burkolatok hosszú távú élettartama és biztonsága szempontjából.

5. Vizsgálat digitalizálása

5.1. Digitalizálás alapgondolata

Annak érdekében, hogy a bitumenborítottság meghatározása valóban objektív és megbízható legyen, elengedhetetlen az emberi tényező kizárása a vizsgálati folyamatból. Ezt leginkább szabványosított fotózással és digitális képfel-

dolgozással lehet elérni. Ezzel pontos, ismételhető és emberi szubjektivitástól mentes eredményt biztosítani. Ennek megvalósítására egy saját fejlesztésű programot készítettem, amely képes a mintáról készült fényképet elemezni.

5.2. Minták rögzítése

5.2.1. Minták digitális rögzítése scanneléssel

A kidolgozott eljárással a mintákból pontos adatot kapunk, amellyel teljesen tisztán láthatóvá válik nagy felbontásban a felületi bevonódás aránya, melyhez később tudjuk hasonlítani a fotókkal készült eredmények pontosságát.

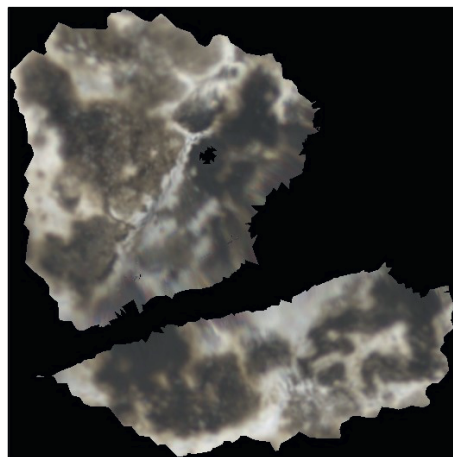


9. ábra 3D scanneléshez felállított berendezés

Ezért kézi scannert használtam a minták minél pontosabb és részletesebb bevizsgálásához. A scanneléshez Artec 3D Spider Professional Handheld 3D Scanner-t használtam, amit egy tripodra rögzítettem, míg a bevont szemcséket Artec Turntable-re helyeztem, ami a minták forgatására szolgált. Miután a bevont szemcséket rátettem a forgóasztalra, beállítottam a scannert megfelelő távolságra és magasságra a mintától, majd elindítottam a scannelést, mely során 150-180 db vakuval megvilágított képet készített. Egy

szemcsét kétszer scanneltem, hiszen a minta a beolvasás során egy felületen fekszik, melyet nem tud leolvasni. Így meg kellett fordítanom, hogy a másik felület is láthatóvá váljon, ezáltal a minta teljes felületéről képet kaphassak. Ezután a két fóliát leszűkítettem kizárólag a mintára és kivágtam belőle a forgóasztal felületét. Így a fóliák a köszemcse egyik-egyik oldalát tartalmazták. Következő lépésként közös pontokat keresve a két oldalon összeillesztettem a két fóliát, hogy egy testet alkosson. Sajnos a minták 8-11 mm frakciójúak, így ebből az apró testből nem lehetett pontos modellt készíteni.

Ezt követően arra jutottam, hogy ha nem scannelek kétszer, hanem csak egyszer, és annak a fóliának vizsgálom meg a százalékos bevonódását, akkor azzal a két felületen szkenneléssel közel azonos eredményt kaphatunk. Hiszen a bevonódás értékelése során is keveredhetnek a közhalmazok előnytelenül, vagy előnyösen. Ezért csak egy scannelés történt, melyet exportáltunk .jpg fájlként. Az így kimentett fotóknak sajnos nem volt kielégítő minősége, hiába változtattam a felbontási paramétereken, nem tudtam egyszerűen és pontosan elválasztani a bitumennel bevont és nem bevont felületeket egymástól.

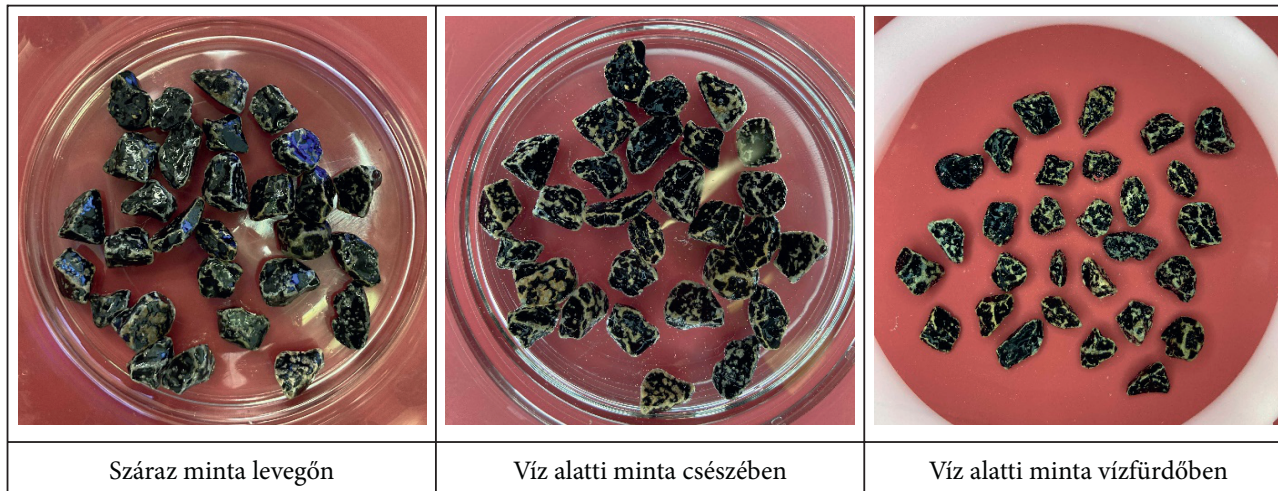


10. ábra 3D scannelésből kinyert felület

5.2.2. Minták digitális rögzítése fotózással

A legnagyobb probléma, ami a bitumennel bevont minták fotózásakor felmerült, az a fényvisszaverődés a bitumenes felületekről. Emiatt egy képen közel lehetetlen lenne megállapítani a bitumen arányát, hiszen rengeteg fényvisszaverődés miatt alig, vagy teljes mértékben nem látszik maga a bitumen. Ezért a felvétel elkészítéséhez a mintát vízbe tettük, amely megszüntette a csillogást, de az üveg faláról

még mindig keletkeztek becsillanások a víz felszínén. Így a fotók ismét zavarosak, pontatlanok lettek. Ezután vízfürdőben leptem el vízzel a szemcséket, ahol az üveg és a bitumen csillanása megszűnt. Így kaptam azokat a fotókat, melyek a legjobban tükrözik a valóságot, és legjobban lehet velük azonosítani a bevonódás mértékét.

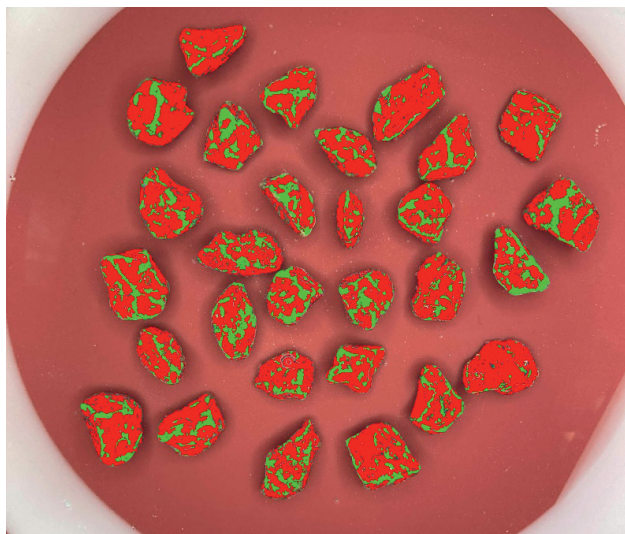


2. táblázat Minták fotózási lehetőségeinek evolúciója

5.3. Digitális feldolgozás előnyei

Az általam kidolgozott eljárás legnagyobb előnye, hogy teljes mértékben kizárja az emberi tényezőket, így az értékelés objektívvá, pontosabbá és ismételhetővé válik. Digitális feldolgozásnak köszönhetően nem szükséges már hozzá két laboráns, elég egy vizsgáló is. Ennek köszönhetően a vizsgálat eredménye függetlenné válik a laboránstól, a helyszíntől vagy az országtól, vagyis minden laborban bárhol Európában, ahol az adott szabványt alkalmazzák, azonos és

összehasonlítható eredményeket lehet kapni. A módszer további előnye, hogy az adatok digitális formában kerülnek rögzítésre, ami lehetőséget teremt nagyméretű, központi adatbázis létrehozására. Ez az adatbázis a jövőben rendkívül értékes információforrást biztosíthat az aszfaltburkolatok viselkedésének, hibáinak és tartósságának vizsgálatához, kutatásokhoz, valamint hozzájárulhat új összefüggések és optimalizálási lehetőségek feltárásához.



12. ábra Digitális feldolgozás során kijelölt bitumen és köfelületek



11. ábra Digitális feldolgozás előtti kép

Hosszútávon ez az adatbázis a jövőben segítheti az aszfaltok hibáinak vizsgálatát, optimalizálását esetleges összefüggések felállítását. Emellett az utak élettartama növelhető a hibák minimalizálása, megismerése alapján. Bár az összes problémát nem tudjuk megszüntetni, hiszen több tényezőtől függenek a tönkremenetelek, de a javításuk jóval tervezhetőbb lesz, ami növeli a karbantartás költség és energiafelhasználás hatékonyságát.

Rövid távon az újonnan épülő aszfaltutak vizsgálata során a módszer alkalmazásával konkrét, mérhető adatokat nyerünk, amelyek segítségével a beruházók és kivitelezők pontosabban tudnak tervezni. Ezáltal biztosítható, hogy az

elkészült útszakaszok megfeleljenek az elvárt SFC (Surface Friction Coefficient) és IFI (International Friction Index) értékeknek, amelyek kulcsfontosságúak a tapadás és a közlekedésbiztonság szempontjából. Az így nyert objektív adatok lehetővé teszik a minőségellenőrzés javítását, és csökkentik a hibás kivitelezés kockázatát. Végző eredményként biztonságosabb, tartósabb és megbízhatóbb úthálózat jön létre, amely nemcsak a hétköznapi közlekedők számára jelent nagyobb biztonságot, hanem a szakemberek munkáját is megkönnyíti azáltal, hogy pontos, összehasonlítható és visszakövethető adatokkal támogatja a tervezési és fenn tartási folyamatokat.

6. Vizsgálat digitalizálása

Ahhoz, hogy az eljárást és a digitális feldolgozás pontosságát igazolni tudjam, elengedhetetlen az ismételhetőség számszerűsítése. Ez a mutató azt jelzi, hogy ugyanazon

vizsgáló személy, azonos mérőeszközzel, rövid időközön belül végzett párhuzamos mérései mennyire konzisztensek.

6.1. Ismételhetőségi határ meghatározása (r)

A nemzetközi szabványügyi gyakorlatban (ISO 5725) az ismételhetőségi határ az az érték, amelynél két egymást kö-

vető mérés közötti abszolút különbség 95%-os valószínűséggel nem nagyobb.

$$r = t_{n-1,\alpha} \cdot \sqrt{2} \cdot s_r \approx 2,96 \cdot s_r$$

Ahol:

s_r : Ismételhetőségi szórás. A párhuzamos mérések eredményeiből származtatott szórásérték.

$t_{n-1,\alpha}$: A Student-féle t-eloszlás kritikus értéke. 95%-os konfidenciaszint és a vizsgálatok során alkalmazott mintaszám esetén értéke közelítőleg 2,093).

$\sqrt{2}$: Matematikai korrekciós tényező, amely két független mérés különbségének varianciáját transzformálja.

6.2. Ismételhetőségi szórás meghatározása (s_r)

Az ismételhetőségi szórás azt mutatja meg, hogy ha ugyanazt a képet vizsgáljuk meg többször szoftveresen, akkor mekkora szórás alakul ki az eredmények között. Ezzel a

képfeldolgozó programnak a mérési bizonytalanságát tudtam számszerűsíteni.

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{n(p-1)}}$$

Ahol:

x_{ij} : Az i-edik minta j-edik egyedi mérési eredménye (bitumenfedettség százalék).

$\bar{x}_i$: Az i-edik minta méréseiből számított számtani középérték.

$n(p-1)$: A statisztikai szabadságfokok száma.

6.3. Minta populáció szórása (s_L)

Tekintettel arra, hogy a kőszemcséknek egyszerre csak egy oldalát látjuk, és a többi oldal fedésben marad, jogosan megkérdőjelezhetővé válik a vizsgálat teljessége. Valóban, ha a szemcsék máshogyan helyezkednek el, akkor más bevonódási értéket kaphatunk. Ebből eredően a mintavételezésnek is van egy szórása.

Ezért egy mintáról több fotót készítettem, miközben a szemcséknek mindig más oldalukat fényképeztem. Tehát a minta populációja ugyanaz maradt, de variáltam a helyzetüket. Így egy átfogóbb képet kaphattam a szemcsék teljes felületi bevonódásáról.

$$s_L = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (\bar{x}_i - \bar{x})^2}$$

Ahol:

M: Minták darabszáma.

$\bar{x}$: Összes érték összegének és a mintaszámának a hányadosa.

6.4. Teljes reprodukálhatóság (s_R)

A teljes reprodukálhatóság megmutatja, hogy mekkora pontatlanság van mind a képfeldolgozásban, mind a mintavételezésben együttesen.

$$s_R = \sqrt{s_r^2 + s_L^2}$$

6.5. Kiterjesztett mérési bizonytalanság (U)

A kiterjesztett mérési bizonytalanság azt a területet mutatja meg a mérési eredmény körül, ahol nagy valószínűséggel a mérésnek a valódi értéke helyezkedik el. Ebbe az értékbe belekalkuláljuk a mérés bizonytalanságát és a mintavételezés bizonytalanságát is.

$$U = k \cdot s_R$$

Ahol:

k: Lefedési tényező. Számításaim során $k=2$ értékkel dolgoztam, ami 95%-os megbízhatóságot jelent.

6.6. Relatív ismételhetőség (RSD)

Mivel a bitumenbevonódás mértéke tág határok (0–100%) között mozog, a mérési módszer stabilitását célszerű százalékos formában is kifejezni. A relatív ismételhetőség az ismételhetőségi szórás és a mért értékek átlagának százalékos formátumú kifejezése:

$$RSD = \left(\frac{s_r}{\bar{X}} \right) \cdot 100$$

Ahol:

$\bar{x}$: Az összes elvégzett mérés összesített átlaga.

6.7. Leíró statisztika készítése

A statisztikai elemzéshez leíró statisztikát készítettem, amiben a következő alpontok szerinti értékekre figyeltem.

6.7.1. Átlag ($\bar{x}$)

Bevonódás vizsgálat során nincs szükség súlyozni a várható értéket, így egy egyszerű átlag számítással kaptam meg az eredményeimet.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Ahol:

x_i : A vizsgálati eredmények értéke.

n : A vizsgálatok darabszáma.

6.7.2. Standard hiba (s_p)

Standard hiba számításra azért van szükség, mert ezzel megkapom, hogy a vizsgálatom eredményei mennyivel térnek el az átlagtól. Azaz, mennyire pontos a számított átlagom.

$$s_p = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Ahol:

s : Az eredmények szórása.

n : Az eredmények darabszáma.

6.7.3. Medián ($\tilde{x}$)

Medián érték megmutatta számomra a valós középértéket az átlaggal szemben. A mintavételezések száma páros szám volt, így a következő képlettel dolgoztam ki őket.

$$\tilde{x} = \frac{\frac{x_n}{2} + \frac{x_{n+1}}{2}}{2}$$

6.7.4. Szórás (s)

A leíró statisztikához arra is szükségem volt, hogy a bevonódási értékek önmagukban mennyire térnek el az átlagtól.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

6.7.5. Tartomány

Számomra egy fontos mutató volt a tartomány értéke, hiszen ez mutatja meg a maximum bevonódási érték és a minimum bevonódási érték közötti különbséget. A tartománnyal látom, hogy milyen szélsőséges kimozdulásokat

kapok bizonyos vizsgálatoknál. Ellentétben pedig, hogy milyen szűk tartományon mozognak a bevonódási értékek.

7. Vizsgálati eredmények

A 6. pontban leírt matematikai összefüggéseket alkalmazva elemeztem a vizsgálati eredményeket. Ezekből szeretnék kiemelni egy mészköves mintát, és egy vulkanikus

mintát. Hiszen a 3.3. pontban látható volt, hogy mekkora különbség van bevonódás meghatározásában világosabb és a sötétebb árnyalatú szemcsék között.

7.1. Mészköves minta bevonódási elemzése

Tisztán látható, hogy a 3. táblázat alátámasztja a világosabb színű mintákra jellemző pontosabb bevonódási érték meghatározását. A fotókon egyértelmű, és kontrasztos volt a különbség a bitumenes és a bevonatlan felületek között. Így a program mérési bizonytalansága is figyelemre méltóan alacsony. ($s_r = 0,52\%$)

A mintavételezésből eredő bizonytalanság szintén alacsony értéket mutatott. ($s_L = 1,21\%$)

Szeretném kiemelni a kiterjesztett mérési bizonytalanság eredményét. ($U = 2,63\%$)

Úgy gondolom, ez a leglátványosabb eredmény, hiszen ebből derül ki, hogy összességében mennyivel pontosabb az általunk kidolgozott eljárás a szabvány által meghatározott érvényben lévő vizsgálattal szemben. A szemrevételezés, becslés, majd átlagolás és kerekítés mind-mind torzít az eredményen. Végző soron pedig a meghatározott eredményünknek óriási bizonytalansága lesz. Ezzel szemben az én eljárásom pedig 2,63 % mérési bizonytalansággal bír, ami kisebb, mint a végső 5% kerekítési határ az EN 12697-11 szerint.

Mészköves minta	
r	1,53%
s_r	0,52%
s_L	1,21%
s_R	1,32%
U	2,63%
RSD	0,71%
Várható érték	73,11%
Standard hiba	0,27%
Medián	72,94%
Szórás	1,21%
Tartomány	5,33%
Minimum	71,00%
Maximum	76,33%
Darabszám	20

3. táblázat Mészköves minta statisztikai elemzése
Forrás: Saját eredmény



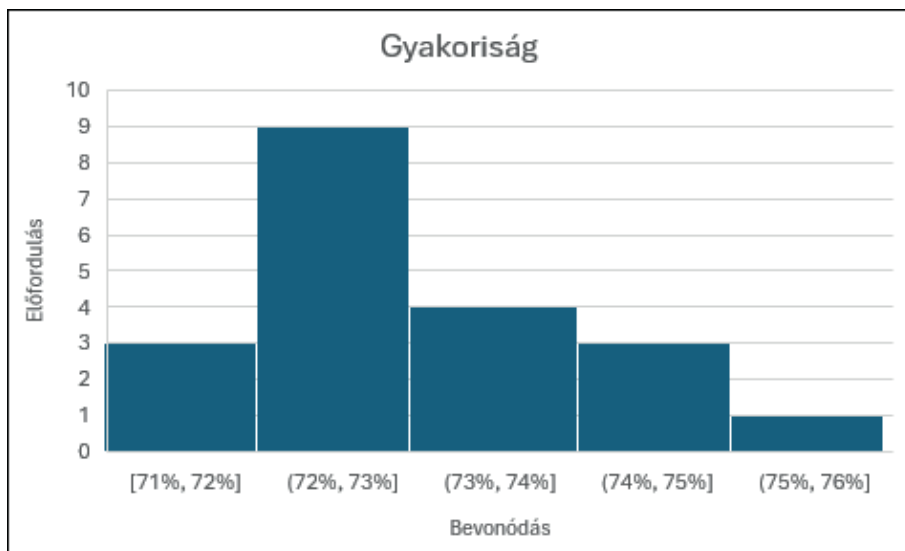
13. ábra Mészköves minta
Forrás: Saját kép

A 14. ábrán szereplő diagram pedig jól mutatja a világos kövekből vett minták konzisztenciáját 20 fényképezés és digitális kiértékelés során. 20 fénykép során láthatóvá válik,

hogy már az első 5 minta mértékadó tartományt határoz meg, amit később már kisebb valószínűséggel lép túl a többi fénykép.



14. ábra Mészköves minta bevonódás vizsgálati eredményei
Forrás: Saját eredmény



15. ábra Mészköves minta bevonódási vizsgálat gyakorisági eredménye
Forrás: Saját eredmény

7.2. Vulkanikus eredetű kőzet bevonódási elemzése

A vulkanikus kőzetből készült minták a bevonódási értékének megállapítása kérdéses tud lenni, hiszen közel sem olyan kontrasztos, mint a világosabb kőzetű minták. Ahogy a 16. ábra mutatja, nehéz elkülöníteni minden esetben a bitumenes felületeket a szabad, sötét kőfelületektől.

Sajnos a vulkanikus kőzetű minták során eredményeim nem olyan egyhangúak, mint a kontrasztosabb színű, világosabb kőzetű mintáknál. Ebből eredően számomra is nehezebb volt a fedett és fedetlen területek arányának meghatározása.

A program mérési bizonytalansága ($s_r = 1,97\%$) bár nőtt, de ez az eredmény még mindig elfogadható. Elfogadhatónak azért merem állítani, mert ebből az tükröződik, hogy bár nehéz a bevonódás meghatározása ezeken a mintákon, a programnak a bizonytalansága kevesebb mint 2%. Azaz, az értékelő rendszer, jelen esetben a program, 2% pontossággal tudja megállapítani a bevonódás mértékét. Az emberi szemrevételezés, ami jelenleg érvényben van, nagy valószínűséggel nem lenne képes 2% pontossággal dolgozni. Ezt

alátámasztják a kérdőívben kitöltött értékek is. Nem említve emellett a különböző intézkedéseket, amik tovább torzítják a szemrevételezéssel meghatározott eredményt.

De akkor miért lettek pontatlanabbak az adatok, ha nem

a programmal van a gond? A válasz a mintavételezésben rejlik. Az elkészült fotók a valóságot tükrözik, de a kamerák nem tudnak olyan fényképeket készíteni, ahol a bitumenes és köves felületek teljesen tisztán elválnak egymástól.

Vulkanikus minta	
r	5,84%
Sr	1,97%
SL	5,38%
SR	5,73%
U	11,47%
RSD	2,88%
Várható érték	56,13%
Standard hiba	1,20%
Medián	57,42%
Szórás	5,38%
Tartomány	20,10%
Minimum	45,49%
Maximum	65,59%
Darabszám	20

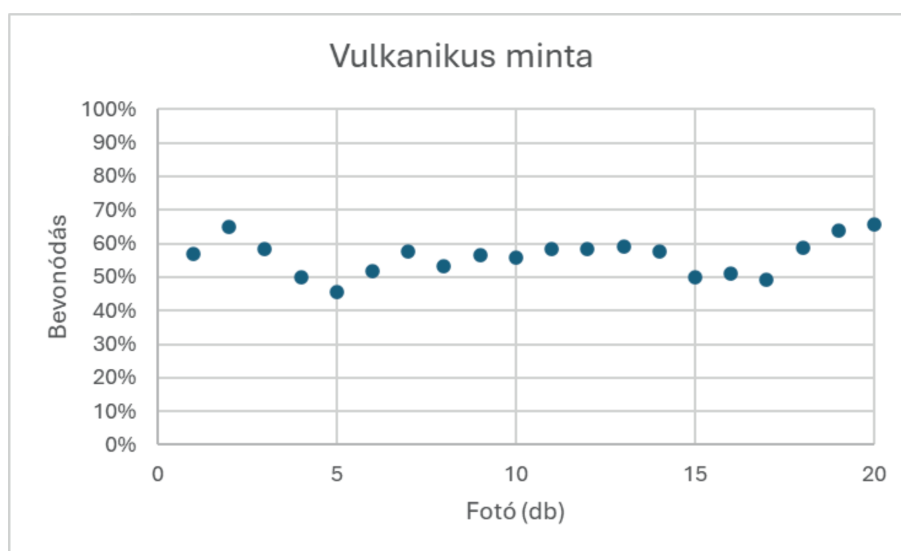
4. táblázat Vulkanikus minta statisztikai elemzése
Forrás: Saját eredmények



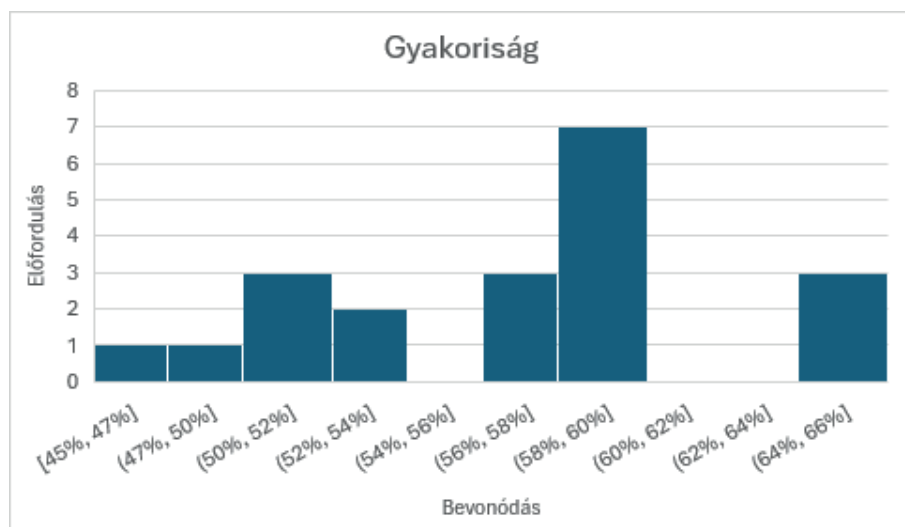
16. ábra Vulkanikus minta
Forrás: Saját képek

Fontos azt is számításba venni, hogy az EN 12697-11 szabvány nem említi a szemcsék több pozícióban történő vizsgálatát. Ebből eredően, ha az előírásnak megfelelően járunk el, akkor kizárólag egy oldalát látjuk a szemcséknek, egyetlen elhelyezési kombinációval. Ezért, bár egy "tág" mintavételezési

bizonytalanságot látunk, ez valószínűleg jóval szűkebb, mint a hivatalos vizsgálat által előírt mintavételezési bizonytalanság. A jövőben szeretném a mintavételezés módszerét fejleszteni és pontosítani, hogy a vulkanikus közetű mintákról is pontosabb adatokat kaphassunk.



17. ábra Vulkanikus minta bevonódás vizsgálati eredményei
Forrás: Saját eredmények



18. ábra Vulkanikus minta bevonódási vizsgálat gyakorisági eredménye
Forrás: Saját eredmények

A 17. ábrán látható, hogy ezen esetben is szintén az első 5 minta meghatározza a mértékadó tartományt, amit a többi vizsgálat eredménye nem lép túl. Emellett látható,

hogy a nagy tartományt okoz a 2. és 5. minta, de a minták 80%-a az 50% és 60% által közrefogott tartományban helyezkedik el.

Irodalomjegyzék

https://www.researchgate.net/publication/337752460_Evaluation_of_adhesion_between_bitumen_and_aggregate_with_the_digital_image_processing_method

https://www.researchgate.net/publication/333824991_Determination_of_Bitumen_Stone_Coverage_by_Digital_Image_Processing

https://www.researchgate.net/publication/282763942_A_bitumen_es_kozet_kozotti_tapadas_-_Fejlesztési_torekvesek_a_bitumen_minosegenek_javitasa_erdekeben

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681416301043>

<https://onestopasphalt.com/blog/what-is-asphalt-raveling/>

https://www.h-a-d.hr/pubfile.php?id=1109&utm_

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2013.855312>



ASZFALT HUNGÁRIA KFT.

SZÉKHELYE: 2225 ÜLLŐ, BELTERÜLET, 3753 HRSZ
KÖZPONT: 1133, BUDAPEST PANNÓNIA UTCA 59-61.

ELÉRHETŐSÉG: ASZFALTHUNGARIA@ASZFALTHUNGARIA.HU

TELEPHELYEINK:

5561 Békésszentandrás, Külterület hrsz 0247/11
4029 Debrecen, Mikepércsi út 0530/80 hrsz
2462 Martonvásár, 0152/1 hrsz
8800 Nagykanizsa, 0632 hrsz – mobil keverő
7100 Szekszárd, Palánki út 41
2225 Üllő, Belterület 3753 hrsz
9442 Fertőendréd, külterület 0157/17. hrsz.

HAPA TAGVÁLLALATAI

Aszfalt Hungária Kft

H-2225 Üllő
belterület, hrsz. 3753.
www.euroaszfalt.hu

Budapest Közút Zrt.

H-1115 Budapest
Bánk bán u. 8-12.
www.budapestkozut.hu

Colas Közlekedésépítő Zrt.

H-1113 Budapest
Bocskai út 73.
www.colas.hu

Colas Út Zrt.

H-1113 Budapest
Bocskai út 73.
www.colas.hu

DÉLÚT Kft.

H-6750 Algyő
Kastélykert u. 171., Pf: 4
www.delut.hu

Duna Aszfalt Zrt.

H-6060 Tiszakécske
Béke u. 150.
www.dunaaszfalt.hu

Hazai Építőgép Társulás Zrt.

H-2351 Alsónémedi
Öregországút utca 2405/4 hrsz.
www.epitogep.com

He-Do Kft.

H-3261 Pálosvörösmart
Hagyóka u. 1.
www.he-do.hu

MENTO Környezetkultúra Kft.

H-3526 Miskolc
Mechatronikai Park 14.
www.mentokft.hu

Mészáros M1 Útépítő Kft.

H-8086 Felcsút, Fő utca 65.

MOL Nyrt

H-1117 Budapest
Dombóvári út 28.
www.mol.hu

OMV Hungária Ásványolaj Kft.

H-1117 Budapest
Október Huszonharmadika utca 6-10.
www.omv.hu

PENTA Kft.

H-2100 Gödöllő
Kenyérgyári u. 1/E.
www.pentakft.hu

„SOLTÚT” Kft.

H-6320 Solt
Kecskeméti u. 34.
www.soltut.hu

STRABAG Aszfalt Kft.

H-1117 Budapest
Gábor Dénes utca 2. (Infopark D ép.)
www.strabag.hu

Swietelsky Magyarország Kft.

H-1016 Budapest
Mészáros utca 13.
www.swietelskymagyarorszag.hu

Úteppark Útépítő és Mélyépítő Kft.

H-8000 Székesfehérvár
Szlovák utca 6.
www.uteppark.hu

VértesAszfalt Kft.

H-2800 Tatabánya
Réti út 174. Fsz. 4.
www.vertesaszfalt.hu

V-Híd Építő Zrt.

H-1146 Budapest,
Hermina út 17.
www.vhid.hu

Vértes-Út Kft.

H-2890 Tata
Takács utca 1.
www.vertesut.hu

HAPA TÁRSULT TAGVÁLLALATAI

Andreas Kft.

H-2030 Érd, Rizling u. 26.

www.andreas.hu
Ammann Austria GmbH

Anzing 33

A-4113 St. Martin im Mühlkreis

www.ammann.com/de
AUMER Kft.

H-2035 Érd

Bikszádi utca 6.

www.aumer.hu
BHG Bitumen Kft.

H-1117 Budapest

Gábor Dénes utca 2.

Infopark D épület

bhg.hu@bauholding.com
BME Út és Vasútépítési Tanszék

H-1111 Budapest

Műegyetem rkp. 3.

epito.bme.hu/
ut-es-vasutepitesi-tanszek
EuroAszfalt Kft

H-2225 Üllő

belterület 3753 hrsz.

www.euroaszfalt.hu
EULAB Kft.

H-2120 Dunakeszi

Székesdűlő 135.

www.eulabkft.hu
Huntraco Kereskedelmi és Szolgáltató Zrt.

H-2040 Budaörs

Kamaraerdei út 3.

www.huntraco.hu
HSH-Chemia Kft

H-1139 Budapest, Pap Károly u. 4.

www.hsh-chemie.com
INNOTESZT Kft.

H-2225 Üllő

Zsarókahegy hrsz. 053/30.

[www.euroaszfalt.hu/leanyvallalat/](http://www.euroaszfalt.hu/leanyvallalat/innoteszt-kft)
innoteszt-kft
INNOVIA Kft.

H- 2541 Lábatlan

Dunapart 1605/2 hrsz.

Labo WTC Hungary Kft.

iroda@labowtc.hu

www.labowtc.hu
leiCON Kft.

Iroda: H-1047 Budapest

Attila utca 12-18. B115

www.leicon.hu
Mélyépítő Labor Kft.

H-2142 Nagytarcsa

Csonka János u. 6.

[www.facebook.com/](http://www.facebook.com/melyepitolabor/)
melyepitolabor/
Magyar Közút Nonprofit Zrt.

H-1024 Budapest

Fényes Elek u. 7-13.

internet.kozut.hu
MAB Tarnóca Kőbánya Kft.

H-2045 Törökbálint

Torbágy u. 20.

www.tarnoca.hu
MKIF Magyar Koncessziós Infrastruktúra Fejlesztő Zrt.

H-2040 Budaörs,

Akron utca 2.

www.mkif.hu
Omya Hungária
Mézőkőfeldolgozó Kft.

H-3300 Eger,

Lesrét utca 71.

www.omya.com
OTYS Úttechnika Kft.

H-2660 Balassagyarmat

0101/21 hrsz.

www.otys.hu
Profi-Bagger Kft.

H-2051 Biatorbágy

Tormásirét u. 6.

www.profi-bagger.hu
Rec-Plus Kft.

H-3200 Gyöngyös

Felső-Újvárosi utca 2.

www.recplus.hu
Rettenmaier Austria GmbH & Co.KG

A-1230 Wien

Rudolf-Waisenhorn-Gasse 18.

www.jrs.de
Rodcont Kft.

H-1221 Budapest

Orsovai u. 10/a

www.rodcont.hu
STA Aszfalt-Tech Kereskedelmi és Szolgáltató Kft.

H-1043 Budapest

Dugonics u. 11.

www.sta.hu
TPA HU Kft.

H-1097 Budapest

Illatos út 8.

www.tpaqi.com
TLI Zrt.

H-2030 Érd,

Bikszádi utca 6.

www.tli.hu
Wirtgen Budapest Kft.

H-2363 Felsőpakony

Erdőalja u. 1.

www.wirtgen-group.com/budapest



OMV



OMV Starfalt® PmB RC - a visszanyert aszfalt (RAP) kötőanyaga

Fenntartható és gazdaságos

Hatékony újrahasznosítás – akár 50% RAP is beépíthető.
Csökkentett karbonlábnyom – kevesebb nyersanyag és hulladék.
Javított kötőanyag-tulajdonságok – növeli a penetrációt,
csökkenti a marás utáni töréspontot.

Bővebb
információért
olvassa be a
QR kódot:

