



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

Aszfaltkeverékek fáradási ellenállásának vizsgálati módszerei

Készítette: Gajdán Zsófia

2016.

Konzulensek: Dr. Igazvölgyi Zsuzsanna

Ávár Vivien Brigitta

Soós Zoltán

Tartalomjegyzék

I. Bevezetés	6
II. Pályaszerkezetek méretezése	7
II.1. Az új útpályaszerkezetek hazai méretezési utasításának jellemzői	10
III. Az aszfalt mechanikai viselkedése	12
III.1.1. Kritikus feszültség és megnyúlás az útburkolatban.....	12
III.2. A fáradás jelensége.....	13
III.2.1. Leíró jellegű megközelítés	13
III.2.2. A törés mechanizmusa szerinti megközelítés.....	15
III.2.3. Energia-alapú megközelítés.....	17
III.2.4. A fáradás vezérlése és a Wöhler-görbe	19
IV. Szabvány	21
V. Vizsgálatok.....	23
V.1. A felhasznált keverék	23
V.2. Hasító-húzó fárasztási vizsgálat henger alakú próbatesten	24
V.3. Négyponthasítóvizsgálat hasáb alakú próbatesten	31
V.4. Egyéb fárasztási vizsgálatok a Magyar Szabványban	34
V.4.1. Kétpontos hasítóvizsgálat trapezoid alakú próbatesten.....	35
V.4.2. Kétpontos hasítóvizsgálat hasáb alakú próbatesten	36
V.4.3. Háromponthasítóvizsgálat hasáb alakú próbatesten.....	37
VI. Vizsgálatok kiértékelése.....	38
VI.1. Fáradási egyenes	38
VI.2. A két vizsgálat terhelése.....	39
VI.3. Különböző terhelési szintek eredményei.....	41
VI.4. Disszipált energia	43
VII. Összefoglalás	46
VIII. Köszönetnyilvánítás	47
IX. Felhasznált irodalom	48

Ábrajegyzék

1. ábra Aszfaltkeverék hőmérséklet és terhelési idő függése	4	Hiba! A könyvjelző nem létezik.
2. ábra Feszültségek az útburkolatban.....	13	Hiba! A könyvjelző nem létezik.
3. ábra Igénybevételi módok	20	Hiba! A könyvjelző nem létezik.
4. ábra Disszipált energia változása különböző vezérlések esetén	21	Hiba! A könyvjelző nem létezik.
5. ábra Beállító eszköz	25	Hiba! A könyvjelző nem létezik.
6. ábra Beragasztott próbatest.....	29	
7. ábra ITT vizsgálat.....	30	
8. ábra Tönkrement próbatest.....	32	
9. ábra Próbatest négyponos hajlítóvizsgálathoz.....	35	
10. ábra Négyponos vizsgálóberendezés.....	36	
11. ábra Kétpontos hajlítóvizsgálat trapezoid alakú próbatesten.....	39	

Táblázatok

1. táblázat A keverékek összetétele.....	26
2. táblázat Típusvizsgálatok eredményei.....	26
3. táblázat ITT eredmények.....	33
4. táblázat A négy pontos vizsgálat fontosabb mérési eredményei.....	37
5. táblázat Az ITT vizsgálat fáradási egyenesének kiértékelése.....	42
6. táblázat A négy pontos vizsgálat fáradási egyenseinek kiértékelése.....	42
7. táblázat Disszipált energia a különböző ciklusokban.....	47

Grafikonok

1. grafikon: az egyes számú próbatesten végzett ITT vizsgálat 100. ciklusának hiszterézis görbéje.....	20
2. grafikon: a keverékem fáradási egyenesei.....	42
3. grafikon: Egy ciklus terhelés/idő függvénye.....	43
4. grafikon: Az első 20 ciklus terhelés/erő grafikonja.....	44
5. grafikon: 9. vizsgálat Alakváltozás/ciklusszám.....	45
6. grafikon: A különböző terhelési szintek fáradása.....	46
7. grafikon: Az első próbatest fárasztásának lefolyása hiszterézis görbéken.....	47
8. grafikon: Disszipált energia változása a ciklusszám függvényébe.....	48

I. Bevezetés

Magyarországra általánosságban az aszfalt burkolatú utak a jellemzőek. 1975 és 2005 között nem épültek számottevően betonburkolatú utak az országban. 2005-öt követően is csak különösen indokolt, nagy terhelésű szakaszokon építettek beton burkolatú utakat ilyen például az M0 autópálya 25+500 – 42+500 km-es 2005-ben átadásra került szakasza.¹ Az aszfalt mellett szóló legfontosabb érvek a könnyű beépíthetősége, könnyű felújíthatósága, illetve hogy az utazáskényelem, és zaj szempontjából is előnyösebb, mint a beton, mivel rugalmasabb anyag. Ezt a tulajdonságát annak köszönheti, hogy az aszfalt, bitumen és meghatározott szemeloszlású kőváz keveréke.

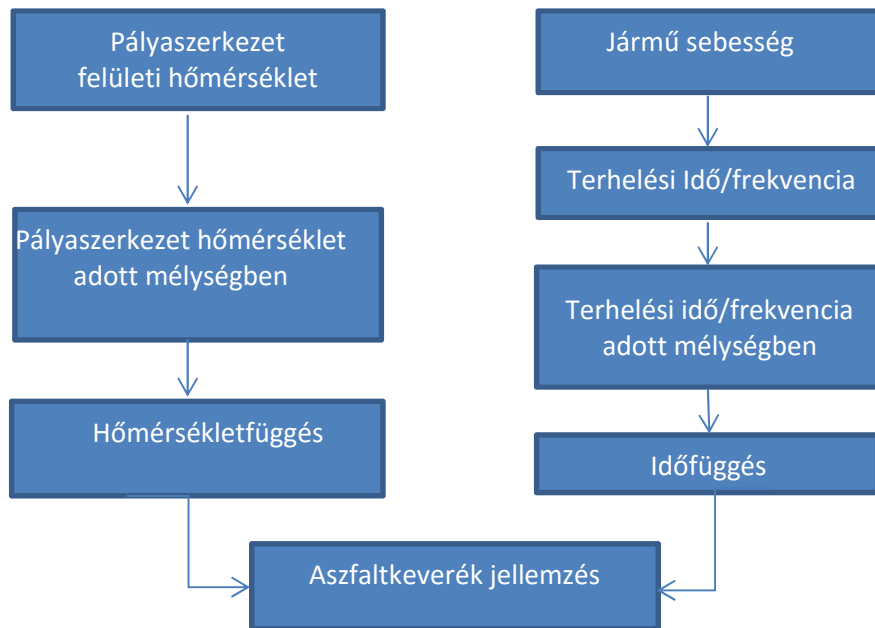
A két anyag, közösen határozza meg az aszfalt mechanikai tulajdonságait. A kőanyag mechanikai tulajdonságai nem függenek a hőmérséklettől, szilárd anyagnak tekinthetők. Ezzel ellentétben a bitumen viszkoelasztikus anyag, azaz a viszkózus és rugalmas tulajdonságok egyaránt jellemzők. Ez azt is jelenti, hogy a mechanikai tulajdonságai a hőmérséklet függvényében változnak. Hazánk útjain az aszfalt átlaghőmérséklete -20°C és 70°C között ingadozik. Ezen a hőmérsékleti tartományon a bitumen plasztikusnak tekinthető, azaz merevsége hosszabb terhelés hatására csökken. A különböző hőmérsékleti tartományokon különböző tönkremeneteli módok a jellemzők. Hazánkban télen gyakori a 0°C alatti hőmérséklet, amin a leggyakrabban tönkremenetel a termikus repedés. Nyáron 30°C felett a plasztikus deformáció a jellegzetes tönkremeneteli mód, melynek során a bitumen hőmérséklet függése miatt a csökken a merevsége, nyomvályúsodás alakul ki. A két véglet közti legáltalánosabb hőmérsékleten a fáradás okozza az aszfalt pályaszerkezet tönkremenetelét. A magyar szabvány azonban a gyakori fáradási tönkremenetel ellenére csak a fokozott igénybevételi kategóriájú szakaszok esetén követeli meg a fáradás vizsgálatot, de akkor is csak tájékoztató jelleggel kell az értéket megadni. Ez alól az egyetlen kivétel a nagymodulusú aszfaltok, melyeknél meg van adva a fáradás alsó határértéke.

A fáradás jelenségét úgy definiáljuk, hogy az aszfalt ciklikusan ismételt adott nagyságú terhelésének hatására létrejövő szilárdság csökkenés. Az aszfalt burkolatot a rajta áthaladó forgalom folyamatos terhelésnek teszi ki, ami mikroméretű károsodásokhoz vezet az anyagban. Bizonyos ismétlődésszám felett ezek a károsodások szuperponálódnak, láthatóvá válnak,

¹ <http://www.betonopus.hu/notesz/liptay-betonutak-60.pdf>

szabad szemmel is felfedezhető repedések keletkeznek rajta, ez maga a fáradás folyamata. A fáradás a bitumen plasztikus anyagtulajdonsága miatt több paramétertől függ, ezek a tényezők a hőmérséklet, a terhelés nagysága és a terhelési idő.

Az alábbi ábra mutatja az aszfaltkeverék hőmérséklet és idő függését.



1. ábra Aszfaltkeverék hőmérséklet és terhelési idő függése

Mivel a pályaszerkezetet az élettartama alatt folyamatos periodikus terhelés éri, az aszfalt fáradása jelentős. A pályaszerkezet méretezése során figyelembe kell venni az anyag fáradási ellenállását. Ezért a beépítendő aszfalt anyagvizsgálatai során kötelező a fáradási vizsgálat, azonban a magyar szabvány több különböző fáradási vizsgálatot ajánl fel, és szabadon választható a vizsgálati módszer.

Dolgozatomban szeretném a különböző vizsgálatokat bemutatni, rámutatni az egyes módszerek előnyeire és hátrányaira, illetve vizsgálok az összefüggéseket a különböző vizsgálatok eredményei között.

II. Pályaszerkezetek méretezése

Magyarországon az 1960-as évek végéig az aszfaltburkolatú hajlékony pályaszerkezeteket nem méretezték. A korábbi évtizedekben kialakult hagyományok alapján határozták meg

vastagságukat. A 60-as években komoly fejlődés indulhatott el az Útügyi Kutatóintézetben dr. Boromissza Tibor és dr. Gáspár László közreműködésével. A korszerű teherbírásmérések, a Benkelman-tartóval történt lehajlásmérések eredményei és az AASHO útkísérletek kiértékelése alapján elkészítették az első magyar méretezési javaslatot. A beinduló fejlesztések másik oka az emberek életvitelében történő nagy változás, a motorizáció széles körű elterjedése és ennek okán megjelenő útkorszerűsítések növekvő igénye volt. Egyik ilyen, akkoriban híressé váló eset, a 80. számú (ma 10. számú) főút méretezés nélkül készült pályaszerkezetének látványos és gyors tönkremenetele, mely a méretezés hiánya mellett azonban más okokkal is magyarázható volt. Azonban ezek a folyamatok indították el azt a kutatómunkát melynek eredményeként megszületett az első magyar szabályozás e témakörben. Az Útügyi Kutatóintézet, a BME Útépítő Tanszéke és néhány vállalat szakértője közreműködésével zajló fejlesztésben az ASPHALT INSTITUT-nak a méretezési módszerét vették alapul. Az AASHO útkísérletek statisztikai kiértékelésén alapuló 1963-as - majd 1973-ban szinte változatlan formában kiadott második kiadás- méretezési módszerét adaptálták a hazai viszonyokra. 1971-ben jelent meg a „Hajlékony Útburkolatok Méretezési Utasítása” című (továbbiakban: „HUMU”) szabályozás a Közlekedési és Postaügyi Minisztérium Közúti Főosztálya kiadásában. A „HUMU” kiterjedt a meglévő pályák megerősítésének méretezési módszerére is.²

Az európai országokban a 70-es évek elejétől egyre szélesebb körben erősödött meg az irányzat, amely szerint az aszfaltos és más út-pályaszerkezeti rétegeket mechanikai és dinamikai vizsgálatok alapján kellene vizsgálni és méretezni. A nyugati országok a 1980-as években már kizárólag a mechanikai-dinamikai alapokon nyugvó módszereket fogadták el. Annak ellenére, hogy igen sok módszer gyakorlatidegen és túlbonyolított volt, lassan kirajzolódtak a maradandó hasznosságú módszerek csoportjai. Főként az aszfaltokra vonatkozó ismeretek bővültek nagymértékben. Az anyag viszkoelasztikus tulajdonságait, a hőmérsékletet és a terhelési időt is figyelembe vevő módszerekkel sikerült mind modulusokat, mind fáradási jelenségeket nemcsak kimutatni, hanem olyan általánosan is alkalmazható eljárásokat és laboratóriumi berendezéseket elterjeszteni, amelyek ezek vizsgálatára alkalmasnak bizonyultak. A kilencvenes évek elejére jellemzően, néhány nemzetközi igényű mechanikai-dinamikai

² dr. Nemesdy Ervin: Az aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének új szabályozása Magyarországon
Közút Folyóirat XII. évfolyam 1992. 6.szám 205. oldal

méretezési módszer volt ismeretes a szakmában. Ilyenek voltak az 1982-es módosított SHELL módszer, vagy az 1985-ös ASPHALT INSTITUT módszere.³

A gyakorlatban használt méretezési irányelvek, módszerek, utasítások és típuspályaszerkezetek a következők voltak:

- az angol nottinghami módszer,
- a francia típusú pályaszerkezet-katalógus,
- a német standard-pályaszerkezet táblázatok,
- a belga méretezési mód,
- a svájci és az osztrák méretezési szabványok.

Mindegyik azonos mechanikai alapokon készült, a következő két méretezési kritérium tekintetében:

- a többrétegűnek tekintett útpályaszerkezet együtt dolgozó aszfaltrétegei alján, a terhelésekből adódó húzófeszültségek illetve nyúlások ne haladják meg az ott alkalmazott aszfaltanyag fáradási szilárdságát a Wöhler görbéknek megfelelően, figyelembe véve az aszfaltnak a havi, a napi hőmérsékletek változása miatti változó modulusait és a tervezési élettartam alatti nehéz járművek terhelési-ismétlési számából adódó fáradási viszonyokat.
- A többrétegű útpályaszerkezet legalsó rétege ne adjon a földmű felső szintjére olyan nagy függőleges irányú feszültségeket, illetve alakváltozást, amely a tervezési élettartam alatti terhelés ismétlődések miatt a földmű maradandó deformációját okozhatná. Ezzel az útburkolatban a földmű deformációja miatti, idő előtti nyomvályú képződést lehet megelőzni, a különben kielégítő technológiai minőségű pályaszerkezeti rétegeket feltételezve.⁴

³ dr. Nemesdy Ervin: Az aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének új szabályozása Magyarországon Közút Folyóirat XII. évfolyam 1992. 6.szám 206. oldal

⁴ dr. Nemesdy Ervin: Az aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének új szabályozása Magyarországon Közút Folyóirat XII. évfolyam 1992. 6.szám 207. oldal

Ez a két méretezési kritérium lényegében minden mechanikai alapú méretezési módszer változatánál szerepelt. Volt egy harmadik kritérium is, amelyet néhány esetben alkalmaztak a méretezés szempontjából - néhány országban-, ez a pályaszerkezeti rétegek tervezett élettartam alatti saját összenyomódásából eredő együttes alakváltozás kiszámítása és korlátozása volt. Az alkalmazott méretezési módszerek többsége azért nem használta ezt a kritériumot, mert a földművön kívül az összes pályaszerkezeti réteget olyan technológiával lehetett megépíteni, amely a nyomvályúsodást egy 12-15 évi időtartam alatt meghatározott határérték (16-19mm) alatt tartotta.

A gazdasági –társadalmi-technológiai fejlődés magával hozta az autópályák és az elkerülő útszakaszok nagyobb arányú építésének igényét és szükségességét. A Közlekedési Minisztérium megrendelte az új útpályaszerkezetek hazai méretezési utasításának az előkészítését 1990-ben, s a szakmai előkészítést követően egy szabványterv kidolgozását is.

II.1. Az új útpályaszerkezetek hazai méretezési utasításának jellemzői

Az új szabályozás egyik fő kiinduló paramétere a nehéz járművek áthaladási száma a pályaszerkezet tervezett élettartama alatt, átszámítva a 100 kN egységtengelyek áthaladási számára, amelynél az útpályát ért rongáló hatások, s a leromlási folyamat ugyanazok. Ezt az F(100) egységtengely-áthaladási számot lényegében ugyanazon értelmű és jellegű képletekkel kellett számítani, mint az eredeti HUMU-nál, majd később az 1990 évi „UMMU” pályaszerkezet megerősítési utasításnál, csupán néhány javítást és aktualizálást kellett elvégezni. Kissé megváltozott határokkal szereplő A_B_C_D_E jelű (jelentése nagyon könnyű – könnyű – közepes – nehéz - nagyon nehéz) elnevezéssel a forgalmi terhelési osztályok F(100) határértékeit és átlagértékeit mutatták be . A pontos mértékadó megállapítás az F (100) tervezési forgalmi szám megállapításával történt. Külön meg kellett határozni a tervezési élettartam nagyságát is, ezt a városi utaknál 20 évre, míg a külterületi utaknál 15 évre számították.⁵

Az utasítás négy típuslapja, amelyeknél a különböző anyagú alaprétegeknél mindig aszfalt burkolat szerepelt a következők:

⁵ dr. Nemesdy Ervin: Az aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének új szabályozása Magyarországon Közút Folyóirat XII. évfolyam 1992. 6. szám 208. oldal

1. Hajlékony típus-pályaszerkezetek

- I.I. Teljes aszfalt pályaszerkezet;
- I.II. Zúzottkőalap aszfaltburkolattal;
- I.III. Kavicsalap aszfaltburkolattal

II. Típus-pályaszerkezetek cementstabilizációs alapréteggel

- II.I. 15 cm vastag stabilizációk aszfaltburkolattal
- II.II. 20 cm vastag stabilizációk aszfaltburkolattal
- II.III. 25 cm vastag stabilizációk aszfaltburkolattal

III. Típus-pályaszerkezetek cementstabilizációs alapréteggel

- III.I. Zúzott kőelosztó réteggel, 15 cm vastag stabilizáció aszfaltburkolattal
- III.II. Zúzott kőelosztó réteggel 20 cm vastag stabilizáció aszfaltburkolattal
- III.III. Zúzott kőelosztó réteggel 25 cm vastag stabilizáció aszfaltburkolattal

IV.I. Típus-pályaszerkezetek sovány beton alapréteggel

- IV.I.I. 20 cm vastag sovány beton alap, aszfaltburkolattal.
- IV.I.II. 25 cm vastag sovány beton alap, aszfaltburkolattal.

IV.II. Típus pályaszerkezet aszfaltmakadám alappal

- IV.II.I. Zúzott kőalap, aszfaltmakadámmal, aszfaltburkolattal⁶

A típus-pályaszerkezetek azt veszik alapul, hogy a földmű dinamikus teherbírás modulusa $\min.E=50\text{MN/m}^2$, a statikus modulusa pedig $E_2=40\text{MN/m}^2$. A régi HUMU a kis forgalmaknál nagyobb vastagságot követelt, míg a közepes terhelési osztálytól kezdve egyértelműen az új típusú pályaszerkezetek a vastagabbak, durván 2-8 cm-el. A félmerev típusok esetén azonban az új pályaszerkezetek már jóval nagyobb, 5-20 cm vastagságnövekedést mutatnak, különösen azoknál a variánsoknál ahol a cementstabilizációra egy 10 cm vastag feszültségeloszló zúzottkő réteg kerül, a reflexiós aszfaltrepedések megelőzésére illetve lassítására.⁷

⁶ dr. Nemesdy Ervin: Az aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének új szabályozása Magyarországon Közút Folyóirat XII. évfolyam 1992. 6. szám 209. oldal

⁷ dr. Nemesdy Ervin: Az aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének új szabályozása Magyarországon Közút Folyóirat XII. évfolyam 1992. 6. szám 209. old

Az új pályaszerkezetek méretezés során az aszfalt fáradását is figyelembe kell venni. A fokozott igénybevételű kategóriához tartozó osztályokban nincs köszöbérték, de tájékoztató jelleggel meg kell adni az aszfalt fáradásának mértékét a típusvizsgálat során. A nagymodulusú aszfaltoknál pedig, minimum értéket is ad, aminek meg kell felelnie az anyagnak. Tekintve hogy a magyar hőmérsékleti viszonyok között az aszfalt fáradása gyakori tönkremeneteli módnak tekinthető, szükség lenne a tervezési szabvány átgondolására és a követelmény szigorítására.

III. Az aszfalt mechanikai viselkedése

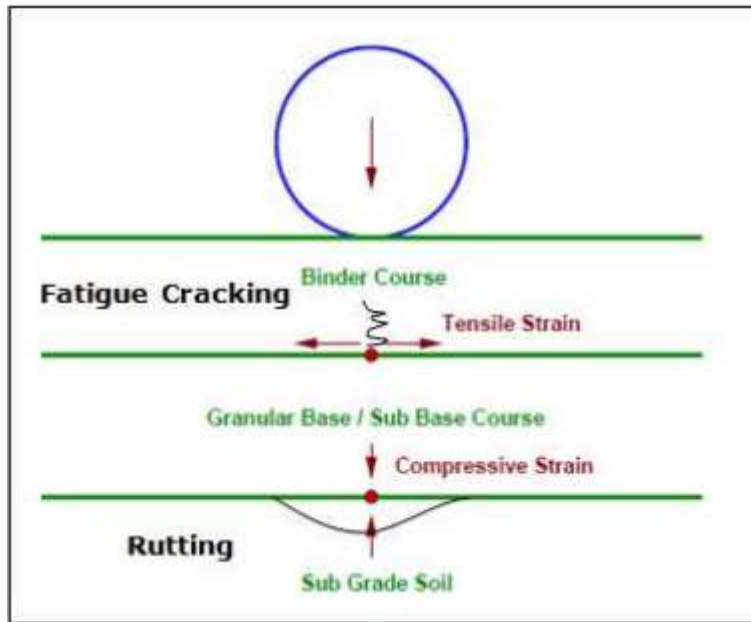
III.1.1. Kritikus feszültség és megnyúlás az útburkolatban

A gépjárművek kereke által létrehozott ismétlődő terhelés különböző fajta feszültségeket okoz az útburkolatban. Két fő típusú feszültség jöhet létre, két különböző helyen:

- függőlegesen nyomott megnyúlás az altalaj tetején, amit a jármű súlya okoz, és az altalaj deformációja állandó deformációhoz vezet a burkolat felületén.
- vízszintes feszültség vagy megnyúlás az aszfalt alsó rétegeiben, amit a járművek súlya, a fékezés, kanyarodás és alapvetően a gépjármű mozgása okoz.

A burkolatok nem sérülnek azonnal, fokozatosan romlanak, egészen a tönkremenetelig. A két fő fajtája az aszfalt tönkremenetelnek: a fáradási törés, amit a túlzott vízszintes megnyúlás okoz az aszfaltréteg alján, és a nyomvályúsodás, amit a túlzott függőleges nyomás hatására keletkező megnyúlás okoz, az altalaj tetején. Az aszfalt burkolat tervezése során különösen fontos ezeknek a kritikus megnyúlásoknak és feszültségeknek az ismerete, hogy a megfelelő vastagságot tervezzük, amivel megelőzhetjük a korai tönkremenetelt.⁸

⁸ Maggiore, Cinzia (2014) A comparison of different test and analysis methods for asphalt fatigue. PhD thesis, University of Nottingham.



2. ábra Feszültségek az útburkolatban⁹

III.2. A fáradás jelensége

Különböző megközelítések léteznek a fáradási viselkedés leírására. Alapvetően elfogadott, hogy a fáradás a halmozódó sérülések hatására létrejövő folyamat, ami fő okozója az aszfalt burkolat tönkremenetelének. Általában három különböző féle megközelítést alkalmazunk, az az aszfalt fáradási viselkedésének leírására: a leíró jellegű megközelítést, a törési mechanizmus megközelítését, és az energia-alapú megközelítést.

III.2.1. Leíró jellegű megközelítés

Az aszfaltkeverékek fáradásának leírása kapcsolatot feltételez a kezdeti megnyúlás vagy feszültség és az ismétlések száma között. Ez az összefüggés nem az elméleti aszfaltmechanikából származtatott. (Hamed,2010)¹⁰.

A terhelés módjától függően, a következő képleteket használjuk a fáradási vizsgálatok során:

⁹ Maggiore, Cinzia (2014) A comparison of different test and analysis methods for asphalt fatigue. PhD thesis, University of Nottingham.

¹⁰ Maggiore, Cinzia (2014) A comparison of different test and analysis methods for asphalt fatigue. PhD thesis, University of Nottingham.

$$N_f = A * (1/\epsilon)b \quad \text{alakváltozásvezérelt módban}$$

$$N_f = C * \left(\frac{1}{\sigma}\right)^d \quad \text{feszültségvezérelt módban}$$

Ahol N_f a fáradási tönkremenetelig lejárt ciklusok száma, ϵ , σ a beállított alakváltozás vagy feszültség értéke, A , C , b , d pedig az anyagtól függő állandók, amelyeket laboratóriumi tesztek során tudunk megállapítani. Általában a kutatók az elmozdulás vezérelt fáradást nem ajánlják, mivel az eredmény a feszültségvezérelthez képest, erősen hőmérsékletfüggő. Sok kutatás kimutatta az irányított terheléses tesztek során, hogy a merevebb aszfaltkeverékek fáradási élettartama rövidebb, ezért bevezették a merevségi modulust a fáradás összefüggésébe, hogy ezzel a hőmérséklet és a terhelési idő hatását megszüntessék. (Monismith, 1985).

Pell megfigyelései alapján a következő összefüggést ajánlotta a megnyúlás az aszfalt alsó rétegében, és a tönkremenetelig lefolyt terhelések száma között:

$$N_f = K_1 * \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{K_2}$$

ahol K_1 és K_2 az ordinátatengely metszéspontja és a lejtés, ami a lineáris regresszió által tudunk meghatározni. (Pell 1967, 1987)

További kutatások megállapították, hogy az elmozdulás vezérelt laboratóriumi fáradási vizsgálatok során, a merevebb keverékeknek alacsonyabb a fáradási élettartama. Ebből kiindulva a fáradási egyenletben bevezették a merevségi modulust, melynek segítségével kiküszöbölhető a terhelési idő és a hőmérséklet hatása (Monismith 1985).

$$\text{A képlet így módosult: } N_f = K_1 * \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{K_2} * \left(\frac{1}{E_0}\right)^{K_3}$$

ahol E_0 a különböző keverékek rugalmassági modulusa, K_1 , K_2 , K_3 pedig a laboratóriumi vizsgálatok alapján kikísérletezett regressziós konstans.¹¹

Ez az összefüggés közvetlenül azonban nem alkalmazható az útpályaszerkezetek viselkedésének modellezésére, hiszen csak egyetlen terhelési szintre (pl. jármű tengelysúly) vonatkozó megengedett ciklusszám értéket olvashatunk le, márpedig egy útszakaszon több, különböző tengelysúlyú jármű is közlekedik. A Miner-hipotézis (Miner, 1945) lineáris arányossági tényezők összegét állítja fel, ahol i a teherosztály jele, n_i a ciklusszám az i

¹¹ Maggiore, Cinzia (2014) A comparison of different test and analysis methods for asphalt fatigue. PhD thesis, University of Nottingham.

teherosztályban, és N_i a tönkremenetelhez szükséges ciklusszám az i teherosztályban. Az egyes teherosztályokban megállapítja a tönkremenetel arányossági (%-os) értékét, majd kumulálja azt. Amennyiben a kumulált érték eléri a 100%-os értéket, a burkolat tönkrement.¹²

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = \sum_1^k \frac{n_i}{N_i} = 1$$

Ebben az első modellben a K_1 , K_2 , K_3 együtthatókat mindig meg kell határozni. Ezek a paraméterek mutatják a keverék anyagtulajdonságait, melyek kísérleti úton lettek meghatározva a fáradási vizsgálatok során. A különböző kutatások, teljesen különböző eredményeket hoztak ezekre az értékekre, de az megállapítható, hogy a K_2 együttható 3 és 6 között van (Barenberg és Thomson, 1992). A K_1 tényező intervallumát nem tudjuk így meghatározni, mivel különböző előírások vannak a terjedelmére. Mindenesetre a két együttható K_1 és K_2 , jól korrelál, a következő képletre (Pell és Cooper, 1975):

$$K_2 = -0.313 * \log K_1 + 0.5$$

A hagyományos leíró jellegű megközelítés nem foglalkozik a törés mechanizmusával a keverékben ismétlődő terhelés alatt, tehát csak anyag és terhelés függő.¹³

III.2.2. A törés mechanizmusa szerinti megközelítés

Ez a megközelítés az aszfaltkeverék fáradási élettartamát a hasadás mechanikája alapján írja le. A leíró jellegű megközelítéssel ellentétben, itt nem feltételezzük, hogy az aszfalt homogén, de jellemezhető a már meglévő belső mikro repedésekkel, levegő hézagokkal, felületi hibákkal és egyenetlenségekkel. A tönkremenetelnek három különböző fázisa van: repedések kezdete, a repedések továbbterjedése és végül a teljes mechanikai tönkremenetel. Az első fázisra jellemző a repedések képződése, és a korábban már meglévő mikro repedések (microcracks) növekedése. A továbbterjedés fázisában, a repedések elkezdnek továbbterjedni az adott feszültségen, és kritikus méreteket okoznak, és ez így folytatódik, amíg be nem következik a

¹² Az aszfaltkeverékek mechanikai paramétereinek és a pályaszerkezet fáradási élettartamának összefüggései Bocz Péter Budapest, 2009,

¹³ Maggiore, Cinzia (2014) A comparison of different test and analysis methods for asphalt fatigue. PhD thesis, University of Nottingham.

tönkremenetel. A teherisméltelési szám, ami arányos a repedés növekedésével, kijelöli a keverék fáradási élettartamát. (Khatakk és Bhaladi, 2013.)¹⁴

Egy egyszerű módszert, ami előre jósolja a fáradási törés terjedését, Paris és Erdogan írt le (1963), és a Paris függvény néven vált ismertté. Ez az egyenlet használja először a törési mechanizmust a fáradás leírására, és ez összefüggésbe hozza a növekedő repedés hosszát ciklusonként (da/dN), a feszültség intenzitás értékével (ΔK). (Paris és Erdogan, 1963.)¹⁵

$$\frac{da}{dN} = C * (\Delta K)^m$$

ahol: $-da/dN-$ a repedések növekedésének aránya, ΔK a minimum és maximum terhelés feszültségértékének különbsége, C és m anyagállandók (C a metszéspont, m pedig a lejtés, a da/dN és ΔK log-log függvényén)

K a repedéscsúcs feszültségintenzitása, és a következő módszerrel megkaphatjuk az értékét:

$$K = \sigma * Y * \sqrt{\pi * a}$$

Alapvetően a törés mechanikát két fő csoportra oszthatjuk: a lineárisan rugalmas törésmechanikára (LEFM), és a nemlineáris törésmechanikára (NLFM). Kimutatható, az LEFM-ben a feszültségmező intenzitása a repedés közelében, amit feszültség intenzitás faktornak nevezünk, és ez egyenesen arányos a feszültséggel, a repedés hosszával és a szerkezet geometriájával. Ezen kívül az LEFM jól leírja a rideg anyagok törési viselkedését. Alacsony hőmérsékleten az aszfalt rideg anyagnak tekinthető. Mivel az LEFM nem tudja megfelelően jellemezni a repedést, és az aszfalt összetevőinek a tönkremenetelét, különböző nemlineáris modelleket fejlesztettek, hogy jobban modellezzék a repedés növekedését. Két nemlineáris modellt használunk: a teljesítési módszert, és az R-görbe módszert (Mamlouk és Mosbasher, 2004). A teljesítési módszer alapvetően csak a meghatározó feltételeit definiálja a repedés változékonyságának, és részben megengedi az energia kibocsátás és a feszültség intenzitás faktor mérését. Az R-görbe módszer, ezzel ellentétben értékeli az anyag törési

¹⁴ Maggiore, Cinzia (2014) A comparison of different test and analysis methods for asphalt fatigue. PhD thesis, University of Nottingham.

¹⁵ Maggiore, Cinzia (2014) A comparison of different test and analysis methods for asphalt fatigue. PhD thesis, University of Nottingham.

ellenállását a különböző repedéshosszaknál, ezzel jobban szemlélteti a repedés terjedésének jelenségét.¹⁶

A törés mechanikájára jó módszer a repedés terjedésének leírása az aszfaltban, azonban még mindig hiányosak az ismereteink a repedés elindulása és az anyag teljes tönkremenetele tekintetében.

III.2.3. Energia-alapú megközelítés

Mivel az aszfalt viszkoelasztikus anyag, így szétszórja az energiát, ha munkát végzünk rajta (terhelés, pihentetés). Mechanikai viselkedése függ a hőmérséklettől és a terhelés feltételeitől. Elasztikusan viselkedik alacsony hőmérsékleten és rövid idejű terhelések hatására, és viszkózus anyagként magas hőmérsékleten és hosszú idejű terhelések alatt. A szilárdságtanból ismerjük a különböző anyagfajták konstans terhelésre való reagálását. A rugalmas anyagok visszatérnek az eredeti formájukba a terhelés megszűnése után, a merev anyagokban azonban maradós alakváltozások következnek be.

Az energia-megmaradás törvénye alapján, amikor a rugalmas anyagon munkát végzünk, azaz leterheljük, az energia eltárolódik benne, mindaddig, amíg a terhelő hatás meg nem szűnik. Ezt követően az anyag visszanyeri eredeti formáját, tehát a terhelési és tehermentesítési görbe egybeesik. A viszkoelasztikus anyagok jellemzésére a hiszterézis görbét használjuk, mivel a tehermentesítés során az anyag más utat jár be, mint a terhelés során. Fáziskésés mérhető az alkalmazott feszültség és a mért deformáció között. Ebben az esetben az energia szétszóródik mechanikai munkaként, hőt termel vagy tönkremegy. Az elvégzett vizsgálataim eredményeiből sikerült saját hiszterézis görbét előállítanom (1. grafikon).

A görbén az alakváltozás (x tengely) a feszültség (y tengely) függvényében van ábrázolva. Egy ciklus 0.5 másodperc, ez alatt összesen 99 pontban, azaz 0.05 másodpercenként vette fel az elmozdulásokat és a hozzájuk tartozó pontos terhelés értékeket a gép. Ezekből a szabványnak megfelelően a következő képletek segítségével számoltam ki a feszültségeket és alakváltozásokat egy cikluson belül:

¹⁶Maggiore, Cinzia (2014) A comparison of different test and analysis methods for asphalt fatigue. PhD thesis, University of Nottingham.

$$\delta_0 = \frac{2 * P}{\pi * t * \Omega}$$

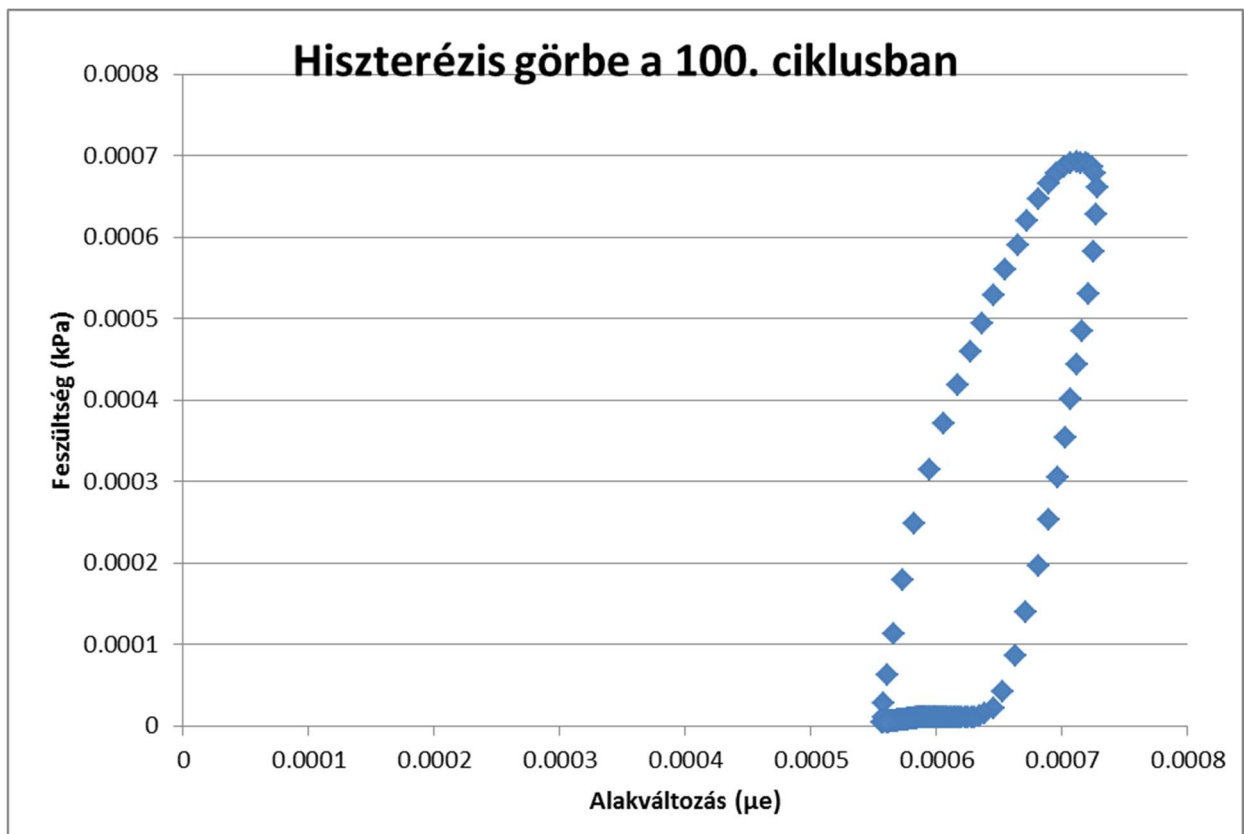
ahol: σ_0 a számolt feszültség értéke [MPa], P a legnagyobb terhelés [N], t a próbatest vastagsága [mm], és Ω a próbatest átmérője [mm].

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{2 * \Delta H}{\Omega} \right) * \left[\frac{1 + 3\nu}{4 + \pi * \nu - \pi} \right]$$

ahol: ε_0 a vízszintes alakváltozás az adott időpillanatban, ΔH a vízszintes megnyúlás [mm]. A ν a Poisson tényező, ami az aszfaltnál minden esetben 0,35, ezért egyszerűsített képlettel számoltam az alakváltozást:

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{2.1 * \Delta H}{\Omega} \right)$$

A görbe alsó része eldeformálódott, jól látható nyúlás van benne, ennek az oka valószínűleg a külpontosság, hogy nem lett a próbatest tökéletesen középre helyezve a terhelési cella alatt, ezért a központos nyomás mellett külpontos erő is hat rá.



1. grafikon: az egyes számú próbatesten végzett ITT vizsgálat 100. ciklusának hiszterézis görbéje

A hiszterézis görbe területe, maga a disszipált energia értéke egy terhelési cikluson belül, és a következő képlettel kiszámolható az értéke, lineárisan viszkoelasztikus anyagok esetén:

$$W_i = \pi * \sigma_i * \varepsilon_i * \sin \varphi_i$$

ahol: σ_i a feszültség szint az adott ciklusban, ε_i a deformáció az i-edik ciklusban, φ_i pedig a fázisszög az i-edik ciklusban.

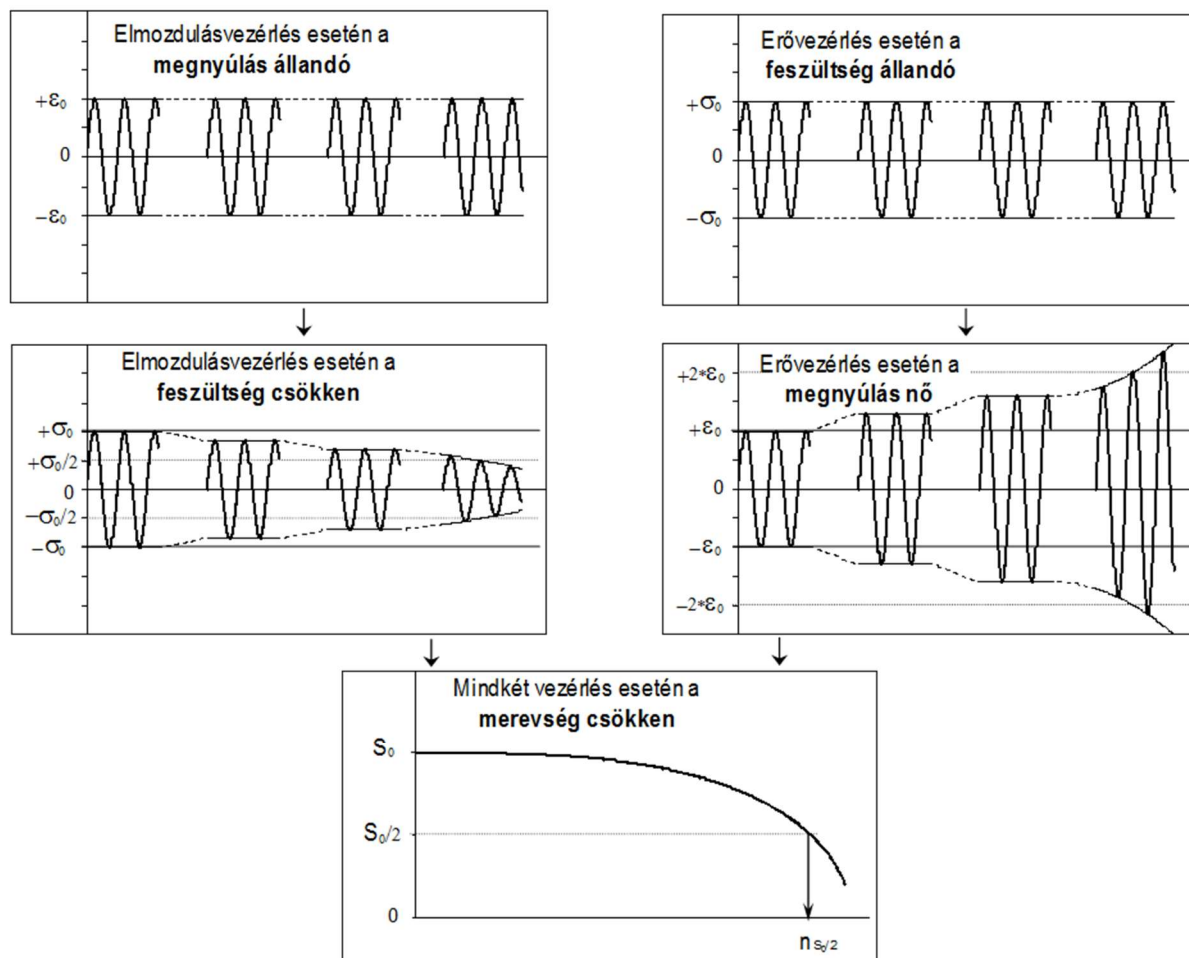
A fáradási vizsgálatok alatt, a merevség csökken, a fáradás folyamata megkezdődik, mikrorepedések kezdenek keletkezni, ezáltal a disszipált energia (W) ciklusonként változik. A disszipált energia három összetevőből állítható össze:

- a törést létrehozó energiából (az energia, ami a felületen új mikrorepedésekhez létre)
- képlékeny disszipált energiából
- és a maradó disszipált energiából.¹⁷

III.2.4. A fáradás vezérlése és a Wöhler-görbe

A fáradás kutatásában végzett munkássága miatt, a fáradási tulajdonságokat ábrázoló görbe Wöhler nevét viseli. A Wöhler-görbe a homogén anyagcsoport különböző terhelési szintjein végzett vizsgálati eredményeit tartalmazza. Az adott anyagot minden esetben ugyanazzal a vizsgálati módszerrel kell fárasztani. A fáradási görbén egyfajta keverék azonos feltételekkel készült vizsgálatának eredményeit lehet csak ábrázolni, tehát a hőmérsékletnek, terhelési módnak és a frekvenciának minden esetben azonosnak kell lennie. Nem mindegy, hogy feszültségvezérelt vagy elmozdulásvezérelt módszert használunk. Feszültségvezérelt vizsgálati módszernek azt nevezzük, amikor a terhelés módjának, egy állandó feszültséget állítunk be. Az ITT vizsgálat ilyen feszültségvezérelt irányítású, az általam elvégzett fárasztások során 150 kPa és 250 kPa terhelési szintek között, 25 kPa-os lépcsőkben választottam meg a feszültség szinteket. Minden terhelési szinten legalább két vizsgálatot végeztem. Az elmozdulásvezérelt irányítást a négy pontos hajlítóvizsgálati módszer során alkalmaztam. Ugyanúgy ahogy az ITT-nél itt is különböző terhelési szinteket használtam, de itt a megadott terhelési paraméter a megnyúlás volt, ami a vizsgálataim esetén 160 és 320 Microstrain között változott. A két vizsgálat legfőbb különbségeit a 3. ábra szemlélteti.

¹⁷ A Dissipated Energy Approach to Fatigue Evaluation Article in Road Materials and Pavement Design, March. 2006. Shihui Shen, Gordon D. Airey, Hai Huang



3. ábra Igénybevételi módok¹⁸

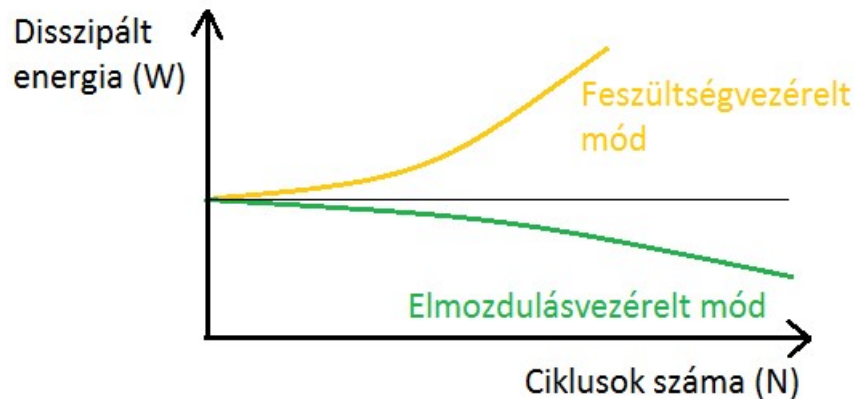
Az ábrán jól látható, hogy az állandó feszültség hatására a megnyúlás a vizsgálat időtartama alatt nő, ami jól mutatja a fáradás jelenségét, hiszen a terhelés értéke állandó lesz, a mikrorepedések és a szerkezeti hibák a ciklikus terheléssel halmozódnak, és ez vezet a tönkremenetelhez. Ezt a saját vizsgálataim során is sikerült kimutatnom, és a vizsgálati eredmények című fejezetben ismertem. Jól megfigyelhető az ábrán, hogy amíg az erővezérelt terhelés a megnyúlás növekedésével jár, addig állandó megnyúlás esetén a feszültség csökkenni fog, tehát ellenkező lesz az előjelük, mégis mindkét terhelési esetben a merevség csökkenni fog. Ennek a szilárdságtanból jól ismert rugalmas anyagokra vonatkozó Hook-törvény az oka, mely szerint:

$$\sigma = E * \epsilon$$

ahol E: merevség, σ :feszültség és ϵ : a megnyúlás.

¹⁸ Út- és vasútépítés laborgyakorlat BME Építőmérnöki kar diasor, Soós Zoltán

Ennek hatására a két igénybevételi mód esetén a disszipált energia változása is különböző előjelű lesz. Állandó feszültségű terhelés esetén a disszipált energia nőni fog a megnyúlás növekedése miatt, viszont állandó elmozdulás esetén a képletéből adódóan csökkenni fog a feszültség csökkenése miatt.



4. ábra Disszipált energia változása különböző vezérlések esetén

Az ábra azt is megmutatja, hogy az azonos keveréknek feszültségvezérelt mód esetén nagyobb lesz a disszipált energia változása (ΔW) a tönkremenetelig, viszont alacsonyabb ciklusszámnál bekövetkezik a tönkremenetel, mint állandó megnyúlás esetén.

A Wöhler görbe y tengelye az irányított terhelés módjától függ, így mindig a különböző terhelési szintek értékét kell felvenni, ha alakváltozásvezérelt a terhelés, az általunk megadott állandó megnyúlás értékét. Ha feszültségvezérelt, akkor az állandó feszültségértéket kell felvenni. Az x tengelyen mindig az y tengelyen felvett értékhez tartozó ciklusszámot vesszük fel. Mindkét tengelyt logaritmikus skálázással ábrázoljuk. Mindkét vezérlési mód esetén a Wöhler-görbe képe azonos. Az ITT vizsgálat során (melyet állandó feszültségű terheléssel végzünk) többféle módszerrel is megadható a fáradási egyenes.

IV. Szabvány

A fáradási vizsgálatokat leíró magyar Szabvány az MSZ EN 12697-24 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverék vizsgálati módszerei. 24. része a Fáradási ellenállás. Ez a szabvány az európai EN 12679-24:2004 szabvány magyarra lefordított megfelelője.

A fáradási ellenállás vizsgálatára több eljárás is alkalmazható. A magyar szabvány öt különböző alternatívát ajánl fel a vizsgálatra, ezek a következők: kétpontos hajlítóvizsgálat trapezoid alakú próbatesten, kétpontos hajlítóvizsgálat hasáb alakú próbatesteken, hárompontos hajlítóvizsgálat hasáb alakú próbatesteken, négypontos hajlítóvizsgálat hasáb alakú próbatesteken és a hasító-húzó vizsgálat henger alakú próbatesteken. Ezek a vizsgálatokat tömörített aszfaltanyagon, szinuszos vagy más vezérelt terheléssel végezhetőek. A szabvány nem ír elő adott vizsgálatot, úgy fogalmaz: „a vizsgálati körülmények pontos megválasztása a használt eszköztől és annak működésétől függ”. Azonban azt is leírja, hogy „a különböző vizsgálati módszerekkel kapott eredmények nem biztos, hogy összehasonlíthatók”¹⁹.

A különböző vizsgálatok különböző alakú próbatesteket írnak tehát elő, ugyan az anyag mechanikai tulajdonságai nem változnak a geometriai különbségek által, azonban a más inercia, és különböző típusú terhelések következtében, ugyanarra a keverékre egész más fáradási értékeket kaphatunk. A próbatestek készülhetnek zsirátorral vagy szegmens tömörítővel, így már a tömörítés módja is különböző mértékű. Az aszfaltkeverék készülhet laboratóriumi körülmények között, ömlesztett mintából egyenesen a keverőtelepről. Minden esetben ügyelni kell rá, hogy a vizsgálatához előírt tömeg rendelkezésre álljon a melegítés után.

A szabványban nem szerepel, hogy a hasító-húzó vizsgálatot Marshall-próbatesten kell végezni, aminél ha nem fűrt minta fárasztása történik, akkor acélütős döngölővel kell készíteni. A keveréket a tömörítés előtt három órán keresztül a szárítószekrényben maximum 130°C-on kell tárolni. Az összeszerelt tömörítő forma aljára szűrőkorongot kell rakni, majd ezt követően a szétosztályozódás elkerülésére figyelve betöltésre kerül az anyag a formába egy tölcse segítségével. Mielőtt megkezdődik a tömörítés, a keverék felszínét el kell egyengetni és egy szűrőkorongot kerül rá. A tömörítő fejet leengedve, behelyezésre kerül a formába, és ezt követi a tömörítés folyamata. 55-60 másodpercen keresztül tart a tömörítés, pontosan 50 ütessel. Ezután a tömörítő hengert meg kell fordítani és a henger másik alapja irányából érkező ütésekkel is el kell végezni a tömörítést.

Tömörítést követően az próbatestek sűrűségét meg kell határozni az erre vonatkozó szabványnak megfelelően.²⁰ A próbatest sűrűségének meghatározásakor először meghatározásra kerül a próbatest száraz tömege, majd ismert hőmérsékletű, és ezáltal ismert sűrűségű vízfürdőbe merül úgy, hogy teljesen ellepje a víz. Addig marad benne, amíg a

¹⁹ MSZ EN 12697-24 Aszfaltkeverékek fáradási ellenállása

²⁰ MSZ EN 12697-32 Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei

hézagok nem telítődnek teljesen vízzel, és a tömeg állandósul, ez a szabvány ajánlása szerint minimum 30 perc. Amikor ez bekövetkezik, a telített próbatest tömegét víz alatt le kell mérni, figyelve arra, hogy a felületéhez légbuborékok ne tapadjanak, illetve a mérés alatt ne távozzanak. Ezt követően a telített próbatestet ki kell emelni a vízből, bőr törülőkendővel a felületéről a vízcseppek letörlésre kerülnek, majd azonnal a levegőn is meg kell mérni a tömegét.

A szabvány különböző eljárásokat is ajánl, például bevont próbatest esetén, azonban mivel a vizsgálataim során ezt a módszert használtam, nem tartom szükségesnek a többi módszer teljes leírását.

V. Vizsgálatok

V.1. A felhasznált keverék

Az általam vizsgált próbatestek anyagának megnevezése: AC 22 kötő (F) 50/70. A keverék pontos összetételét az 1. számú táblázatban ismertetem. A kötőréteg aszfaltbetonok tervezési követelményeit az e-ÚT 05.02.11-2010 szabvány 5. táblázata (15. oldal) adja meg. E szerint az én keverékemhez fáradási határérték nincs megadva követelménynek (NR), azonban szükséges fáradási vizsgálatot végezni, és annak az eredménye megadandó a vizsgálati jelentésben.²¹ A dolgozatom céljából több fáradási vizsgálati módszert is használtam ezen a keveréken, ezeknek az eredményeit, az elvégzett vizsgálatok leírása során a későbbiekben ismertetem.

Keverék alkotóanyagai és összetétele				
Kőanyag	Származási hely	Sűrűség [Mg/m³]	kőanyag [m/m%]	össz. [m/m%]
ML- mészkő	Tatabánya	2.705	7.0	6.7
NZ 0/4 - dolomit	Iszkaszentgyörgy	2.810	26.0	24.9
NZ 4/11 - dolomit	Iszkaszentgyörgy	2.830	25.0	24.0
NZ 11/22 - dolomit	Iszkaszentgyörgy	2.830	42.0	40.4
Testsűrűség kőanyag		2.808	100.0	
Bitumen				
50/70		1.020		4.0

²¹ e-ÚT 05.02.11-2010 Útügyi Műszaki Leírás Útépítési aszfaltkeverékek Aszfaltbeton

1. táblázat A keverékek összetétele

Minden keverékhez kötelező típusvizsgálat készítése, melynek során vizsgáljuk az aszfalt alkotóanyagainak megfelelőségét. A keverékemhez tartozó típusvizsgálat eredményeit a 2. számú táblázat tartalmazza. A keverék minden vizsgálati kritériumnak megfelelt.

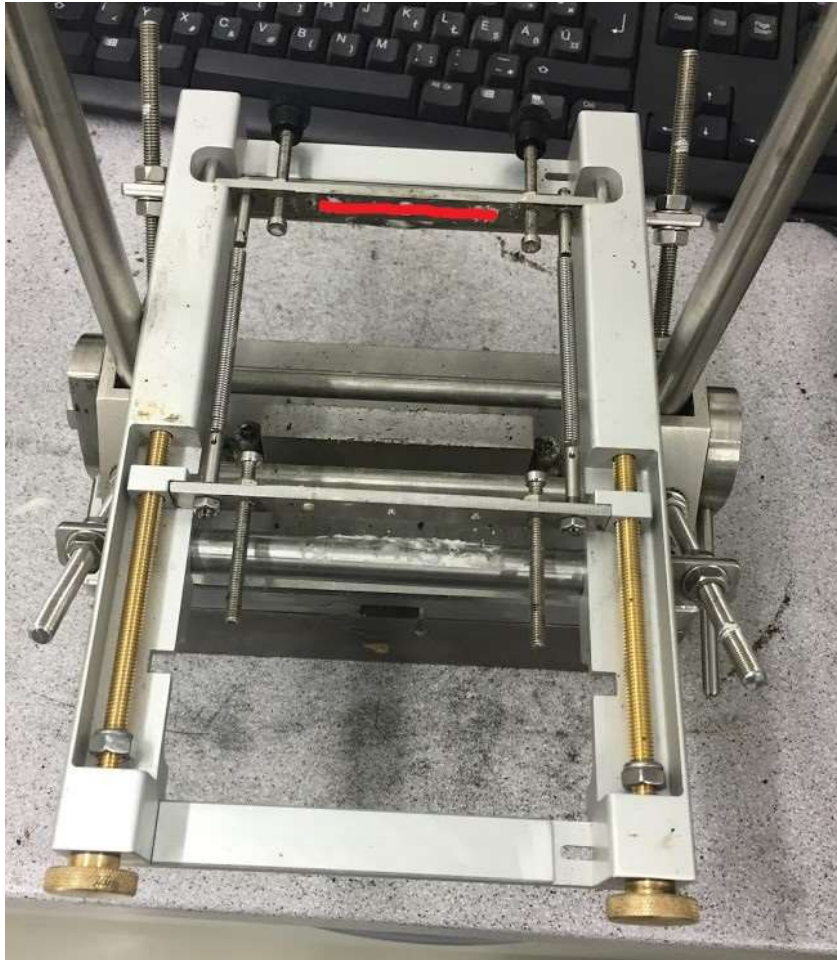
Típusvizsgálat eredménye					
Vizsgálat	Jel	Szabvány/eljárás	Érték	Mért.e.	Előírt érték
Oldható kötőanyag-tartalom	S	MSZ EN 12697-1:2012	3.8	m/m%	≥3.0
Keverék hézagmentes testsűrűsége	ρ_{mv}	MSZ EN 12697-5:2010	2633	kg/m ³	
Kőzet hézagmentes testsűrűsége	ρ_a	számított	2.8	Mg/m ³	
Testsűrűség	$\rho_{t\ ssd}$	MSZ EN 12697-6:2012	2501	kg/m ³	
V _m hézagtartalom	V _m	MSZ EN 12697-8:2003	5.0	V/V%	3.0 - 5.0
Köváz befogadó hézag	VMA	MSZ EN 12697-8:2003	14.3	V/V%	
Kötőanyag-telítettség	VFB	MSZ EN 12697-8:2003	65.2	%	
Vízérzékenység	ITSR	MSZ EN 12697-12:2009 A módszer	81.6	%	≥70.0

2. táblázat Típusvizsgálatok eredményei

V.2. Hasító-húzó fárasztási vizsgálat henger alakú próbatesten

Az ITT (Indirect Tensile Test) vizsgálatot a TPA HU Kft. Budapesti egységének laboratóriumában végeztem. Azonos ömlesztett aszfaltmintából készültek mindkét vizsgálatához a próbatestek. Az ITT vizsgálatához 100 mm átmérőjű Marshall-tömörítéssel készült próbatesteket készítettünk. A szabvány azt mondja, hogy a próbatestnek legalább 40mm vastagságúnak és 100±3 mm átmérőjűnek kell lennie, ha 25 mm legnagyobb szemmagyságú aszfaltból készítjük, vagy 60 mm vastagságúnak és 150±3 mm átmérőjűnek kell lennie, ha az ásványi anyag legnagyobb szemmagysága 38 mm. A tömörítést követően a próbatesteket két hétig pihentettük, majd ezt követően kezdődtek meg a vizsgálatok. A próbatesteket a vizsgálat előtt szabályozott hőmérsékletű termosztátszekrénybe tettem, aminek a hőmérsékleti szabályozó rendszere maximum 1°C eltéréssel képes szabályozni a hőmérsékletet, és legalább

4 órát hagytam ott minden esetben 20°C-on temperálódni. A ragasztás előtt minden esetben lemértem a próbatest tömegét, és geometriai méreteit az MSZ EN 12697-29-es szabvány szerint.



5. ábra Beállító eszköz

A 5. ábrán látható beállító eszköz segítségével tudjuk a Marshall-próbatestet beragasztani a keretbe.

A szerkezetbe be kell tenni a keretet, majd az ábra alján látható csavarokkal addig nyújtjuk a keret rugóit, amíg hely marad a ragasztó felkenéséhez az alakváltozási élre, úgy, hogy közben a próbatest is beférjen. A ragasztót a piros csíkkal jelzett részre, és azzal párhuzamosan a keret másik oldalára is fel kell helyezni. Ezután beállítjuk az aszfalt próbatestet a keret közepébe vigyázva, hogy az útdóknak kétoldalt maradjon hely (6. ábra). Volt olyan ragasztás, amit meg kellett ismételni, mivel a jeladók nem fértek el. Ezt követően a csavarokat visszaállítva eredeti helyzetükbe a ragasztó pontosan az átmérő síkjában fogja elérni a próbatestet, kicsit rászorítjuk a keretet, és visszatesszük temperálódni és száradni a

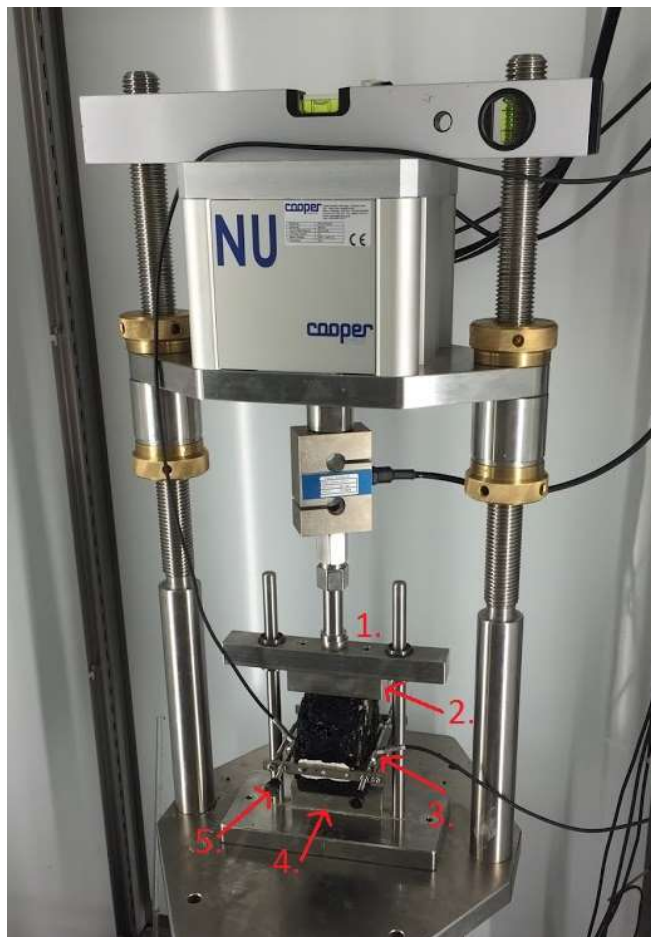
termosztátszekrénybe. A ragasztás megszáradására minimum két órát kell hagyni, ezt követően, ha nem mozdulnak el az alakváltozási élek a próbatestről, meg lehet kezdeni a vizsgálatot.



6. ábra Beragasztott próbatest

A vizsgálatot Cooper készüléken, a Dymension nevű programmal végeztem. Miután megszáradt a ragasztás, behelyeztem a keretet és a próbatestet az alsó hasítóéltre. A hasítóélek alul és felül fogják közre a próbatestet, konkáv felületűek és legömbölyített élűek. A legömbölyítés ívsugara a vizsgálati próbatest sugarával egyenlő. A hasítóéleknek rendre 100 mm-es és 150 mm-es átmérőjű próbatestekhez 12,6 mm és 19,1 mm szélességűnek kell lenni $\pm 0,2$ mm lehet az eltérés.^[1] Az alakváltozási élekhez rögzítjük az alakváltozást mérő jeladókat.

Ezeknek 10 mm magasnak, 2 mm vastagnak és 80 mm hosszúságúnak kell lennie. A kialakítása a vizsgálati próbatetest ívsugarával megegyező sugarú. Az élek pontosan a vízszintes átmérő síkjában helyezkednek el, egymással szemben. Az éleket ragasztóval erősítjük a próbatesthez, és egy rugó köti össze. A jeladók a vízszintes átmérő síkjában mérik az alakváltozási élek távolságának változását. A felső él golyós perselyes rudakra van szerelve, a terhelő cella egy félgömb vízszintes felén keresztül adja át a terhelést.



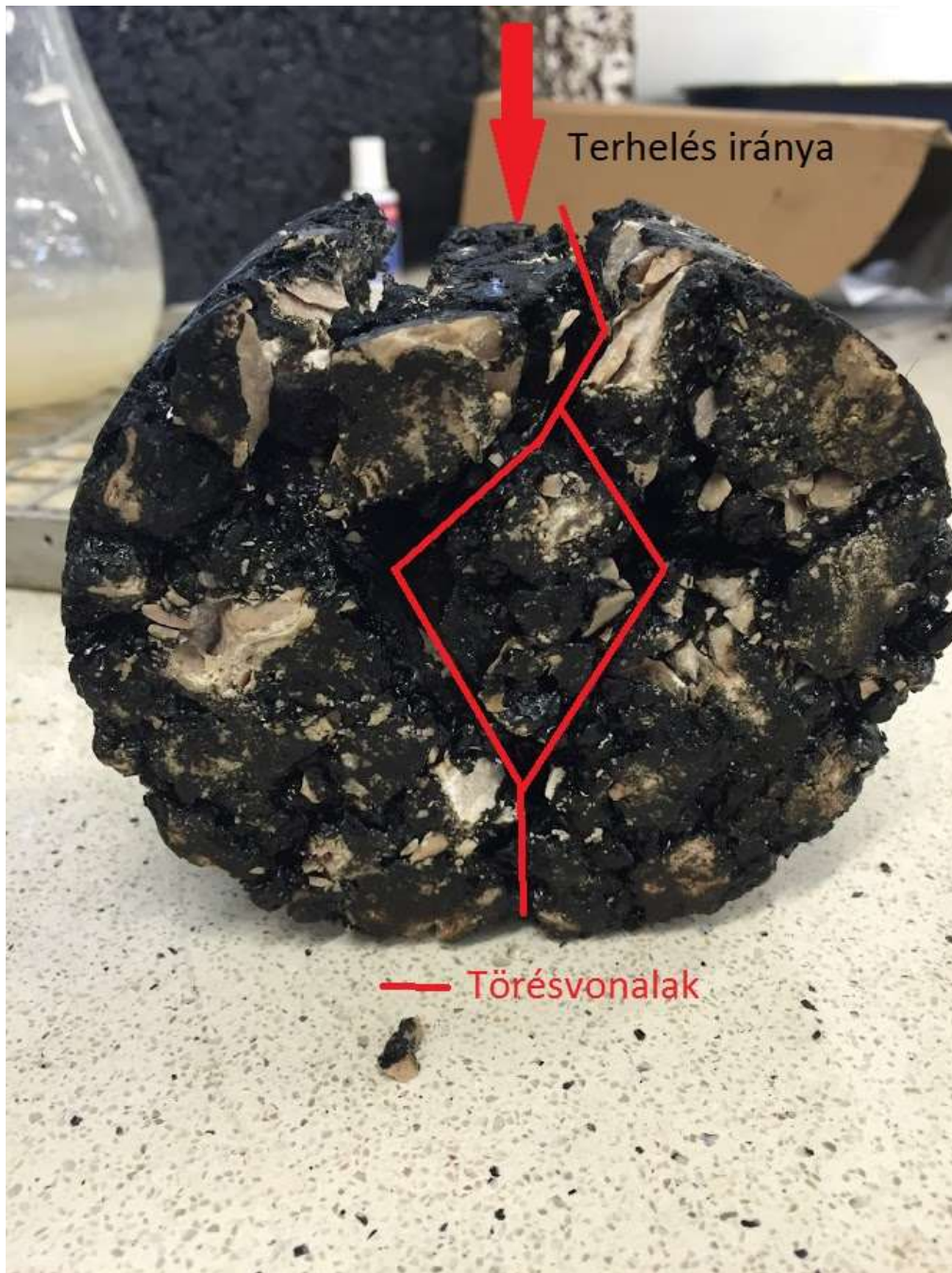
1. terhelő cella
2. felső hasítóél
3. nyúlásmérő
4. alsó hasítóél
5. jeladók értékszabályozója

7.ábra ITT vizsgálat

A próbatest beállítása után be kell állítani a programba a terhelést, a próbatest méreteit, illetve létrehozni kíván állandó feszültséget. Vizsgálataim során 150, 175, 200, 225 és 250 kPa feszültségszinteken terheltem a próbatesteket. Összesen 14 ITT vizsgálatot végeztem. Egy nap csak egy vizsgálatot tudtam- többségében- elvégezni, mivel csak egy keret volt, így a vizsgálat lejárata után tudtam csak a következő próbatestet beragasztani, és persze a kötési idő is elég hosszú volt. Mivel a fárasztás beállított feszültségszintjétől erősen függ a tönkremenetel, a különböző szinteken történő fárasztás egészen eltérő vizsgálati időket adott. A legmagasabb

250 kPa-os feszültség szinten 2-3 óra alatt, vagy akár kevesebb idő alatt is lefolyt egy vizsgálat, azonban 150 kPa-os feszültség szinten még 12 óra alatt sem feltétlenül. A próbatestek fárasztására azok tönkremeneteléig került sor.

A vizsgálat során, a próbatestet félszinuszos lüktető nyomóterheléssel fárasztjuk, ciklusonként 0,1s terhelési idővel és 0,4s pihentetési idővel. A ciklusonkénti terhelésnek az a tulajdonsága, hogy pihenési időt is tartalmaz, jól modellezi az egységtengelyek áthaladását az adott keresztmetszeteken. A gépjárművek kerekei is csak abban a pillanatban terhelik az aszfalt keresztmetszetét amikor áthaladnak rajta, a következő kerék érkezéséig nem éri az anyagot terhelés. A második kerék és a következő gépjármű érkezése között is eltelik valamennyi idő, tehát ugyanaz a mechanizmus vonatkozik ebben az esetben is a fáradásra. A terhelés hatására egyenletes függőleges húzófeszültség keletkezik a terhelés irányára merőlegesen, és a függőleges átmérő mentén. A tönkremenetel a feszültségek összeadódásával, a függőleges átmérő síkjában történt minden esetben. A nagy szem nagyságú kőanyagok persze gyakran torzították a törésképet. A következő ábrán az 5. számú vizsgálat próbatestjét láthatjuk, melyen a törésvonalakat kiemeltem. Jó látható, hogy a közepén lévő egybefüggő nagyobb szemek a törésvonalat eltorzították, de ha összegezzük, a tönkremenetel elsősorban a függőleges síkban következett be. Az ábrán azonban a merőleges törésvonalak is jól láthatóak.



8. ábra Tönkrement próbatest

A vizsgálatot a $100 \mu\epsilon$ - $400 \mu\epsilon$ (Microstrain) közötti megnyúlás tartományban kell végezni, hogy a vizsgált anyag fáradási élettartama $10^3 - 10^6$ -on nagyságrendű ismétlésszám között legyen. Ezt sikerült a vizsgálat során teljesíteni. A szabvány előírja, hogy 250 kPa feszültség szinten kell kezdeni a vizsgálatot, mivel az gyakorlatilag mindenféle keveréknél mértékadónak tekinthető. Nálam a keverék tulajdonságaiból adódóan, a 250 kPa feszültség a

maximális szint volt, amin fárasztottuk, mivel azon 10^3 nagyságrendű ismétlésszámok adódtak, 3000-5000 ciklus környékén ment tönkre a próbatest.

A következő táblázatban ismertetem az ITT vizsgálatom leglényegesebb eredményeit.

Vizgált próbatest jele	feszültség szint (σ) [kPa]	ε (Microstrain)	ciklus (N)	Merevségi modulus [Mpa Mpa]
1	225	600.3	5976	2.702268
2	250	604.7	3107	2.42511
3	200	383	4887	2.651625
4	200	444	16763	1.799051
5	225	509	4890	2.43598
6	175	371	14385	3.11666
7	175	391	8338	2.583483
8	250	545	2328	2.291299
9	200	555	5357	2.426274
10	200	379	6003	2.608014
11	150	258	53938	3.062325
12	150	320	43141	3.207353
13	225	762.62	3524	2.36518
14	250	830.2	1676	1.918411

3. táblázat ITT eredmények

A 4. vizsgálatnál olyan eltérés látszik, ami alapján feltételezem, hogy valami vizsgálati hiba történhetett, ezért ezt az eredményt a későbbi fáradási görbénél nem vettem figyelembe. A legalacsonyabb 150 kPa-os feszültség szinten 40-50000 közötti ciklusszámokat láthatunk. A gép a ciklusszám számolásával addig megy, amíg le nem kapcsoljuk, tehát jóval több adatot kapunk a gép által lementett file-ban, mint amennyire szükségünk van. Azonban jól elkülöníthető mind grafikonon ábrázolva, mind az adathalmazban, a tönkremenetel pontja. A vizsgálat előrehaladtával, folyamatosan nőtt az alakváltozás (ε, Microstrain), amíg el nem fáradt az agyag. Megkerestem azt a maximális alakváltozás értéket, ami után hirtelen elkezdett rendszertelenül csökkenni, mivel ugye az útdó a szerkezeti tönkremenetel hatására elmozdult vagy akár ki is esett, és az alakváltozás érték rendszertelenül változott.

A 3. táblázatban a különböző próbatestek tönkremeneteli ciklusszámát, és az ahhoz tartozó alakváltozást, illetve merevségi modulusot tehát a fáradási egyeneshez használt legfontosabb adatai találhatóak meg. A fáradási egyeneshez szükséges pontokat két különböző módon is

felvehetjük a szabvány szerint. Mindkét esetben az ITT vizsgálat során általunk megadott paraméter, a feszültség szint lesz a pont, y koordinátája. Az x koordináta lehet a tönkrementeli ciklusszám, vagy a 100. ciklushoz tartozó merevségi modulus. Mindkét érték ugyanazokat a mért adatokat használja, így közel azonos korrelációval adja meg a fáradási egyenest. Az ismétlésszámot és a feszültség szintet is logaritmikusan ábrázoljuk, az így kapott pontokra illesztett egyenes lesz a fáradási egyenesünk. A fáradási egyenest arra használjuk, hogy azt meghosszabbítva, megállapíthatjuk az egy milliomodik ciklusszámhoz tartozó merevségi modulus vagy alakváltozást. Ez a pályaszerkezet méretezés során lesz mértékadó.

V.3. Négypontos hajlítóvizsgálat hasáb alakú próbatesten

Hazánkban a leggyakrabban használt fáradási vizsgálat a négypontos hajlítóvizsgálat. A vizsgálat onnan kapta a nevét, hogy egy hasáb alakú próbatestet, szimmetrikusan 4 pontban rögzítve a próbatestet fásasztjuk, a két belső befogón. A próbatestet periodikus szinuszos hajlításnak vetjük alá, állandó fajlagos nyúlást létrehozva a két középső befogó között. A vizsgálat ezért az ITT vizsgálatától eltérően elmozdulásvezérelt lesz. A vizsgálatok a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Karának Pályaszerkezeti Laboratóriumában készültek. A vizsgálni kívánt próbatesteket aszfalt lapokból kell kivágni. Laboratóriumi körülmények között a lapokat szegmens tömörítővel tömörítjük, a lap vastagsága a szabványnak megfelelően legalább a megkövetelt H magasság plusz 20 mm-nek kell lennie. A tömörítést követően 2 hétig pihentettük az aszfalt lapokat, majd ezt követően következett a vágás. A kivágott próbatest szélességi és hosszúsági mért legnagyobb és legkisebb értékének különbsége maximum 1 mm lehet, a mért magasság legkisebb és legnagyobb értékének legnagyobb eltérése maximum 2 mm lehet (7. ábra). A hasábokat az aszfaltlap közepéből kell kivágni, de legalább 20 mm-re a tábla szélétől. A próbatestnek mindegyik hosszmenti oldalának vágottnak kell lennie. A négypontos vizsgálat során elvileg lehet beépített aszfaltból vett, hengerelessel tömörített mintát fásasztani. Mivel az útból kivágott aszfaltréteg nem feltétlenül felel meg a vastagsági követelményeknek, ebben az esetben a jegyzőkönyvben kell jelezni a szabvány mérettől való eltérést. Ha beépített aszfaltot szeretnénk ezzel a vizsgálattal fásasztani, sokkal nagyobb lesz a roncsolás a nagy aszfaltlap kivágása által, és emiatt a helyreállítási igény is, mint az ITT vizsgálat során kivágott 100 mm-es vagy 150 mm-es átmérőjű fűrt minta esetén. Ezért beépítésből vett minta esetén, sokkal előnyösebb a hasító-húzó fásasztóvizsgálat elvégzése.

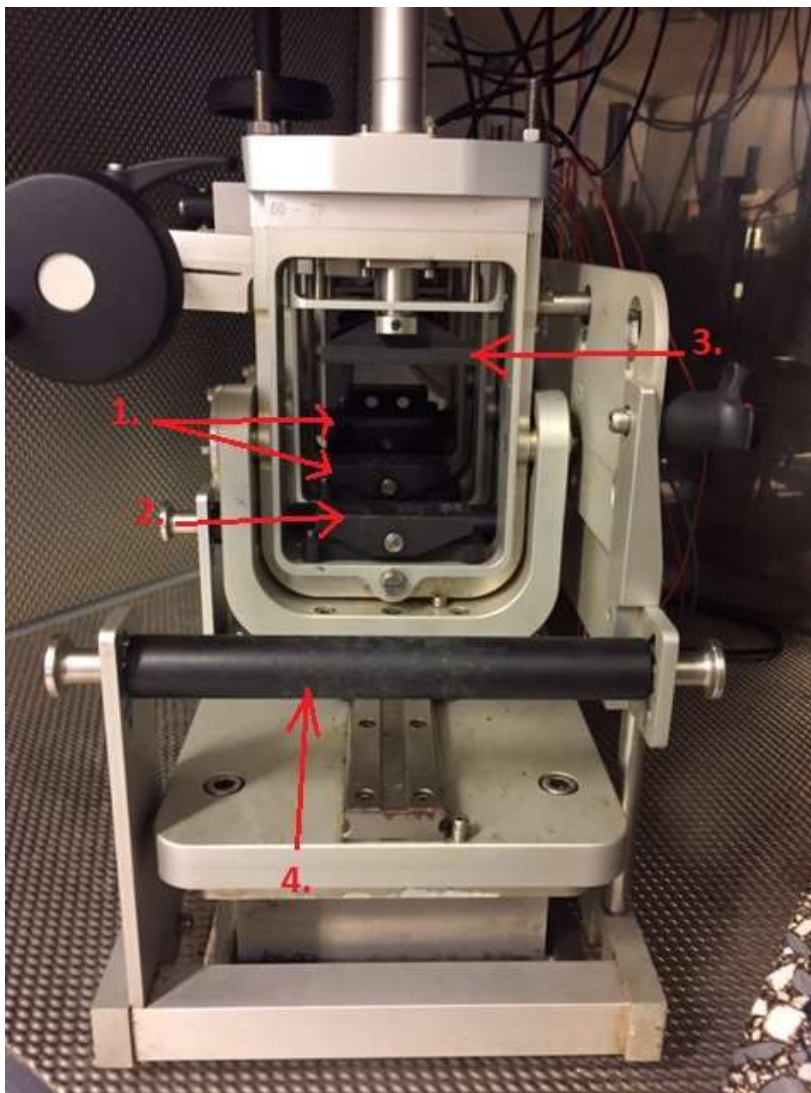


9. ábra Próbatest négy pontos hajlítóvizsgálathoz

A próbatesteket a vágást követően 15-25°C közötti hőmérsékleten tömegállandóságig szárítottuk. A vágást követően, 2-8 héten belül el kellett végezni a vizsgálatot. A hasáb méreteit az MSZ EN 12697-24-es szabvány szerint nóniuszos tolómérővel, egy tizedes pontosságra kellett lemérni, a befogók helyén. A mintákat szigorúan fektetve szabad tárolni, egyenletes tiszta felületen, úgy, hogy egymásra nem tehetők. A hasábot többféle módon lehet rögzíteni a vizsgálathoz. Van olyan gép amelyhez kapszokat kell ráragasztani a befogások helyén, és azok segítségével lehet a próbatestet rögzíteni. A BME Útpályaszerkezetek laboratóriumának olyan műszere van, amihez nem szükséges ragasztás, a szerkezetbe a befogók be vannak építve és automatán rögzítik a próbatestet.

A vizsgálat során nagyon fontos a hasáb tökéletesen szimmetrikus elhelyezése a befogók között úgy, hogy a hasáb hosszmenti geometriai középpontja, a két belső befogó között legyen középen. A 10. ábrán jól láthatóak a befogók a próbatest behelyezése irányából. Nagyon fontos, hogy a befogók úgy vannak beállítva, hogy minden alátámasztásnál lehetővé teszik a szabad elfordulást és elmozdulást. A szinuszos terhelést függőlegesen adjuk két pontban a két belső befogóra. A két pont terhelési értéke azonos. A lehajlást mérő útdó a középső keresztmetszetben van. Elrendezése szerint négy pontban nem képes elmozdulásra a próbatest, egy állandó nyomatékot ad, ami pedig állandó értékű megnyúlást okoz. Ezért nevezzük ezt a

vizsgálatot alakváltozásvezéreltnek, hiszen állandó értékű periodikus elmozdulásokkal terheljük a próbatestet. A fárasztási vizsgálat kezdete előtt a termosztátszekrényt legalább egy órával korábban beállítottuk a 20°C-os vizsgálati hőmérsékletre. A terhelés f_0 frekvenciája minden vizsgálatnál 30 Hz volt, hogy a szabványnak megfelelően 0-60 Hz közé essen, 0,1 Hz pontossággal. Ez a mérés addig tart, amíg a kezdeti merevség a felére nem csökken, tehát nem a szerkezeti tönkremenetelig mint az ITT-nél. A mérés eredményeiből a kezdeti merevség 50%-ához tartozó ciklusszám, illetve a fázisszög, és az alakváltozás a számunkra fontos kimeneti adatok.



1. két középső alsó befogó
2. szélső alsó befogó
3. szélső felső befogó
4. görgő a próbatest behelyezéséhez

10. ábra Négyponos vizsgálóberendezés

Az erőmérő cella vizsgálati tartománya legalább ± 2000 N. Az elmozdulás mérését a próbatest felső felületén a két belső befogó között végzi a berendezés LVDT segítségével.

A vizsgálat alatt a próbatest hajlításához szükséges terhelést, a behajlást és e két jel közötti fáziskésést kell az idő függvényében mérni. A mérőeszközhöz csatlakozik egy adatrögzítő rendszer, egy számítógéphez kapcsolt digitális interface-egység, mely lehetővé teszi a mérés vezérlését, a nyúlási szintek, terhelési frekvencia beállítását, illetve a mérési eredmények rögzítését. A pontos mérés érdekében a rendszer előterhelést végez, így a beállított értékek könnyen ellenőrizhetővé válnak.²²

Vizsgált próbatest jele	ciklus (N)	Alakváltozás (μstrain)	Fázisszög (°)
1	18009	320	43.56423
2	679610	160	37.99367
3	1769381	160	40.20617
4	65848	240	42.28091
5	18222	320	44.08629
6	825865	160	38.09
7	933855	160	38.59917
8	1360007	160	38.25646
9	18957	320	42.69138
10	15559	320	41.76978
11	591853	160	38.06193
12	76008	240	39.99829
13	20446	320	41.92019
14	12974	320	42.12806
15	35821	240	38.30215
16	49580	240	39.80576
17	17359	240	36.64758
18	54448	240	4.28E+01

4. táblázat A négyponos vizsgálat fontosabb mérési eredményei

V.4. Egyéb fárasztási vizsgálatok a Magyar Szabványban

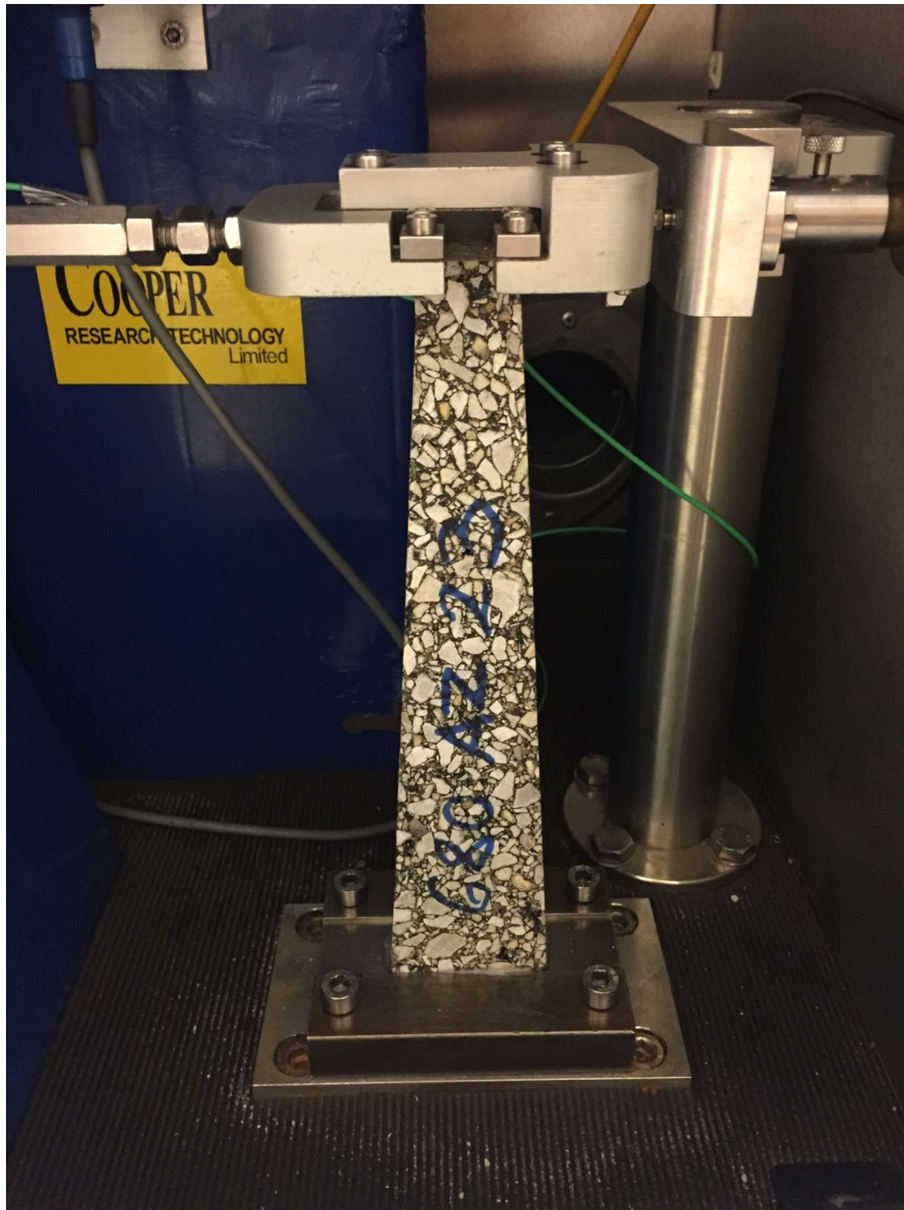
Az MSZ EN 12697-24 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei, 24. rész Fáradási ellenállás című szabvány öt különböző fajta vizsgálatot ajánl a fáradási élettartam meghatározására. A két legmodernebb vizsgálatot az ITT-t, illetve a Négyponos hajlítóvizsgálatot már ismertettem.

²² Aszfaltkeverékek fáradási tulajdonságainak meghatározása csökkentett mérési eredményszám alapján szerkesztett mestergörbe segítségével 2010, Ávár Vivien

A kétpontos hajlító vizsgálatok illetve a hárompontos hajlító vizsgálat elavultabb, eredményei sokkal gyengébb korrelációt mutatnak, ezért nem végeztük el a keverék vizsgálatát ezekkel a módszerekkel. Dolgozatom témájából adódóan szükségesnek tartom a további vizsgálatok ismertetését.

V.4.1. Kétpontos hajlító vizsgálat trapezoid alakú próbatesten

A trapezoid alakú próba testeket vagy laboratóriumi körülmények között készített vagy beépítésből kifűrt vagy kivágott lapokból kell kivágni. Három különböző méretben lehet elkészíteni ami a keverékek D szemnagyságától függ. A próbatesteket a nagyobbik alapjánál be kell ragasztani vagy elmozdulás nélkül más módon rögzíteni egy fém alaplapra. Ezzel egy befogást hozunk létre. A vizsgálatot addig nem szabad elkezdni, amíg a próbatest hőmérséklete nem érte el pontosan a vizsgálati hőmérsékletet, mivel a vizsgálat eredménye nagy eltéréseket mutathat különböző hőmérsékleteken. Maga a vizsgálat úgy történik, hogy a próbatest felső alapját szinuszos terheléssel mozgatjuk, egészen a tönkremenetelig. A reakcióerőket kell mérni a 100. s az 500. ciklusszám között $\pm 2\%$ pontossággal. A fajlagos nyúlást úgy kell megválasztani terhelési értéknek, hogy a nyúlás értékek logaritmikus skálán szabályosan elosztva legyenek. Az eredményeket a korábban ismertetett fáradási görbén kell ábrázolni.



11. ábra Kétpontos hajlítóvizsgálat trapezoid alakú próbatesten

V.4.2. Kétpontos hajlítóvizsgálat hasáb alakú próbatesten

Ezt a vizsgálatot hasáb alakú próbatesten végezzük, amit laboratóriumban készített vagy beépítésből származó lapokból kell kivágni minden esetben. A próbatest méretei a legnagyobb szemnagyságtól függően változnak a szabvány szerint. A próbatestet a trapéz alakú próbatesthez hasonlóan rögzíteni kell a vizsgálathoz, a felső lapját ragasztjuk a fém alaplaphoz. A vizsgálat előkészületei hasonlóak a többi vizsgálathoz, vágást követően minimum 2 hétig pihentetni kell, és a ragasztást követően legalább 1 órát kell temperálni a próbatestet, hogy

elérje a vizsgálati hőmérsékletet. A vizsgálat során a próbatest tetejét szinuszos elmozdulással mozgatjuk, aminek hatására a próbatestben húzófeszültség keletkezik. Ennek a feszültségnek a szintjét kell a vizsgálat kezdetekor beállítani. A feszültség szintet úgy kell megválasztani, hogy a tönkremenetelhez tartozó ciklusszám 104 és 106-on nagyságrendű értékek között legyen. A fáradási egyenest a próbatestben keletkező húzófeszültség és a tönkremeneteli ciklusszám által kijelölt pontokból lineáris regresszióval rajzolhatjuk fel.

V.4.3. Hárompontos hajlítóvizsgálat hasáb alakú próbatesten

Ez a vizsgálat vezérelt szinuszos elmozdulással terheli a próbatestet, három pontos hajlítással. A vizsgálati gerenda mérete $300 \pm 3 \text{ mm} * 50 \pm 3 \text{ mm} * 50 \pm 3 \text{ mm}$ -nek kell lennie. A gerendát az MSZ EN 12697-33 számú szabvány szerint kell laboratóriumi körülmények között előállítani. A vizsgálati hőmérséklet $20 \pm 1^\circ\text{C}$ -nak kell lennie, és a próbatestet a vizsgálat előtt legalább egy órát kell temperálni.

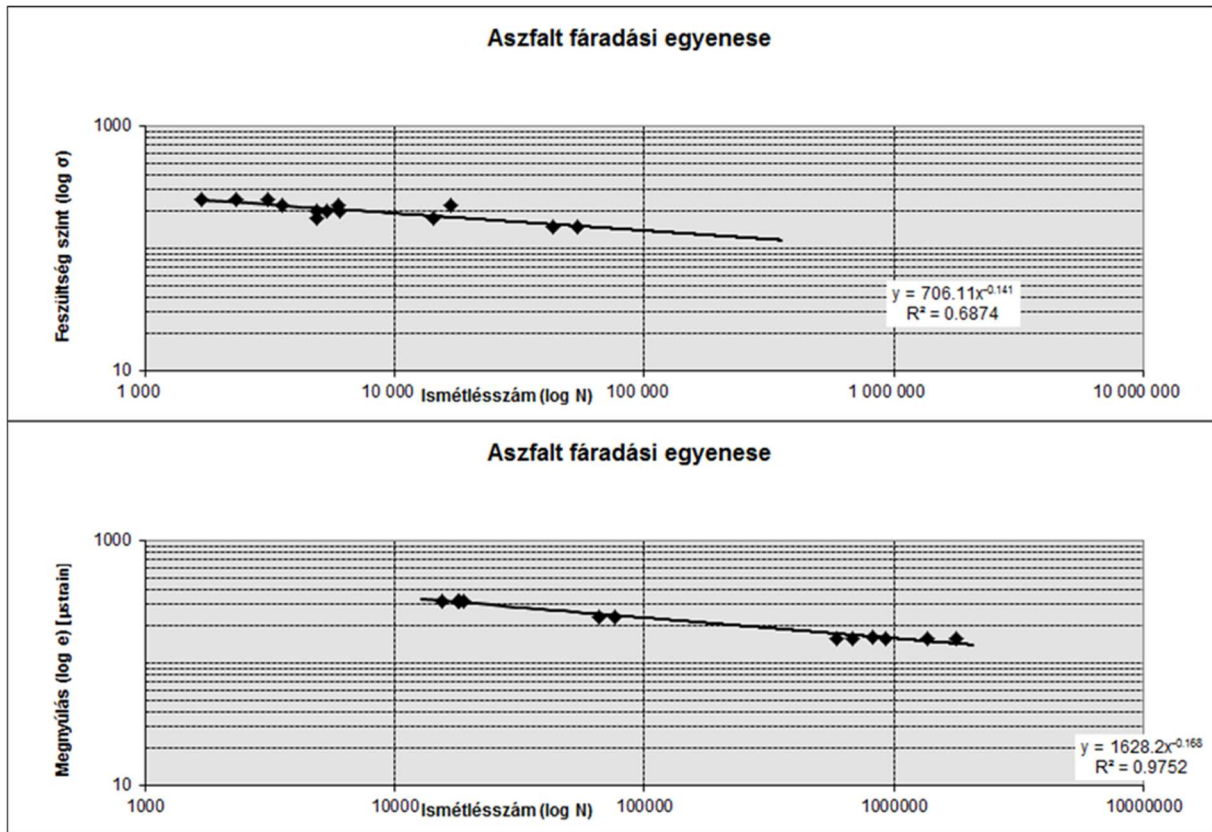
A próbatesteket négyzet keresztmetszvényű csövekkel rögzítjük a támaszmechanikához és a terhelő szeleprúdhoz. Az egyik csövet az egyik vágott oldal közepére ragasztjuk, a másik kettőt a vele szemben lévő vágott oldalra ragasztjuk. A csöveket a két támaszhoz és a rúdhoz szorítókkal vagy más eszközökkel rögzítjük. Fontos, hogy a támaszmechanika képes legyen a saját tengelyeinek mozgására és döntésére. A nyúlásmérőt a két cső között az oldal geometriai középpontjában kell elhelyezni.

A terhelés során a szeleprudat mozgatjuk szinuszos periodikus elmozdulással. A vizsgálatot állandó 10 Hz hullámfrekvencián kell végezni. A vizsgálat tönkremeneteli kritériumig kell folytatni, ami a kezdeti merevségi modulus felére csökkenéséig tart. A vizsgálat alatt a 200. ciklustól kezdve 500 ciklusonként kell a terhelési függvényt a nyúlásmérő jel és az elmozdulás függvényeit rögzíteni. Minden periódusra ki kell számolni a feszültséget és az alakváltozást. A feszültségfüggvény és az alakváltozás függvény fáziskülönbségét meg tudjuk határozni, majd a már meglévő adatainkból a III. fejezetben ismertetett módon ki lehet számolni a disszipált energiát.

VI. Vizsgálatok kiértékelése

VI.1. Fáradási egyenes

A vizsgálati adatokat a program szöveges dokumentumként adta ki, amit én importáltam át Excelben, hogy tudjak dolgozni az eredményekkel. Először mindegyik vizsgálatnak felvettem a fáradási egyenesét. Az ITT vizsgálat Wöhler görbáját a különböző terhelési szintekkel és a tönkremenetelhez tartozó ciklusszámmal adtam meg. Úgy választottam ki ezt a ciklust, hogy a megnyúlás ciklusonként változó értékét figyeltem. Az a pont, ahol a konstans növekedés trendje megállt és az érték hirtelen csökkenni kezdett, az a szerkezeti tönkremenetel időpontja. A fáradási egyenes megadható a 100. ciklushoz tartozó merevségi értékkel is a terhelési szint függvényében. Ezt is ábrázoltam, és közel azonos korrelációt kaptam a két egyenes esetén. Az $R=0.6897$ -es korreláció azt mutatja, hogy az eredmény nem pontos, a pontok elhelyezkedése nagyon szórt. Ennek úgy gondolom, az az oka - hiszen azonos a hiszterézis görbe deformáltságával-, hogy nem sikerült minden esetben a próbatestet tökéletesen középre behelyezni, és egy enyhe külpontosság keletkezett a terhelés során. A fáradási egyenes gyakorlati haszna, hogy a pontok alapján felvett egyenes képletéből, kiszámolható az egy milliomodik ciklusszámmal tartozó feszültség. Ezt vizsgálati módszerekkel több napon keresztül folyamatosan végzett fárasztással lehetne meghatározni, de ez alatt az idő alatt a hibák és külső hatások halmozódása okán az eredmény egyáltalán nem lenne megbízható. A négyponthoz a mérő eszköz eleve úgy van beállítva, hogy a vizsgálatnak akkor van vége, amikor a merevség eléri a kezdeti érték 50%-át. Ezért a négyponthoz tartozó ciklusszámot ábrázoltam, a beállított megnyúlás értékével. A következő grafikonok, a két általam végzett vizsgálat fáradási egyenesét ábrázolják. A négyponthoz tartozó vizsgálat korrelációja 0.9752 ami azt jelenti, hogy az egyenes jól illeszkedik az ábrázolt pontokra, a vizsgálat pontos.



2. grafikon A keverék fáradási egyenesei

A fáradási egyenes alapján számolt értékek:

$N=10^6$ -hoz tartozó cikluszám	101	Fáradási egyenes irányítványozója (p)	-0.139
---------------------------------	-----	---------------------------------------	--------

5. táblázat Az ITT vizsgálat fáradási egyenesének kiértékelése

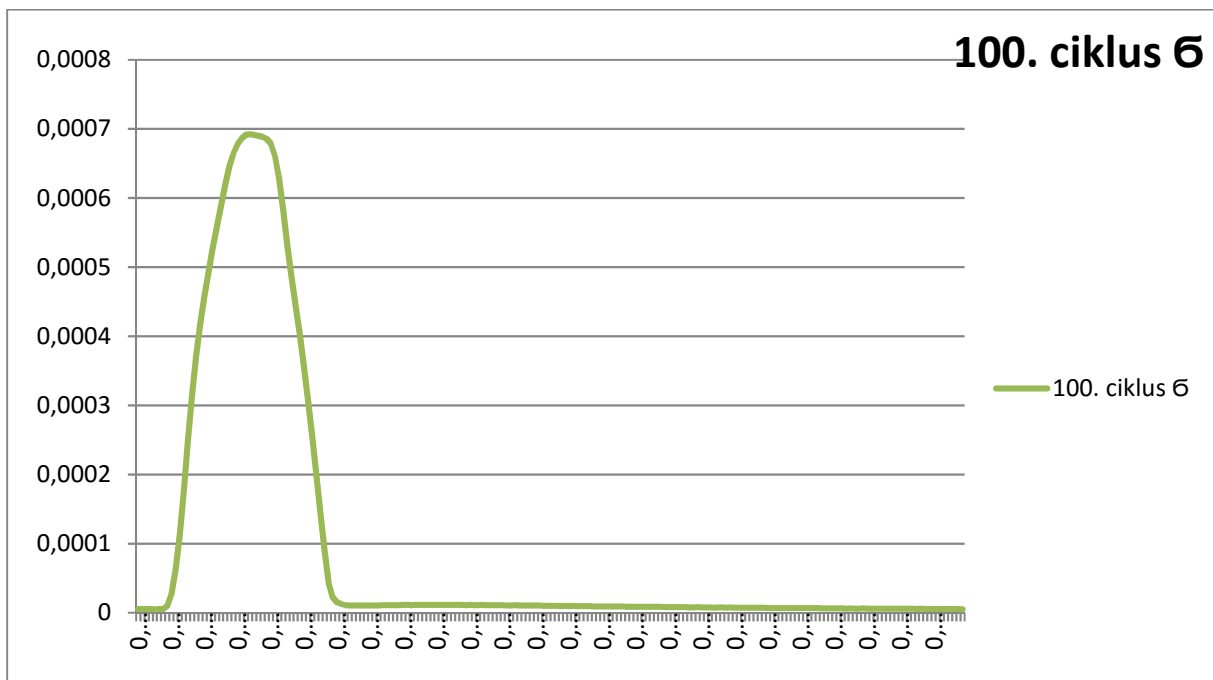
$N=10^6$ -hoz tartozó kezdeti megnyúlás (μ strain)	160	Fáradási egyenes irányítványozója (p)	-0.168
---	-----	---------------------------------------	--------

6. táblázat A négyponos vizsgálat fáradási egyenesének kiértékelése

VI.2. A két vizsgálat terhelése

A négyponos hajlítóvizsgálat és a hasító-húzó vizsgálat közti egyik legjellemzőbb különbség a terhelés módja. A négyponos vizsgálatnál szinuszos terhelést adunk a próbatestre a terhelő cellán keresztül, míg az ITT egy periodikus, de ismert függvénnyel nem meghatározható terhelést ad. A szinuszos terhelésnek az a jellemzője hogy szabályos szinusz görbék mentén halad, azonban gyakorlatilag periódusonként egy pontban lesz a terhelés 0 értékű. Ezzel ellentétben az ITT egy olyan periodikus terhelést ad át, melynek során az egy ciklus két részre van bontva. Egy ciklus az 0.5 másodperc, amit úgy bont fel, hogy az első egy másodpercben

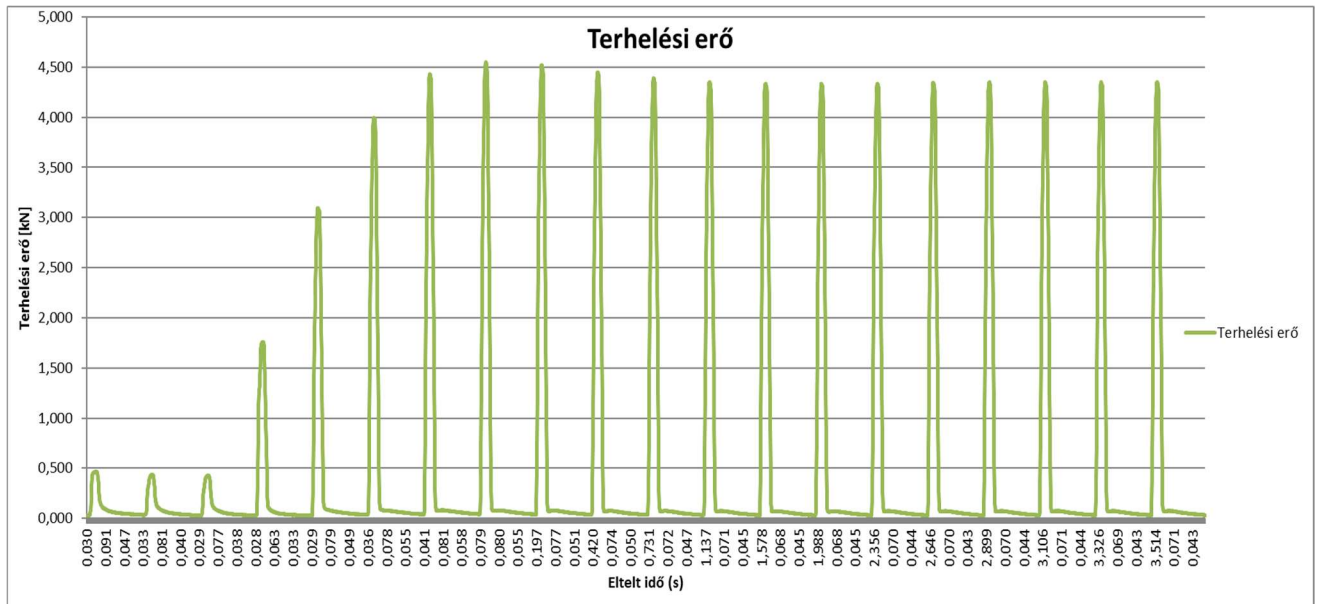
meredeken nő eléri a maximumát majd meredeken csökken a terhelés értéke. A maradék 4 másodpercben, a terhelés értéke a nullához konvergál, csak a lapterhelés értéke marad rajta. Ezáltal egy túszerű görbe jön létre minden periódusban. Ez a terhelésfajta sokkal jobban modellezi a forgalom haladásának hatását, hiszen az autó kereke is a másodperc töredékéig terheli a vizsgált keresztmetszetben, majd a továbbgurulással tehermentesítés történik és a következő kerék érkezéséig az aszfalt is „pihenhet”. Az ITT vizsgálatot végző eszközön be tudtam állítani, hogy egy cikluson belül 99 mérési pontot vegyen fel, így sikerült ezt a terhelési módot kimutatnom.



3. grafikon Egy ciklus terhelés/idő függvénye

Az alábbi grafikonon az 1. számú próbatest 100. ciklusának terhelés/idő függvénye látható.

Jól mutatja a ciklus terhelési lefutását:

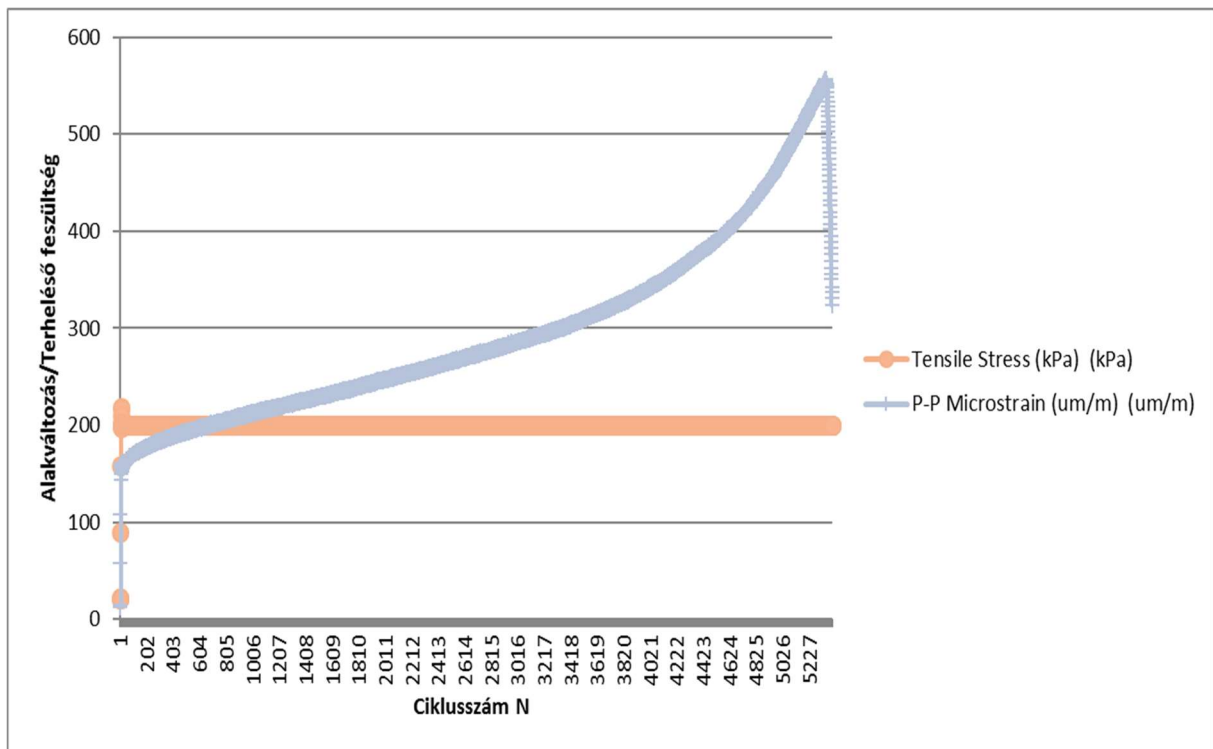


4. grafikon Az első 20 ciklus terhelés/erő grafikonja

A 4. számú grafikon az 1. számú próbatétel terhelését mutatja az idő függvényében az első 20 ciklusban. Jól látható hogy az első néhány ciklusban a gép még állítja a terhelési erőt, ezért különböző maximumai vannak, majd szép lassan beáll állandóra. Mivel a négyponos vizsgálat csak ciklusonként ad ki eredményt, ezért az egy cikluson belüli terhelési folyamatot azon nem tudtam bemutatni.

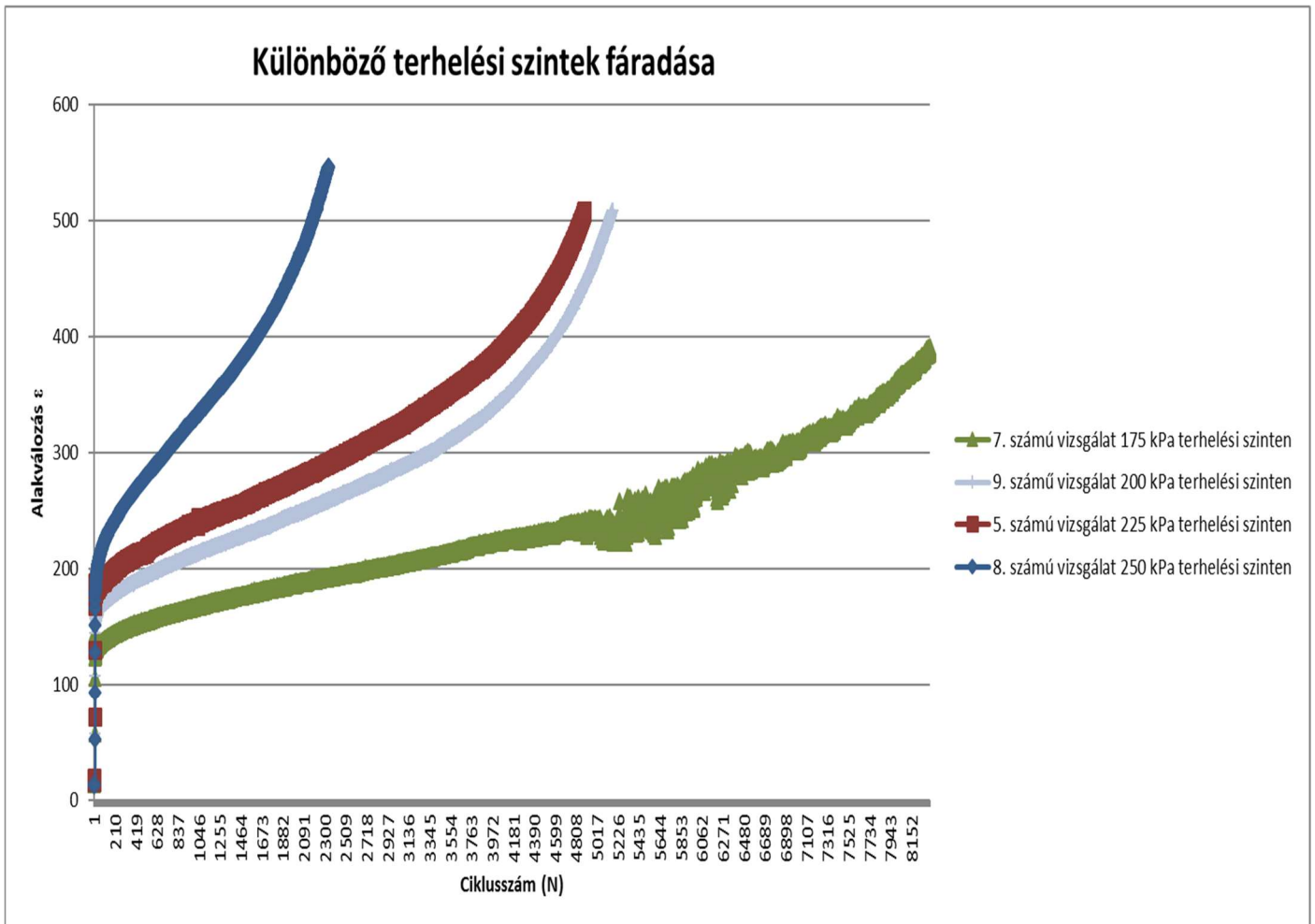
VI. 3. Különböző terhelési szintek eredményei

Minden vizsgálathoz készítettem egy alakváltozás/ciklusszám diagramot, amin jól látható a tönkremenetel időpontja, illetve a fáradás különböző fázisai a törésmechanikából. Az első szakaszon egy meredek érintővel indul el a fáradás folyamata, majd következik egy lineáris szakasz amikor a repedések nőnek. A harmadik szakaszon már a fáradás utolsó fázisa látható, amikor felgyorsul a folyamat a halmozódó belső feszültségektől, végül a próbatétel tönkremenetele a legnagyobb alakváltozással jár.



5. grafikon 9. vizsgálat Alakváltozás/ciklusszám

A grafikonon kézzel látható a megnyúlás egészen a tönkremenetelig, és narancssárgával a beállított terhelési szint, ami a 9. számú próbatétel esetében 200 kPa volt. Jól látszik, hogy az első pár ciklusban még nem állt be 200-ra, kellett a gépnek egy kis idő hozzá. Sikertelt a vizsgálataim során kimutatnom, hogy azonos keverék esetén minél magasabb szinten terheljük a próbatételt, annál korábban tönkremegy. Viszont a magasabb terhelési szintekhez magasabb végső alakváltozások tartoznak. A következő grafikonon négy különböző terhelési szinten lefutott fáradást ábrázoltam, ami ezeket az állításokat igazolja.

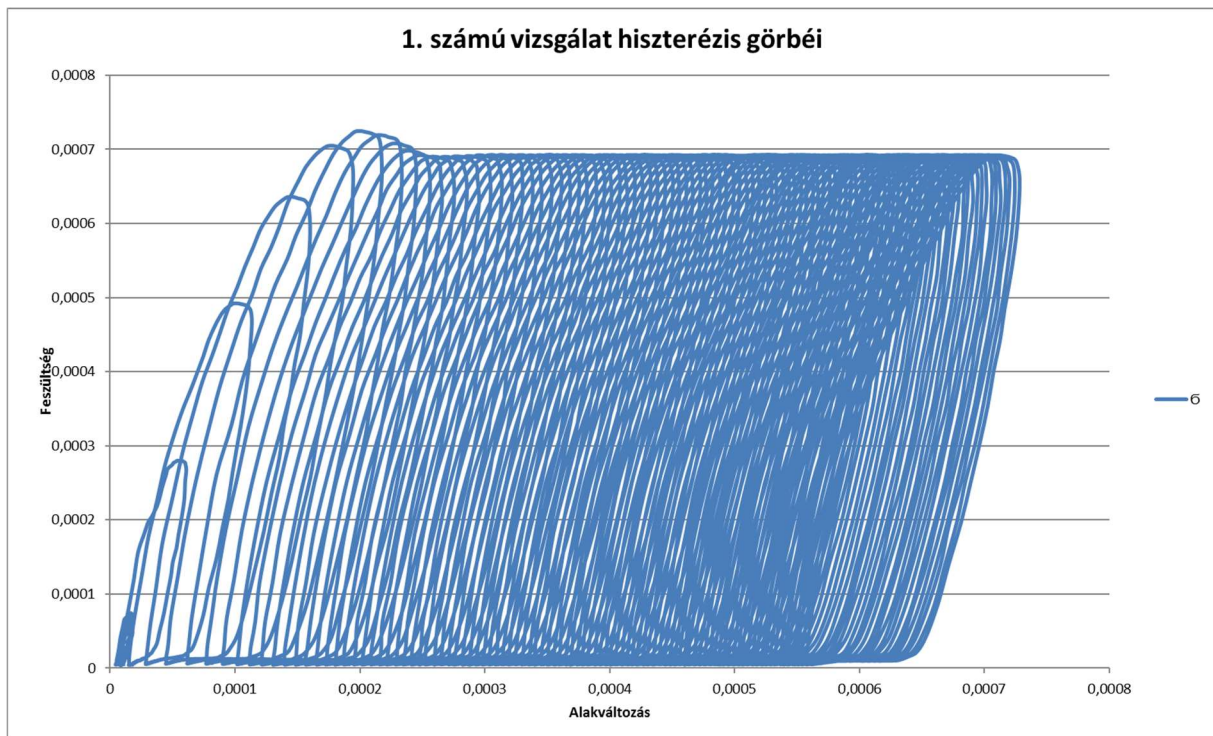


6.grafikon A különböző terhelési szintek fáradása

A 7. vizsgálatnál 175kPa feszültség szinten látható hogy a grafikon a második inflexióváltásnál ugrál, ennek az okát csak feltételezni tudom, hogy a belső feszültség olyan kis mértékben változott a terhelés hatására, csökkent a változás sebessége.

VI.4. Disszipált energia

Mivel az ITT vizsgálatoknál tudtam a ciklusokon belül a fázisszögeket számolni, ezért csak ennek a vizsgálatnak tudtam a disszipált energiáját kiszámolni. Kiszámoltam a vizsgálati eredményekből a feszültség és az alakváltozás értékeket minden vizsgált pontban (tehát egy cikluson belül 99 pontban), és az összes ciklusban, amivel megkaptam a teljes vizsgálat hiszterézis görbéjét. Ezt a görbét a következő grafikonon ábrázoltam.



7. grafikon Az első próbatest fáradtásának lefolyása hiszterézis görbéken

Jól látszik a görbéken a korábban említett enyhe deformáltság, illetve az első görbéken a mérőeszköz kezdeti anyagvizsgálata, melynek során beállította a terhelési feszültséget. Ezen kívül az is jól látható hogy a hiszterézis görbék a fáradás előrehaladtával már egyre kisebb távolságra vannak egymástól. Egy hiszterézis görbe területe az adott ciklus disszipált energiájával egyenlő.

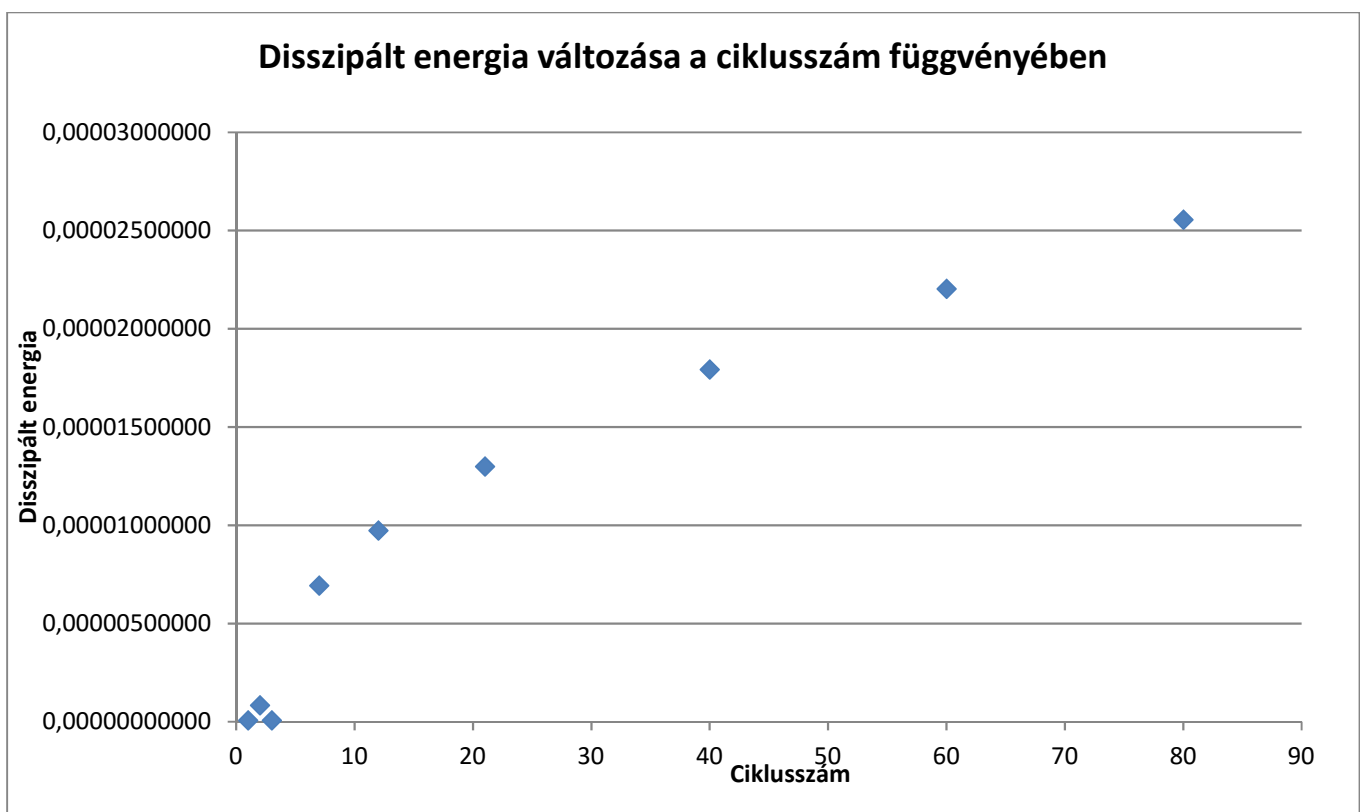
A disszipált energia kiszámításához szükségem volt a fázisszög kiszámítására, amit pontonként meg is tettem. A vizsgálat csak a 100. ciklusig adta ki ilyen részletesen az eredményeket. Ezért a disszipált energia változását az első néhány ciklust követően, 20 ciklusonként számoltam ki, a ciklusra eső disszipált energia értékét úgy, hogy a görbét berajzolhassam, mivel elég hosszadalmas egy-egy ciklus számítása.

A következő eredményeket kaptam:

ciklusszám	Disszipált energia
1	0,00000008405
2	0,00000084378
3	0,00000008565
7	0,00000694504
12	0,00000974247
21	0,00001300232
40	0,00001794201
60	0,00002204067
80	0,00002556546
100	0,00002861919

7. táblázat Disszipált energia a különböző ciklusokban

Ezt a következő grafikonon ábrázoltam. Néhány ezer ciklus után inflexió lenne benne, és azt követően meredekebben nőne ahogy azt a 4. ábrán már vázoltam.



8. grafikonon Disszipált energia változása a ciklusszám függvényében

VII. Összefoglalás

Kutatásom során az aszfalt fáradási ellenállásának vizsgálatait és jelenségét mutattam be, itthon még nem használt illetve kevésbé ismert megközelítésekkel. Megvizsgáltam a már ismert elméleti összefüggéseket és elveket, és összehasonlítottam az általam végzett vizsgálati eredményekkel. Mivel az aszfalt fáradása gyakori tönkremeneteli ok, ezért a magyar hőmérsékleti adottságok mellett, érdemesnek tartom a szabványt további vizsgálatoknak megfelelően pontosítani.

Egy AC 22 kötő(F) ömlesztett aszfalt mintát vizsgáltam a hasító-húzó vizsgálat (ITT) illetve négy pontos hajlítóvizsgálattal. Az ITT vizsgálat erővezérelt a négy pontos vizsgálat alakváltozásvezérelt. A két vizsgálat próbatesteinek is más a geometriája, és ezek miatt a különbségek miatt megállapítottam, hogy az eredmények nem összehasonlíthatók. Mindkét vizsgálatot több terhelési szinten elvégeztem, és a mérési eredményeket a fáradási egyenesen ábrázoltam. Megállapítottam az egymilliomodik ciklusszámhoz tartozó megnyúlást vagy feszültséget. A fáradás folyamatának három fázisa jól kimutatható mindkét vizsgálat eredményei alapján megrajzolt alakváltozás grafikonon a ciklusszám függvényében. Az ITT vizsgálat alakváltozás/ciklusszám ggrafikonjai közül, minden terhelési szinthez tartozó vizsgálatból kiválasztottam egyet, és ezeket közös grafikonon ábrázoltam. Ezen jól látható a fáradás egyik legfontosabb alapelve, hogy a magasabb terhelési szinten alacsonyabb ciklusszámnál megy végbe a tönkremenetel, és nagyobb a maximális alakváltozás.

Az ITT vizsgálatnak sikerült kimutatnom a terhelési ciklus lefolyásának képét, egy terhelő erő/eltelt idő grafikonon, amin jól látható hogy nem szinuszos terhelést ad, hanem a 0.5 s-os ciklusidő alatt egy tizedmásodperc a terhelés valós ideje, és négy tizedmásodperc a pihenés, ami sokkal pontosabban modellezi a forgalom lefolyásának fárasztási hatását az adott keresztmetszetben, mint a négy pontos vizsgálat szinuszos terhelése. Mivel képes voltam az ITT vizsgálat során egy ciklusnak 99 pontjában mérni a pillanatnyi eredményeket, ezeknek a pontoknak az alakváltozásának és feszültségének kiszámolásával sikerült a hiszterézis görbét előállítanom. Megállapítottam, hogy a vizsgálataim során is érvényes, hogy a hiszterézis görbék a fáradás előrehaladtával egyre közelebb esnek egymáshoz. A hiszterézis görbe területe a disszipált energia, amit szintén cikluson belül minden pontban ki kellett számolni, és azt összegezve kaptam meg a ciklus teljes disszipált energiáját. Ezt sikerült az első 100 ciklusra 20 ciklusonként kiszámolni, amit ábrázoltam is diagramon. Ezen jól látható hogy az erővezérelt fárasztás disszipált energiája pozitív lesz a feszültségvezérelt ellentétben. A két vezérlési mód disszipált energiájának az előjele a Hook törvény miatt lesz különböző.

VIII. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni a dolgozatom megírásában nyújtott segítséget a konzulenseimnek, Ávár-Kollár Viviennek, dr. Igazvölgyi Zsuzsának és Soós Zoltánnak. Azon kívül a BME Pályaszerkezeti Laborjának a vizsgálatok elvégzésében való segítséget, a TPA HU Kft.-nek biztosították a vizsgálati anyagot, illetve hogy használhattam az ITT vizsgálatra a mérőeszközüket. A családomnak és a barátaimnak a támogatást és a sok segítséget.

IX. Felhasznált irodalom

1. dr. Nemesdy Ervin: Az aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének új szabályozása Magyarországon, Közút Folyóirat, XII. évfolyam. 1992. 6. szám
2. <http://www.betonopus.hu/notesz/liptay-betonutak-60.pdf>
3. Maggiore, Cinzia (2014) A comparison of different test and analysis methods for asphalt fatigue. PhD thesis, University of Nottingham.
4. A Dissipated Energy Approach to Fatigue Evaluation Article in Road Materials and Pavement Design · March 2006 Shihui Shen, Gordon D. Airey, Hai Huang
5. Az aszfaltkeverékek mechanikai paramétereinek és a pályaszerkezet fáradási élettartamának összefüggései Bocz Péter, 2009,
6. Aszfaltkeverékek fáradási tulajdonságainak meghatározása csökkentett mérési eredményszám alapján szerkesztett mestergörbe segítségével 2010, Ávár Vivien
7. Út- és vasútépítés laborgyakorlat BME Építőmérnöki kar diáisor, Soós Zoltán
8. MSZ EN 12697-24 Aszfaltkeverékek fáradási ellenállása
9. e-ÚT 05.02.11-2010 Útügyi Műszaki Leírás, Útépítési aszfaltkeverékek, Aszfaltbeton