

# AZ Aszfalt

A Magyar Aszfalttípari Egyesülés

hopa

hivatalos lapja

XXXI. ÉVFOLYAM 2024/1. szám



A nagy előadó terem  
az E&E 8. Kongresszusán  
a Millenáris park D épületében



Asphalt 100% recyclable



Az aszfalt 100%-ban  
újrahasznosítható

**2024**  
**június**



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:

SILBER-Nyomda Kft.-www.silbernyomda.hu

Hirdetésfelvétel:

Magyarországon a szerkesztőségben

Terjesztés: a szerkesztőségben keresztül  
2500 Ft/példány+postaköltség  
ISSN 1217-7830

## TARTALOMJEGYZÉK

**Skronka Gábor – Király Ákos – Károly Róbert – Piry Tamás —**

Különböző kötőanyagokkal készített, fáradásnak ellenálló aszfalt alaprétegviselkedése reológiai és aszfaltmechanikai szempontból..... 6

**Zsichla László —**

Az aszfaltkeverék szilárdságának jelentősége a méretezésben és mérésének lehetőségei..... 15

**Bortei-Doku Shaun —**

Közútkezelői feladatok az önvezető autók terén..... 25

**Szvoboda Krisztián – Zsichla László —**

Az aszfaltkeverék tervezésén belül a keverék-szilárdságot befolyásoló tényezők elemzése..... 32

**Dr. Rácz Ádám – Márkus Izabella —**

Andezitek törési- és anyagtulajdonságai közötti összefüggések vizsgálata egyszemcse törési módszerrel ..... 47

**Ferrini Marcio —**

Új „SZOLIDBATCH”: az Ammann nyelő kombinációja ..... 52

**Dr. Ing. Markus Spiegl— Ing. Siegfried Kammerer**

Az OMV PmB RC kötőanyag viselkedésének értékelése különböző tesztszakaszokon Ausztriában és Csehországban ..... 56

**Dr. Deepak Madan, Ph.D. – Ranjeet Sandhu –**

**Angela Staudinger – Dr. Krishna Srinivasan —**  
Bitumenbarát, fenntartható adalékanyag javítja a nyomványúsodási ellenállást ..... 63

**Kurt Birngruber —**

Újrahasznosított aszfalt használata hideg felületi zárásokban (DSK) ..... 73

## Kedves Kollégák,

Nagy örömmel számolhatok be arról, hogy az Euroasphalt & Eurobitume 8. Kongresszusa sikeresen lezajlott Budapesten. A Kongresszuson három napon keresztül 74 előadó mutatta be az aszfalt lehetséges jövőjéről az elképzeléseit.

A program izgalmas témákat vetett fel, két szekcióban párhuzamosan folytak az előadások. Remélem, néhány előadót meg tudok hívni a jövő év februári konferenciánkra is.

Engedjék meg, hogy a saját szavaim helyett az EAPA júliusi hírleveléből idézzek néhány gondolatot:

„Jó reggelt Olvasók!

Remélem, már a nyári vakáció módban vagy, ahogy a nap jobban süt! Miközben lezártunk egy hihetetlen budapesti eseményt, szánjunk egy pillanatot arra, hogy röviden elgondolkodjunk rajta, miközben megosztunk néhány frissítést a 8. E&E Kongresszusról, és várjuk, hogy mi következik.

Elképesztő pillanatokat örökítettünk meg a kongresszuson....”

„...**Fénypontok Budapestről!**

Íme néhány fontosabb kivonat és emlékezetes pillanat az eseményről:

• **Lenyűgöző részvétel:** Több mint 750 résztvevő több mint 50 különböző országból, köztük Japán, Ausztrália, Dél-Afrika, Malajzia, Szingapúr és az Egyesült Államok delegációja.

• **Nyüzsgő, élénk kiállítási terület :** 130 kiállító és szponzor mutatta be innovációit több mint 50 standon.

• **Elkötelezett előadások:** 74 előadó nyújtott betekintést a 14 ülés során, valamint három sikeres workshopon.

• **Szórakozás és hálózatépítés:** Az első #AsphaltRunners rendezvényen nagy volt a részvétel, és a Szépművészeti Múzeumban megrendezett vacsora emlékezetes este volt, több mint 400 résztvevővel.

Részt vett a budapesti E&E Kongresszuson, de lemaradt egy párhuzamos ülésről, vagy szeretné újra meghallgatni kedvenc előadásait? Jó hír az E&E Kongresszus résztvevőinek! Az összes ülés felvétele már elérhető a Kongresszus platformján a regisztrált résztvevők számára a következő három hónapban!

Lemaradt a budapesti rendezvényről? Sajnáljuk, hogy nem tudott személyesen csatlakozni hozzánk a közösségi eseményeken, a hálózatépítésen és a szemléletes foglalkozásokon. Ennek ellenére továbbra is hozzáférhet a munkamenet felvételeihez és előadásaihoz. Egyszerűen kattintson az alábbi linkre a regisztrációhoz, és fizessen a hozzáférésért. Ne feledje, hogy ez a különleges hozzáférés a nem résztvevők számára korlátozott ideig – július 31-ig – áll rendelkezésre.”

„Szívvel köszönöm a szerzőknek, a lektoroknak és a Műszaki Programbizottságnak az odaadást. Köszönetünket fejezzük ki a kiállítóknak, a szponzoroknak, a partnereknek és a Guarant Internationalnek is a megingathatatlan támogatásukért. És nagyon köszönöm mindenkinek, hogy sikeressé tette ezt a rendezvényt!”

Az előadások megtekintésének lehetősége a Kongresszus honlapján megtalálható.

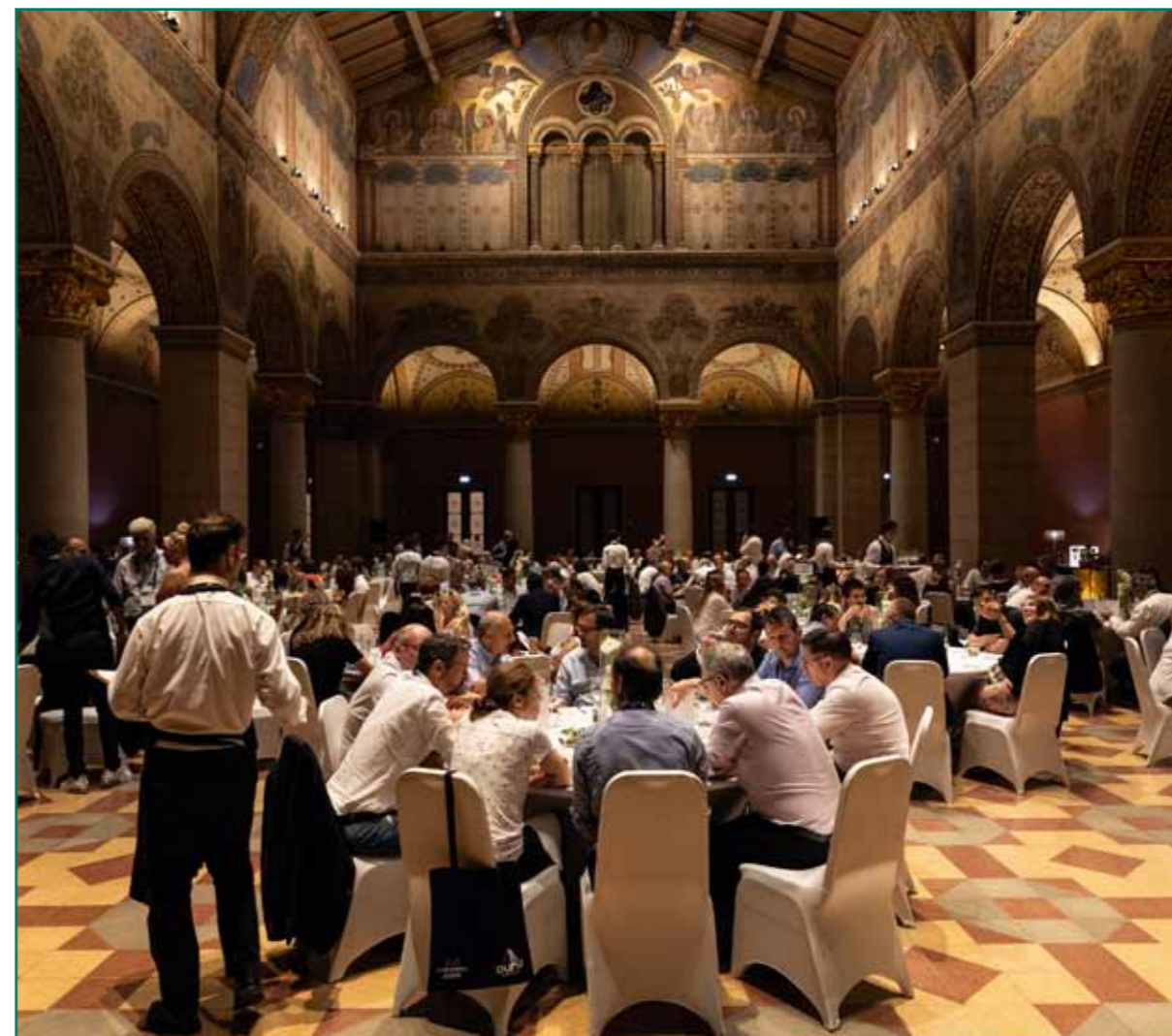
Remélem, a magyar résztvevők számára emlékezetes esemény volt, mert a külföldi résztvevőktől már a rendezvény alatt is rengeteg pozitív visszajelzést kaptunk.

Külön szeretnék köszönetet mondani a „Bemutatkozik Magyarország” HAPA magazin különdiadás elkészítéséért Dr. Töröcsik Frigyesnek, Varga Virágnak, Timár Józsefnek és Dr. Gáspár Lászlónak. A magyar és angol nyelvű kiadvány igen nagy sikert aratott.

Néhány fotóval szeretném érzékeltetni a kongresszus hangulatát.

Veress Tibor  
igazgató HAPA





# Különböző kötőanyagokkal készített, fáradásnak ellenálló aszfalt alapréteg viselkedése reológiai és aszfaltmechanikai szempontból

**Skronka Gábor**

technológus  
TPA HU Kft.



## 1 Előzmények

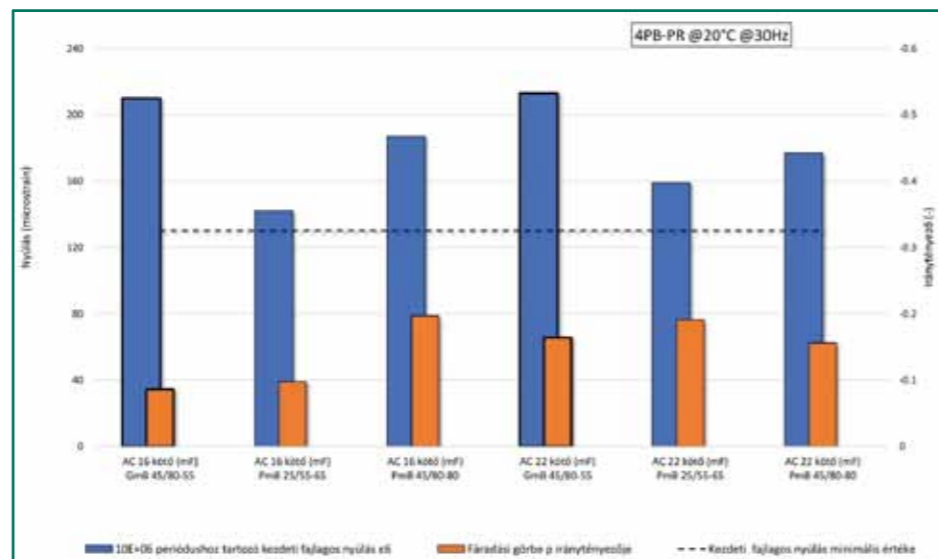
A 2020-ban a Csorna és Sopron országhatár közötti M85 gyorsforgalmi út 1. számú tervezési szakaszának részeként (Csorna II és Fertőd-Endrédmajor csp., 31+550 – 51+600 km) egy kísérleti szakasz „hosszú élettartamú pályaszerkezettel” („Perpetual Pavement”) épült meg a STRABAG konzern kivitelezésében [1].

A gyakorlatban tapasztaltak alapján elmondható, hogy a M85-ös gyorsforgalmi út kísérleti szakaszán aszfalt alapréteggént alkalmazott AC kötő (mF) PmB 45/80-80 HiMA típusú aszfalt fáradási eredményei, és a korábban több egyéb projekt keretein belül sikerrel alkalmazott MOL gyártmányú kémiailag stabilizált gumibitumennel (továbbiakban GmB) gyártott aszfaltok fáradási tulajdonságai hasonlóan kiválóak (1. ábra). Ennek következtében merült fel a kérdés, hogy az AC 16 kötő (mF) PmB 45/80-80 aszfaltkeverék kötőanyagát ki lehet-e váltani a magyar gyártású GmB 45/80-55 típusú gumibitumennel, továbbá hogy helyettesíthető-e fáradásellenálló réteggént a hazai gyakorlatban gyakrabban alkalmazott AC 22 kötő típusú aszfalttal az ott alkalmazott AC 16 kötő típusú aszfalt, szintén gumibitumennel.

szerzők: **Skronka Gábor – TPA HU**  
**Király Ákos – TPA HU**  
**Károly Róbert – TPA HU**  
**Piry Tamás – Strabag**

Az aszfaltkeverékek közötti összehasonlító vizsgálatok során kapott részletes aszfaltmechanikai paraméterek felhasználásával, egy az M85 gyorsforgalmi úton alkalmazott rétegrendhez hasonló, de gumibitumenes, hosszú élettartamú aszfalt alapréteggel készülő, a valós aszfaltmechanikai tulajdonságokat figyelembe vevő méretezésen alapuló pályaszerkezet kialakítása volt a cél.

A fenti elgondolások, a vizsgálati eredmények és az elkészült méretezés alapján az M6 autópálya Bóly-Ivándárda közötti tervezési szakaszon egy újabb „hosszú élettartamú pályaszerkezet” kísérleti szakasz építésére került sor a STRABAG konzern kivitelezésében.



1. ábra: Különböző típusú bitumeneket tartalmazó különböző aszfalttípusok négypontos hajlítóvizsgálat (4PB-PR) eredményei 20 °C-on 30 Hz-en meghatározva

## 2. A pályaszerkezet előnyei – várható élettartama

A hosszú élettartamú pályaszerkezetekről röviden annyit lehet összefoglalni, hogy ezek olyan pályaszerkezetek, amelyeket úgy terveznek és építenek meg, hogy a kopóréteg időszakos cseréjét leszámítva legalább 50 éves tervezési élettartam alatt ne legyen szükség nagymértékű szerkezeti beavatkozásokra.

Ennek kivitelezése műszaki szempontból azon az alapon nyugszik, hogy az aszfalt rétegek alsó szálában keletkező megnnyúlások okozta húzóigénybevételek minimálisra legyenek csökkentve, illetve hogy azok ne haladják meg az aszfalt kritikus fáradási anyagtulajdonságát, megelőzendő a pályaszerkezet aszfalt alaprétegből kiinduló, felszín felé terjedő repedések kialakulását.

Ezt kétféleképpen lehet elérni: a hagyományoshoz képest magas merevségű, vastag kötőréteg beépítésével, ami eleve nem engedi meg a túl nagy alakváltozásokat, illetve a húzóigénybevételeknek kitett aszfalt alapréteg fáradásnak ellenállóbb, magasabb bitumentartalmú, rugalmasabb, vékonyabb aszfaltréteg beépítésével.

Fontos megjegyezni, hogy a kopóréteg kötelező alkalmassági ideje 5 év, melynek folyamatos állapotvizsgálatát és szükség szerinti cseréjét el kell végezni ahhoz, hogy az alsó rétegek élettartama a számításoknak megfelelően.

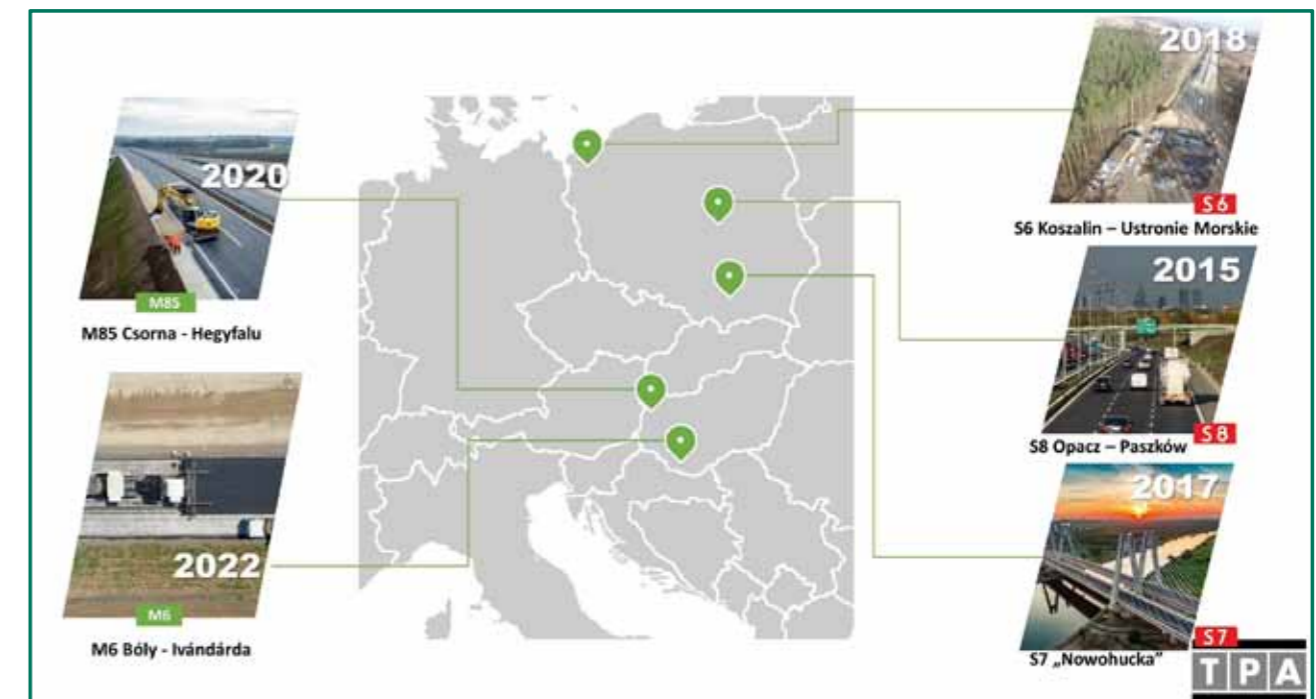
A „hosszú élettartamú pályaszerkezet” jelen esetben alkalmazott elméletét és szerkezeti felépítését a lengyel TPA dolgozta ki és egy 2014-es próbaszakasz építése után 2015-ben került alkalmazásra Lengyelországban az S8 gyorsforgalmi úton a helyi STRABAG kivitelezésében [2].

Az M85 projekthez hasonlóan, az M6 autópálya kísérleti pályaszerkezetének koncepciója is a lengyel TPA által kidolgozott, alábbi elgondolás alapján készült:

Hagyományosan a rugalmas aszfalt pályaszerkezet több, általában három rétegből áll, ahol a legalsó réteget (az aszfalt alapréteget) általában a legvastagabb és legmerevebb rétegek tervezik, amely durva aszfaltkeverékekből készül, viszonylag alacsony bitumentartalommal, normál kötőanyaggal. Az ilyen, viszonylag merev keverékek általában rossz fáradási ellenállással rendelkeznek. Ha az aszfalt pályaszerkezet aljára rugalmasabb és fáradással szemben ellenállóbb réteget tervezünk, akkor jelentősen, legalább 2-szeresére meghosszabbíthatjuk a burkolat élettartamát. A pályaszerkezet felépítésének új elgondolása szerint tehát a háromrétegű aszfalt szerkezet fáradásnak leginkább kitett alsó rétegét egy gumival modifikált, magas kötőanyag-tartalmú, rugalmas, fáradásnak ellenálló AC 16, illetve AC 22 aszfaltkeverékből kell megépíteni. A kötő- és kopórétegek az eddig is alkalmazott, hagyományos szerkezeteknek megfelelően a következő marad: a szilárdságot biztosító, nagymerevségű AC 22 keverékből készült kötőréteg, illetve a jó felületi tulajdonságokat biztosító SMA 11 keverékből készült kopóréteg.

Az M6 autópálya kísérleti pályaszerkezetének esetében kötőanyagként a magyar gyártású MOL GmB 45/80-55 típusú bitumen került alkalmazásra, amely könnyen elérhető, gazdaságos és a tapasztalatok szerint nagyon jó fáradási tulajdonságokkal rendelkezik [3].

A korábbi pozitív tapasztalatok alapján a már ismert és tesztelt hosszú élettartamú pályaszerkezet előremutató és innovatív alternatívának számít a tartós és fenntartható útpályaszerkezetek között. A gumibitumen fáradásnak ellenálló aszfalt alapréteggel történő felhasználása gazdaságilag előnyös alternatívát jelenthet a legtöbbször ilyen rétegekben használt, magasan polimertartalmú kötőanyagokkal szemben.



2. ábra: Hosszú élettartamú szakaszok eddig a STRABAG kivitelezésében

### 3. A projekt során felhasznált különböző kötéanyagok tulajdonságai

A projekt során felhasznált kötéanyagokat az előállításukkor használt alapbitumenen túl elsősorban a modifikálásukhoz használt modifikáló szerek és azok mennyisége különbözteti meg.

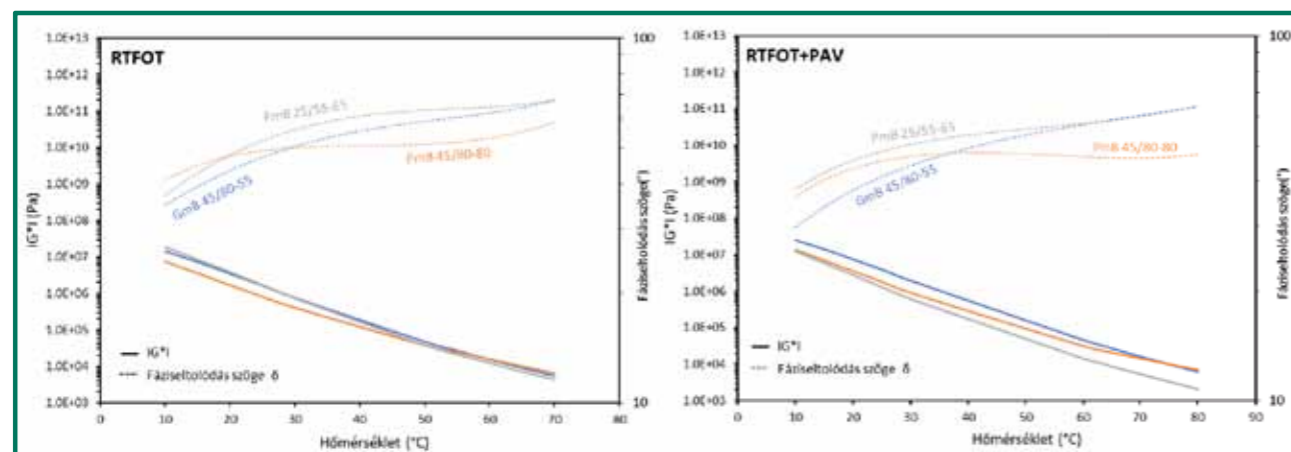
A polimerrel modifikált bitumenek (PmB) előállításakor modifikálószerként a legtöbb gyártó a rugalmas tulajdonságokkal rendelkező polisztirol-polibutadién-polisztirol blokk polimert (SBS) használja. A PmB 25/55-65 bitumenhez viszonyítva a magas polimer koncentrációjú PmB 45/80-80 HiMA bitumenre jellemző a kedvezőbb rugalmassági és fáradási tulajdonságok [4].

A MOL által gyártott gumibitumenben a gyártó megfogalmazása szerint a gumiőrlemény nem csupán inaktív töltőanyagként van jelen, hanem a kémiai degradálás és mechano-kémiai diszpergálásnak köszönhetően valódi modifikálószerként javítja az alap bitumen tulajdonságait [3, 5]. Hasonlóan a polimerrel modifikált bitumenekhez, a gumival modifikált bitumenekre (GmB) is jellemző a nyomvályúsodási és a fáradási hajlam javulása.

Empirikus tulajdonságaik alapján (1. táblázat) elmondható, hogy magas hőmérsékleten a vizsgált kötéanyagok közül a GmB 45/80-55 bizonyult a leglágyabbnak, míg a PmB 45/80-80 HiMA a legszilárdabbnak.

1. táblázat: A vizsgált kötéanyagok alapvető empirikus tulajdonságai

Jellemzők	Mértékegység	GmB 45/80-55	PmB 45/80-80	PmB 25/55-65
Penetráció, 25 °C-on	(0.1 mm)	57	50	45
Lágyuláspont	(°C)	59,5	93,0	80,9
Fraass-töréspont	(°C)	-20	-20	-15
Rugalmas visszaalakulás, 25 °C-on	(%)	55,0	97,0	93,0
Maradó penetráció RTFOT után	(%)	78	80	62
Lágyuláspont-növekedés RTFOT után	(°C)	6,8	3,0	7,9



3. ábra: A komplex nyírási modulusának ( $|G^*|$ ) és fáziseltolódás szögének ( $\delta$ ) hőmérsékletfüggése

Keményedéssel (öregedéssel) szembeni ellenállásuk alapján a PmB 25/55-65 volt legkevésbé ellenálló, míg a PmB 45/80-80 HiMA a legellenállóbb. Fraass-töréspontjuk alapján mind a PmB 45/80-80 HiMA, mind pedig a GmB 45/80-55 kiváló alacsony hőmérsékleti tulajdonságokkal rendelkezik. Rugalmas visszaalakulásuk szerint a két SBS-modifikált PmB bizonyult a legrugalmasabbnak 25 °C-on.

A három vizsgált kötéanyag komplex nyírási modulusának ( $|G^*|$ ) és fáziseltolódás szögének ( $\delta$ ) hőmérsékletfüggése (3. ábra) dinamikus nyíróreométer (DSR) segítségével lett meghatározva.

Abban a mélységben, ahol a fáradásnak ellenálló aszfalt réteg jellemzően található, Magyarország klimatikus viszonyaiban a hőmérséklet általában 0 és 30 °C között mozog [6], így a gumibitumen magas hőmérsékleten várható potenciálisan kisebb ellenállása a maradó alakváltozásokkal szemben [7] várhatóan nem jelent gondot.

Magas hőmérsékletek mellett, RTFOT rövid távú, és RTFOT+PAV hosszútávú öregítés után a PmB 45/80-80 HiMA mutatott jobb rugalmassági tulajdonságokat (alacsonyabb fáziseltolódás, nagyobb rugalmasság). Azonban, 30–40 °C alatti hőmérsékletek esetén már a GmB 45/80-55 bizonyult rugalmasabbnak

A vizsgált kötéanyagok fáradási jellemzői a lineáris amplitúdó söprés (Linear Amplitude Sweep - LAS) vizsgálat segítségével lettek meghatározva, mely vizsgálatot az AASHTO TP 101-14 szabvány foglalja magába. A kötéanyagok fáradás tulajdonságai mind rövid távú öregítés után (RTFOT), mind pedig hosszútávú öregítés után (RTFOT+PAV) meg lettek határozva.

A LAS vizsgálat előnyei közé sorolható, hogy a segítségével meghatározott ún. fáradási élettartam index (Nf) nem csak különböző hőmérsékleten, de különböző megnyúlási szintek mellett is számolható. A teljes aszfaltréteg vastagságának növelése esetén azzal lehet számolni, hogy a burkolat terhelésekor az aszfaltréteg alsó szálában kisebb megnyúlások, azaz kisebb fáradási igénybevételek keletkeznek. Következésképpen a LAS vizsgálat eredményeiben a 2,5%-os megnyúlási igénybevételeknél meghatározott fáradási tulajdonságok olyan burkolatokra vonatkoznak, amelyek aszfalt rétegeinek összvastagsága meghaladja a 10 cm-t, míg az 5,0 %-os értékek a 10 cm-nél vékonyabbakra vonatkoztathatók.

A vizsgált kötéanyagok fáradási jellemzői alapján megállapítható, hogy a PmB 45/80-80 HiMA kötéanyag mutatja a legjobb fáradási eredményeket 10 °C-on rövid távú (RTFOT) és hosszútávú öregedés (PAV) után egyaránt, míg a GmB 45/80-55 volt a második, amit a PmB 25/55-65 követett.

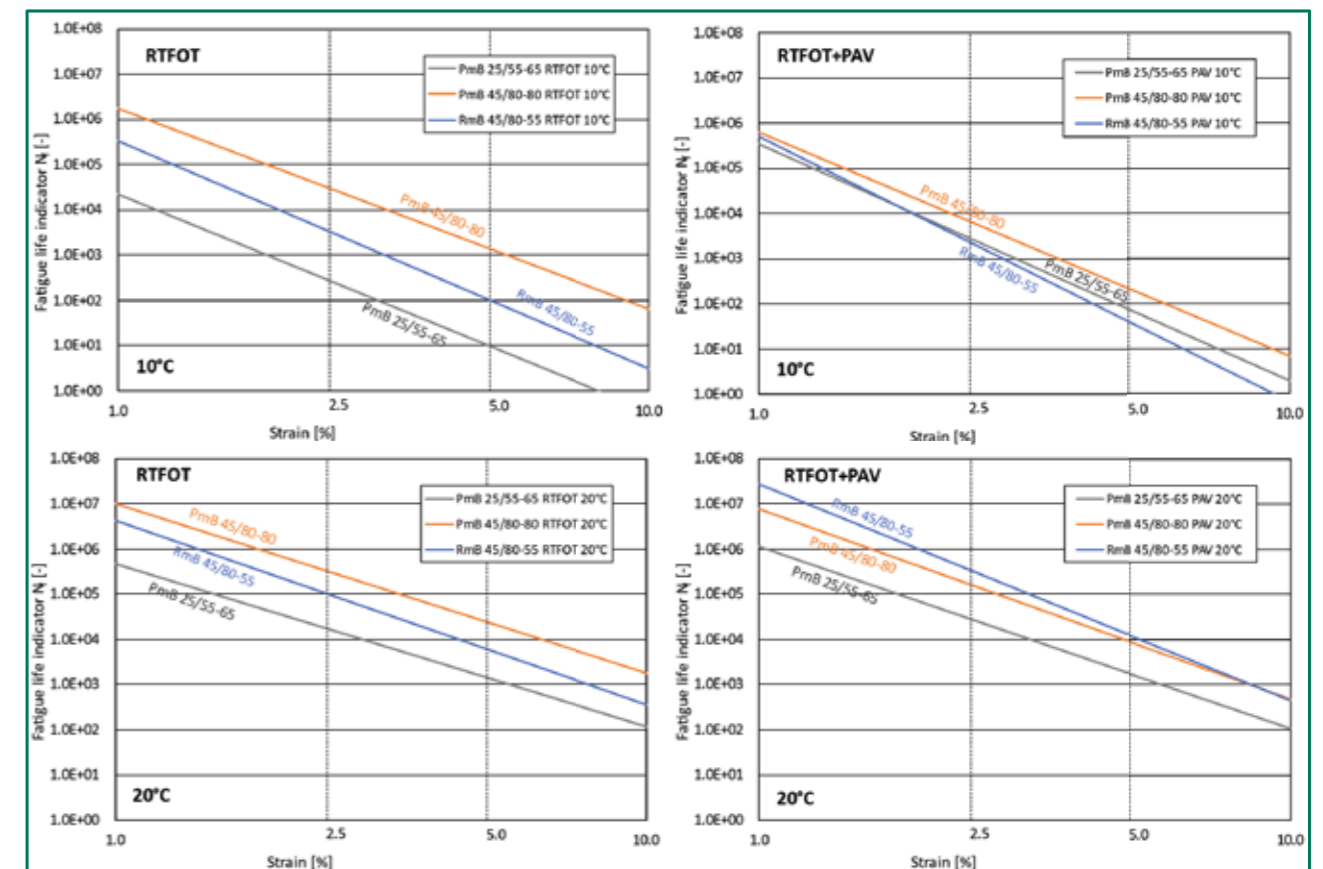
Hasonló megállapításra lehetett jutni a 20 °C-on, RTFOT maradékon végzett mérések során is, azonban hosszú távú öregedés után a GmB 45/80-55 kötéanyag már felülmulta mindkét SBS-modifikált kötéanyagot. Ezért a bitumeneken végzett LAS vizsgálat alapján elmondható, hogy az évek előrehaladtával fáradásnak ellenálló aszfalt alapréteg, amely GmB 45/80-55 gumibitument tartalmaz, hasonló vagy akár jobb fáradási tulajdonságokkal is rendelkezhet, mint a másik két vizsgált kötéanyagot tartalmazó aszfalt alaprétegek.

### 4. A tervezett kísérleti pályaszerkezetek

A projekt keretében összesen négy kísérleti szakasz lett megépítve, mindegyik különböző pályaszerkezettel.

A hosszú élettartamú burkolat koncepció elmélete alapján meg kell akadályozni a hidraulikusan kötött alaprétegből kiinduló reflexiós repedések terjedését.

Ezért az I. és a II. szakasz esetében a CKt burkolatalap tetejére 0/22-es folytonos szemeloszlású zúzottkő burkolatalap-réteg (FZKA) került. Ezt követte a fáradásnak ellenálló aszfalt alapréteg gumibitumennel, majd a vastagabb kötőréteg hagyományos PmB 25/55-65-ös bitumennel, amire a szintén hagyományos SMA réteg került.



4. ábra: A vizsgált bitumenek fáradási jellemzőinek összehasonlítása 10 °C és 20 °C hőmérsékleten különböző öregedési szakaszokban (RTFOT rövid távú, RTFOT+PAV hosszútávú öregedés)

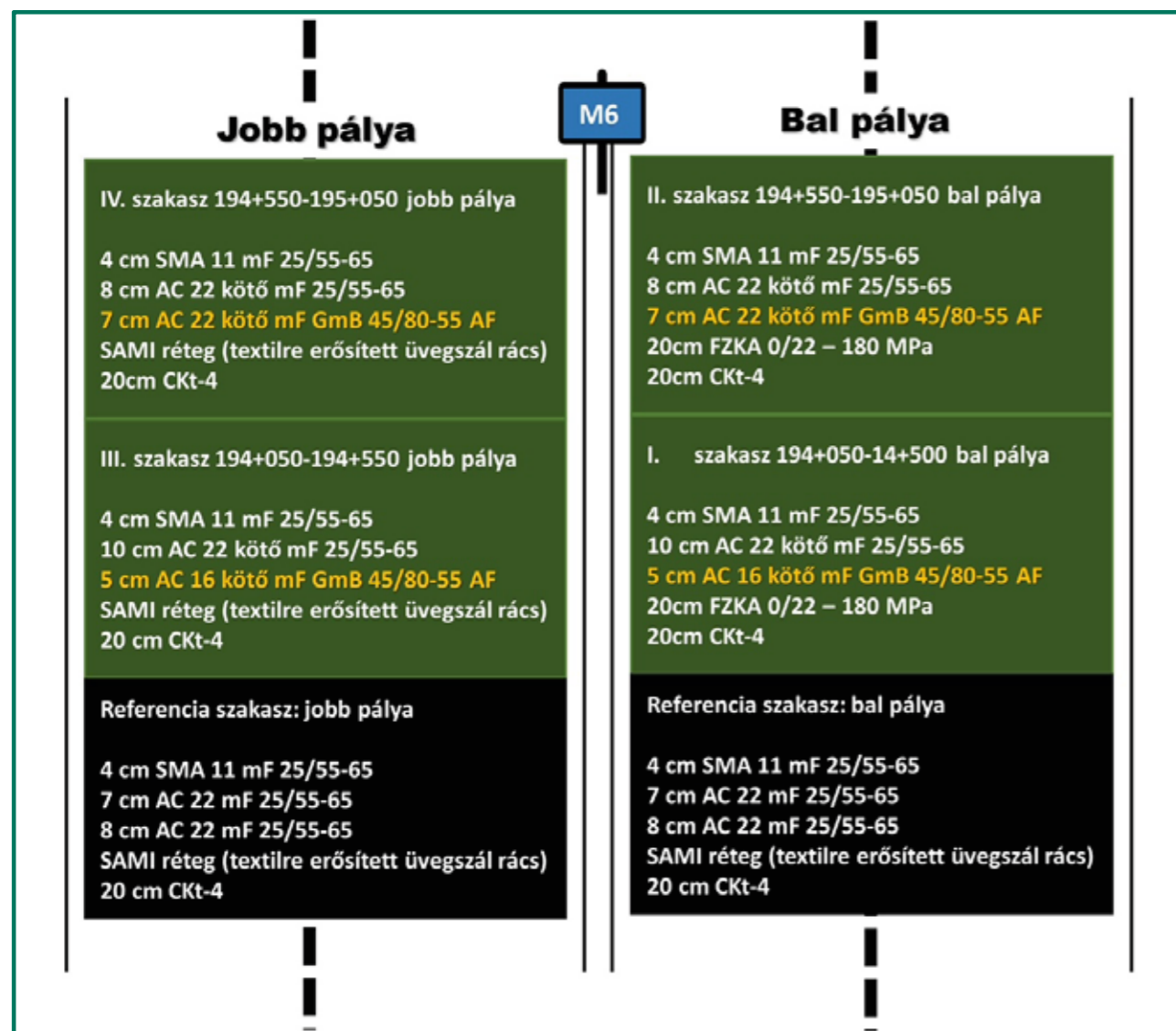
A legfőbb különbség a két szakasz között, hogy az egyik fáradásnak ellenálló alaprétege 22-es névleges szemmagyságú kővázal lett tervezve, a másik pedig, a nemzetközi gyakorlatnak megfelelően, 16-os névleges szemmagyságú kővázal.

Mivel azonban az ország egyes területein nem lehetséges vagy gazdaságilag előnytelen jó minőségű FZKA réteg kiépítése, ezért a hagyományosan alkalmazott technológiával épített burkolatszerkezetek hosszútávú viselkedésének megfigyelése érdekében a III. és IV. kísérleti szakasz az eredetileg alkalmazott repedés továbbterjedését gátló SAMI réteg kerül beépítésre textília hordozóanyagú üvegszál aszfaltháló formájában.

A várakozások szerint a kellően rugalmas alsó aszfalt alapréteg a SAMI réteggel együtt képes lesz elviselni a CKt repedései által okozott igénybevételeket, így jelentősen késleltetve a repedések terjedését a felsőbb rétegek irányába.

A megépített hosszú élettartamú pályaszerkezet várható előnyei:

- számottevően megnövekedett élettartam, nagymértékű fenntartási beavatkozás, illetve szerkezeti megerősítés szükségessége nélkül;
- az alkalmazott FZKA 0/22 réteg elválasztó hatása miatt a hidraulikus kötésű rétegben nincs szükség hézagképzésre, repesztésre stb. a reflexiós repedések kialakulásának megelőzése érdekében



5. ábra: A kísérleti szakaszok és referencia szakaszok pályaszerkezetei

## 5. A pályaszerkezetek méretezése – a várható élettartam ellenőrzés

### 5.1 A tervezési forgalom meghatározása

A méretezés során a hosszú élettartamú pályaszerkezet kibővített várható élettartamának ellenőrzését kell elvégezni a tervezett kísérleti szerkezetekben alkalmazott fáradásellenálló alapréteg vizsgált anyagparamétereinek alkalmazásával.

Az első lépés a hosszú élettartamú pályaszerkezet tervezési forgalmának meghatározása az érvényes Útügyi Műszaki Előírások alapján az előírt 50 év élettartamra.

A kísérleti szakaszok a tervezett autópálya szakasz első, mértékadó szakaszán (M6-M60 elválasztó csp. – Bóly Keleti forgalmi csp.) kerülnek megépítésre, a szakaszon a prognosztizált tervezési forgalom (TF) 11 millió F100 egység-tengely áthaladás a szabványos 20 éves élettartamra [8].

A forgalomfejlődési szorzók figyelembevételével számított tervezési forgalom az elvárt 50 év élettartamra:

$$TF = 45\,468\,652 \text{ [F100 egység-tengely-áthaladás darabszám]}$$

### 5.2 A mértékadó igénybevételek meghatározása a pályaszerkezetben

Az útpályaszerkezetek méretezésekor használt háromrétgű mechanikai modell egyes rétegeinek anyagjellemzői a következők:

- a rugalmassági modulusok
- a Poisson-tényezők
- a rétegvastagságok

A számítások végrehajtásához a rendelkezésünkre álló SHELL-BISAR és WinJulea szoftvereket használjuk, a programmal a háromrétgű pályaszerkezetmodellben az alábbi igénybevételek határozandók meg a terhelés tengelyében:

- Az aszfaltréteg alsó szálában értelmezett ( $\epsilon_t$ ) nyúlás microstrainben kifejezve

$$\epsilon_t = \epsilon_{mértékadó}^{aszfalt} \text{ microstrain} \quad (1)$$

- A földmű tetején értelmezett ( $\epsilon_v$ ) összenyomódás microstrainben kifejezve

$$\epsilon_v = \epsilon_{mértékadó}^{földmű} \text{ microstrain} \quad (2)$$

A terhelés egy 150 mm sugarú körtárcsa felületén megosztó 0,7 MPa nyomás jelenti, amely megfelel a 100 kN nagyságú egység-tengely egyik kerékterhelésének.

A laboratóriumban elvégzett merevségvizsgálatok (IT-CY, 20 °C-nál, 124 ms), az eddigi tapasztalataink és a szakirodalom adatai alapján [1, 9] a pályaszerkezeti modellben alkalmazott anyagi jellemző paraméterek a következők voltak:

Rugalmassági modulusok:

- SMA 11 (mF) PmB 25/55-65 kopóréteg – 4200 MPa
- AC 22 kötő (mF) PmB 25/55-65 kötőréteg – 7900 MPa
- AC 16 kötő (mF) GmB 45/80-55 AF fáradásnak ellenálló aszfalt alapréteg – 7000 MPa
- AC 22 kötő (mF) GmB 45/80-55 AF fáradásnak ellenálló aszfalt alapréteg – 7300 MPa
- FZKA 0/22 folytonos szemeloszlású zúzottkő burkolatalap – 440 MPa
- Ckt-4 hidraulikus alapréteg – 2000 MPa
- földmű – 80 MPa

Poisson-tényezők:

- aszfaltrétegek: 0,35
- FZKA 0/22 folytonos szemeloszlású zúzottkő burkolatalap: 0,40
- Ckt-4 hidraulikus alapréteg: 0,20
- földmű: 0,40

A modellben az aszfaltrétegek között teljes tapadást, a többi réteg esetében pedig részleges elcsúszás volt feltételezve.

A pályaszerkezet SHELL-BISAR és WinJulea szoftverrel meghatározott maximális húzó- és nyomófeszültségi eredményeit a 2. táblázat foglalja össze.

### 5.3 A határigénybevételek meghatározása

Az aszfaltréteg alsó szálában megengedhető fajlagos megnyúlás számítása

„A méretezési eljárás egyik kritériuma, hogy az együttdolgozó aszfaltrétegek alján ébredő húzási nyúlások ne legyenek nagyobbak, mint az illető terhelési szint fáradási határigénybevétele az illető aszfaltanyag Wöhler-görbéje alapján [10].”

A tervezési forgalomhoz tartozó megengedett vízszintes fajlagos megnyúlás értéke többféle összefüggéssel is meghatározható, a részletes számítások során háromféle eljárást alkalmazunk:

- a) a fáradásellenálló aszfaltanyag négyponos fáradásvizsgálatával meghatározott fáradási egyenesének  $k=10$  eltolási tényezővel módosított használatával (a MAÚT Pályaszerkezet Méretezési Bizottság módszere szerint) számolt értékek:

- **AC 16 alapréteg esetében: 184 microstrain**
- **AC 22 alapréteg esetében: 185 microstrain**

- b) a lengyel módszer szerint a francia méretezési eljárás képletével, a kétpontos aszfaltmechanikai vizsgálati eredmények felhasználásával számolt értékek [11]:

$$\epsilon_{xad} = \epsilon_6(10^\circ\text{C}, 25 \text{ Hz}) * \left(\frac{N_{HMA}}{10^6}\right)^b * \left(\frac{E(10^\circ\text{C})}{E(\theta)}\right)^{0.5} * k_c * k_r * k_s \quad (3)$$

- **AC 16 alapréteg esetében: 151 microstrain**
- **AC 22 alapréteg esetében: 162 microstrain**

2. táblázat: Mértékadó igénybevételek meghatározása a pályaszerkezet aszfaltrétegének alsó szálában és a földmű felszínén

Fáradásnak ellenálló aszfalt alapréteg	Burkolatalap	Használt szoftver	$\epsilon_t$ megnyúlás (microstrain)	$\epsilon_v$ összenyomódás (microstrain)
AC 16 kötő (mF) GmB 45/80-55 AF fáradásnak ellenálló aszfalt alapréteg	FZKA+CKt	SHELL-BISAR	123	178
		WinJulea	138	103
	SAMI+CKt	SHELL-BISAR	107	227
		WinJulea	133	125
AC 22 kötő (mF) GmB 45/80-55 AF fáradásnak ellenálló aszfalt alapréteg	FZKA+CKt	SHELL-BISAR	121	177
		WinJulea	136	102
	SAMI+CKt	SHELL-BISAR	108	227
		WinJulea	131	124

c) a 2016-ban megjelent magyar „Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének alternatív módszere” analitikus tervezési útmutatóban alkalmazott képlettel (ausztrál módszer) és az ott megadott paraméterekkel számolt értékek [11]:

$$\epsilon_{eng}^{aszfalt} = \left(\frac{F}{SF}\right)^{0.2} * \frac{10^4 * (0.856 * V_b + 1.08)}{E_a^{0.36} * TF^{0.2}} \quad (4)$$

- AC 16 alapréteg esetében: 135 microstrain
- AC 22 alapréteg esetében: 135 microstrain

Ebben az esetben mindkét aszfalttípusra, a tervezési útmutatóban meghatározott paraméterekkel összhangban, ugyanazokat a paramétereket lettek alkalmazva, ezért a két aszfaltréteg megnyúlás értéke között nem figyelhető meg különbség.

#### A földmű úttükör felszínén megengedhető fajlagos összenyomódás számítása

A földmű összenyomódása kritériumát az alábbi két módszer szerint határozzuk meg:

a) a lengyel módszer szerint az amerikai Asphalt Institute képletével [1]:

$$\epsilon_p = k * \left(\frac{1}{N_{sub}}\right)^m$$

- megengedhető fajlagos összenyomódás a földmű felszínén: 206 microstrain

b) a 2016-ban megjelent magyar „Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének alternatív módszere” analitikus tervezési útmutatóban alkalmazott összefüggéssel (a belga CRR Útügyi Kutató Intézet módosított képlete) [11]

$$\epsilon_{eng}^{földmü} = \frac{600}{TF^{0.23}}$$

- megengedhető fajlagos összenyomódás a földmű felszínén: 104 microstrain

### 6. Az eredmények kiértékelése – a méretezés végrehajtása

Az analitikus méretezés elve szerint, a terhelésből adódó mértékadó igénybevételek a tervezési élettartam alatt várható egységterhelés áthaladási szám alapján meghatározott megengedett igénybevételeket nem haladhatják meg.

Ennek ellenőrzése az alábbiak szerint történik:

$$\epsilon_t = \epsilon_{mértékadó}^{aszfalt} \leq \epsilon_{eng}^{aszfalt}$$

és

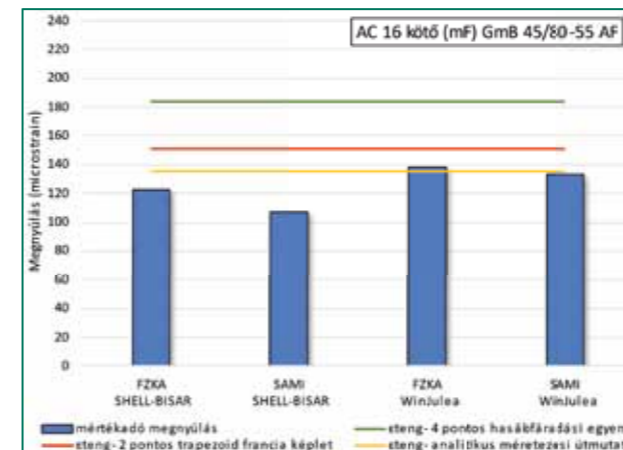
$$\epsilon_v = \epsilon_{mértékadó}^{földmü} \leq \epsilon_{eng}^{földmü}$$

Ha a számított mértékadó igénybevételek kisebbek, mint a megengedett határigénybevételek, akkor a pályaszerkezet mechanikai szempontból megfelel.

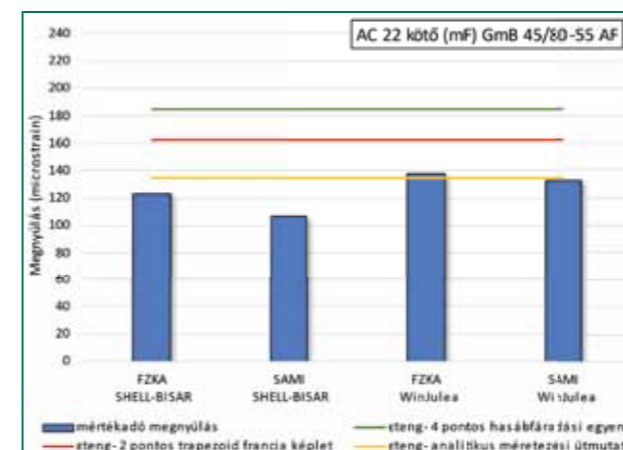
Mivel a projekt során a megengedett határigénybevételeket a rendelkezésre álló, anyagokra jellemző fáradási tulajdonságok alapján többféle eljárással is meg lehetett határozni, ezért lehetőség volt a méretezési kritériumok többféle módon történő ellenőrzésére is.

A négyponos fáradásvizsgálatokkal meghatározott fáradási egyenesének használatával történő méretezés – élettartam ellenőrzés

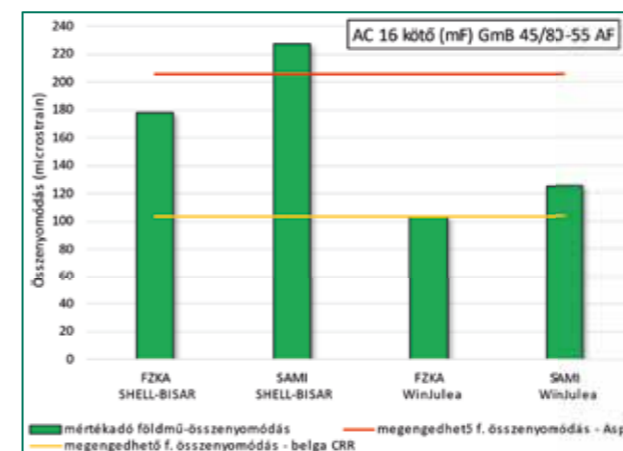
Itt a mértékadó igénybevételek meghatározása SHELL-BISAR és WinJulea programmal lett elvégezve, a határigénybevételek számítása pedig a négyponos fáradásvizsgálatokkal meghatározott fáradási egyenes használatával történt. Eszerint a módszer szerint tehát az aszfaltfáradás szempontjából mindegyik kísérleti szerkezet megfelelt a tervezett 50 éves (TF = 45 468 652 [F100 egységterhelés-áthaladás darabszám] tervezési forgalom) élettartamnak (6–9. ábra).



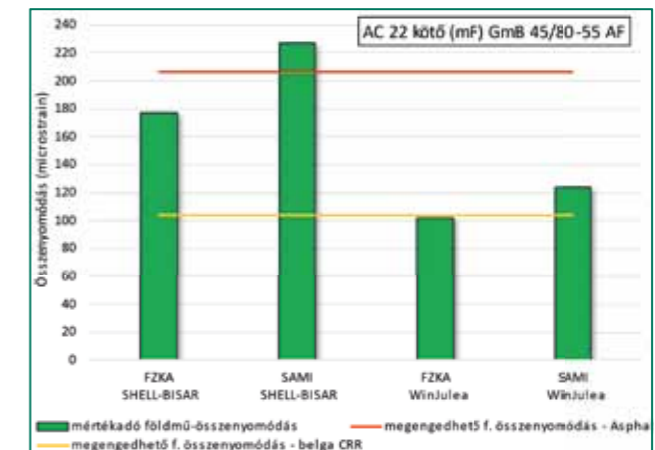
6. ábra: Az AC 16 kötő (mF) GmB 45/80-55 AF aszfalt alapréteggel számított aszfalt alsó szál mértékadó igénybevételeinek összehasonlítása a megengedett igénybevételekkel



7. ábra: Az AC 22 kötő (mF) GmB 45/80-55 AF aszfalt alapréteggel számított aszfalt alsó szál mértékadó igénybevételeinek összehasonlítása a megengedett igénybevételekkel



8. ábra: Az AC 16 kötő (mF) GmB 45/80-55 AF aszfalt alapréteggel számított mértékadó földmű-összenyomódás összehasonlítása a megengedett igénybevételekkel



9. ábra: Az AC 22 kötő (mF) GmB 45/80-55 AF aszfalt alapréteggel számított mértékadó földmű-összenyomódás összehasonlítása a megengedett igénybevételekkel

### A „lengyel módszer” szerinti méretezés – élettartam ellenőrzés

A lengyel módszer szerint a mértékadó igénybevételek meghatározása SHELL-BISAR és WinJulea programmal lett elvégezve, a határigénybevételek pedig az aszfaltréteg alsó szálában megengedhető fajlagos megnyúlás esetében a francia méretezési utasítás képlete alapján, a földmű úttükör felszínén megengedhető fajlagos összenyomódás esetében pedig az amerikai Asphalt Institute képletével történt (6–9. ábra).

A lengyel méretezési módszer szerint tehát mindegyik kísérleti szerkezet megfelel a tervezett 50 éves (TF = 45 468 652 [F100 egységterhelés-áthaladás darabszám] tervezési forgalom) élettartamra mind az aszfaltfáradás, mind pedig a földmű-összenyomódás kritériumnak eleget téve.

Az „Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének alternatív módszere” analitikus tervezési útmutató szerinti méretezés – élettartam ellenőrzés

A magyar módszer szerint a mértékadó igénybevételek meghatározása SHELL-BISAR és WinJulea programmal lett elvégezve, a határigénybevételek számítása pedig minden esetben a tervezési útmutató képletei alapján, az ott megadott paraméterek értékeivel (F, SF, V<sub>b</sub>, E<sub>a</sub>) történtek.

A magyar analitikus tervezési útmutató szerinti méretezési módszer alapján tehát az aszfaltfáradás szempontjából az építendő szerkezetek megfelelnek a kritériumoknak, ez alól egy esetben a WinJulea programmal számított mértékadó igénybevétel kivétel (FZKA réteggel). Továbbá a földmű-összenyomódás kritérium szempontjából a magyar analitikus tervezési útmutató szerinti méretezési módszer alapján legtöbb esetben nem felel meg (6–9. ábra).

Ez utóbbi esetben a földmű összenyomódás kritériumra a kétféle módszerrel kiszámolt igénybevétel értékei egymáshoz képest kétszeresen tértek el. A továbbiakban – vélhetően egy másik projekt keretében – kiemelt figyelmet kell fordítani arra, hogy a számítások háttérben álló elméletekből következő igénybevételek közül melyik közelíti jobban a valóságot, melyhez a pályaszerkezetbe épített szenzorok segítségével juthatunk talán a legközelebb.

## 7. Konklúzió

A korábban az M85 építése során kivitelezett hosszú élettartamú pályaszerkezettel kapcsolatban sok adathoz és eredményhez jutottunk, mely megerősített minket abban, hogy a fenntarthatóságot költségkímélő módon, jelentős beruházási igény nélkül a hosszú élettartamú pályaszerkezetek környékén érdemes keresni. Könnyű belátni, hogyha egy szerkezet ugyanannyi erőforrásból megépítve kétszer annyi ideig képes kiszolgálni a használókat, akkor az időegységre jutó energiafelhasználás, CO2 kibocsátás is fele a hagyományos szerkezethez képest.

Ez a felismerés, és az, hogy a gumibitumen használatával a hagyományos szerkezetek építési költségével alakíthatóak ki a hosszú élettartamú pályaszerkezetek, vezetett minket az M6 autópálya építése során megvalósított hosszú élettartamú pályaszerkezeti kialakításhoz. Ennek kipróbálására négy próbaszakaszon nyílt lehetőség az M6 autópálya

Bóly és Ivándárda közötti szakaszán:

- I. szakasz 194+050 – 194+550 km, bal oldal,
- II. szakasz 194+550 – 195+050 km, bal oldal,
- III. szakasz 194+050 – 194+550 km, jobb oldal,
- IV. szakasz 194+550 – 195+050 km, jobb oldal,
- referencia szakaszok: 193+350 – 193+850 km, jobb és bal oldal.

A gumibitumen már a reológiai vizsgálatok során is megmutatta, hogy megfelelő vastagságban építve fáradási tulajdonságai előnyösek és a fáradásnak ellenálló réteg építési mélységében jellemzően előforduló hőmérsékleteken a konvencionális PmB 25/55-65 bitumen fáradási tulajdonságait felülmúlja, a bitumenek hosszútávú öregedését figyelembe véve pedig akár a PmB 45/80-80 HiMA bitumen fáradási tulajdonságait is felülmúlhatja.

A gumibitumen az előzetes laboratóriumi keverésből származó, mintákon vizsgálva bebizonyította, hogy képes teljesíteni azokat a kritériumokat, melyek a különböző méretezési modellek támasztanak vele szemben. A tervezett 50 éves élettartamot várhatóan mind a négy, különböző próbaszakaszon alkalmazott pályaszerkezeti rétegrend biztosítja. A projektre egyedül csak a hidraulikusan kötött rétegből kiinduló repedések jelentenek mérsékelt kockázatot, de az alkalmazott inverz pályaszerkezet, és a hidraulikusan kötött alapréteg kétféle repedés késleltetési módszere vélhetően jelentősen csökkenti majd azt az időt, amikor a repedések burkolat felszínén megjelennek, ha egyáltalán megjelennek.

A kivitelezés során megerősítést nyert, hogy hosszú élettartamú pályaszerkezet koncepciója azért alkalmazható könnyen, mondjuk első lépésként a fenntarthatóságért folytatott versenyben, mert további beruházások nélkül, a meglévő eszköz és géppark felhasználásával képes jelentősen csökkenteni az élettartamra vetített környezeti költségeket.

## Irodalomjegyzék

- [1] No. 20FF770051cor02 TECHNICAL REPORT „Perpetual pavement on M85 motorway between Csorna II. - Sopron state border, design section No.1 between Csorna II. - Fertőd-Endrédmajor junction (31+550 - 51+600 km section)” TPA Sp. z o.o. 07.07.2020.
- [2] I Ruttmar, A Grajewska, K Pelczynska. Perpetual pavement design and construction using anti-fatigue base layer on expressway S8 in Poland. In: E&E Congress 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress (2016), Prague, Czech Republic. <https://doi.org/10.14311/EE.2016.175>
- [3] Chemically stabilized asphalt rubber compositions and a mechanochemical method for preparing the same (International Patent No. WO 2007/068990 A1). World Intellectual Property Organization
- [4] K Blaziejowski, M W Wisniewska, W Baranowska, P Ostrowski. Bitumen Handbook 2021
- [5] L Kisgyörgy, C Toth, A Geiger. Elastic modulus of asphalt with chemically stabilized rubber bitumen. *Gradevinar*, 68 (2016) 7 533-541.
- [6] L Pethő. A hőmérséklet eloszlás alakulása az aszfalt burkolatú útpályaszerkezetekben és ennek hatása a pályaszerkezeti rétegek fáradási méretezésére, technológiai tervezésére. Ph.D. dissertation (2008), Budapest Univ. of Tech. and Econ. Budapest
- [7] G Skronka, M Blascik, O Vacin, Martin Jasso. Impact of shear stress levels on validity of MSCR tests. *Road Materials and Pavement Design* 24(2022) 7 1820-1836 <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2106293>Ghatak, S. (2019).
- [8] Magyar Útügyi Társaság. Közutak távlati forgalmának meghatározása előrevetítő módszerrel. e-UT 02.01.31. Útügyi műszaki előírás (2005)
- [9] Magyar Útügyi Társaság. Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezése és megerősítése. e-UT 06.03.13. Útügyi műszaki előírás (2005)
- [10] Útügyi lapok. Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek alternatív méretezési módszere. Tervezési útmutató (2016)
- [11] Ministère de l'Équipement des Transports et du Tourisme. Conception et dimensionnement des structures de chaussée. Guide technique (1994). LCPC

## Az aszfaltkeverék szilárdságának jelentősége a méretezésben és mérésének lehetőségei

Zsichla László

ügyvezető  
Rodcont Kft.



### 1. Bevezetés

Hazánkban még mindig a legnagyobb behajlásra alapuló út-pályaszerkezeti méretezési módszert alkalmazzuk, amely 40 évvel ezelőtt még korszerűnek számított. Több ország alkalmazza a még mindig empirikus, de a pályaszerkezeti rétegek vastagságának és komplex modulusainak ismeretében az út-pályaszerkezetben keletkezett legnagyobb fajlagos megnyúláson alapuló méretezést. A két módszerben meglévő hiányosságokra mutattam rá korábbi tanulmányban<sup>(1)</sup>, amely hiányosságok között a TDC repedések nem megfelelő kezelése és az út-pályaszerkezeti rétegeket összeragasztó bitumen vastagságának és komplex modulusának figyelmen kívül hagyása is szerepel. Megoldásnak az út-pályaszerkezet méretezés törésméleti bevezetését javasoltam, amely módszer csak akkor alkalmazható, ha ismerjük az út-pályaszerkezeti rétegek szilárdsági tulajdonságát meghatározó Mohr-Coulomb-féle egyenest, amely egyenest a közismert kohézióval és belső súrlódási szöggel jellemzünk.

Az út-pályaszerkezeti rétegek vizsgálatát azonban minden esetben adott frekvencián és hőmérsékleten kell elvégezni, amely frekvencia biztosítása az aszfaltkeverék laboratóriumi vizsgálata során nem egyszerű feladat, mivel a terhelést minden esetben egy terhelés alatt törésig/ folyásig kell biztosítani. A dinamikus több teherismétlést lehetővé tevő eszközökön, ahol a vizsgálati frekvencia beállítható ez nem lehetséges. A szükséges törővizsgálat csak állandó előtolású, állandó felterhelési sebességű „hagyományos” készülékekkel érhető el.

A tanulmányban avval foglalkozom, hogy az ilyen készülékekkel milyen előtolási sebességet válasszunk, ill. a vizsgálati eredményeket hogyan kell átszámítani, hogy a megkövetelt méretezési frekvenciára vonatkozó mérési eredményeket kapjunk.

### 2. Szilárdság jelentősége a méretezésben

Egy aszfaltkeverék szilárdsági tulajdonságát az út-pályaszerkezet méretezés céljából - adott  $f_i$  tervezési feltételek mellett - jellemezhetjük az  $E^{f_i}$  rugalmassági modulus,  $\mu^{f_i}$  Poisson számmal,  $\sigma_t^{f_i}$  tiszta húzáshoz tartozó húzószilárdsággal és a tiszta nyomáshoz tartozó  $\sigma_c^{f_i}$  nyomószilárdsággal.

Az út-pályaszerkezet méretezésénél mindig meg kell határozni, hogy az aszfaltkeverék tulajdonságait milyen hőmérsékletre, frekvenciára vonatkoztatjuk, mik a  $f_i$  tervezési feltételek.

Az út-pályaszerkezet méretezésénél alkalmazott fáradási görbének is ezekre az  $f_i$  feltételekre kell vonatkoznia. Amennyiben ez nem lehetséges, akkor meg kell adni a mérésekkel igazolt átszámítási módszert, pl.  $E^{f_t} = f(E^{f_i})$ . Az  $f()$  függvény az  $f_i$  feltételek alapján kapott  $E^{f_i}$ , komplex modulusból számítva megadja az  $f_t$  tervezési feltételhez tartozó  $E^{f_t}$  komplex modulus.

Ilyen eset az, amikor a FWD-vel mért behajlásból visszszámítjuk a mérés kori komplex modulus, amit átszámítunk „statikus” komplex modulusra, mert a fáradási görbék statikus mérésekre vonatkoznak hazánkban.

Hasonló eset, amikor a laboratóriumban szabványos  $f_i$  feltételek között mért  $E^{f_i}$  komplex modulus átszámítjuk a tervezési feltételeknek megfelelő komplex modulusra  $E^{f_t} = f(E^{f_i})$ .

Az út-pályaszerkezetben a járműterhelésből keletkező  $\omega_f$  tervezési frekvencia elsősorban a  $v_{j\text{ármű}}$  terhelő jármű sebességétől és attól az  $s_f$  terhelési távolságtól függ, amely távolságon belül a terhelő jármű már nem elhanyagolható alakváltozást okoz a vizsgált rétegben.



$$\omega_t = \frac{\pi v_{\text{jármű}}}{s_t} \quad (1)$$

ahol,

$v_{\text{jármű}}$  - a mértékadó terhelő jármű átlagsebessége (m/s)

$s_t$  - terhelési távolság (m), jó közelítéssel  $s_t = \pi$

$\omega_t$  - tervezési frekvencia, más néven szögsebesség (rad/sec)

A megadott  $\omega_m$  vizsgálati frekvencia általában nem egyezik a  $\omega_t$  tervezési frekvenciával, sőt sok esetben a vizsgálat nem egy adott frekvencián, hanem egy adott  $v_i$  felterhelési sebességen, vagy adott „t” felterhelési idővel végezzük. Az ilyen eltérő vizsgálati módok esetén is biztosítani kell az  $f_i$  tervezési feltételekre az átszámítás lehetőségét.

Az  $f_i$  tervezési feltételek közé tartozik, hogy az út-pályaszerkezet méretezése nem a laboratóriumban készített aszfaltkeverékre, hanem a ténylegesen beépített aszfaltkeverékre vonatkozik, amit szintén figyelembe kell venni.

Az út-pályaszerkezeti rétegek vastagságának és  $i$  rétegenkénti  $E_i$  rugalmassági, általában komplex modulusának ismeretében, adott terhelés mellett, pl. körtárcsa, ikerabroncs, megfelelő programok alkalmazásával számolhatjuk az út-pályaszerkezeti rétegekben keletkező x,y,z irányú normál feszültségeket, és/vagy fajlagos alakváltozásokat. A méretezésnél a Hook-törvény ellentmondás nélkül, akkor alkalmazható, ha a feszültség-alakváltozás görbe lineáris, vagyis jó közelítéssel egyenes.

A nyomószilárdság mérési tapasztalatunk szerint ez a feltétel a terheléskor változatlan terhelési frekvencia mellett viszkoelasztikus anyagok esetén is teljesül, ha a normál feszültség nem haladja meg a törést okozó feszültség 80%-át. Az út-pályaszerkezetben keletkező feszültségek jóval a 80%-os határ alá esnek, ezért nem követünk el elvi hibát, ha a Hook törvényt alkalmazzuk és a komplex modulusal számolunk.

A másik érv a lineáris komplex modulus mellett, hogy még a modifikált bitumenek komplex modulusa is 2-3%-os

fajlagos alakváltozásig lineárisan viselkedik, amit LVE lineáris viszkozitási határnak nevezünk. Aszfaltkeverék esetén ez a határ a bitumentartalomtól függően 2000-4000 mikrostrain. Az LVE határig a bitumen newtoni folyadékként viselkedik.

A hazai méretezési előírás az út-pályaszerkezet alsó síkjában keletkező megengedett megnyúláson, ill. legnagyobb megengedett behajlásra alapulnak. Ez a két módszer már nem használható, az út-pályaszerkezeti felsőbb rétegek méretezésére, várható leromlásának meghatározására, pl. az út-pályaszerkezet kopó-és kötőrétegében keletkező TDC repedések előre jelzésére.

Az út-pályaszerkezeti rétegek várható tönkremenetele a  $T_i$  nyírási hányados(1) segítségével (3) is meghatározható. A nyírási hányados az  $f_i$  tervezési feltételeknek megfelelő körülmények és mértékadó terhelésből számítható a vizsgált  $i$ . rétegben keletkező (2)  $\tau_f$  fő-nyírófeszültség és a törést okozó (4)  $\tau_u^i$  nyírófeszültség hányadosaként.

$$\tau_f = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2 \quad (2)$$

ahol:

$\sigma_{max}$  - a maximális normál főfeszültség kPa;

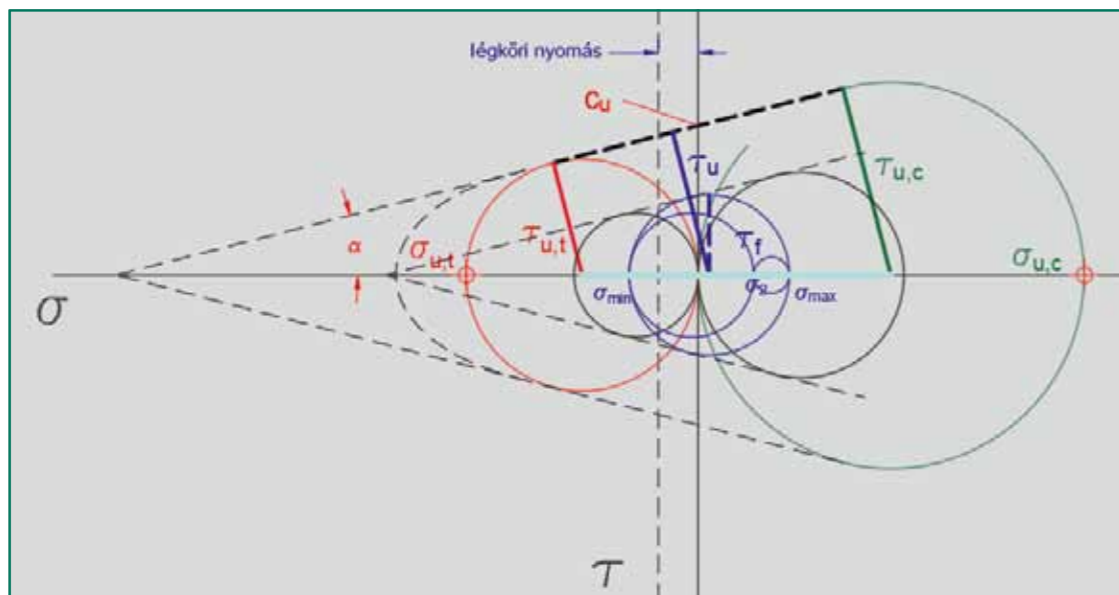
$\sigma_{min}$  - a minimális normál főfeszültség kPa

$$T_i = \frac{\tau_f}{\tau_u^i} \quad (3)$$

$T_i$  - az  $i$ . rétegre vonatkozó nyírási hányados.

A  $\tau_u^i$  törést okozó nyírófeszültség az 1. ábra szerinti Mohr-Coulomb-féle egyenes, határoló görbe alapján határozható meg.

$$\tau_u^i = \frac{\sigma_{u,t}^i + (\sigma_{u,t}^i - \sigma_{max} - \sigma_{min}) \sin \alpha_i}{2} \quad (4)$$



1. ábra: Mohr-Coulomb-féle egyenes meghatározása a  $\sigma_{u,c}$  nyomó és  $\sigma_{u,t}$  húzószilárdságból.

Az 1. ábra szerinti  $\sigma_{min}, \sigma_2, \sigma_{max}$  az út-pályaszerkezet megadott pontján számított normál feszültségek, amelyek számításához elegendő az  $i$  rétegenkénti  $E_i$  komplex modulus és  $\mu_i$  Poisson számainak ismerete. A  $\tau_u^i$  törést okozó nyírófeszültség számításához azonban szükségünk van az  $i$ . vizsgált réteget jellemző Mohr-Coulomb-féle egyenes meghatározásához szilárdsági vizsgálatokra elvégzésére is.

A  $T_i$  nyírási hányados szoros összefüggésben van az eddig is alkalmazott fáradási görbékkel ill. az erővezérelt négyponthoz hajlító vizsgálat eredményével(1).

Adott „R” törékenység mellett (5) megadható  $av, bv$  paraméterekkel a nyírási hányados szerinti fáradási görbe (6) és az UME(2)-ban megadott (7) hajlékony út-pályaszerkezeti rétegekre megadott fáradási görbe között 0,98 korreláció van.

$$R = \frac{E}{\sigma_{u,t}} \quad (5)$$

$$\log(T) = av \log(TF_m) + bv \quad (6)$$

$$S_{eng} = 14,5 TF_m^{-1/4,55} \quad (7)$$

ahol

$R$  - törékenység

$TF_m$  - mértékadó tervezési forgalom (et)

$av, bv$  - paraméterek

$S_{eng}$  - megengedett behajlás (mm)

A  $TF_m$  mértékadó tervezési forgalomszámításhoz szükséges  $T$  nyírási hányadost (4) a mértékadó terhelésből keletkező legnagyobb fő-nyírófeszültség és a törést okozó  $\tau_u$  nyíró feszültség hányadosa adja meg. Az út-pályaszerkezeti rétegben keletkező legnagyobb fő-nyírófeszültséget  $\tau_f^{max}$  az út-pályaszerkezeti rétegek  $v_i$  vastagságának és  $E_i$  komplex modulus ismeretében megfelelő programok segítségével számítható.

Az  $i$ . rétegben a  $\tau_f^{max}$  legnagyobb fő-nyírófeszültséghez tartozó törést okozó  $\tau_u$  nyíró feszültség az 1. ábra szerinti Mohr-Coulomb-féle egyenes alapján meghatározható a tiszta húzáshoz tartozó húzószilárdsági  $\sigma_{u,t}^i$  és tiszta nyomáshoz tartozó nyomószilárdsági  $\sigma_{u,c}^i$  értékek segítségével is.

A  $\sigma_{u,t}^i$  és  $\sigma_{u,c}^i$  szilárdságokat rétegenként és anyagokként különböző módon, laboratóriumban kell és lehet mérni.

Az eltérő mérési módszereket és feltételeket úgy kell kialakítani, hogy azok kielégítsék az út-pályaszerkezet

méretezésére vonatkozó és megkövetelt  $f_t$  tervezési feltételeket, vagy utólag a mérési eredmények a tervezési követelményekre még megbízhatóan átszámíthatók legyenek. Ilyen tervezési feltétel a tervezési frekvencia és a tervezési hőmérséklet.

A Mohr-Coulomb-féle egyenes egyenletét a kohézió és a belső súrlódási szög határozza meg.

Olyan anyagok esetén, ahol a nyomószilárdság és a húzószilárdság viszonylag egyszerűen meghatározható célszerű a belső súrlódási szög  $\sin \alpha_i$  kifejezése a (8) összefüggéssel, ahol  $\alpha_i$  az  $i$ . réteg belső súrlódási szöge.

$$\sin \alpha_i = \frac{n_i - 1}{n_i + 1}; n_i = \frac{\sigma_{u,c}^i}{\sigma_{u,t}^i} \quad (8)$$

ahol:

$\sigma_{u,c}^i$  -  $i$ . réteg tiszta nyomáshoz tartozó nyomószilárdsága (MPa)

$\sigma_{u,t}^i$  -  $i$ . réteg tiszta húzáshoz tartozó húzószilárdsága (MPa)

A járműterhelésből az út-pályaszerkezetben keletkező feszültségeket jellemző Mohr körök középpontja az 1. ábrán világoskék színnel jelzett szakaszra - a tiszta húzáshoz és a tiszta nyomáshoz tartozó Mohr körök középpontjai által behatárolt szakasz - fog esni.

E miatt a Mohr körök érintőjének egyenletét a tiszta húzószilárdság és a tiszta nyomószilárdság között kell a lehető legpontosabban meghatározni.

A tiszta húzáshoz tartozó húzószilárdság mérése történhet hajlító vagy húzó vizsgálattal. A tiszta nyomáshoz tartozó nyomószilárdság meghatározható nyomó vizsgálatl.

Mindhárom vizsgálat jellemzője, hogy legalább két főfeszültség a vizsgálat során azonos értékű, általában a légköri nyomással egyező értékű. Triaxiális vizsgálatl meghatározható a tiszta nyomáshoz tartozó nyomófeszültség és a belső súrlódási szög. A triaxiális vizsgálatot is általában az jellemzi, hogy legalább két normál főfeszültség értéke azonos.

Tresca-féle törési elmélet szerint a törés akkor következik be, amikor a (2) egyenlet szerinti főnyírófeszültség eléri a törést okozó  $\tau_u$  nyíró feszültséget. Hencky szerint a test egy pontja akkor kerül képlékeny állapotba, szenved törést, ha a fajlagos torzítási energia a  $\frac{\tau_u^2}{2G}$  értéket eléri, amit  $\tau_{okt}$  oktaéderes nyírási feszültségnek is nevezünk. A két elmélet azonos eredményre vezet, ha a normál főfeszültségek közül legalább kettő azonos értékű.

A nyírási hányados mindkét elmélet szerint közel azonos eredményt ad, ezért az egyszerűbb Tresca-féle elméletet alkalmaztam.

### 3. Húzó –és nyomószilárdság mérési lehetőségei eltérő vizsgálati módszerekkel

Az út-pályaszerkezetet terhelő mértékadó forgalomra egy állandó sebességet tételezünk fel, amelynek következménye, hogy az út-pályaszerkezeti rétegek terhelési frekvenciáját a keletkező feszültségek helyétől és nagyságától függetlenül egyetlen  $\omega_f$  tervezési frekvencia jellemzi.

A négyponos hasáb alakú hajlító vizsgálatból<sup>(3)</sup> is tudjuk hogy a különböző fajlagos megnyúlások 150-400  $\mu strain$ , de azonos  $\omega_m$  mérési frekvencia mellett azonos aszfaltkeverékek esetén a 100. terheléshez tartozó  $E_k$  kezdeti komplex modulus a vizsgált tartományban közel állandó. A mérések során kapott  $E_k$  kezdeti komplex modulusok relatív szórása 7-9%.

Az út-pályaszerkezetekben keletkező feszültségek számítása szempontjából szükséges  $E_i$  modulus, akkor elégíti ki a Hook-törvényt, ha a vizsgált feszültségi tartományban a  $\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} = E_i$  állandó, amely követelmény az  $E_k$  kezdeti komplex modulusra teljesül.

A mérés során a választott fajlagos megnyúlás eléréséig a szabványos<sup>(3)</sup> terhelés növekedése szinuszos. Az ilyen vizsgálatok alkalmasak a fáradási élettartam és a kezdeti alakváltozási modulus mérésére, szerkezeti kialakításuk miatt azonban nem használhatók az aszfaltkeverékek szilárdságának mérésére.

A hajlító vizsgálatoknál számítjuk az  $E_k$  kezdeti komplex modulusot, és feltételezzük, hogy a nyomott és a húzott rész komplex modulusa azonos, ez a feltételezés a kezdeti  $E_k$  kezdeti komplex modulusra minden esetben igaz.

A számítások során a Hook-törvény szerinti modellt alkalmazzuk, ami a linearitás miatt teljesül, ezért az alkalmazott számítási képletek helyesek. Más a helyzet a fázisátviteli folyamat során, ahol a nyomott öv a magasabb nyomószilárdság miatt lassabban fárad, mint a húzott öv, e miatt az  $E_k/2$  fáradási határ számítása nem megbízható, de ez a nyilvánvaló probléma<sup>(4)</sup> nem érinti a cikk további részét.

A szilárdságot általában állandó  $v_i$  felterhelési sebességű, előtolású készülékekkel mérjük. Az út-pályaszerkezet méretezéséhez azonban csak azonos  $f_i$  tervezési feltételeket kielégítő mérési eredmények alkalmazhatók, ezért szükséges a különböző terhelési módú mérések közötti kapcsolat elemzése.

A  $2\pi$  szerint ismétlődő szinuszos terhelésű és adott  $\omega_m$  mérési frekvenciájú „dinamikus” vizsgálatokat az jellemzi, hogy az  $\varepsilon_i$  beállított fajlagos alakváltozást minden esetben ugyanakkora  $t_m$  felterhelési idővel érjük el, ahol a felterhelési idő és a  $\omega_m$  mérési frekvencia között az alábbi összefüggés áll fenn:

$$t_m = \frac{\pi}{\omega_m} \quad (9)$$

ahol

$t_m$  - felterhelési idő, a teljes periódusidő fele (rad/sec)

Az aszfaltkeverék szilárdságát mérhetjük hajlító vizsgálatl, ha csak a tiszta húzás szerinti húzószilárdságot akarjuk meghatározni, vagy mérhetjük húzó-nyomó vizsgálatl, ha a tiszta húzás és nyomás szerinti szilárdságokat akarjuk meghatározni.

Egyenletes  $v_i$  felterhelési sebességű húzó-nyomó és hajlító vizsgálatnál a mért feszültség-alakváltozás összefüggés minden  $\varepsilon_i$  választott fajlagos alakváltozáshoz a vizsgálat jellegéből következően, szükségszerűen változó, folyamatosan növekvő a  $t_m$  felterhelési időt és ennek következtében a mérés során folyamatosan csökkenő  $\omega_m$  mérési frekvenciát kapunk eredményül.

Egyenletes  $v_i$  felterhelési sebességű húzó-nyomó és hajlító vizsgálatnál számolható, hogy adott  $\varepsilon_i$  beállított alakváltozás eléréséhez mekkora felterhelési idő szükséges, vagy fordítva adott  $t_m$  felterhelési idő és  $\varepsilon_i$  beállított alakváltozás mekkora  $v_i$  felterhelési sebességgel érhető el.

Egyenletes  $v_i$  felterhelési sebességű húzó-nyomó vizsgálatoknál  $t_m$  felterhelési idő alatt a próbatest felterhelés irányú  $\varepsilon_i l_0$  alakváltozást (mm) szenved el, az alakváltozás és felterhelési időből következik (9) összefüggés (10) egyenlet felhasználásával.

$$v_i = \frac{\varepsilon_i l_0 \omega_m}{\pi} \quad (10)$$

ahol,

$v_i$  - az  $\varepsilon_i$  fajlagos megnyúláshoz tartozó felterhelési sebesség (mm/sec)  
 $l_0$  - alakváltozás mérésének bázishossza (mm)  
 $\omega_m$  - mérési frekvencia (rad/sec, Hz)  
 $\varepsilon_i$  - fajlagos megnyúlás, periódikus hajlító vizsgálat során beállított fajlagos megnyúlás

Egyenletes  $v_i$  felterhelési sebességű hajlító vizsgálatoknál  $t_m$  felterhelési idő alatt a próbatest felterhelés irányú "y" lehajlást, elmozdulást (mm) szenved el a terhelő erőnél.

A négyponos hajlító vizsgálatnál a terhelő erő az egyik támaszponttól "a" távolságra van a próbatest magassága "h" és a támaszközök távolsága "L", akkor a terhelő erőnél mért terhelés irányú "y" elmozdulás és mért  $\varepsilon_i$  fajlagos megnyúlás között felírható a következő összefüggés:

$$y = \varepsilon_i \frac{3aL - 4a^2}{3h} \quad (11)$$

$$v_i = \varepsilon_i \frac{3aL - 4a^2}{3h} \frac{\omega_m}{\pi} \quad (12)$$

A  $l_h = \frac{3aL - 4a^2}{3h}$  négyponos hajlító vizsgálatra vonatkozó állandó hosszúságot (mm), nevezhetjük a hajlító vizsgálat  $l_h$  bázishosszának.

A 2. ábra szerint az állandó frekvenciájú mérés és a változó frekvenciájú, de állandó felterhelési sebességű mérések feszültség-alakváltozási görbéi kizárólag egy ponton metszhetik egymást. A metszésponthoz tartozó  $\varepsilon_i$  fajlagos alakváltozásnál húzó-nyomó vizsgálatnál teljesül a (10) egyenlet, míg a hajlító vizsgálatnál teljesül a (12) egyenlet.

Az aszfaltkeverék változatlan hőmérséklet mellett frekvencia függésének ismeretében (13) a 2. ábrán különböző felterhelési sebességek teljes feszültség-alakváltozás görbéje is számítható.

$$E_r = c \omega^k \quad (13)$$

ahol:

$E_r$  - rugalmassági modulus MPa  
 $\omega$  - frekvencia Hz  
 $c$  - konstans MPa  
 $k$  - hatványkitevő,  $k = 0,15 - 0,30$

A (13) összefüggés helyett, ha a hőmérséklet-frekvencia függést egy függvényen belül akarjuk figyelembe venni, akkor a mestergörbékkel előállított szigmoid-függvények, illetve a Ramberg-Osgood modell alkalmazható<sup>(5)</sup>.

Azonos fajlagos alakváltozás esetén (10) és (13) miatt felírhatjuk az egyszerűbb hatványos összefüggést (14), amely 1-30 Hz tervezési frekvencia esetén minden esetben alkalmazható egy adott tervezési hőmérséklet esetén.

$$\sigma_i = \sigma_m \left( \frac{v_i}{v_m} \right)^k = \sigma_m \left( \frac{\omega_i}{\omega_m} \right)^k \quad (14)$$

Az 1. táblázatban  $\varepsilon_m = 100 \mu strain$  fajlagos megnyúláshoz  $v_m = 8,6 \text{ mm/min}$  felterhelési sebesség és  $\sigma_m = 0,50 \text{ MPa}$  normál feszültség tartozik.

Ha a  $100 \mu strain$  fajlagos megnyúláshoz  $v_i = 34,4 \text{ mm/min}$  felterhelési sebességet választunk, akkor (14) alapján  $k = 0,28$  mellett,  $\sigma_i = 1,47 * 0,5 = 0,74 \text{ MPa}$  normál feszültséget kapunk eredményül. Így megkaptuk a  $v_i = 34,4 \text{ mm/min}$  felterhelési sebességű vizsgálat  $100 \mu strain$  fajlagos alakváltozáshoz tartozó pontját.

Mivel (10) független a  $\varepsilon_m$  fajlagos alakváltozástól, ezért a feszültség-alakváltozás görbe minden  $v_i$  felterhelési sebességhez számítható.

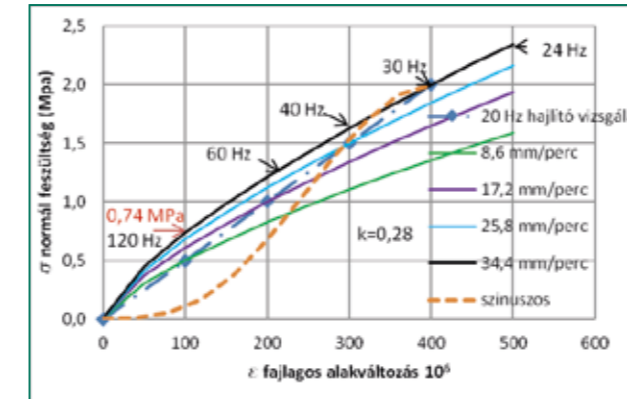
A  $v_i$  felterhelési sebességek (10) alapján számíthatók, ahol az  $\varepsilon_i$  fajlagos alakváltozáshoz tartozó  $\sigma_i$  az  $E_k$  kezdeti komplex modulus függvénye, amely jelen esetben lineáris. Ennek következtében az  $E_r$  kezdeti komplex modulus,  $\omega_m$  mérési frekvencia és a  $k$  hatványkitevő ismeretében minden  $v_i$  felterhelési sebességre vonatkozó feszültség-alakváltozás görbe számítható. A 2. ábra is így készült.

Az állítás azonban fordítva is igaz, ha egy aszfaltkeverék feszültség-alakváltozás görbéjét meghatároztuk egy  $v_i$  felterhelési sebességű méréssel, akkor abból számolható a  $\omega_m$  mérési frekvenciájú hajlító vizsgálatból származó feszültség-alakváltozás görbe is. Az oda-vissza számításoknál azonban figyelembe kell venni az adott mérési tartományt.

A 2. ábra szerinti  $\omega_m = 30 \text{ Hz}$  mérési frekvenciájú hajlító vizsgálatból nem javasolt a  $v_i = 4,3 \text{ mm/min}$  felterhelési sebességnél kisebb felterhelési sebességre átszámítani a mérési eredményeket, mert ez csak a 0-100  $100 \mu strain$  fajlagos megnyúlásokkal lehetséges, ahol a mérés pontossága már alacsony.

A továbbiakban egyenletes  $v_i$  felterhelési sebességű,  $l_0 = 150 \text{ mm}$  bázishosszú húzó-nyomó vizsgálatokat vettem össze a szinuszos terhelésű elmozdulás vezérelt hajlító vizsgálatl.

A 2. ábrán azt az általános esetet ábrázoltam, amikor a különböző fajlagos alakváltozásokhoz mért  $E_k$  kezdeti komplex modulusok azonosak, vagyis a feszültség-alakváltozás görbe lineáris, ha a  $\omega_m$  mérési frekvencia 30 Hz, a mérési hőmérséklet 20 °C.



2. ábra: Az  $E_k$  kezdeti komplex modulus és eltérő felterhelési sebességek kapcsolata.

A feszültség-alakváltozási görbe annak ellenére lineáris, hogy az  $E_k$  kezdeti komplex modulus minden esetben tartalmaz az alakváltozás fáziskésése miatt képzetes részt. Ez a képzetes rész adja a nem visszanyerhető, elnyelt disszipált energiát. Ez azt jelenti, hogy a töréshez képest viszonylag alacsony fajlagos alakváltozásoknál a fáziszőg közel állandó, a rugalmas-képlékeny arány nem vagy elhanyagolható mértékben változik, ha a mérési frekvencia állandó.

Az aszfaltkeverékek viszkózus viselkedését döntően a bitumen határozza meg, ha a kötőanyag newtoni folyadéként viselkedik a mérési tartományban, akkor lineáris.

Állandó  $\omega_m$  mérési frekvencián végzett hajlító vizsgálatnál, figyelembe véve a komplex modulus lineáris viselkedését a (10) egyenlet alapján előre beállított  $\varepsilon_i$  fajlagos megnyúlásokhoz, a 2. ábrán megadott 100; 200; 300; és 400  $\mu strain$  számíthatjuk az egyenletes  $v_i$  felterhelési sebességeket.

A számítás eredményeit az 1. táblázat tartalmazza.

Felterhelési sebessége	Fajlagos alakváltozás	Normál feszültség
mm/min	„10 <sup>6</sup> ”	(MPa)
4,3	100	0,50
17,2	200	1,00
25,8	300	1,50
34,4	400	2,00

1. táblázat:

30 Hz  $\omega_m$  mérési frekvenciához tartozó értékpárok,  $l_0 = 150$ .

A tervezési és a mérési frekvencia viszonylag nagyobb eltérése esetén felmerülő bizonytalanságot a következő példán mutatom be.

1996. évből vizsgálati eredményünk van AB-12 (F) aszfaltkeverék a 2. táblázatban megadott Marshall próbatést 20 °C-on, 0,2 mm/min terhelési sebességgel történő nyomószilárdság vizsgálatára. A próbatést magassága 63,4 mm, amely egyben az  $l_0$  bázishossz.

Nyomószilárdság mérés szempontjából a próbatést mérete nem ideális, mert a nyomófej és a próbatést közötti súrlódás hatása befolyásolta a feszültség eloszlást, amely e miatt eltér az egyenletestől. Ideális esetben a próbatést magassága legalább háromszorosa az átmérőnek és az  $l_0$  bázishossz a próbatést közepén van kijelölve, az  $l_0$  bázishossz a próbatést magasságának 2/3-a.

Szorzó ( $30/\omega_m$ ) <sup>0,25</sup>	Frekvenciával korrigált feszültség	Mért értékek		Mérési frekvencia
		$\sigma_c$ (MPa)	$\varepsilon \cdot 10^6$	
		0,00	0	
2,646	1,30	0,49	270	0,612
3,309	3,28	0,99	660	0,250
3,734	5,53	1,48	1070	0,154
4,049	7,98	1,97	1480	0,112
4,338	10,32	2,38	1948	0,085
4,588	13,03	2,84	2440	0,068
5,136	20,18	3,93	3830	0,043
5,941	26,44	4,45	6860	0,024

2. táblázat: Nyomószilárdság vizsgálat, a törés 4,45 MPa-nál következett be.

A (10) és (14) egyenletek alapján a folyamatosan változó frekvenciáknál mért nyomófeszültséget 30 Hz frekvenciára számoltam át  $k=0,25$  és  $k=0,15$  hatványkitevőkkel.

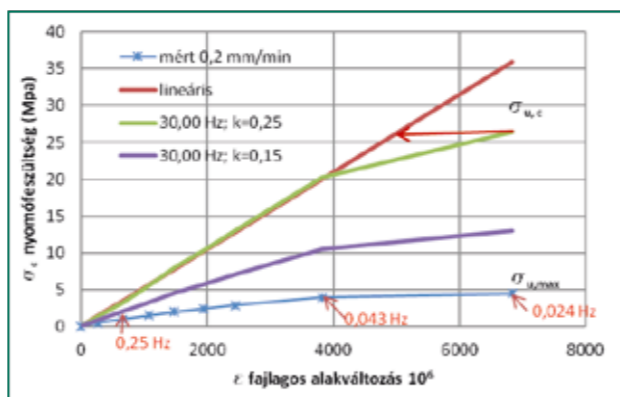
A 2. táblázatban  $k = 0,25$  hatványkitevővel számolt frekvenciával korrigált nyomófeszültségek találhatóak.

A 2. táblázat szerinti legnagyobb mérési frekvencia 0,612 Hz, amely jelentősen eltér a felvett 30 Hz tervezési frekvenciától. A felterhelési sebesség akkor lenne megfelelő, ha a mérési tartományba esne a 30 Hz tervezési frekvencia.

A 3. ábrán kék vonallal ábrázoltam a 0,2 mm/min felterhelési sebességű mérés eredményét, ahol a mért nyomószilárdság  $\sigma_{u,max} = 4,45$  MPa volt.

A mérés során ennél nagyobb feszültséggel a próbatést nem lehetett terhelni, mert az alakváltozás sebessége már nagyobb volt, mint a felterhelési sebesség. Értelemszerűen a nagyobb felterhelési sebességhez nagyobb nyomószilárdság adódik ugyanazon a próbatésten.

Korábbi vizsgálataink segítségével (13) alapján határoztuk meg a  $k$  hatványkitevő értékét, amely  $k = 0,15$  volt. A mai előírásoknak megfelelő, aszfaltkeverékeknél  $k = 0,25$  is lehetséges.



3. ábra: A 20 °C-os vizsgálati hőmérsékletnél 0,2 mm/min felterhelési sebességű mérés átszámítása 30 Hz mérésre  $k = 0,15$  és  $k = 0,25$  hatványkitevők esetén.

A mérési és a tervezési frekvencia jelentős eltérése főleg 0°C alatti hőmérsékleten bizonytalanná teszi a számított nyomó vagy húzószilárdság értékét, mivel a frekvencia is befolyásolja a szilárdság értékét. Előfordulhat, hogy a 3. ábrán a 30 Hz és  $k=0,25$  hatványkitevőhöz tartozó görbe mentén a törés alacsony hőmérsékleten kisebb fajlagos alakváltozásnál következik be. A görbe alakja nem fog változni, de a nyomószilárdság el fog térni a számítottól, annál várhatóan kisebb lesz.

A hatványkitevő értékét pontosan nem ismerjük - bár a mestergörbék alapján mérhetők-, ezért kiemelt jelentőségű, hogy az átszámításnál a hatást csökkentjük, amely a megfelelő felterhelési sebesség alkalmazásával érhető el. A 20-30 Hz  $\omega_m$  mérési frekvenciához  $v > 50$  mm/min felterhelési sebességű húzó-nyomó vizsgálatot ajánlott választani.

Ha így választunk felterhelési sebességet a választott frekvenciához, akkor a hatványkitevő értékében elkövetett 30%-os hiba a számított húzó vagy nyomószilárdság értékében max. 10% eltérést okoz.

A 3. ábrán azt szemléltetem, amikor az állandó értékű  $v_i$  felterhelési sebességű méréssel a próbatést  $\sigma_{u,max}$  törésig is terhelhetjük, vagyis olyan tartományban is mérhetünk, ahol a dinamikus, periódikus ismétlődő, állandó  $\omega_m$  frekvenciával mérő készülékekkel már nincs lehetőségünk.

A  $\sigma_{u,c} = 26,44$  MPa nyomószilárdságot a mért  $\sigma_{u,max}$ -ból számítottam a (14) alapján, ahol a szorzó 5,94.

A 30 Hz mérési frekvenciához tartozó  $E_k$  kezdeti komplex modulus a 3. ábra szerinti lineáris regresszióval is meghatározható  $E_k = 5270$  MPa, ha  $k = 0,25$ .

Kis hiba a  $k$  hatványkitevő becslésében, pl.  $k = 0,22$  a 0,25 helyett, akkor a számított  $E_k = 4400$  MPa lenne. A hatványkitevő értékének meghatározásában 12%-os hiba a komplex modulus értékében 16,5%-ra növekedett  $v = 0,2$  mm/min felterhelési sebességnél.

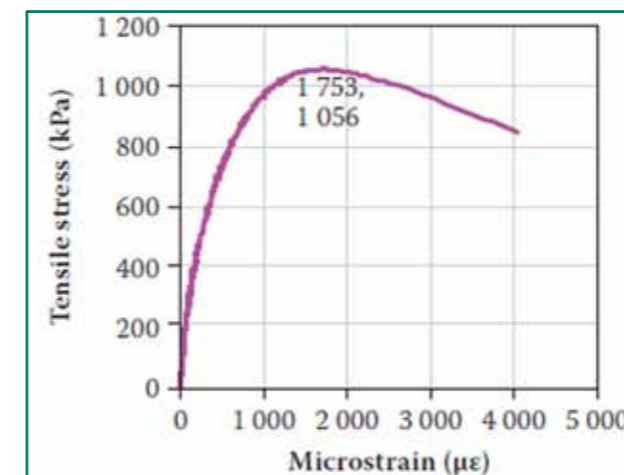
Az  $E_k$  kezdeti komplex modulus azonban más vizsgálatokkal lényegesen pontosabban is meghatározhatjuk, pl. négyponthasítók, vagy hasító-húzó vizsgálatokkal, de a szilárdságok ezekkel az eszközökkel nem mérhetők.

Nagyon fontos, hogy a hatványkitevő rossz becsléséből eredő hibát minimalizáljuk a tervezési frekvenciához közelálló vizsgálati felterhelési sebesség megválasztásával, vagyis törekedni kell arra, hogy a mérés során a törés a tervezési frekvencia közelében következzen be.

A kezdeti  $E_k$  komplex modulus meghatározható az IT-CY hasító-húzó vizsgálatával is. A hazai előírás 20 °C-ra és  $t = 0,124$  sec felterhelési időre vonatkozik, ami ~25 Hz.

A négyponthasító vizsgálatra előírt vizsgálati hőmérséklet szintén 20 °C, a vizsgálati frekvencia azonban 30 Hz. Az eltérő vizsgálati frekvencia miatti kezdeti  $E_k$  komplex modulus eltérés (13) alapján 3-6 %.

Az IT-CY azonban szintén nem alkalmas az aszfaltkeverék húzószilárdságának mérésére.



4. ábra: Tiszta húzás törésképe és feszültség alakváltozás görbéje<sup>(6)</sup>.

Tiszta húzás vizsgálatot hazánkban nem szoktak végezni, ezért nemzetközi jól dokumentált példát kerestem. A 2010. évben Dél-Afrikában 23 féle aszfaltkeveréken végeztek ilyen vizsgálatokat<sup>(6)</sup>. A felterhelési sebessége 1,27 mm/min, a vizsgálati hőmérséklet 20 °C, a mérés bázishossza  $l_0 = 100$  mm volt.

A jellemző törésképet és a feszültség-alakváltozás görbét a 4. ábra mutatja, ahol a legnagyobb húzófeszültség 1,056 Mpa, amelyhez 1056 mstrain fajlagos megnyúlás tartozik.

A 4. ábra szerinti 1,056 Mpa húzószilárdság a (10) és (14) egyenletek alapján 30 Hz mérési frekvencia és  $k = 0,25$  hatványkitevő esetén a húzószilárdság 5,58 MPa lenne.

A cikkben megadott 23 aszfaltkeverék típusból a három kiugróan alacsony húzószilárdságúakat elhagyva az eredeti relatív szórás - szórás/átlag - 0,356 volt, az átlag 0,83 MPa. A megadott adatokból az összes mérést átszámoltam 30 Hz mérési frekvenciára, ennek eredményeként a relatív szórás 0,294-re csökkent, az átlagos húzószilárdság pedig **4,96 MPa** lett, amely érték iránymutató lehet a hazai aszfaltkeverékek 30 Hz frekvencián mért tiszta húzásának várható húzószilárdságára 20 °C-on

#### 4. Hasító-húzó vizsgálat

A hasító-húzó vizsgálat rendkívüli előnye, hogy Marshall próbatésten, vagy az elkészült útpályaszerkezetből vett fúrt mintán is elvégezhető. Hasító-húzó vizsgálatot alkalmazunk a vízerzékenység számítására, ahol mérjük az ITS hasító-húzó szilárdságot száraz és nedves állapotban.

Az ITS mérésnél az előírt tömörítő munka 2\*35 ütés az MSZ EN 12697-30 döngölővel, a vizsgálati hőmérséklet 15 °C, a felterhelési sebesség 50 mm/min.

Az aszfaltkeverék fáradási tulajdonságát és a merevségét az előzőektől eltérően általában 2\*50 ütessel tömörített és 20 °C-on vizsgáljuk.

A hasító-húzó szilárdság  $\sigma_{Hh}$  (ITS):

$$\sigma_{Hh} = \frac{2F}{d \cdot h \cdot \pi} \quad (15)$$

ahol

$F$  - terhelő erő (N)  
 $d$  - minta átmérője (mm)  
 $h$  - minta magassága (mm)

A töréskor a terhelő erővel párhuzamos  $\sigma_z$  feszültség is keletkezik, amelynek a terhelésre merőleges felületen, az eloszlása szinuszos. A  $\sigma_z$  feszültség eloszlásának elméletét Schlee alapozta meg<sup>(7)</sup>, a minta közepén a terhelési síkban kialakuló feszültség:

$$\sigma_z = \frac{6F}{d \cdot h \cdot \pi} = 3\sigma_{Hh} \quad (16)$$

Az elmélet ellenőrzésére, a feszültségeloszlás részletesebb vizsgálata érdekében véges elemes számításokat is végeztek<sup>(8)</sup>, amely megerősítette a (14) összefüggést.

Az  $E_m$  merevségi modulus az MSZ EN 12697-26 szerint az alábbiak szerint számítjuk:

$$E_m = \frac{F(\mu+0,27)}{z \cdot h} \quad (17)$$

ahol,

$\mu$  - Poisson-tényező  
 $z$  - Z tengely irányú elmozdulás (mm)

A (15), (16) és (17) alapján a hasító-húzó szilárdságnál a fajlagos alakváltozás:

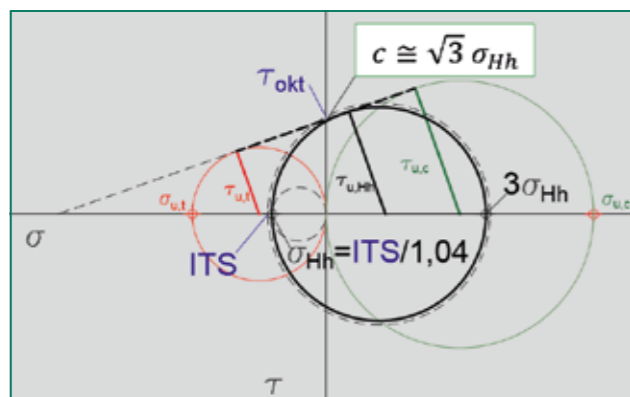
$$\varepsilon_h = \frac{z}{h} \frac{(1+3\mu)}{\pi(\mu+0,27)} \approx 1,05 \frac{z}{h} \quad (18)$$

Az  $\varepsilon_h$  törési fajlagos alakváltozáshoz tartozó  $\omega_h$  frekvencia:

$$\omega_h = \frac{\pi v_i}{d \varepsilon_h} \approx \frac{h \pi v_i}{1,05 d z} \quad (19)$$

A henger alakú próbatesten 50 mm/min felterhelési sebességen végzett hasító-húzó szilárdság mérés esetén az  $\varepsilon_h$  fajlagos alakváltozástól függően a várható  $\omega_h$  frekvencia 6-20 Hz. A tervezési elvart  $\omega_t$  frekvenciára a mért  $\sigma_{Hh}$  hasító-húzó szilárdságot (14) alapján a  $k$  hatványkitevő ismeretével kell átszámítani.

$$\sigma_{Hh}^{ter} = \sigma_{Hh} \left( \frac{\omega_t}{\omega_h} \right)^k \quad (20)$$



5. ábra: Hasító-húzó szilárdság vizsgálat töréskori feszültségállapota Mohr körökkel.

A hasító-húzó szilárdság mérésekor bekövetkező törés mindig három eltérő nagyságú normál főfeszültség elérésekor következik be.

A Tresca-féle elmélet és Huber-Misses-Hencky-féle HMH elmélet eltérése a hasító-húzó vizsgálatra vonatkozóan 1,04, ahol a Tresca-féle elmélet szerinti törőszilárdság a kisebb. A tiszta húzás és tiszta nyomás esetén a két elmélet azonos eredményt ad.

Ha a törést Tresca-féle elmélet szerint értelmezzük a törést, akkor a Mohr körök érintője nem érintő görbe, hanem egyenes. A valós törés a HMH elmélet szerint  $\tau_{okt}$  oktaéderes nyírófeszültségnél következik be, ezért a hasító-húzó vizsgálatkor kapott  $ITS$  törésre vonatkozó értékét, 1,04-el csökkenteni kell, ahol:

$$\tau_{okt} = \sigma_{Hh} \sqrt{\frac{13}{3}} \quad ; \quad \tau_{u,Hh} = 2\sigma_{Hh}$$

$$\sigma_{Hh} = ITS/1,04 \quad (21)$$

A hasító-húzó szilárdsághoz tartozó Mohr kör elég nagy pontossággal megadja Mohr-Coulomb-féle egyeneshez tartozó kohéziót:

$$c \cong \sqrt{3} \sigma_{Hh} \quad (22)$$

## 5. Triaxiális vizsgálatok

Amióta a triaxiális vizsgálatok léteznek, azóta az aszfaltkeverékeket is vizsgálják<sup>(9)</sup>. A triaxiális vizsgálatok elterjedésével párhuzamosan azonnal felvetődött, hogy az optimális bitumentartalmat triaxiális vizsgálatokkal kellene meghatározni. A triaxiális bonyolultsága és költségessége miatt a rutin vizsgálatoknál kezdetben a Marshall vizsgálatok terjedtek el, a triaxiális vizsgálatok megmaradtak a kutató-fejlesztő munkák körében. A triaxiális vizsgálatokat általában az jellemzi, hogy legalább két főfeszültség azonos, ezért a Tresca és a HMH-féle elmélet teljesen azonos eredményre vezet.

A triaxiális vizsgálatokat azonban általában az jellemzi, hogy mindhárom normál főfeszültség nyomás, viszont a pályaszerkezetben a legveszélyesebb, a legnagyobb kárt okozó feszültségek húzásból származnak. A kezdeti triaxiális vizsgálatokkal húzást nem lehetett vizsgálni, viszont a pályaszerkezet felső rétegeiben keletkező deformációk modellezésére alkalmas lehet, ahol mindhárom főfeszültségi irányban nyomás van.

A triaxiális vizsgálatokkal elő lehet állítani a Mohr-Coulomb-féle egyenest, viszont olyan feszültségállapotok esetén, ahol már húzás is előfordul a Mohr-Coulomb egyenes kiterjesztése csak feltételezés.

Sokszor felvetődik a kérdés, hogy milyen függvényt követ a Mohr körök érintője, egyenes vagy valamilyen egyéb függvényt, esetleg parabolát. Ép kőzetek vizsgálatánál pl. a Mohr-Coulomb helyett a Hoek-Brown modellt, ill. Griffith-parabola modelleket javasolják a közzettest repedezettségének függvényében<sup>(10,11)</sup>.

A javasolt modellek függenek a tiszta húzás/nyomás hányadosától az „n”-től. Az  $n < 6$  esetén egyenest javasolnak, mint érintő „sörbét” figyelembe venni, aszfaltkeverékek esetén az  $n < 6$  feltétel minden esetben teljesül.

A Griffith-parabola a hasító-húzó vizsgálati Mohr körhöz csatlakozik, vagyis feltételezi, hogy a hasító-húzó szilárdság egyezik a tiszta húzáshoz tartozó húzószilárdsággal, ami aszfaltkeverékek esetén nem valós feltételezés.

A triaxiális vizsgálatokkal csak a mérési tartományba eső paramétereket lehet pontosan meghatározni, ennek megfelelően a belső súrlódási szög pontosan meghatározható a Mohr körök középpontjával lehatárolt területen. Ez a terület minden esetben kívül esik az út-pályaszerkezetben keletkező normál főfeszültségek által meghatározott Mohr körök középpontjától lásd. az 1. ábrán jelölt világoskék színnel jelölt tartományt.

A triaxiális vizsgálat elvi alapjait tekintve nem különbözik a tiszta húzó-nyomó vizsgálatoktól, ezért az egyenletes felterhelésű húzó-nyomó vizsgálatokra vonatkozó (9), (10), (14) egyenletek itt is érvényesek.

Az egyenletes felterhelésű triaxiális vizsgálati eredményeket is át kellene számolni egy adott, tervezési  $\omega_t$  tervezési frekvenciára, az átszámításhoz azonban szükséges a töréshez tartozó fajlagos alakváltozás ismerete.

2019. évben közölt tanulmányban<sup>(12)</sup> a kínai szerzők különböző hőmérsékleten és aszfaltkeverékeken végzett, többször ismételt kompressziós triaxiális vizsgálatokkal próbálták az egyenes egyenlete helyett a Mohr köröket jobban közelítő összefüggést, egyenleteket felállítani.

A méréseket  $v = 1$  mm/min felterhelési sebességen végezték, 40, 50 és 60 °C-on, 0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0 MPa ellenőrzött feszültségeken, SMA-13, AC-13 és OGFC-13 „nyitott szerkezetű”, nagy hézagtartalmú aszfaltkeverékeken.

A közölt mérési eredményeket újra feldolgozva az egyenes egyenlete jobb korrelációt adott, mint a tanulmányban javasolt egyenletek.

Az újra feldolgozásból kapott 6. ábrán az SMA-13 60° C-on mért eredményei vannak ábrázolva, jól látható, hogy a lineáris megközelítés elvileg is megalapozott nagyon jó regressziót adott minden esetben.

$R^2 = 0,98-0,998$ , ezért a tanulmányban inkább igazolták az érintő egyenes helyességét, mint cáfolták.

Érdekességként feltüntettem a 6. ábrán az FZKA mechanikai stabilizáció Mohr-Coulomb egyenesét.

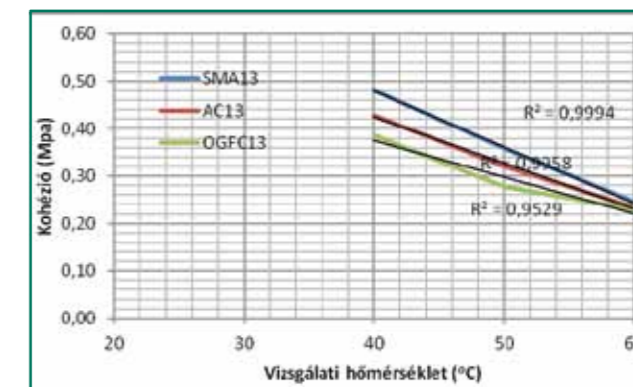
A vizsgálati tartományban – két vonal 0,4 - 2,2 MPa nyomás minden főfeszültségre - és vizsgálati feltételek mellett az FZKA minden esetben sokkal kedvezőbb, mint az SMA-13 aszfaltkeverék. A vizsgálati feltételek mellett az „optimális” bitumentartalom 0 százalék lenne, vagyis nem is kell bitumen, a víz is megfelelő.

A mérés nem hibás, sőt a levont következtetés is helyes, csak hogy az út-pályaszerkezetben minden esetben a 6. ábra szerinti „kiterjesztett” tartományban keletkeznek a feszültségek, ahol az FZKA már minden esetben sokkal kedvezőtlenebb, mit az SMA-13.

Az aszfaltkeverék optimális bitumentartalmát a húzófeszültség elviselését is lehetővé tevő kohézió adja, ezért az út-pályaszerkezet méretezése szempontjából rendkívül fontos a kohéziót befolyásoló tényezők, paraméterek ismerete.

A mérési eredmények azt igazolták, hogy a vizsgálati hőmérséklet növelése csökkenti a kohéziót, a 7. ábra szerint a kohézió a hőmérséklettel fordítottan arányos, minden vizsgált aszfaltkeveréken.

A 7. ábrán az OGFC13 a hazánkban is ismert nagy hézagtartalmú „nyitott” aszfaltkeveréket jelenti, pl. vízáteresztő vagy a BBTM aszfaltkeverékek.

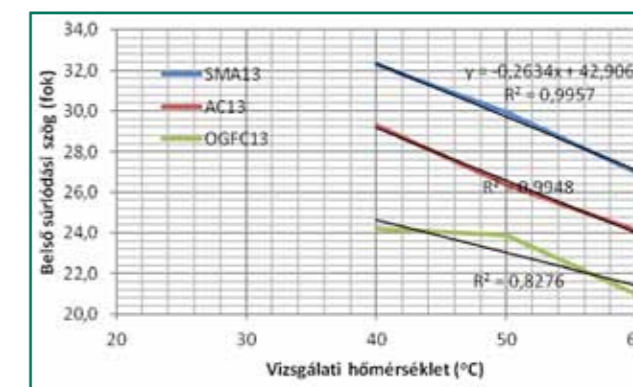


7. ábra: Kohézió hőmérsékletfüggése különböző aszfaltkeveréknél.

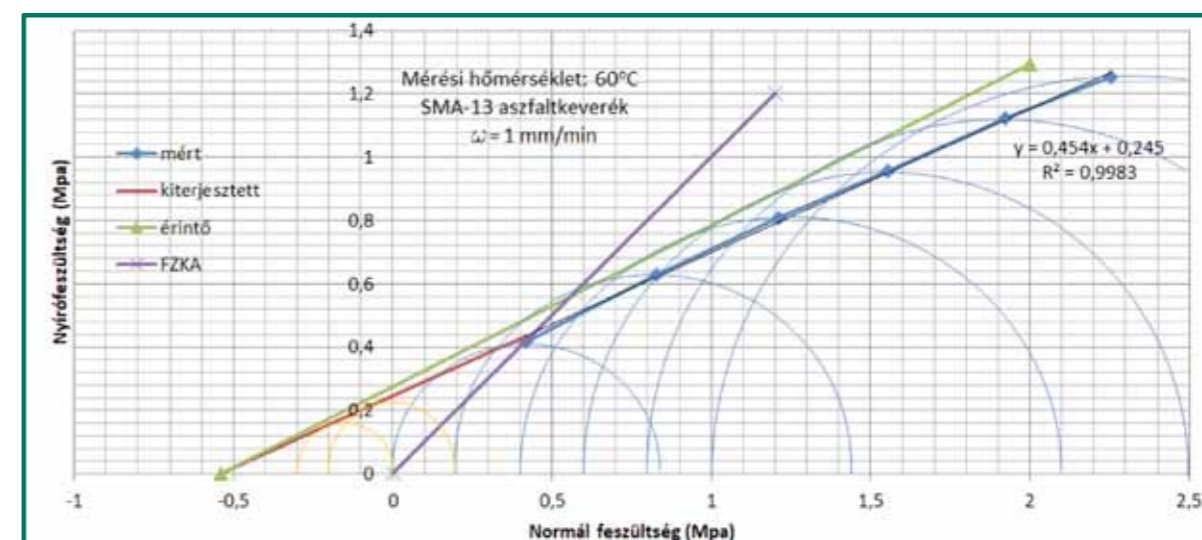
A keverékekhez alkalmazott bitumen SBS-el modifikált bitumen volt.

Az aszfaltkeverék kohéziójának hőmérséklet függését, nyilvánvalóan a bitumen nyírási modulusának, viszkozitásának hőmérsékletfüggése okozza.

A hőmérséklet azonban nemcsak a kohézióra, hanem a belső súrlódásra is hat, a 9. ábra szerint minden aszfaltkeverék típusra hasonló a hatás.

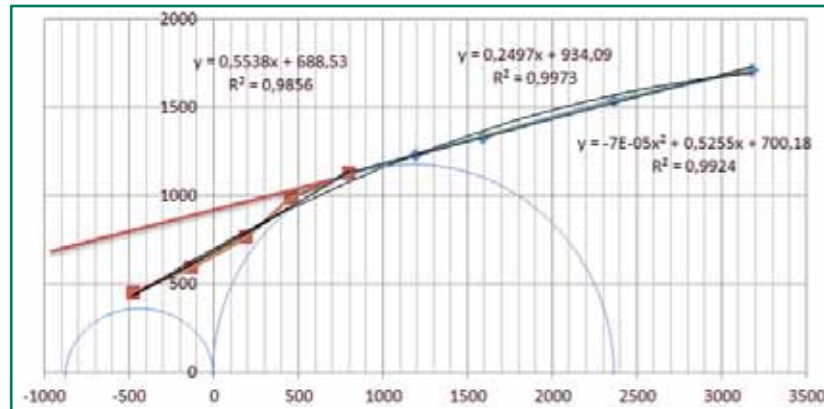


8. ábra: Belső súrlódási szög hőmérséklet összefüggése.



6. ábra: Kompressziós triaxiális vizsgálat eredménye és kiterjesztése a nem mért húzott oldalra.

Létezik olyan triaxiális mérés is, ahol csavarással el lehet érni, a húzást, de ekkor a készüléken belül szükségszerűen a készülék és a minta között a deviátor feszültség hatására olyan súrlódási feszültségek lépnek fel, amelyet nem, vagy csak igen pontatlanul tudunk meghatározni. Kínában húzófeszültséget is előállító triaxiális berendezést készítettek<sup>(13)</sup>. Az MTS készülékhez olyan kompressziós kamrát csatoltak, ahol a nyomást a henger alakú próbatestre rugalmas ballonok biztosítják. A készülékkel 0-6 Mpa nyomást ill. húzást lehet kialakítani 0,01 MPa megbízhatósággal. Az eltérő normál főfeszültségekkel a főfeszültségi irányokban jelentősen eltérő feszültségeket lehetett kialakítani. A 9. ábra szerint, ha minden főfeszültség nyomás, akkor ezen a tartományon belül – kék egyenes – számított belső súrlódási szög eltér a – piros görbe – már húzást is tartalmazó tartományban számított belső súrlódási szög értékétől. A vizsgálati módszer validálása azonban elmaradt. A vizsgálati módszert össze lehetett volna hasonlítani a tiszta nyomás és húzás vizsgálatával, vagy a még nem említett tiszta nyírással is.



9. ábra: A törést okozó mért  $\tau_{okt}$  oktaéderes nyíró feszültségek a tiszta húzáshoz és nyomáshoz tartozó Mohr körökkel.

A 9. ábra azonban felhívja a figyelmet, hogy a triaxiális vizsgálat eredményeként kohézió csak egy extrapolálás és nem egy valóban mért érték, és fenntartással kell kezelni a belső súrlódási szög értékét is. A 9. ábrán alapvető hiba, hogy a mérést nem számolták át azonos frekvenciára, amely éppen a piros vonallal jelzett tartományban okozza a legnagyobb eltérést a mért és az azonos frekvenciára átszámított feszültségek között, mert ebben a tartományban a mért három főfeszültség jelentősen eltért egymástól,

amelyek következménye a főfeszültségi irányokban az eltérő fajlagos alakváltozások. A (10) egyenletet minden főfeszültségi irányra külön-külön kellett volna számítani, ami nem történt meg.

A triaxiális méréseknél vetették fel először, hogy az ellenőrzött nyomástól függ a merevségi modulus. Ezek a vizsgálatok is figyelmen kívül hagyták, hogy a mérések összehasonlítása csak azonos mérési frekvencián ad megfelelő eredményt. Sajnos ezt a tényt sokszor figyelmen kívül hagyják, ami könnyen vezethet, vezet hibás következtetésekre.

A Coulomb-Mohr-féle egyenes egyenletét a triaxiális vizsgálatok helyett sokkal megbízhatóbban és egyszerűbben, ezáltal megbízhatóbban lehet megadni a tiszta nyomó-húzó vagy /és ITS vizsgálatok alkalmazásával, amelyek egyúttal olcsóbb mérési módszerek.

## 6. Összefoglaló javaslatok, megállapítások

Az út-pályaszerkezet méretezéshez ismerni kell az aszfaltkeverékek komplex modulusát és az aszfaltkeverékek szilárdságát, amit a kohézió és a belső súrlódási szög által meghatározott Mohr-Coulomb-féle egyenes egyenletével azonosítunk a normál feszültség függvényében.

A kohéziót és a belső súrlódási szöget meghatározó szilárdsági vizsgálatokat, tiszta húzás, hajlítás, tiszta nyomás, tiszta nyírás, ITS vizsgálat ill. triaxiális vizsgálatok eredményeit a megadott egyenletek segítségével az adott vizsgálat felterhelési sebessége alapján át kell számolni a tervezési frekvenciára és hőmérsékletre.

Törekedni kell arra, hogy adott vizsgálat esetén olyan felterhelési sebességet válasszunk, hogy a bekövetkező tönkremenetel a tervezési frekvencia környezetében legyen.

A belső súrlódási szög meghatározásához javasolt a tiszta húzás, vagy hajlítás és a tiszta nyomás és/vagy ITS vizsgálatának elvégzése.

A kohézió gyors és egyszerű meghatározására célszerű az ITS hasító-húzó szilárdság mérése, amely vizsgálat alkalmas a minőség ellenőrzésére és a már elkészült, beépített aszfaltkeverék megbízható minősítésére.

## Irodalomjegyzék:

- Zsichla L. 2023: Útpályaszerkezet méretezése a törésmélelet alapján; Útügyi Lapok, 11. évfolyam, 18. szám. <https://doi.org/10.36246/UL.2023.1.06>
- e-UT 06.03.13:2005 UME, Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezése és megerősítése.
- MSZ EN 12697-24:2013 „D” melléklete szerint
- Egbert Beuving 2007: Fejlődés Európában az aszfaltkeverékek tulajdonságainak jellemzése területén; Közúti és Mélyépítési Szemle, 7. szám
- Tóth Cs., Seouyoung Cho, Primusz P. 2020: A Ramberg-Osgood modell alkalmazása az aszfalt technológiában; Útügyi lapok, 8. évfolyam, 13. szám. <https://doi.org/10.36246/UL.2020.1.06>
- L.F. Walubita, G. S. Siamte, J. H. Oh. 2010: Characterizing the ductility and crack resistance potential of asphalt mixes based on the laboratory direct tensile strength test; Journal of the South African Institution of Civil Engineering, Vol 52 No 2, October 2010, P 31-40.
- Schleeh, W 1978: Zur Ermittlung der Spaltzugfestigkeit des Betons. In: Beton (1978), Nr. 2, S. 57-62
- Lenz Peter, 2012: Beton-beton-verbund potenziale für schubfugen. Dissertation, Technischen Universität München.
- Berger R. 1968: Vergleich von Ergebnissen des Triaxial Tests und Marshall Tests; Bie Strasse, 1968.4.
- Vásárhelyi Balázs 2016: Az alkalmazott közetmechanika alapjai. Hantken Kiadó, 2016.
- Somosvári Zsolt 2010: A repedezett közzettett (közetmasszívum) geomechanikai paramétereinek meghatározás. Miskolci Egyetem, 2010, 123-134. oldal.
- Tou Huang, Shuai Qi, Hongfu Yu, Sheng Li 2019: Share Properties of Asphalt Mixture under Triaxial Compression; <https://doi.org/10.3390/app9071489>
- Jianlong Zheng, Tuo Huang, 2015: Study on triaxial test method and failure criterion of asphalt mixture. Journal of Traffic and Transportation Engineering 2015; 2 (2):93-106.

# Közútkezelői feladatok az önvezető autók terén

**Bortei-Doku Shaun**



üzemeltetés-fenntartási mérnök  
Magyar Közút Nonprofit Zrt.

## Baljós jelek

2022 július 5-én Steve Phillips, a CEDR (Conference of European Directors of Road - Európai Közútkezelők Tanácsa) főtitkára baljós közleményt tett közzé, mely magyar fordításban így szól:

*„A közútkezelőknek tisztában kell lennie azzal, hogy előfordulhat, hogy a jól bevált gyakorlat szerint kialakított terelések nem érik el a kívánt hatást, ha az érkező járműben új típusú fedélzeti rendszerek működnek; ez közlekedés-biztonsági kockázatot jelent.”*

Ezt fél évvel megelőzve a Rijkswaterstaat (röviden RWS, a holland Infrastruktúrákezelési és Vízügyi Minisztérium – lényegében a közútkezelő) kiadott egy fehérkönyvet [1], melyben az önvezető autók témakörét járták körbe. Az anyagban többek között felhívták a figyelmet annak fontosságára, hogy a közútkezelői szakma elkezdjen beszélni arról, hogyan kellhet átalakítania gyakorlatát az önvezető autók fokozott térnyerése következtében.

Ezt a témát karolta fel a CEDR, és a probléma valódiságát demonstrálандó az RWS-sel közösen, 2022 októberében életre hívtak egy addig példanélküli technológiai bemutatót, melyen képviseltette magát minden érdekelt fél az önvezető autók kapcsán: jelen voltak autógyártók, szenzorgyártók, közútkezelők, hatóságok és jogalkotók is több országból – a Magyar Közút Dr. Mocsári Tibor kollégámmal képviseltük. A demonstráció egy holland kisvárosban, Lelystad-ben található járműipari teszt pályán zajlott, és az esemény során 5, legalább SAE 2-es önvezető szintű autót teszteltek olyan szituációkban, amelyekkel ezek az autók ténylegesen találkozhatnak gyorsforgalmi utakon kialakított tereléseknél.

Ahhoz, hogy megértsük a teszt egy fontos részét, előbb át kell tekintenünk, hogyan is különböztetjük meg az önvezetési szinteket. Az SAE (Society of Automotive Engineers – Járműmérnökök Társasága) kidolgozott egy J3016 jelzetű szabványt, amely 6 szintet különböztet meg, ezek egyszerű leírását az 1. táblázat tartalmazza.

Önvezetési szint	Kritérium	Emberi felügyelet
SAE 0	vagy nincsenek vezetéstámogató rendszerek, vagy ha vannak, csak pillanatszerűen avatkoznak be a vezetés műveletébe	kell
SAE 1	a jármű képes vagy távolságot tartani az előtte haladó járműtől (adaptív tempomat - ACC), vagy a sáv közepén tartani magát (Lane Keeping Assistant - LKA), de a két műveletet együtt nem képes végezni	kell
SAE 2	a jármű képes távolságot tartani és a sáv közepén tartani magát (tehát ACC és LKA együtt is aktív lehet)	kell
SAE 3	a jármű képes valós önvezetésre (pl. sáv váltás, állóra fékezés, navigáció), de az irányítást bármikor visszaadhatja az emberi sofőrnek	kell
SAE 4	a jármű képes valós önvezetésre, de csak földrajzilag lehatárolt területen, viszont azonnali emberi beavatkozás szüksége már nem merülhet fel	nem kell
SAE 5	a jármű bárhol képes valós önvezetésre, emberi beavatkozást nem igényel	nem kell

1. táblázat: az SAE által meghatározott önvezetési szintek rövid magyarázata

Ezt olvasva megállapítható, hogy a jelenleg útjainkon közlekedő autók túlnyomó többsége SAE 0-s szintű, de még a legkorszerűbb autók sem igazán haladják meg az SAE 2 szintet. Külön érdemes belegondolni az SAE 3-as szintű autók veszélyeibe: itt áll elő ugyanis az a kombináció, hogy az autó bár normál körülmények közt meggyőzően végzi a teljes önvezetés műveletét, ha mégis bármilyen történik, amely miatt a jármű az automatika kikapcsolása mellett dönt, a sofőrnek másodperceken belül át kell vennie az irányítást. Ez pedig nyilvánvalóan csak akkor elegendő a baj megelőzéséhez, ha előtte, az önvezető fázisban figyelme nem kalandozott el, vezetésre képes állapota megmaradt.

Visszatérve Lelystad-hez: bár a teszt során a járművek mind SAE 2 szintűek voltak, a legelső teszt egy SAE 0-s szintű alrendszer, az AEB (Automatic Emergency Braking – automata vészfék) viselkedését vette górcső alá. Ez a rendszer az ENSZ előírása alapján [2] úgy hivatott működni, hogy ha a jármű haladása közben olyan akadályt észlel, amellyel a jármű ütközne, ha sebességét megtartja, először figyelmezteti erre a sofőrt, és ha a veszély továbbra is fennáll, akár fékezéssel, akár kormányzással elkerüli az ütközést, vagy csökkenti annak súlyosságát.

Az RWS más nyugati közútkezelőkkel egyetemben azt a gyakorlatot követi évek óta, hogy gyorsforgalmi úti tereléseknél járműveivel nem a sávval párhuzamosan, hanem kb 30-45 fokban ferdén, ún. „fend-off” pozícióban áll meg (ez alól természetesen kivétel a TMA-val, tehát ütközési energiát elnyelő berendezéssel szerelt teherautó). Ennek több előnye is van: az érkező sofőrök számára messziről egyértelmű, hogy a közútkezelői jármű áll, illetve, hogy „valami nem ok”, tehát, hogy egy megváltozott forgalmi szituációban fogják találni magukat. Ezen felül nagyobb felületen látszanak a közútkezelői járművek figyelmeztető szimbólumai, feliratai és villogói is. Ezeket az előnyöket azonban semmissé teheti az, ha az így leállított autót az önvezető autók vagy későn, vagy egyáltalán nem észlelik.

Nem meglepő tehát, hogy amikor az RWS elkezdett rájönni, hogy a fend-off pozícióban álló autót nem észlelik az önvezető járművek, meg is kongatták a vészharangot. Lelystad-ben is ez volt az első teszt, és valóban megdöbbenés ült ki az arcokra, amikor a jelenlévők tapasztalták, hogy az 5 tesztelt járműből egyetlenegy volt (Mercedes Actros F nyerges vontató), amelyik észlelte az akadályt (a teszt során egy szabványos „szivacsautót”, lásd 1. ábra), és időben lefékezett.



1. ábra: Tesla ütközése a szivacsautóval a lelystad-i tesztpályán

A többi teszten is hasonlóan rosszul szerepeltek a járművek, így az esemény végén Phillips ráerősített korábbi figyelmeztetésére, azzal kiegészítve, hogy mindegy, hogy az önvezető autó felismeri-e a ferde szögben parkoló járművet járműként, akkor is meg kellene állnia, ha az egy darab beton lenne, mert az akadály az akadály.

Lelystad-ből hazatérve már más szemmel néztem a Magyar Közút közös használatú járműveit is. A flotta fiatalodásával megjelentek SAE 1-es szintű autók is, amelyekben adaptív tempomat működött, aztán érkeztek olyan járművek, amelyek hiába voltak még ezeknél is koszerűbbek, mégis SAE 0 szintet képviseltek. Már ebből is érződött, hogy nem könnyű kiigazodni a különböző szinteken és rendszereken, úgyhogy elhatároztam, hogy írok egy belső felhasználásra szánt segédanyagot a közutas autók rendszereiről és azok használatáról. Itt kezdett igazán kilátszani ennek a probléma-jéghegyenek a csúcsa.

Az érintett autók vonatkozásában írtam a forgalmazónak annak reményében, hogy fog tudni ad egy listát minden olyan vezetéstámogató rendszerről, amely az adott járművekben működik. A forgalmazótól azonban az a válasz érkezett, hogy nem tud segíteni, mivel az egyes felszereltségi szintek tartalma nem csak modelltől, de a modellévtől is függ. Gondoljunk bele, mit is jelent ez: nekem, mint sofőrnek, aki egy céges tulajdonú autóra száll be, nem elég tudnom a gyártót és a típust, de még azt is kell tudnom, melyik évben gyártották az autót.

Ezután fellapoztam az autók interneten elérhető kezelési utasítását, ahol (nem meglepő módon) az fogadott, hogy a kézikönyv minden olyan vezetéstámogató rendszert listáz, amely az adott autótípusban előfordulhat, mindezt arra való tekintet nélkül, hogy a konkrét járműbe végül melyik rendszer került be, és melyik nem. Erre tett rá még egy lapáttal az, hogy a rendszereket néha nem is a nemzetközi nevezéktan, vagy a köznyelvi név alapján hivatkozták: a mindenki által tempomatként ismert rendszert például a kézikönyv „GRA”-ként említette.

Utolsó reményként végigmentem az egyik kiválasztott autó beállításain, hátha abból kiolvasható, milyen rendszerek is üzemelnek benne. Ez is vakvágány volt: három különböző menüben voltak szétszórva a rendszerek, valamelyik kikapcsolható, volt, valamelyik nem, sőt, olyan is volt, amely még listázásra sem került. Itt látszott tehát az első nagy probléma: egységes nevezéktan és szabványosított összesítő lista hiányában az ember jó eséllyel úgy száll be egy korszerű autó volánja mögé, hogy nem tudja, milyen rendszer hogyan fog a vezetés folyamatába aktívan „beleszólni”.

## SAE 4-es autók a forgalomban

Gondolná az olvasó, hogy mindez kicsit aggasztó, de ha időben reagál rá a szakma, még menthető a dolog. Nos, az a rossz hír, hogy eközben az Egyesült Államokban már majdnem 10 éve közlekednek SAE 4-es önvezető autók közúton. 20 államban engedélyezett a teljesen autonóm járművek közúti tesztelése, és ebből 8 államban már üzemeltetett is fejlesztőcég az elmúlt években önvezető flottát.

Ha San Francisco városát nézzük: 2023 októberéig a Cruise (a General Motors önvezető projektje) 300 autót üzemeltetett vezető nélküli taxiként, míg fel nem függesztették tevékenységüket egy baleset miatt. Ezzel párhuzamosan pedig a Waymo, a Google leányvállalata 250 autót üzemeltet hasonló célból jelen cikk írásának időpontjában is.

Jeanine Nicholson, a város tűzoltóparancsnoka frusztrációjának adott hangot amiatt, hogy az esethez vonuló tűzoltóautók gyakran karamboloznak ezekkel az önvezető taxikkal (csak 2023-ban összesen 55 ilyen incidens történt [3]), mivel azok viselkedése néha kiszámíthatatlan, és nem úgy reagálnak a megkülönböztető jelzésre, mint egy ember vezette jármű. De az autókkal a rendőrségnek és a közútkezelőnek is meggyűlik a baja: felkerült egy felvétel az internetre, ahol egy rendőr járőr próbálja megállásra bírni az önvezető taxit, de az mindig elhajt előle, illetve több olyan eset is előfordult, ahol a jelzőőr jelzéseit nem ismerve a robotaxi munkagödörbe vagy frissen burkolt útra hajtott.

Emellett San Francisco lakossága is eltérő lelkesedéssel fogadja az új jövevényeket: van, aki Tiktok videóban demonstrálta, hogy egy STOP táblát ábrázoló pólóval az út mentén megállva megálljt tud parancsolni a Waymo autóinak, de arra is többen rájöttek, hogy a robotaxik motorházatetejére terelőkúpot helyezve az autó teljesen megbénítható.



2. ábra: Tűzoltóautóval karambolozott Cruise önvezető taxi San Francisco városában

## Nem ez az első ilyen korszak

A fent leírtakból látszik, hogy egy olyan különös (és kockázatos) időszakot élünk, amikor egy új, kibontakozó technológia egyre több helyen jelenik meg, olyan helyeken, ahol ezt sem a hatóságok, sem a jogalkotás, sem az érintett használók nem tudják teljesen lekövetni. Azonban nem ez az első ilyen időszak!

Könnyű párhuzamot vonnunk hazánk egy hasonló periódusával, ha visszamegyünk az időben úgy 130 évet.

Hatsek Béla optikus volt az első magyar, aki autót vásárolt Magyarországon 1895-ben. 4 évvel később Törley József, a pezsgőgyáros – és a motorizáció nagy támogatója – lovas fogatait cserélte le tehergépkocsikra.

Ugyanebben az évben a Belügyminisztérium megvizsgálta, hogy szükséges-e a növekvő számú autók miatt bármilyen szabályozást kidolgozni, de arra jutottak, hogy mivel még alig 50 gépkocsi közlekedik Magyarországon, ez egyelőre nem indokolt.

A folyamat 1900-ban folytatódott:

a Magyar Királyi Posta üzembe állította a Csonka-féle postakocsikat, és nem kellett innentől kezdve sokat várni az első gyalogosgázolásra sem: 1900 decemberében Törley József maga sodorta el autójával Czolits János utcseprőt.

Az ügy nem került bíróságra, a pezsgőgyáros peren kívül megegyezett a könnyű sérüléseket szenvedő áldozattal, miután 3 napi munkabérét megtérítette



3. ábra: Hatsek Béla optikus, az első magyar autótulajdonos

Végül 1901-ben jelent meg egy kezdetleges, 17 pontból álló KRESZ („Automobil forgalmi szabályrendelet”), és ugyanebben az évben adták ki az első jogosítványokat és forgalmi engedélyeket is [4].

55 évvel később, 1956 június 30-án, az amerikai Grand Canyon fölött ütközött össze a United Airlines 718-as és a Trans World Airlines 2-es járata, a szerencsétlenség mind a 128 elszenvető életét követelte. Ez a tragédia újabb fontos példája volt annak, hogy a szabályozás általában le van maradva a technológia fejlődésétől: a baleset úgy következett be, hogy minden érintett minden szabályt betartott. Régen ugyanis nem volt központosított légiforgalmi monitoring, mint napjainkban, helyette a légitársaságok saját diszpécser szolgálatokat üzemeltettek, és a repülő személyzet velük tartott kapcsolatot, előre meghatározott bejelentkezési pontokon.

Az így kapott információkat aztán a diszpécserek tovább jelentették a központi légiforgalmi irányításnak.

Az információs szünetekben (tehát két bejelentkezési pont közt) az útvonal és a repülési magasság is a pilótákra volt bízva, tehát az egyes légitársaságok elkülönítése is szabad szemmel, a szélvédőn kinézve történt.

A légszavaros repülőgépek vezetése közben azonban sokkal nagyobb figyelmet kellett fordítani a műszerekre, és – hiába repültek ekkoriban a gépeket 3 fős legénységek – kevesebb idő jutott kinézni a szélvédőn. Így fordulhatott elő, hogy mire a United legénysége meglátta a TWA gépet, már nem lehetett elkerülni a katasztrófát. A baleset következtében a nyomozás megállapította, hogy a légiforgalmi szabályozás már olyan szinten elavult, hogy a biztonságos légiközlekedés nem lehetséges annak változtatása nélkül [5].

E két esetből az látszik, hogy a szabályozás legtöbbször a technológia fejlődését próbálja utolérni, és sajnos többször is emberéletekbe kerül, hogy észrevegyük a szabályozási környezet elégtelenségét.

## Követő szabályozás a jelenben

Ugyanez az átmeneti időszak az elmúlt száz évtizedben is megfigyelhető. 2016. február 14-én okozott először balesetet önvezető autó: a californiai Mountain View városában a Google egy tesztjárműve hajtott neki egy városi busz oldalának [6]. Ez a baleset csak anyagi káros volt, de 2 évvel később, 2018. március 18-án már embert ölt egy önvezető autó [7]. Az arizonai Tempe-ben Elaine Herzberget gázolta halálra az Uber egy önvezető autója, miközben kerékpárját tolta keresztül az úttesten egy sötét úton. Habár az állam törvényei alapján ekkor még csak felügyelő sofőrrel közlekedhettek az ilyen tesztautók, a balesetet okozó autó volánja mögött ülő nő nem az útra figyelt a gázolás előtti pillanatokban. Az eset következtépp a felügyelő 3 év felfüggesztett próbaidőt kapott, és Arizona állam visszavonta az Uber engedélyét.

2020. június elsején Taiwanon egy SAE 2-es módban közlekedő Tesla hajtott bele fékezés nélkül egy felborult teherautóba az autópályán (sérülés nem történt) [8], egy évré, 2021. augusztus 12-én Kínában hajtott bele egy szintén SAE 2-es járműként közlekedő NIO ES8-as a közútkezelő autópályás terelésébe – a sofőr életét követelve [9]. Két évvel ezután, 2023 október 2-án pedig San Franciscóban a Cruise egyik SAE 4-es autója hajtott át egy olyan járókelőn, akit egy másik, emberi sofőr vezetett el [10]. Ez volt az a korábban említett baleset, amely miatt a Cruise szüneteltette tevékenységét.

Ha megvizsgáljuk a fent leírt balesetek jogszabályi környezetét, azt látjuk, hogy nincs globálisan egységes szabályozás. Hazánkban 2017-ben a közlekedési tárca (akkor Nemzeti Fejlesztési Minisztérium) kiadta a 11/2017-es rendeletet „A fejlesztési célú járművekről”, amelyben megengedik akár az SAE 5-ös autók közlekedését is közúton, de a volán mögötti, magasan képzett felügyelő sofőr jelenlétéhez kötik. Emellett a 133/2022 kormányrendelet 8. pontja már kimondja, hogy a közútkezelő úgy köteles alkalmazni a jelzőtáblákra vonatkozó szabályozást, hogy különös figyelmet fordít az automatizált vezetéstámogató rendszerek általi észlelhetőségre és olvashatóságra. Azt azonban, hogy ez hogy érhető el, a jogszabály nem fejt ki.

2020-ban az amerikai Nemzeti Autópályaközlekedés-biztonsági Hivatal (NHTSA) dolgozott ki egy olyan

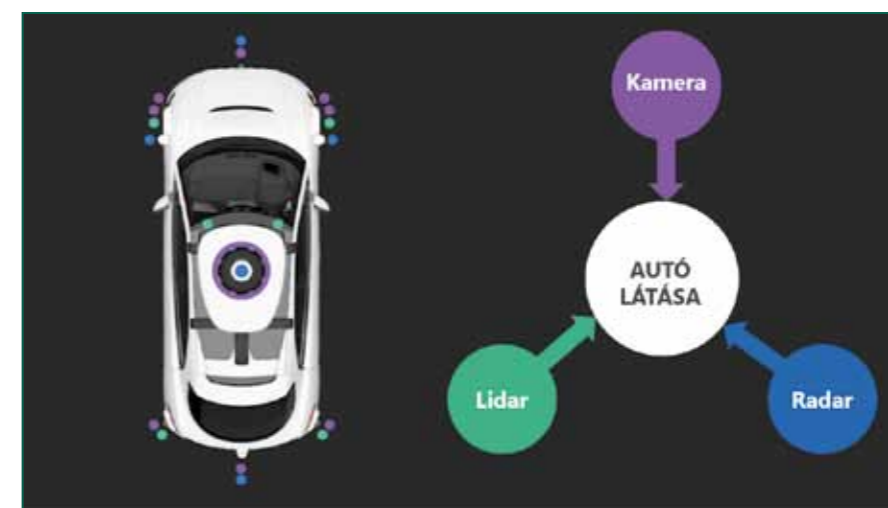
irányelvet, amely például megszabja, hogyan reagáljanak az önvezető autók egy-egy helyzetre. 2022-ben az ENSZ annyival egészítette ki a Bécsi Közúti Közlekedési Egyezményt (melynek Magyarország, és köztük sok más európai ország is aláíró tagja), hogy a járművet automatika is vezetheti, nem csak ember. Az EU már többet haladt a témában: ugyanebben az évben adták ki a legutóbbi, részletes engedélyezési keretrendszert önvezető autók jóváhagyására. Ezt azonban e cikk megírásáig alig néhány ország ratifikálta.

## Hogy lát, hogy gondolkodik az önvezető autó?

A legtöbb önvezető autó három fajta szenzor jeleire hagyatkozik: kamera, radar és lidar (tehát lézer alapú radar) alapján tájékozódik a környezetben. E szenzorok eltérő előnyökkel és hátrányokkal rendelkeznek: a kamerák például – akár az emberi szem – képesek színeket megkülönböztetni és feliratokat olvasni, azonban sötétben vagy rossz látási viszonyok közt ugyanúgy nem boldogulnak, mint mi. Ezzel szemben a radart nem hatják meg a rossz látási viszonyok, „ellát” többszáz méterre is, azonban a radarjelből nem igen lehet következtetni valami méretére vagy alakjára. Egy kicsi, de fémes összetételű tárgy ugyanis sokkal erősebb radarjelet képes produkálni, mint egy nagy, de nem fémes tárgy. A hajózásban ezért használnak például radarreflektorokat: olyan geometriájú eszközöket, amelyek koncentráltan verik vissza az elektromágneses hullámokat, és ezáltal a radarképen fényes pontokként tűnnek fel, jelezve, hogy ott valami fontos van.

A lidar hasonló elven működik, mint a radar, csak elektromágneses hullámok helyett lézernyalábokat bocsát ki, és azok visszaverődését figyeli, ezáltal alkotva 3D-s modellt a környezetről. Térlátásra jobb, mint bármelyik másik szenzornak, azonban színeket, feliratokat ez sem képes olvasni. Érdekesség, hogy Elon Musk, a Tesla tulajdonosa kategorikusan kijelentette, hogy Tesla-n sosem lesz lidar – emiatt a Tesla az egyetlen olyan önvezető autót gyártó cég, amely nem használja ezt a fajta szenzort.

De még ha ettől el is tekintünk: ahány autógyártó, annyi féle logika alapján áll össze az önvezető autók látása: nem tudni, milyen arányban hagyatkoznak melyik szenzor jeleire.



4. ábra: Példa egy önvezető autó látásának összetevőire

A gondolkodásuk sem sokkal világosabb: a Tesla SAE 3-as önvezető módját például még egy 300.000 programsoros, de emberi kéz írta kód vezérelte, ezzel szemben az SAE 4-es szintet már egy konvolúciós neurális háló (convolutional neural network - CNN) alkotja. Ez – nagyon leegyszerűsítve – úgy áll elő, hogy az emberi programozó két algoritmust ír: egyet, amely kódot ír, szinte véletlenszerű paraméterekkel, és egyet, amely ezeket a kódokat teszteli, és figyel, melyik teljesíti legjobban a kitűzött célokat: a végén a legjobban teljesítő kód (neurális háló) nyer.

Ez azonban ahhoz vezet, hogy a nyertes kód működését még a programozók sem ismerik az utolsó részletig, tehát nem megjósolható az algoritmus viselkedése minden helyzetben. Ezért aggasztó, hogy a Teslát SAE 4-es módban már ilyen kód vezérli: nem tudja, mi az a záróvonal, sem azt, mi az a STOP tábla, csak megnézte többezer másik Tesla fedélzeti felvételeit, és eltanulta, hogyan szokás vezetni.

Az pedig külön izgalmas csavart jelent a történetben, hogy a Tesla távolról is tudja frissíteni az általa eladott járműveket. Tehát könnyen előfordulhat, hogy az autó, amellyel hétfőn beállok a garázsomba, SAE 3-as szintre képes, de kedden, egy frissítés után már SAE 4-esként veszem elő. Ez nem csak a sofőrnek, de a közútkezelőnek is egy dinamikus és gyorsan változó technológiai környezetet eredményez.

A Google pedig a Föld lakosságának erőforrásait kombinálja autói tanítására. Amikor az ember egy weboldalon be kell bizonyítsa, hogy nem robot, gyakran kap olyan képes feladványokat, ahol ki kell választani minden olyan cellát, ahol pl. buszok, jelzőlámpák vagy gyalogátkelők vannak. Nem véletlen, hogy ezek mindig közlekedési feladványok: mire a felhasználó megkapja a feladványt, az ellenőrzésen már átment (keresési előzmények, a kurzor mozgása, és egyéb paraméterek alapján már tudható, hogy ő egy ember).

Innentől kezdve a Google úgy gondolja, hogy van egy emberi tesztalany, aki motivált arra, hogy bejusson a weboldalra, tehát vélhetően helyesen fogja megoldani a képes feladványt. És ha ugyanazt a feladványt többmillió ember ugyanúgy oldja meg, a Google igazként elfogadja és validálja a megoldást, és vélhetően felhasználja önvezető projektje, a Waymo autóinak tanítására. Emiatt az sem zárható ki, hogy ezek az autók eltanulhatnak emberi tökéletlenségeket.

A fent leírtak pedig akkor válnak igazán aggasztóvá, ha belegondolunk, hogy megannyi gyártó megannyi különböző logika alapján kódolt, és különböző szenzorok útján különféleképp látó járműve ugyanabban a közúti környezetben kell boldoguljon.



5. ábra: A 6-os út a budafoki kanyarnál 2018-ban és 2022-ben a Google Street View felvételén

## Ember viszonya a géppel

Eddig a technológiáról beszéltünk, de essen pár szó azokról az emberekről is, akik e technológia felhasználói. Vizsgáljunk meg egy újabb repülőgép-szerencsétlenséget: 1972. december 29-én az Eastern Air Lines 401-es járata leszállni készült a floridai Miami-ban, ám amikor a pilóták kibocsátották a futóműveket, az orrfutó helyes rögzülését visszajelző lámpa sötét maradt. Mivel nem lehettek biztosak benne, hogy csak az izzó égett ki, vagy tényleg nem nyílt ki teljesen a futómű, robotpilótára kapcsolták a gépet, hogy a kézi repülés terhe nélkül tudjanak megbizonyosodni a leszállás biztonságos mivoltáról. Egy ponton azonban a pilóta véletlenül meglökte a szarvkormányt, minek következtében a Lockheed L-1011-es robotpilótája visszajelzés nélkül kikapcsolt. Innentől kezdve egyik személyzeti tag sem vette észre, hogy a repülő lassú süllyedésbe kezd, annak ellenére, hogy a szokásosnál nagyobb, 4 fős személyzet repülte a gépet. A repülő végül a floridai Everglades mocsárba csapódott, 101 ember életét követelve.

A katasztrófa után elrendelt nyomozás többek között egy *automatizációs torzítás (automation bias)* nevű jelenséget tett felelőssé, amely értelmében az emberek, ha automata rendszerek segédkezése mellett dolgoznak, túl nagy bizalmat szavaznak az automatikának, és ennek következtében hamis biztonságérzetük támad, lankad a figyelmük és csökken a helyzetérzékelésük. Ez tökéletesen igaz a mai korra is: ha bárki kételkedne ebben, keressen YouTube-on a „Tesla” kifejezésre, és mellé olyan tevékenységekre, amelyeket nem illik vezetés közben végezni. Videók százai mutatnak SAE 2-es módban közlekedő autók volánja mögött alvó, olvasó, illetve egyéb, ezen újság hasábjaira nem való tevékenységet végző embereket. És emlékezzünk: az SAE 2 még folyamatos emberi felügyeletet igényel!

## Mit csináljon másképp a közútkezelő?

Ahogy az elején idézett közlemény fogalmaz: a közútkezelőnek számolnia kell azzal, hogy olyan gyakorlatok, amelyek eddig tökéletesen működtek, az önvezető autókkal már nem fognak. De mit jelent ez a mindennapok szintjén?

Például probléma lehet, ha egy munkaterülethez tartozó depónia területén olyan helyre tesznek nem a közlekedőknek szánt jelzőtáblákat, amely az útról is látszik. Az emberi sofőr felismeri a helyzetet, és tudja, hogy egy rakáson 20 STOP táblát nem kell komolyan venni, azonban egy önvezető autónál egyik közútkezelő sem jelentheti ki nagy biztonsággal, hogy nem fog állóra fékezni a nyílt út közepén.

Ugyanígy egy sávelhúzásos terelés sárga, ideiglenes burkolati jeleit sokszor nem távolítja el megfelelően a vállalkozó, és az a sávelhúzás után hónapokkal, akár évekkel később is helyben marad (példa az 5. ábrán).

Ha emberi sofőr hajt át ilyen helyen, valószínűleg a többi autó mozgásából, vagy helyismeretéből adódó rutinjából tudja, hogy neki nem a sárga, hanem a fehér burkolati jelekkel kijelölt sávot kell követnie, azonban egy önvezető autó logikájában joggal szerepelne az a fontossági sorrend, hogy a fehér burkolati jelet a sárga felülbírálja. Innentől kezdve előfordulhatnak sávváltásból eredő balesetek, ha az önvezető autó egy ilyen helyzetben magára van hagyva. Látszik tehát, hogy olyan közútkezelői mulasztások, amelyek eddig kevésszer vezettek balesetbe az ember helyzetfelismerése miatt, az önvezető autók korában már nem lesznek megengedhetők.

Aztán vannak azok az esetek, amelyeknél még csak nem is lehet közútkezelői hibáról beszélni. Például amikor egy gyorsforgalmi úton egy-egy csomópontban a főpályáról leágazik úgynevezett gyűjtő-elosztó pálya (GYEP), és egy darabig a főpályával párhuzamosan fut, előfordul, hogy a GYEP-re érvényes alacsonyabb sebességhatárítás úgy van kihelyezve az út jobb és bal oldalán, hogy a GYEP bal oldali jelzőtáblája a főpálya jobb oldali jelzőtáblájának is látszódnak (6. ábra). Mivel az egyes autógyártók logikáját nem ismeri a közútkezelő, hogyan tudja megállapítani, mi az a biztonságos távolság a főpályától, ahonnan már nem veszi figyelembe – tévesen – az önvezető autó az alacsonyabb sebességhatárítást, és kezd el lassítani látszólagos ok nélkül, ezzel ráfutásos balesetet okozva.

Újra megemlíthető a fehér és sárga szín hierarchiája: Magyarországon a kerékpáros infrastruktúra sok eleménél sárga színűek a vonalak. Vajon minden esetben meg fogja tudni különböztetni az önvezető autó a kerékpársáv szélét jelző vonalat a terelés miatt máshol vezetett sávot jelölő sárga vonalról?



6. ábra: A gyűjtő-elosztó pálya bal oldali jelzőtáblája a főpálya jobb oldali jelzőtáblájának is tűnhet

## Miért kell minderről beszélünk?

A cikk során tehát megláttuk, hogy:

- nincs az önvezető autókra vonatkozó globális szabályozás vagy szabvány,
- emiatt a gyártók megtehetik, hogy merőben más logika alapján kódolják önvezető autóikat, amelyet általában – üzleti titokként kezelve – nem hozzák nyilvánosságra,
- ebből következően az autók merőben máshogy látják maguk körül a világot, és máshogy gondolkodnak, de mind ugyanabban a környezetben kell boldoguljanak,
- a sofőrök viszont nehezen igazodnak ki az autókban lévő rendszerek közt, mivel nem mindig egységes a nevezéktan, és nincs szabványos információs forrás sem,
- ezért amikor beszállnak a volán mögé, sokszor nincsenek tisztában, pontosan milyen rendszerek és hogyan fognak beavatkozni a vezetés folyamatába,
- ennek ellenére túlságosan elengedik a gyeplőt (automatizációs torzítás), és olyan rendszer is vezetheti az autót, amely erre nem áll készen,
- ez néha teljesen legális keretek közt történik, mert a szabályozási környezet csak most igyekszik utolérni a technológia fejlődését,
- a közútkezelő eközben nem tudja, hogyan kellene gyakorlatát megváltoztatnia, hogy minden autónak megfeleljen,
- és ezek az autók már jelenleg is forgalomban lehetnek.

## Források

- [1] Whitepaper Automated Driving and RWS – Smart Mobility (2021. december 6.)
- [2] Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to the Advanced Emergency Braking System (AEBS) for M1 and N1 vehicles (2020. február 4.)
- [3] Autonomous Vehicles Are Driving Blind – The New York Times (Julia Angwin – 2023. október 11.) <https://www.nytimes.com/2023/10/11/opinion/driverless-cars-san-francisco.html>
- [4] Autózás jogsi és rendszám nélkül, vizsga cigányzenére – Autószelet.hu (Boros Jenő – 2022. június 11.) <https://www.autoszelet.hu/hu/content/autozas-jogsi-es-rendszam-nelkul-vizsga-ciganyzenere>
- [5] 1956 Grand Canyon mid-air collision [https://en.wikipedia.org/wiki/1956\\_Grand\\_Canyon\\_mid-air\\_collision](https://en.wikipedia.org/wiki/1956_Grand_Canyon_mid-air_collision)
- [6] AI incident database <https://incidentdatabase.ai/cite/71/>
- [7] AI incident database <https://incidentdatabase.ai/cite/4/>
- [8] AI incident database <https://incidentdatabase.ai/cite/218/>
- [9] A Chinese driver died in a car crash involving a Nio car activated with driver-assistance feature <https://technode.com/2021/08/16/a-chinese-driver-died-in-a-car-crash-involving-a-nio-car-activated-with-driver-assistance-feature/>
- [10] One crash set off a new era for self-driving cars in S.F. Here's a complete look at what happened <https://www.sfchronicle.com/projects/2024/cruise-sf-collision-timeline/>



# Az aszfaltkeverék tervezésén belül a keverék-szilárdságot befolyásoló tényezők elemzése

szerzők: Szvoboda Krisztián, Zsichla László

Szvoboda Krisztián



Központi Labor vezető  
COLAS Zrt.

Zsichla László



ügyvezető  
Rodcont Kft.

## 1. Bevezetés

Jelen tanulmány célja bemutatni az aszfaltkeverék szilárdsági tulajdonságát befolyásoló tényezők hatásmechanizmusát.

Az elemzés szakít a megszokott módszertannal, ugyanakkor alapvető feltétel volt, hogy leírt hatásmechanizmus nem lehet ellentétes a megfigyelésekkel, eddigi tapasztalatokkal és a vizsgálati eredményekkel.

Az aszfaltkeverékektől elvárjuk, hogy a tervezési időszak alatt a terhelő forgalom a tervezett mértéken felül ne okozzon az út-pályaszerkezetben teherbíráscsökkenést, és közvetve elvárjuk, hogy az útburkolat felszínén mért egyenetlenség IRI nemzetgazdasági és a mért nyomvályú közlekedésszempontból megfelelő legyen.

Az aszfaltkeverék tervezésének nemzetgazdaság szempontjából kívánatos célja az aszfaltkeverék komplex modulusnak és a nyírószilárdságának növelése minden az útpályaszerkezet méretezés szempontjából releváns hőmérsékleten.

## 2. Nyírószilárdság

A továbbiakban azt elemezzük, hogy mik azok a tényezők, amik az aszfaltkeverékek nyírószilárdságát befolyásolják.

Egy aszfaltkeveréket, akkor jut el a törés határállapotába 1. ábra, ha a terhelés miatt bekövetkező fő-nyírófeszültség eléri vagy meghaladja az aszfaltkeverékhez tartozó Coulomb-Mohr érintő egyenest. A törés hideg viselkedés esetén lehet

repedés, vagy meleg viselkedés esetén folyás. Ebben a határállapotban az aszfaltkeverék már nem tud felvenni egy adott nyírófeszültségnél nagyobbat.

A törést okozó  $\tau_u^i$  nyírófeszültség egyenesének egyenletét a talajmechanikában ismert módon is felírhatjuk, ahol a nyírószilárdságot a normálfeszültségtől  $\sigma_u^i$  függő (1) egyenlettel jellemezzük:

$$\tau_u^i = c_u^i + \sigma_u^i \operatorname{tg}(\alpha_u^i) \quad (1)$$

ahol,

$i$  - aszfaltkeverék típusának indexe

$u$  - hőmérsékleti index

$c_u^i$  -  $i$  aszfaltkeverék,  $u$  indexhez tartozó hőmérsékleten a kohézió (MPa)

$\alpha_u^i$  -  $i$  aszfaltkeverék,  $u$  indexhez tartozó hőmérsékleten a belső súrlódási szög (fok)

$\sigma_u^i$  -  $i$  aszfaltkeverék,  $u$  indexhez tartozó hőmérsékleten a normál feszültség (MPa)

$\tau_u^i$  -  $i$  aszfaltkeverék,  $u$  indexhez tartozó hőmérsékleten a nyírószilárdság (MPa)

Az 1. ábrán egy SAM-13 aszfaltkeverék<sup>(1)</sup> nyírószilárdságának változását szemléltettük a hőmérséklet függvényében. Jól látható, hogy a hőmérséklet növekedése nemcsak a  $c_u^i$  kohéziót, hanem a  $\alpha_u^i$  belső súrlódási szöget is befolyásolja. A belső súrlódás csökkenésének mértéke azonban keverékenként eltérő. A példában a hőmérséklet 20 °C-ról 60 °C-ra növekedése miatti belső súrlódási szög csökkenése 10 fok, de vannak olyan keverékek amelyeknél ez csak néhány fok csökkenést okoz az 1. ábrán szaggatott fekete vonallal jelölve.

A hőmérséklet az aszfaltkeverék belső súrlódási szögét és kohézióját egyrészt a kötőanyag viszkozitásán és nyírószilárdságán, másrészt a kötőanyag és az adalékanyag közötti adhézióon keresztül befolyásolja.

Az aszfaltkeverék hőmérséklete nemcsak a nyírószilárdságra, hanem az aszfaltkeverék komplex modulusára is hat, a hőmérséklet növekedése csökkenti a komplex modulus értékét.

Az 1. sz. ábrán fekete vonallal jelöltük a 20 °C-on és kék vonallal jelöltük a 40 °C-on az út-pályaszerkezetben keletkező feszültségek Mohr köreit, amelyek megadják a fő-nyírófeszültségeket.

Az út-pályaszerkezetben Mohr körök változása a komplex modulus változásának következménye. A hőmérséklet 20 °C-ról 40 °C-ra növekedése az útpályaszerkezetben csökkenti a keletkező fő-nyírófeszültség értékét, de ezt a csökkenést meghaladja a törést okozó nyírófeszültség csökkenése, aminek következtében a fáradási élettartam is csökken.

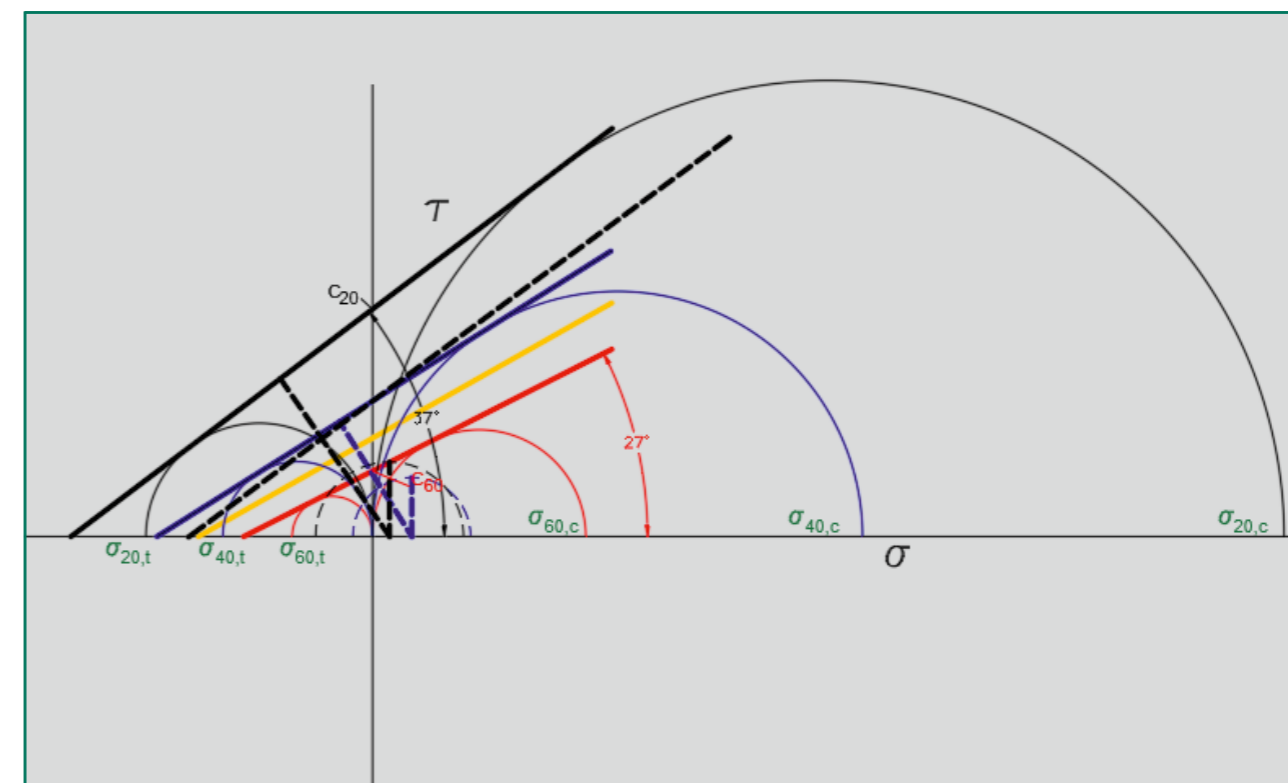
Az aszfaltkeverékek komplex modulusának hőmérséklet függését a mestergörbékkel előállított szigmoid függvényekkel is jellemezhetjük<sup>(2)</sup>.

A komplex modulus csökkenést nemcsak a hőmérséklet növekedésével érhetjük el. A kötőanyag viszkozitásának csökkenése is kiváltja a komplex modulus, és a kohézió csökkenését. A mérések azonban azt bizonyítják, hogy változatlan hőmérséklet esetén az adhézió elhanyagolhatóan függ a bitumen fajtájától, viszkozitásától<sup>(3)</sup>, de jelentősen függ az adalékanyag ásványi összetételétől.

Ez azt jelenti, hogy a hőmérséklet változása miatti viszkozitás változás hatása eltérhet az azonos hőmérsékleten pl. keményebb bitumen helyett lágyabb használata miatti viszkozitás-csökkenés hatástól. Az adhézió hőmérsékletfüggése egyelőre még nem ismert és az adhézióra vonatkozó megbízható mérési módszerrel se rendelkezünk.

Ha az útpályaszerkezetbe beépítendő aszfaltkeverék tervezési hőmérsékletre vonatkozó komplex modulusát csökkentjük, akkor annak az lesz a következménye, hogy az útpályaszerkezet többi rétegében keletkező feszültségek megnövekednek és növekedni fog a járműterhelés során bekövetkező legnagyobb behajlás értéke. Az esetek többségében a komplex modulus csökkenése együtt jár az út-pályaszerkezet fáradási élettartamának csökkenésével.

Az aszfaltkeverék nyírószilárdságának meghatározásához szükséges lenne a belső súrlódási szög és a kohézió mérése.



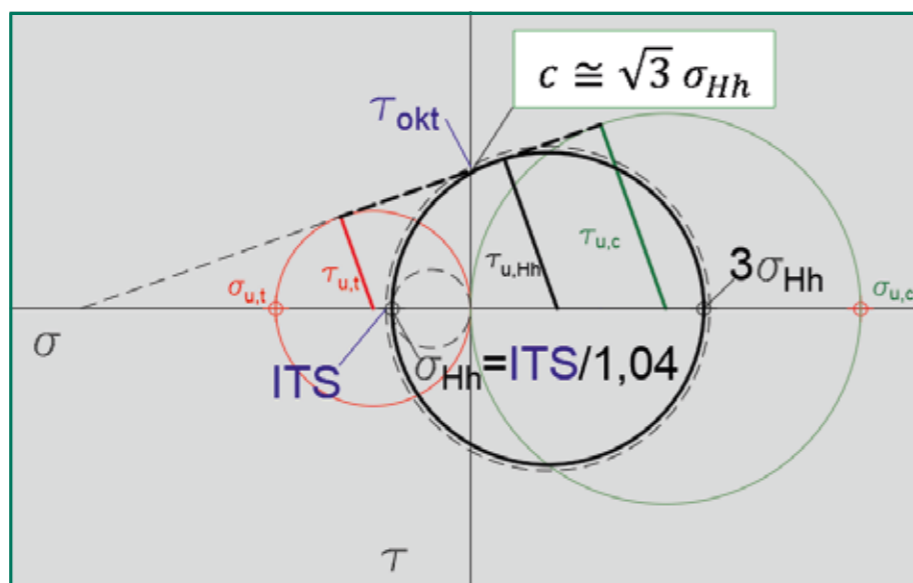
1. ábra: Az aszfaltkeverék nyírószilárdságának hőmérsékletfüggése.

Általában nem határozzuk meg az aszfaltkeverékek belső súrlódási szögét, de minden esetben mérjük a vízérzékenység miatt az ITS hasító-húzó szilárdságot.

Az aszfaltkeverék tervezési hőmérsékletére és tervezési frekvenciájára vonatkozó „c” kohézióját a 2. ábra szerint értelmezve viszonylag nagy pontossággal az ITS vizsgálattal is meghatározhatjuk.

A mért ITS értelmezésénél figyelembe kell venni a mérés hőmérsékletét, a mérési sebességét és a tömörítő munkát.

A vízérzékenységnél alkalmazott mérési paraméterek nem jellemzik megfelelően a tervezési kritériumokat



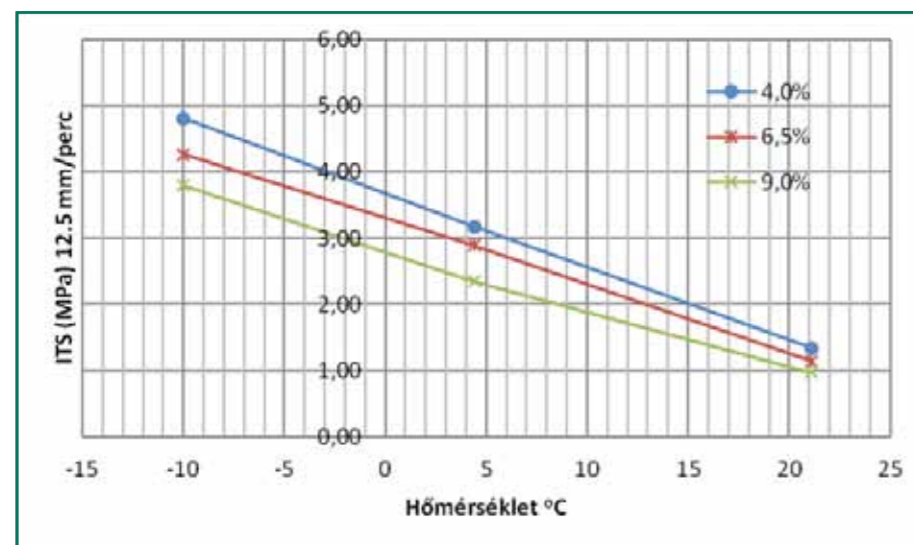
2. ábra: ITS vizsgálat és a kohézió összefüggése.

### 3. Hézagterfogat hatása a nyírószilárdságra

Tudjuk, hogy az aszfaltkeverék hézagterfogata befolyásolja a komplex modulust, avval fordítottan arányos mértékben.

A hézagterfogat nemcsak a komplex modulusra, hanem a kohézióra és ezen keresztül a nyírószilárdságra is hat.

A 3. ábra szerint vizsgálták<sup>(4)</sup> a különböző hézagterfogatú és típusú aszfaltkeverékek kúszását és hasító-húzó szilárdságát ITS, ahol modifikált bitumen volt a kötőanyag.



3. ábra: Egy aszfaltkeverék hasító-húzó szilárdság változása a hézagterfogat és a hőmérséklet függvényében.

A hézagterfogat növelése kedvezőtlenül befolyásolta az aszfaltkeverék hasító-húzó szilárdságát és a kúszási értékét is.

A hézagterfogat növekedése csökkentette a hasító húzó szilárdságot ami csökkenti a  $c_u^i$  a kohéziót, a kúszási érték romlás pedig a belső súrlódási szög  $\alpha_u^i$  csökkenésére utal.

A hézagterfogat növekedése ezen kívül még a kötőanyag gyorsabb öregedését is okozza, amely kedvezőtlenül hat az aszfaltkeverék hideg viselkedésére, és a repedés-érzékenységére.

Az aszfaltkeverékek kohéziója változatlan keverék-összetétel mellett, a kötőanyag viszkozitását jobban figyelembe vevő tömörítő munka által is növelhető.

A tömörítő munka növelése - lásd. 3. ábrát - a talajok optimális víztartalmához hasonlóan csökkenti a tömörítés szempontjából optimális bitumentartalmat.

A tömörítés szempontjából optimális bitumentartalmat a bitumen viszkozitása is befolyásolja.

A tömörítés szempontjából optimális bitumentartalom azonban nem eredményezi a szilárdság szempontjából optimális bitumentartalmat.

A legnagyobb tömörség nem jelenti a legnagyobb szilárdságot.

A hézagterfogat csökkentése a 4. ábra szerint javítja a keverék kohézióját, azt azonban figyelembe kell venni, hogy a beépített aszfaltkeverék hézagterfogata a nehéz járművek által járt keréknyomban a forgalomba helyezést követő néhány évben jelentősen akár 3-4 %-ot is csökkenhet.

Kopórétegnél, de a többi rétegnél is el kell kerülni, hogy az aszfaltkeverék a bitumenben „ússzon” a hézagterfogat a nullához közelítsen, ezért az aszfaltkeverék tervezésnél előírt 3-4 % hézagterfogat mindenképpen helyes. Kopórétegnél azért is kerülendő a nulla hézagterfogat, mert a bitumen felúszik a felszínre és minimálisra csökkenti a felületi érdességet, ami balesetveszélyessé teheti a kopóréteget.

A maradó alakváltozással szembeni ellenállást, deformációt, az ásványi adalékanyag kővázának stabilitását növelő szemmegoszlással biztosítjuk, amelyre a legjobb példa a zúzalékvázas masztix aszfalt az SMA.

A zúzalékvázas aszfaltkeverék a Fuller-féle szemmegoszlást jellemző<sup>(2)</sup> összefüggéshez képest lényegesen nagyobb „n” kitevőjű szemmegoszlás alkalmazása a kohézió csökkenését is okozhatja.

$$d = (D/D_{max})^n, \text{ ill. } n = \log(d) / \log\left(\frac{D}{D_{max}}\right) \quad (2)$$

ahol,

$D$  - a jellemző durva szita átmérője (mm)

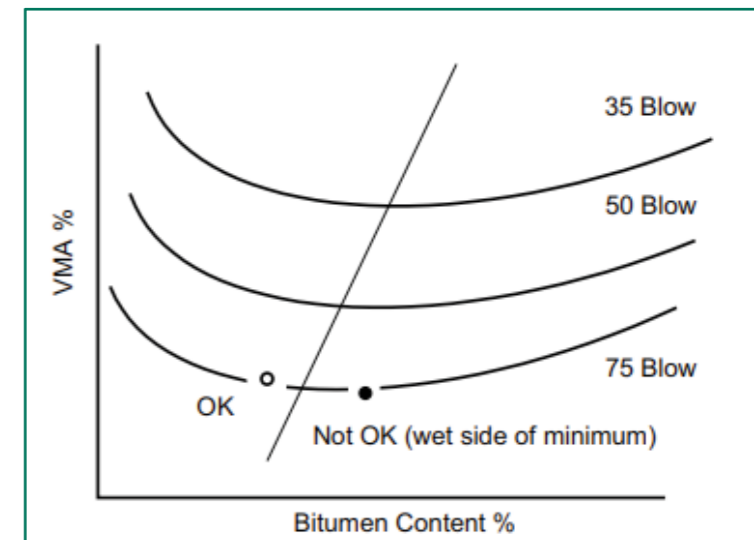
$D_{max}$  - a legnagyobb szemmagyság (mm)

$d$  - a jellemző durva szitán áthullott mennyiség m/m%

$n$  - hatványkitevő, „optimális” eloszlás esetén  $\sim 0,45$

Az a szemmegoszlás, ahol az  $n < 0,45$  ott nincs elég hely a nagyobb szemek között, ezért a nagyobb szemek a finomabb rész által meghatározott keverékben fognak „úszni”. Az aszfaltkeverék belső súrlódási szögét ez a finomabb általában a „homok méretű” rész fogja meghatározni, végső soron csökkenteni. Ilyen aszfaltkeverékeket terveztünk a 80-as években, ezt neveztük „homokhasas” aszfaltkeveréknek.

Ha az  $n \gg 0,45$  nagyobb, vagy sokkal nagyobb, akkor az ásványi kőváz stabilitása megnő, növekszik az aszfaltkeverék belső súrlódási szöge.



4. ábra: A tömörítési ütésszám, tömörítési munka hatása a hézagterfogatra és az optimális tömörítési bitumentartalomra<sup>(5)</sup>.

### 4. Aszfaltkeverék mikro-mechanikai tönkremeneteli módja

Az út-pályaszerkezetben keletkező feszültségek számítási modelljeiben feltételezzük, hogy a szerkezet homogén és izotrop. Ebben a „klasszikus” feltételezésben az anyagvizsgálat során feltételezzük, hogy a  $D_{max}$  legnagyobb szemmagyság által meghatározott  $l_0 = 2,5 D_{max}$  bázishosszon a mért fajlagos megnyúlás az  $l_0$  teljes hosszában állandó és ebből adódóan a számított feszültségállapot is állandó.

Mikro-mechanikai megközelítésben az  $l_0$  bázishosszon a fajlagos megnyúlás nem állandó, hanem jelentősen függ attól, hogy az aszfaltkeveréket alkotó összetevők közül melyiken végezzük a mérést.

Az aszfaltkeverékek közül a következő összetevőket különböztetjük meg, amelyek mechanikai tulajdonságai jelentősen eltérnek egymástól:

- ásványi adalékanyag,
- kötőanyag,
- levegő,
- víz.

Az aszfaltkeverék mikro mechanikai elemzése csak léptékében tér el a klasszikus megfontolásoktól, modellektől.

A célszerű a léptéket a töltőanyag még értelmezhető, mérhető szemmagyságában  $\sim 2-3 \mu m$  kell megadni, ebben az esetben a bázishossz  $l_0 \sim 2-3 \mu m$ .

Mikro-mechanikai szemléletnél is van kisebb lépték, mert nem különböztetjük meg az ásványi anyagokon belül az ásványokat, és a bitumenen belül az eltérő molekulákat.

Mikro-mechanikai szemléletben az aszfaltkeveréken belül a nyírószilárdságot az aszfaltkeverékek összetevői szerint külön-külön kell vizsgálni.

A levegő és a víz gyakorlati nyírószilárdsága nulla. Az ásványi adalékanyagok kivétel nélkül a vizsgálati hőmérséklettől függően akár több nagyságrenddel magasabb nyírószilárdságúak és merevségűek, mint a bitumen, ezért általában a törés vagy folyás nem az ásványi adalékanyagban, hanem azokat elkerülve, megkerülve következik be.

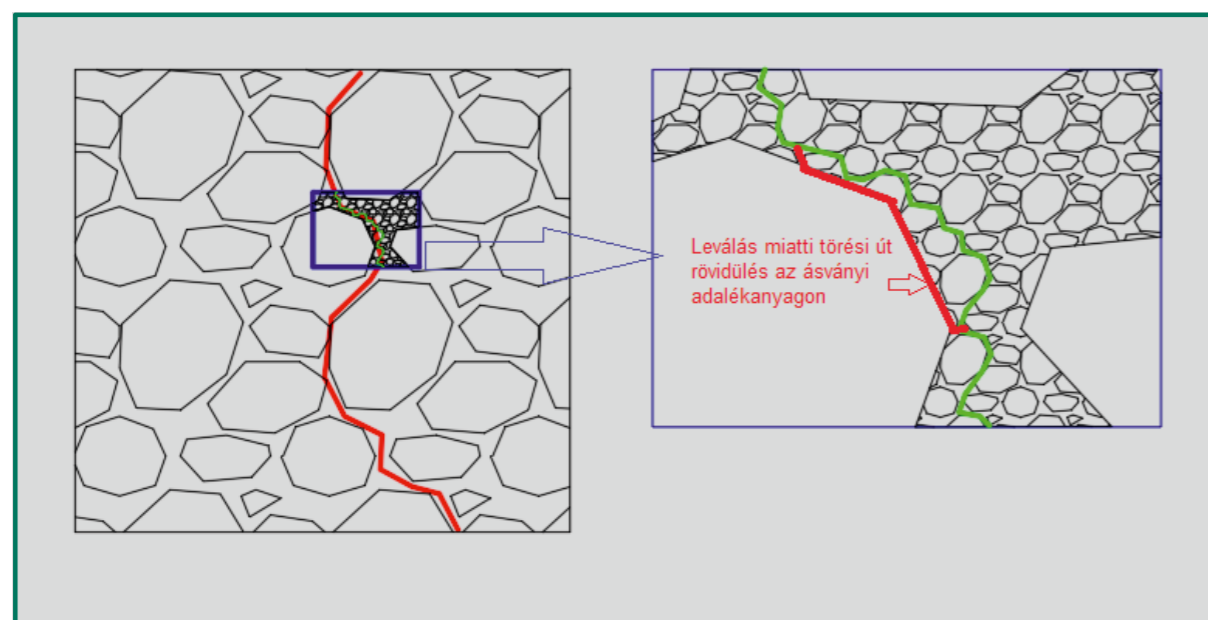
Az aszfaltkeverék törését okozó feszültségállapotának szempontjából kritikus a bitumen mechanikai tulajdonsága, valamint a bitumen és az ásványi adalékanyag között kialakuló adhézió.

A továbbiakban az aszfaltkeverék próbatesten belül elsősorban a tiszta húzás okozta feszültségeket elemezzük.

Az aszfaltkeverék tiszta húzás esetén nem az elméleti felületén  $A_0$  felületen, henger alakú próbatest esetén  $A_0 = \pi r^2$  törik el, vagy folyik meg, hanem attól jelentősen eltérően az 5. ábra szerint értelmezve az ásványi váz szemmegoszlásától függően egy teljesen szabálytalan „A” felületen törik el.

A valós törési felület az  $A_0$  felület többszöröse is lehet. A tiszta húzásból adódó feszültség általában nem okozza az ásványi anyag törését, ellentétben a hajlításból és nyomásból, ahol a keletkező feszültségek által főleg a lemezes alakú szemek el is törhetnek. Tiszta húzás esetén a lemezes alakú szemek növelik a törési felületet, míg a kubikus alakúak csökkentik, de a nyomás, hajlítás és csavarás esetekhez viszonyítva, elhanyagolható a törésük valószínűsége.

Az 5. ábra szerinti törési utat, felületet a szemmegoszlás egyenlőtlenségének  $d_{60}/d_{10}$  arányának növelésével is



5. ábra: Az ásványi adalékanyag szemmegoszlásától és a nem megfelelő tapadástól, adhéziótól függő törési utak

emelhetjük, de ez csak akkor hatékony, ha a törés nem az ásványi adalékanyagban következik be.

Az ásványi anyag felületén bekövetkező törés a törési felületet csökkenti, ami az aszfaltkeverék szilárdságának csökkenésével jár.

A levegővel vagy vízzel telített térfogatrészen belül a repedés gyakorlatilag külön energiabevitel nélkül terjed át. E miatt hátrányos a hézagterefogat növekedése, ill. előnyös annak csökkenése.

A törési felületet jelentős csökkenését okozhatja, okozza az ásványi adalékanyagban megtapadó agyagásványok, amelyek még az aszfaltkeverék gyártása során is részben megmaradnak. Az agyagásvány és az ásványi adalékanyag közötti tapadás jóval kisebb, mint a bitumen és az ásványi anyag közötti tapadás, adhézió, ezért már kis nyírófeszültség esetén is légrés keletkezik, ami szintén csökkenti a töréshez szükséges belső energiát.

Mikro-mechanikai szemléletben a törési felületen a törést okozó nyírófeszültség nem állandó, hanem egy igen komplex, bonyolult még elméletileg is nehezen leírható összefüggés határozza meg.

A törési felület egy elemi felületén a törés három fő okra vezethető vissza:

- adhéziós törés,
- a kötőanyag törése,
- hézagon keresztülhatoló törés.

A hézagon keresztül hatoló törés külső energia bevitel nélkül is bekövetkezik – jelen van -, ez a felület, akkor válik kritikussá, ha kapcsolódik az adhéziós és a kötőanyag törése által kialakult törési felülethez. A törési felületek összekapcsolódása azért válik kritikussá, mivel ekkor a törésmechanikából ismert a repedés terjedéséhez szükséges energia is kialakul.

## 5. Adhézió

A bitumen és az ásványi adalékanyagok közötti kötési energiát az adhézió fejezi ki. Az adhézió pontos mérésére jelenleg nincs megfelelő módszerünk. A kötelezően mérendő vízerzékenységből ITSR%-ból nem derül ki, hogy mekkora a száraz keverék adhéziója, csak arra ad becslést, hogy az aszfaltkeverék milyen mértékű kohéziócsökkenése várható.

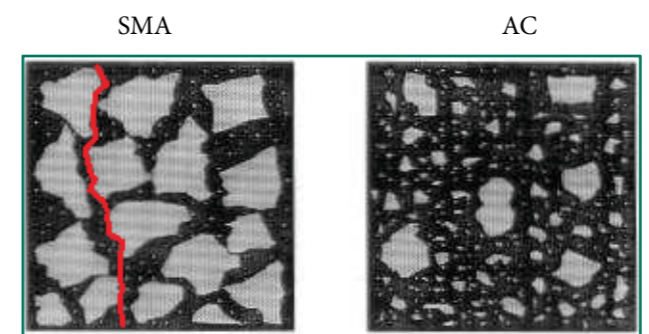
A nem megfelelő adhézió miatti kohéziócsökkenés hasonlít a hőmérséklet növekedése miatti szilárdságcsökkenéshez, lásd. 1. ábrát.

Mivel nem tudjuk, hogy a mért kohézió belül mekkora súllyal szerepel az adhézió, ezért a vízerzékenységből az adhézió nem határozható meg.

Az aszfaltkeverékek különösen a kopórétegben fokozottan ki vannak téve a vízzel való érintkezés veszélyének. Ezeknek a keverékeknek adhézióját részben a legnagyobb szemcseméretű frakció és a bitumen tapadása határozza meg.

A zúzalékváz masztix aszfaltok alkalmazása kockázatos a rendkívül nagy forgalmú utakon, ha nem tudjuk garantálni a tervezési élettartam során a megfelelő adhéziót. Az adhézió garantálásához minimális követelmény lenne egy megbízható vizsgálati módszer, ilyenrel azonban nem rendelkezünk. A kockázat csökkenthető tapadásjavító szerekkel. A tapadásjavító szereket a legnagyobb szemcseméretű frakcióra célszerű optimalizálni.

A 6. ábrán mutatom be hogyan alakul a törési útvonal az SMA és az AC aszfaltkeverékek esetén, ha az adhézió nem megfelelő. Nem megfelelő adhézió esetén az SMA aszfaltkeverékben a törési útvonal a kőváz felületén alakul ki, ahol a hatékony felület a 6. ábra szerint rendkívüli módon lecsökkenhet. A törési út elkerüli a kisebb frakciókat, a bitumenes habarcsot.



6. ábra: Kőváz hatása a törési útra, ha nem megfelelő az adhézió

Egy véletlenül kiválasztott egységnyi ásványi anyag fajlagos felületén minél vékonyabb a bitumenfilm, annál nagyobb az adhézióval nem rendelkező felületi arány, amely 0,0-1,0-ig terjedhet. Ennek következménye, hogy a fajlagos felületi adhézió csökken, a fajlagos felületen a bitumenfilm leválasztásához egyre kevesebb energia szükséges.

Az arány függ a bitumenfilm vastagsától is, amit a bitumentartalom növelésével ill. a keverési idő változtatásával tudunk befolyásolni, adott bitumenfajta és ásványi adalékanyag esetén.

A fajlagos felületi adhéziót jellemezhetjük a  $\tau_a$  adhéziós nyírószilárdsággal, amely feszültség elérésekor a bitumenfilm elválik a felülettől.

Ha a  $\tau_a$  adhéziós nyírószilárdság már nem éri el a bitumen(4)  $\tau_{bit}$  nyírószilárdságát, akkor a törés az ásványi anyag felületén, vagy avval párhuzamosan fog kialakulni, amely jelentősen csökkenti a törési felület nagyságát.

A bitumenfilm vastagságának csökkentése megnöveli a víz ásványi adalékanyag felületére jutásának lehetőségét, ami rontja a tapadást, az adhéziót<sup>(8,9)</sup>. A víz vékonyabb bitumenfilm esetén könnyebben jut el az ásványi anyag felületéhez, ahol bonthatja a bitumen és az ásványi adalékanyag közötti tapadást, a dipólusos kötést.

A bitumentartalom csökkentése közvetve vékonyítja a bitumenfilmet, amelynek következtében csökken a fajlagos adhézió, mert adott keverési idő mellett egyre kisebb valószínűséggel keletkezik kötés az ásványi adalékanyag és a kötőanyag között.

A bitumen és az ásványi adalékanyag közötti tapadást csökkentheti, megszüntetheti a víz jelenléte<sup>(6)</sup>, amit vízerzékenység vizsgálattal, az adhézió helyett a kohézió változásával jellemzünk.

A nem megfelelő tapadás, adhézió miatt a legnagyobb törési felület csökkenés a  $D_{max} - \frac{1}{3} D_{max}$  közötti szemcseméretű ásványi adalékanyag - kőváz - következik be. Ebben az esetben a kisebb szemcseméretű frakciókhoz a törési felület már el se jut, ezért a szemmegoszlással  $d_{60}/d_{10}$  egyébként lehetővé tett sokszoros törési felületnövekedés elmarad.

Minél nagyobb szemcseméretű frakciónál következik be víz hatására a leválás, az adhéziós kötés csökkenése, megszűnése, annál jobban csökken a törési felület.

A bitumenhez tapadás -adhézió- szempontjából a bázikus tulajdonságú ásványi anyagok a kedvezőek<sup>(6,7)</sup>, viszont a bázikus dolomit nem alkalmas kopórétegbe, mivel nagyon hamar polírozódik. Az adhézió növelésére használhatunk tapadásjavító szereket, de ez csak akkor lehet hatékony, ha egy keveréken belül azonos bázikuságú ásványi adalékanyagot alkalmazunk. Ha mégis rákényszerülünk egy keveréken belül az eltérő bázikuságú ásványi adalékanyagok alkalmazására, akkor a tapadásjavító szert a nagyobb szemcseméretű ásványi adalékanyagra a kővázra kell optimalizálni.

A bitumen nyírószilárdságának növelése kedvező, mert növeli a töréshez szükséges energiát, de ez csak akkor lehet hatékony, ha a törés a bitumenfilmben következik be.

Alacsony  $\tau_a$  adhéziós nyírószilárdság esetén, ahol  $\tau_a < \tau_{bit}$  a bitumen nyírószilárdságának növelése nem lesz hatékony, mivel csökken a törési felület annak következtében, hogy a törés az alacsony adhézió miatt az ásványi adalékanyagban következik be lásd. 7. ábrát.

Az adhéziót elsősorban az ásványi adalékanyag határozza meg és csak kevésbé függ a bitumen típusától. Az adhézió az ásványi adalékanyag felületén nem állandó, mivel az adhézió az ásványi adalékanyagban belül a különböző ásványoktól függ. A változó ásványi összetétel miatt is a  $\tau_a$  adhéziós nyírószilárdság értéke nehezen meghatározható értékek között mozog, bizonytalan. Többek között ezért is igen nehéz feladat az adhézió közvetlen mérési módszerének kialakítása.

## 6. Felületi orientáció, érdesség és a bitumenfilm vastagságának hatása

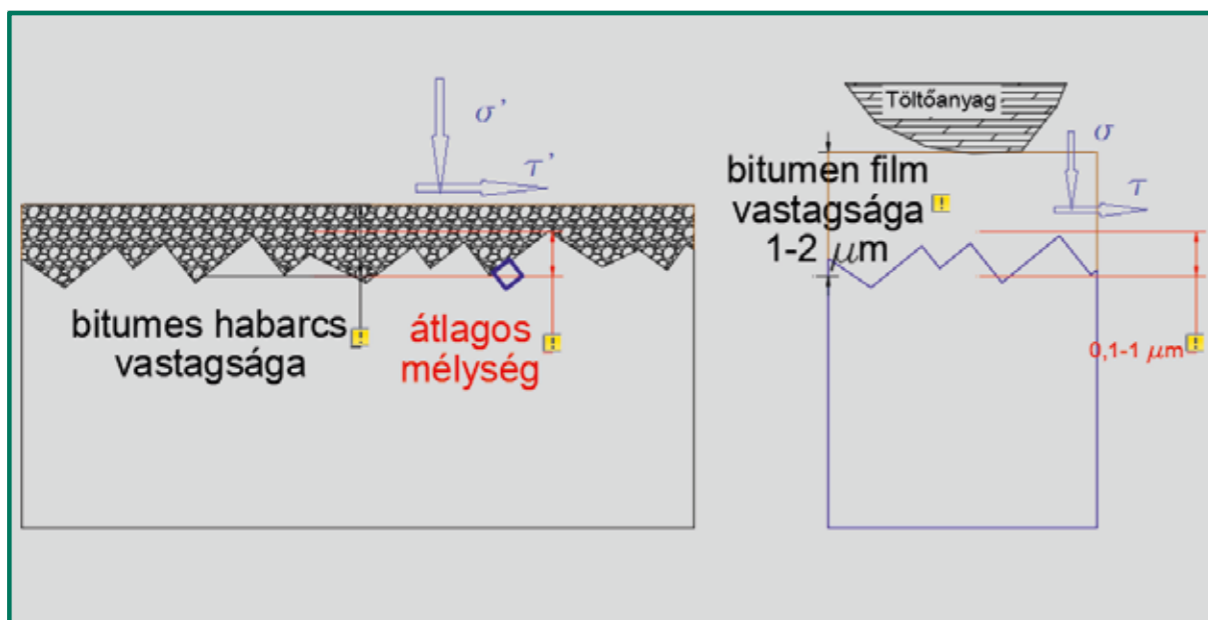
Aszfaltkeverék esetén az ásványi adalékanyag levegőhöz, vízhez és a bitumenhez képest nagyságrendekkel magasabb nyírószilárdsága miatt a terhelő erőre merőleges elhelyezkedés már nem eredményezne minimális belső munkát, mert ez az ásványi adalékanyag törésével járna együtt, ami sokszorosára emelné a töréshez szükséges belső energiát. A minimális belső energia követelménye miatt az elemi felület a térben elfordul annak érdekében, hogy elkerülje a nagyobb belső energiát igénylő ásványi adalékanyag törését, amelynek következményeként egy igen összetett és bonyolult térbeli törési felület alakul ki.

A térbeli felületre nemcsak az ásványi adalékanyagok térbeli elhelyezkedése, hanem a hézagok elhelyezkedése is hatással van, mert a hézagokon a keresztülhaladás nem jelent többlet belső energiát.

Az ásványi adalékanyag és a bitumen közötti adhézió is befolyásolja a törési felületet, mert megfelelő adhézió esetén sokkal nagyobb belső energia kell a felületen haladás, mint annak elkerülése esetén a bitumenben haladás esetén.

A nem megfelelő vagy tapadás nélküli esetben már az ásványi adalékanyagon is kialakulhat a törési felület, mert nagyon alacsony adhézióval a minimálishoz közeli belső energia szükséges.

Az ásványi adalékanyag felületi érdessége is befolyásolja a kialakuló törési felület nagyságát. A felületi érdesség még alacsony adhézióval, vagy leválásnál is kikényszerítheti, hogy a törési út ne az ásványi adalékanyag felületén, hanem az aszfalthabarcban alakuljon ki. Ez azonban csak akkor lehetséges, ha a 7. ábra szerint az ásványi adalékanyag felületén nyomófeszültség alakul ki. A másik feltétel, hogy az érdesség átlagos mélysége legalább a töltőanyag  $d_{10}$  szem-nagyságának ~ 2,5 szerese legyen. E feltétel azért szükséges, mivel ellenkező esetben elhanyagolható annak a valószínűsége, hogy az érdes felületi csúcsok, az átlagos mélység közé töltőanyag jusson. Ha az érdességi csúcsok közé a méret miatt nem kerülhet töltőanyag, akkor a törési felület csökken, mivel nem kell elkerülni a töltőanyag szemcséket.



7. ábra: A felületi orientáció, érdesség és a bitumenfilm vastagságának értelmezése.

A bitumen törési felületén kialakuló fajlagos belső munkát a (3) egyenlet adja meg:

$$dL_b^f = -\sigma d\varepsilon \quad (3)$$

ahol,

$$\underline{\sigma} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{x,y}, \tau_{y,z}, \tau_{z,x}]$$

$$\underline{\varepsilon} = [d\varepsilon_x, d\varepsilon_y, d\varepsilon_z, d\gamma_{x,y}, d\gamma_{y,z}, d\gamma_{z,x}]$$

Folyadékok esetén a kialakuló nyírófeszültséget a viszkozitás és a nyírési alakváltozás sebességének szorzata adja:

$$\tau = \eta_b \dot{\kappa} = G \gamma \quad (4)$$

$$\dot{\kappa} = \frac{\Delta v}{\Delta h} \quad (5)$$

ahol,

$h$  - a viszonyítási felülettől az áramlás irányára merőleges távolság (m),

$v$  - áramlás sebessége (m/sec),

$\dot{\kappa}$  - nyírési alakváltozás sebessége (1/sec),

$\eta_b$  - viszkozitás (Pa sec),

$G$  - nyírési modulus (Pa),

$\gamma$  - fajlagos nyírési alakváltozás, szögtorzulás

A viszonyítási felülethez képest értelmezzük az áramlási vektort. A viszonyítási felület minden esetben egy ásványi adalékanyag felülete. Terhelés közben az ásványi adalékanyagok egymáshoz képest is eltérő sebességgel mozognak, ezért az áramlási sebesség is relatív érték.

Ugyan az az áramlás az eltérő relatív áramlási sebesség miatt eltérő nyírófeszültséget okoz az eltérő sebességgel haladó ásványi adalékanyagok felületén, ezért az áramlási sebességet minden esetben a vizsgálandó ásványi adalékanyag felületéhez képest határozzuk meg és számítjuk a nyírófeszültséget.

Az aszfaltkeveréken belül jelentős egyszerűsítés, de nem igaz állításon alapul a (4) egyenlet, amely szerint az áramlás sebessége a felületre merőleges távolsággal lineárisan arányos. Igaz az állítás, ha csak folyadékokat vizsgálunk és a folyadék newtoni viselkedést követ. Abban az esetben, ha a newtoni folyadékot ásványi adalékanyagokkal keverjük az állítás már nem lesz igaz, mert az áramlási sebességek már nem fogják követni a lineáris összefüggést, az adalékanyag szemcsék egymáshoz képest a lineáristól eltérő arányban elmozdulnak.

Newtoni folyadékok esetén a lineáris feltételezés azonban mindaddig igaz marad, amíg az ásványi adalékanyagok egymáshoz viszonyított helyzete az idő függvényében nem, vagy elhanyagolható módon változik. Aszfaltkeverékek esetén az áramlási sebesség linearitása megmarad, amíg a külső terhelés miatt kialakuló fő-nyírófeszültség el nem éri a törést okozó nyírószilárdság 80-90%-át.

A törést okozó nyírófeszültséghez egy kritikus  $\dot{\kappa}$  nyírési alakváltozási sebesség tartozik adott  $\eta_b$  viszkozitás mellett.

Tiszta húzás esetén a kialakuló törési felület, egy elemi felülete úgy igyekszik orientálódni, hogy a töréshez tartozó felület minimális legyen. A felületi minimum, akkor következik, ha az merőleges a tiszta húzást okozó terhelő erővel. Ez a feltétel csak homogén és izotrop közegben következik be pl. ha csak a bitument vizsgáljuk, aszfaltkeverék, vagy bitumenes habarcs esetén a feltétel már nem teljesül.

A bitumen és az ásványi adalékanyag közötti érdes felületen bekövetkező törésnél a töréshez szükséges energia nem állandó. A  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , normál főfeszültségek a felületre merőleges komponensek növekedésével a töréshez szükséges energia a felület érdességének függvényében növekedni fog. A  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , normál főfeszültségekből elvileg számítható a felülettel párhuzamos komponens a nyírófeszültség.

Jelenleg azonban nem tudjuk számolni adott elemi felületen a terhelésből kialakult főfeszültségeket és nem tudjuk meghatározni a felület főfeszültségekkel bezárt szögeit se. A feszültségeloszlást azért nem tudjuk számolni, mivel az függ az aszfaltkeverék szemmegoszlásától, az ásványi adalékanyag és kötőanyag térbeli elrendezésétől, a kötőanyag áramlási sebességeloszlásától is. Ennek a rendkívül komplex problémának a megoldására jelenleg nincs eljárásunk.

Pontos modellek, matematikai megoldások hiányának ellenére is tehetünk néhány általános megállapítást.

A törés a vizsgált felületen az 7. ábra alapján akkor következik be, amikor a nyírófeszültség meghaladja a nyírószilárdságot, amely azonban függ a normál feszültségtől.

Az ásványi adalékanyag felülete - megfelelő bitumenes bevontság esetén - az 7. ábra szerint a bitumen filmmel, közvetve pedig az aszfalthabarcossal érintkezik.

A vizsgált felületre merőleges normál feszültség iránya szerint lehet nyomás és húzás, de mértéke szerint is eltérő attól függően, hogy tiszta húzásból, tiszta nyomásból, vagy egyéb vizsgálatból származik.

Tiszta húzás esetén a felületre ható normál feszültség a felület orientációjától is függ, ezért a normál feszültség nagyobb valószínűséggel húzás, mint nyomás.

Tiszta nyomás esetén nagyobb valószínűséggel alakul ki a vizsgált felületen nyomás, ill. kisebb valószínűséggel és kisebb mértékben alakulhat ki húzás.

A fajlagos felületre merőleges húzófeszültség esetén a felület érdessége csak akkor növeli a töréshez szükséges energiát, ha van adhézió. Húzás esetén a bitumen áramlása merőleges a felületre.

Nyomófeszültségnél a töréshez szüksége energia még akkor is növekszik, ha nincs adhézió, mert a nyomófeszültségtől függően sűrűlődből eredő nyírószilárdság mindig keletkezik.

Nyomás esetén a nyomófeszültség addig növelhető, amíg a bitumenfilm nyírószilárdságát elérjük. Nyomásnál a felület közvetlen közelében a bitumen áramlása a felülettel párhuzamos, ahol kis adhézió esetén megszakadhat az adhéziót biztosító kötések, mivel a bitumen folyadékként viselkedik. A határoló felülettel párhuzamos áramlásnál a határoló felületnél az áramlás sebessége nulla, viszont a nyírófeszültség maximális. Így vagy az adhéziós kötések szűnnek meg vagy a bitumen törik, szakad meg a folytonosság.

Az adhéziós kötések megszűnése, még nem jelent azonnali törést, mert a bitumen és az ásványi anyag közötti sűrűlődből még mindig megmarad. A sűrűlődből származó nyírófeszültség elvileg korlátlanul növelhető, ha növekszik a nyomófeszültség lásd. 1. sz. ábrát, de a felületre nemcsak merőleges feszültségek hatnak, ezért húzás is kialakul. A felületen kialakuló feszültségállapotát jellemző fő feszültségek iránya nem lesz merőleges a vizsgált felületre, ezért a bitumen áramlása is nagyon komplex folyamat, nehezen modellezhető.

Az azonban biztos, hogy az érdesség növekedése nyomás esetén minden esetben jelentősen növeli a törési felületet és végső soron a nyomószilárdságot, ellentétben a húzással, ahol az érdesség növekedése csak korlátozottan növeli a húzószilárdságot.

Mivel az érdesség növekedése jobban hat a nyomószilárdságra, mint a húzószilárdságra, ezért az 1. ábra szerint az érdesség növeli a belső sűrűlődből származó szöveget, de növeli a kohéziót is mivel a tiszta húzó -és nyomószilárdság is növekszik.

Azt is beláthatjuk, hogy az adhézió teljes felületen történő javítása növelné a kohéziót, de csökkentené a belső sűrűlődből származó szöveget, mivel csökkenne a tiszta húzó -és nyomószilárdság közötti különbség.

## 7. A bitumen és a bitumenes habarcs szilárdsága

A bitumen tulajdonságai közül a bitumen szilárdságára jellemző nyírási modulust, húzószilárdságot, vagy nyírószilárdságot, fáradási élettartamot általában nem szoktuk vizsgálni. Régi szabványban még elő volt írva a duktilitás vizsgálat, amely nem más, mint a bitumen szakítószilárdsága. A bitument a rendkívül nagy szakadási nyúlás jellemezi, ez a szakadási nyúlás még a műanyagokhoz, polimerekhez képest is nagyon magas.

Tiszta húzás és nyomás vizsgálatoknál a megszokott (6) és (7) egyenleteket módosítani kell, mivel a próbatest terhelés közbeni keresztmetszet változását nem veszi figyelembe. A próbatest térfogati állandósága mellett a mérés közbeni keresztmetszeti változást a (8), és (9) egyenletek szerint kell figyelembe venni, amit a 8. ábra szemléltet.

A  $\tau$  nyírófeszültség és a  $\gamma$  fajlagos szögtorzulás, vagy más néven nyírási alakváltozás függ a vizsgált pont feszültségállapotát jellemző három főfeszültségtől, ezért a (8) és (9) egyenletek következményeként felírhatjuk a (10) és (11) egyenleteket.

A (10) és (11) egyenletek levezetésénél figyelembe vettük, hogy a vizsgálat közben legalább két fő normál feszültség egyenlő egymással, ezért a  $\tau$  nyírófeszültség éppen a fele a  $\sigma$  deviátor feszültségnek, valamint a bitumen a Poisson szám  $\mu \cong 0,5$ .

Két fő normál feszültség nemcsak a tiszta húzás és nyomás vizsgálatnál egyenlő egymással, hanem általában a triaxiális vizsgálatoknál is, ezért a (8-11) egyenletek ezekre a vizsgálatokra is alkalmazandó, ha jelentősek az alakváltozások pl. bitumenes habarcsok, vagy magas a vizsgálati hőmérséklet.

$$\sigma_e = \frac{P}{A_0} \quad (6)$$

$$\varepsilon_e = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (7)$$

ahol

$\gamma_e$  - fajlagos szögtorzulás, fajlagos nyírási alakváltozás

$\varepsilon_e$  - mérési fajlagos alakváltozás

$P$  - terhelő erő (N)

$A_0$  - terhelő felület a terhelés kezdetekor

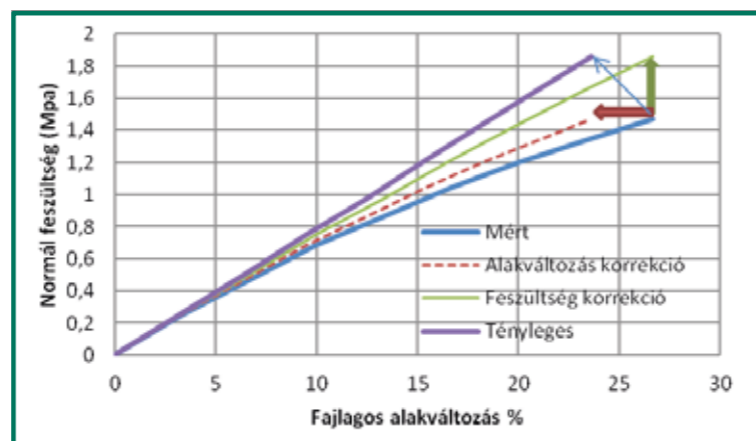
$L_0$  - alakváltozás mérésének bázishossza (mm)

$L$  - alakváltozás hossza (mm)

Mérés közben a  $\sigma_t$  tényleges feszültség és az  $\varepsilon_t$  fajlagos alakváltozás:

$$\sigma_t = \sigma_e (1 + \varepsilon_e) \quad (8)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (9)$$



8. ábra: A mért és a tényleges feszültség-alakváltozás lineárisan tökéletesen rugalmas, de jelentős megnyúlású anyag esetén.

$$\tau_t = \frac{\sigma_t}{2} = \tau_e \left(1 + \frac{2}{3} \gamma_e\right) \quad (10)$$

$$\gamma_t = \frac{3}{2} \varepsilon_t = \frac{3}{2} \ln\left(1 + \frac{2}{3} \gamma_e\right) \quad (11)$$

Tiszta nyírásnál és csavarásnál, ahol a húzó és a nyomófeszültség egyezik a nyírófeszültséggel:

$$\sigma_t = \tau_t = \tau_e \left(1 + \frac{1}{3} \gamma_e\right) = \tau_e \left(1 + \frac{1}{3} \kappa_e t\right) \quad (12)$$

$$3\varepsilon_t = \gamma_t = 3 \ln\left(1 + \frac{1}{3} \gamma_e\right) = \kappa_e t = 3 t \ln\left(1 + \frac{1}{3} \kappa_e t\right) \quad (13)$$

ahol,

$t$  - felterhelési idő (sec),

$\omega$  - frekvencia (rad/sec),  $\omega = \frac{\pi}{t}$

A duktilitás vizsgálatnál 9. ábra a feszültség-alakváltozás összefüggését a nagyon jelentős megnyúlás miatt nem szoktuk számolni, keveréktervezésnél legfeljebb a szakadási nyúlást vesszük figyelembe. A 9. ábra szerint még tájékoztató érték a maximális terhelő erő, amely a bitumen „keménységének” viszkozitásának arányában növekszik.

A duktilitás vizsgálatból ennél sokkal több információ is „kinyerhető”, ha a (8) és (9) egyenleteket segítségével számítjuk a 10. ábra szerinti tényleges feszültség-alakváltozás görbéket.

Meghatározható a vizsgálati hőmérséklet-hez és teherfelhordási sebességhez tartozó húzószilárdság, amely feszültség elérése után a terhelő feszültség már nem növelhető.

A 10. ábrán az is látható, hogy a maximális húzófeszültség elérése után a modifikált bitumen kivételével a feszültség a frekvenciával egyenesen arányosan lineárisan csökken, viszont az SBS-el modifikált bitumen húzószilárdsága folyamatosan növekszik.

A „kemény” alacsony penetrációjú bitumenek lényegesen magasabb húzószilárdsággal, vagy nyírószilárdsággal rendelkeznek, mint a „lágyabb” kisebb viszkozitású bitumenek.

Hidegben  $-5$  °C alatt azonban a kemény bitumenek már rideggé, törékennyé válnak, ami az aszfaltkeverék gyors tönkremenetelét okozhatja, ezért alkalmazásuk nem javasolt, annak ellenére, hogy a bitumen húzószilárdsága igen magas.

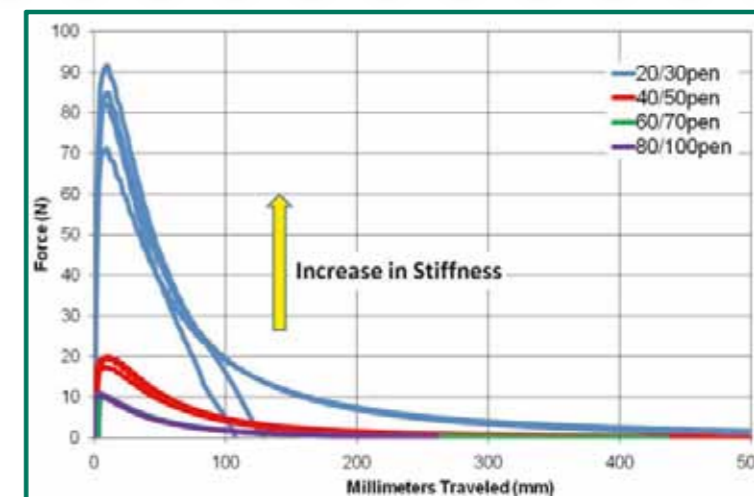
A bitumen  $\tau_{bit}$  nyírószilárdsága befolyásolja az aszfaltkeverék kohézióját, ami növelhető a bitumen viszkozitásának növelésével. A magas viszkozitású „kemény” bitumenek kedvezőtlen hideg viselkedése miatt kerülni kell.

Az alacsonyabb viszkozitású bitumenek viszkozitását, ill. nyírószilárdságát száraz vagy nedves modifikálással, polimerek alkalmazásával célszerű változtatni.

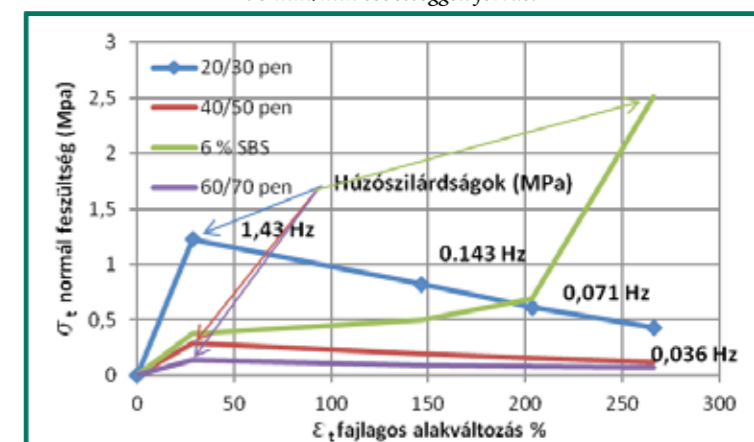
Száraz eljárás, amikor a modifikálás a keverőgépben történik és a modifikálószer mennyisége a kívánt kohézió elérése céljából változtatható.

Nedves eljárás, amikor a bitumenbe keverjük a polimert pl. SBS-t, amelynek mennyiségét utólag már nem tudjuk megváltoztatni az elérni kívánt kohézió érdekében.

Az út-pályaszerkezetek méretezéséhez azonban csak olyan szilárdsági adatok alkalmazhatók, amelyek egy adott tervezési frekvenciára vonatkoznak, ezért a bitumenre vonatkozó feszültség-alakváltozást függvényként is át kell számítani állandó frekvenciára.



9. ábra: Duktilitás vizsgálat különböző penetrációjú bitumeneken 15 °C-on és 273 mm/min sebességgel. forrás: (10)



10. ábra: Duktilitás vizsgálat eredményének ábrázolása a tényleges feszültség és alakváltozás alapján.

A változó frekvenciájú vizsgálat  $\sigma_t$  feszültség eredményeit átszámíthatjuk egy felvett  $\omega_a$  átszámítási frekvenciára (14).

A 10. ábra szerinti  $\sigma_t - \varepsilon_t$  feszültség-alakváltozás görbe  $\varepsilon_t$  alakváltozás értéke változatlan marad, de a  $\sigma_t$  feszültséget a (14) egyenlet alapján átszámítjuk az  $\varepsilon_t$  fajlagos alakváltozáshoz (9) tartozó  $\omega_t$  frekvenciára (15)

$$\sigma_a = \sigma_t \left(\frac{\omega_a}{\omega_t}\right)^k \quad (14)$$

$\omega_a$  - átszámítási frekvencia (rad/sec, Hz),

$\omega_t - \varepsilon_e$  fajlagos alakváltozáshoz tartozó mérési frekvencia (rad/sec, Hz),

$\sigma_t$  - tényleges feszültség (MPa),

$\sigma_a$  - átszámított feszültség (MPa),

$k$  - hatványkitevő,

$$\omega_t = \frac{\pi v_i}{\varepsilon_e l_0} \quad (15)$$

ahol,

$v_i$  - felterhelési sebesség (mm/sec),

$l_0$  - alakváltozás mérésének bázishossza (mm),

A mérési frekvenciát a mért megnyúlás  $\varepsilon_e l_0$  határozza meg, és nem a keresztmetszet változását is figyelembe vevő  $\varepsilon_t l_0$  megnyúlás, amiből számítjuk a  $\sigma_t - \varepsilon_t$  feszültség-alakváltozás görbét.

Az előzően alapján a következő sejtést fogalmazhatjuk meg:

**Ha egy bitumen newtoni folyadékként viselkedik, akkor adott vizsgálati hőmérsékleten létezik egy olyan „k” hatványkitevő, amely a  $\sigma_t - \varepsilon_t$  feszültség-alakváltozás görbét lineárisra teszi.**

A (14) és a (15) egyenletek felhasználásával 0,143 Hz-en egy tetszőlegesen felvett átszámítási frekvencián a nem modifikált bitumenekre létezik egy olyan „k” hatványkitevő, amely a  $\sigma_t - \varepsilon_t$  feszültség-alakváltozás görbét lineárisra teszi.

Az eredmény a 11. ábrán látható. Az SBS-el modifikált bitumenre viszont nem létezik egy olyan „k” hatványkitevő, amely a  $\sigma_t - \varepsilon_t$  feszültség-alakváltozás görbét lineárisra teszi.

A modifikált bitumenekről tudjuk, hogy szükségszerűen, a modifikálószer „polimer” miatt nem viselkedhetnek newtoni folyadékként, legfeljebb kis alakváltozások esetén közelíthető lineárisra.

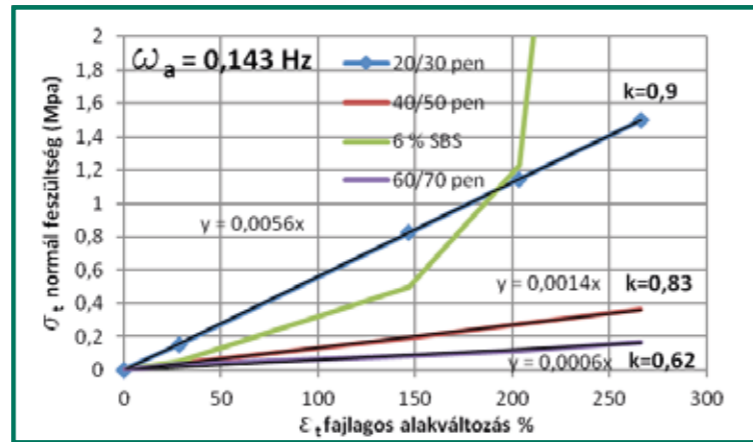
A „k” hatványkitevő a modifikált bitumen kivételével mindhárom bitumenre meghatározható, a hatványkitevő nem függ a frekvenciától, csak a hőmérséklet befolyásolja. A kapott egyenesek egyenletének meredeksége megadja adott frekvenciához és hőmérséklethez tartozó komplex modulus, a 40/50 penetrációjú bitumen hatványkitevőjének értéke 0,143 Hz frekvencián és +15 °C vizsgálati hőmérsékleten 0,14 MPa, de pl. 20 Hz-en 8,15 MPa lenne.

A „k” hatványkitevő ismeretében adott hőmérsékleten elvileg bármilyen  $\omega_i$  frekvenciára ki tudjuk számítani az egyenes egyenletét adó meredekséget, amely nem más, mint a bitumen komplex modulusa.

A húzófeszültség frekvenciától függését a (14) egyenlet meghatározza, de nem ad információt arról, hogy a vizsgált anyag mikor törik el ill. milyen feszültségnél éri el maximumát.

A 10. ábra szerinti vizsgálat pl. 273 mm/min terhelési sebesség esetén megadja a húzószilárdságot.

A kapott 1,23 MPa húzószilárdság 1,43 Hz frekvenciára vonatkozik, ezt a húzószilárdságot pl. 20 Hz-re átszámíthatjuk (14) szerinti, amely esetben 10,75 MPa húzószilárdságot kapnánk, de semmi sem garantálja, hogy a minta 20 Hz-en eléri-e ezt a feszültséget, vagy törik, folyik alacsonyabb feszültségnél.



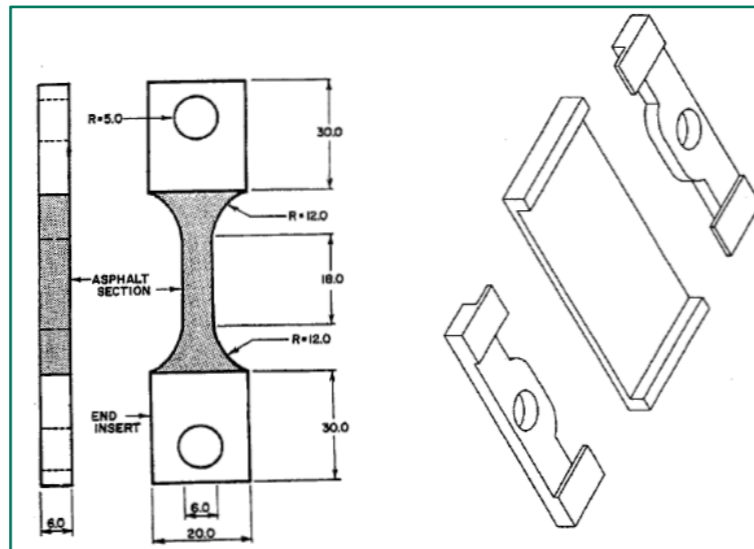
11. ábra: Duktilitás vizsgálat eredményének ábrázolása 0,143 Hz frekvencián a tényleges feszültség és alakváltozás alapján.

Az előzőekben megfogalmazott sejtést igazolhatjuk Osman<sup>(11)</sup> vizsgálataival, aki a bitumen és a bitumenes habarcok mechanikai tulajdonságait vizsgálta a duktilitáshoz hasonló 12. ábra szerinti módszerrel.

A vizsgálati hőmérséklet -10 °C -tól +10 °C-ig terjedt.

A vizsgálati sebességek:

2 mm/min (5,9%/min), 5 mm/min (14,8%/min), 10 mm/min (29,6%/min), 20 mm/min (59,2%/min), 50 mm/min (147,9%/min).

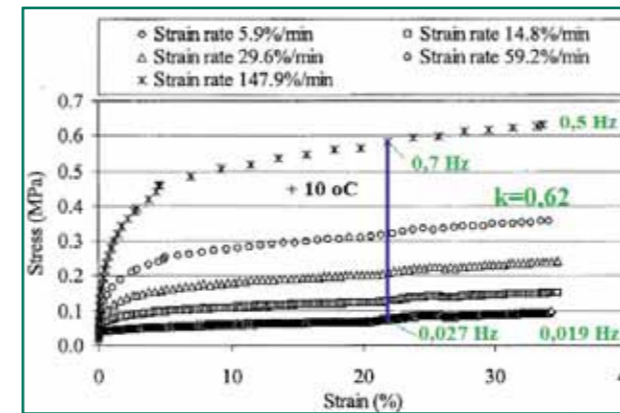


12. ábra: A közvetlen húzás vizsgálat mintájának geometriája. Forrás:(11)

A vizsgálati bitumen penetrációja 50, míg a lágyuláspontja 50,2 °C volt. A felhasznált mészkeletet nagyon jelentős mértékben 60 m%-ban tartalmazott 0,063-nál nagyobb szemcséket.

A 13. ábrán jól látszik a bitumen húzófeszültség-alakváltozás görbéinek felterhelési sebességtől és a vizsgálati hőmérséklettől függése.

A bitumen „melegben” +10 °C-on nagyobb felterhelési sebességnél, azonos megnyúlás mellett nagyobb húzószilárdságot, nagyobb komplex modulusot mutat. A Fraas-féle töréspont közelében a komplex modulus szintén növekszik a felterhelési sebességgel, de a húzószilárdság jelentősen csökken a lassú felterhelési sebességhez képest. A bitumen rideggyé, törékennyé válik, ami az aszfaltkeverék törékenységenek(12) növekedését is jelenti.



13. ábra: A bitumen viselkedésének hőmérséklettől és a felterhelési sebességtől függése. Forrás:(11)

A kemény nagy viszkozitású bitumenek alkalmazása helyett célszerűbb az alacsonyabb viszkozitású bitumenek húzószilárdságának növelése száraz modifikálással –a keverőtelepen az aszfaltkeverékbe kevert, pl. P2000 adalékanyaggal –, vagy nedves modifikálással a bitumenbe kevert pl. gumiőrlemény adalékanyaggal, vagy adott esetben a kettőt együtt alkalmazva, ha a nyírószilárdságot jelentősen kell emelni. pl. autópályák út-pályaszerkezeti rétegeibe. A megfelelő már kipróbált és hatásában igazolt modifikálószer rendkívüli előnye, hogy a meleg viselkedést, az alakváltozással szembeni ellenállást a nagyobb nyírószilárdság/húzószilárdság miatt nagyon megnöveli, miközben a lágyabb bitumen hideg viselkedését nem rontja, vagy esetleg még javítja is. A modifikálás a hideg és a meleg viselkedés javításán kívül az aszfaltkeverék szilárdságának, kohéziójának növelésén keresztül javítja a fáradási élettartamot, a komplex modulus növelésén keresztül pedig jelentősen növeli az út-pályaszerkezet várható élettartamát.

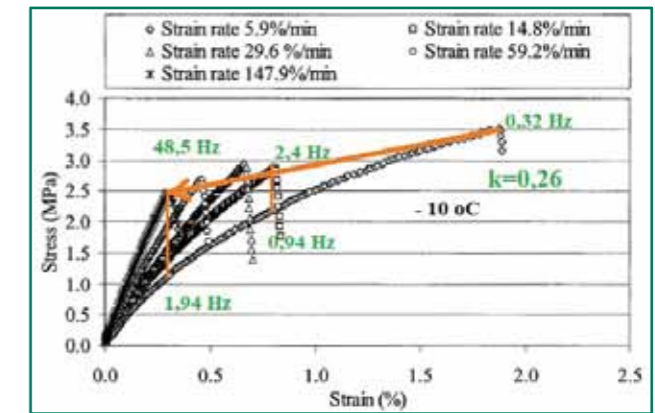
A 13. ábra szerint legalább két – a példában az 50 mm/min és a 2 mm/min - terhelési sebességek feszültség-alakváltozási görbéiből a (14-15) egyenletek felhasználásával számítható az adott vizsgálati hőmérsékletekhez tartozó k hatványkitevő.

A vizsgálati hőmérsékleten belül a k hatványkitevő állandó, nem függ attól, hogy melyik két terhelési sebességből és melyik  $\varepsilon_t$  fajlagos alakváltozáshoz számítjuk ki az értékét, +10 °C-nál a k hatványkitevő 0,62, míg -10 °C-nál a k hatványkitevő 0,26.

A 14. ábra szerint a +10 °C-hoz mérési hőmérsékletnél az 50 mm/min feszültség-alakváltozási görbéiből a (8-9) egyenletek segítségével meghatározzuk a piros színű tényleges  $\sigma_t - \varepsilon_t$  feszültség-alakváltozás görbét. Az így kapott tényleges  $\sigma_t - \varepsilon_t$  feszültség-alakváltozás görbe még az  $\varepsilon_t$  fajlagos alakváltozás növekedésének arányában csökkenő frekvenciát tartalmaz.

A számítás 0,7 Hz frekvenciára a (14-15) egyenletek alapján a +10 °C-hoz tartozó k=0,62 hatványkitevővel végeztük el.

A számítás eredménye a 14. ábrán kék színnel jelölt egyenes, ami igazolja sejtésünket.



Az egyenes iránytangense megadja a bitumen +10 °C-hoz tartozó komplex modulusát, amely 3,81 MPa. A komplex modulus 20 Hz esetén 30,5 MPa lenne.

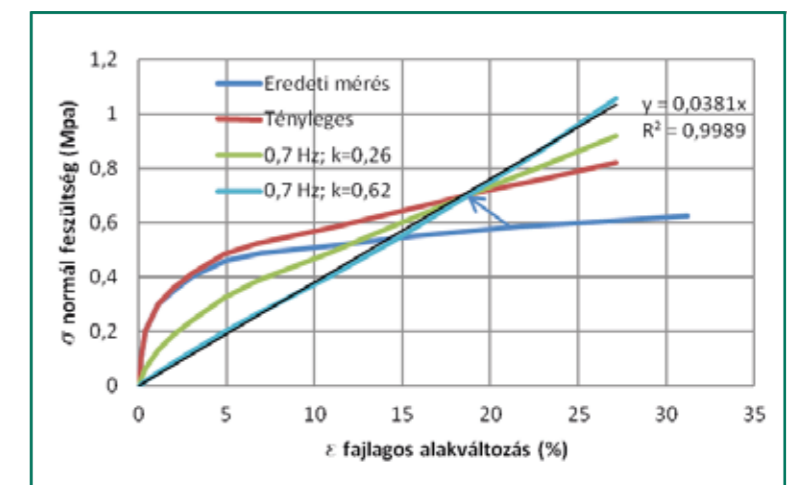
A k=0,62-től eltérő hatványkitevők alkalmazása esetén a regresszió egyre romlik, pl. a -10 °C-ra vonatkozó k=0,26 közel se eredményez egyenest.

A 13. ábra +10°C-nál a folyás közel azonos fajlagos alakváltozásnál következik be. Az 50 mm/min felterhelési sebességnél 0,5 Hz-nél, míg 2 mm/min felterhelési sebességnél 0,019 Hz-nél lesz a törés/folvás.

A két frekvencia között felvett  $0,5 \geq \omega_i \geq 0,019$  bármely frekvenciára számíthatjuk a húzószilárdságot, de ezen a határon kívülre már nem tudunk megbízhatóan számítását végezni a húzószilárdságra.

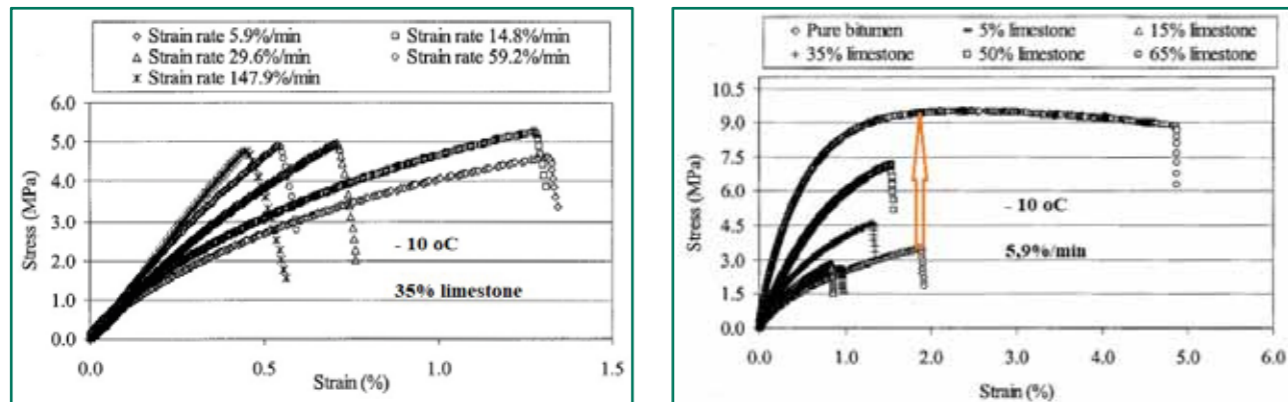
A problémát jól szemlélteti a -10 °C-on végzett mérés, ahol a törések eltérő fajlagos alakváltozások mellett következnek be, ezért az egyik felterhelési sebességhez tartozó húzószilárdság és k=0,26 ismerete nem elégséges a húzószilárdság eltérő frekvencián történő számításához.

A komplex modulus számításnak nincsenek ilyen akadályai, a k hatványkitevő ismeretében adott hőmérsékleten bármely frekvenciára számítható, de a mért és a számított komplex modulus lehetőleg ne haladja meg a tízszeres értéket.



14. ábra: 50 mm/min terhelési sebességű, +10 °C hőmérsékletű mérés tényleges feszültségei és alakváltozásai és átszámításuk 0,7 Hz frekvenciára k=0,62 és k=0,26 hatványkitevő esetén.

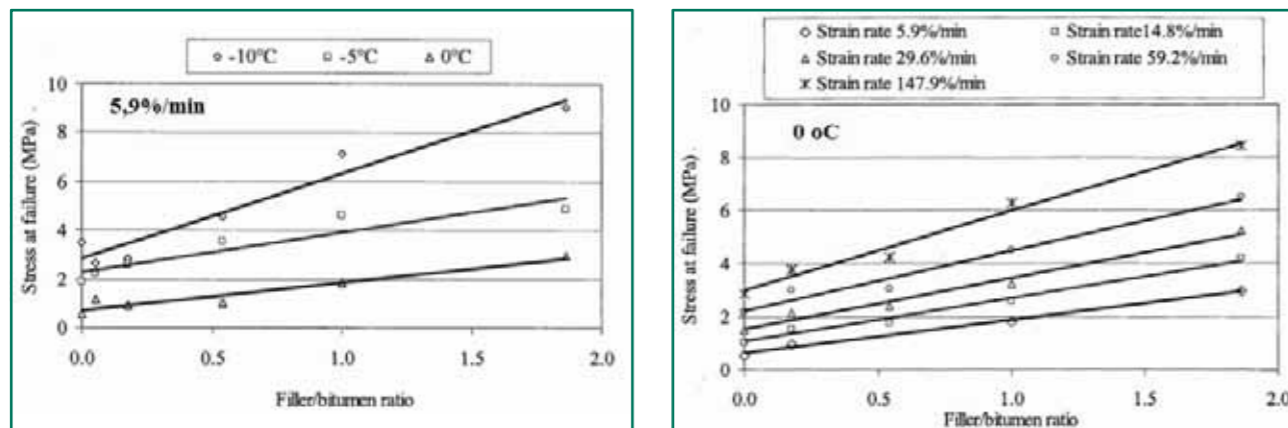
A 15. ábrán mutatja, hogy már 35% térfogat százalék mészköliszt tartalom esetén is a törést okozó húzófeszültség  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on állandó, független a felterhelés sebességétől. A töltőanyag tartalom növelése 2 mm/min felterhelési sebességnél  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on a kötőanyaghoz képest növeli a húzószilárdságot és a komplex moduluszt.



15. ábra: A bitumenes habarcs viselkedése  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on, eltérő felterhelési sebességnél és mészköliszt tartalomnál. Forrás:<sup>(12)</sup>

A 16. ábra szerint 2 mm/min felterhelési sebességnél a töltőanyag/kötőanyag tartalom arányának növelése  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ -tól  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig növeli a bitumenes habarcs húzószilárdságát. Adott hőmérsékleten  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál a töltőanyag/kötőanyag tartalom arányának növelése 2 – 50 mm/min felterhelési sebességeknél is növelte a húzószilárdságot.

Általánosságban azt mondhatjuk, hogy a töltőanyag/kötőanyag arányának növelése javítja a bitumenes habarcs hideg viselkedését, szilárdságát.



16. ábra: A töltőanyag/bitumen arányának hatása a húzószilárdságra  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ -tól  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig, valamint különböző felterhelési sebességek esetén  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on. Forrás:<sup>(12)</sup>

A vizsgálati eredmények összhangban van a mikro-mechanikai megfontolásokkal. Alacsony töltőanyag/kötőanyag arányánál közelítünk a kötőanyag húzószilárdságához, mivel az alacsony arány egyben kevés ásványi adalékzemcsét is jelent, amit a törés során el kell kerülni. A törési út csökkenése a törési felület csökkenését is jelenti.

A töltőanyag szemmegoszlásának változtatása nélküli töltőanyag arány növelése a várakozásnak megfelelően lineárisan növeli a törési felületet, így a húzószilárdságot is.

A gradáció növelésével  $d_{60}/d_{10}$  lineárisnál nagyobb húzószilárdság növekedés is elérhető.

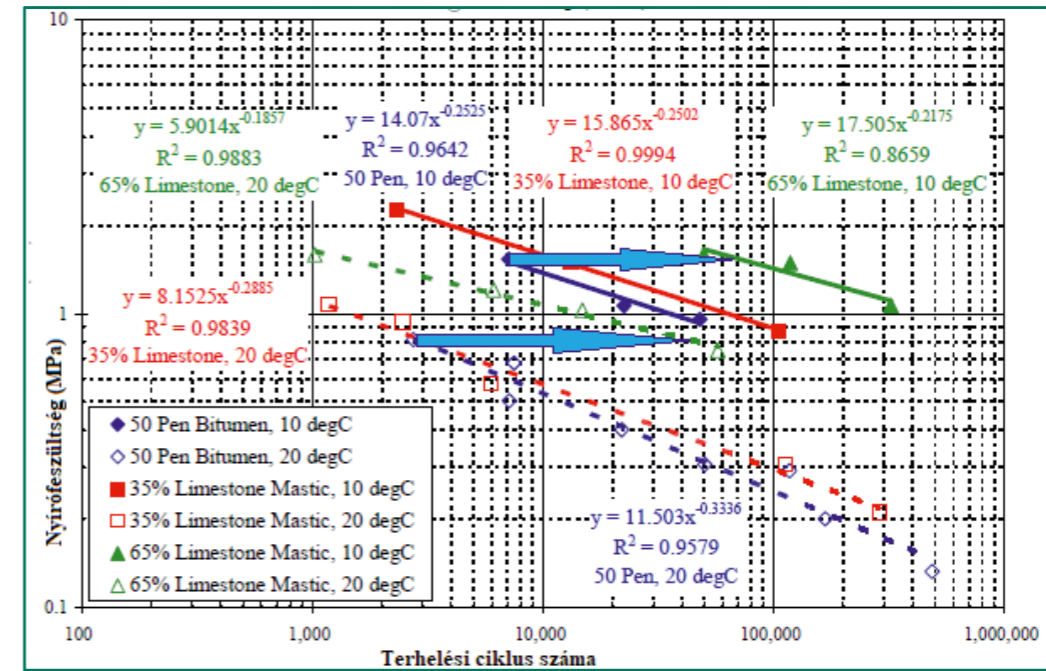
A bitumen és a bitumenes habarcs szilárdságának változása összefügg a faterhelési élettartammal.

A Nottingham egyetemen kutatói<sup>(13)</sup> 50 penetrációjú bitumennel és 35% valamint 65% mészköliszt tartalmú aszfalthabarcsok faterhelési és szilárdsági tulajdonságait 10 Hz-en vizsgálták DSR készülékkel 17. ábra.

A faterhelési élettartamot a komplex nyírási modulus felére csökkenéssel jellemezték. A komplex nyírási modulus csökkenése bitumen esetén a kezdeti viszkozitás csökkenését jelenti (4) egyenlet alapján, mivel a DSR vizsgálat során a  $\dot{\gamma}$  nyírási alakváltozás sebessége állandó.

A nagyon alacsony 35% töltőanyagú aszfalthabarcs faterhelési élettartama 17. ábra szerint alig jobb, mint az alap bitumené mindkét vizsgálati hőmérsékleten. A faterhelési élettartamot a hőmérséklet csökkenése és a töltőanyag növelése jelentősen javította.

A 35% arány  $\sim 0,53 \frac{T}{E}$  töltőanyag/bitumen arányának felel meg, míg a 65% arány  $1,88 \frac{T}{E}$ -t jelent.



17. ábra: DSR faterhelési vizsgálat eredményei különböző mészköliszt tartalmú bitumenes habarcsoknál. Forrás:<sup>(13)</sup>

A mért értékek és tendenciák visszaigazolják a mikro-mechanikai megfontolásokat.

A faterhelés során a bitumen megy tönkre, faterhel el, csökken le a kezdeti komplex nyírási modulusa, viszkozitása. A bitumen és az alacsony töltőanyagot tartalmazó bitumenes habarcs faterhelési élettartama, kezdeti nyírófeszültsége alig tér el egymástól, a törési felület csak kis mértékben növekedett a „tisztá” bitumenhez képest.

A vizsgálati hőmérséklet csökkentése növeli a faterhelési élettartamot, e mögött azonban a bitumen viszkozitásának hőmérsékletfüggése áll.

Töltőanyag arányának növelése növeli a valós törési felületet 4. ábra, DSR vizsgálatnál a nyírt felületet. Aszfaltkeverékekben belül a „töltőanyag” ásványi adalékanyag arányát lehet növelni a bitumentartalom csökkentésével is, a bitumentartalom csökkentésének az adhézió csökkenése szab határt.

A minimális bitumentartalmat az aszfaltkeverék kohéziójának meghatározásával az ITS vizsgálatnál tudjuk meghatározni, a Marshall módszerhez hasonló eljárással.

Az alapbitumen egy adott tervezési hőmérsékletre tartozó viszkozitásának, növelése addig megfelelő, amíg a bitumen hideg viselkedése megfelelő élettartamot biztosít az adott régió éghajlati viszonyait tekintve. Magyarországon az 50 alatti penetrációjú bitumenek alkalmazása nem ajánlott. E miatt a bitumenek ill. az aszfaltkeverékek  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on faterhelési élettartamának vizsgálatára lenne szükséges.

A magas viszkozitású bitumenek alacsony hőmérsékleten esetén még alacsony frekvencián is ridegen viselkednek, húzószilárdságuk nem növekszik, sőt csökkennek, de a komplex modulusuk növekszik, vagyis ridegké törékennyé válnak.

A törés, kialakulást, terjedését csak törésmechanikai alapon lehet és kell tárgyalni, ami már nagyon meghaladja e cikk terjedelmét. A lényeg, hogy az aszfaltkeverékekben szükségképpen kialakuló, ill. a már jelen lévő repedés terjedését még fémekek esetén is jelentősen befolyásolja a

repedéscsúcsonban jelentkező plasztikus zóna tulajdonsága és mértéke.

A plasztikus zóna képes a repedés terjedéséhez szükséges energiát elnyelni, ezért minél nagyobb ez a zóna és minél plasztikusabb, annál nagyobb az energiaelnyelő képessége.

Merev ill. nagy viszkozitású bitumeneknél ez az energiaelnyelő képesség kicsi, ezért a nagy merevségű bitumenek egy adott hőmérséklet mellett „elkezdenek” repedni, a repedésterjedés sebessége jelentőssé válik. A bitumen energiaelnyelő képessége nem más, mint a mért ill. a komplex modulusból számítható disszipatív energia, a mi a komplex modulus szinuszos, képzetes része.

A repedéscsúcson minden anyag „folyik”, plasztikus, nagyon nagy a fajlagos alakváltozása, ezt az állapotot bitumennél az állandó terhelési sebességű húzószilárdság vizsgálat jellemzi a legjobban 13. és 15. ábrák.

## 8. Keverési idő

A keverési időre eddig úgy gondoltunk, hogy annak kizárólagos szerepe az aszfaltkeverék homogenitásának biztosítása, amely feltétel ellenőrzése „szemrevételezéssel” is megoldható.

Jelen cikkben rámutattunk, hogy a keverési idő és az adhézió között van összefüggés, amit igazolni lehet az ITS méréssel, mivel a kohéziót befolyásolja az adhézió lásd. vízérzékenység vizsgálat.

Jelenleg a vizsgálati laboratóriumban az adott keverőgépen „kellő” ideig kevert aszfaltkeveréket tervezünk az előírásoknak megfelelő aszfaltkeveréket. A keverőgépen beállított keverési idő akkor megfelelő, ha az aszfaltkeverék megfelel a vizsgálati laboratóriumban kapott eredményeknek és megfelel a bevontsági és homogenitás követelményének<sup>(14)</sup>.

„A keverőgépből történő ürítéskor az anyag homogén megjelenésű legyen, a kötőanyag teljesen vonja be a kőanyaghalmozatot, és a finom kőanyaghalmozatot csomósodásának semmilyen jele nem mutatkozhat.”

Nem „megfelelő” keverési idő esetén nem tartható a hézagtartalom ill. a Marshall stabilitás. A hézagterfogat azonban csak az egyik tényező az aszfaltkeverék szilárdságának és élettartamának tekintetében. A Marshall stabilitás és a szilárdság pl. tiszta húzáshoz tartozó húzószilárdság, vagy a fáradási élettartam között nem található elfogadható mértékű összefüggés.

A keverési idő az adhézió keresztül befolyásolja a szilárdságot. A keverési idő hat az adalékanyagon kialakuló bitumenfilm vastagságának eloszlására, egyenletességére, ezért a keverési idő csökkenti a mért ITS szilárdság ill. kohézió relatív szórását.

Elgondolkodtató, hogy sok laboratórium a cukrárszatban használt keverőgépeket használ a megfelelő kényszerkeverők helyett. Továbbá nincs egységes módszertan a keverőtelepi keverési idő és a laboratóriumi keverési idő validálására se.

A probléma felvetése és esetleges megoldási irányának kijelölése céljából egy aszfaltkeveréket az adott laboratóriumi keverőben kevertük 3; 5; és 8 percig, valamint ITS vizsgálatot végeztünk 4 db mintán, amelynek eredménye az 1. táblázatban található.

Keverési idő (min)	ITS (kpa)			Relatív szórás
	Átlag:	Szórás:	5% valószínűség, hogy rosszabb.	
3	1536	114	1292	7,45%
5	1827	72	1673	3,96%
8	1793	31	1727	1,73%

1. táblázat: Keverési idő és az ITS változása.

A keverési idő növelése jelentősen és szignifikánsan csökkentette a relatív szórását, az ITS szempontjából növelte a homogenitást.

Általában azonos aszfaltkeverékek és azonos vizsgálati módszerek esetén a relatív szórás 6-10% szokott lenni, ezért felvetődik, hogy a vizsgálati szórás a keverési idő növelésével csökkenthető, amely végső soron az aszfaltkeverék jobb homogenitását és jobb szilárdságát eredményezi.

A laboratóriumi keverési idő és a keverőtelepi keverési idő között nem ismerjük az összefüggést, ezért célszerű a megfelelő keverési időt próbakeverésekkel is meghatározni.

Az 1. táblázat eredményei azonban egyértelműen igazolják a keverési idő és az aszfaltkeverék szilárdsága közötti ok-okozati összefüggés feltételezésének helyességét.

## 9. Összefoglalás

Áttekintettük az aszfaltkeverékek szilárdságát meghatározó főbb tényezők hatásmechanizmusát mikro-mechanika és klasszikus megközelítésekben.

Az aszfaltkeverék összetevői közül részletesebben vizsgáltuk a kötőanyag viszkozitását, komplex nyírási modulusát és a húzó ill. nyírószilárdságát.

Bizonyítottuk, hogy a mért feszültség-alakváltozás összefüggését a mért fajlagos alakváltozás mértékének függvényében át kell számítani tényleges feszültség-alakváltozássá.

Igazoltuk független laboratóriumok mérési eredményeinek felhasználásával, hogy a nem modifikált bitumenek adott vizsgálati frekvencián és hőmérsékleten newtoni folyadékként viselkednek.

Megerősítettük mikro-mechanikai megfontolásokkal is, hogy a töltőanyag/kötőanyag arányának növelése növeli a bitumenes habarcs húzószilárdságát, fáradási élettartamát a tervezés szempontjából minden releváns hőmérsékleten. A hatás okaként a törési felület növekedését jelöltük meg.

Rámutattunk a mikro-mechanikai megfontolásokkal, az adhézió és a bitumen szilárdsági tulajdonságai – viszkozitás, nyírószilárdság - kiemelt fontosságára.

Közvetve igazoltuk, hogy az aszfaltkeverék kohéziója szempontjából a bitumentartalom csökkentése előnyös mindaddig, amíg a folyamatosan csökkenő adhézió miatt a kohézió nem kezd el csökkenni.

Igazoltuk, hogy az aszfaltkeverék kohézióját az ITS hasító-húzószilárdság mérésével viszonylag nagy pontossággal meg lehet határozni, ezért az ITS vizsgálat alkalmas az optimális bitumentartalom meghatározására.

Végezetül rámutattunk, hogy az aszfaltkeverékek keverési ideje is befolyásolja az aszfaltkeverékek kohézióját, de legfőképpen a relatív szórását, ami a tervezés szempontjából nagyon fontos tényező.

## Irodalomjegyzék:

- Tou Huang, Shuai Qi, Hongfu Yu, Sheng Li 2019: Share Properties of Asphalt Mixture under Triaxial Compression; <https://doi.org/10.3390/app9071489>
- Tóth Cs., Seoyoung Cho, Primusz P. 2020: A Ramberg-Osgood modell alkalmazása az aszfalt technológiában; Útügyi lapok, 8. évfolyam, 13. szám. <https://doi.org/10.36246/UL.2020.1.06>
- Hilde Soenen, Stefan Vansteenkiste, Patricia Kara De Maeyer. 2020: Fundamental Approaches to Predict Moisture Damage in Asphalt Mixtures: State-of-the-Art Review; Infrastructures, 2020, 5. (2) p.20. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5020020>
- D. N. Richardson, S. M. Lusher. 2008: Determination of Creep Compliance and Tensile Strength of Hot-Mix Asphalt Wearing Course in Missouri; Organizational Results Research Report, 2008, OR08.018
- TRL, DFID, 2002: A Guide to the Design of Hot Mix Asphalt in Tropical and Sub-Tropical Countries
- Geiger A., Holló A. 2010: A bitumen és a közet közötti tapadás – Fejlesztési törekvések a bitumen minőségének javítása érdekében, <https://www.researchgate.net/publication/282763942>
- Géber Róbert. 2012: Mészkelet és dolomit töltőanyagok hatása aszfalthabarcsok reológiai tulajdonságaira; Doktori (Ph.D.) értekezés, Kerpely Antal Anyagtudományok és technológiák Doktori Iskola, Miskolc, 2012.
- Taha A. H. A., 2014: Investigation the Rutting and Moisture Sensitivity of Warm Mix Asphalt with Varying Contents of Recycled Asphalt Pavement: University of Iowa, Iowa, at the August 2014 graduation.
- Little, D. N. Jr.; Jones, D. R. IV., “Chemical and Mechanical Processes of Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt Pavements,” National Seminar, TRB Committee on Bituminous-Aggregate Combinations to Meet Surface Requirements Transportation Research Board (TRB), San Diego, CA, February 2003, pp. 37-74.
- G.A.J. Mturi, M. NKGapele, 2013: Force ductility - A 5 Years Feedback of Performance Result. Transport Infrastructure Engineering, Pretoria, South Africa, 2013.
- Sami A. Osman, 2004: The Role of Bitumen and Bitumen/Filler Mortar in Bituminous Mixture Fatigue, The University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy, 2004.
- Zsichla L. 2023: Út pályaszetkezet méretezése a törésemélet alapján; Útügyi Lapok, 11. évfolyam, 18. szám. <https://doi.org/10.36246/UL.2023.1.06>
- Min-Chin Liao, 2007: Small and Large Strain Rheological and Fatigue Characterisation of Bitumen-Filler Mastics, The University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy, 2007.
- e-UT 05.02.11:2018/M1:2021 Út pályaszetkezet aszfaltburkolatok keverékeinek követelményei.

# Andezitek törési- és anyagtulajdonságai közötti összefüggések vizsgálata egyszemcse törési módszerrel

szervezők: **Márkus Izabella, PhD hallgató; Dr. Rácz Ádám, egyetemi docens**  
Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar,  
Nyersanyagelőkészítés és Környezettudományi Intézet

## Dr. Rácz Ádám

egyetemi docens  
Miskolci Egyetem



## Márkus Izabella

PhD hallgató  
Miskolci Egyetem



## 1. Bevezetés

A kőanyag-halmazok az építőipar által a legnagyobb volumenben használt alapanyagok [1], az aszfaltgyártás nélkülözhetetlen, nagy mennyiségben felhasznált alapanyagai. A kőanyag-halmazok a különféle természetes eredetű ásványi nyersanyagokból aprítással és osztályozással előállított termékek, melyet szemcseméret szerint töltőanyag (<0,063 mm), homok (0,063-2 mm) és kőanyag csoportokban sorolhatók. Az aprítás a mechanikai-fizikai nyersanyagelőkészítés egyik legenergiaigényesebb művelete, viszont a bevezetett összes energiának csak néhány százaléka hasznosul a szemcsék törése során, miközben energiaszükséglete globális szinten a villamosenergia-termelés megközelítőleg 4 %-a [2] [3].

Az aprítási technológiák működését általában a nagy energiaszükséglet és kis hatások jellemzi tehát, ami arra vezethető vissza, hogy évtizedekig a fő szempont a kívánt volumen és termékminőség előállítás volt az energiaszükséglet figyelmen kívül hagyva. Az energiaszükségletet egyrészt az alkalmazott aprító berendezés, másrészt a feldolgozott nyersanyag tulajdonságai, mint például a keménysége, szilárdsága, szövete, repedések gyakorisága és ásványos összetétele, határozzák meg. A nagy energiaszükséglet és a kis hatások miatt az aprítási folyamatok optimalizálása, hatékony technológiák kialakítása napjainkban is jelentős kérdés.

## 2. Aprítási- és örölhetőségi vizsgálatok

A különböző törési és örölhetőségi vizsgálatok az aprítási folyamatok tervezésének, optimalizálásának nélkülözhetetlen elemei. Ugyanis ezek a vizsgálatok mutatják meg, hogy egy adott típusú igénybevétellel szemben mekkora aprítási ellenállást tanúsít az anyag.

Az örölhetőségi vizsgálatok, mint a Bond-, Hardgrove- és Zeisel főleg az őrlés tartományára ( $x_{80} < 0,5$  mm) adnak pontosabb információt, így a malmok méretezésére tökéletesen alkalmasak, de a durvább szemcseméret-tartományban ezen adatok alapján való számítások az aprítógép méreteinek hibás meghatározásához vezethetnek.

Az egyszemcse törési kísérletek a törési jelenség, az energia és a szemcseméret-csökkenés kapcsolatának, valamint a törési folyamat energiafelhasználása és a különböző energiavesztések vizsgálatára alkalmas módszerek.

Ha a berendezés hatását ki szeretnénk iktatni és az anyag eltöréséhez szükséges minimális energiát, illetve az aprító berendezésben végbemenő aprítás elemi folyamatait szeretnénk tanulmányozni, az egyszemcse törési kísérletek alkalmazása elengedhetetlen [4].



### 3. Egyszemcse törési vizsgálatok

Az egyszemcse törési vizsgálatok az igénybevétel módja és az érintkezési pontok száma szerint osztályozhatók, ennek alapján három csoport különíthető el: ütközéssel egy felületen, ütközéssel két felület között és lassú nyomás két felület között.

A vizsgálati módszercsoporthoz tartozó eljárások és vizsgálati berendezések jelentős része a második csoporthoz tartozik, vagyis az ütközéssel történő igénybevétel két felület között játszódik le. Ebben a csoportban tartozik az egyszemcse törési vizsgálatok egyik legegyszerűbb és gyakran alkalmazott módszere az esősúlyos vizsgálat [5].

Ennek kivitelezéséhez az 1. ábrán látható vizsgálati berendezést fejlesztettük és építettük meg. A berendezés fő szerkezeti elemei: 1,18 kg és 23,5 kg között változtatható tömegű súly, a vázszerkezet, amelyre egy elektromágnes segítségével a súly rögzíthető, illetve elengedhető; a 0,5 m és 1,5 m tartományban változtatható ejtési magasság, keményfém üllő, amelyre az egyedi szemcse, szemcsehalmaz vagy fúrómag darab helyezhető, valamint a zárható fém doboz, amely a törés során a töret szétszóródását hivatott megakadályozni.

A tetszőleges méretű és tömegű súlyt, egy pontosan meghatározott magasságra emeljük és ott megtartja az elektromágnes, majd a vizsgálat során egy kioldó szerkezet elengedi a súlyt, amely az üllőn elhelyezett mintára esik.



1. ábra: Esősúlyos vizsgálat berendezés ME-NyKI

Az aprítási energia a súly tömegének, ejtési magasságának változtatásával módosítható, amely a következő összefüggéssel adható meg:

$$E_i = m_b \cdot g \cdot (h_k - h_v) [m^2 kg/sec^2]$$

ahol

$m_b$  a súly tömege [kg] és  $h_k$  a súly aljának magassága az ejtést megelőzően [m] és  $h_v$  a súly aljának magassága az ejtést követően [m].

Ebből a fajlagos aprítási energia számítható a szemcse tömegének ismeretében:

$$E_s = E_a / m_{sz} [kWh/t]$$

ahol  $m_{sz}$  a szemcsék átlagos tömege [g].

### 4. Anyag- és vizsgálati módszer

A módszer szemléltetéséhez a Colas-Északkelet Kft. Tállyai bányájából származó piroxén-andezit mintákon végzett törési kísérletek eredményeit mutatjuk be.

A bánya által termelt andezit egy szubvulkáni intrúzió andezit tömb. A nyomás, a hőmérséklet és az illóviszonyok a benyomulólavaként a függőleges és oldalirányban is változtak így a termelt anyag minősége az egyes termelési szinteken eltér. A mérések három minta típuson történtek (2. ábra), egy üde, jó minőségű finom szemcsés, porfíros, sötétszürke oszlopos andezit, amely a mállás és repedés nyomait nem mutatja (Andezit\_1), egy közepes minőségű lilás-szürke finomszemcsés, hólyagüreges andezit, amelyen már felfedezhetők enyhe mállási nyomok (Andezit\_2), valamint egy erősen mállott, sárgás-szürkés Fe-oxidos bevonatos, szürkés-barnás andezit, amelyben a hólyagüreges gyakoribbak, de a méretük csökken (Andezit\_3).

A makroszkópos, szemmel történő tulajdonságok megfigyelésén túl a minták anyagtulajdonságainak, köztantani jellemzőinek meghatározása is megtörtént. A mennyiségi ásványos összetétel meghatározása röntgen pordiffrakciós módszerrel (XRD) történt, az egyes minták összetételét a 1. táblázat foglalja össze.

Az egyes minták egymáshoz képest nem mutattak jelentős összetételbeli eltérést, csak az egyes ásványfajták arányai változóak, mint például az egyes plagioklász fajták arányai.

1. táblázat: A minták mennyiségi ásványos összetétel (wt%)

	Andezit_1	Andezit_2	Andezit_3
Plagioklászfeldpát	49,1	49,4	63,8
Kálföldpát	17	12,9	0,5
Kvarc	4,2	1	0,6
Szmektit	1,4	1,4	5,7
Járolékos ásv.	18	20,5	14,43
Amorf	9,7	14,8	20,7

A mikroszkópos szöveti megfigyelések és ezek számszerűsítése közet vékonycsiszolatokon történt Zeiss AXIO Imager.M2m optikai mikroszkóppal rögzített digitális fényképen, valamint a Zeiss AxioImager szoftver szemcseelemző moduljának használatával. Az andezitek szövetüket tekintve egyenlőtlen szemcseméretű kiömlési magmás kőzetek, a nagy méretű kristályos kőzetalkotó elegyreszek, úgynevezett fenokristályok és az ezek közötti teret kitöltő mikrokristályos alapanyag, úgynevezett mátrix alkotják.

Az egyes ásványszemcsék mérete között jelentős eltérés van. ezért a fenokristályok és a mátrix számszerűsítése külön történt. Az egyes mintákra jellemző átlagos szemcseméreteket a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat:

A fenokristályok és a mátrix átlagos szemcsemérete

	Andezit_1	Andezit_2	Andezit_3
mátrix X átlag [ $\mu$ m]	250,2	231,7	236,9
fenokristály X átlag [ $\mu$ m]	28,3	32,4	30,8

Az Andezit\_1 minta esetében a fenokristályok nagyobb méretűek (3. ábra, bal), míg az Andezit\_2 (3. ábra, közép) és Andezit\_3 (3. ábra, jobb) minta esetében közel azonos méretűek. A mátrix esetében az átlagos szemcseméretben jelentős eltérés nem volt észlelhető.

A szöveti jellemzőkön túl, a minta porozitásának meghatározása is megtörtént. A porozitás meghatározáshoz a 40-45 mm-es frakciót választottuk ki, mivel megfigyelésünk alapján ez a mérettartomány a szabad szemmel látható pórusok méretének többszöröse. A szemcsék esetében a porozitás mérés nagy méretű fém piknométerben történt.

A mérést követően a mintát <125  $\mu$ m szemcseméret alá porítottuk és a por sűrűségét üveg piknométerben meghatároztuk. A kapott értékekből határoztuk meg a porozitást, melyet a 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat:

A minták porozitása, mértékegység g/cm<sup>3</sup>

Andezit_1	Andezit_2	Andezit_3
2,11	4,99	3,76

Az egyszemcse törési vizsgálatok szűken osztályozott frakciókon történtek, szemléltetésképpen az 56-63 mm, 25-31,5 mm és 8-11,2 mm-es frakciók eredményeit mutatjuk be. Az egyszemcse töréshez szükséges minták előállítása aprítással és szitálással történt. Az esősúlyos vizsgálatok kivitelezése mind három minta és vizsgálati frakció esetében három törési energia alkalmazásával történt.

A szemcsék törése egyesével történt, az adott törési energiához tartozó szemcsehalmaz szemcseméret-eloszlását a törést követően mintánként száraz szitálással határoztuk meg.

### 5. Eredmények

Az esősúlyos vizsgálatok eredményeit 4. ábra, 5. ábra és 6. ábra mutatja be. Az 56-63 mm-es frakció esetében az Andezit\_1 minta minhárom törési energia esetében kevésbé aprózódott, az Andezit\_2 és Andezit\_3 minta jobban aprózódott az előzőhöz viszonyítva, egymáshoz viszonyítva a második törési energia szinten (84,71 J) az Andezit\_2 minta aprózódott jobban.

A 25-31,5 mm-es frakció esetében is hasonló trend volt megfigyelhető. A 8-11,2 mm-es frakció esetében az előzőekben megfigyelt trend nem érvényesült, a legkisebb törési energia szinten ugyan még az Andezit\_1 minta kevésbé aprózódott, de a két nagyobb törési energia esetében ez a trend már nem volt megfigyelhető. A 24,9 J törési energiánál minhárom minta szinte azonos mértékben aprózódott, ez a jelenség például a három típusú anyag együttes feldolgozásánál kívánatos lenne. A 36,6 J törési energia mellett az Andezit\_3 minta aprózódott a legjobban, míg a másik két minta közel azonos mértékben.

A fajlagos aprítási energia és az aprózódás kapcsolatának vizsgálatára a szakirodalomban gyakran alkalmazott az úgynevezett  $t_n$  görbék. Ezen görbék azt az anyag mennyiséget jelöli %-ban amely a kiindulási anyag szemcseméretének az  $n$ -ed része alá aprózódik. Például a  $t_{10}$  görbe a 25-31,5 mm-es frakció esetében, azt az anyagmennyiséget jelöli százalékban, amely a kiindulási anyag méretének, ez esetben vegyük a frakció átlagos szemcseméretét, 28,25 mm a tizede alá, az az 2,85 mm alá aprózódik.

A 7. ábra mutatja a  $t_2$ ,  $t_6$  és  $t_{10}$  görbéket. A  $t_2$  görbe esetében a befektetett fajlagos energia növekedésével az aprózódás mértéke nő. A  $t_6$  és  $t_{10}$  görbék esetén látható egy pontcsoport, amely elkülönül (pirossal bekeretezve), ezek a 8-11,2 mm-es frakcióhoz tartozó pontok, jól látható, hogy ebben a mérettartományban a befektetett fajlagos energia nem eredményez olyan mértékű szemcseméret csökkenést, mint a nagyobb szemcseméretű frakciók esetén.

### 6. Következtetések

A különböző típusú andezitek azonos méretű frakcióit különböző törési energia szinteken összehasonlítva kimutatható, hogy eltérően viselkednek a törés során.

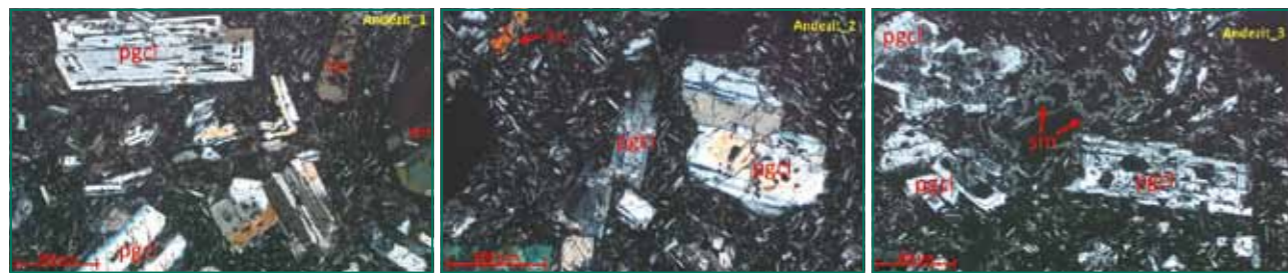
A szemcseméret csökkenésével és ezáltal a hibahelyek számának csökkenésével, az egyes minta típusok aprózódása is megváltozik. A nagyobb szemcseméretű vizsgálati frakciók esetén a hibahelyek és repedések a fő befolyásolói az anyagtulajdonságnak.

A szemcseméret és ezáltal a hibahelyek csökkenésével előtérbe kerülnek a szövet-szerkezeti, valamint az ásványtani tulajdonságok hatásai. A mállás növelte a törési ellenállást mivel a másodlagos ásványok kitöltötték a pórusokat, csökkentve ezáltal a porozitást. A törés során befektetett fajlagos aprítási energia növekedésével nem minden esetben fog nőni a szemcseméret csökkenésének mértéke.

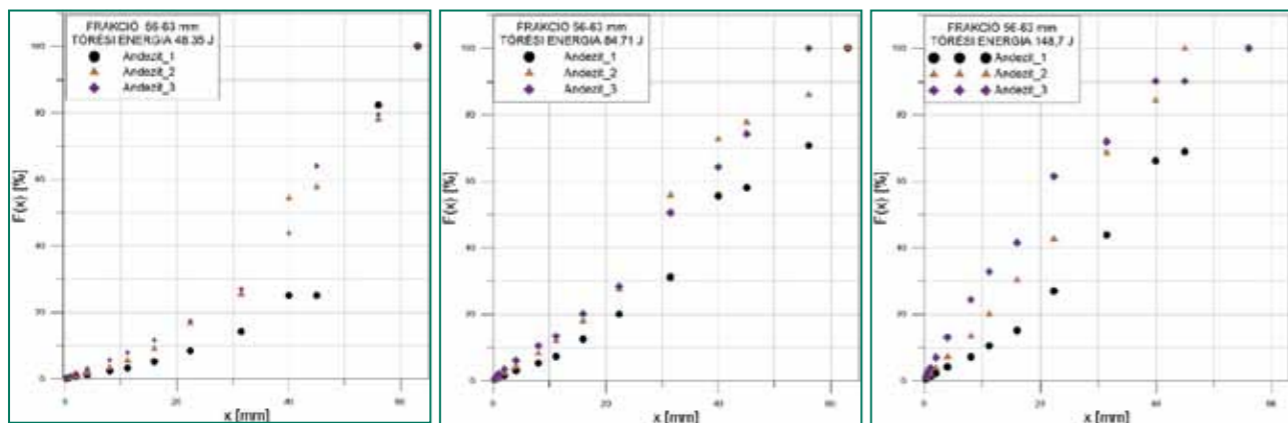
Az azonos típusú, de különböző minőségű kőzetek esetében kiválasztható egy olyan törési energia amellyel, ha nem is teljesen azonos mértékben fognak aprózódni az eltérő minőségű kőzetek, de minimalizálható az aprított nyersanyag egyes szemcséinek túlaprózódása.



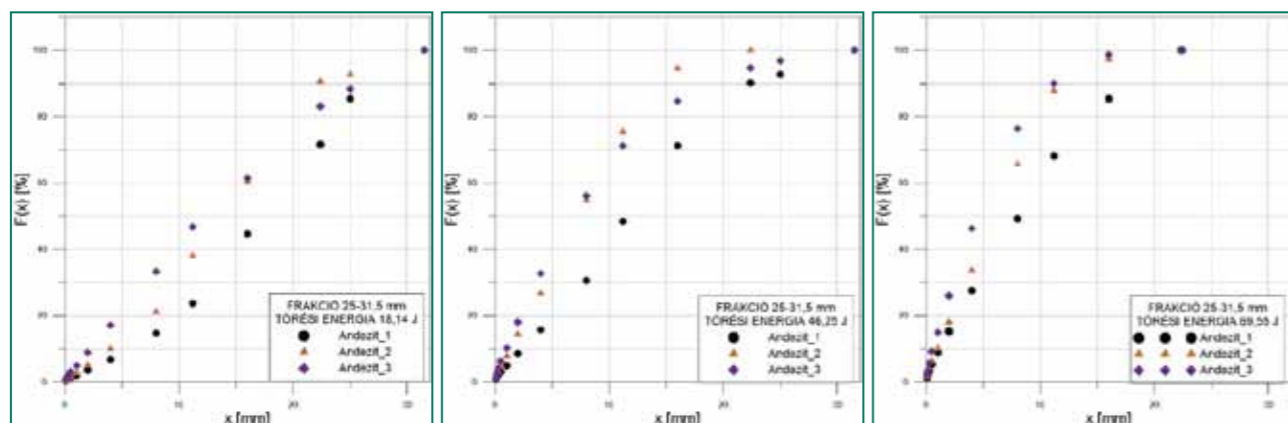
2. ábra: A három eltérő minőségű andezit minta



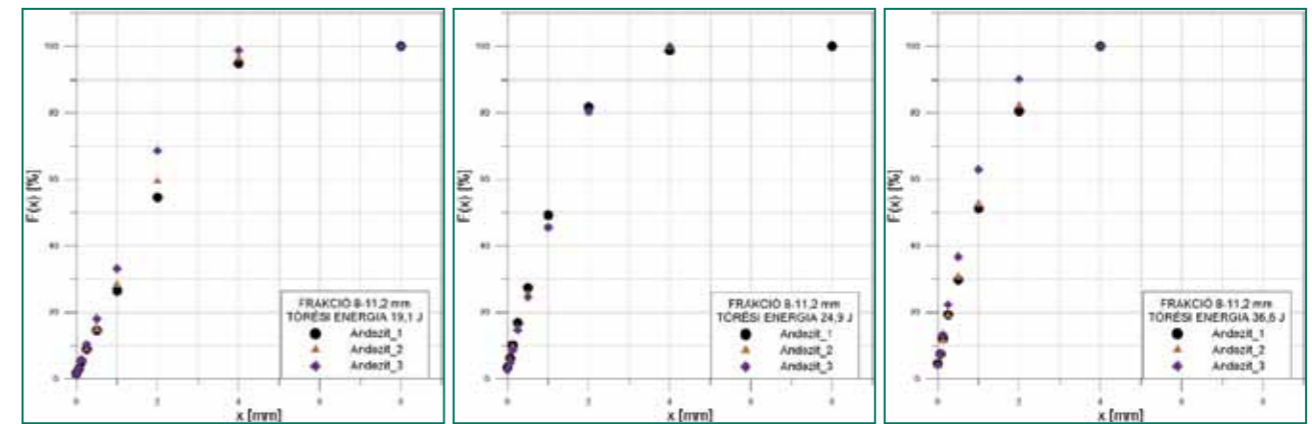
3. ábra: A minták jellemző szövete, vékonycsíszolaton készült optikai mikroszkópos felvételek



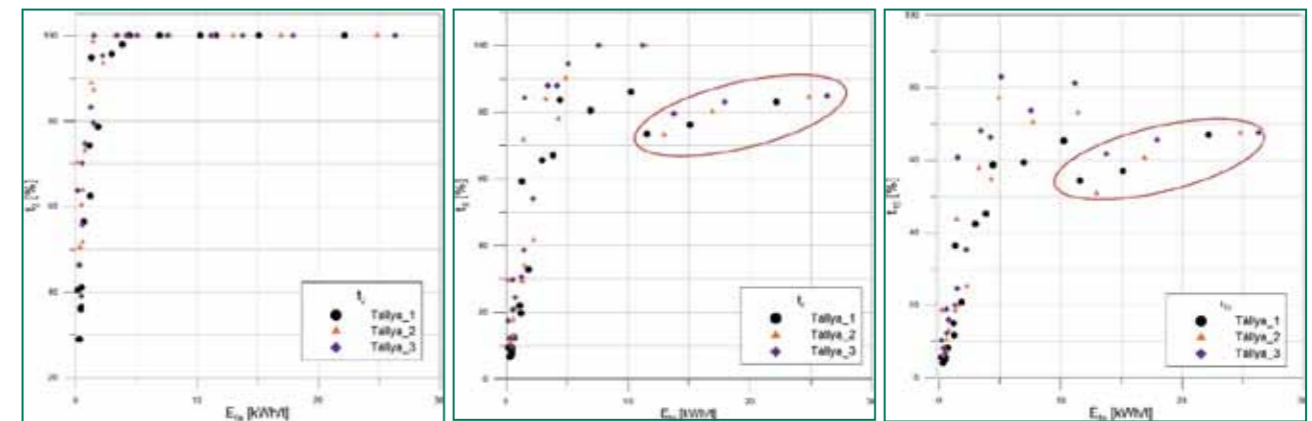
4. ábra: 56-63 mm-es frakció esősúlyos vizsgálat eredménye



5. ábra: 25-31,5 mm-es frakció esősúlyos vizsgálat eredménye



6. ábra: 8-11,2 mm-es frakció esősúlyos vizsgálat eredménye



7. ábra:  $t_2$ ,  $t_6$  és  $t_{10}$  görbék

Irodalomjegyzék

[1] Akbulut, H. Gürer, C., Cetin, S.: Use of volcanic aggregates in asphalt pavement mixes, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Transport 164 May 2011 Issue TR2, 111-123  
 [2] Valery, W., Jankovic, A.: The future of comminution, 34th IOC on Mining and Metallurgy, 30 Sept.-3 Oct.2002, Hotel "Jezero", Bor Lake, Serbia, 287-298  
 [3] Jeswiet, J., Szekeeres, A.: Energy consumption in mining comminution, 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Procedia CIRP 48 (2016), 140 - 145  
 [4] L.M. Tavares, R.P. King: Single-particle fracture under impact loading. Int. J. Miner. Process. 54, 1998, p. 1-28, doi: https://doi.org/10.1016/S0301-7516(98)00005-2  
 [5] Márkus, I.; Rácz, Á.; Mucsi, G., A nyersanyagelőkészítés területén alkalmazott egyszemcse törési vizsgálatok kritikai áttekintése, Bányászati És Kohászati Lapok-Bányászat Kőolaj És Földgáz 154 : 3 pp. 12-18. , 7 p. (2021)

# Új „SZOLIDBATCH”: az Ammann nyerő kombinációja

**Ferrini Marcio**

Igazgató  
AMMANN kereskedelmi  
marketing és speciális üzemek

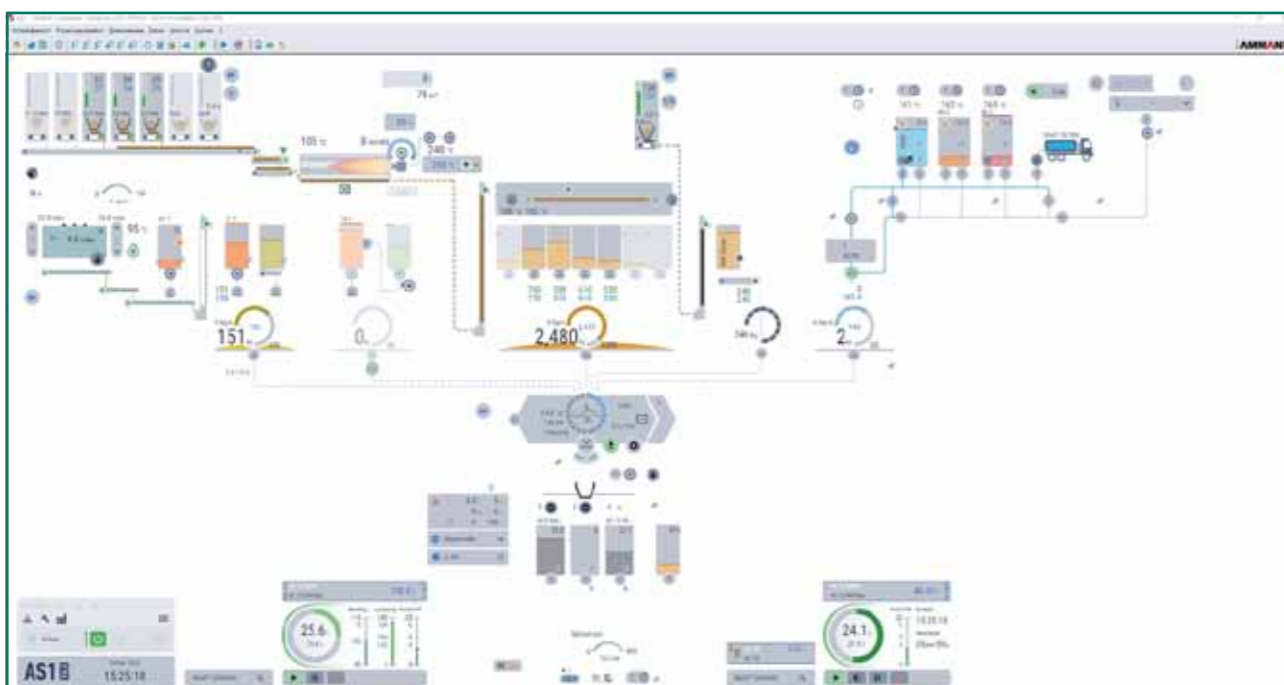


## A legjobb befektetési szint, garantált teljesítmény az AMMANN-tól.

Az Ammann jelenléte az aszfaltgyártó iparban több mint 150 éve tart, hosszú időszakot ölel fel, amelyet számos gazdasági és ebből következően technológiai változás jellemez. Ez több mint másfél évszázad, amely lehetővé tette Ammann értékeinek, fejlődési vágyának és állandó jövőorientált víziójának köszönhetően, hogy számtalan tapasztalatot gyűjtsön össze és gyarapítsa know-how-ját, mindig szinten tartva azt.

Az Ammann csapat globális víziójából és szakértelméből egy mindenki számára elérhető termék evolúciója újjászületik ma.

A Solidbatch egy nem folyamatos aszfaltgyár, amelyet a konkrétság, a teljesítmény és a praktikum ötvözésére terveztek, megőrizve azt a megbízhatóságot és minőséget, amely mindig is megkülönböztette az Ammann márkát.



Ez az üzemfejlesztés tökéletes egyensúlyt képvisel a kezdeti befektetésen és a termék értékén belül.

A Solidbatch praktikussága és konkrétsága abban mutatkozik meg, hogy képes kielégíteni a különböző gyártási igényeket, 100 t/h-tól kezdve, a 180 és 260 t/h-s modelleken keresztül, eléri a 340 t/h-t, ugyanazon a robusztusságon és konkrétságon át. Megtartva az egyszerű használatot és karbantartást.

A teljesítményt az újrahasznosító rendszer és a szárítási és szűrési folyamatnak köszönhetően optimalizált energiamegtakarítás kombinációja garantálja.

Az anyag és az alacsony befektetés olyan fogalmak lehetnek, amelyek általában egy szabványos termékhez kapcsolódnak. Nem ez a helyzet az ABC Solidbatch esetében, amely két különböző újrahasznosítási megoldás rugalmasságát mutatja be:

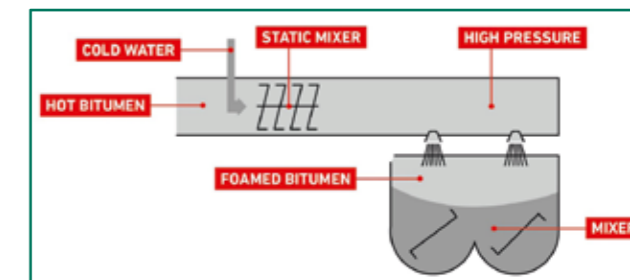
- Akár 15% meleg betáplálás a meleg elevátorba
- Akár 40% hideg betáplálás a keverőbe

Különösen a RAC hidegtáplálási technológia garantálja a funkcionális hozzáadott értéket. A RAP-ot közvetlenül a keverőben szárítják-melegítik, érintkezve a túlhevült aggregátumokkal, mindig a szitán keresztül lehet előállítani és mindig minimális mennyiségű RAP-t adagolni a műszaki előírásoknak megfelelően. Ezen túlmenően ez a rendszer megakadályozza, hogy a problémák keletkezzenek a keverőtornyba tapadt aszfalt miatt.

A hatékonyság fogalma kiterjed más alkatrészekre is, mint például a már említett rostasor és a készanyag tároló, amelyek az Unibatchéval megegyező jellegzetes kialakításúak.

Sok esetben a költséghatékony kezdeti ráfordítás lehet a legalkalmasabb megoldás a részben az üzem új technológiákkal történő jövőbeli megvalósítására szánt beruházás megtérülésére. Az Ammann erre a lehetőségre is gondolt az utólagos felszerelési lehetőségek széles választékával.

A számos fejlesztés közül az egyik a környezetvédelmi technológiák jelentős fejlesztése: az Ammann Foam rendszer.



A habosítási eljárás csökkenti a bitumen viszkozitását azáltal, hogy javítja annak diszpergált tulajdonságait, és számos előnnyel jár, mint például:

- Energiatakarékosság
- Alacsony CO2 és COV kibocsátás
- Jobb munkakörülmények
- A bitumen csökkent öregedése
- Magasabb keverőtelepi szárítási és újrahasznosítási teljesítmény
- Hosszabb szállítási idő lehetősége
- Magasabb tömörítési teljesítmény

Az Ammann Retrofits kínálatát más fontos megoldások is gazdagítják, mint például az as1 vezérlőrendszeren elérhető számos APP közül egy vagy több megvalósítása, technológiai fejlesztések, mint például az RAH60 dob és így tovább.

A Solidbatch a számos említett jellemzőnek köszönhetően, amelyek az evolúcióját jelzik, a piacon elérhető legjobb ilyen típusú rendszert képviseli, és ideális megoldás mindazok számára, akiknek minőségi keverékeket kell előállítaniuk, rövid időn belül és kedvező áron.



Végül, de nem utolsósorban, néhány szót az AMMANN Control System névről, az AS1-ről.



Az AS1 számítástechnikai környezetet nehéz környezetekben való használatra tervezték és tesztelték. Hálózati képességét is optimalizálták. Az ügyfelek profitálnak a rugalmas munkaállomás-konfigurációból, hálózatépítésből és adminisztrációból.



Számos APP elérhető, például az AS1 kiegészítő modulja, az EcoView bemutatja a nyers tényeket a keverőüzem energiahatékonyaságáról. Az energiafogyasztási adatokat folyamatosan rögzítjük, és a kezelő számára nagyon egyszerűen és áttekinthetően jelenítjük meg.



# Az OMV PmB RC kötőanyag viselkedésének értékelése különböző teszszakaszokon Ausztriában és Csehországban.

szerzők: **Dr. Ing. Markus Spiegl, OMV Downstream GmbH, Austria**  
**Ing. Siegfried Kammerer, OMV Downstream GmbH, Austria**

**Dr. Ing. Markus Spiegl**

Advisor Pricing & Business Development Black Products  
OMV Downstream GmbH,  
Austria



## Absztrakt

A cikk az OMV által kifejlesztett OMV Starfalt® PmB 45/80 RC aszfalt kötőanyag tulajdonságait tárgyalja, amelyet regenerált aszfaltkeverékek (RAP) újrahasznosítási céljaira kívánunk használni. A kötőanyagot különféle beállított tulajdonságok jellemzik, mint például nagyobb penetráció, magasabb gyűrűsgolyós lágylámpont, nagyobb rugalmas visszaalakulás (közel 95-100%), azzal a céllal, hogy kompenzálja a regenerált aszfaltban lévő előregedett kötőanyag tulajdonságait.

A Cseh Köztársaságban 2015-ben két próbaszakaszt építettek az SFDI (Állami Közúti Infrastrukturális Alap) által finanszírozott innovatív technológiák támogatására. Ezek a szakaszok 8 éven keresztül monitorozást végeztek a felhasznált kötőanyag tulajdonságainak egymást követő elemzésével.

A korábban leírt kötőanyagot Domašov és Lednice községek próbaszakaszainak építése során használták. Az első esetben egy kopórteleg keverék (ACO 11+) 15% regenerált aszfaltot tartalmazott, míg a második esetben egy kötórteleg keverék (ACL 22 S) 20% regenerált aszfaltot tartalmazott. Nyolc év szolgálat után egyetlen szakaszon sem észleltek meghibásodást vagy meghibásodást, ez a cikk a 2019-ben végzett kutatási munkákat mutatja be és frissíti a 2023-as legfrissebb eredményekkel.

Ezen túlmenően Ausztriában 2010-ben épített első, azonos anyagból készült próbaszakasz-építést is folyamatosan figyelték és elemezték a visszanyert bitumenes kötőanyagokat.

Ezen a szakaszon sem észleltek meghibásodást 13 év használat után.

## 1. Bemutakozás

Az újrahasznosítás és a környezetvédelem gondolata az elmúlt években egyre fontosabbá vált, így nem áll meg az aszfalt utakon és a felhasznált nyersanyagoknál. Ennek az anyagnak a fő előnye abban rejlik, hogy az aszfaltkeverék, amelyet normál útbitumennel, vagy polimerrel módosított bitumennel állítanak elő, 100%-ban újrafelhasználható. Ez a bitument és az aszfaltot „zászlóshajóvá” teszi a fenntarthatóság, az újrafelhasználhatóság és a körkörös gazdaság szempontjából.

Ausztriában a visszanyert aszfalt 100%-át újrahasznosítják, de kezdetben csak egy kis részét használták fel újra meleg keverékhez. Ez az arány az elmúlt évtizedben növekszik. 2010/11-ben az Asfinag (Ausztriai Autópálya- és Gyorsútfinanszírozási Részvénytársaság) újra előírta a regenerált aszfalt használatát autópálya-pályázataiban.

Az alap- és kötőanyagrétegekben 20%-os felhasználást követelték meg a projekt alapon. A 20%-os határ az ausztriai aszfaltkeverő üzemek akkori műszaki felszereltségén alapult. Legtöbbjük csak hideg hozzáadási lehetőséggel rendelkezett, de a helyzet megváltozott, és mára több üzemet is párhuzamos dobokkal vagy dobgyűrűvel szereltek fel.

Mivel kezdetben főként hideg adagolást használtak és alkalmaznak, a cél egy olyan termék kifejlesztése volt, amely ezeket a követelményeket és körülményeket támogatja. A cél az volt, hogy 20% hidegen vagy legfeljebb 40% forrón hozzáadott RAP-ot tartalmazó aszfaltkeverékeket állítsanak elő, amelyek végül legalább olyan jók, mint a 100% friss termékek keverékei.

A termékfejlesztés célja tehát egy erősen módosított polimer bitumen volt, amely alkalmas nagy forgalmú úthálózaton (pl. autópályák, gyorsforgalmi utak) újranelhasznált aszfalttal az alap- és kötőanyagrétegekben.

Ez a cikk Varaus et al. cikkének frissített változata. (České Budějovice, 2019) a 2015-ben Csehországban épített két tesztpályáról.

Ebben a cikkben a legfrissebb elemzési és kutatási eredményeket mutatjuk be, tárgyaljuk, és összehasonlítjuk a korábbi eredményekkel, valamint más országok tapasztalataival, amelyek a regenerált aszfaltot (RAP) az OMV Starfalt PmB 45/80 RC-vel kombinálva használták nagy forgalmú aszfalt utakon.

## 2. Termékfejlesztés

Az aszfaltkeverékek regenerált aszfalttal történő előállításához ennek megfelelően jó minőségű hozzáadott friss bitumenre van szükség. Ennek a terméknek kompenzálnia kell az újrahasznosított aszfaltkeverékből az előregedett és így megkeményedett bitumen rossz tulajdonságait.

Ausztriában még mindig sok aszfaltkeverő üzem van, amelyekben csak a RAP hidegadagoló technikája van. Továbbá Ausztriában még mindig bevett gyakorlat az összes aszfaltréteg egyidejű marása, és nagyon gyakran még mindig nagyon nagy eltérések mutatkoznak a RAP minőségében, a RAP kitermelés forrásától (útosztályától) függően. Ennek köszönhetően olyan bitumenes kötőanyag kifejlesztése volt a cél, amely ezeket a körülményeket figyelembe veszi. A termékfejlesztés alapötletével és elveivel kapcsolatos további információk Varaus et al. cikkeiben található. (České Budějovice, 2019) és Spiegl et al. (2019, Bled).

A 2.1. táblázat bemutatja a kifejlesztett OMV Starfalt® PmB 45/80 RC tulajdonságait azzal a céllal, hogy lehetővé

2.1 táblázat: Bitumenes kötőanyag tulajdonságai – OMV Starfalt® PmB 45/80 RC

Properties	Unit	Range of Values (typical values)
Penetration at 25°C	1/10 mm	45-80 (60-80)
Softening point ring and ball	°C	≥ 70 (70-80)
Fraass breaking point	°C	≤ -18
Elastic recovery before aging at 25 °C	%	≥ 80 (95-100)
Elastic recovery after RTFOT aging at 25 °C	%	≥ 70 (80-90)
Storage stability - difference in softening point	Δ°C	≤ 5,0
Force ductility at 5 °C	J/cm <sup>2</sup>	≥ 3 (5°C) (6,8)
PG exakt (DSR / BBR)	°C	80 -29
PG Superpave	°C	76 -24

tegye a RAP megnövelt adagolását az aszfaltkeverékekbe, autópálya- vagy nagy teherbírású utépítésekhez.

A magasabb fokú módosításnak köszönhetően ezt a terméket több mint 90-95%-os rugalmas visszaalakulás jellemzi. Ennek a nagy rugalmasságnak köszönhetően ez a termék elegendő tartalékkal rendelkezik ahhoz, hogy kompenzálja a RAP kötőanyagának „rossz” tulajdonságait. Például, ha rendelkezésre áll egy PmB-vel ellátott RAP, amelynek rugalmas tulajdonságai már korlátozottak – a rugalmas visszaalakulás 50% alatt van –, akkor ezek a tulajdonságok jelentősen javíthatók ezzel az új termékkel. Ezen túlmenően ennek a kötőanyagoknak a penetrációja a 60-80 (0,1 mm) tartományba esik, ezért nyilvánvalóan „puhább” kötőanyag, mint a szabványos PmB 45/80-65, 45-60 (0,1) penetrációs értékkel (mm). Ráadásul ezek az értékek messze meghaladják az atipikus RAP anyagok kötőanyag-penetrációját, ami körülbelül 10-25 (0,1 mm). Ennek a kötőanyagoknak a használata az alacsony hőmérsékletű tulajdonságokat is javítja a töréspont csökkenése miatt.

Az egyik cél az volt, hogy a RAP-ból származó előregedett kötőanyag keverékének és az új RC kötőanyagoknak a tulajdonságait a PmB 45/80-65 szabványos kötőanyag tulajdonságaival kezeljük, amelyet a cikk későbbi grafikonjaiban dokumentálunk.

## 3. Próba szakaszok

A következő fejezet az első Ausztriában és Csehországban zajló próbaszakaszokat ismerteti.

Néhány információ (lásd a 3.1. táblázatot) az építési területről (helyszín és aszfaltkeverék típusa), a RAP-tartalomról, a kötőanyag-tartalomról (friss, RAP-ból és összesen), a szabad hézag tartalomról és az út megjelenéséről több alkalommal is megadásra kerül néhány évi üzemelés után.

### 3.1. táblázat: Alapvető információk a különböző ausztriai és csehországi próbaszakaszokról

Project	Asphalt mixture	planned RAP content [%]	actual RAP content [%]	binder content [%]			Void content [%]
				fresh	RAP	total	
L384 – AT	AC 16	15	15	4,5	0,8	5,3	2,4
L384 – AT	AC 16	20	19	4,3	1,0	5,3	3,0
Domasov - CZ	ACO 11+	15	18	4,9	1,1	6,0	2,3
L384 – AT	AC 32	15	14	3,8	0,6	4,4	3,4
L384 – AT	AC 32	20	21	3,5	0,9	4,4	2,3
Lednice - CZ	AC 22	20	23	3,3	1,0	4,3	5,7

A próbaszakasz négy különböző típusú aszfaltkeveréket fed le, amelyek tervezett RAP-tartalma 15% vagy 20%.

A visszanyert aszfaltot mindig hidegen adagoljuk az aszfaltkeverő üzemben. A tényleges RAP-tartalom a kötőanyag-tartalom és a RAP-ból származtatott kötőanyag-tartalom teljes mennyiségéből számítható vissza. Minden projektnél az OMV Starfalt® PMB 45/80 RC friss kötőanyagot használnak.

#### 3.1 Építési terület Ausztriában – L384

2010 májusában a régi L 384 Lafnitzthal országutat teljes szélességében és mélységében kimarták.



1. ábra: Az út állapota L 384 Lafnitzthal több mint 13 év használat után.



Ezt követően két rétegben, 8 cm alaprég és 5 cm kopórég terítésével, 15%, illetve 20% RAP felhasználásával az útpálya rekonstrukciója megtörtént. Összesen mintegy 1300 tonna AC 16 (felületi réteg) vagy AC 32 (alaprég) aszfalt került 2 területre.

Több mint 13 év forgalmi időszak után sem észlelhető károsodás az úton (lásd 1. ábra), karbantartási intézkedések nem történtek, ami azt bizonyítja, hogy közép- és hosszú távon sem várható jelentősebb útviszonyok romlása.

#### 3.2 Építési terület Csehországban – Domasov út 602 és Lednice

Mindkét, 2015-ben épült tesztút egy Cseh Köztársaságban folyó kutatási projekt, és folyamatosan ellenőrzik. A Brünni Műszaki Egyetem részt vett az út rekonstrukció előtti elemzésében, valamint a keverék tervezésében. Később rendszeres időközönként magmintákat fűrtak, és megvizsgálták a visszanyert kötőanyagot. Varaus M. és más szerzők már publikáltak és kommentáltak az eredményeket 2017-ben és 2019-ben a České Budějovice-i Aszfaltkonferencián.

Domasovban 1,45 km hosszon egy 7 m széles út felületi rétege (4 cm), 18% RAP felhasználásával (16 (1/10 mm) penetráció és 71 °C lágyulásponti hőmérséklet). Az előállított ACO 11+ felületi réteg összes kötőanyag-tartalma kb. 6,0%, friss kötőanyag tartalma 4,9%. A fent említett PMB-ből összesen 45,5 tonna fogyott 10.150 m<sup>2</sup> területen.

Lednicében 600 m hosszon és 6 m szélességben eltávolították a meglévő út kötőanyagát (6 cm vastagság). A felújított terület 3800 m<sup>2</sup> lett. Az újrahasonosított aszfalt aránya 23% volt, és hidegen adagoltuk az aszfaltkeverőbe. A friss bitumen (OMV Starfalt® PMB 45/80 RC) részaránya 3,3%, a teljes részarány 4,3%. A kötőanyagréteg 5,7%-os szabad hézag tartalommal burkolt, ami a szabad hézag tartalom felső tartományába esik.

Mindkét út közel 8 évnyi forgalom után is kiváló állapotban van. Károsodás nem észlelhető, karbantartási intézkedésekre eddig nem volt szükség.

A 2. ábra a domasovói, a 3. ábra pedig a lednicei utat mutatja.



2. ábra: Az út állapota 4 (balra) és közel 8 (jobb) év használat után Domasov községben (II/602).



3. ábra: Az út állapota 4 (balra) és közel 8 (jobb) év használat után Lednice községben.

Az ausztriai és csehországi kísérletek mellett 2016-ban egy további tesztút épült Szlovéniában. Zvonko Cotič úr a Structum cégtől 2019-ben mutatta be („Regenerált aszfalt felhordása a szemetes rétegben az AC Brezovica – Vrhnika tesztterületen” címmel) a 17. Kollokviumon Bledben. Hasonló eredményeket mutattak be, a minőséget megerősítették, és megfelelő megoldásként javasolták a jövőre nézve.

#### 4. Teszt eredmények és értelmezés

Ez a fejezet a korábbi évek néhány kötőanyag-teszt eredményeit és azok értelmezését, valamint a 2023-as legfrissebb elemzéseket tartalmazza. További vizsgálati eredmények a 2019-es české budějovicei és bledi konferenciák fent említett cikkeiben találhatóak.

A kötőanyag-vizsgálatok középpontjában a reológiai teszt (DSR) áll, mivel ezek alkalmasabbak a kötőanyag teljesítményének megfelelő leírására.

Ezenkívül empirikus tesztek végeztek, mint például a penetráció és lágyuláspont, valamint a BBR tesztek, hogy képet kapjanak az alacsony hőmérsékletű teljesítményről.

Ebben a cikkben a Cseh Köztársaságban végzett két próbaszakasz eredményeire összpontosítunk.

### Bitumenvizsgálati eredmények Domasov és Lednice esetében:

A 4. ábrán látható, hogy a penetráció nem változik jelentősen az idő múlásával. Idővel bizonyos eltérések mutatkoznak, de nincs nyilvánvaló tendencia a további keményedésre.

A 5. ábrán látható, hogy a gyűrűs-golyós lágyuláspont nem változik jelentősen az idő múlásával. Idővel bizonyos eltérések mutatkoznak, de nincs nyilvánvaló tendencia a további merevedésre.

A 6. ábra a hajlítósugaras reométeres tesztből (BBR) számított kritikus hőmérsékletet mutatja a meghatározott hajlítási merevségi modulus értékénél,  $S = 300$  MPa.

Az egyes bírálati időpontokban elért eredmények ismét közel állnak egymáshoz.

Megfigyelhetjük, hogy mindkét sávnál enyhén csökken az érték. Domasovban már 44 hónap után, de azóta nincs változás és  $-19^{\circ}\text{C}$ -kal még mindig kiváló szinten.

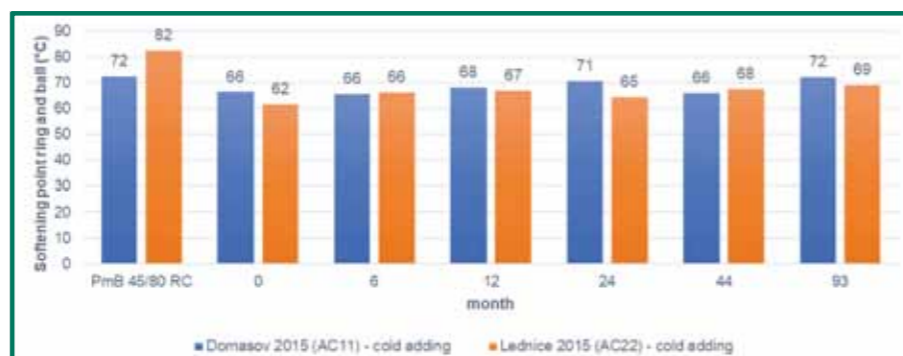
Lednicében az érték az elmúlt 4 évben  $-18,3^{\circ}\text{C}$ -ra csökkent, ami még mindig kiváló érték a kötőanyag réteg szempontjából. Jelenleg nem számítunk alacsony hőmérsékletű meghibásodásra a következő években.

A 2023-as felülvizsgálati szakaszban nagyobb figyelmet kapott a Domasov AC 11 kopóréteg. A kutatócsoport úgy döntött, hogy közelebből megvizsgálja a réteg felső 2 cm-ét („felfel”), valamint a réteg alsó 2 cm-ét („alacsony”), hogy ellenőrizze, van-e szignifikáns eltérés az értékek között.

Az eredmények a 7. ábrán láthatók.



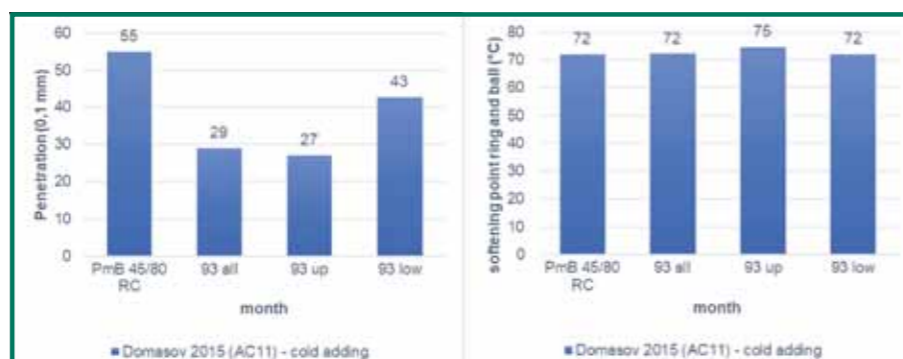
4. ábra: A friss PmB 45/80 RC és a visszanyert kötőanyag penetrációja 0, 6, 12, 24, 44 és 93 hónap után.



5. ábra: A friss PmB 45/80 RC lágyuláspontja, valamint a visszanyert kötőanyag 0, 6, 12, 24, 44 és 93 hónap után.



6. ábra: Kritikus hőmérséklet  $S = 300$  MPa hajlítási merevséggel 0, 6, 12, 24, 44 és 93 hónap után



7. ábra: Athatolás, lágyulási pont gyűrű és golyó, rugalmas visszanyerés és kritikus hőmérséklet (BBR) 93 hónap után a teljes vastagságban, a felső 2 cm és az alsó 2 cm

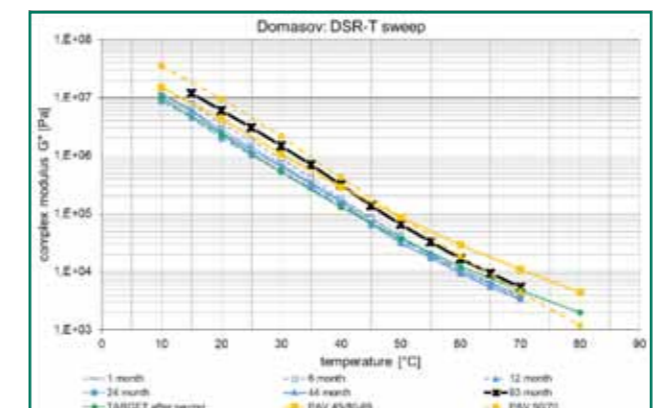
Megfigyelhető, hogy az értékekben egyértelmű különbség van. Ahogy az várható volt, a felületi réteg felső 2 cm-es része keményebb (alacsonyabb tollérték), merevebb és a rugalmas visszaalakulás alacsonyabb, de még mindig jó szinten. Valamint az is megfigyelhető, hogy az öregedés elsősorban a felső 2 cm-be jelentkezik.

Az alsó 2 cm értékei továbbra is nagyon jónak tűnnek, és közel állnak egy rövid ideig érlelt PmB 45/80-65 értékéhez. Ugyanez a jelenség figyelhető meg az alacsony hőmérsékletű viselkedésnél is, vagyis az alsó 2 cm teljesítménye jobb a felsőhöz képest, amit az öregedési induktorok, mint a forgalom, a fény, az oxigén és a radikálok okoznak.

A 8a és b ábra az ACO 11+ DSR értékeit mutatja Domasovban. Az első 44 hónap minden vizsgálati eredménye (kék) még mindig közel van a célgörbéhez a burkolás után (zöld vonal), és nem láthatók jelentős változások az idő múlásával.

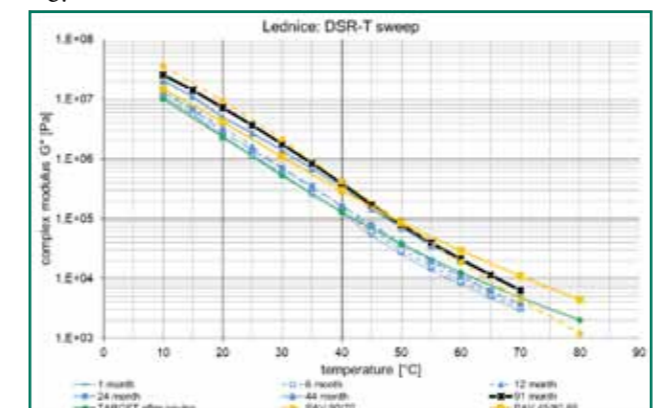
Az elmúlt 4 évben kisebb merevedés figyelhető meg (lásd a fekete vonalat a kereszttel). Ugyanez érvényes a fázisszögre is. Az első 44 hónap görbéi követik a célgörbe alakját.

Az elmúlt 4 évben megfigyelhető, hogy a görbék alakja kissé megváltozik az előregedett burkolatminőség



8a és b ábra: A RAP reológiai tulajdonságai DSR (komplex nyírási modulus  $G^*$  (balra) és fázisszög (jobbra)), tiszta PmB 45/80 RC és céltermék Domasov számára.

A 9a és b ábra a lednicei tesztpálya DSR eredményeit mutatja. Az eredmények értelmezése hasonlít Domasovhoz. Ugyanazt a trendet, hasonló értékeket és hasonló viselkedést mutat.



9a és b ábra: A RAP reológiai tulajdonságai DSR (komplex nyírási modulus  $G^*$  (balra) és fázisszög (jobbra)), tiszta PmB 45/80 RC és céltermék a Lednice számára.

bitumen irányába, de még mindig csak kisebb és a tipikus s-alakú görbe látható, ami jól mutatja, hogy a A PmB tulajdonságai kiválóak és még mindig aktívak.

A már említett tesztpályák mellett 2019-ben egy 40%-os RAP-t használtak egy AC 22-ben. Négy év nagy forgalmú használat után az út továbbra is kiváló állapotban van.

A 10. ábra az elmúlt 4 év folyamatosan monitorozott kínálatát mutatja, összehasonlítva Lednice és Domasov azonos korú eredményeivel.

Látható, hogy a penetrációs szintek hasonlóak 43/44 hónap után. A 40% RAP-ot tartalmazó aszfaltkeverék lágyuláspontja valamivel magasabb, amit a magasabb RAP tartalom vezérel.

A közel 60%-os rugalmas visszaalakulás továbbra is jó, és a kezdetek óta nem változott jelentősen. Az alacsonyabb érték háttérben a magas RAP tartalom áll, illetve valószínűleg az a tény, hogy a RAP kötőanyagának nem, vagy nagyon alacsony volt a rugalmas visszanyerése, de ezt rendkívül jól kompenzálta a kiváló minőségű PmB RC.

A BBR vizsgálatokból levezetett kritikus repedési hőmérséklet hasonló szintet mutat a 40% RAP és 20% RAP tartalmú aszfaltkeverékek között.

Property	test method	PE-Steele	recovered binder	recovered binder	recovered binder	recovered binder	recovered binder	recovered binder	recovered binder
		date	RA 40 10/2019	RA 40 04/2020 6 month	RA 40 10/2020 12 month	RA 40 10/2021 24 month	RA 40 05/2023 43 month	Lednice RA20 44 month	Domasov RA20 44 month
Penetration at 25°C	EN 1426	1/10 mm	31	29	30	25	32	29	39
Softening point ring and ball	EN 1427	°C	69,2	68,8	70,4	69,6	70,1	67,5	66,0
el. Recovery	EN 13398	%	61	62	65	62	56		
property at low temperature (BBR) EN 14771 after recovery of binder									
Temperature at 300 Mpa		°C	-20,8	-21,0	-20,6	-19,5	-19,2	-21,7	-19,0
Temperature at m = 0,3		°C	-20,5	-20,6	-19,9	-17,3	-17,6	-21,4	-15,1
Critical temperature difference (ΔTc) [MPa-0,3m]		°C	-0,3	-0,4	-0,7	-2,2	-1,6	-0,3	-3,9

10. ábra: A 40%-os RAP-val végzett kísérlet vizsgálati eredménye összehasonlítva az azonos korú Lednicében és Domasovban végzett kísérlettel.

Végül a DSR és BBR mérésekből származó szuperpave teljesítmény-besorolást kiszámították és összehasonlították a céltermék OMV Starfalt® PmB 45/80-65 értékeivel. A megcélzott termék értéke PG 76 -22.

Az első érték a teljesítmény osztályozása magas hőmérsékletre, a második érték pedig alacsony hőmérsékletre. Az OMV Starfalt® PmB 45/80 RC friss kötőanyag PG besorolása 76-28.

A Domasov-tól származó AC 11 visszanyert kötőanyagának értékei 93 hónapos használat után megegyeznek a céltermékével, nevezetesen a PG 76 -22-vel.

A lednicei AC 25 visszanyert kötőanyagának értéke PG 82 -22, ami azt jelenti, hogy a felső PG érték magasabb, ami nagyobb tartós deformációval szembeni ellenállást jelent.

## 5. Következtetések és kitekintések

A jelen tanulmányban bemutatott összes vizsgálati eredmény bizonyítja a kifejlesztett OMV Starfalt®PmB 45/80 RC kiváló tulajdonságait.

Karbantartási intézkedést eddig egyik tesztpálya sem igényelt. A visszanyert bitumen tulajdonságai alig változtak az idők során, és még mindig szinte ugyanazok, mint a beépítés napján.

Az L384 és más építkezések igen ígéretes eredményeinek köszönhetően ez a termék és ez a kialakítás már a legkorszerűbb építési technika Ausztriában (RAP-tartalom: akár 25% hidegadagolásnál és akár 40% meleg hozzáadás).

A csehországi próbaszakaszok eredményei is igazolják a termék minőségét, ennek köszönhető, hogy 2015 óta további építkezések valósultak meg.

Következő lépésként a csehországi kísérleti szakasz visszanyert kötőanyagát tovább elemzik a Bécsi Műszaki Egyetem Christian Doppler Laboratóriumában, a Bitumenes anyagok kémiai-mechanikai elemzésére, hogy jobban megértsék a bitumen öregedési folyamatát, amely később a továbbfejlesztett öregedésállósággal rendelkező további termékfejlesztés vagy egy új, még jobb teljesítményű PmB RC alapja.

## Szakirodalom:

- Spiegel M. and Kammerer S.: Forschungsprojekt Ausbauasphalt – L384 Laßnitzthal, GESTRATA Journal 132, GESTRATA, Wien, 2011
- Kammerer S.: Influence of high modified PmB on the properties of asphalt with RAP, ZAS 14th Colloquium Asphalt, Bitumen and Pavements, Bled, 2013
- Spiegel M., Kammerer S., Varaus M., Koudelka T. and Dašek O.: Evaluation of the behavior of RC Binder on the trial section in Czech Republic - VYHODNOCENÍ CHOVÁNÍ RC POJIVA NA POKUSNÝCH ÚSECÍCH V ČESKÉ REPUBLIC, Conference Asphalt Pavements, České Budějovice, 2019
- Spiegel M., Kammerer S., and Flatscher St.: Asphalt recycling – Experience with OMV Starfalt®PmB 45/80 RC in Austria and Czech Republic, 17th Colloquium: Asphalt, Bitumen and Pavements, Bled, Slovenia, 2019
- Spiegel M., Kammerer S. and Varaus M.: UPDATE CONCERNING THE STUDY OF THE BEHAVIOUR OF RC BINDER ON TRIAL SECTIONS IN THE CZECH REPUBLIC - VYHODNOCENÍ CHOVÁNÍ RC POJIVA NA POKUSNÝCH ÚSECÍCH V ČESKÉ REPUBLIC, Conference Asphalt Pavements, České Budějovice, 2019

# Bitumenbarát, fenntartható adalékanyag javítja a nyomvályúsodási ellenállást

Dr Deepak Madan<sup>1</sup>,  
Ranjeet Sandhu<sup>2</sup>,  
Angela Staudinger<sup>2</sup>  
and Dr. Krishna Srinivasan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sripath Technologies LLC, Mahwah, New Jersey, USA  
<sup>2</sup> Sripath Innovations LTD, Croydon, UK

## Absztrakt

A polimerrel módosított bitumen (PMB) alapú aszfaltkeverékeket gyakran használják nagy forgalomnak és terhelésnek kitett utak burkolására. A hagyományos polimereken alapuló PMB-k gyártása általában nagy nyíróképességű malmok alkalmazását, valamint magasabb gyártási és bedolgozási hőmérsékletet igényel.

Az elmúlt hét évben egy új bitumenbarát polimer-adalékanyagot ("PGXpand"), használtak az utakon a világ több országában, amely enyhíti a hagyományos polimerekhez kapcsolódó gyártási és bedolgozási nehézségeket. A PGXpand a hagyományos elasztomer vagy plasztomer polimerekkel ellentétben nagyon egyedi módon lép kölcsönhatásba a bitumennel, ami jobb teljesítményű és költséghatékonyabb PMB Mixet eredményez.

A PGXpand nagyon hatékonyan adagolható. Könnyedén keveredik a bitumenbe alacsony energiájú malmokkal, rövidebb keverési idővel és alacsonyabb keverési hőmérséklettel, és kiváló tárolási stabilitással rendelkező PMB-ket hoz létre. Csökkenti vagy fenntartja a bitumen viszkozitását, javítja a PMB-keverékek bedolgozhatóságát, csökkenti a burkolat hőmérsékletét és megkönnyíti a keverék terítését és tömörítését. A PGXpand növeli a bitumen magas hőmérsékleti teljesítményét anélkül, hogy befolyásolná az alacsony hőmérsékletű tulajdonságokat.

Megcélzott időjárási és forgalmi viszonyok között a kívánt burkolati teljesítményt és tartósságot tudja biztosítani, ami kiemelkedő nyomószilárdságot, jó kifáradási tulajdonságokat és hosszú távú tartósságot eredményez.

Ez a cikk a PGXpand legfontosabb jellemzőit mutatja be; hatása a bitumen és a keverék tulajdonságaira; bizonyítja, hogy képes a kívánt burkolati teljesítményt nyújtani; és esettanulmányokat mutat be a világ minden tájáról.

Példák a PGXpand alkalmazási területeire:

- forró PMB aszfaltkeverékek,
- hibrid PMB-k,
- nagy merevségű keverékek,
- meleg permetezés,
- PMB emulziók és kátyújavító keverékek.

## Kulcsszavak

Bitumenbarát polimer-adalékanyag, javítja a nyomvályúsodással szembeni ellenállást, PGXpand, polimerrel módosított bitumen (PMB)

## 1. Bevezetés

A polimerrel módosított bitumen (PMB) rutinszerűen használatos a nagy forgalmi viszonyoknak kitett utak kiváló teljesítményének biztosítására. A PMB Mixek javított magas hőmérsékleti teljesítménnyel, valamint jobb nyomvályúsodással és sérüléstűrővel biztosítják az út minőségét.

A hagyományos polimereken alapuló PMB-ket jellemzően nehéz előállítani, térhálóító szereket igényelnek, tárolási stabilitásuk gyenge, és jelentős energiát fogyasztanak.

Az ilyen, hagyományos PMB-keverékeket nehéz lehet tömöríteni és teríteni, és meleg keverék-adalékanyagok használatára lehet szükség.



## Bitumenbarát polimer-adalékanyag (PGXpand)

Az elmúlt években kifejlesztettek egy új bitumenbarát polimer-adalékot (PGXpand), amely enyhíti a hagyományos polimerekkel kapcsolatos feldolgozási és burkolási nehézségeket, és világszerte használják az utakon [1-3]. A PGXpand a hagyományos elasztomer vagy plasztomer polimerekkel ellentétben nagyon egyedi módon lép kölcsönhatásba a bitumennel, ami jobb teljesítményű és költséghatékonyabb PMB Mixet eredményez.


Az 1. ábra a PGXpand, egy egyedülálló bitumenbarát polimer főbb jellemzőit foglalja össze. A PGXpand egy új, közepes molekulatömegű bitumenbarát polimer adalék, amelyet kifejezetten személyre szabott architektúrával és kémiával terveztek.

A PGXpand egy rendkívül hatékony adagolási adalék, amely körülbelül 150°C-on megolvad a bitumenben, és alacsony energiájú keverőkkel és rövid keverési idővel könnyen beépíthető a kötőanyagba. A PMB-kben kiváló tárolási stabilitást mutat. A világ minden tájáról származó bitumenes kötőanyag széles választékával kompatibilis.

A PGXpand kiküszöböli vagy csökkenti az olyan nyersanyagok iránti igényt, mint a térhálósító adalékok, a meleg keverék adalékok és a hagyományos polimerek. Hozzájárul az alacsonyabb energiafogyasztáshoz, csökkenti a keverékgyártási, szállítási és burkolási költségeket, valamint környezetbarát.

A PGXpand növeli a bitumen magas hőmérsékleti teljesítményét anélkül, hogy befolyásolná az alacsony hőmérsékletű tulajdonságokat. Megcélzott időjárás és forgalmi viszonyok között a kívánt teljesítménnyel és tartóssággal biztosítja az utakat. Javítja a PMB-keverékek bedolgozhatóságát, javítja a keverék belső kenőképességét, és csökkenti a burkolat hőmérsékletét, így a keverék könnyebben teríthető és tömöríthető.

A PGXpand kiemelkedő nyomvályúsodási ellenállást, jó kifáradási tulajdonságokat és hosszú távú tartósságot biztosít.

Excellent Performance	PGXpand®	Plant Friendly
<ul style="list-style-type: none"> <li>Boosts High Temperature Performance.</li> <li>Retains Low Temperature Properties.</li> <li>Improves Softening Point &amp; Paving Grade.</li> <li>Lowers or Maintains Viscosity.</li> <li>Improves Workability.</li> <li>Makes Mix Easier to Compact.</li> <li>Outstanding Rutting Resistance.</li> <li>Excellent Fatigue Properties.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Melts &amp; Mixes Rapidly into Bitumen.</li> <li>Requires Low Shear Mixing.</li> <li>Exhibits Excellent Storage Stability</li> <li>Easy to Incorporate into Mix Plant.</li> <li><b>Helps Reduce Mix Cost</b></li> <li>Exhibits Superior Dosage Efficiency</li> <li>Lowers Paving Temperature</li> <li>Lowers Energy Consumption.</li> <li>Lowers Overall Cost.</li> </ul>

1. ábra: A PGXpand főbb jellemzői burkolási alkalmazásokhoz

## A PGXpand értékelése helyi anyagok felhasználásával a helyi szabványok szerint

A PGXpand-ot a világ minden tájáról származó tudományos, ipari és közlekedési ügynökségek vezető szakértői tesztelték, értékelték és ellenőrizték. 2016 óta megbízható és hatékonyan használják az utakon szerte a világon. Az értékelési folyamat során a kötőanyagokat, adalékanyagokat és egyéb aszfalt-adalékanyagokat minden egyes földrajzi régióból helyi forrásból szerezték be.

A tanulmányban használt PGXpand a Sripath Technologies-től származik [1]. Az ebben a cikkben hivatkozott hagyományos polimer adalékanyagokat, például gumiőrleményt, plasztomereket és elasztomereket helyben szerezték be. Az ebben a cikkben bemutatott adatokhoz az adott földrajzi régióra vonatkozó vizsgálati módszereket és szabványokat alkalmaztuk.

## Hatás a tulajdonságokra

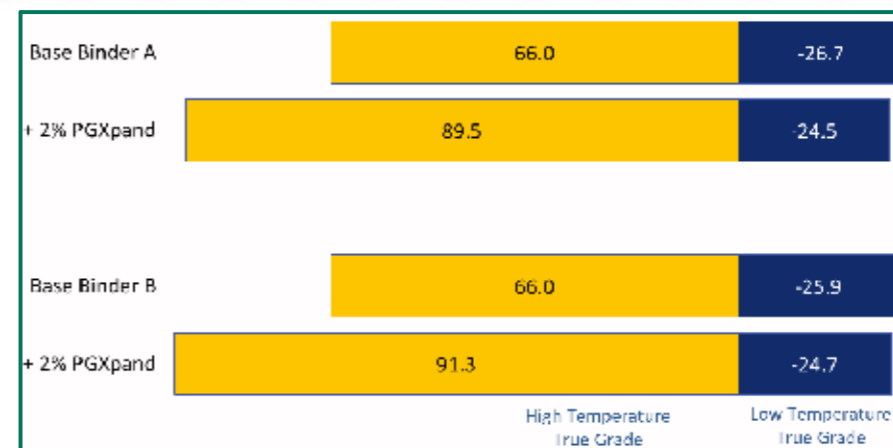
A PGXpand bitumenhez való hozzáadása javítja annak magas hőmérsékletű tulajdonságait, miközben megtartja alacsony hőmérsékletű tulajdonságait. Javítja a kötőanyag nedvesíthetőségét és fenntartja vagy csökkenti a viszkozitását. A PGXpand alapú PMB kiváló tárolási stabilitást mutat. Az ilyen PMB-k jobb megmunkálhatósággal rendelkeznek, és könnyebben teríthetők és tömöríthetők.

Kiemelkedő nyomvályúsodással, jó kifáradási tulajdonságokkal és hosszú távú tartóssággal rendelkező utakat biztosít.

## Javítja a magas hőmérsékletű tulajdonságokat

A 2. ábrán látható, hogy egy kis 2%-os PGXpand hozzáadása az A bázis kötőanyag magas hőmérsékletű valódi minőségét 66,0-ról 89,5 °C-ra, a B bázis kötőanyagét pedig 66,0-ról 91,3 °C-ra növelte.

Ugyanakkor nagyon csekély hatással volt mindkét kötőanyag alacsony hőmérsékletű valódi minőségére.



2. ábra: A PGXpand javítja a bitumen magas hőmérsékletű tulajdonságait

Az 1. táblázat felvázolja az 1,5%-ról 3%-ra változó PGXpand-tartalom hatását az USA-ból származó, kereskedelmi forgalomban kapható PG 64-22 bitumen tulajdonságaira. A PGXpand hozzáadása az alap kötőanyag lágyulási pontját 48 °C-ról 120 °C fölé emelte 2%-os PGXpand adagolással. A penetrációs értékek 67 mm-ről körülbelül 40 mm-re csökkentek.

## Javítja a kötőanyag nedvesíthetőségét

A PGXpand javítja a kötőanyag nedvesíthetőségét, lehetővé téve annak hatékonyabb bevonását és tapadását az adalékanyag részecskéihez.

A 3. ábrán látható kötőanyag 15% gumiőrleményt (CR) tartalmaz, PGXpand nélkül nem nedvesíti megfelelően az adalékanyagokat. A 2% PGXpand-ot és CR-t nem tartalmazó kötőanyag, valamint az 1% PGXpand-ot és 10% CR-t tartalmazó kötőanyag egyaránt fokozott bevonási és tapadási képességet mutat az aggregátum részecskékhöz.



3. ábra: A PGXpand javítja a kötőanyag nedvesíthetőségét.

1. táblázat: A PMB-alapú forró keverék tulajdonságai USA Bitumen PG 64-22 + PGXpand; a vonatkozó ASTM szabványok szerint

With PGXpand	Softening Point °C	Penetration dmm	True Grade °C	Viscosity @ 163°C cps
Base Binder	48	67	66.8 –26.1	450
1.5%	98	45	85.3 –25.1	402
2%	122	40	95.0 –25.0	384
3%	123	39	95.0 –25.0	370

## Csökkenti vagy fenntartja a viszkozitást

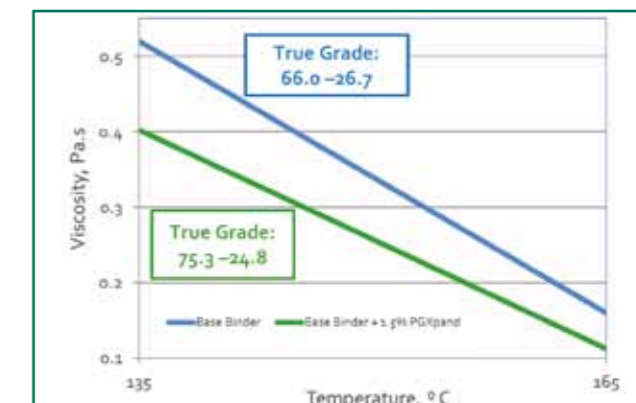
A 4. ábra az alapbitumen (USA Grade 64-22) és az 1,5%-os PGXpanddal módosított alapbitumen viszkozitási profilját hasonlítja össze.

A PGXpand hozzáadása 5-10 %-kal csökkenti a kötőanyag viszkozitását a teljes gyártási és tömörítési hőmérséklet-tartományban, miközben javítja a magas hőmérsékletű minőségi tulajdonságokat.

Amint az 1. táblázatban látható, a viszkozitás a 64-22

fokozatú kötőanyag 450 cps-ről 384 cps-re csökkent, ha a kötőanyaghoz 2% PGXpand-ot adunk.

A 2. táblázat azt mutatja, hogy a PGXpand hozzáadása egy C170 Australian kötőanyaghoz a viszkozitást körülbelül 0,11 Pa.s értéken tartja 165 °C-on.



4. ábra: Viskozitási profil az USA Base Bitumen vs. Binder + PGXpand esetén

## Javítja a világ minden tájáról származó bitumen- és aszfaltkeverékek teljesítményét

Az ausztráliai Melbourne-i Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT) értékelt a PGXpand hatását egy ausztrál C170 bitumen tulajdonságaira [4,5].

A kötőanyag és a keverék szintjének tulajdonságait AC14 minőségű keveréken értékeltük. Mindkét eredményt a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat: A PGXpanddal adagolt Australian Bitumen C170 tulajdonságai AC14 aszfaltkeverék, az ausztráliai RMIT-en értékelve

Properties	Test Method	Units	% PGXpand Addition				
			1.2	1.5	2.0	2.5	3.0
Viscosity at 165 °C	AS/NZS2341.4	Pa.s	0.11	0.11	0.12	0.11	0.12
Softening Point	AGPT/T131	°C	74	107	111	115	117
Stress Ratio at 10 °C	AGPT/T125	-	0.99	1.02	1.05	1.02	1.03
Stiffness at 25 °C	AGPT/T121	kPa	35	40	48	56	64
Separation of PMB	ASTM D7173	°C	1.1	0.8	0.2	1.1	1.5
Elastic Recovery at 25 °C	ASTM D6084	%	22.0	19.0	13.5	13.0	11.0
Hamburg Wet Wheel Tracking Rut Depth @ 50 °C, 20K cycles	AASHTO T324	mm	4.88	4.62	3.57	2.70	2.18

3. táblázat: Lab PMB tulajdonságai: Indian Bitumen VG30 + 1,5% PGXpand Labor aszfalt keverék: 5,4% kötőanyag, 3,84% szabad hézag, 12 mm szemmagyság. Értékelve az IIT Bombayben, Mumbai.

Properties of VG30 + 1.5% PGXpand	Test Method	Units	Value
Viscosity at 150 °C	ASTM D4402	mPa.s	244.4
Softening Point	IS 1205	°C	89.7
Penetration	IS 1203	dmm	20
Separation of PMB	IRC SP 53:2010-A3	°C	0.90
Elastic Recovery at 25 °C	IRC SP 53:2010-A2	%	20.67
Hamburg Wet Wheel Tracking Rut Depth @ 50 °C, 20K cycles	AASHTO 324	mm	5.69
CT Index Ideal-CT @ 25 °C, 50 mm/min	ASTM D8225-2019	-	74

4. táblázat: A CRMB60 és a Plant PMB tulajdonságai, az IIT Bombay, Mumbai értékelése

	Plant PMB: Indian VG30 + PGXpand	Units	1.5 % PGXpand	Control CRMB60
	Plant Mix: 5.2% Binder			
PMB	Viscosity at 150 °C	mPa.s	241.7	-
	Softening Point	°C	82.9	-
	Penetration	dmm	33	-
Mix Properties	Hamburg Dry Wheel Rut Depth @ 60 °C, 20K cycles	mm	4.39	20*
	Tensile Strength Ratio (TSR) @ 25 °C	-	102	98
	Resilient Modulus, 1 Hz, 35°C	MPa	4439	1559

5. táblázat: PMB, SRT, Dél-Afrika értékelte

	50/70 Bitumen + PGXpand	Units	1.5% PGXpand	2.0% PGXpand	Spec.
Before RTFO	Penetration @ 25°C	dmm	34	25	
	Softening Point	°C	95.3	107.3	63 – 73
	Dynamic Viscosity @ 165°C	Pa.s	0.108	0.102	0.55 max
	Storage Stability @ 180°C	°C	3.0	2.0	5 max
After RTFO	Mass Change (Loss/Gain)	%	0.117	0.043	1.0 max
	Softening Point (R&B)	°C	93.8	108.8	61 min

A PGXpand tipikus 1,5-2,5%-os adagolási szintje kiváló tulajdonságokat biztosított. A lágyuláspont körülbelül 110 °C-ra, a merevség körülbelül 50 kPa-ra nőtt, miközben a viszkozitás alacsony szinten, körülbelül 0,1 Pa.s-on maradt 165 °C-on tesztelve. A Hamburg Wet Wheel Tracking által mért nyomvályú mélysége 50 °C-on 4 mm körül volt 20 000 ciklus után.

Az 50 °C-on tesztelt nyomvályú mélység 5,7 mm, az ideális CT-index 74 volt 25 °C-os teszt hőmérsékleten. Egy indiai bitumenminőségű VG30 alapú PMB-t 1,5% PGXpanddal értékeltek az Indian Institute of Technology Bombay-ban, Mumbai, India (IIT Bombay) [6]. A keverékszint tulajdonságait 5,4% kötőanyagot, 3,84% szabad hézagot tartalmazó keveréken és 12 mm-es névleges méretű adalékanyag alapján értékelték.

A tulajdonságokat a 3. táblázat foglalja össze.

Az 1,5% PGXpand-ot tartalmazó PMB kiváló tulajdonságokkal rendelkezik - 244 mPa.s viszkozitást 150 °C-on, 90 °C-os lágyuláspontot, 20 mm-es penetrációt és 0,9 °C-os PMB elválasztást. A nyomvályú a Hamburg Wet Wheel szerint 5,69 mm.

A nagyforgalmú utak burkolására használt PMB és Mix üzemet is értékelte az IIT Bombay. A kontroll egy CRMB60 indiai kötőanyag volt, amely 14% gumimorzsa tartalmazott. A próbakeverék 1,5% PGXpanddal adagolt indiai VG-30 bitumenből állt. Egy BC-II növényi eredetű, 5,2% kötőanyagot tartalmazó keveréket értékeltünk. A PGXpand adagolt keverék kiváló tulajdonságokat eredményezett a kontroll CRMB60 alapú keverékhez képest, 4,39 mm-es keréknyommélységgel, 102 TSR értékkel és 4439 MPa rugalmassági modulussal.

A dél-afrikai 50/70 bitumen 1,5% és 2,0% PGXpand alapú PMB-t a Specialized Road Technologies, Westmead, Dél-Afrika (SRT) értékelte.

Amint az 5. táblázatban látható, az 1,5% PGXpanddal adagolt PMB penetrációja 34 mm, lágyuláspontja 95,3 °C, dinamikus viszkozitása 0,108 Pa.s 165 °C-on, és tárolási stabilitása 3 °C teszt hőmérsékleten, 180°C.

#### Kiváló stabilitási és elválasztási tulajdonságokat mutat

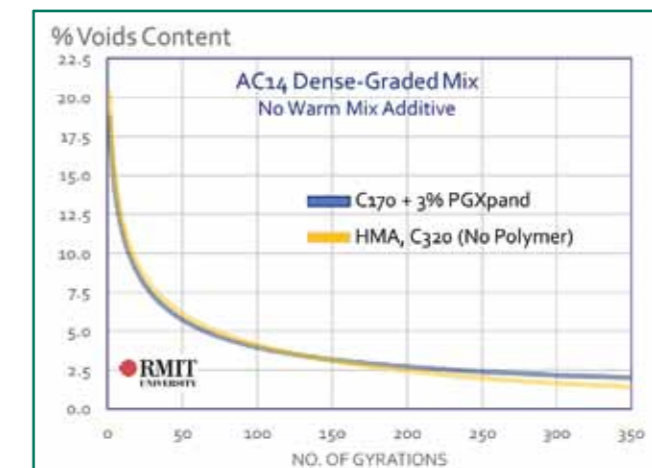
A PGXpand alapú PMB kiváló tárolási stabilitást mutatott. Az 1,5% PGXpand-ot tartalmazó bitumenmintákat szivarcsőben tartottuk 165 °C-on 72 órán keresztül. A szivarcső felső és alsó részének G\*/Sinδ értékét 3 különböző hőmérsékleten mértük. A felső és alsó mérések közötti eltérés 5% alatti volt.

Más tulajdonságok, mint például a lágyulási pont, a penetráció és a fázisszög hasonló kis eltéréseket mutattak, bizonyítva a PGXpand kiemelkedő tárolási stabilitását.

Ezenkívül, amint a 2. táblázatban látható, egy ausztrál C170 bitumen PMB-ben való elválasztása, amelyet 1,2-3% PGXpanddal adagoltak, nagyon stabil volt, értéke 0,2 és 1,5 °C között mozog. ASTM D7173 vizsgálati módszerrel mérve.

#### Javítja a keverék bedolgozhatóságát és tömöríthetőségét

A PGXpand még alacsony adagolási szinteknél is csökkenti a bitumen viszkozitását és javítja a keverék belső kenési tulajdonságait, ami javítja az ilyen PMB-keverékek bedolgozhatóságát. A PGXpand csökkenti a terítési hőmérsékletet, és sokkal könnyebbé teszi a keverék terítését és tömörítését. Az 5. ábra egy C170 ausztrál kötőanyag és 3% PGXpand-on alapuló ausztrál AC14 keverék tömöríthetőségi görbéit hasonlítja össze egy standard Hot Mix Asphalt (HMA) görbéjével, amely C320 ausztrál bitumenből készült, polimer hozzáadása nélkül. A két görbe szinte azonos, ami azt mutatja, hogy a PGXpand egyedülállóan képes javítani a Mix megmunkálhatóságát és elősegíteni a tömörítést. Meg kell jegyezni, hogy a PGXpand alapú keverékekben a bitumen lágyulási pontja 110 °C felett van, szemben a standard HMA 50 °C körüli lágyulási pontjával.



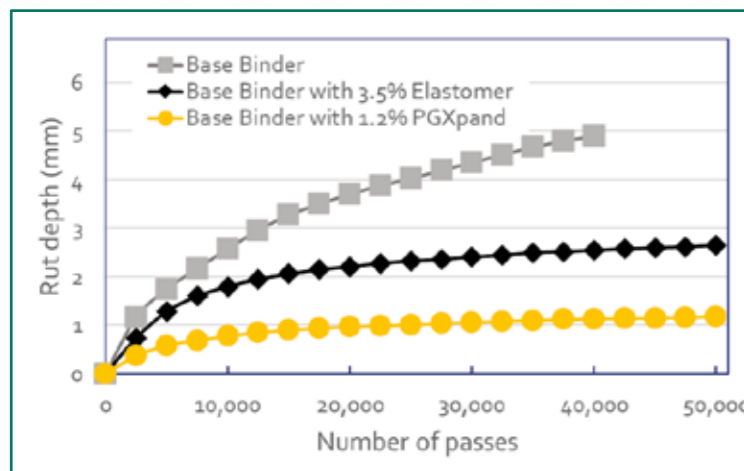
5. ábra: A tömöríthetőségi görbék összehasonlítása az ausztrál bitumen alapján  
(a) C170 bitumen + PGXpand vs. (b) forró keverék C320 bitumen alapú polimer nélkül

#### Kiváló csúszásellenállást biztosít

A PGXpand csúszásellenállási teljesítményéről az Indiai Technológiai Intézet (IIT Madras, Chennai, India) végzett egy mélyreható tanulmányt, amelyet a 6. ábra foglal össze.

A 6. ábra a 60 °C-on hamburgi kerékkövetési teszttel mért nyomkövetési ellenállást hasonlítja össze három, indiai VG30 bitumenminőségű keveréknek: az alapköötőanyaggal készült keverék; 3,5% hagyományos elasztomer polimerből készült keverék; és 1,2% PGXpanddal adagolt keverék [7].

A bitumen lágyuláspontja mindkét PMB-keverékben 75 °C körül volt. A PGXpanddal készült PMB Mix sokkal jobb surlódási ellenállással rendelkezik. Amint a 6. táblázatban látható, a PGXpand a surlódási ellenállás bármely mértékét tekintve következetesen jobb surlódási ellenállást mutatott, mint a hagyományos elasztomer polimer.



6. ábra: Az indiai bitumen VG30 alapú keverékek sűrűlódási ellenállásának összehasonlítása

### Alapkötőanyag vs. 3,5% elasztomer polimer vs. 1,25% PGXpand

#### Jó fáradási tulajdonságokat biztosít

Amellett, hogy kiváló magas hőmérsékleti teljesítményt és csúszósűrűlódást biztosítanak, a PGXpanddal készült PMB keverékek az alacsony rugalmas visszanyerési értékek ellenére a hagyományos elasztomer PMB keverékekhez hasonló kifáradási teljesítményt mutattak.

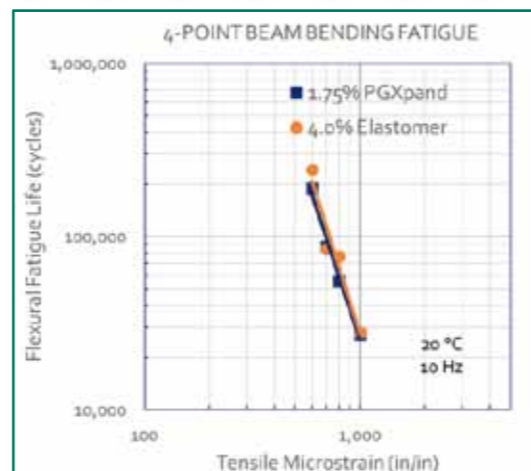
Két PMB-keverék 4-pontos hajlító kifáradási teljesítményét a 7. ábra hasonlítja össze. Az 1,75% PGXpand-ot tartalmazó PMB-keverék görbéje majdnem megegyezik a 4% hagyományos elasztomer polimer tartalmazó keverék görbéjével.

A hajlító kifáradási vizsgálatot 20 °C-on, 10 Hz-es terhelés mellett PG 64-22 kötőanyag-minőséggel végezték nagy teljesítményű hídburkolati keverékhez New Jersey-ben, USA-ban.

Mind a PGXpand, mind a hagyományos elasztomer PMB magas hőmérsékletű, 75°C-os valódi minőséggel rendelkezett.

6. táblázat: Különböző vizsgálati módszerekkel mért sűrűlódási ellenállás

Mixture	TR (mm/cycle)	WTR (mm/cycle)	Pi @ 20K (%)	WTS <sub>air</sub> (mm/10 <sup>3</sup> cycle)
Indian Binder (VG30)	0.6	0.4	0.7	0.18
VG30 + 3.5% SBS	0.4	0.3	0.3	0.09
VG30 + 1.2% PGXpand	0.2	0.1	0.1	0.03



7. ábra: Fáradási vizsgálat 4 pontos hajlításterheléssel @ 20 C, 10 Hz

USA Bitumen PG 64-22, 4% elasztomer PMB vs. 1,75% PGXpand

### Hatás az üzemi működésre és környezetre

A PGXpand könnyen beépíthető egy PMB üzembe [8], és segít csökkenteni a költségeket és a szénlábnymot.

#### Könnyen beépíthető az üzemi körülmények között

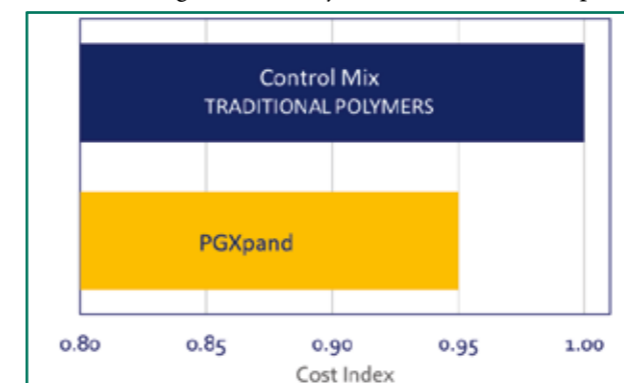
A PGXpand hozzáadása a bitumenhez endoterm folyamat, így a kötőanyagot a teljes keverési folyamat alatt melegíteni kell a kívánt hőmérséklet fenntartásához. 150-163°C keverési hőmérsékleten a PGXpand könnyen beleolvad a bitumenbe, ami folyadék-folyadék keveredést eredményez. A homogenizált keverék könnyen előállítható alacsony nyíróerejű keverőkkel, minimális recirkulációval és gyors keverési időkkel.

A PGXpand csökkentheti a bitumen viszkozitását, kiváló polimerrel módosított bitument hozva létre, amely kiváló tárolási stabilitással rendelkezik.

Összességében a PGXpand alapú PMB-k alacsonyabb energiát fogyasztanak, és csökkentik a költségeket.

### Segít csökkenteni a keverési költséget

A hagyományos elasztomerek két vagy több részét jellemzően ki lehet cserélni a PGXpand egy részével, hogy hasonló úttesti teljesítményt érjünk el. Továbbá a PGXpand használata csökkenti vagy kiküszöböli a térhálósító szerek vagy a meleg keverék adalékok szükségességét. A csökkentett nyersanyagigény a keverékköltség általános megtakarítását eredményezi, amint azt a 8. ábrán látható PGXpand keverék költségindexe mutatja a Control Mix-hez képest.



8. ábra: A PGXpand csökkenti a burkolatkeverék összköltségét

#### Környezetbarát adalékanyag

A PGXpand segít csökkenteni a PMB gyártásához szükséges energiát. Nagyon hatékony az adagolásban, és kis mennyiség is biztosítja a kívánt eredményt.

Alacsonyabb üvegházhatású gázok kibocsátását eredményezi az előállítás, a szállítás és a felhasználás során, és alacsonyabb hőmérsékleten lehet teríteni és tömöríteni, ami további energiamegtakarítást eredményez. Ezenkívül rendkívül tartós utakat biztosít, ami ritkább úttartást és cserét eredményez.

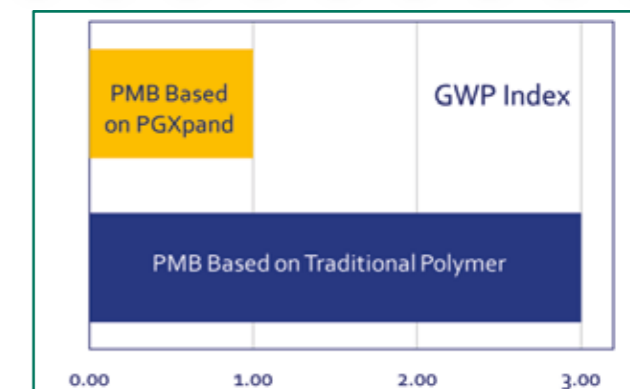
Összességében a PGXpand hozzájárul az energiafogyasztás csökkentéséhez, költségmegtakarításhoz, a környezeti fenntarthatóság előmozdításához és kiemelkedő közúti teljesítményhez. Amint a 9. ábrán látható, a PGXpand alapú PMB-k egyharmadát teszik ki a szén-dioxid-kibocsátási értékek, mint a hagyományos PMB-k.

PGXpand, egy bitumenbarát polimer adalék

- Csökkenti a PMB előállításához felhasznált energia mennyiségét.
- Csökkenti a hőmérsékletet és az energiát, és tömöríti és tömöríti.
- Rendkívül hatékony adagolási adalékanyag.
- Csökkenti az üvegházhatású gázok kibocsátását a PMB és keverékek előállításához, szállításához és felhasználásához.
- Jobb úttartást, kevésbé gyakori úttartást és összességében alacsonyabb energiafogyasztást biztosít.



10. ábra: PGXpand módosított bitumen alapú keverékkel épített autópályák



### A PGXpand főbb alkalmazásai

A PGXpanddal módosított bitument számos burkolat- és útjavítási alkalmazáshoz használják, beleértve: melegkeverékes burkolatot, hibrid polimerrel módosított bitumen, nagy merevségű aszfaltkeverékeket (HiSAM), forró permetezésű felületi zárások alkalmazásokat, valamint útjavító és -karbantartási alkalmazásokat [9].

#### Hot-mix burkolati alkalmazások

A PGXpand felhasználásával előállított polimerrel módosított bitumen (PMB) 2017 óta használják a nyomvályúsodás-ellenállóság javítására és a kívánt úttestteljesítmény biztosítására a nagy forgalmú utakon világszerte. Az ilyen PMB-eket könnyű előállítani, csökkentik a költségeket, könnyebben burkolhatók és tömöríthetők [10].

Gyorsforgalmi út Andhra Pradesh-ben, Indiában:

A PGXpand-ot kopóréteg építésére használták az indiai Andhra Pradesh-ben, az SH-2 nagy forgalmú állami autópálya 2 km-es szakaszán [11]. Körülbelül 1,5% PGXpandot kevertek össze egy indiai bitumen VG-30-zal, ami hasonló vagy jobb tulajdonságokat eredményezett, mint a 3,5% hagyományos elasztomer polimer alapú keveréké. A PGXpand alapú keverék körülbelül 70°C-os lágyulási pontot, 41 mm-es penetrációt és kiváló minőséget eredményezett.

Agra-Gwalior Highway Indiában:

A PGXpand-ot sikeresen használták a nyomvályúsodási teljesítmény javítására az indiai Agra-Gwalior autópálya 4 km-es szakaszán [12]. Körülbelül 1,5% PGXpand-ot adtak egy indiai VG30 minőségű bitumenhez. A PMB-alapú keveréket 30 mm vastag kopóréteg építésére használták az Agra-Gwalior autópálya 4 km-es szakaszán, körülbelül 40 km-re Gwaliortól.

## Hibrid polimerrel módosított bitumen alkalmazások

A PGXpand hagyományos elasztomer polimerekkel vagy gumiőrleménnyel kombinálva használható hibrid PMB készítmények széles skálájának létrehozására.

Az ilyen hibrid PMB-k lehetővé teszik a PGXpand® számos előnyének beépítését egy hagyományos elasztomer PMB-be, megkönnyítve azok előállítását és használatát, valamint jobb úttesti teljesítményt és tartósságot biztosítanak.

Amint a 7. táblázatban látható, a PGXpand hozzáadható egy PMB-hez, amelyet úgy hoztak létre, hogy az USA-ból származó PG 64-22 kötőanyagot 2,5% hagyományos elasztomer polimerrel adagolják. 1,5-3,0% PGXpand hozzáadása egy ilyen PMB-hez növelte a lágyuláspontot, javította a magas PG-minőséget, csökkentette a penetrációt, és körülbelül 7-10%-kal csökkentette a viszkozitást.

Fontos megjegyezni, hogy a PGXpand hozzáadása nem rontja a bitumen alacsony hőmérsékletű tulajdonságait.

7. táblázat: Hibrid polimerrel módosított USA Bitumen (PG 64-22) + 2,5% SBS + PGXpand

With PGXpand	Softening Point (°C)	Penetration (dmm)	True Grade (°C)	Viscosity @ 163°C (cps)
Base Binder + 2.5% SBS	66	74	73.1 –29.0	450
1.5%	105	47	85.6 –28.4	402
2%	125	42	95.0 –28.1	384
3%	124	38	95.0 –28.0	370

8. táblázat: Hibrid polimerrel módosított bitumen Ausztrál C320 bitumen + gumiőrlemény + PGXpand

Blend	CR %	PGXpand %	Anti-Strip, %	Viscosity Profile vs. Temperatures, Pa.s					Softening Point, °C
				160°C	170°C	180°C	190°C	200°C	
Control	15	-	0.5	0.74	0.57	0.45	0.42	0.42	61.7
#1	-	1.0	0.5	0.19	0.11	0.07	0.06	0.05	73.8
#2	-	1.5	0.5	0.18	0.11	0.09	0.06	0.05	109.6
#3	-	2.0	0.5	0.20	0.13	0.09	0.07	0.06	111.7
#4	5	1.0	0.5	0.35	0.27	0.22	0.20	0.19	100.2
#5	10	1.0	0.5	0.56	0.44	0.35	0.33	0.30	102.2

A PGXpand gumiőrleménnyel kombinálva is hozzáadható hibrid PMB létrehozásához. 1-2% PGXpand® hozzáadása egy ausztrál C320 kötőanyaghoz, amely legfeljebb 15% gumiőrleményt tartalmaz, csökkenti a viszkozitási profilgörbét és javítja a hibrid PMB-k lágyulási pontját, amint azt a 8. táblázat mutatja.

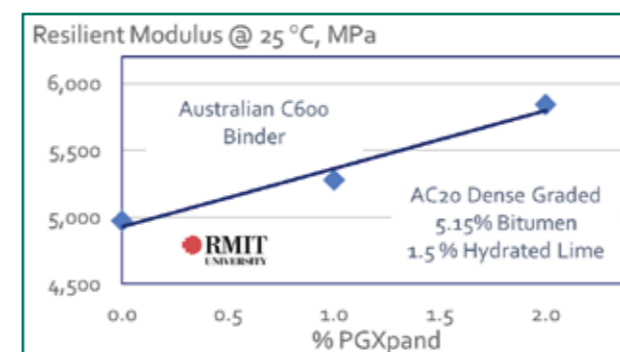
## Nagy merevségű aszfaltkeverékek (HiSAM) alkalmazások

A jelenleg elérhető nagy merevségű keverékek, mint például az EME technológián alapulóak, meglehetősen drágák, és magas hőmérsékleten kell teríteni, többszörös tömörítést igényelnek az aszfaltreteg terítésekor, nehézkes a gyártás és nem könnyű terepen használni őket.

A PGXpand (HiSAM) alapú nagy merevségű aszfaltkeverékek életképes alternatív megoldást jelentenek. A HiSAM keverékek könnyen gyárthatók és használhatók, alacsonyabb hőmérsékleten teszik lehetővé az aszfalt terítést, és környezetbarátabbak. A technológia lehetővé teszi a hézagtartalom csökkentését, az alaprég vastagságának csökkentését, a nedvességállóság javítását, valamint egy vagy több réteg tömörítését.

9. táblázat: Az IIT Bombay által tesztelt PGXpand módosított bitumen rugalmassági modulusa. Üzemi PMB: VG30 + 1,5% PGXpand; Vezérlés: CRMB60

Asphalt Mix: 5.2% Binder, BC-II, 13.2 NMAS	Units	VG30 + 1.5% PGXpand	Control CRMB60
Resilient Modulus, 1 Hz, 35°C	MPa	4439	1559



11. ábra: A PGXpand változó szintjének hatása a rugalmassági modulusra

Az ausztrál C600 bitumenhez 0%, 1% és 2% PGXpanddal adagolt PMB-ekből készült keverékek rugalmassági modulusát értékelték. AC20 keveréket vizsgáltunk, 5,15 % teljes bitumentartalommal és 1,5 % méshidráttal.

A 11. ábrán látható módon a PGXpand hozzáadása a rugalmassági modulusát a C600 kötőanyag 4971 MPa értékéről 5840 MPa értékre javította a 2%-os PGXpand alapú PMB keveréknél.

Hasonlóképpen, ahogy a 9. táblázatban látható, egy 1,5% PGXpanddal adagolt VG30 indiai kötőanyag felhasználásával készült PMB-n alapuló keverék rugalmassági modulusa 4439 MPa, szemben a CRMB60 kontroll kötőanyag alapú keverék 1559 MPa értékével egy próbaszkaszon Indiában, egy autópályán.

## Meleg szórásos felületi zárások alkalmazása

A PGXpand-ot meleg permetezéses felületi zárások alkalmazásokban is használják, ez a technológia Ausztráliában, Új-Zélandon és Dél-Afrikában széles körben használatos. A PGXpand könnyen beépíthető a bitumenbe, önmagában, gumiőrleménnyel vagy hagyományos elasztomer polimerekkel együtt. Az ilyen PGXpand alapú PMB-k alacsonyabb viszkozitásúak, könnyen permetezhetők alacsonyabb hőmérsékleten, csökkentik az energiafogyasztást, csökkentik a szénlábnyomot, jobb közúti teljesítményt eredményeznek, és potenciálisan hozzájárulnak a költségek csökkentéséhez.

Hot-Spray Seal Trial Roadway, Victoria, Ausztrália: A 12. ábrán látható módon egy forró permetezésű felületi zárás kísérletet végeztek egy nagy forgalmú helyi út

egy 1 sávós kilométeres szakaszán Victoria államban, Ausztráliában. A kísérletet a Victoria államban közösen végezte a Közlekedési és Tervezési Tanszék, Sprayline Road Services, RMIT Egyetem és Sripath Asia-Pac Pty Ltd. A záráshoz egy hibrid polimerrel módosított bitument használtak, amely egy ausztrál C170 bitumenből állt, 18 rész gumiőrleménnyel (CR) és 1% PGXpanddal adagolva. Két réteg lett felhordva az úttestre. Az első réteg egy „C170 bitumen + 18 rész CR” PMB permetezéséből állt, majd ezt követte a 14 mm-es aggregátum szórása. A második réteg a „C170 bitumen + 18% rész + 1% PGXpand” PMB szórása, majd a 7 mm-es adalékanyag szórásából állt.



12. ábra: Hot Spray Seal próba PGXpand + CR PMB használatával

Az ausztráliai Victoria városában lévő Roadway-n végezték

## Javítási és karbantartási alkalmazások

A PGXpand-ot különféle útjavítási és -karbantartási projektekhez használják, például emulziós alkalmazásokhoz és nagy teljesítményű kátyújavító keverékekhez.

Emulziós alkalmazások: A PGXpand könnyen beépíthető a bitumenbe, így PGXpand módosított emulziót hozhatunk létre. Az ilyen emulziók könnyen emulgeálhatók hagyományos emulgeálási technológiával, és felvihetők az útfelületre normál alkalmazási technikák, berendezések és gyakorlatok alkalmazásával.

A PGXpand-ot különféle útjavítási és -karbantartási projektekhez használják, például emulziós alkalmazásokhoz és nagy teljesítményű kátyújavító keverékekhez.

**Emulziós alkalmazások:** A PGXpand könnyen beépíthető a bitumenbe, így PGXpand módosított emulziót hozhatunk létre. Az ilyen emulziók könnyen emulgeálhatók hagyományos emulgeálási technológiával, és felvihetők az útfelületre normál alkalmazási technikák, berendezések és gyakorlatok alkalmazásával.

A PGXpand alapú emulziókat slurry seal, chip seal, scrub seal, fog seal, és microsurfing alkalmazásokhoz használják. A PGXpand elősegíti a gyors áttörést, ami tapadásmentes, nyomkövető útfelületet eredményez, amely gyorsan megnyitható a forgalom előtt.

A legfontosabb előnyök közé tartozik a kisebb üveg-házhatású gázok kibocsátása, a jobb emulzióstabilitás a szállítás során, a kiemelkedő nyomvályú ellenállás és a tartós, ritkábban karbantartást igénylő utak.

**Kátyújavító keverékek:** A használatra kész kátyújavító aszfaltkeverékek, amelyek PGXpand-ot tartalmaznak, alkalmasak a kátyúk javítására minden időjárási körülmény között, még nedves állapotban is. Az ilyen PMB-keverékeket meleg keverékként gyártják, de csomagolják, tárolják és hideg keverékként használják. Ezek a keverékek könnyen használhatók és tartósak.

## Elismerés

A szerzők elismerik és köszönetet mondanak a világ minden tájáról érkező ügyfelekből, leányvállalatokból, ügynökökből, tanácsadókból és műszaki szakértőkből álló hálózatuknak; aki műszaki útmutatást adott, és tesztadatokat és esettanulmányokat osztott meg a bitumenbarát polimer-adalékanyag felhasználásával készült PMB-k használatával kapcsolatban használják.

## Irodalom

- [1] Sripath Technologies Website, <http://www.sripath.com>, last accessed 2023/05/20.
- [2] "PGXpand": A Technical Overview – A Bitumen-Friendly Polymeric-Additive for Paving and Roofing Applications", Sripath Technologies, <https://sripath.com/resources/documents/>, last accessed 2023/05/20.
- [3] Srinivasan, K., Raju, S., & Madan, D., "An Effective Bitumen-Friendly Polymer for Superior Roadway Performance & Durability"; Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2024, D Singh et al (eds.), Transportation Research, Lecture Notes in Civil Engineering 434, pp. 87-98, Proceeding of the TPMDC 2022 International Conference, held at IIT Bombay, Mumbai, India in Dec 2022.
- [4] Giustozzi, F., Project Report on PGXpand by Royal Melbourne Institute of Technology, Melbourne, Australia, for Sripath Asia-Pac Pty. Ltd., (2022).
- [5] Hamid, T., "Sripath PGXpand, a Specially-Engineered Innovative Polymer, Vetted and Evaluated by RMIT", In: Roads & Infrastructure, (2022).
- [6] Singh, D., Suchismita A, Krishna V, "Performance Evaluation of PGXpand", Progress Report by Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai, India for Bitpath Pvt. Ltd., (2022).
- [7] Project Report "Characterization of Rutting Performance of Bituminous Mixtures with PGXpand" by Indian Institute of Technology Madras, Chennai for Bitpath Pvt. Ltd. (2021).
- [8] "PGXpand" Guidelines for Blending the Polymer into Bitumen", Sripath Technologies, <https://sripath.com/resources/documents/>, last accessed 2023/05/20.
- [9] "PGXpand: A Specially-Engineered Innovative Polymer", In: World Highways, last accessed 2023/05/20, <https://www.worldhighways.com/products/pgxpandr-specially-engineered-innovative-polymer>, (Mar 2022).
- [10] "Bitumen's Best Friend – Sripath's PGXpand", In: Roads & Infrastructure, pp. 31-32 (Nov 2022).
- [11] Madan, D., "PGXpand Makes Way for PMB in India's Highway Mixes", In: AsphaltPro, pp. 22-23, (May 2021).
- [12] "Sripath PGXpand Used to Reduce Rutting in India", In: AsphaltPro pp. 34, (Aug 2022).

## Következtetések

A PGXpand, a bitumenbarát polimer adalék, kifejezetten úgy lett megtervezve, hogy nagyon egyedi és innovatív módon kölcsönhatásba lépjen a bitumennel, lehetővé téve a termék kiváló közúti teljesítményt és tartósságot. A polimer javítja a bitumen olyan kulcsfontosságú tulajdonságait, mint a lágyuláspont, a penetráció és a valóban kiváló minőség. Csökkenti vagy fenntartja a PMB-keverékek viszkozitását, javítja a bedolgozhatóságot és megkönnyíti a keverékek tömörítését.

Ez az egyedülálló polimer kiváló nyomvályúsodási ellenállást, kifáradási tulajdonságokat és hosszú távú tartósságot biztosít az utakon. A PGXpand-ot a világ minden tájáról származó tudományos, ipari és közlekedési ügynökségek vezető szakértői tesztelték, értékelték és ellenőrizték. 2017 óta megbízható és hatékonyan használják az utakon szerte a világon.

A szerzők a jövőben azt tervezik, hogy folytatják a PGXpand teljesítményének és alkalmazásának értékelését és jelentését a PMB-keverékekben a világ közutakon.

# Újrahasznosított aszfalt használata hideg felületi zárásokban (DSK)

## Kurt Birngruber

Prokurist  
Vialit Asphalt GmbH&Co. KG



## 1. Bemutkozás

Szinte minden ország úthálózata súlyosan károsodott. Emiatt alacsony költséggel történő építési módok nagyon szükségesek a meglévő úthálózat működőképes állapotban tartásához.

Ha ezt figyelmen kívül hagyjuk, elkerülhetetlen a jelentős romlás, ami óriási gazdasági károkat okozhat.

Az aszfalt újrahasznosítás az elmúlt években egyre fontosabbá vált a fenntarthatósági szempontok előtérbe kerülésének köszönhetően.

Az újrahasznosított aszfalt (RA) használata jelentős előnyökkel jár, mint például a természetes környezet megőrzése, erőforrások, energiamegtakarítás és az ezzel járó építési költségek csökkenése.

Az aszfalt a leggyakrabban használt építőanyag az utak burkolatának megerősítésére.

Ez a regenerált aszfalt jó minőségű rendelkezésre állását is eredményezi, amely a speciális feldolgozásának köszönhetően építőanyaggá változik vissza. Ez az új építőanyag melegen és hidegen is többször újrahasznosítható. A régi aszfalt feldolgozása gazdaságos elengedhetetlen a természeti erőforrások megőrzése érdekében.

## 2. Útkárok és azok okai

A repedések a leggyakoribb sérülések útjainkon, gyakran felületi repedések formájában.

Az ilyen repedések kialakulásának a következő okai vannak:

- A felépítmény alsó rétegeinek nem megfelelő teherbíró képessége
- Hibás vagy túlfáradt felületi réteg és/vagy alapréteg
- Nem megfelelő rétegtökés
- Fagyállóság hiánya a felépítményben
- A kötőanyag megkeményedése (öregedés miatti ridegség) az alap- és felületi rétegben

Miután az aszfaltréteg szerkezetét meggyengítette egy repedés, menetrendszerűen fokozatos tönkremenetel veszi a kezdetét.

A behatoló esővíz károsítja az alsó, nem kötött alaprétegeket, telítetté válnak és télen hatalmas károk keletkeznek, amelyek során a kötött rétegek is károsodnak a fagyás-olvadás hatás miatt.

A következmények kezdetben a teherbíró képesség csökkenésében jelentkeznek és a terhelés átadásánál megnövekednek hajlítási húzófeszültségek. Ez viszont idő előtti fáradtságához vezet, kezdetben kis kitoréseket eredményezve a felületi rétegben, végül pedig kialakulnak a a hírhedt „kátyúk”, amelyek minden évben óriási gazdasági károkat okoznak.

Legkésőbb addigra a meglévő létesítmény „mélyen megrongálódott”, a javítási költség pedig az egyenértékű egy új építésével.

Az ilyen károk időben történő ellensúlyozására emulziós konstrukciós módszereket alkalmaznak, amelyek kiválóan alkalmasak több évtizedes megelőző útkarbantartások során.

### 3. DSK újrahasznosított aszfalttal (RA) - kialakítás és hatásmechanizmusa

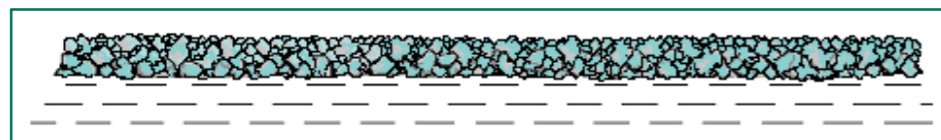
Egy DSK többféle változatban is megtervezhető, elsősorban a legnagyobb szemcseméret kiválasztása szerint. A leggyakoribb szemcseméret a DSK 5 (lásd 1. ábra) vagy a DSK 8.

A DSK-t önjáró gép segítségével, az osztályozott adalékanyag (homok és frakciók) és/vagy feldolgozott RA keverésével granulálják speciális bitumen emulziókkal. Az „aszfaltkeveréket” először pépes, szabadon folyó és hideg konzisztenciában állítják elő, majd egy körülbelül 5-10 mm vastag rétegben hordják fel a felületre a munkagép terítő rendszerén keresztül. A teljes DSK réteget műszakilag két rétegben gyártják, azaz egy profilozó rétegben és egy felső rétegben. A profilozó réteg vastagsága változó, és lehetséges a „nulla vastagságig építeni”, ami elősegíti az anyagtakarékosságot.

Azonban más filozófiát követnek az RA granulátum profilozóréteggel való használatokor.

Kicsit vastagabb, kb. 20 – 25 kg/m<sup>2</sup> és speciális szálal anyag hozzáadásával megfelelő repedésállóság érhető el. Az alkalmazás után néhány perccel a keverék megköt és körülbelül fél óra múlva tovább lehet haladni. A DSK egy napon belül 2 rétegben állítható elő egy profil-, és egy felső réteg beépítésével. Ez a megközelítés jelentősen javítja az felület keresztirányú profilját.

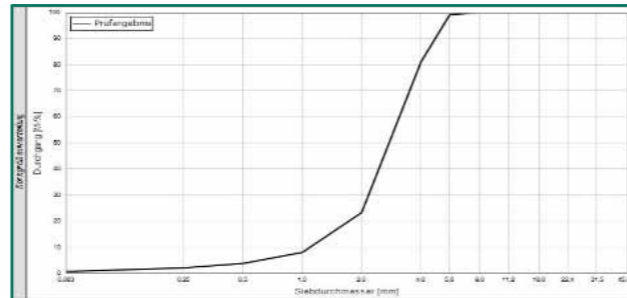
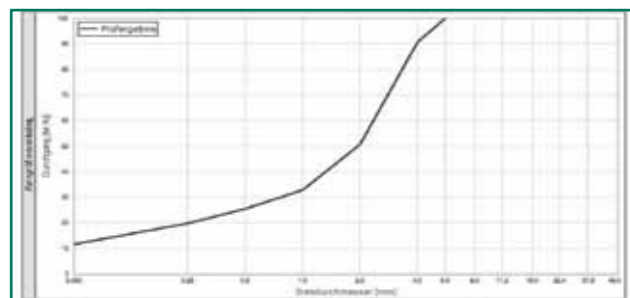
A DSK nagyon magas követelményeket támaszt a felhasznált építőanyagokkal, különösen a kötőanyaggal szemben.



1.Ábra.: DSK 5 profilozóréteg sematikus ábrázolása RA granulátummal 0/5

Az RA granulátumot ennek megfelelően kell elkészíteni és frakcionálni. A 0-5 mm-es darbméret-eloszlású RA granulátum bizonyult a legjobbnak a különböző tesztelési helyszíneken.

Az extrakció után a granulátum kötőanyag-tartalmának 4,5% és 5,5% között kell lennie.



2. ábra: RA 0/5 bal: osztályozási görbe extrakció után; jobbra: szemcseszéret-eloszlás

A fektetéskor az RA granulátumot kb. 7 - 10%-os C 65 BP 7-DSK bitumen emulzióval keverjük össze. Az emulzió mennyisége az RA granulátum BM-tartalmától függ. Ezenkívül egy speciális szálal adnak a keverékhez, hogy az még nagyobb pozitív hatással legyen a repedés áthidalására. A felső réteget hagyományos módon homok/zuzalék keverékkel és bitumenes emulzióval C 65 BP 7-DSK hordjuk fel.

A következő táblázat egy példát mutat be az RA granulátum és az egyes DSK rétegek kötőanyag-tartalmára egy tesz szakasz építésekor.

Minta	BM-tartalom %
RA-Granulátum 0/5	5,3
Minta1 (DSK RA 0/5-el)	11,1
Minta 2 (DSK RA 0/5-el)	11,2
DSK 5 felső réteg	6,3

A profilozórétegben RA anyagot használó DSK burkolatot Ausztriában már több mint 5 éve alkalmazzák és egyre gyakrabban. Az eddigi tapasztalatok a mintegy 100 000 m<sup>2</sup> beépítési területről rendkívül pozitívak.

A többé-kevésbé szerkezetileg károsodott útburkolat felületének lezárása, a további tönkremeneteltől való megóvása nagymértékben megvalósul.

Nem feltétlenül szükséges előzetesen kimarni a sérült területeket. Az alacsony, 45 kg/m<sup>2</sup> alatti építőanyag-felhasználás ellenére a gyakorlatban javulást sikerült elérni a meglévő burkolat teherbíró képességében.

Ez a javulás az útszerkezet kötött és nem kötött rétegeinek fokozódó kiszáradásával magyarázható, mert ennek a speciális burkolatnak a repedésgátló hatása is nagymértékben csökkentheti a víz felszíni rétegben való átjutását.

### 4. Reológiai megfontolások

Az újrahasznosított aszfalttal módosított DSK visszanyert kötőanyagának reológiai vizsgálatai kimutatták, hogy a |G\*| 90 °C-on körülbelül kilencszer magasabb, mint a standard DSK, míg a különbség 6 °C-on elhanyagolható (3. ábra). Ez azt jelenti, hogy ez egy úgynevezett „flex-hard” kötőanyagrendszer.

A „flexhard” kifejezés alatt olyan kötőanyagot értünk, amely egyrészt repedésáthidaló hatású (flexibilis), másrészt ennek megfelelő szilárdsággal (deformációállósággal) rendelkezik. Az újrahasznosított aszfalt használata a módosított DSK-ban jelentős javulást eredményez a magas hőmérsékleten való viselkedésben.

Az R&K lágylási pontja 48°C-ról 60°C-ra nő (3. ábra), miközben az alacsony hőmérsékleti viselkedés szinte változatlan marad. A szabványos DSK-hoz képest ez azt jelenti, hogy meleg nyáron kisebb a deformáció veszélye, télen pedig nincs további ridegség. A szálal kötőanyagok használatával az alacsony hőmérsékletű viselkedés mind a standard DSK-ban, mind az RA granulátummal módosított DSK-ban javítható.

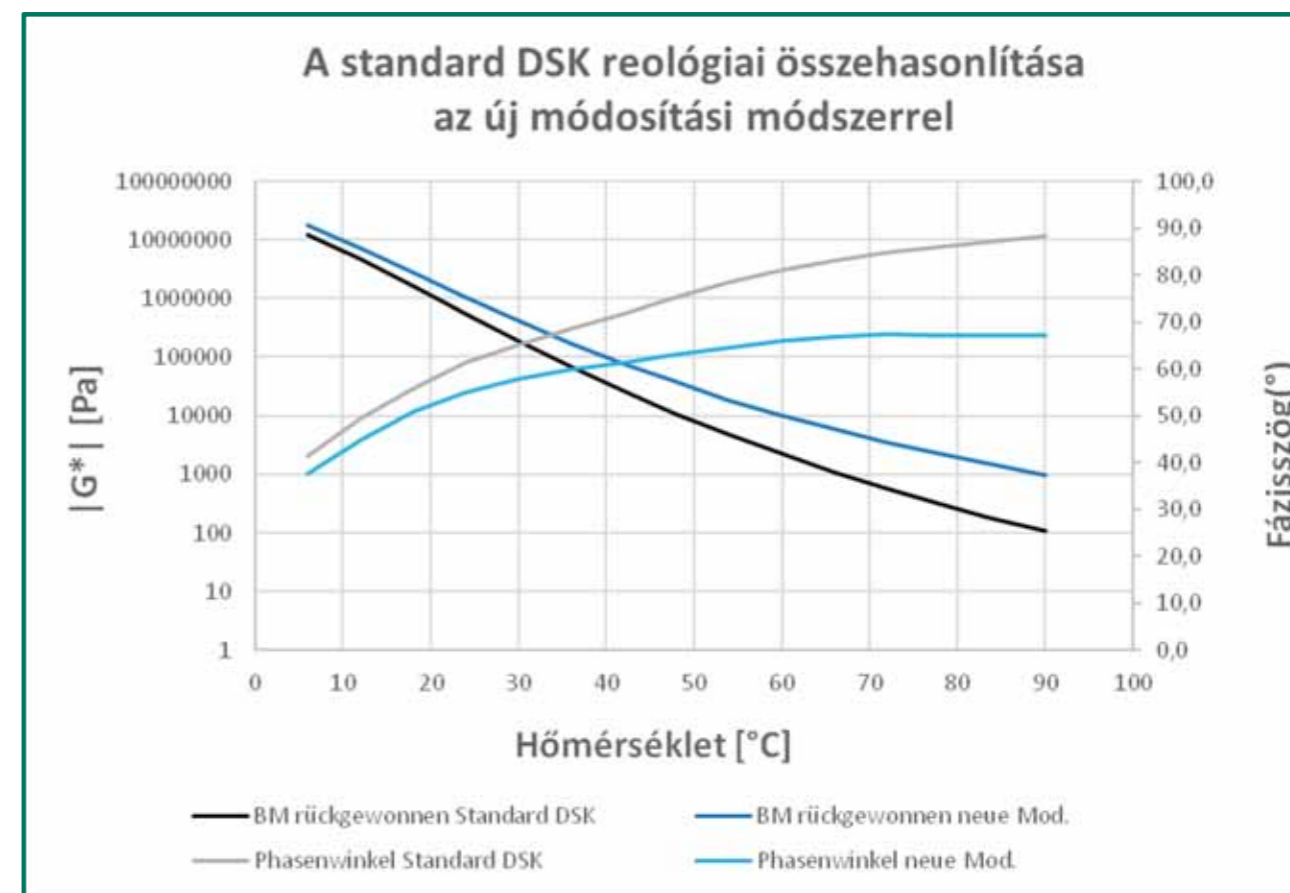
### 5. Gazdasági megfontolások:

A bitumenes általános felújításhoz képest ez a módszer a „meglévő burkolat karbantartásának” egyszerű és költséghatékony módja. Ez elsősorban az alacsonyabb anyagfelhasználásnak köszönhető, kb. 35 – 45 kg/m<sup>2</sup> a DSK a hagyományos beépítési módhoz képest. A melegépitési móddal történő felújításnál a legtöbb esetben további előkészítő munkára van szükség a régi szerkezet lemarásával, ami a DSK építési móddal ez elhagyható.

Ezenkívül a meglévő erőforrásokat megőrzik a regenerált aszfalt újrafelhasználása révén. Ennek megfelelően ez is pozitív hatással van a CO2 lábnyomra.

Az RA granulátumú DSK burkolat lényegesen jobb teljesítményt nyújt a többirétegű koncepciójának és a rétegek kifejezett vékonyságának, rugalmasságának és magas kötőanyag-tartalmának köszönhetően.

Költséghatékony megoldás tehát a szerkezetileg már súlyosan sérült úthálózat megelőző karbantartására, és gazdaságilag felülmúlja a hagyományos javításokat.



3. ábra: A két rendszer reológiai összehasonlítása a visszanyert kötőanyagban

## 6. tapasztalat terepi tesztekből

A következő képdokumentumok különböző tesztelési tételből származnak, amelyeket Ausztriában és Olaszországban állítottak elő, hogy teszteljék az RA granulátum DSK rendszerben való alkalmazásának ötletét, annak alapvető alkalmasságát a gyakorlati építéshez. Az alépítmény építés előtti állapotát részben számos hosszanti repedés és hálózati repedés jellemezte, amelyek vizuális megjelenésükből adódóan a teljes szerkezet teherbíró képességének hiányosságaira is visszavezethetők.



Ezek a tesztelési tétel új betekintést hoztak, például:

- Az RA-DSK aprítási viselkedése gyorsabb kikeményedést és azonnali bevonatot biztosít, mint a standard DSK.
- Vastagabb rétegeket kevesebb vízzel lehet beépíteni, ami jobb repedésgátló hatású.
- Az RA granulátummal készült profilréteg a nagyobb, kb. 25-30 kg/m<sup>2</sup> anyagmennyiség ellenére sem mutat nagyobb összenyomódást.
- A repedésgátlás és az alacsony hőmérsékleti viselkedés további javítása száltöltőanyag hozzáadásával érhető el, mind a profilrétegben, mind a fedőrétegben.



## 7. Összefoglalás

Európa szinte minden „gazdag” iparosított országa (és úgy tűnik, hogy ez más kontinenseken is hasonló) szembeül azzal a problémával, hogy a közúti forgalom folyamatosan növekszik az útfenntartáshoz szükséges pénzügyi források pedig elégtelenek. A probléma az országos úthálózattól az önkormányzati úthálózatig végig fennáll. A meglévő út súlyos szerkezeti károsodásának kockázata csak költséghatékony, nagy léptékben alkalmazható építési módok alkalmazásával csökkenthető.

Körülbelül 6 éves ausztriai gyakorlati tapasztalat azt mutatja, hogy a legmagasabb szintű karbantartási hatékonyság

érhető el az újrahasznosított aszfaltot használó DSK építési módszerrel. A készletek szinte teljes megőrzése vagy felhasználása lehetséges. A sérült felületi rétegek lemarása általában nem szükséges. Alacsony, 45 kg/m<sup>2</sup> alatti építőanyag felhasználással hidegépítéssel sűrű, repedésáthidaló, közép- és hosszútávon használható, forgalombarát új felületi réteg állítható elő. Ennek eredményeként a CO<sub>2</sub>-lábnyom is jelentősen csökken.

Ez a burkolati rendszer ezért értékes hozzájárulást jelenthet a hatékony, gazdaságos útkarbantartáshoz. Feltehetően a kérdést Winston Churchill demokrácia formáról szóló kijelentésével analóg módon: A DSK felület nem a legjobb az összes aszfaltfelület közül, de a jelenlegi helyzetben – sok a kár, de korlátozottak az erőforrások – van-e jobb?

Birngruber Kurt

Vialit Asphalt GmbH&Co.KG

Josef Reiter Straße 78

A-5280 Braun au am Inn

Stravia Emulziógyártó és Útfenntartó Kft.

Olajbányász u. 2.

6400 Kiskunhalas

## HAPA TAGVÁLLALATAI

**Aszfalt Hungária Kft.**  
H- 2225 Üllő  
belterület, hrsz. 3753.  
<https://euroaszfalt.hu>

**Budapest Közút Zrt.**  
H-1115 Budapest  
Bánk bán u. 8-12.  
<https://budapestkozut.hu>

**Colas Közlekedésépítő Zrt.**  
H-1113 Budapest  
Bocskai út 73.  
<https://colas.hu>

**Colas Út Zrt.**  
H-1113 Budapest  
Bocskai út 73.  
<https://colas.hu>

**DÉLÚT Kft.**  
H-6750 Algyő  
Kastélykert u. 171.  
Pf: 4  
<https://delut.hu>

**Duna Aszfalt Zrt.**  
H-6060 Tiszakécske  
Béke u. 150.  
<https://www.dunaaszfalt.hu>

**Harmat-Bau Kft.**  
H-6725 Szeged  
Harmat utca 16.

**Hazai Építőgépi Társulás Zrt.**  
H- 2351 Alsónémedi  
Ócsai út 2405/4 hrsz.  
<https://www.epitogep.com>

**He-Do Kft.**  
H-3261 Pálosvörösmart  
Hagyóka u. 1.  
<https://he-do.hu>

**MENTO Környezetkultúra Kft.**  
H-3527 Miskolc  
Besenyői út 26.  
<https://mentokft.hu>

**MOL Nyrt**  
H-1117 Budapest  
Dombóvári út 28.  
<https://mol.hu>

**OMV Hungária Ásványolaj Kft.**  
H-1117 Budapest  
Október Huszonharmadika utca 6-10.  
<https://www.omv.hu>

**PENTA Kft.**  
H-2100 Gödöllő  
Kenyérgyári u. 1/E.  
<http://pentakft.hu/>

**„SOLTÚT” Kft.**  
H-6320 Solt  
Kecskeméti u. 34.  
<http://soltut.hu>

**Swietelsky Magyarország Kft.**  
H-1016 Budapest  
Mészáros utca 13.  
<http://swietelskymagyarorszag.hu>

**Úteppark Útépipítő és Mélyépipítő Kft.**  
H-8000 Székesfehérvár  
Szlovák utca 6.  
<http://uteppark.hu>

**Vértaszfalt Kft**  
H-2800 Tatabánya  
Réti út 174. Fsz. 4.  
<http://vertesaszfalt.hu>

## HAPA TÁRSULT TAGVÁLLALATAI

**Ammann Austria GmbH**  
Anzing 33.  
A-4113 St. Martin im Mühlkreis  
<https://www.ammann.com/de/>

**AUMER Kft.**  
H-2035 Érd  
Bikszádi utca 6.  
<http://aumer.hu/>

**BHG Bitumen Kft.**  
H-1117 Budapest  
Gábor Dénes utca 2. Infopark D  
épület  
<http://bhg.huauholding.com>

**BME Út és Vasútépítési Tanszék**  
H-1111 Budapest  
Műgyetem rkp. 3.  
<https://epito.bme.hu/ut-es-vasutepitesi-tanszek>

**EuroAszfalt Kft**  
H - 2225 Üllő  
belterület 3753 hrsz.  
<http://euroaszfalt.hu/>

**EULAB Kft.**  
H- 2120 Dunakeszi  
Székesdűlő 135.  
<https://www.eulabkft.hu/>

**Huntraco Kereskedelmi és Szolgáltató Zrt.**  
H-2040 Budaörs  
Kamaraerdei út 3.  
<https://www.huntraco.hu/>

**INNOTESZT Kft.**  
H - 2225 Üllő  
Zsarókahegy hrsz. 053/30.  
<http://euroaszfalt.hu/leanyvallalat/innoteszt-Kft>

**INNOVIA Kft.**  
H- 2541 Lábatlan  
Dunapart 1605/2 hrsz

**ITERCHIMICA S.R.L.**  
Via G. Marconi, 21,  
24040, Suisio (BG), Italy  
<http://www.iterchimica.it/>

**Mélyépipítő Labor Kft.**  
H-2142 Nagytarcsa  
Csonka János u. 6.  
<https://www.facebook.com/melyepitolabor/>

**Magyar Közút Nonprofit Zártkörűen Működő Részvénytársaság**  
H-1024 Budapest  
Fényes Elek u. 7-13.  
<https://internet.kozut.hu/>

**MAB Tarnóca Kőbánya Kft.**  
H- 2045 Törökbálint  
Torbágy u. 20.  
<http://www.tarnoca.hu/>

**MKIF Magyar Koncessziós Infrastruktúra Fejlesztő Zrt.**  
H-2040 Budaörs,  
Akron utca 2.  
<https://mkif.hu>

**Omya Hungária Mészkefeldolgozó Kft.**  
H-3300 Eger,  
Lesrét utca 71.  
<https://www.omya.com/>

**OTYS Úttechnika Kft.**  
H-2660 Balassagyarmat  
0101/21 hrsz.

**Profi-Bagger Kft.**  
H - 2051 Biatorbágy  
Tormásirét u. 6.  
<https://profi-bagger.hu/>

**Rec-Plus Kft.**  
H-3200 Gyöngyös  
Felső-Újvárosi utca 2.  
<http://www.recplus.hu/>

**Rettenmaier Austria GmbH & Co.KG**  
A-1230 Wien  
Rudolf-Waisenhorn-Gasse 18.  
[https://www.jrs.de/jrs\\_de/](https://www.jrs.de/jrs_de/)

**Rodcont Kft.**  
H-1221 Budapest  
Orsovai u. 10/a  
<https://rodcont.hu>

**STA Aszfalt-Tech Kereskedelmi és Szolgáltató Kft.**  
H - 1043 Budapest  
Dugonics u. 11.  
<http://www.sta.hu>

**SRIPATH INNOVATIONS LTD / SRIPATH TECHNOLOGIES LLC**  
21 Ledbury Place  
Croydon CR0 1ET  
United Kingdom  
<https://sripathinnovations.com>

**TPA HU Kft.**  
H-1097 Budapest  
Illatos út 8.  
<http://www.tpaqi.com>

**TLI Zrt.**  
H-2030 Érd,  
Bikszádi utca 6.  
<http://www.tli.hu>

**ÚTLABOR Kft.**  
H- 9151 Abda  
Bécsi út 15.  
<https://utlabor.hu/>

**Wirtgen Budapest Kft.**  
H-2363 Felsőpakony  
Erdőalja u. 1.  
<https://www.wirtgen-group.com/budapest/hu/>



