



Tapadásjavító mészhidráttal kezelt alacsony zúzottüveg adagolású AC 11 kopó keverékek teljesítménye a hazai szabályozás alapján

Rosta Szabolcs¹

¹ Széchenyi István Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Műszaki tudományi Kar,
Közlekedéscépesítési és Vízmérnöki Tanszék

E-mail: rosta.szabolcs01@gmail.com

DOI: [10.36246/UL.2020.2.05](https://doi.org/10.36246/UL.2020.2.05)

KIVONAT

Ez a tanulmány Magyarországon közepes forgalmi terhelésű utak esetén alkalmazható AC 11 kopó (F) B 50/70-es aszfaltbeton keverék teljesítményének meghatározásával foglalkozik különböző zúzottüveg adagolások mellett (a kőanyagkeverékre vonatkoztatva 15 m% és 30 m%). Továbbá egy tapadásjavító adalékszer, mészhidrát (a kőanyagkeverékre vonatkoztatva 4 m%) aszfaltkeverékre gyakorolt hatását hivatott feltárni. A keverékeket laboratóriumi keveréssel állítottuk elő, törekedve arra, hogy azok szemeloszlásai minél jobban megközelítsék egymást, az összehasonlíthatóság érdekében. Első lépésként ezen keverékek optimális bitumentartalmai kerültek meghatározásra Marshall-eljárással, legalább 3 különböző bitumentartalom adagolás mellett. Ezt követően vizsgáltuk az optimális bitumentartalmú keverékek vízérzékenységet, merevséget és plasztikus deformációs hajlamát az *MSZ EN 12697-12:2009 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. Próbatetek vízérzékenysége és az MSZ EN 12697-26:2012 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. Merevség, C melléklet hasító-húzó vizsgálat, illetve MSZ EN 12697-22:2003 A1.2008 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. Keréknyomképződés kiskerekű berendezés „B” módszer szerint*. A tanulmány végén a laboratóriumi vizsgálatok kiértékelését figyelembe véve egy ajánlás található a fentiek szerint előállított üvegaszfalt keverékek felhasználhatóságára, a hazai szabályozás értelmében.

Kulcsszavak: üvegaszfalt, zúzott hulladéküveg, mészhidrát, vízérzékenység, plasztikus deformációs hajlam

ABSTRACT

This study deals with the determination of the performances of AC 11 kopó (F) B 50/70 asphalt mixture at different crushed glass dosages (15 m% and 30 m% based on the aggregate mass), which is used in Hungary for surface courses in case of medium traffic loads. Furthermore, it is intended to reveal the effect of hydrated lime as an anti-stripping additive (4 m% based on the aggregate mass), on the asphalt mix. The mixtures were prepared by laboratory mixing with the aim of making their partial size distribution very similar to each other in the field of comparability. As a first step, the optimal bitumen contents of these mixtures were determined by the Marshall method with at least 3 different bitumen contents. Subsequently, the water sensitivity, stiffness and plastic deformation behaviour of the mixtures with optimal bitumen content were investigated by the *MSZ EN 12697-12: 2009 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 12: Determination of the water sensitivity of specimen and MSZ EN 12697-26: 2012 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 26: Stiffness. Annex C IT-CY, and MSZ EN 12697-22: 2003 A1.2008 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 22: Wheel tracing test. Small wheel equipment, according to method "B"*. At the end of the study, taking into account the evaluation of the laboratory tests, there is a recommendation for the usability of the glass asphalt mixtures produced as described above, based on the Hungarian regulation.

Keywords: crushed waste glass, glassphalt, hydrated lime, water sensitivity, plastic deformation behaviour

Rosta Szabolcs

Széchenyi István Egyetem Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola PhD hallgatója (Közlekedésepítési és Vízmérnöki Tanszék). A Duna Aszfalt Zrt. innovációs főmérnöke.

1. BEVEZETÉS: ZÚZOTT HULLADÉKÜVEG ÚJRAHASZNOSÍTÁS LEHETŐSÉGEI

A gyors gazdasági növekedés és a folyamatosan növekvő fogyasztás mellett nagy mennyiségű üveghulladék keletkezik. Az ökológusok számára nem feltétlenül a meglévő hulladék jelenti a legfőbb problémát, hanem az, ha hiányoznak azok az intézmények és technológiák, amelyek segítségével a hulladék keletkezését el lehetne kerülni, és amelyekkel meg lehetne oldani a hulladék visszaforgatását és újrahasznosítását. A hulladékgazdálkodás a 21. század legjelentősebb feladata, amely magába foglalja a hulladék keletkezésének megelőzését, csökkentését, a keletkezett hulladék elkülönítését, gyűjtését, kiválogatását és hasznosítását, valamint a nem hasznosítható hulladék környezetszennyezés nélküli átmeneti tárolását és ártalmatlanítását (Jony et al., 2011).

Ezen feladatok megoldására már elméletek, modellek jelentek meg, amelyet az úgynevezett 4R környezetvédelmi intézkedési program fogalmaz meg hierarchiába rendezve:

- **Reduce:** a hulladék keletkezési helyeinek felkutatása és a hulladék mennyiségének csökkentése a hulladékok, esetleg veszélyes anyagoknak más, kevésbé problémás anyagokkal történő helyettesítése.
- **Reuse:** hulladék *újrahasználat*a. Különösebb fizikai beavatkozás nélkül ugyanarra a célra, ugyanarra a tevékenységre használjuk.
- **Recycling:** Az anyagok szelektív gyűjtése után azok *újrahasznosítása*a. Az anyagában történő hasznosítás, hulladékból újra terméket állítunk elő.
- **Recovery:** A hulladéknak vagy valamely összetevőjének a termelésben vagy szolgáltatásban történő felhasználása. Ez a folyamat irányulhat hulladékban lévő különböző anyagok visszanyerésére, újrafeldolgozására (anyagában történő hasznosítására), vagy a hulladék anyagaiban rejlő energia felhasználására (energetikai hasznosítás).

Bármely infrastruktúra ágazat építése kapcsán számos hulladék hasznosítási módszer terjedt már el világszerte. Ezek előnye nem csak az, hogy csökkentik a hulladékok mennyiségét, hanem jelentős megtakarításokat lehet velük elérni az új építési anyagokkal szemben (Hawken et al., 2013).

Az üveg használatba történő visszaforgatásának két módja van. Az első a visszaváltás, amikor szortírozzák szín szerint a beérkező üvegeket, majd megfelelő tisztítás és fertőtlenítés után újratöltik azokat (*újrahasználat*). Másik, amikor a vegyes hulladékot szortírozzák színük és fajtájuk szerint, megtisztítják, majd beolvasztásra kerülnek, majd új üvegterméket állítanak elő belőlük (*újrahasznosítás*). Jelenleg ezen felhasználás a legelterjedtebb a világon. Bár az összegyűjtött hulladéküveg összmennyisége nagy lehet, azonban a teljes mennyiségnek csak a töredékét lehet új üveg előállításához felhasználni az újrafeldolgozás szigorú korlátai miatt. Az újrafeldolgozás során figyelembe kell venni a hulladéküveg származását. Az üvegeket hagyományosan különböző színekben kell összegyűjteni és rendezni. A nem szétválogatható üvegek jellemzően törnek vagy összekeverednek az összegyűjtési fázisban olyan hulladéküveg anyagokkal, melyek tartalmaznak szennyező anyagokat (fa, műanyag, fém, papír, kavics, kerámia). Ezen frakciókat már nem mindig gazdaságos szétválogatni, viszont technikailag alkalmatlanok az új üveg gyártására. Mindössze 5-20 g nem újrahasznosítható üveg elegendő 1 tonna újrahasznosítható üveg szennyezéséhez (Afshinnia et al. 2015). Ezen problémának egyik vonzó megoldása a zúzott hulladéküveg használata építési anyagok alternatívájaként, például aszfaltkeverék alapanyagként. Mint ahogy sok más másodlagos hasznosítási terület az építőiparban, a zúzott hulladéküveg felhasználása nehezen dönthető el, hogy *újrahasználati*, vagy *újrahasznosítási* tevékenység lenne. Általában inkább újrahasznosítás kategóriába sorolják többször, a felhasználási cél

megváltoztatása miatt. Az viszont bizonyos, hogy sok esetben gazdaságosabb megoldást jelenthet, mint az új üveg előállítás. A hazai üvegfeldolgozás helyzetéről és másodlagos hasznosítási lehetőségekről részletesebben a diplomamunkámban számoltam be (Rosta, 2019).

2. TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS ÉSZAK-AMERIKAI TAPASZTALATOK

A világon egyre nagyobb problémát jelent az üveghulladékok keletkezése. Hulladéküveg újrahasznosítás egy alternatívája lehet, ha azt megfelelő frakciókra törve és osztályozva az aszfaltkeverékek alapanyagául szolgáló zúzottkövek helyettesítésére használjuk fel. Az ilyen módon gyártott melegen hengerelt aszfaltbeton keverékeket nevezzük üvegaszfaltnak.

A pályaszerkezeti aszfaltrétegekben nedvesség jelenlétében a kötőanyag-szemcse tapadása lecsökkenhet, anélkül, hogy láthatóvá válna a kötés megbomlása, mivel a víz befolyásolhatja a kötőanyag kohéziós erejét. A víz okozta legkorábbi problémák (melyek szélsőséges éghajlat és nagy forgalom esetén még korábban jelentkeznek) a szemek kipergése, hámlás, további kohézió csökkenés következtében felületi repedések, később pedig kátyúk kialakulása.

Zúzott hulladéküveg felhasználása aszfaltkeverékekben az 1960-as évek végétől kezdődött el az Amerikai Egyesült Államokban. Legkorábbról származó kutatás Missouri-Rolla Egyetem egy környezetvédelmi szervezettel folytatott projektje, amelyben 33 db üvegaszfalt (glasphalt) próbaszakaszt építettek. 1969 és 1972 között 19 különböző kanadai és egyesült államokbeli szervezet épített üvegaszfaltot a régióban, ahol az átlagosan adagolt üveg mennyisége 1970-ben 73%-volt míg 1972-ben 46 %-ra csökkent ez a mennyiség. Toledo és New York City voltak az első városok, ahol a legnagyobb mennyiségben üvegaszfaltot használtak fel. Az üvegaszfalt korai használatának nagy része parkolók aszfalt alaprétegei voltak, azonban városi utak és lakó utcák esetében is használták, kisebb mennyiségben kopórétégeként is (Chesner et al. 1987).

1983-ban egy Christman nevezetű mérnöki tanácsadó cég dolgozott Connecticut állam néhány városával egy olyan kopórétég kialakításán, amely 50% -ban osztályozott tört üvegből állt. Az 50% -os zúzottüveg keveréket tesztelték. A beépített kopórétég csúszási ellenállás vizsgálata alapján úgy döntöttek, hogy az üvegtartalmat 20-25% közöttire csökkentik. Egy 1991-es Christman-jelentés szerint az üvegburkolatok „elfogadható használhatóságot” biztosítanak (Dembicki, 1992).

1988-ban a New York állam Közlekedési Minisztériuma kísérleti jelleggel épített be New York Cityben üvegaszfaltot 5-15%-os finom rész (<4,75 mm) helyettesítéssel. Brooklynban a New York City tulajdonában lévő és működtetett aszfaltüzem minőségellenőrzési vezetője 1989 után végeztette el a csúszásellenállási teszteket, és az üvegaszfalt megfelelt a normál keverékkel szemben támasztott követelményeknek. Ezt követően 1990-1995 között New York Cityben kb. 250 000 t üvegaszfalt került beépítésre.

1994-ben összesen 6 állam jelentett üveg felhasználását aszfaltkeverék beépítéseknél, azonban 10 másik állam számolt be kutatási tevékenységről üvegaszfalt témakörben. (Maupin, 1998) Üvegaszfalt felhasználása a 2000-es évek elején Egyesült Államok néhány államában (K-i partvidék), Kanada néhány tartományában, Japánban, és néhány Európai országban volt lehetséges, mivel ezekben az országokban, vagy régiókban került valamilyen formában a nemzeti útépítési előírásban a zúzottüveg, mint aszfalt alapanyag (Su et al., 2002).

A kezdeti baltimore-i és New York-i szakaszokon repedések jelentek meg. Ennek kapcsán a 1990 körül vizsgálatokat hajtottak végre, amelyben felülvizsgálták az 1970-es években beépített üvegaszfaltokat. A korai kutatók potenciális problémaként azonosították a lapos és hosszúkás szemcséket, amelyek hozzájárulhatnak a szemek kipergéséhez, tapadóképesség csökkenéséhez, a gyenge csúszásellenálláshoz, a rendellenesen magas gumiabroncsok kopásához és a túlzott csillogáshoz. Mivel az üveg nem képes abszorbeálni a bitument, és mivel az üveg is "hidrofil", a nedvességkárosodás különös aggodalomra ad okot, különösen akkor, ha a magas százalékos arányokat és nagy névleges szemnagyságú üvegzúzalékalmazokat használnak aszfalt kopórétegek esetén. A korai kutatók közül sokan azt javasolták, hogy mészhidrátot kell a keverékhez adni, ami tapadásjavító tulajdonságokkal rendelkezik. A felülvizsgált adatokból arra a következtetésre jutottak, hogy korai üvegaszfalt

projektekben jellemzően használt magas adagolási mennyiség (a keverék 25 tömegszázalékát meghaladó) és magas névleges szemcseméretű üvegüzalék halmazok (12,7 mm-nél nagyobbak) valószínűleg hozzájárultak a legtöbb, az 1970-es években beépített üvegaszfalt próbaszakaszok kipergési, és repedezési problémáihoz (Chesner et al., 1987; Petrarca, 1988; Hughes, 1990; Chesner, 1992; Dembicki, 1992; Flynn, 1993)

A legfontosabb ajánlásokat és követelményeket az Egyesült Államok Közlekedési Minisztériumához tartozó Szövetségi Autópálya Felügyelet (FHWA) már 1990-ben kiadta, és azóta többször is megújította azt. Számos államban jelenleg is érvényben van. A FHWA legfontosabb előírásai és a korai kutatók megállapításai a következők:

- Az üveg szemcsék lassabban hűlnek le, mint az aggregátumok, azok hővezető képességük különbségei miatt. Ez lehet előnyös tulajdonság hideg időben, mivel több időt biztosít a tömörítésnek. Melegebb időjárás esetén azonban a keverékek instabilak lehetnek az építési hengerek alatt.
- A vizsgált felületek megfelelő csúszásellenállósági tulajdonsággal rendelkeztek.
- Szemeloszlás: kopórétegekben használt zúzottüveg halmazok névleges szemnagysága maximálisan 4,75mm és feleljen meg az AASHTO T27 követelményeinek. Nagyobb névleges szemnagyságú halmazok 4,75-15,3 mm aszfalt alaprétegek keverékeihez alkalmasak.
- Testsűrűség: Az üveg kb. 10-15%-kal alacsonyabb térfogatsúllyal rendelkezik az általánosan használt útépitési zúzottköveknél. Ennek köszönhetően az üvegaszfalt testsűrűsége alacsonyabb, az aszfaltbeton testsűrűségénél, amely nagyobb termelékenységet eredményezhet a kivitelezésnél.
- Mechanikai tulajdonság: az üveg törékeny anyag, a 4,75 mm-nél nagyobb szemcsék tömörítés hatására törhetnek, ezért javasolt kizárólag $D < 4,75\text{mm}$ halmazt használni kopórétegek esetén. Kevésbé érzékeny a nedvességre (0,3% és 0,4% közötti vízfelvétel).
- A csúszásellenállás vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy a hulladéküveg burkolatok az ajánlott csúszásellenállás vizsgálati határok közé esnek. Mindazonáltal a nagyobb méretű (>9,5 mm) hosszú lapos szemek nem használhatók, mert azok tömörítés hatására „besimulnak” és rontják a keverék csúszási ellenállását.
- A megfelelően zúzott üveg szögletes alakja és nagy súrlódási szöge (kb. 50°) hozzájárul a jó oldalirányú stabilitáshoz. Ez pozitív tulajdonság, különösen akkor, ha a keveréket fokozott fékezési és gyorsulási helyszínekre tervezik.
- Az üveg gyenge tapadóképességének javítása érdekében valamilyen tapadásjavító szer alkalmazása javasolt.
- Az AASHTO T283 Lottman teszt alapján igazolni kell minden esetben az üvegaszfalt keverékek megfelelőségét. (Vízérzékenység).
- 15 %-nál nagyobb adagolás esetén már számottevően megnőhet a burkolat fényvisszaverő képessége. Annak mértékét a nagyobb szemek használata még jobban befolyásolja. Esztétikai szempontból kedvező ez a tulajdonság, illetve éjszakai vezetésnél is optikai vezetést tud biztosítani gépjármű sofőrjének. Nedves felületen nappal viszont ez problémát okozhat. (FHWA, 1998)

3. KEVERÉKTERVEZÉS

A szakirodalom tanulmányozását követően meghatároztam a keverékeim típusát, az üvegadagolás mennyiségeit, a tapadásjavítószer típusát és adagolási mennyiségét.

A kutatás során egy AC 11 kopó (F) B 50/70 es keveréket vizsgáltam különböző zúzottüveg adagolással (a köanyagkeverékre vonatkoztatva 15 m% és 30 m%.) Vizsgáltam továbbá egy tapadásjavító szer, a mészhidrát hatását (köanyagkeverékre vonatkoztatva 4 m%). Így 5 különböző keveréket állítottam elő. Első körben meghatároztam ezen keverékek optimális bitumentartalmát

Marshall-eljárással. Majd az optimális bitumentartalmú keverékeken elvégeztem az e-UT 05.02.11:2018- *Útpályaszerkezeti aszfaltburkolatok keverékeinek követelményei* hazai előírásban foglalt teljesítmény vizsgálatokat (1. táblázat). Az előírt követelmények alapján értékeltém az alacsony üvegadagolással készített keverékek felhasználhatóságát különböző forgalmi terhelésű utak esetén.

AC 11 kopó				
Tervezési forgalom (F100 millió darab)	0-0,03	0,03-0,3	0,3-10	Vizsgálati módszer
Forgalmi terhelési osztály	A alatt	A, B	C, D, E	
Igénybevételi kategória	(P)	(N)	(F)	
Aszfaltkeverék jelzete	(N)		(F)	
Megnevezés	Aszfaltkeverék követelményei			
Kötőanyag-tartalom, tömeg%, legalább	5,3			MSZ EN 12 697-1, vagy MSZ EN 12 697-39
Hézagtartalom, V, térfogat%, legalább	2,5			MSZ EN 13 108-20C.1.2,2×50 ütés
legfeljebb	4			
Vízérzékenység, ITSR, %, legalább	80	80		MSZ EN 12 697-12 2×35 ütés, 15 °C
Maradó alakváltozási ellenállás, PRD _{AIR} , %, legfeljebb	–		7	MSZ EN 12 697-33 MSZ EN 12 697-22 kiskerekű, „B” módszer levegőn, 60 °C
Merevség, S, MPa, legalább	–		NR, megadandó	MSZ EN 12 697-26 IT-CY: 20 °C, 124 μs
Fáradás, ε ₆ , microstrain, legalább	–		NR, megadandó	MSZ EN 12 697-24 2PB-TR: 10 C, 25 Hz, vagy 4PB-PR: 20 °C, 30 Hz

1. táblázat: AC 11 kopó (N) B 50/70 és AC 11 kopó (F) B 50/70 jelű keverékek követelményei (e-UT 05.02.11:2018).

5 különböző keverék jelölése:

AC 11 kopó (F) B 50/70 jelölése: ¹AC11_0_²

AC 11 kopó (F) B 50/70+15% zúzottüveg jelölése: ¹AC11_15_²

AC 11 kopó (F) B 50/70+30% zúzottüveg jelölése: ¹AC11_30_²

AC 11 kopó (F) B 50/70+15% zúzottüveg + 4% mészhidrát jelölése: ¹AC11MH_15_²

AC 11 kopó (F) B 50/70+30% zúzottüveg + 4% mészhidrát jelölése: ¹AC11MH_30_²

Továbbá keverések során alkalmazott különböző szemeloszlásokat (¹sorszám) és bitumen tartalmakat (²százalék megadása) szintén feltüntettem a jelölésekben. A laboratóriumi vizsgálatokat az Eulab Laboratóriumi és Technológiai Kft. dunakeszi központi laboratóriumában végeztük.

3.1. ALAPANYAGOK ÉS KEVERÉKTERV MEGHATÁROZÁSA

A vizsgálatokhoz a Swietelsky Magyarország Kft. egyik típusvizsgálatát (SW DK 083 2016 AC 11 kopó (F) vettük alapul, amelynek a kővázát eruptív andezites nógrádkövesdi kőanyaghalmoz alkot. A keverékek előállításához OMW B 50/70 típusú utépítési bitument használtunk fel.

Szita méret (mm)	Áthullott tömegszázalék
---------------------	-------------------------

	Tatabánya Mészköliszt	Calmit Mészhidrát	Nógrádköves d NZ 0/2	Nógrádköves d NZ 0/4	Fer-Marik ZÜ 0/5	Nógrádköves d KZ 4/8	Nógrádköves d KZ 8/11
16	100	100	100	100	100	100	100
11,2	100	100	100	100	100	100	89
8	100	100	100	100	100	91	17
5,6	100	100	100	100	92	29	5
4	100	100	100	86	70	2	5
2	100	100	89	54	50	1	3
1	100	100	55	31	30	1	3
0,5	100	100	30	15	17	1	2
0,25	100	100	15	6	11	1	2
0,125	98	98	6	1	6	1	2
0,063	87,8	79,2	1,7	0,4	4,2	0,4	1,7

2. táblázat: A kőanyag-halmazok, a zúzottüveghalmaz, a töltőanyag és a tapadásjavító töltőanyag szemeloszlásai.

A keverékekhez Fer-Marik Kft.-től származó zúzottüveget vizsgáltam. A zúzottüveg és a többi kőanyagkeverék szemeloszlásai a 2. táblázatban láthatók. A zúzottüveg szemeloszlása kissé durvább a nógrádkövesdi NZ0/4-nél, továbbá az *e-UT 05.01.15:2018- Útépítési kőanyag-halmazok* útügyi műszaki előírás szerinti NZ, KZ, Z 0/4-es és ZK 0/8-as határértékek közé esik, előbbinél durvább, utóbbinál finomabb. A szemeloszlás tulajdonságára utalva a felhasznált zúzottüveg a 0/5-ös jelölést kapta. A töltőanyagként használt Tatabánya mészköliszt és Calmit mészhidrát szemeloszlása alapján elmondható, hogy a mészhidrát szemeloszlása kis mértékben durvább, azonban feleslegesen bitument felvenni képes apró szemek szinte teljesen egyenlő arányban vannak jelen a két töltőanyagban. (3. táblázat) D₁₀ szemmagyság mindkét esetben 0,003 mm finom iszap tartományba esik.

d _i -nél kisebb szemcsék [%]	homok			iszap			agyag			
	0,5	0,25	0,125	0,063	0,02	0,0063	0,002	D ₆₀	D ₃₀	D ₁₀
Calmit Mészhidrát	100	100	98	79,2	77,1	26,3	0	0,011	0,007	0,003
Tatabánya Mészköliszt	100	100	98	87,8	72,1	40,3	0	0,008	0,004	0,003

3. táblázat: A mészköliszt és mészhidrát agyag iszap tartalmának meghatározása.

Az MSZ EN 1097-6:2013 *Kőanyag-halmazok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata 6. rész: A testsűrűség és vízfelvétel meghatározása* szerint meghatároztuk a felhasznált alapanyagok testsűrűségeit és vízfelvételeit.

	Tatabánya Mészköliszt	Calmit Mészhidrát	Fer- Marik ZÜ 0/5	Nógrádkövesd NZ 0/2	Nógrádkövesd NZ 0/4	Nógrádkövesd KZ 4/8	Nógrádkövesd KZ 8/11
Testsűrűség ρ_a [Mg/m³]	2,801	2,789	2,488	2,855	2,863	2,837	2,821
Testsűrűség ρ_{ssd} [Mg/m³]			2,455	2,751	2,759	2,74	2,737
Vízfelvétel WA₂₄ [%]			0,4	2,2	2,1	2,0	1,7

4. táblázat: Alapanyagok testsűrűsége és vízfelvétele.

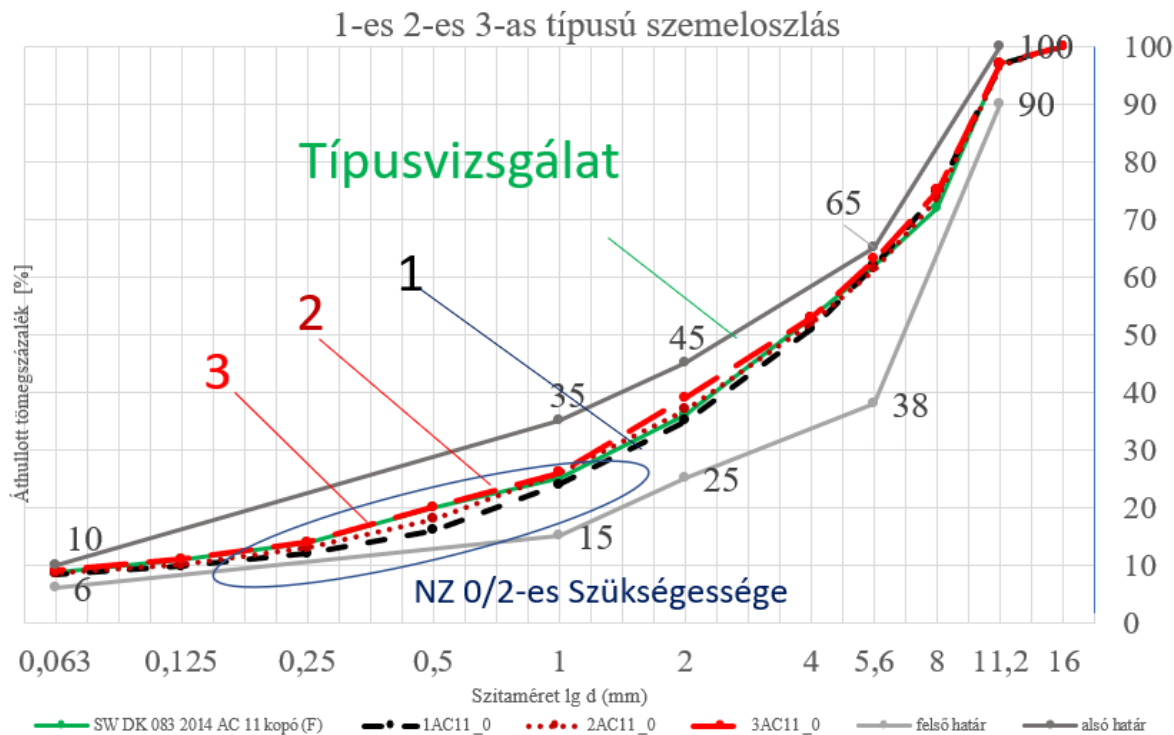
A 4. táblázatból látható, hogy a zúzottüveg testsűrűsége ~13%-kal alacsonyabb az NZ 0/4-es zúzottkő testsűrűségénél, és cca~ 80%-kal alacsonyabb vízfelvétele az összehasonlításban szereplő andezit zúzottkőnél.

3.2. OPTIMÁLIS BITUMENTARTALOM MEGHATÁROZÁSA MARSHALL ELJÁRÁSSAL

Az aszfaltkeverékek optimális bitumentartalmát Marshall-eljárással határoztam meg. A keverékek optimális bitumentartalmát legalább 3 összetétellel előállított próbatestek vizsgálatain alapultak. A

vizsgált jellemzők empirikus jellegűek, elsősorban a hézagtartalom, de emellett egyszerűbb mechanikai tulajdonságok voltak, mint a Marshall-stabilitás és a Marshall-folyás.

A keverékek optimális bitumentartalmának meghatározásához, mindegyik esetben a lépcsőközüket 0,3%-os bitumentartalomra határoztam meg. A referencia szemeloszlást a SW DK 083 2016 AC 11 kopó (F) típusvizsgálatban megadott szemeloszlás adta.



1. ábra: 1-es 2-es 3-as típusú szemeloszlás.

Első lépésben meghatároztam a referenciakeverék optimális szemeloszlását 1-es 2-es 3-as egyre finomodó szemeloszlás közül (1.ábra), majd mindegyiknek az optimális bitumentartalmát 4,9%, 5,2%, 5,5%, 5,8% bitumentartalom mellett. Az optimális bitumentartalmat 3,5-os hézagtartalomra terveztük, azokat kis mértékben korrigáltam a Marshall-vizsgálatokból született eredmények alapján.

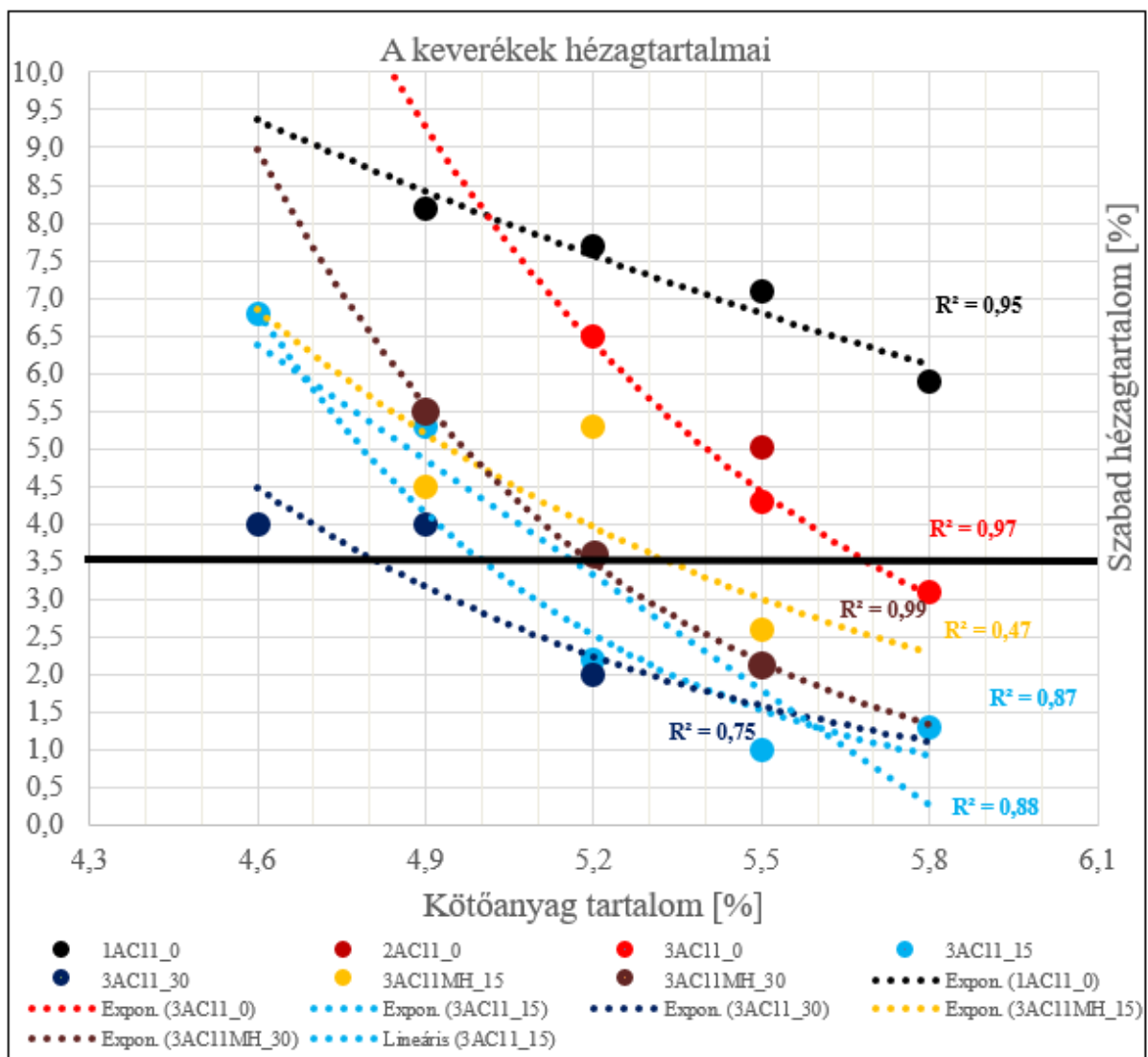
Az optimális bitumentartalmú referencia keverék: 3AC11_0_5,7.

Ezt követően meghatároztam a 3AC11_15, 3AC11_30, 3AC11MH_15, 3AC11MH_30 keverékek zúzottüveg, zúzottkő, mészköliszt és mészhidrát adagolási arányait, hogy azok szemeloszlásai a lehető legjobban illeszkedjenek a 3-as típusú szemeloszláshoz (ez ±1%-os felezőszítán áthullott anyagmennyiségek mellett volt lehetséges). A keverékekhez a bemérési arányokat az 5. táblázatban foglaltam össze.

Keve- rékek jelölése	Tatabánya ML	Calmit Mészhidrá- t	Fer- Marik ZÜ 0/5	Nógrádköves d NZ 0/2	Nógrádköve sd NZ 0/4	Nógrádköve sd KZ 4/8	Nógrádköve sd KZ 8/11,2	Σ
1AC11_0	9	0	0	0	49	13	29	100
2AC11_0	9	0	0	5	42	14	30	100
3AC11_0	9,5	0	0	10	37,5	14	29	100
3AC11_15	9	0	15	7,5	27	12,5	29	100
3AC11_30	8,5	0	30	10	12	11,5	28	100
3AC11MH_15	5	4	15	7,5	27	12,5	29	100
3AC11MH_30	4,5	4	30	10	12	11,5	28	100

5. táblázat: Különböző alapanyagok adagolási mennyiségei a kővázra vonatkoztatva tömegszázalékban, keverékenként.

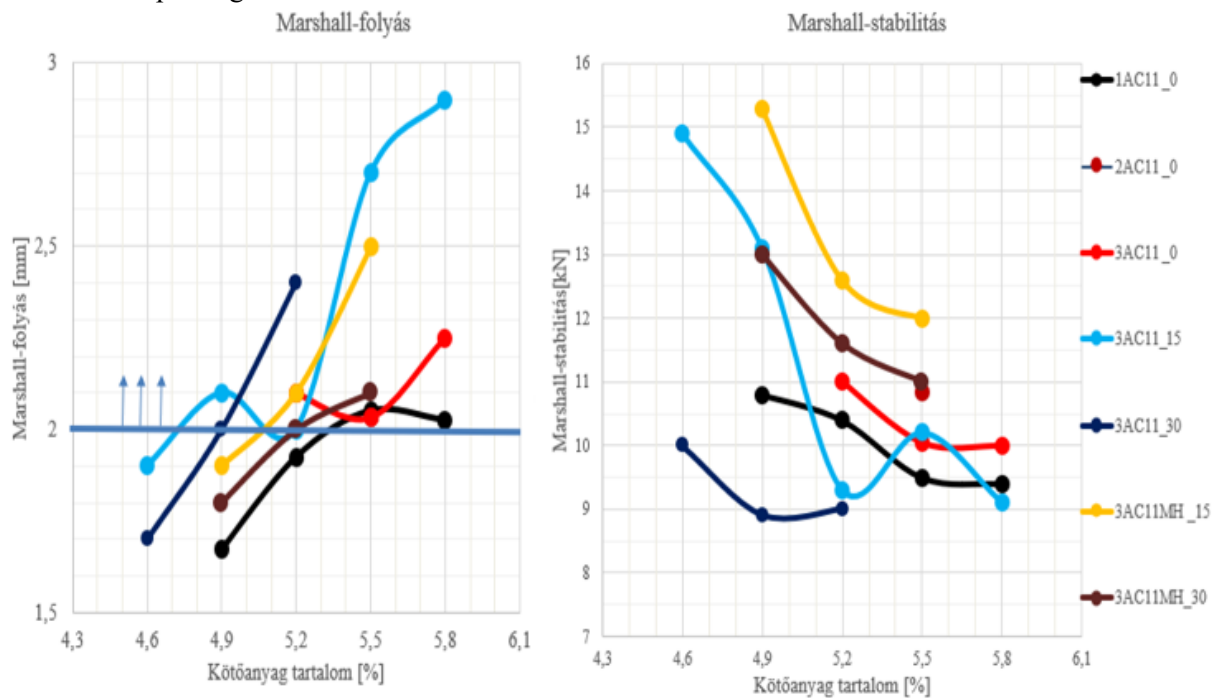
Ezt követően meghatároztam a négy üvegaszfalt keverék optimális bitumentartalmát. A pontos bitumentartalom kiválasztásához lineáris és exponenciális regressziós görbéket használtam (a hézagtartalmakat ábrázoltam a bitumentartalom függvényében), és vizsgáltam, hogy a görbék hol metszik a 3,5%-os hézagtartalmat. A 3AC11MH_15 keverékeknél a trend nem szoros $R^2=0,47$ determinációs együttható mellett, annak ellenére, hogy a hézagmentes testsűrűség és szabad hézagtartalom vizsgálatok a megengedett terjedelmek között maradtak. Itt feltételezhető, hogy egyéb mérési vagy beadagolási hiba történt az 5,2%-os bitumentartalmú keverék esetén. Meg kell jegyezni, hogy mindegyik esetben hasonló szorossággal illeszkedtek a vizsgálati eredmények a lineáris regressziós görbére is. Számottevő különbség a 3AC11_15 esetén prognosztizálható hiszen exponenciális regresszió esetén $R^2=0,87$ és lineáris regresszió esetén $R^2=0,88$, viszont az optimális bitumentartalom az első esetben 5,0 m% míg a második esetben 5,2 m%, ami már jelentősebb különbséget jelent (a többi esetben tizedre kerekítve ugyanazok az eredmények adódtak). A keverékek szabad hézagtartalmait a bitumentartalom függvényében a 2. ábrán látható.



2. ábra: A keverékek hézagtartalmait a bitumentartalom függvényében.

Az MSZ EN 12697-34:2004+A1:2008 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. Marshall-vizsgálatból származó Marshall-stabilitás és folyás kikerült a nemzeti értékelési rendszerünkől, azonban az ASTM D 1559 (2008) Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixture using Marshall Apparatus szabványban leírtak alapján közepes forgalmi igénybevétel esetén ($10^4 - 10^6$

ET) stabilitási értékre minimum 5 336 N, míg folyás értékekre 2-4,5 mm az elvárható teljesítmény aszfaltbeton kopórétegek esetén.



3. ábra: A keverékek Marshall-folyás és Marshall-stabilitás értékei a kötőanyagtartalom függvényében.

Marshall-folyás minimumának elérése érdekében, a 3AC11_30 jelű keveréknek 0,2 m%-os bitumentartalom növelését hajtottam végre. A 3AC11_15 jelű keveréknél a Marshall-folyás teljesítése, és a burkolati hézag eredményeinél alkalmazott exponenciális és lineáris függvényből származó bizonytalanság miatt 5,2 m%-os bitumentartalmat állapítottam meg optimálisnak.

	3AC11_30	3AC11_15	3AC11MH_30	3AC11MH_15	3AC11_0
optimális bitumentartalom [%]	4,8→5,0	5,2	5,2	5,3	5,7

6. táblázat: A keverékek optimális bitumentartalmai.

Megfigyelhető, hogy a zúzottüveg növekvő adagolása mellett a keverékek bitumenigénye csökken. A kutatásban használt kötőanyag és kőanyagok használata esetén az optimális 5,7%-os bitumentartalom 15%-os zúzottüveg adagolás esetén 0,4-0,5%-kal csökken, míg 30%-os adagolás esetén kb. 0,5-0,7%-kal. A jelenséget azzal lehet magyarázni, hogy az üvegszemcsék minimális porozitása miatt, azok sokkal kevésbé képesek bitument abszorbeálni a zúzottkövel szemben.

Ezt a tulajdonságát a keveréknek mások is megállapították. Egy jordániai kutatásban (Zaydoun et al., 2018) $D_{max}=4,75mm$ zúzottüveggel gyártott kopóréteg keveréket terveztek Marshall-eljárással. A tervezett 4%-os hézagtartalom mellett az optimális bitumentartalom a következőképp alakult:

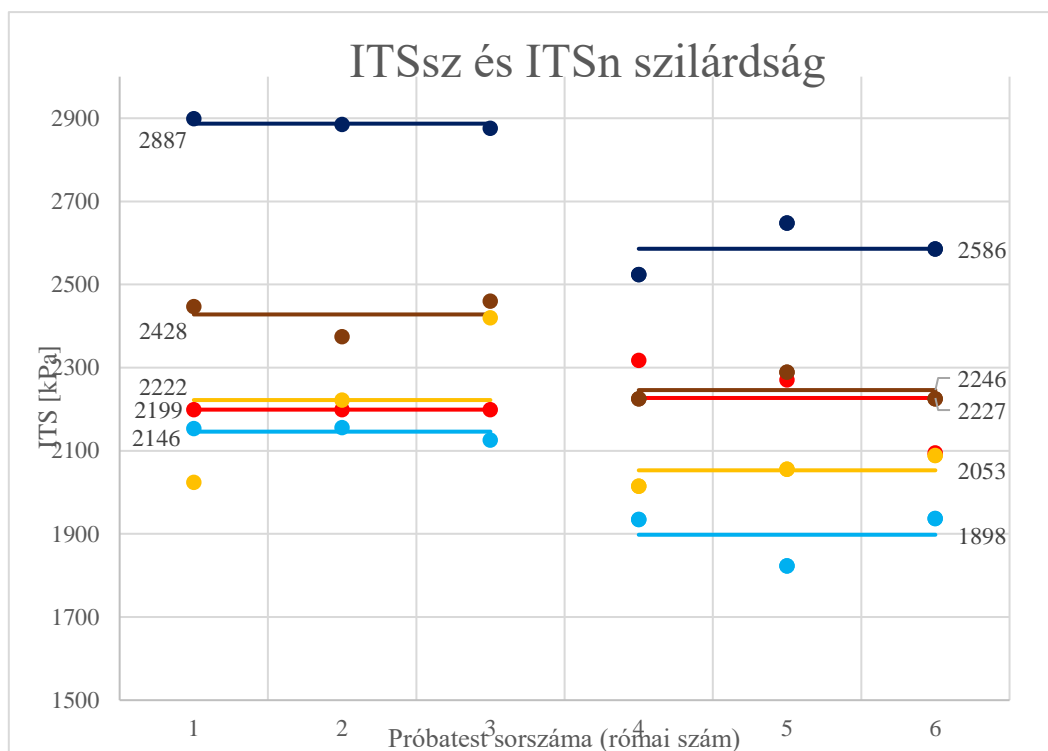
- 0%-os zúzottüveg → 5,80 % bitumen
- 5%-os zúzottüveg → 5,45 % bitumen
- 10%-os zúzottüveg → 5,50 % bitumen
- 15%-os zúzottüveg → 5,40 % bitumen
- 20%-os zúzottüveg → 5,35 % bitumen

Egy iráni kutatásban a finom zúzottüveg 20 %-os adagolása az optimális bitumentartalom 1,0%-os csökkenését eredményezte egy aszfaltbeton kopóréteg tervezésekor (Shafabakhsh et al., 2014).

4. VÍZÉRZÉKENYSÉG

Az aszfaltbeton kopórétegek felületéről a víz képes a pórusokon keresztül a rétegbe bejutni. Ha ez a pórusokból nem tud azonnal távozni, pangó víz alakul ki. Amikor a pályán egy nagy tömegű gépjármű halad egy ilyen rétegen, a jármű abroncsnyomásával arányos mértékben préselődik szét a víz az egyébként terheletlen felületek felé. A nagynyomású öblítő hatás képes kimosni az aszfalt habarcs részét, így a nagy szemcsék közötti érintkezési felületen létrejövő bitumen-szemcse kapcsolatot károsítani képes. Ezek ellen a hatások ellen a kötőanyag és a szemcse közötti tapadás minősége a mértékadó. Ennek ellenőrzésére alakították ki a vízerzékenység vizsgálatot, amely az EN termékszabványok megjelenésével típusvizsgálatként kötelezően elvégzendő vizsgálatná vált (Ambrus, 2006).

MSZ EN 12697-12:2009 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. Próbatestek vízerzékenysége vizsgálat eredményekből látszik (4. ábra), hogy a legmagasabb ITS értékek 30%-os zúzottüveg adagolása mellett adódtak. A 15%-os zúzottüvegű keverékek hasonló szilárdsággal rendelkeznek (nedves csoport), mint a referencia keverék.



4. ábra: ITS hasító-húzó szilárdság eredményei.

A hasító-húzószilárdság hányadost „vízerzékenység” ($ITSR = ITS_n / ITS_{sz} * 100$) tekintve (7. táblázat) a legmagasabb értéket a referencia keverék érte el. A kiváló vízerzékenységi ellenállást mutatja, hogy a nedves csoport átlagos ITS értékei 1,3%-kal a száraz csoport ITS értékeinél magasabbra adódtak. Ez ellentmond a vizsgálatban végrehajtott leromlási procedúra elvének, azonban jó szemcse-bitumen tapadással rendelkező keverékeknél ez az anomália előfordulhat. Megfigyelhető, hogy az üvegaszfalt keverékek is kedvező tulajdonságot mutattak a vizsgálat szerint. A mészhidrát tapadásjavító tulajdonsága nem mutatkozott olyan markánsan jelen esetben, mint amit több más kutató is bemutatott.

	3AC11_0_5,7	3AC11_15_5,2	3AC11_30_5,0	3AC11MH_30_5,2
ITSR [-]	101,3	88,5	89,6	92,4

7. táblázat: ITSR hasító-húzó szilárdság hányados eredményei.

Általában a kutatásokban a keverékek kb. 5-10 %-kal magasabb TSR értékekről számolnak be mészhidrát adagolás mellett. (Maupin, 1998; Lesueur et al., 2013; Behbahani et al., 2015) A kutatási eredményeim alapján mindössze 2-3 %-kal adódtak alacsonyabb értékek mészhidrát adagolása nélkül. Hozzá kell tenni, hogy a hivatkozott kutatásokban *módosított Lottman-teszt* alapján 150 mm átmérőjű zsirátoros tömörítéssel gyártott próbatesteken határozták meg a keverékek vízerzékenységét.

A szakirodalomban leírt üvegarány adagolás melletti vízerzékenység növekedés 15%-os adagolásig jelen esetben is megfigyelhető. Azonban további leépülés nem mutatkozott sem a mészhidrát adagolás nélküli 3AC11, sem a mészhidrát adagolással készített 3AC11MH keverékek esetén a fenti cikkekben tapasztaltakkal ellentétben.

5. IT-CY MEREVSÉG

A merevségi modulus (S_m) fontos tényező a pályaszerkezetek dinamikus terheléssel szembeni ellenállásának előrejelzésében. Az IT-CY merevségi modulus az axiális terhelés feszültség-feszültségváltozásának sebessége, amely az aszfaltkeverék viselkedését mutatja terhelési körülmények között. Mivel az aszfaltkeverékek viselkedése érzékeny a hőmérsékletre és a terhelés időtartamára, a merevségi modulus ezen paraméterek függvénye, amely kapcsolat különböző keverékek esetében eltérő.

A hazai előírásban előírtak szerint könnyű és normál igénybevételi kategóriában nincs előírt érték aszfaltbeton keverék esetén merevségre. Fokozott igénybevételi kategória esetén, megadandó paraméterként kell szerepeltetni *MSZ EN 12697-26:2012 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. Merevség, C melléklet hasító-húzó vizsgálat* IT CY merevségeit. A szabványban leírtak szerint 2x50 ütési Marshall-próbatesteken kell elvégezni a vizsgálatot 20 °C-on 124 µs erőfelfutás mellett. Az eredmények az 5. ábrán láthatók.

	3AC11_0_5,7	3AC11_15_5,2	3AC11_30_5,0		3AC11MH_30_5,2
S_m [Mpa] átlag	4935	6211	5882	6823	6420

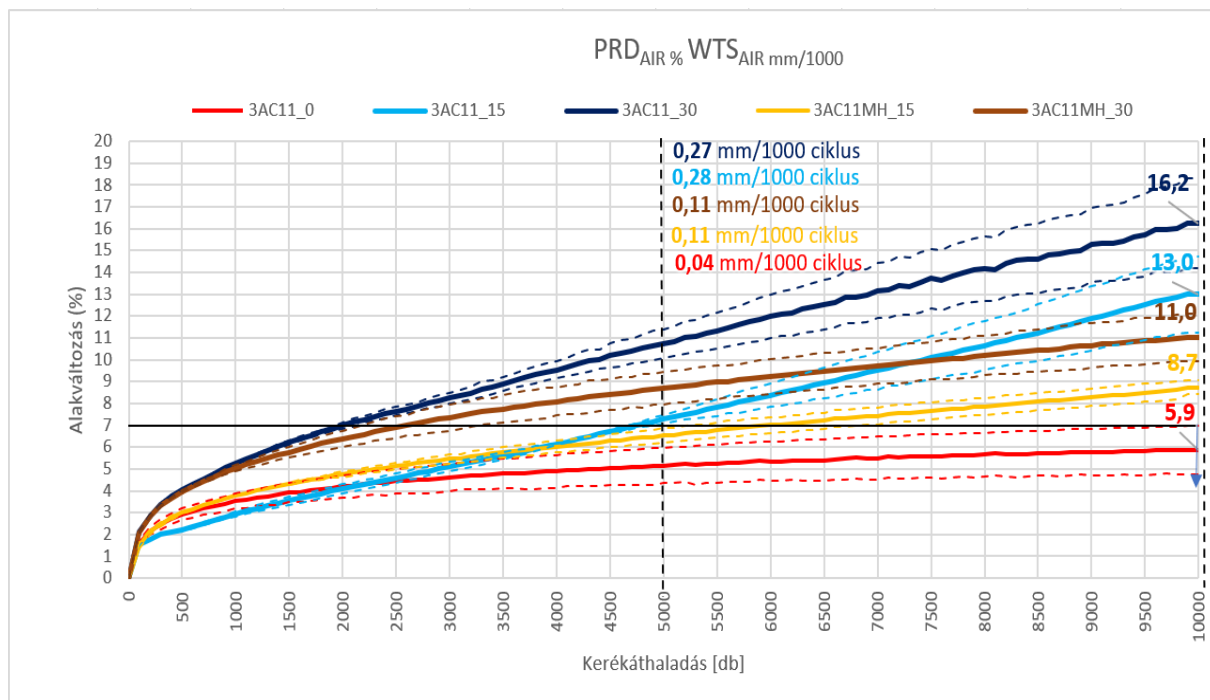
8. táblázat: IT CY merevség átlagai 20 °C 124 µs erőfelfutás esetén.

Összeségében elmondható, hogy a legalacsonyabb merevség értéke a referencia, 0%-os zúzottüveg adagolású keveréknek adódott. Megfigyelhető, a zúzottüveg adagolás 15%-ig merevség növekedést eredményezett. A referencia keverékhez képest 15% zúzottüveg adagolású keverék mészhidrát nélkül 25%-kal, míg mészhidrát adagolás mellett 38%-kal növelte meg a vizsgált merevségét a keveréknek. Azonban a 30%-os adagolás esetén kis mértékű visszaesés figyelhető meg a merevségek értékeiben. A megnövekedett merevség a zúzottüvegek aszfaltkeverékbe történő hatékony beágyazódásának köszönhető. A köváznak megnövekedett belső súrlódási szögét az üvegszemcsék nagyobb mértékű szögletessége adja, illetve a bazalt és üveg közti szilárdság különbség. Azonban feltételezhető, hogy egy optimális értéket elérve ezen szemcsék bősége miatt egyre több üvegszemcse-üvegszemcse kapcsolat alakul ki, amelyek nem képesek a bitument hatékonyan felvenni, így egymáson elcsúszni képesek, ami a merevség csökkenését eredményezheti. A merevségek ezen tendenciáját más kutatók is megállapították. A csökkenő tendencia kezdetét aszfaltbeton kopóréteg esetén $D_{max}=4,75$ mm zúzottüveg adagolás mellett kb. 15-20%-ban állapították meg. (Arabani, 2011; Shafabakhsh et al., 2014; Arabani et al., 2014). Megfigyelhető továbbá, hogy mészhidrát tapadásjavítóval kezelt keverékek merevségei 12-15 %-kal magasabbra adódtak, mint a tapadásjavító adalékszer nélkül készített próbatesteké.

6. KERÉKNYOMKÉPZŐDÉS

Az öt keverék plasztikus deformációs hajlamát az MSZ EN 12697-22:2003 A1.2008 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. Keréknyomképződés szabványban előírtak szerint hajtottam végre.

A hazai előírás alapján könnyű és normál igénybevételi kategóriában nem támaszt az előírás követelményt keréknyom-képződési ellenállás tekintetében. Fokozott igénybevétel esetén B 50/70-es útépítési bitumen használata mellett kiskerekű berendezéssel levegőn mért keverék fajlagos nyommélysége 10 000 terhelési cikluson maximálisan 7% lehet. A 6. ábrán látható a keverékeken mért fajlagos nyommélységek és azok átlagai. A referencia keverék ellenálló tulajdonságát mutatja, hogy teljesíti a fokozott igénybevételi kategória előírt értékét, amely határt egyik üveg adagozalt keverék sem érte el. Keréknyomképződés tekintetében megfigyelhető, hogy az üveg adagolási mennyiségének növekedése a vizsgált keverékek esetében keréknyomképződési hajlam növekedést eredményez. Azonban 4% mészhidráttal adagolás esetén ennek mértéke csökkent.



5. ábra: Fajlagos nyommélység a vizsgált keverékeken.

A 3AC11MH_15 keverék megközelíti az előírt határértéket, kissé módosított összetétellel feltételezhető, hogy teljesíteni is tudná azt. Érdekes, hogy a 3AC11_15 keveréknél még a 4 % mészhidráttal készült 30%-os üveg adagolású keverék is kedvezőbb keréknyomképződési ellenállást mutatott, ami még inkább annak jótékony hatását igazolja.

Érdekes megfigyelni a 3AC11_15 típusú keverékek görbéjének alakulását. A vizsgálatban megszokott trendtől egy gyors kezdeti alakváltozást követően már kevesebb, mint 1000 ciklus után figyelhető meg egy szinte teljesen lineáris szakasz. Ez általában és a többi keverék esetén is későbbi ciklusszám után következik be.

A 6. ábrán feltüntetett WTS_{AIR} (wheel tracking slope) a kondicionálási szakasz (5000 kerékáthaladás) utáni grafikonrész meredekségét jelenti milliméterben 1000 ciklusra számítva. Úgy kell meghatározni, hogy a 10000. ciklusban mért deformáció értékéből kivonjuk az 5000. ciklusban mért deformáció értékét, és elosztjuk 5-tel.

Ezt a paramétert nem befolyásolja a keverék kezdeti összenyomódása, ami nagyban függ a keverék térfogatváltozásából. Finomszemcsés keverékek esetén például a spanyol PG3-szabályozás 0,07- 0,1 mm /1000 ciklusú WTS határértéket határoz meg az EN 12697-22 kiskerekű berendezéssel vizsgált eljárásában, az éghajlati viszonyoktól és forgalmi terheléstől függően. (García et al., 2012)

A hazai szabályozás nem támaszt követelményt ezen paraméterrel szemben. A vizsgálataim alapján a referencia keverék 0,04 mm/1000 ciklus WTS érték, tehát kifejezetten ellenálló tulajdonságra utal. Érdekes megfigyelni, hogy a mészhidráttal előállított keverékek fajlagos nyommélység görbe

meredekségei és mészhidrát nélkül előállított üvegaszfalt keverékek 15% és 30 % zúzottüveg adagolás mellett szinte megegyeznek egymással. Az utóbbi viszont majdnem háromszor meredekebb deformációs meredekséget mutat. A 0,11 mm/1000 ciklus WTS értékek a mészhidrát tapadásjavító adalékszer, plasztikus deformációs hajlamra való jótékony hatását mutatja.

A mészhidrátot nem tartalmazó keverékek eredményei a szakirodalomban sokkal inkább kiemelt vízerzékenységi hajlamnál talán még érzékenyebb tulajdonságára hívják fel a figyelmet az üvegaszfalt keverékeknek.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálatban felhasznált zúzott hulladéküveg kb. 10-15%-kal alacsonyabb térfogatsúllyal rendelkezik az általánosan használt útépítési zúzottköveknél (a kutatásban használt Nógrádkövesd NZ 0/4 2,86 kg/Mg, míg Fer-Marik ZÜ 0/5 2,49 kg/Mg). Ennek köszönhetően az üvegaszfalt testsűrűsége alacsonyabb, az aszfaltbeton testsűrűségénél, amely nagyobb termelékenységet eredményezhet beépítéskor.

Alacsony (0-30%) zúzottüveg adagolási tartományban az üveg adagolásának növelése mellett a keverékek bitumen igénye csökken. A kutatásban használt kötőanyag és kőanyagok használata esetén az optimális 5,7%-os bitumentartalom 15%-os zúzottüveg adagolás esetén 0,4-0,5%-kal csökken, míg 30%-os adagolás esetén kb. 0,5-0,7%-kal.

A Marshall-vizsgálat eredmények tekintetében elmondható, hogy a keverékek optimális bitumentartalma mellett magas stabilitási értékeket kaptunk. Az ASTM 1559 (2008) Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixture using Marshall Apparatus szabványban előírt 5,36 kN -os határértéket mindegyik keverék kielégíti, ez főként a megfelelő minőségű kőanyagalmazok és üveghalmaz minőségét igazolja. A legmagasabb érték a mészhidrátal kezelt keverékekénél adódott. A Marshall-folyás eredményei is szintén kielégítik a szabványban előírt 2 mm-4,5 mm közötti követelményt, annak alsó határához közelítenek. A kapott eredmények 2,0-2,4 mm közötti szűk tartományban mozognak.

Finomszemcséjű zúzottüveg adagolása mellett ($D_{max}=4-5$ mm) kb. 15-20 %-ig az aszfaltkeverékek merevsége növekszik, kőváznak megnövekedett belső súrlódási szöge az üvegszemcsék nagyobb mértékű szögletessége, illetve a bazalt és üveg közti szilárdság különbség miatt. Egy optimumot elérve, azonban egyre több üvegszemcse-üvegszemcse kapcsolat alakul ki, amelyek nem képesek a bitument hatékonyan felvenni, így egymáson elcsúszni képesek, ami a merevség csökkenését eredményezi. Mészhidrát adagolás esetén a kötőanyag szemcse tapadás növekedése miatt a vizsgálatokból 10-15 %-os merevség növekedés látszik.

A vizsgálat szerint 30%-os zúzottüveg adagolásig a fokozott igénybevételi kategóriába tartozó ITSR 80% követelmény megfelelő keveréktervezéssel biztosítható, de mészhidrát adagolása mellett a vízerzékenység kockázata még jobban csökken, a keverék tartóssága kedvezőbben biztosítható.

30%-os adagolásig könnyű (P) és normál (N) igénybevételű utaknál kopórétegbe beépíthetőnek bizonyulnak a vizsgálati összetételű keverékek. Fokozott (F) igénybevételi kategória esetén alacsonyabb forgalmi terhelésű utaknál (C esetleg D) 5-15 %-ban tapadásjavítószer használata esetén (pl. mészhidrát) alkalmas lehet kopórétegben. Magasabb adagolás és adalékszer hiányában kritikus lehet, keréknyomképződési ellenállása a keveréknek.

8. IRODALOMJEGYZÉK

Arabani, M. 2011: Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete, *Constraction and Building Materials* 25, 1181-85; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.043>

Ambrus, K. 2006: Az SNM 46 jelű syntumen adalékkal készített aszfaltkeverék vizsgálatai, *Közúti és Mélyépítési Szemle* 56(1)

- Afshinnia, K., & Rangaraju, P. R. 2015: Influence of fineness of ground recycled glass on mitigation of alkali-silica reaction in mortars, *Construction and Building Materials* 81, 257-67; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.041>
- Behbahani, H., Ziari, H., Kamboozia, N., Mansour Khaki, A. & Mirabdolazimi, S. M. 2015: Evaluation of performance and moisture sensitivity of glassphalt mixtures modified with nanotechnology zycosoil as an anti-stripping additive, *Construction and Building Materials*, 78, 60-68; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.053>
- Chesner, W. 1992: *Waste Glass and Sewage Sludge Ash Use in Asphalt Pavement, Utilization of Waste Materials in Civil Engineering Construction*. American Society of Civil Engineering
- Chesner, W. & Petrarca, R. 1987: *Report on Glass Aggregate Pavement for the Browning Ferris Industries Merrick Transfer Station Located in Hempstead, New York*
- Dembicki, M. 1992: Glassphalt paves an alternate route, *Waste Age Magazine*, 23, 87-92
- Federal Highway Administration Research and Technology, 1998: *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, WASTE GLASS*, Publication Number: FHWA-RD 97-148
- Flynn, L. 1993: *Glassphalt Utilization Dependent on Availability, Roads and Bridges*
- García-Travé, G., Martínez-Echevarria, M. J., Rubio Gámez, M. C. & Moreno-Navarro, F. 2012: Bituminous mix response to plastic deformations: comparison of the Spanish NLT-173 and UNE-EN 12697-22 wheel tracking tests. *Dyna* 174, 51-57
- Hawken, P., Lovins, A. B. & Lovins L. H. 2013: *Naturalcapitalism: the next industrial revolution*, 1sted. US Green Building Council
- Hughes, C. S. 1990: *Feasibility of using recycled glass in asphalt*, Virginia Transportation Research Council, VTRC 90-R3 Charlottesville
- Jony, H. H., Al-Rubie, M. F. & Jahad, I. Y. 2011: The Effect of Using Glass Powder Filler on Hot Asphalt Concrete Mixtures Properties, *Engineering and Technology Journal* 29, 44-57
- Lesueur, D., Petit, J. & Ritter H. J. 2013: The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state of the art review, *Road Materials and Pavement Design*, 14, 1-16; <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.743669>
- Maupin, G. W. 1998: *Effect of glass concentration on stripping of glassphalt*, Virginia Transportation Research Council Final Report, 1-20
- Nazirizad, M., Kavussi, A. & Abdi, A. 2015: Evaluation of the effects of anti-stripping agents on the performance of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 84 (Supplement C) 348-53; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.024>
- Petrarca, R. 1988: *Use of Glassphalt*, Paper Presented to the Long Island Society of Asphalt Technologists
- Rosta, Sz. 2019: *Zúzott hulladéküveg felhasználhatóságának vizsgálata aszfaltbeton kopórétegben*, MSc. Diplomamunka Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 7-19
- Shafabakhsh, G. H. & Sajed, Y. (2014): Investigation of dynamic behavior of hot mix asphalt containing waste materials, case study, Glass cullet; *Case Studies in Construction Materials*, 96-103; <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2014.05.002>
- Su, N. & Chen, J. S. 2000: Physical properties of glass asphalt concrete and its applications. The first conference on roadway pavement, Taiwan, 12-26
- Zaydoun T. Abu Salem, Taisir S. Khedawi, Musa Bani Baker & Raed Abendeh 2018: Effect of Waste Glass on Properties of Asphalt Concrete Mixtures, *Jordan Journal of Civil Engineering*, vol. 11 (1)