



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar**

**Az aszfaltkeverékek mechanikai paramétereinek és a
pályaszerkezet fáradási élettartamának összefüggései**

PhD értekezés

Bocz Péter
okleveles építőmérnök

Tudományos vezető:

Dr. Fi István
egyetemi tanár, tanszékvezető
az MTA doktora

BME Út és Vasútépítési Tanszék

Budapest, 2009.

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	7
1.1. A DISSZERTÁCIÓ CÉLJA	8
1.2. A DISSZERTÁCIÓ FELÉPÍTÉSE.....	8
2. AZ ASZFALT BURKOLATOK TÖNKREMENTELE.....	10
2.1. AZ ASZFALT BURKOLATÚ ÚTPÁLYASZERKEZETEK TÖNKREMENTELI MÓDJAI	11
2.1.1. <i>Keréknyomvályú</i>	11
2.1.2. <i>A hőmérséklet ingadozásával kapcsolatos hatások</i>	11
2.1.3. <i>Fáradás</i>	11
3. AZ ASZFALT BURKOLATOK MECHANIKAI TULAJDONSÁGAINAK VIZSGÁLATA.....	13
3.1. A FÁRADÁS JELENSÉGÉNEK VIZSGÁLATAI.....	13
3.1.1. <i>A Wöhler-féle fáradási görbe</i>	13
3.1.2. <i>A Miner-hipotézis</i>	13
3.1.3. <i>Az aszfaltkeverékek hajlító-fárasztó vizsgálatainak kezdetei</i>	15
3.1.4. <i>Aszfaltkeverékek hajlító-fárasztó vizsgálatai a BME Út és Vasútépítési Tanszéken</i>	15
3.1.5. <i>Az aszfalt próbatestek fáradási kísérletei és a valóságos fáradási viselkedés közötti eltérések</i>	16
3.2. AZ ASZFALTKEVERÉKEK MEREVSÉGI MODULUSÁNAK SZÁMÍTÁSI KÉPLETEI	17
3.2.1. <i>Asphalt Institute módszer</i>	17
3.2.2. <i>University of Nottingham módszer</i>	18
3.2.3. <i>CRR módszer</i>	18
3.3. A GYAKORLATBAN HASZNÁLT KÉPLETEK A FÁRADÁSI TÖRÉS KRITÉRIUMÁRA	19
3.3.1. <i>Francia módszer a fáradási törési kritériumra</i>	19
3.3.2. <i>Egyesült királyság módszere a fáradási törési kritériumra</i>	20
3.3.3. <i>Belgiumban kidolgozott módszer a fáradási törési kritériumra</i>	20
3.3.4. <i>Shell-módszer a fáradási törési kritériumra</i>	21
3.3.5. <i>Shell Grand Couronne-módszer a fáradási törési kritériumra</i>	21
3.3.6. <i>Asphalt Institute módszer a fáradási törési kritériumra</i>	21
3.4. ASZFALT PÁLYASZERKEZET-MÉRETEZÉSI ELJÁRÁSOK	22
3.4.1. <i>A Magyarországon alkalmazott pályaszerkezet-méretezési eljárás</i>	22
3.4.2. <i>Ausztria</i>	23
3.4.3. <i>Belgium</i>	24
3.4.4. <i>Egyesült Királyság</i>	24
3.4.5. <i>Franciaország</i>	24
3.4.6. <i>Hollandia</i>	25
3.4.7. <i>Németország</i>	25
3.4.8. <i>Svájc</i>	25
3.5. KUTATÁSOK A PÁLYASZERKEZET-MÉRETEZÉSI ELJÁRÁSOK FEJLESZTÉSÉVEL KAPCSOLATBAN	26
3.5.1. <i>Kutatások a nagy forgalmi terhelésű útszakaszok burkolataival kapcsolatban</i>	26
3.5.2. <i>Az útburkolatok teljesítőképességének komplex rendszere</i>	27
4. VIZSGÁLATOK A MEREVSÉGI MODULUS MEGHATÁROZÁSÁRA.....	29
4.1. A VIZSGÁLATOK TÍPUSAI, VÉGREHAJTÁSUK	29
4.2. A SZÁMÍTOTT ÉS MÉRT MEREVSÉGI MODULUSOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	31
4.3. ÖSSZEFOGLALÁS, TÉZISEK	36
5. HAJLÍTÓ-FÁRASZTÓ VIZSGÁLATOK.....	37
5.1. A HAJLÍTÓ-FÁRASZTÓ VIZSGÁLATOK ISMERTETÉSE	37
5.2. A VIZSGÁLAT LEFUTÁSÁNAK KIÉRTÉKELÉSE	39
5.3. ÖSSZEFOGLALÁS, TÉZISEK	45

6. A MEREVSÉGI PARAMÉTEREK ÖSSZEFÜGGÉSE AZ ASZFALT PÁLYASZERKEZET IGÉNYBEVÉTELEIVEL.....	46
6.1. A MÉRETEZÉS VÉGREHAJTÁSA	46
6.2. A PÁLYASZERKEZETEK FELÉPÍTÉSE	48
6.2.1. <i>Altalaj</i>	48
6.2.2. <i>Alsó alapréteg</i>	48
6.2.3. <i>Felső alapréteg</i>	49
6.2.4. <i>Kötőréteg</i>	49
6.2.5. <i>Kopóréteg</i>	49
6.2.6. <i>Alkalmazott pályaszerkezetek</i>	50
6.3. A TERHELÉSEK	51
6.4. AZ IGÉNYBEVÉTELEK MEGHATÁROZÁSÁNAK HELYEI	52
6.5. A SZÁMÍTÁSOK VÉGREHAJTÁSA	52
6.6. A SZÁMÍTÁSOK EREDMÉNYEI	52
6.6.1. <i>Megnyúlások a kopóréteg alsó szélső szálában</i>	52
6.6.2. <i>Megnyúlások az alsó aszfaltréteg alsó szélső szálában</i>	54
6.7. A KÖTŐRÉTEG MEREVSÉGI MODULUS ÉRTÉKÉNEK HATÁSA A PÁLYASZERKEZET IGÉNYBEVÉTELEIRE	60
6.8. ÖSSZEFOGLALÁS, TÉZISEK	68
7. A PÁLYASZERKEZET FÁRADÁSI ÉLETTARTAMA AZ ASZFALTKEVERÉKEK FÁRADÁSI GÖRBÉI ALAPJÁN.....	69
7.1. A LABORATÓRIUMBAN VIZSGÁLT ASZFALTANYAGOK WÖHLER-GÖRBÉI	69
7.2. A VIZSGÁLT PÁLYASZERKEZETEK ÉLETTARTAMA	71
7.3. AZ ASZFALT PÁLYASZERKEZETEK MEGENGEDETT TENGYELYÁTHALADÁSI SZÁM – RÉTEGVASTAGSÁG ÖSSZEFÜGGÉSEI KONKRÉT ASZFALTANYAGOK MÉRÉSI EREDMÉNYEINEK FELHASZNÁLÁSÁVAL	74
7.4. ÖSSZEFOGLALÁS, TÉZISEK	80
8. AZ ASZFALTRÉTEGEK MEREVSÉGCSÖKKENÉSÉNEK HATÁSA A PÁLYASZERKEZET ÉLETTARTAMÁRA	81
8.1. BEVEZETÉS	81
8.2. MÓDSZERTAN	82
8.3. EREDMÉNYEK	84
8.4. ÖSSZEFOGLALÁS, TÉZISEK	89
9. ÖSSZEFOGLALÁS	90
9.1. ÖSSZEGZÉS	90
9.2. GYAKORLATI FELHASZNÁLÁSI LEHETŐSÉGEK	91
9.3. TOVÁBBI KUTATÁSI TÉMÁK	91
9.4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK, TÉZISEK.....	92

ÁBRAJEGYZÉK

3.1. ábra	Példa egy aszfaltkeverék Wöhler-féle fáradási görbéjére	14
3.2. ábra	A Miner-hipotézis alkalmazása a Wöhler-görbén	14
3.3. ábra	Hőmérséklet – ciklusszám Saal és Pell szerint	15
3.4. ábra	Hőmérséklet – ciklusszám Arand szerint	17
3.5. ábra	A követelmények piramisa (Hollandia)	28
4.1. ábra	Aszfalt próbatestek merevségi modulus-meghatározásának módszerei	30
4.2. ábra	A mért és számított merevségi modulusok AB-11/F aszfaltkeverékeken	32
4.3. ábra	A mért és számított merevségi modulusok AB-12/F aszfaltkeverékeken	33
4.4. ábra	A mért és számított merevségi modulusok AB-16/F aszfaltkeverékeken	33
4.5. ábra	A mért és számított merevségi modulusok K-20/F aszfaltkeverékeken	34
4.6. ábra	A mért és számított merevségi modulusok K-22/F aszfaltkeverékeken	34
4.7. ábra	A mért és számított merevségi modulusok mAB-11/F és mAB-12/F aszfaltkeverékeken	35
4.8. ábra	A mért és számított merevségi modulusok mK-20/F és mK-22/F aszfaltkeverékeken	35
4.9. ábra	A mért és számított merevségi modulusok mZMA-11 és mZMA-12 aszfaltkeverékeken	36
5.1. ábra	A különböző hajlító-fárasztó vizsgálatok elrendezési vázlatai	37
5.2. ábra	Az erő és az elmozdulás fáziseltolódása a szinuszos terhelés hatására	38
5.3. ábra	A merevség változása a ciklusszám függvényében	39
5.4. ábra	A ciklusszám – merevség diagramra illeszthető lineáris egyenesek	40
5.5. ábra	A ciklusszám – merevség függvényekre illesztett regressziós egyenesek korrelációja (R^2) az illesztés kezdő értékének függvényében	40
5.6. ábra	A fáradási vizsgálat kiértékelése (a próbatestek fárasztását $N_{S*50\%}$ értékig folytattam)	44
5.7. ábra	A fáradási vizsgálat kiértékelése (a próbatestek fárasztását $N_{S*60\%}$ értékig folytattam)	44
5.8. ábra	A fáradási vizsgálat kiértékelése (a próbatestek fárasztását $N_{S*70\%}$ értékig folytattam)	45
6.1. ábra	A számítás során figyelembe vett típus-pályaszerkezetek és a szükséges rétegvastagságok az A-R forgalmi terhelési osztályoktól függően	47
6.2. ábra	Az aszfalt kopóréteg alsó szélső szálának megnyúlása a típus pályaszerkezetekben, teljes elcsúszás feltételezésével	54
6.3. ábra	Az aszfalt alsó szálának megnyúlása a kopóréteg merevségének függvényében (példák)	55
6.4./a. ábra	Az aszfalt alsó szálának megnyúlása a kötőréteg merevségének függvényében (M56 alapréteg esetén)	56
6.5. ábra	Az aszfalt alsó szálának megnyúlásának terjedelme a földmű merevségének függvényében az egyes típus-pályaszerkezetekben	59
6.6. ábra	Az aszfalt alsó szálának megnyúlása a rétegek közötti elcsúszás függvényében	60
6.7. ábra	Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg merevségének függvényében (M56 jelű mechanikai stabilizációs alapréteg esetén)	62
6.8. ábra	Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg merevségének függvényében (FZKA alapréteg esetén)	62
6.9. ábra	Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg merevségének függvényében (150 mm vastagságú CKt alapréteg esetén)	63
6.10. ábra	Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg merevségének függvényében (200 mm vastagságú CKt alapréteg esetén)	64
6.11. ábra	Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg vastagságának függvényében (M56 alapréteg esetén)	66
6.12. ábra	Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg vastagságának függvényében (FZKA alapréteg esetén)	66
6.13. ábra	Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg vastagságának függvényében (150 mm vastagságú CKt alapréteg esetén)	67
6.14. ábra	Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg vastagságának függvényében (200 mm vastagságú CKt alapréteg esetén)	67
7.1. ábra	AB-12/F anyagok mért és számított (előrebecsült) Wöhler-görbéi	70
7.2. ábra	K-20/F anyagok mért és számított (előrebecsült) Wöhler-görbéi	70
7.3. ábra	mK-22/F, mK-22/NM anyagok mért és számított (előrebecsült) Wöhler-görbéi	71
7.4. ábra	Alkalmazható aszfaltvastagságok a (M56 mechanikai stabilizációs alapréteg)	77
7.5. ábra	Alkalmazható aszfaltvastagságok a (FZKA zúzottkő alapréteg)	77
7.6. ábra	Alkalmazható aszfaltvastagságok a (150 mm vastagságú CKt alapréteg)	78
7.7. ábra	Alkalmazható aszfaltvastagságok a (200 mm vastagságú CKt alapréteg)	78
8.1. ábra	Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg merevségének függvényében (150 mm vastagságú CKt alapréteg esetén)	82

8.2. ábra	Példa a Wöhler-görbe alkalmazására	83
8.3. ábra	A merevségcsökkenés számítása arányossági tényezőkkel.....	84
8.4. ábra	Megengedett tengelyáthaladási számok 56B-DD (K-20/F) jelű kötőréteg alkalmazásával	86
8.5. ábra	Megengedett tengelyáthaladási számok 56B-BD (K-20/F) jelű kötőréteg alkalmazásával.....	87
8.6. ábra	Megengedett tengelyáthaladási számok H61-GB (mK-22/NM) jelű kötőréteg alkalmazásával	87
8.7. ábra	Megengedett tengelyáthaladási számok H61-GC (mK-22/F) jelű kötőréteg alkalmazásával	88
8.8. ábra	A Wöhler-görbe meredeksége és a merevség-csökkenés miatti élettartam összefüggése.....	88
8.9. ábra	A merevség változása a tengelyáthaladási szám függvényében	89

TÁBLÁZATJEGYZÉK

3.1. táblázat	Az aszfaltanyagok fáradási képleteinél használt együtthatók	19
4.1. táblázat	Az IT-CY vizsgálattal és számítással meghatározott merevségi modulus eltérése (%).....	32
5.1. táblázat	K-20/F jelű aszfaltanyagokon elvégzett hajlító-fárasztó kísérletek végeredményeinek becslése	43
6.1. táblázat	A számítás során alkalmazott alaprétegek tulajdonságai	49
6.2. táblázat	A modellben alkalmazott aszfaltanyagok merevségének meghatározása.....	50
6.3. táblázat	Aszfaltanyagok alkalmazható rétegvastagságai.....	50
6.4. táblázat	A modellezés során alkalmazott pályaszerkezeti felépítések.....	51
6.5. táblázat	A kopóréteg alsó szálának megnyúlási spektruma a típus pályaszerkezetekben, 50%-os (félíg) együttlátás esetén (microstrain).....	53
6.6. táblázat	Az alsó aszfaltszál megnyúlásának terjedelme a kopóréteg merevség függvényében.....	55
6.7. táblázat	Az alsó aszfaltszál megnyúlásának terjedelme a kötőréteg merevség függvényében.....	58
6.8. táblázat	Pályaszerkezeti rétegrendek a kötőréteg szükséges vastagságának megállapításához.....	61
6.9. táblázat	Hatvány görbék paraméterei a 6.6-6.7. ábrához	64
6.10. táblázat	Hatvány görbék paraméterei a 6.8-6.9. ábrához	64
7.1. táblázat	Az mK-22/F, mK-22/NM keverékeken elvégzett fárasztási vizsgálatok eredményei	71
7.2. táblázat	A megengedhető tengelyáthaladási számok az aszfalt kopóréteg alsó szélső szál megnyúlásának függvényében.....	72
7.3. táblázat	A megengedhető tengelyáthaladási számok az aszfalt kötőréteg alsó szélső szál megnyúlásának függvényében (K-20/F keverék Wöhler-görbáját felhasználva).....	73
7.4. táblázat	A megengedhető tengelyáthaladási számok az aszfalt kötőréteg alsó szélső szál megnyúlásának függvényében (mK-20/F keverék Wöhler-görbáját felhasználva).....	74
7.5. táblázat	A modellezés során felhasznált aszfaltanyagok mechanikai tulajdonságai	74
7.6. táblázat	A kiválasztott aszfaltanyagok merevségéből számított alsó szélső szál megnyúlások 150 mm CKt alaprétegen, az aszfaltvastagság függvényében	75
7.7. táblázat	A rétegvastagság – tervezési forgalom görbe a, b konstansainak értékei	76
7.8. táblázat	Alkalmazható aszfaltvastagságok [mm] (M56 alapréteg).....	79
7.9. táblázat	Alkalmazható aszfaltvastagságok [mm] (FZKA alapréteg).....	79
7.10. táblázat	Alkalmazható aszfaltvastagságok [mm] (150 mm vastagságú CKt alapréteg).....	79
7.11. táblázat	Alkalmazható aszfaltvastagságok [mm] (200 mm vastagságú CKt alapréteg).....	80
8.1. táblázat	Hatvány görbék paraméterei a 8.1. ábrához	83
8.2. táblázat	A merevség csökkenése miatti élettartam-csökkenés	86

1. BEVEZETÉS

A világon a közúti forgalom jelenlegi nagysága és töretlen növekedése okán folyamatosan előtérben van a gazdaságilag és technológiailag egyaránt megfelelő útburkolatok építésének szükségessége. Az útburkolatok építéséhez legnagyobb tömegben felhasznált anyagok az aszfalt és a beton.

A két anyag közül az aszfaltkeverékeket alkalmazzák a legszélesebb körben (túlnyomó többségben) burkolatok építésére, mivel a beépítésük és karbantartásuk egyszerű: a terítés és a tömörítés a rendelkezésre álló gépekkel egyszerűen és gyorsan elvégezhető, a beépítés után 1-2 órával a burkolat már a forgalomnak átadható. Az aszfalt burkolat – a beton burkolattal ellentétben – nem igényel dilatációs hossz- és keresztirányú hézagokat, amelyek bonyolítanák a kivitelezést, a járművek kerekeinek áthaladása során növelnék az igénybevételeket, illetve csökkentenék a pályaszerkezet élettartamát.

Az útpályaszerkezetet – mint minden építőmérnöki szerkezetet – a fellépő igénybevételek figyelembevételével méretezni kell. A szerkezet méretezése azonban több okból is nehézségekbe ütközik (Karoliny, 2005):

- a terhelések és igénybevételek oldaláról: a forgalmi terhelés nagyon változatos, emellett dinamikus (ismétlődő) terhelés, illetőleg az útpályaszerkezet jellegénél fogva fokozottan ki van téve a szélsőséges időjárási hatásoknak is, amely ellen védekezni nem lehetséges;
- a felhasznált anyagok oldaláról: a földmű, az alaprétegek és maga az aszfaltanyag tulajdonságai egyaránt nehezen határozhatók meg pontosan, az anyagok inhomogenitásából következően;
- a gazdaságosság oldaláról: a meglehetősen nagy mennyiségű anyag beépítése miatt a szerkezetek túlméretezése nem gazdaságos.

A fenti problémák eltérő súlyozása következtében az aszfalt pályaszerkezetek méretezési szabványai országonként különbözőek. Az 1960-as évek előtti aszfaltburkolat építések során még jórészt tapasztalati alapon méretezték a burkolatokat, majd a '60-as évektől, az ún. AASHO kísérletek hatására indult meg a tudatos pályaszerkezet-méretezés. A további helyszíni és laboratóriumi vizsgálatok során a technológusok egyre inkább megismerték az aszfaltanyagok mechanikai tulajdonságait. A mechanikai tulajdonságok alapján minden ország kidolgozta a saját pályaszerkezet-méretezési eljárását, köztük hazánk is (HUMU, 1971, majd ÚT 2-1.202 jelű Útügyi Műszaki Előírás, 1991).

A fenti okok miatt a gyakorlatban használt méretezési eljárások azonban egyszerűsítéseket tartalmaznak, főként annak érdekében, hogy a gyakorlatban könnyen használhatóak legyenek.

Ennek egyik praktikus formája az ún. típus-pályaszerkezetek rendszere, amelyeket a hazai szabvány is alkalmaz (Nemesdy, 1991a).

1.1. A DISSZERTÁCIÓ CÉLJA

Az elkészített dolgozat célja annak vizsgálata, hogy az egyes aszfaltkeverékek – laboratóriumi vizsgálatok során meghatározott – mechanikai paramétereinek alakulása hogyan hat a pályaszerkezet méretezésére, illetve a szükséges pályaszerkezeti vastagságokra. Ennek vizsgálata azért jelentős, mert a jelenlegi (pl. hazai) szabályozás egyszerűsítései elrejtik a jobb minőségi mutatókkal rendelkező aszfaltok kedvező tulajdonságait, és nem veszik számba az azok felhasználásával épített pályaszerkezetek fáradási élettartam-növekedését.

Ennek érdekében többféle aszfaltkeveréken (kopó- és kötőrétegek szokásos anyagain egyaránt) merevségi modulus meghatározást, illetve hajlító-fárasztó vizsgálatot végeztem. E vizsgálatok végeredménye az aszfalt burkolatok fáradásra történő méretezésének két legfőbb bemeneti adata.

A dolgozatban kimutatom, hogy az egyes aszfaltkeverékek valós paramétereit hogyan befolyásolják a burkolat fáradási élettartamát. Példának okáért az aszfalt- és bitumentekológia fejlődése során kidolgozott modifikált bitumenekkel gyártott aszfaltkeverékek jobb merevségi és fáradási tulajdonságai módot adnak arra, hogy a pályaszerkezet kisebb rétegvastagságokkal – azaz gazdaságosabban – épüljön meg, mint a jelenlegi előírások. Természetesen jelen dolgozat ezt a lehetőséget csak a pályaszerkezetek egyik tönkremeneteli módja, a fáradás szempontjából vizsgálja, a rétegvastagságok mérlegelésénél számos egyéb szempont is közrejátszik.

1.2. A DISSZERTÁCIÓ FELÉPÍTÉSE

A disszertáció második fejezetében bemutatom az aszfalt burkolatok tönkremeneteli módjait és az azzal kapcsolatos kutatásokat. Miután a dolgozat célja a fáradásra történő méretezés, így főként a pályaszerkezetek fáradási tönkremenetelével kapcsolatos vizsgálatokat elemzem.

A harmadik fejezetben röviden foglalkozom a fáradás alapjaival, a fáradási jelenségek kutatásával, illetve a jelenleg érvényes hazai és külföldi méretezési eljárások rövid ismertetésével.

A negyedik fejezetben ismertetem a merevségi modulus meghatározására irányuló laboratóriumi vizsgálatokat, illetőleg összehasonlítást végzek a mért és a z előrebecslő képletekkel számított merevségi modulusok értékei között.

Az ötödik fejezetben az általam elvégzett hajlító-fárasztó vizsgálatok menetét és végeredményeit ismertetem, illetve megállapításokat teszek nem csak a fárasztási vizsgálat végeredményére, hanem a vizsgálati időbeli lefutására is.

A hatodik fejezetben segítségével pályaszerkezeti modelleket állítok fel, amelyeken a BISAR szoftver segítségével meghatározom a mértékadó pontokban keletkező igénybevételeket. A modellek viselkedésének alapján érzékenységvizsgálatot végzek, amelynek segítségével megállapítható, hogy melyek a pályaszerkezet azon – geometriai vagy mechanikai – tulajdonságai, amelyek a legnagyobb mértékben befolyásolják a pályaszerkezetben keletkező igénybevételeket.

A hetedik fejezetben a pályaszerkezetben ébredő igénybevételek segítségével, az egyes aszfaltkeverékek és pályaszerkezeti felépítések alapján meghatározhatók a szükséges aszfaltvastagságok. A fejezet célja annak bemutatása, hogy a nagyobb teljesítményű aszfaltok kisebb rétegvastagságban is megfelelnek a fáradásra történő méretezés kritériumainak.

A nyolcadik fejezetben kimutattam, hogy a pályaszerkezet fáradása során az igénybevételek növekednek, amelyek egy öngerjesztő folyamatot indítanak el, így a pályaszerkezet élettartama a korábbi számítások alapján várható élettartamának csak bizonyos százaléka.

2. AZ ASZFALT BURKOLATOK TÖNKREMENTELE

Az aszfalt tulajdonképpen bitumen és adalékanyag (megfelelő szemmegoszlású zúzott kő) keveréke. Az aszfaltkeverék tulajdonságait ugyan mindkét összetevő meghatározza, azonban a bitumen – mint kötőanyag – nagy szerepet játszik a keverék mechanikai tulajdonságaiban. A bitumen viszkoelasztikus anyag, amelynek a fizikai tulajdonságai a hőmérséklettől függnek, de a hőmérséklet változásával reverzibilis (visszafordítható) jelleggel változnak meg:

- alacsony hőmérsékleten ($<0^{\circ}\text{C}$) elasztikus (rugalmas)
- közepes hőmérsékleten ($0\div 80^{\circ}\text{C}$) elasztikus – plasztikus
- magas hőmérsékleten ($>80^{\circ}\text{C}$) viszkózus newtoni folyadék.

A hőmérséklet változtatásával tehát a bitumen merevségi modulusa is változik. Tekintettel azonban arra, hogy a bitumen az útburkolatban előforduló hőmérsékleti tartományban ($-20 \div +70^{\circ}\text{C}$) plasztikus tulajdonságokkal is bír, így a merevségi modulus nem csupán a hőmérséklet függvénye, hanem értékében szerepet játszik a terhelés nagysága és a terhelés időtartama is. Az aszfaltkeverék tulajdonságait a keverék kora is befolyásolja, azonban jelen disszertációban az újonnan épített aszfalt pályaszerkezetekkel foglalkozom.

Az aszfaltanyag merevségi modulusát, és főként annak hőmérséklettől való függését tehát főként a bitumen viselkedése határozza meg, a merevségi modulus a bitumen penetrációjával is összefüggésben van (Pallós et al., 1999). Az aszfalt burkolat, és ezen belül az aszfaltrétegek méretezése (vastagságának meghatározása) sok, speciálisan az aszfalt burkolatra alkalmazható méretezési módszer kidolgozását tette szükségessé.

További megállapítás, hogy az aszfaltanyag – a bitumen viszkozitásából következően – erősebben produkálja a fáradási jelenségeket, mint más anyagok (pl. acél), vagyis az anyag – ismétlődő, ciklusos terhelés hatására – veszít a merevségi modulusából. Tekintettel arra, hogy egy útburkolaton a ciklikus terhelés a jellemző (a járművek kerekeinek áthaladása), a méretezések során kitüntetett szerepet kap a fáradási tulajdonság vizsgálata.

Az útburkolatok élettartam-paraméterei közül azonban csak az egyik tényező a fáradási élettartam, ezeken kívül sok egyéb tényező is hozzájárul a leromlási folyamathoz. A burkolat élettartamának előrebecslése az összes figyelembe veendő paraméter segítségével korlátozott megbízhatóságú, sztochasztikus feladat (Gáspár, 2004). Az alábbiakban az aszfalt burkolatok legfontosabb tönkremeneteli módjait ismertetem.

A különböző helyszíni és laboratóriumi kísérletek mind-mind új megállapításokkal gyarapították az aszfaltburkolat méretezésének kérdéskörét, legfőképpen azt, hogy a burkolatok tönkremenetele milyen paraméterektől függ.

2.1. AZ ASZFALT BURKOLATÚ ÚTPÁLYASZERKEZETEK TÖNKREMENTELI MÓDJAI

2.1.1. Keréknyomvályú

A bitumen – mint az aszfaltkeverék kötőanyaga – a magasabb hőmérsékleti tartományokban egyre inkább a plasztikus viselkedés felé tolódik el. A bitumen merevsége csökken, és a fázisszög (az anyagban keletkező feszültség és az általa létrejött megnyúlás közötti fáziskésés) egyre nagyobb értékű lesz. A hosszabb ideig tartó terhelések hatására maradó alakváltozás jön létre. Így olyan sávokban, ahol a terhelések tartósabbak (pl. autóbusz-megálló, csomópontok járműosztályozói, illetve a nagyobb nehézgépjármű-forgalmú utakon) a mozgás hossz tengelyével párhuzamosan, a járművek által járt keréknyomokban benyomódások (vályúk) alakulnak ki. A nyomvályúk a forgalombiztonságra veszélyesek, mert az eső hatására a víz megállhat bennük és csatornázott vezetés, illetve nagy sebességeknél vízcensúzás jöhet létre. A nyomvályú szélsőséges esetben száraz időben is veszélyes lehet, mert mintegy „vezeti” a jármű kerekeit, nagyobb sebességű előzésnél nehéz elhagyni.

Látható tehát, hogy a keréknyomvályú képződése elsősorban nyáron, magas hőmérséklet és nagy nehézgépjármű-forgalom hatására jön létre.

2.1.2. A hőmérséklet ingadozásával kapcsolatos hatások

Az aszfaltburkolatok hézagmentesen épülnek, tekintettel arra, hogy a bitumen kötőanyag rugalmassága és viszkozus tulajdonságai miatt ez káros hatásokat (repedéseket) általában nem okoz.

A félmerev útpályaszerkezetekben azonban előfordulhat, hogy a hidraulikus kötésű alapréteg – zsugorodási, valamint a hőingadozás, elsősorban a nagymértékű lehűlés hatására létrejövő – repedései áttükröződnek a kopórétegen is, ezeket reflexiós repedéseknek nevezzük. Megakadályozásuk az alaprétegen tervezett repedések helyei előzetes létrehozásával (kraftolással, hézagvágással) vagy mikrokopesztéssel; feszültségelosztó bitumenes réteg beépítésével (SAMI) esetleg az alapréteg és a felette épülő aszfaltrétegek közötti együttdolgozás csökkentésével (pl. aszfaltrács) valósítható meg.

Látható, hogy a reflexiós repedések elsősorban a téli időszakban jönnek létre, függetlenül a forgalmi terhelés nagyságától.

2.1.3. Fáradás

Az aszfalt burkolatokat érő terhek hatására szerkezeti átalakulások jönnek létre, amelyek eredményeként károsodások alakulnak ki. Megfelelően sok alkalommal ismétlődő hatások esetén azonban ezek a károsodások összeadódnak, amely már látható, tapasztalható és folyamatosan

előrehaladó károsodást jelent (pl. repedések): ezt a folyamatot fáradásnak nevezzük. A fáradás lecsengése a bitumen anyagtulajdonságai miatt elsősorban a hőmérséklettől és a terhelés nagyságától, valamint a terhelési ismétlési gyakoriságától függ.

A fáradás nehezen modellezhető aszfalt-burkolat viselkedés, számos paramétertől, a terhelések mértékétől, valamint azok időbeli gyakoriságától függ. A növekvő nehézjármű-forgalmú útszakaszokon – főként a régebbi építésű szakaszokon – a fáradás miatti tönkremenetel okozza a problémát; a **2.1.1.** és a **2.1.2. pontban** felsorolt tönkremeneteli módok mérséklésére helyes technológiával és helyes keverék-összetétellel sokat tehetünk.

Jelen disszertációban az új útpályaszerkezetek fáradási méretezésével foglalkozom, a burkolatok egyéb tönkremeneteli módjait így figyelmen kívül hagyom.

3. AZ ASZFALT BURKOLATOK MECHANIKAI TULAJDONSÁGAINAK VIZSGÁLATA

3.1. A FÁRADÁS JELENSÉGÉNEK VIZSGÁLATAI

3.1.1. A Wöhler-féle fáradási görbe

Az anyagok fáradási tulajdonságainak vizsgálatát, a kifáradás jelenségének leírását ugyan Wöhler-nek tulajdonítjuk, azonban e jelenséget először Albert (1838) drótkötelekre, illetve Rankie (1843) vasúti tengelyekre ismertette (Tóth L., 1999). Wöhler legnagyobb érdeme a szisztematikus elemzés, illetve a megfelelő vizsgáló berendezés kialakítása volt. Így a fáradási tulajdonságok ábrázolására használatos görbe is mint Wöhler-görbe szerepel az irodalomban (Wöhler, 1866). A Wöhler-görbe x tengelyén a tönkremenetelhez tartozó teherisméltési szám található, logaritmikusságban; y tengelyén pedig a ciklusos (fárasztó) terhelés mértéke, szintén logaritmikusságban. A fárasztás végrehajtási módja szerint a terhelési szint lehet megnyúlás jellegű (ε , microstrain) vagy feszültség jellegű (σ , MPa) mennyiség:

$$\log \sigma = A - B \cdot \log N$$

ahol

σ terhelési szint

A, B az anyagtól függő konstansok

N ciklusszám

A Wöhler-görbe szerint tehát minél nagyobb az ismétlődő terhelések száma, annál kisebb mértékadó igénybevétel elegendő az anyag tönkremeneteléhez, ezért a Wöhler-görbe mindig monoton csökkenő (3.1.). A csökkenés meredekségét a B konstans adja meg.

3.1.2. A Miner-hipotézis

A Wöhler-görbe ciklusszám (N) – terhelési szint összefüggése közvetlenül 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 járművek is közlekednek. A Miner-hipotézis (Miner, 1945) lineáris arányossági tényezők összegét állítja fel (3.2. ábra):

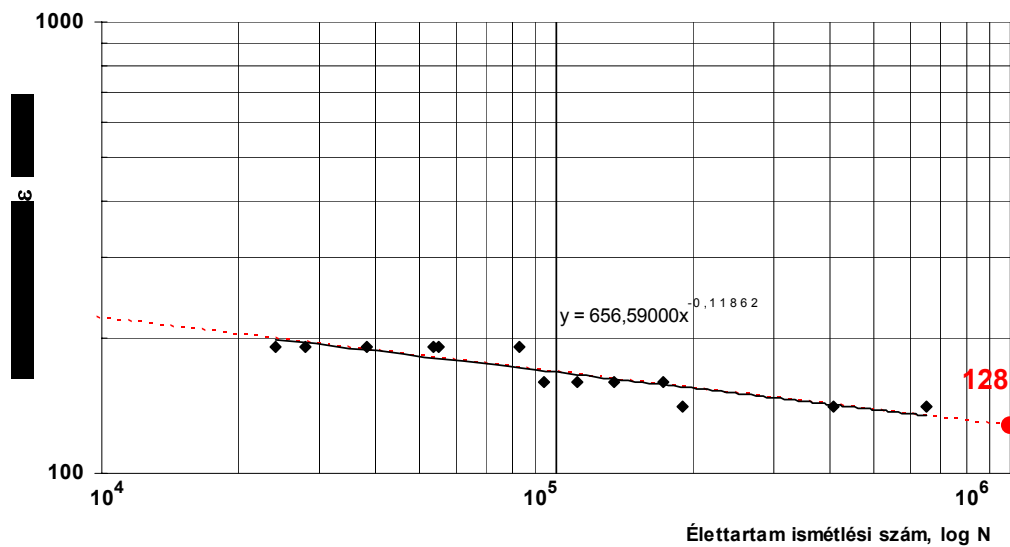
$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1$$

ahol:

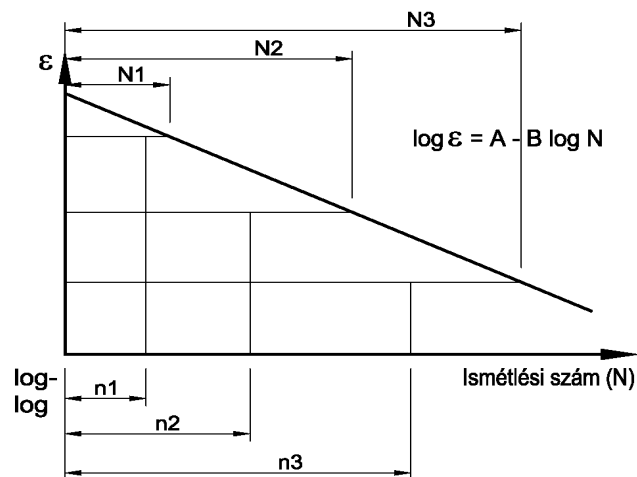
i a teherosztály jele

- n_i a ciklusszám az i . teherosztályban;
- N_i a tönkremenetelhez szükséges ciklusszám az i . teherosztályban;

azaz az egyes teherosztályokban megállapítja a tönkremenetel arányossági (%-os) értékét, majd kumulálja azt. Amennyiben a kumulált érték eléri a 100%-os értéket, a burkolat tönkrement.



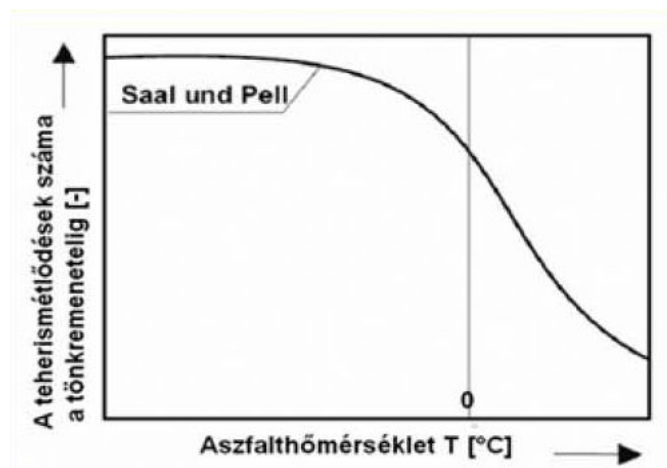
3.1. ábra Példa egy aszfaltkeverék Wöhler-féle fáradási görbéjére



3.2. ábra A Miner-hipotézis alkalmazása a Wöhler-görbén

3.1.3. Az aszfaltkeverékek hajlító-fárasztó vizsgálatának kezdetei

A fáradás jelenségét elsőként nem az aszfaltanyagokra, hanem inkább acélananyagokra fejlesztették ki, a berendezések tehát rendelkezésre álltak. Felismerték, hogy a mozgó járműkerék alatt az aszfaltrétegekben a kerék haladási irányában váltakozóan lépnek fel a felülettel párhuzamos sugárirányú húzó- és nyomófeszültségek. Európában az aszfaltok fáradási jellemzőinek, merevségi modulusának meghatározására a kétirányú hajlító-fárasztó vizsgálatok terjedtek el. Az ilyen típusú vizsgálat előnye, hogy maradó alakváltozások ennél a terhelési módnál nem jöhetnek létre, ezzel az aszfalt viszkelasztikus tulajdonságai, anyagállandói megbízhatóbban állapíthatók meg. Az aszfalt próbatestek fáradással szembeni ellenállása kísérleti meghatározásának módszerét Saal és társai (1960) fejlesztették ki.. Az első aszfalt próbatestek fárasztására szolgáló berendezés kétpontos forgó hajlító-fárasztó berendezés volt, e berendezéssel kapcsolatos első vizsgálatok eredményeit Pell (1962) írta le. A fáradási vizsgálataik eredményeképpen megállapították, hogy az aszfalt próbatestek fáradási ellenállása – a tönkremenetelig szükséges ciklusszám szám (N) – azonos terhelési szint esetén a hőmérséklet csökkenésével monoton nő (3.3. ábra)



3.3. ábra Hőmérséklet – ciklusszám Saal és Pell szerint

3.1.4. Aszfaltkeverékek hajlító-fárasztó vizsgálatai a BME Út és Vasútépítési Tanszékén

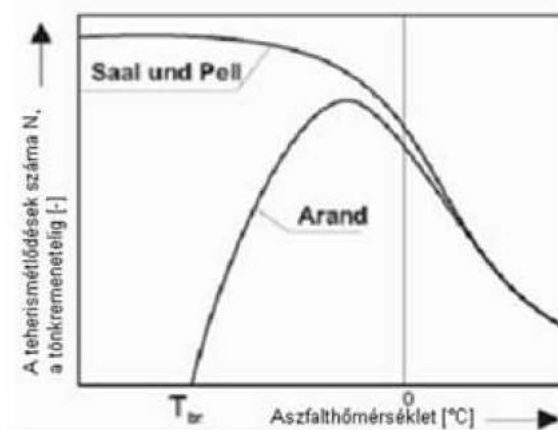
Magyarországon 1975 körül kezdett fárasztás témájával foglalkozni a BME Útépítési Tanszéke (Török et al., 1988), a drezdai és a zürichi hasonló tanszékek kezdeti tapasztalatait átvéve. 1976-ban a BME számára épített új tanszéki aszfaltlaboratóriumban több különféle hazai aszfaltmechanikai vizsgálati eszköz készült el. 1978-ban egy Guericke-féle dinamikus kétirányú, hajlító-fárasztó berendezést szereztek be, azonban ez főként csak kis szemmagyságú aszfaltok összehasonlító vizsgálatára volt alkalmas, mérete és szerkezeti kialakítása miatt. Az MTS

pulzátor alapú négypontos, kétirányú hajlító-fárasztó berendezés 1983-ra készült el, amely már megbízhatóan üzemelt, és mind erővezérléssel, mind elmozdulás-vezérléssel képes volt működni.

Az 1990-ben megrendezett RILEM konferencia hatására nagyszabású körvizsgálatot szerveztek, azonos minőségű aszfaltanyag merevségi modulusának és fáradási tulajdonságainak meghatározására. (Ambrus et al., 1999b). A vizsgálat sorozatban hazánk is rész vett (a Közlekedéstudományi Intézet és a BME Útépítési Tanszék képviselte Magyarországot). A fárasztási vizsgálat módjára semmilyen kikötést nem tettek, így következhetett be, hogy a meghatározott merevségi modulusok szórása – annak ellenére, hogy ugyanazon anyagról volt szó – igen nagy volt. Azonban ha csak a hajlító vizsgálatok eredményeit vesszük figyelembe, az eredmények szórása már elfogadható.

3.1.5. Az aszfalt próbatetek fáradási kísérletei és a valóságos fáradási viselkedés közötti eltérések

Arand (2007) vizsgálataiban felhívja a figyelmet, hogy bár a fáradási kísérletek során felhasznált próbatetek vizsgálatánál igaz lehet Saal és Pell feltételezése, azonban a burkolatban a hőmérséklet-változás hatására – főképp a lehűlés következtében – a gátolt dilatáció okán húzófeszültségek jönnek létre, amelyek a jármű kerékterhelésével szuperponálódnak. Ebből következően tehát a burkolatban nem csak a forgalom hatására keletkeznek igénybevételek, mint ahogy azt az aszfalt próbatetek fáradási kísérletei során mérhetjük. Megállapítja, hogy a kritikus feszültségek nem feltétlenül a keréknyomban, hanem mellette 400-900 mm- távolságban alakulnak ki, hiszen itt az alacsony hőmérsékleten tapasztalható húzófeszültség a forgalom hatásából képződő szintén húzó irányú feszültséggel adódik össze. Az ennek alapján meghatározott görbe már mást mutat, mint Saal és Pell görbéje, hiszen alacsony hőmérsékleten a tönkremenetel – köszönhetően a nagy húzófeszültségnek – sokkal gyorsabban következik be a valós állapotban, mint a kísérleti próbatetekeken (**3.4. ábra**). Az ábra alapján képletet dolgoz ki 0/11 szemmagyságú aszfaltbeton anyagokra a fáradási tönkremenetel előrebecsülésre.



3.4. ábra Hőmérséklet – ciklusszám Arand szerint

3.2. AZ ASZFALTKEVERÉKEK MEREVSÉGI MODULUSÁNAK SZÁMÍTÁSI KÉPLETEI

Az aszfaltkeverékek merevségének mérését helyettesítendő, különböző kutató műhelyek – számos megelőző laboratóriumi vizsgálat alapján – összefüggéseket dolgoztak ki az aszfaltkeverék merevségének előrebecslésére, a keverék összetétele és a bitumen tulajdonságai alapján. Ezen összefüggések közül a legismertebbek:

3.2.1. Asphalt Institute módszer

A módszert Witczak (1978) publikálta, az egyenlet:

$$\log E = 5,553833 + 0,28829 \frac{P_{200}}{f^{0,17033}} - 0,03476V_v + 0,070377\eta + 0,000005t_p^{(1,3+0,49825 \log f)} P_{ac}^{0,5} - 0,00189t_p^{(1,3+0,49825 \log f)} \frac{P_{ac}^{0,5}}{f^{1,1}} + 0,931757 \frac{1}{f^{0,02774}}$$

ahol

- E az aszfaltkeverék rugalmassági modulusa [psi];
- P_{200} a 200-as szitán átesett adalékanyag [tömegszázalék];
- f terhelési frekvencia;
- V_v szabadhézag tartalom [térfogatszázalék];
- η bitumen viszkozitás 70 F hőmérsékleten;
- P_{ac} bitumentartalom [tömegszázalék];
- t_p hőmérséklet [°F].

3.2.2. University of Nottingham módszer

Az egyenletet az egyesült királysági viszonyokra dolgozták ki (Brown et al., 1982):

$$S_m = S_b \left[1 + \frac{257,5 - 2,5VMA}{0,83 \log \left[\frac{4 \cdot 10^4}{S_b} \right] * (VMA + 3)} \right]^{0,83 \log \left[\frac{4 \cdot 10^4}{S_b} \right]}$$

ahol

- S_m az aszfaltkeverék rugalmassági modulusa [MPa];
- S_b a bitumen merevsége [MPa];
- VMA szabadhézag tartalom [térfogatszázalék].

3.2.3. CRR módszer

A belga útkutatási központ (Centre de Recherches Routières, Bruxelles) által kidolgozott egyenlet (Verstraeten et al., 1977) az Európában elterjedt képlet az aszfalt merevségi modulusának becslésére, a hazai méretezési utasítás is ezt használta (Nemesdy, 1992b).

$$|E^*| = E_\infty \times |R^*(f_r)|$$

ahol

$$E_\infty = 1,436 \times 10^4 \times \frac{V_A}{V_L} \times \exp(-5,84 \times 10^{-2} \times v)$$

$$\log_{10} |R^*| = \log_{10} |F^*| \left\{ 1 - 1,35 \times \left[1 - \exp(-0,13 \frac{V_A}{V_L}) \right] (1 + 0,11 \log_{10} |F^*|) \right\}$$

ahol

- E^* az aszfaltkeverék merevségi modulusa [MPa];
- $R^*(f_r)$ a redukált modulus, melynek értéke 0 és 1 között változik [-];
- E_∞ az aszfaltkeverék nagyon alacsony hőmérsékleten értelmezett rugalmassági modulusa [MPa];
- V_A az adalékanyag [térfogatszázalék];
- V_L a bitumentartalom [térfogatszázalék];
- v szabadhézag tartalom [térfogatszázalék];
- F^* a bitumen redukált nyírési modulusa [MPa].

3.3. A GYAKORLATBAN HASZNÁLT KÉPLETEK A FÁRADÁSI TÖRÉS KRITÉRIUMÁRA

Az egyes aszfaltkeverékek Wöhler-görbéje – a laboratóriumi vizsgálatok alapján – nagymértékű eltéréseket mutat. Ezért is szükséges a pályaszerkezet-méretezés során is figyelembe venni az alkalmazott anyagok valós fáradási görbéjét, de a Wöhler-görbe meghatározása azonban hosszadalmas laboratóriumi kísérletek segítségével lehetséges. Annak érdekében, hogy a méretezést leegyszerűsítsék, számos európai kutatóhely – saját, nagyszámú laboratóriumi mérés alapján – különböző képleteket dolgozott ki a fáradási görbe meghatározására számítással, bizonyos bemenő paraméterek alapján.

Az alábbiakban bemutatom az egyes kutatóhelyek által laboratóriumi vizsgálatok alapján kifejlesztett képleteket a fáradási (Wöhler-) görbe meghatározására. A **3.1. táblázat** foglalja össze, hogy a fáradási képletek milyen bemeneti paramétereket használnak. A táblázatból látható, hogy az aszfaltkeverékek merevségi modulusa és a bitumentartalom szinte minden esetben szerepel a képletek bemenő paramétereinek között, hiszen az aszfaltkeverékek ilyen irányú viselkedését főként a bitumen viselkedése határozza meg.

3.1. táblázat Az aszfaltanyagok fáradási képleteinél használt együtthatók

Ország	Franciaország	Nottingham (UK)	Belgium	Shell (Hollandia)	Shell-Grand Couronne	Asphalt Institute (USA)
Merevségi modulus	+			+	+	+
Bit. penetrációs index					+	
Bitumen lágyuláspont		+				
Bitumentartalom (V%)		+	+	+	+	+
Szabadhézag tart.(V%)			+			+
A keverék fajtája	+					
N=10 ⁶ ciklus után megeng. megnyúlás	+					

3.3.1. Francia módszer a fáradási törési kritériumra

Franciaországban 1995-ben publikálták a fáradási görbe egyenletét, az anyagtulajdonságoktól függően. Úgy találták, hogy a görbe meredeksége állandó (-0,2), azonban a megengedett mértékadó igénybevétel a ciklusszámon felül az aszfaltkeverék merevségi modulusától is függ.

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_6 \times (NE/10^6)^b \times (E_{10^\circ C} / E_{\Theta eq})^{0,5} \times k_c \times k_r \times k_s$$

ahol

$\varepsilon_{t,ad}$ az aszfalt rétegben megengedhető megnyúlás (microstrain)

ε_6 az N=10⁶ teherismétlési számhoz tartozó megnyúlás (MSZ EN 12697-24)

NE	a tönkremenetelhez szükséges egységtengely áthaladási szám
b	-0,2 (a Wöhler-görbe meredeksége)
$E_{10^{\circ}\text{C}}$	az aszfalt merevségi modulusa 10°C hőmérsékleten
Φ_{eq}	az ekvivalens tervezési hőmérséklet
k_c	az aszfaltréteg fajtájától függő együttható
k_r	a számítási pontatlanság és az ismételhetség együtthatója
k_s	az útalapok hibáit figyelembe vevő együttható

3.3.2. Egyesült királyság módszere a fáradási törési kritériumra

A Nottinghami egyetem kutatásai alapján előállt fáradási görbe (Pell et al., 1972; Brown et al. 1982; Brunton et al., 1987) elsősorban az aszfaltkeverék bitumentartalmától és a bitumen tulajdonságaitól teszi függővé a megengedett igénybevételek nagyságát, rámutatva, hogy a fáradás jelenségének mértéke főként a kötőanyag tulajdonságaitól függ.

$$\log \varepsilon_t = \frac{14,39 \log V_B + 24,2 \log SP_i - k - \log N}{5,13 \log V_B + 8,63 \log SP_i - 15,8}$$

ahol

ε_t	az aszfalt rétegben megengedhető megnyúlás (microstrain)
N	a tönkremenetelhez szükséges egységtengely áthaladási szám (millió ciklus)
V_B	az aszfaltkeverék bitumentartalma (V%)
SP_i	a bitumen lágyuláspontja (°C)
k	kritikus állapot elérése esetén 46,82; törési állapot elérése esetén 46,06.

3.3.3. Belgiumban kidolgozott módszer a fáradási törési kritériumra

A Belgiumban kidolgozott képlet (Verstraeten et al., 1972) szintén a bitumen tulajdonságaitól, illetve a keverék összetételétől teszi függővé a számított fáradási görbét:

$$\varepsilon_r(N) = A \times G \times \left[\frac{V_B}{V_B + V_V} \right] \times \left[\frac{N}{10^6} \right]^{-0,21}$$

ahol

ε_r	az aszfalt rétegben megengedhető megnyúlás (microstrain)
N	a tönkremenetelhez szükséges egységtengely áthaladási szám (ciklus)
A	a bitumen aszfaltén tartalmától függő együttható
G	az ásványi vázról függő együttható, értéke útépítésben 1
V_B	az aszfaltkeverék bitumentartalma (V%)
V_V	az aszfaltkeverék szabadhézag-tartalma (V%)

3.3.4. Shell-módszer a fáradási törési kritériumra

A Shell-módszer (Valkering, 1992) az alábbi képletet alkalmazza a fáradási görbe meghatározására:

$$\varepsilon_{fat} = (0,856 \times V_{bit} + 1,08) S_{mix}^{0,36} \times N_{fat}^{-0,2}$$

ahol

- ε_{fat} az aszfalt rétegben megengedhető megnyúlás (microstrain)
- V_{bit} az aszfaltkeverék bitumentartalma (V%)
- S_{mix} az aszfalt merevségi modulusa (N/m²)
- N_{fat} a tönkremenetelhez szükséges egységtengely áthaladási szám (millió ciklus)

3.3.5. Shell Grand Couronne-módszer a fáradási törési kritériumra

A Shell-Grand Couronne módszer (Bonnaure et al., 1982) a bitumen tulajdonságai mellett az aszfaltkeverék merevségi modulusától is függővé teszi a fáradási görbe helyzetét, képlete:

$$\varepsilon_r = \frac{(0,3 \cdot PI - 0,015 \cdot PI \cdot V_{bit} + 0,08 \cdot V_{bit} - 0,198) \cdot E_{mix}^{-0,28}}{N^{0,2}}$$

ahol

- ε_r az aszfalt rétegben megengedhető megnyúlás (microstrain)
- PI a bitumen penetrációs indexe
- V_{bit} az aszfaltkeverék bitumentartalma (V%)
- E_{mix} az aszfalt merevségi modulusa (N/m²)
- N a tönkremenetelhez szükséges egységtengely áthaladási szám

3.3.6. Asphalt Institute módszer a fáradási törési kritériumra

Az Asphalt Institute módszer (Shook et al., 1982) a következő képletet alkalmazza. Ebben az esetben a fáradási tulajdonságok meghatározására Monismith és társai (1972) által végzett laboratóriumi vizsgálatok képezték az alapot:

$$N = 18,4 \times C \times (6,167 \times 10^{-5} \times \varepsilon_t^{-3,291} \times |E^*|^{-0,854}$$

$$\text{és } C = 10^{4,84 \times \left[\frac{V_B}{V_B + V_V} - 0,69 \right]}$$

ahol

- N a tönkremenetelhez szükséges egységtengely áthaladási szám (millió ciklus)
- ε_t az aszfalt rétegben megengedhető megnyúlás (microstrain)
- E^* az aszfalt dinamikus merevségi modulusa (N/m²)
- V_B az aszfaltkeverék bitumentartalma (V%)
- V_V az aszfaltkeverék szabadhézag-tartalma (V%)

3.4. ASZFALT PÁLYASZERKEZET-MÉRETEZÉSI ELJÁRÁSOK

Az alábbiakban néhány európai ország pályaszerkezet-méretezési gyakorlatát ismertetem röviden (BME UVT, 2007; Fi, 2007).

3.4.1. A Magyarországon alkalmazott pályaszerkezet-méretezési eljárás

A hazai méretezési gyakorlatot Nemesdy (1992) alapozta meg, és 1992-ben vezették be. A módszer, bár az alkalmazandó szerkezet típus pályaszerkezetek katalógusból történő kiválasztását teszi lehetővé, alapjaiban a mechanikai méretezési módszert követi. Az útpályaszerkezetet mint többrétegű rendszert modellezi (burkolat, burkolatalap, földmű), amelynek legfontosabb kiindulási anyagtulajdonságai:

- Merevségi (rugalmassági) modulus;
- Poisson-szám;
- Rétegvastagság;
- Fáradási (Wöhler-) görbe.

A méretezés során alapelv, hogy az útpályaszerkezet a tervezési élettartama alatt különböző nagyságú ismétlődő terhelésnek van kitéve, az ezekből keletkező különböző nagyságú fárasztó hatásokat összegezve csak a tervezési élettartam vége után éri el a tönkremeneteli állapotot, amelyet a Wöhler-görbék meghatároznak.

Amennyiben az aszfaltban a T_i tengelyterhelés σ_i , illetve a T_e egységterhelés (100 kN) σ_e húzófeszültségeket hoz létre és a tönkremenetelhez tartozó teher-ismétlések száma N_i , illetve N_e , felírhatók az alábbiak:

$$\log \sigma_e = A - B \cdot \log N_e; \text{ és } \log \sigma_i = A - B \cdot \log N_i$$

$$\log \sigma_i - \log \sigma_e = B \cdot (\log N_e - \log N_i)$$

$$\log \frac{\sigma_i}{\sigma_e} = B \cdot \log \frac{N_e}{N_i} = \log \frac{T_i}{T_e}; \text{ mivel } \sigma_i / \sigma_e = T_i / T_e$$

$$\frac{T_i}{T_e} = \left(\frac{N_e}{N_i} \right)^B; \text{ másképp: } \frac{1}{N_i} = \frac{1}{N_e} \cdot \left(\frac{T_i}{T_e} \right)^{1/B}$$

az előzőekben említett Miner hipotézis alapján:

$$\sum_1^k \frac{n_i}{N_i} = \sum_1^k \frac{n_i}{N_e} \cdot \left(\frac{T_i}{T_e} \right)^{1/B} = 1$$

$$N_e = \sum_1^k n_i \cdot \left(\frac{T_i}{T_e} \right)^{1/B}$$

amely összefüggésből már adódik a $B=0,2$ (aszfaltok) meredekség esetében a jelenleg alkalmazott méretezési képletünk:

$$TF(F_{100}) = 1,25 \cdot 365 \cdot r \cdot \sum_1^t f_{ij} \cdot AN T_i \left(AF_i \cdot BN_i \cdot \frac{T_j}{100} \right)^5$$

ahol

TF Tervezési forgalom, adott tervezési időtáv alatt áthaladt $F_{100} = 100$ kN nagyságú egységtengely áthaladási szám

Az aszfaltanyagok modulusait az előzőekben említett előrebecslő képletekkel határozták meg (Az E_{bit} bitumenmodulust a Shanin-féle képletekből, majd a belga Francken és Verstraeten módszerével az E_{mix} aszfaltmodulust lehet meghatározni). A modulus meghatározása mellett a fáradási (Wöhler-) egyenes meghatározása szintén előrebecslő számításokkal történt, éspedig a SHELL-Grand Couronne (Bonnaure et al., 1982) képlettel.

Az anyagok modulusának meghatározása után a 12 havi középhőmérsékletnek megfelelően állapították meg az ALISE III többrétegű rendszer programmal az aszfalt alsó szélő szálának megnyúlását és a földmű összenyomódását. Az egyes hónapokban – a hőmérséklet változásából következően – az aszfalt modulusa más és más, azonban célszerű egy állandó egyenértékű modulussal számolni. Ez a modulus a Miner-féle hipotézis alkalmazásával az N_a helyettesítő fáradási ciklusszám alapján kereshető meg, értéke $E^a = 10\,000$ MN/m².

A méretezés forgalmi terhelési kategóriák (A-B-C-D-E), típus-pályaszerkezetek (elsősorban a burkolatalap típusa és vastagsága), illetve kétféle aszfaltkeverék (A, B) összetételének felvételével történt. Az aszfaltanyag összetételének segítségével máeghatározták a fáradási görbéket (SHELL-Grand Couronne), a görbékből forgalmi terhelési kategóriák tengelyáthaladási számai alapján megállapíthatók voltak a megengedett maximális aszfaltnyúlások (microstrain). A megnyúlások alapján végeelem-programmal (ALISE III, BISAR) kiszámíthatók az egyes típus-pályaszerkezetek rétegvastagságait a forgalmi terhelés és a burkolatalap típusának függvényében.

3.4.2. Ausztria

Az osztrák tervezési eljárás típus pályaszerkezetek katalógusára épül, kétféle hajlékony és egy kompozit pályaszerkezeti típust ajánlva 5+1 forgalmi kategóriában. A tervezési élettartam 20 év, ennek végén további felújítást vagy rehabilitációt feltételeznek. A típus-pályaszerkezetek miatt újfajta anyagok bevezetése csak jelentős munkával járó igazoló számítások elvégzésével

lehetséges. Lineáris-elasztikus modell alkalmazásával számítják a bitumenes, valamint a cementes kötőanyagú rétegek alján, a vízszintes irányú alakváltozást és a feszültséget. Hasonló módszerrel határozható meg a földmunka felső szintjén keletkező függőleges irányú alakváltozás és feszültség. A számítás alapjául szolgáló terhelés a 100 kN egység tengely. A számítás eredményeként kapott alakváltozási és feszültségi értékek adnak módot a várható fáradási élettartam számítására. A kapott eredményt vetik össze a tervezési élettartam során várható forgalomnagysággal, illetve az abból származó leromlással.

3.4.3. Belgium

A belga pályaszerkezet-tervezési rendszer egy többrétegű szerkezet-számítási modellt használ. A modell alkalmazásához a felhasznált anyagok mechanikai tulajdonságainak ismerete mellett, az időjárási jellegzetességek, valamint az előforduló talajok geotechnikai jellemzőinek ismerete szükséges. A nagy számítási szükséglet miatt az alkalmazás számítógépes szoftver formájában történik.

3.4.4. Egyesült Királyság

Az EK-ban használt eljárást 1984-ben fejlesztették ki. Lineáris, többrétegű rugalmas modellt alkalmaz a módszer, a szabványos kerékterhelés hatására, az alaprég alján keletkező vízszintes húzófeszültség és az altalaj tetején keletkező függőleges nyomófeszültség meghatározására. Ezen feszültségek, az út fáradási élettartamát és a deformációs élettartamát előrejelzik, azt, 80 kN-os tengelyáthaladások számában megadva. A modell kalibrálásához 34 kísérleti útszakasz súlyozott teljesítményadatát használták fel. Ezen előírás szerint megtervezett utak 85%-os valószínűséggel érik meg a 20 éves élettartamot tönkremenetel nélkül. Megfelelő megerősítésük további 20 éves élettartamot biztosít.

3.4.5. Franciaország

A francia tervezési eljárás egész Európa előtt ismert, fejlesztése folyamatos. A számítás elméleti alapja egy olyan, többrétegű rugalmas modell (Burmister), amely lehetővé teszi a legalsó aszfaltrég alján, valamint az alatta fekvő hidraulikus réteg alsó szélső szálában a keletkező vízszintes alakváltozás és igénybevétel, továbbá a földmű felső szintjén keletkező függőleges irányú alakváltozás, illetve igénybevétel számítását. Az alkalmazott terhelés 130 kN-os egység tengely. A számítás ALIZÉ szoftvere lehetővé teszi eltérő kerékterhelés felvételét is. A szoftver legnagyobb előnye az, hogy a teljes méretezési eljárás rendszerbe foglaltan, az aszfaltmechanikai vizsgálatoktól kezdve, bizonyos építési sajátosságokat is beleértve, a

kockázatok kezeléséig teljes körűen tartalmazza a méretezéshez szükséges lépéseket. Szabadon paraméterezhető jellege miatt jól illeszthető a nemzeti sajátosságokhoz.

3.4.6. Hollandia

A pályaszerkezetek méretezésére Hollandiában azt az eljárást alkalmazzák, amely az analitikus SPDM (Shell Pavement Design Manual, 1978) módszer alapján készült. Az eljárás a lineárisan rugalmas többrétegű elméleten alapszik. Az alkalmazás során a fáradási élettartamhoz tartozó és az alsó aszfaltréteg alján keletkező húzófeszültséget, valamint az altalaj függőleges összenyomódását határozzák meg. Az altalaj összenyomódása általában nem domináns. A tervezési forgalom meghatározása a 100kN-os egységtengety alapján történik a negyedik hatvány szerinti tengelyátszámítási tényező szerint. Az eljárást 1983 és 1984 között szerkezeti tönkremeneteli eredmények alapján empirikusan kalibrálták.

3.4.7. Németország

Kezdetben a burkolatok esetében, csak a fagyással szembeni ellenállásra vonatkozóan jelentek meg követelmények. A későbbiekben jelent meg az RStO 86 számú dokumentum, amely előírásokat tartalmaz a rétegvastagság meghatározására a különböző pályaszerkezet típusok esetében. A burkolatok az alábbi filozófiával összhangban épülnek:

A talaj és altalaj rétegeinek el kell érniük a teherbírási minimum értékeket és az előírt tömörségi fokot. Az egyedi rétegekre vonatkozó követelmények a felső rétegek felé haladva nőnek. A rétegvastagságok függenek a forgalom nagyságtól és a különböző szabványos aszfaltkeverékekhez igazodnak. Az aszfaltkeverékek megválasztása gazdasági megfontolások mellett, a helyi és regionális tapasztalatok, valamint a környezetvédelmi előírások alapján történik.

3.4.8. Svájc

A svájci pályaszerkezet méretezés az AASTHO eljáráson, valamint a svájci úthálózaton végzett építési és fenntartási tapasztalatokon alapul. A szabvány egy katalógus, amely egyaránt tartalmazza a hajlékony, a félmerev és a merev pályaszerkezeteket. A tervezési eljárás meghatározza a teljes szerkezeti vastagságot csakúgy, mint az egyes rétegek vastagságát a 20 éves tervezési időszakra. A katalógus típus- pályaszerkezeteket tartalmaz a 80kN-os egységtengetyek napi 10 és 3000 közötti áthaladási számára.

3.5. KUTATÁSOK A PÁLYASZERKEZET-MÉRETEZÉSI ELJÁRÁSOK FEJLESZTÉSÉVEL KAPCSOLATBAN

Korábban, a nagy teljesítményű számítógépek elterjedése előtt – a pályaszerkezet méretezés számítási igényessége miatt – a modellezési lehetőségek erőteljesen korlátozottak voltak. A számítógépek megjelenésével e lehetőségek határai is kitágultak, hiszen rengeteg művelet gyors elvégzésére volt lehetőség.

A COST 333 munkabizottság vizsgálta a fő pályaszerkezeti elemek romlási mechanizmusait, illetve az egyes európai országok pályaszerkezet-tervezési modelljeit (Gáspár, 1999). Arra a következtetésre jutottak, hogy az egyes országok hiába alkalmaznak hasonló elvű analitikus pályaszerkezet-tervezési modelleket, az inputokat (forgalom, időjárási tényezők, anyagjellemzők különböző módokon veszik figyelembe. Ennek következménye az országoként eltérő pályaszerkezeti rétegvastagságok hasonló forgalmi terhelésre.

A COST 333 munkabizottság tagjaiból alakult AMADEUS projekt (Advanced Models for Analytical Design of European Pavement Systems, Fejlett modellek az európai burkolatok analitikus tervezéséhez) keretében 10-féle pályaszerkezet-tervezési modell vizsgálatára került sor. (Gáspár, 2001). Az adatok elemzése során megállapítható volt, hogy a rugalmas többrétegű elmélet alkalmazása az alsó aszfaltszál megnyúlását meglehetősen jól előrebecsüli. A modellek egy része a viszkoelasztikus tulajdonságok modellezésére is képesek, de a szükséges paramétereket nem lehet sem laboratóriumi, sem helyszíni vizsgálatokkal meghatározni.

3.5.1. Kutatások a nagy forgalmi terhelésű útszakaszok burkolataival kapcsolatban

A gépjármű-forgalom és a tengelyterhelések gyors növekedésével olyan nagy forgalmi terhelések alakultak ki, amelyek felvetették a pályaszerkezet felépítése során alkalmazott anyagok megváltoztatását. A nagy forgalmi terhelésű útszakaszok pályaszerkezeti rétegeinek építésekor a külföldi tapasztalatok alapján mindenképpen két lehetőség jöhet szóba: betonburkolat vagy nagymodulusú aszfaltokkal készített hajlékony pályaszerkezet (Ambrus et. al, 2003). Az aszfalttechnológia fejlődésével megjelenő modifikált bitumenekkel készített aszfaltkeverék esetében a fáradási tulajdonságok kedvezőbben alakulnak. Európában ezt a tulajdonságot egyedül Franciaországban használják ki a pályaszerkezetek rétegrendjének tervezésénél (Ugyan nem témája a disszertációnak, de megemlítenő, hogy a modifikált bitumennel készült aszfaltoknak a burkolat más tönkremeneteli módjaira is kedvező hatása van (pl. plasztikus deformáció).

A nemzetközi trendekhez hasonlóan hazánkban is előtérbe került a modifikált bitumen alkalmazása, illetve nagymodulusú aszfalt teherhordó rétegek beépítése, főként autópályák pályaszerkezeti rétegeiként. Székely (2005) az IMI Kft. (ma: H-TPA Kft.) laboratóriumában

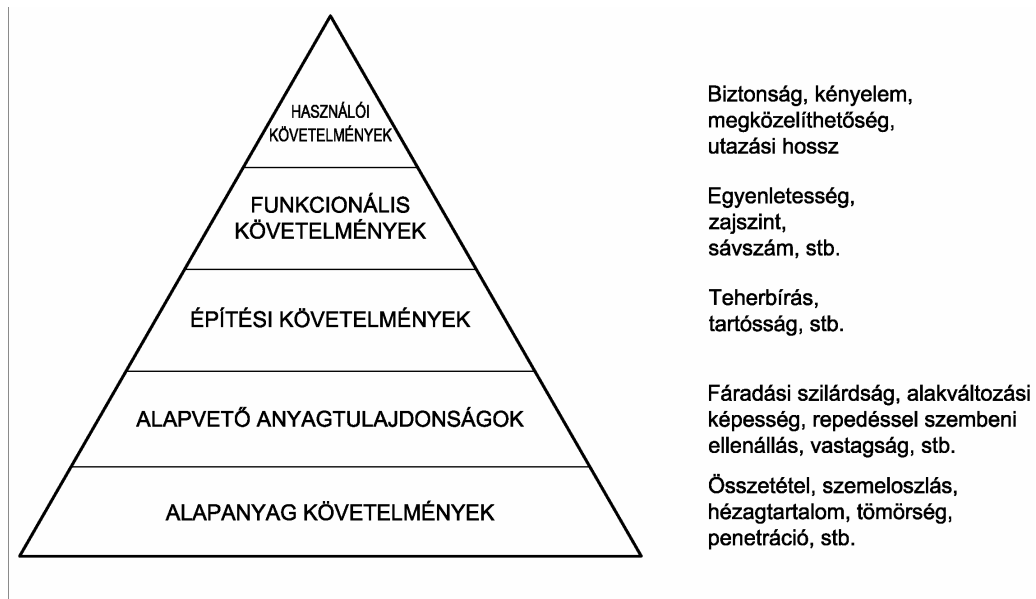
tervezett és vizsgált nagymodulusú aszfaltok vizsgálati eredményeiről számol be. A vizsgált aszfaltanyag beépítése során arra törekedtek, hogy a nagymodulusú aszfalt lássa el a teherviselő-elosztó feladatot, a kopóréteg szerepe csupán a felület tulajdonságait (egyenletesség, tapadás, stb.) határozza meg.

3.5.2. Az útburkolatok teljesítőképségének komplex rendszere

Az útburkolatok építésében és felújításában világszerte egyre inkább az a tendencia érvényesül, hogy a szakmai szabályozások az útburkolatok viselkedésével minél közvetlenebb kapcsolatba kerüljenek. Korszerű szabályozások segítségével nemzetgazdasági szempontból is optimálissá válhatnak az egyébként rendkívül nagy forrásokat igénybe vevő útépitési beruházások. A burkolat teljesítményének a útburkolatokkal szemben támasztott gazdaságossági, biztonsági és kényelmi követelmények összességének kielégítési mértékét nevezik. Ez tehát jóval több, mint a burkolat állapotát, illetve állapotának változását jellemző viselkedés.

Az üzemi szabályozások tisztán teljesítményi szabályozása azt jelenti, hogy a burkolat üzem közbeni teljesítményére összpontosít. Ennek a módszernek azonban az a hátránya, hogy kevés korábbi tapasztalat, vizsgálat áll rendelkezésre ahhoz, hogy a burkolatok kivitelezése közben előre lehessen becsülni az üzem közbeni viselkedést. Éppen ebből kifolyólag a következő két átmeneti szabályozástípus elterjedt (Gáspár, 2003, 2004):

- teljesítményen alapuló szabályozás (performance-based specification): az építés során nehezen ellenőrizhető mérnöki jellemzőkre vonatkozik;
- teljesítménnyel összefüggő szabályozás (performance-related specification): az anyagtulajdonságokat kell ismerni, és az elérendő célt meghatározni.



3.5. ábra A követelmények piramisa (Hollandia)

A teljesítménnyel kapcsolatos szabályozások fontos eleme, hogy a követelményeket (kritériumokat) a megbízó határozza meg. A **3.5. ábra** mutatja be a teljesítménnyel összefüggő követelmények piramisát. A piramis. Az alsó szinte található követelmények csak közvetetten hatnak a burkolat teljesítményére; felsőbb szintjei egyre közelebb kerülnek az úthasználókhoz, azonban ezek a követelmények egyre nehezebben számszerűsíthetők. A piramisban a disszertáció témájául szolgáló fáradási tulajdonságok a 2. szinten jelennek meg.

Az utóbbi időben előtérbe került a hosszú élettartamú útburkolatok megvalósításának kérdése. Gáspár (2005) az ELLPAG (hosszú élettartamú burkolatokkal foglalkozó) munkabizottság tevékenységéről számol be. Az ilyen burkolatok egyik jellemzője, hogy „szerkezeti tönkremenetel több, mint 20 évig nem következet be”. A modifikált bitumennel készült aszfaltok lapos hajlású Wöhler-görbéje – főként nagyobb vastagságú aszfaltburkolatok beépítése esetében – segítséget nyújthat az élettartam fáradás szempontjából történő kiterjesztésére.

4. VIZSGÁLATOK A MEREVSÉGI MODULUS MEGHATÁROZÁSÁRA

4.1. A VIZSGÁLATOK TÍPUSAI, VÉGREHAJTÁSUK

A merevségi modulus meghatározására alkalmazott vizsgálatok felépítése eltérő. A 80-as évek elejéig a fáradási tulajdonságok vizsgálatára is használt hasáb alakú próbatesteken határozták meg a merevségi modulus értékét, pl. a hárompontos hajlítás módszerével (MSZ EN 12697-24:2005). E berendezéssel a komplex modulus meghatározása különböző hőmérsékleteken és frekvenciákon lehetséges volt. Ezeknek az eszközöknek az alkalmazásával szolgáltatott eredmények felhasználása kizárólag kutatási munkákhoz kapcsolódott, az iparhoz kötött felhasználás a magas időigény miatt gyakorlatilag kizárt volt. Egy 3 pontos hajlító berendezéssel egy nap alatt egy próbatest vizsgálata volt lehetséges.

Az 90-es évek elején a merevség meghatározására alkalmas közvetett húzóvizsgálat – ITT, Indirect Tensile Test (Nunn, 1992) – elvégzéséhez szükséges eszköz kereskedelmi forgalomba került, amellyel már gazdaságosan és viszonylag könnyen meg lehetett határozni az aszfaltkeverékek merevségi modulusát. Az egyszerű végrehajthatóság, a viszonylag egyszerű próbatest készítési mód miatt ezt a hengeres próbatesteken végzett vizsgálatot alkalmazzák a legelterjedtebben a merevség megállapítására (Fairhurst et al., 1990).

A merevségi modulus meghatározásának módjára jelenleg a hazánkban is érvényes MSZ EN 12697-26:2005 számú európai szabvány ad utasítást. A szabvány szerint a merevségi modulus vizsgálata a következő módokon végezhető el (zárójelben a szabvány által használt kód):

Hajlítóvizsgálatok:

- kétpontos hajlítóvizsgálat trapéz alakú próbatesteken (2PB-TR);
- kétpontos hajlítóvizsgálat hasáb alakú próbatesteken (2PB-PR);
- hárompontos hajlítóvizsgálat hasáb alakú próbatesteken (3PB-PR);
- négypontos hajlítóvizsgálat hasáb alakú próbatesteken (4PB-PR).

A választható hasító-húzó vizsgálat:

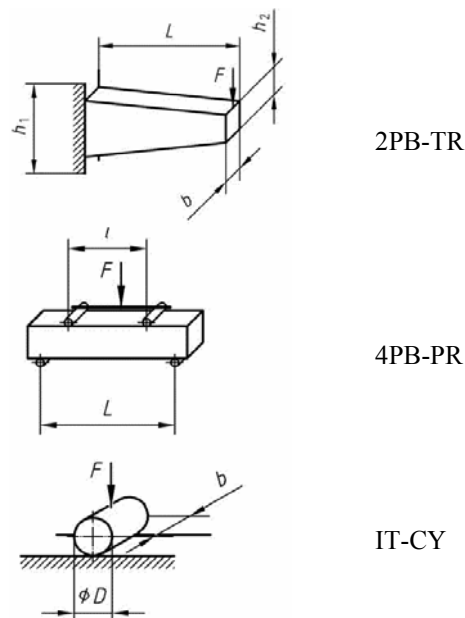
- hasító-húzó vizsgálat henger alakú próbatesteken (IT-CY).

A választható közvetlen egytengelyű vizsgálatok:

- közvetlen húzó-nyomó vizsgálat henger alakú próbatesteken (DTC-CY);
- közvetlen húzóvizsgálat henger alakú próbatesteken (DT-CY);
- közvetlen húzóvizsgálat hasáb alakú próbatesteken (DT-PR).

A fáradásvizsgálat során laboratóriumunkban a **4.1. ábrán** látható három vizsgálatot alkalmazzuk a merevségi modulus meghatározására.

A legegyszerűbb módszer, a próbatest készítésének egyszerűsége miatt az IT-CY vizsgálat, hiszen ez a rövid ideig tartó vizsgálat elvégezhető ömlesztett mintából készített Marshall-próbatesteken és burkolatból fűrt magmintákon egyaránt. A hajlító vizsgálatok előnye ugyanakkor abban rejlik, hogy a fárasztási vizsgálatához gyártott próbatestek vizsgálatának mintegy „melléktermékként” egyúttal merevségi (S kezdeti merevségi) érték is megállapítható.



4.1. ábra Aszfalt próbatestek merevségi modulus-meghatározásának módszerei

Az IT-CY vizsgálat végrehajtásakor a mérőkeretbe helyezett – megfelelő hőmérsékletű – próbatesten először kondicionáló impulzusokat kell alkalmazni annak érdekében, hogy a berendezés képes legyen a terhelés nagyságát és idejét az elérendő vízszintes átmérőirányú alakváltozáshoz és felfutási időhöz igazítani. A kondicionálás után az 5 terhelési impulzus méréseiből a mért merevségi modulus értékét minden egyes terhelési impulzusra a következő képlettel kell meghatározni:

$$S_m = \frac{F \times (v + 0,27)}{z \times h}$$

ahol

- S_m a mért merevségi modulus [MPa];
- F az alkalmazott függőleges teher csúcserője [N];
- z a vízszintes alakváltozásnak a terhelési ciklusban elért amplitúdója [mm];
- h a próbatest vastagságának középértéke [mm];
- v a Poisson-tényező. Értéke általában 0,35.

A mért merevségi modulus értékét korrigálni kell a terhelési terület tényező 0,60-as értékéhez a következő képlettel:

$$S'_m = S_m \times (1 - 0,322 \times (\lg S_m - 1,82) \times (0,60 - k))$$

ahol

- S'_m a merevségi modulus 0,60-os terhelési terület tényezőre korrigált értéke, [MPa];
 k a mért terhelési terület tényező;
 S_m a mért merevségi modulus [MPa], k terhelési terület tényező esetén.

A próbatest merevségi modulusát két, egymásra merőleges átmérő mentén kell mérni és számítani, majd ezek átlagát képezni, ezt nevezzük adott próbatest merevségi modulusának.

4.2. A SZÁMÍTOTT ÉS MÉRT MEREVSÉGI MODULUSOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A korábban bemutatott előrebecslő képletek széles körű laboratóriumi vizsgálatokon alapulnak, ezért bizonyos határok között az előzetes tervezéshez elegendő információ nyújtanak. A ténylegesen mért merevségi modulusok használatakor azonban eltérések adódhatnak, ahogy azt korábbi kutatások már alátámasztották (Quintus et al., 1982), továbbá a merevségi modulus meghatározásának módja is jelentősen befolyásolhatja annak értékét (Ambrus et al., 1999).

A BME Út és Vasútépítési Tanszék Városi Útpályaszerkezetek Laboratóriumában 2005-2007. évek között számos aszfaltkeverék merevségi modulusának mérése történt meg, közvetett hasító-húzó vizsgálattal (IT-CY). Az aszfaltkeverékek az aszfalt útpályaszerkezetekbe leggyakrabban beépített keverékek közül kerültek ki (AB-11/F, AB-12/F, mAB-11/F, mAB-12/F, AB-16/F, mZMA-11, mZMA-12, K-20/F, K-22/F, mK-20/F, mK-22/F). Egy-egy keverékből 3-5 db Marshall-próbatestet készítettünk, így az aszfaltkeverék várható merevségi modulusa 3-5 próbatest merevségi modulusának átlagából adódott.

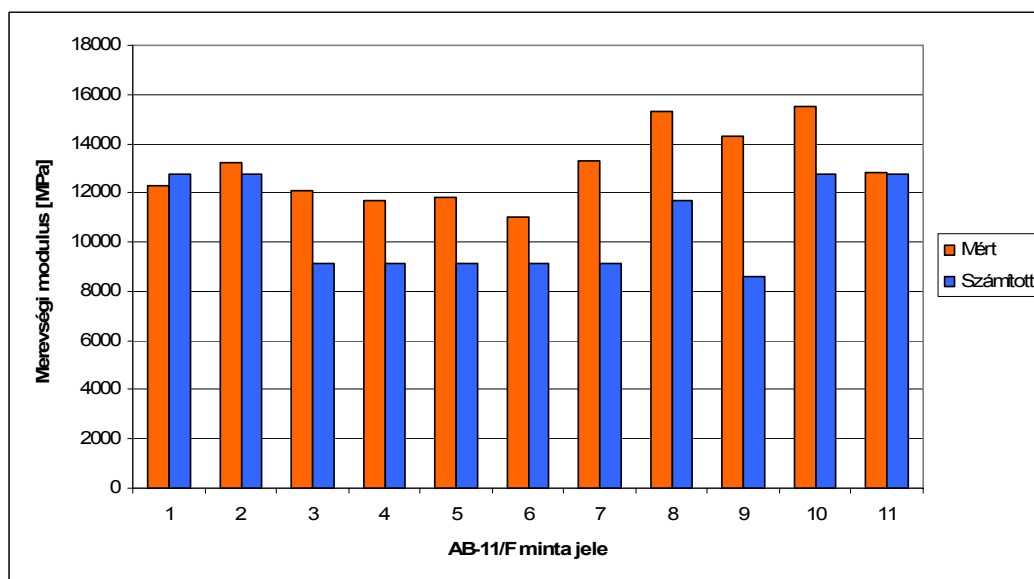
A nagy számú minta alapján kísérletet teszünk a Verstraeten által kidolgozott merevségi előrebecslési módszer és a mért merevségek közötti eltérések megállapítására. A **4.2-4.9. ábrák** a különböző típusú aszfaltkeverékeken végzett merevségi modulus mérések, és a keveréktervek alapján számított merevségi modulusok láthatók.

A **4.1. táblázat** az egyes aszfalt típusok számított és mért merevségi modulusainak eltéréseit gyűjti össze, a mért modulus százalékában. A táblázatból és az ábrákból egyaránt látható, hogy a nem modifikált bitumennel készült keverékek ± 20 % alatti eltéréssel előrebecsülhetők a Verstraeten-féle képlettel. Megállapítható továbbá, hogy a képlet AB-11/F és AB-12/F keverékek esetében inkább alulbecsüli, K-20/F, K-22/F aszfaltkeverék esetében inkább felülbecsüli a merevséget. A modifikált bitumennel készült keverékek esetében a számított és a mért merevségek között meglehetősen nagy eltérés adódik. Ez alól kivétel a modifikált bitumennel készült kötőrétegek merevségi modulusa, mert bár a minták száma csak 10,

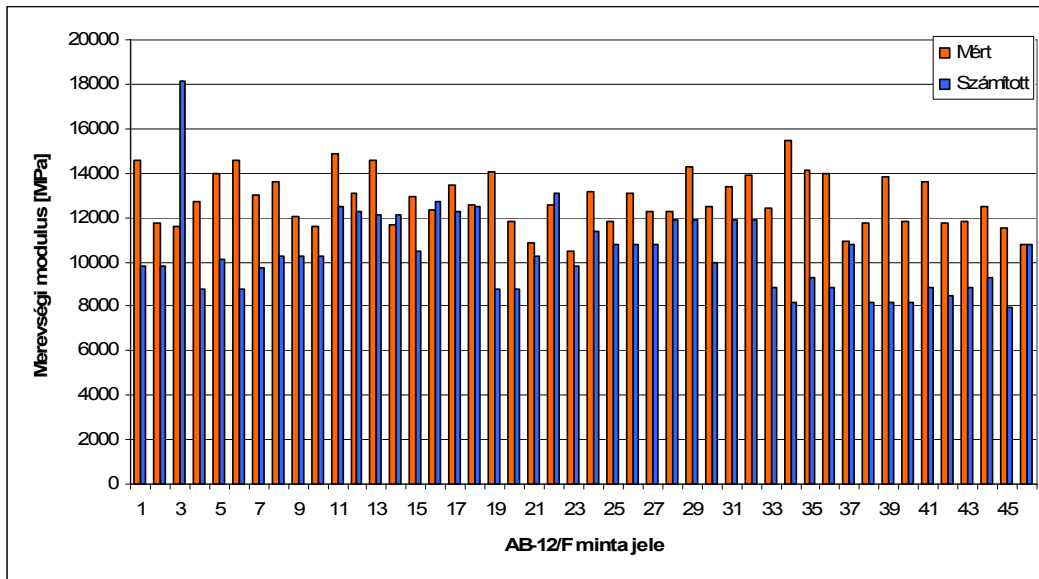
ugyanakkor nagyobb eltérés a számított és a mért merevségi modulus értékek között csak 2 esetben adódott egyébként a két érték jól megközelíti egymást ($\pm 20\%$).

4.1. táblázat Az IT-CY vizsgálattal és számítással meghatározott merevségi modulus eltérése (%)

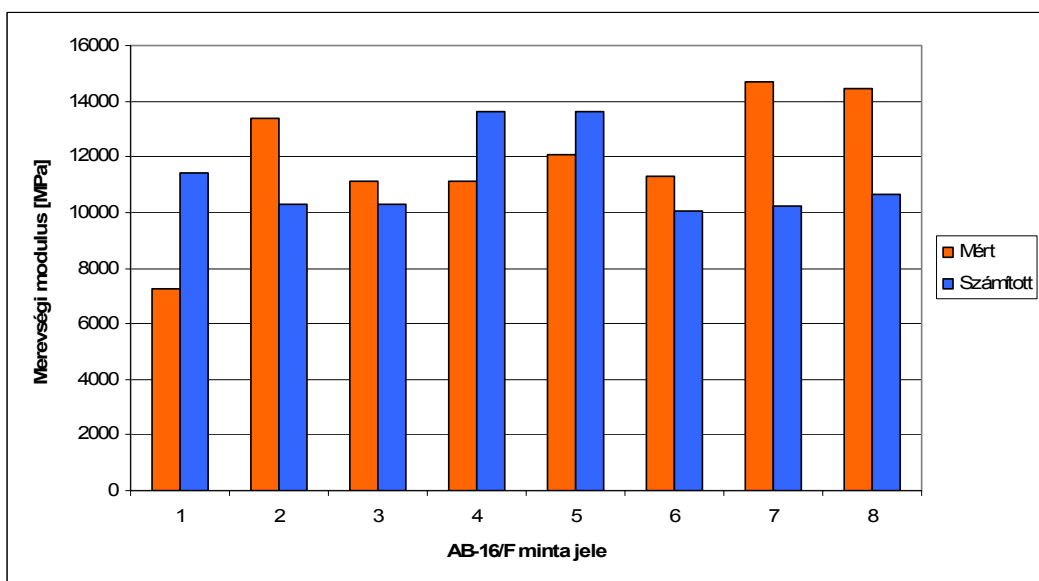
Keveréktípus jele	Vizsgált ömlesztett aszfaltanyagok száma	A mért és a számított merevségi modulus eltéréseinek átlaga (%)
AB-11/F	11	-18 %
AB-12/F	46	-18 %
AB-16/F	8	-1 %
K-20/F	29	+12 %
K-22/F	14	+3 %
mAB-11/F és mAB-12/F	18	-51 %
mK-20/F és mK-22/F	10	-9 %
mZMA-11 és mZMA-12	21	-61 %
Összes keverék	157	



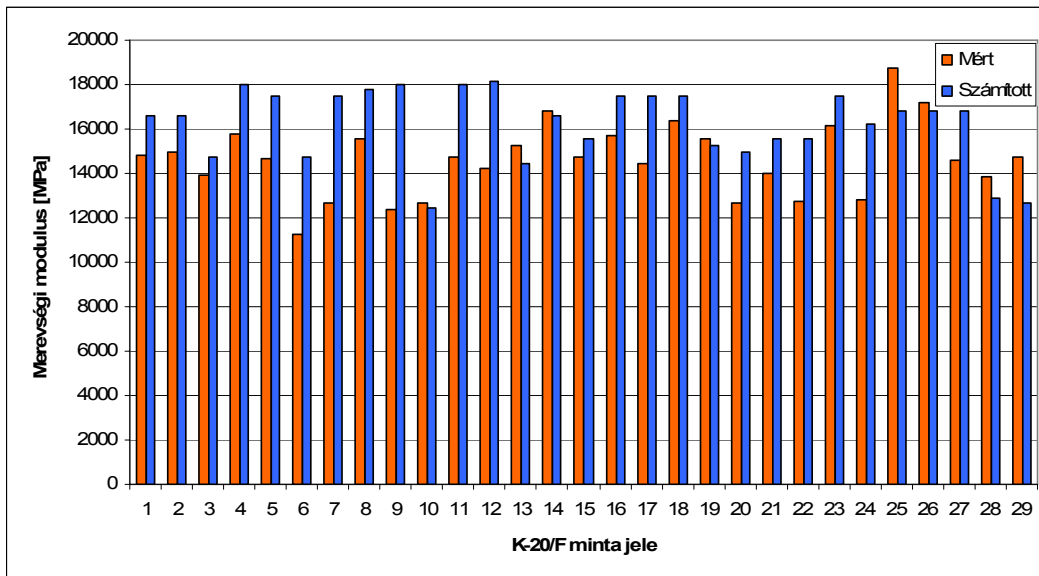
4.2. ábra A mért és számított merevségi modulusok AB-11/F aszfaltkeverékeken



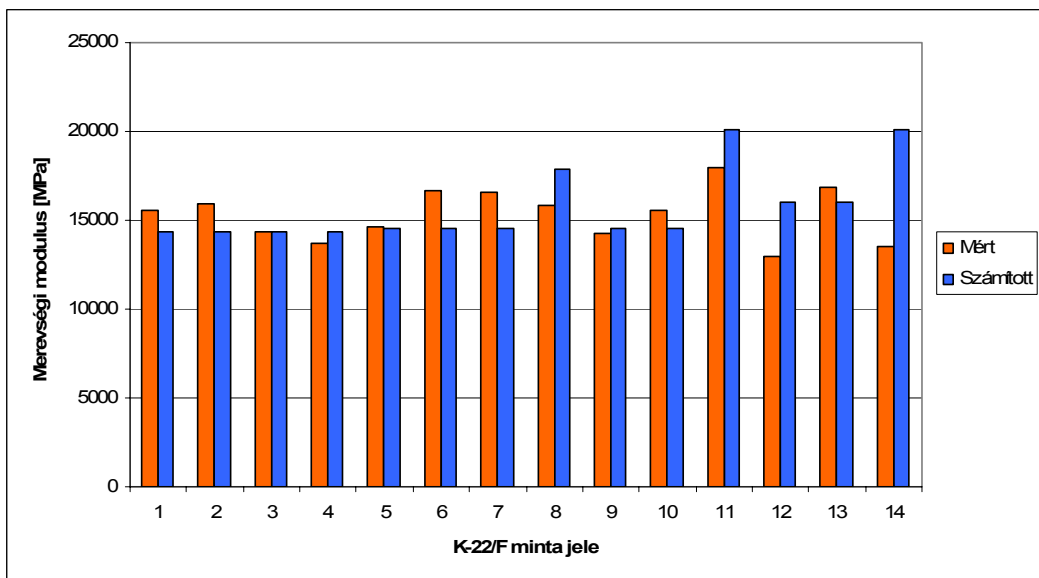
4.3. ábra A mért és számított merevségi modulusok AB-12/F aszfaltkeverékeken



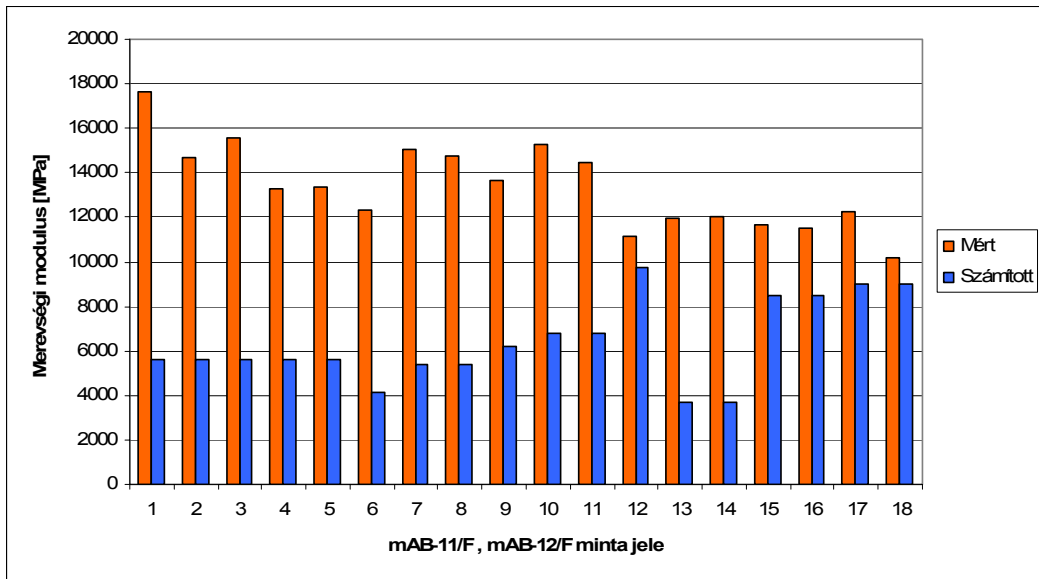
4.4. ábra A mért és számított merevségi modulusok AB-16/F aszfaltkeverékeken



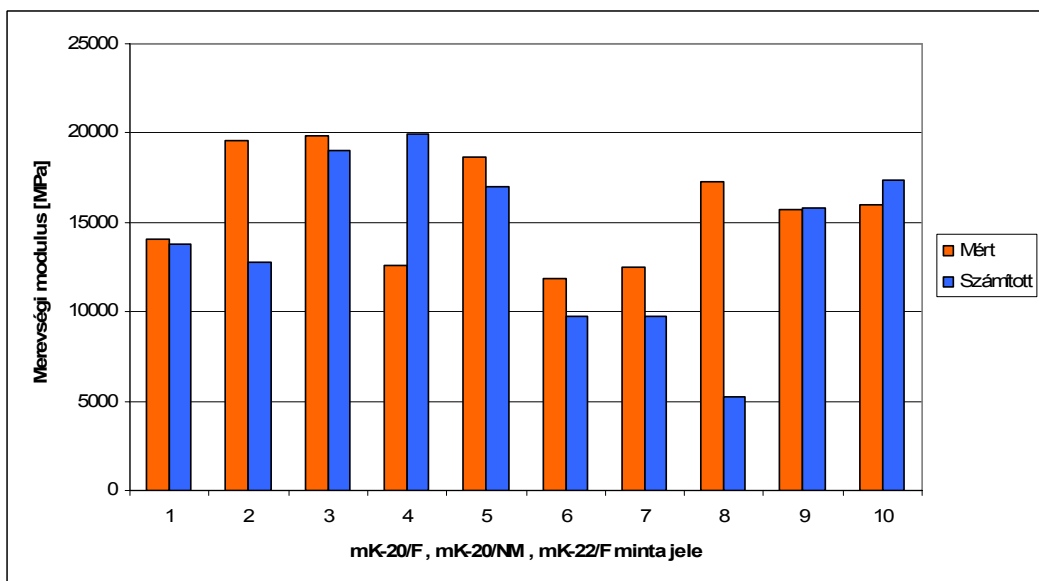
4.5. ábra A mért és számított merevségi modulusok K-20/F aszfaltkeverékeken



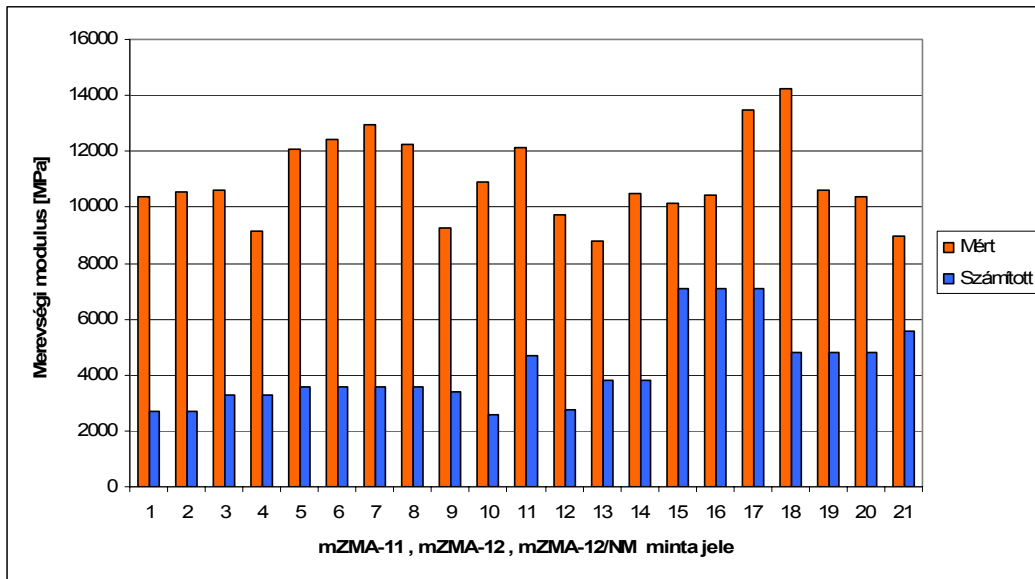
4.6. ábra A mért és számított merevségi modulusok K-22/F aszfaltkeverékeken



4.7. ábra A mért és számított merevségi modulusok mAB-11/F és mAB-12/F aszfaltkeverékeken



4.8. ábra A mért és számított merevségi modulusok mK-20/F és mK-22/F aszfaltkeverékeken



4.9. ábra A mért és számított merevségi modulusok mZMA-11 és mZMA-12 aszfaltkeverékeken

4.3. ÖSSZEFOGLALÁS, TÉZISEK

1. tézis: Nagy számú aszfaltkeverékből készült próbatestek IT-CY merevségi vizsgálatának elvégzése alapján megállapítható, hogy a Verstraeten által kidolgozott előrebecslő képlet a jelenleg gyártott aszfaltanyagokon is – a modifikált bitumenekkel készült kopóréteg-keverékek kivételével – jól becsüli előre az aszfaltkeverék összetétele alapján a merevségi modulusot, azaz az előzetes tervezéshez jól használható.

A pályaszerkezet méretezésénél a felső aszfaltréteg (kopóréteg) merevségi modulusa kevésbé játszik szerepet, így a kopóréteg-keverékek merevségi becslésének kisebb szerepe van.

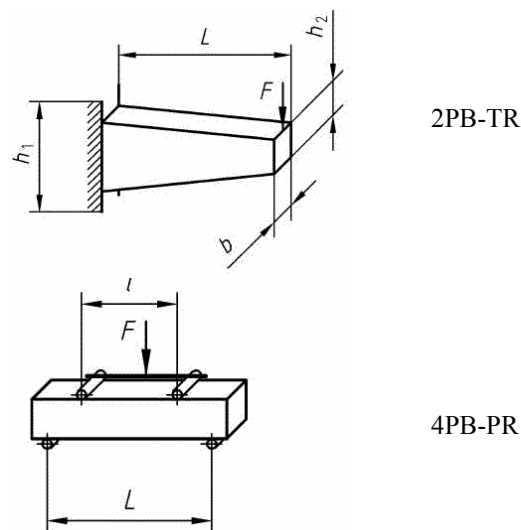
5. HAJLÍTÓ-FÁRASZTÓ VIZSGÁLATOK

5.1. A HAJLÍTÓ-FÁRASZTÓ VIZSGÁLATOK ISMERTETÉSE

Az aszfaltkeverékek mechanikai paramétereinek közül nagy fontosságú a fáradási tulajdonságok mérése és eredményeinek értékelése. A fáradásvizsgálat lefolytatására történő utasításokat az **MSZ EN 12697-24:2006** jelű európai szabvány tartalmazza. A szabvány szerint a fáradásvizsgálat az alábbi módokon végezhető el (zárójelben a szabvány által használt kód):

- Kétpontos hajlító-fárasztó vizsgálattal trapezoid alakú próbatesten (2PB-TR)
- Hárompontos hajlító-fárasztó vizsgálattal prizmatikus (gerenda) próbatesten (3PB-PR)
- Négypontos hajlító-fárasztó vizsgálattal prizmatikus (gerenda) próbatesten (4PB-PR)

A fáradásvizsgálat végrehajtásánál alkalmazott elrendezések az **5.1. ábrán** láthatók.



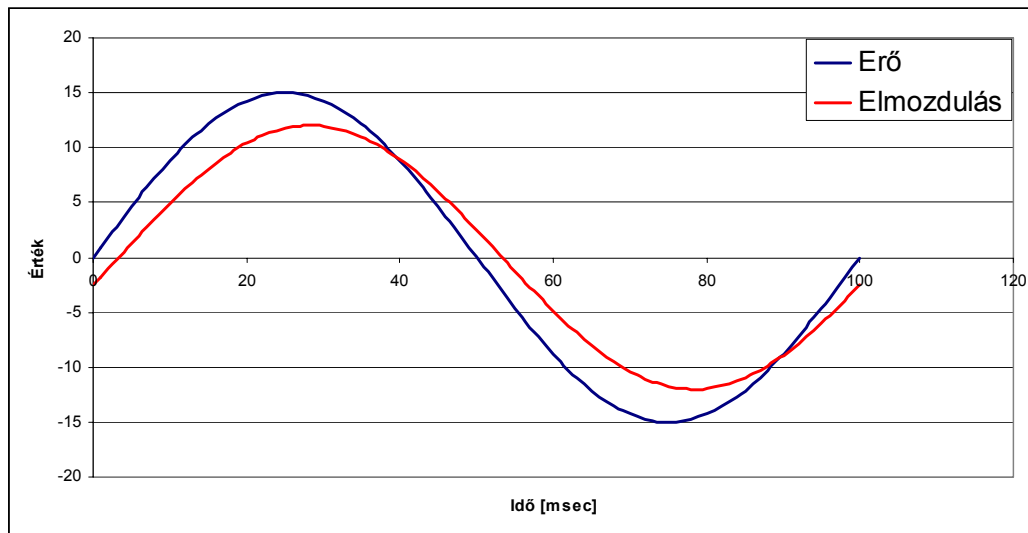
5.1. ábra A különböző hajlító-fárasztó vizsgálatok elrendezési vázlatai

A fáradásvizsgálat elve, hogy az aszfalt próbatest ismétlődő – a laboratóriumi vizsgálatok esetében általában szinuszos – hajlító terhelés hatására veszít a kezdeti merevségéből. A próbatest tönkremenetele egyezményesen a kezdeti merevség (S_0) 50%-ához tartozó ciklusszám (N). A vizsgálat végrehajtható:

- Erővezérléssel: a próbatestet állandó hajlítóerővel terhelve, a próbatest szélső szálain tapasztalható állandó feszültség – $\sigma(t) = \text{konst.}$ – mellett a szélső szál megnyúlása ($\mu\epsilon$) egyre nő;

- Elmozdulás-vezérléssel: a próbatestet állandó lehajlásnak tesszük ki, így a szélső szálak megnyúlása állandó ($\mu\epsilon$), ezzel párhuzamosan a szélső szálban keletkező feszültség – $\sigma(t)$ – csökken, vagyis egyre kisebb terhelő erővel kell a próbatestet terhelni az állandó $\mu\epsilon$ megnyúlás eléréséhez.

A rugalmas anyagokra érvényes a Hooke-féle összefüggés. ($\sigma = E \times \epsilon$). A laboratóriumi hajlító-fárasztó vizsgálat esetén ez azt jelenti, hogy a szinuszosan ismétlődő terhelés hatására az alsó szélső szálban keletkező feszültség és fajlagos nyúlás maximumai egybeesnek. Az aszfalt azonban csak nagyon alacsony hőmérsékleten tekinthető rugalmas anyagnak, az alkalmazott hőmérsékleti tartományban viszkoelasztikus. Ez az oka, hogy a hajlító-fárasztó vizsgálat közben a feszültség és az alakváltozás időben eltolódik, így a Hooke-törvény az alábbi alakúra módosul: $E^* = \sigma(t) / \epsilon(t)$. A gyakorlatban az E^* komplex modulus abszolút értékét használják, mint merevségi modulus. Értéke: $S = |E^*| = \sigma_{\max} / \epsilon_{\max}$. (Ambrus et al., 1999a)



5.2. ábra Az erő és az elmozdulás fáziseltolódása a szinuszos terhelés hatására

A vizsgálat végrehajtása a szabvány szerint igencsak időigényes: az elkészített 18 db próbatestet minimálisan 2 hétig pihentetni kell, majd három terhelési szinten – vagyis megkívánt $\mu\epsilon$ szélső szál megnyúlás értéken – 6-6 db próbatest hajlító-fárasztó vizsgálatát kell elvégezni, amely szintén kb. 2-3 hét időtartamot vesz igénybe.

A BME Út és Vasútépítési Tanszék Városi Útpályaszerkezetek Laboratóriumában hajlító-fárasztó vizsgálatokat négyponos berendezésen, elmozdulás-vezérelt módszerrel hajtottunk végre.

5.2. A VIZSGÁLAT LEFUTÁSÁNAK KIÉRTÉKELÉSE

A hajlító-fárasztó vizsgálat vizsgáló berendezése minden egyes próbatest esetében adott ciklusszámoknál számítógépes fájlban rögzíti az ismétlési számot [N], és a hozzá tartozó komplex merevségi modulus értékét [S^* , MPa]. Ha a rögzített adatokat grafikusán ábrázoljuk, az **5.3. ábrához** hasonló diagramot kapunk.

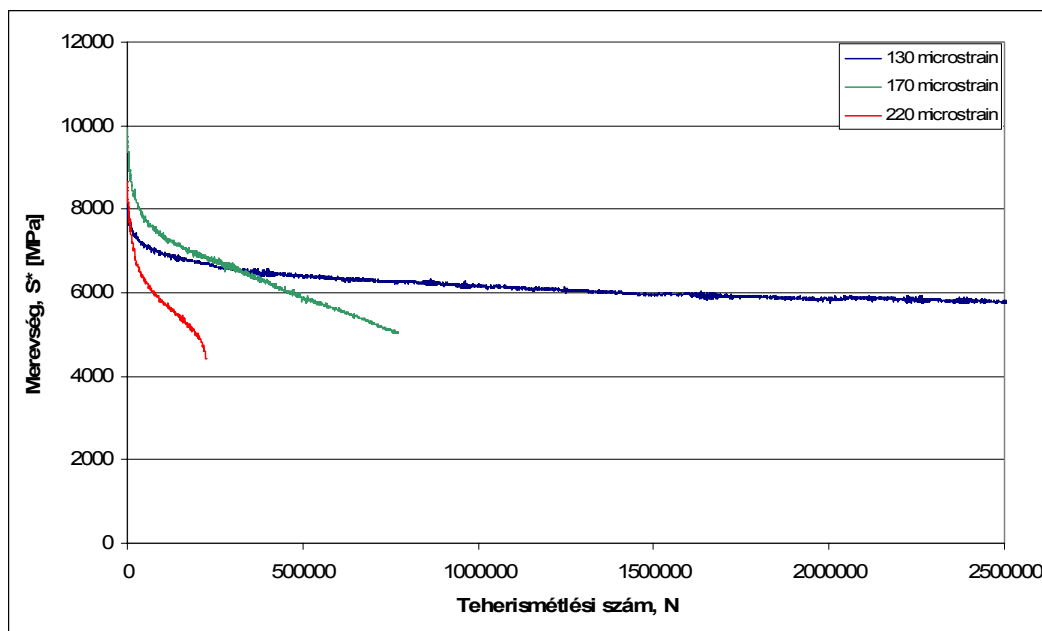
A grafikonon látható görbékről megállapítható, hogy a ciklusszám – merevség függvény konkáv jellegű, és két, jól elkülöníthető szakaszra osztható:

- egy kezdeti, erősen konkáv szakaszra;
- egy további, közel lineáris szakaszra.

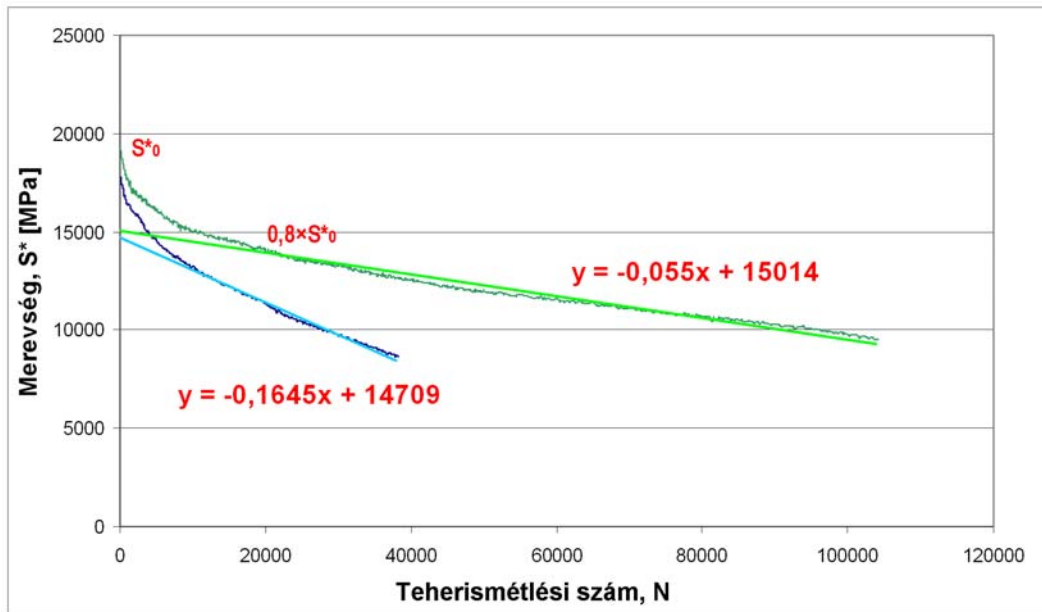
A konkáv és a lineáris szakasz határát úgy állapítottam meg, hogy a kezdeti merevség meghatározott százalékától (pl. 85%, 80%, 75%), mint kezdőértéktől a vizsgálat végéig a ciklusszám – merevségi modulus görbére lineáris regressziós egyenest illesztettem.

Ezen lineáris regressziós egyenesek és egyenleteik láthatók példaként az **5.4. ábrán**. Amennyiben az illesztett egyenesek korrelációs értéke (R^2) értéke megfelelően nagy ($>0,90$), a korreláció erős.

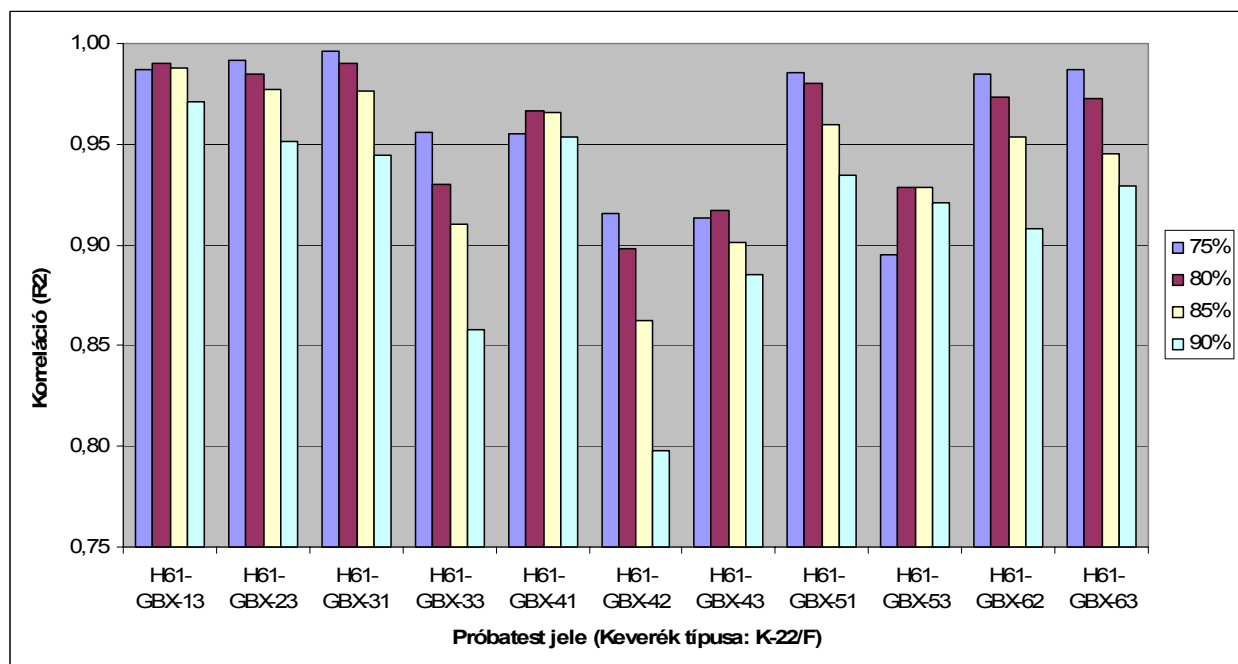
A különböző aszfaltkeverékek teljes ciklusszám – merevség görbéiből felvettem a kezdeti merevség 85%, 80% és 75%-os értékétől induló (és természetesen az 50%-os végértékig haladó) regressziós egyeneseket. A regressziós egyenesek korrelációs együtthatói az **5.5. ábrán** láthatók.



5.3. ábra A merevség változása a ciklusszám függvényében



5.4. ábra A ciklusszám – merevség diagramra illeszthető lineáris egyenesek



5.5. ábra A ciklusszám – merevség függvényekre illesztett regressziós egyenesek korrelációja (R^2) az illesztés kezdő értékének függvényében

A korrelációs együtthatók annál jobbák, minél inkább a függvény második, közel lineáris szakaszára illesztettem őket. Ezzel a módszerrel lehatárolható a konkáv és a közel lineáris szakasz közötti határ, amelyet célszerű a kezdeti merevség százalékában megállapítani. A táblázatból kapott adatok alapján megállapítható, hogy a konkáv és a lineáris szakasz határát a

kezdeti merevség 80%-os értékének felvéve a függvény további szakaszára jó korrelációval (>90%) lineáris egyenes illeszthető.

Az egyes próbatestek ciklusszám – merevségi modulus függvényére illesztett regressziós egyenesek képlete:

$$S^*(N) = m \times N + b$$

ahol

$S^*(N)$ A komplex modulus N ciklusszámhoz tartozó értéke;

m A regressziós egyenes hajlása ($m < 0$);

N A ciklusszám;

b A regressziós egyenes y tengelyhez tartozó metszéspontja.

Megállapítható, hogy a terhelési szint – pl. elmozdulásvezérelt módszernél az elérendő szélső szál megnyúlás [ε] – növelésével a merevség intenzívebben csökken, azaz „m” abszolút értéke növekszik.

Az MSZ EN 12697-24:2006 jelű szabvány szerint a 18 db próbatesten lefolytatott vizsgálatnál az egyezményes tönkremeneteli kritériumhoz (a kezdeti merevség 50%-a; $S^*_{0/2}$) tartozó ciklusszámot ($N_{S^*_{0/2}}$) kell feljegyezni, majd a ciklusszám (N) – terhelési szint ($\mu\varepsilon$) diagramban, log-log léptékben ábrázolni. A hajlító-fárasztó vizsgálat végeredménye a feltett pontokra illesztett regressziós egyenes (*Wöhler-görbe*), illetve ezen egyenes képletéből számított olyan terhelési szint érték, amely az $N=10^6$ ciklusszámnál okoz tönkremenetelt.

Amennyiben igaz az, hogy az egyes próbatestek ciklusszám – merevség függvényére (a kezdeti merevség 80%-os értékétől kezdődően) regressziós egyenes illeszthető, úgy az egyezményes tönkremeneteli kritériumhoz ($S^*_{0/2}$) tartozó ciklusszámot ($N_{S^*_{0/2}}$) a regressziós egyenes segítségével is kiszámíthatjuk (lásd **5.4. ábra**):

$$N_{S^*_{0/2}} = \frac{\frac{S^*_{0/2} - b}{m}}{2}$$

ahol

$N_{S^*_{0/2}}$ az egyezményes tönkremeneteli kritériumhoz tartozó ciklusszám

$S^*_{0/2}$ a kezdeti merevség

b a regressziós egyenes y tengellyel való metszéspontja

m a regressziós egyenes hajlása

Ez a módszer azért lehet jelentős, mert a fáradás végrehajtásának időszükséglete nagy. Amennyiben a regressziós egyenes helyzete a próbatest ciklusszám – merevség függvényéből már a próbatest tönkremenetel előtt becsülhető, úgy a fárasztás végrehajtásának időszükséglete csökkenhet. Ezen azt értjük, hogy nem feltétlenül kell minden esetben a tényleges egyezményes tönkremeneteli kritériumig fárasztani a próbatesteket.

Az **5.5. ábrán** egy kiválasztott aszfaltkeverékre az MSZ EN 12697-24:2006 számú szabvány szerinti kiértékelést alkalmaztam. A függvény az egyezményes tönkremeneteli kritérium szerinti ismétlési számot tartalmazza a terhelési szint ($\mu\varepsilon$) függvényében. Az felvett Wöhler-görbe és az $N=10^6$ ciklusszámhoz tartozó terhelési szint ($\mu\varepsilon$) szám látható.

Az **5.6. ábrán** ugyanazon keverékre a kiértékelést úgy végeztem el, hogy minden egyes próbatest ciklusszám – merevség görbéjére a kezdeti merevség 80% ÷ 50% közötti tartományában regressziós egyenest illesztettem, majd az egyenesek egyenletéből az előzőekben ismertetett módon számítottam az $N_{S*0,2}$ tönkremeneteli ismétlési számot. Ezen a ismétlési számok felhasználásával vettem fel a Wöhler-görbe és az $N=10^6$ ciklusszámhoz tartozó terhelési szint ($\mu\varepsilon$) értékét.

Az **5.7. ábrán** ugyanazon keverékre a kiértékelés során a próbatestek ismétlési szám – merevség görbéjére a kezdeti merevség 80% ÷ 60% közötti tartományában illesztettem a regressziós egyenest, amelyből extrapolálással, az egyenesek egyenletéből az előzőekben ismertetett módon számítottam az $N_{S*0,2}$ tönkremeneteli ismétlési számot. A próbatestek tönkremenetelhez tartozó ciklusszámát itt is felhasználtam a Wöhler-görbe felvételéhez és az $N=10^6$ ciklusszámhoz tartozó terhelési szint (ε) kiszámításához.

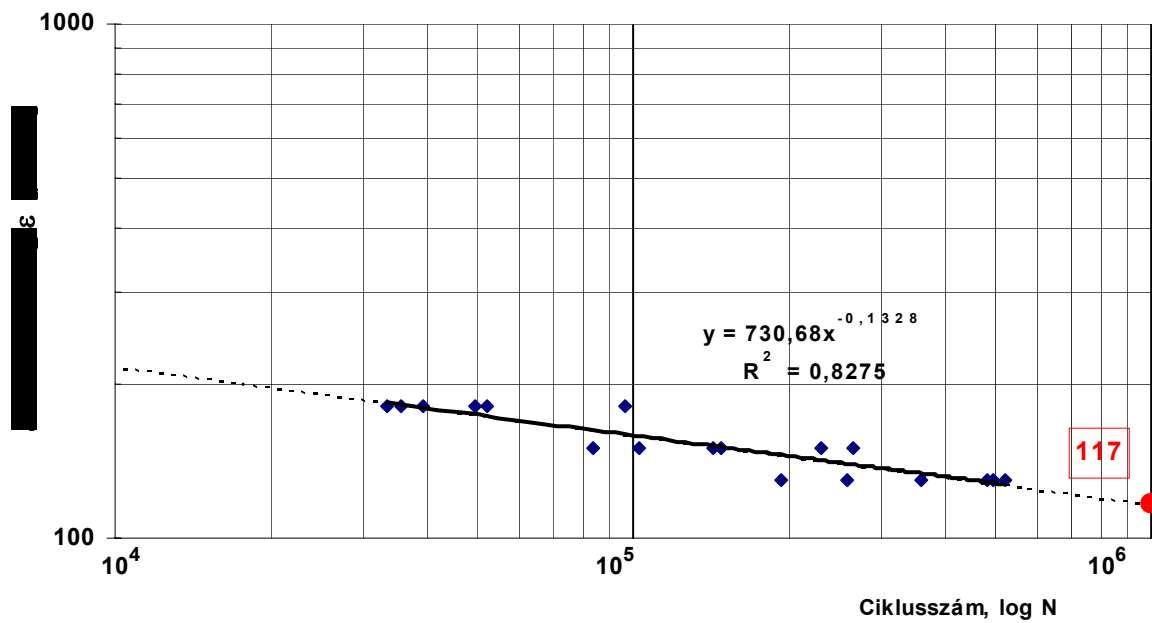
Az **5.8. ábrán** az előzőekhez hasonló elvet követtem, de a próbatestek ismétlési szám – merevség görbéjére a kezdeti merevség 80% ÷ 70% közötti tartományában illesztettem a regressziós egyenest, amelyből szintén extrapolálással, az egyenesek egyenletéből az előzőekben ismertetett módon számítottam az $N_{S*0,2}$ tönkremeneteli ciklusszámot.

Az **5.5-5.8. ábrákból** látható, hogy a példaként bemutatott keveréken a kezdeti merevség 70%-áig lefolytatott vizsgálatból becsült végeredmény is csak 4% eltérés tartalmaz az 50%-os, tényleges tönkremeneteli kritériumig folytatott vizsgálatokhoz képest.

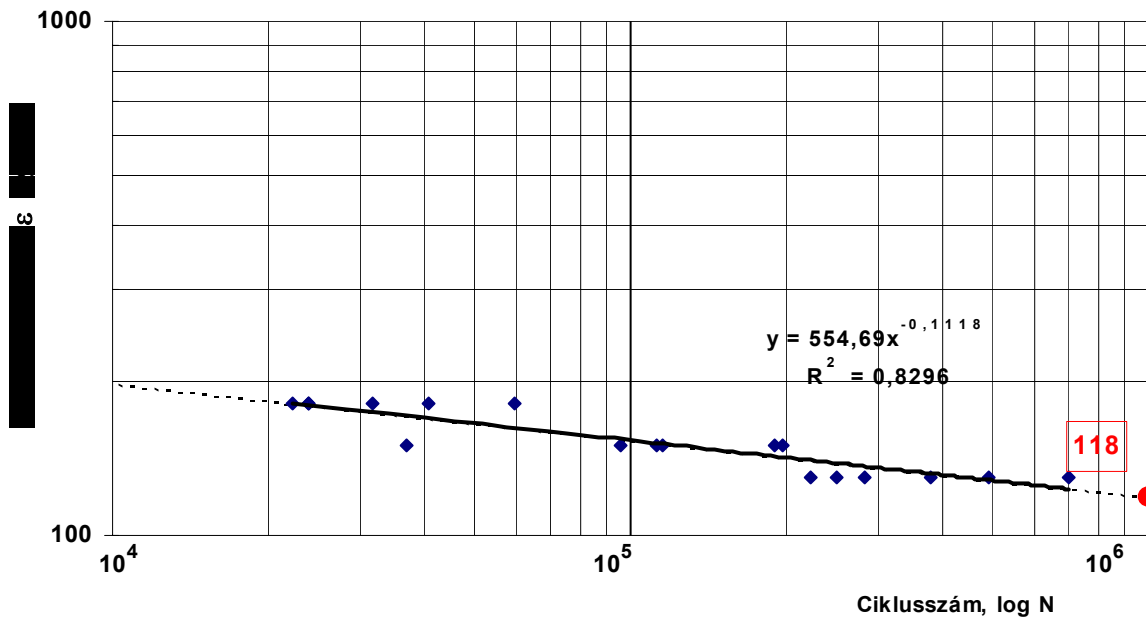
Az **5.1. táblázatban** több típusú aszfaltkeveréken végeztem hajlító-fárasztó vizsgálatot, majd előrebecsléssel határoztam meg az $N=10^6$ ciklusszámhoz tartozó terhelési szint értékét. A táblázat alapján látható, hogy a kezdeti merevség 70%-áig elvégzett fáradási vizsgálatok végeredményének becslése is meglehetősen jó, vagyis a ténylegesen lefuttatott fáradási vizsgálat végeredményéhez képest a vizsgált négyféle anyagon maximálisan ± 10 % eltérést produkált. Az eredmények alapján azonban látható, hogy a merevség 60%-áig futtatott vizsgálatok már ± 5 %-on belül becsülik a végeredményt. Ezzel a módszerrel a fárasztó vizsgálat kb. 25%-a megtakarítható, tehát a 2-3 hét vizsgálati időtartam 1,5-2 hétre csökkenthető.

5.1. táblázat K-20/F jelű aszfaltanyagokon elvégzett hajlító-fárasztó kísérletek végeredményeinek becslése

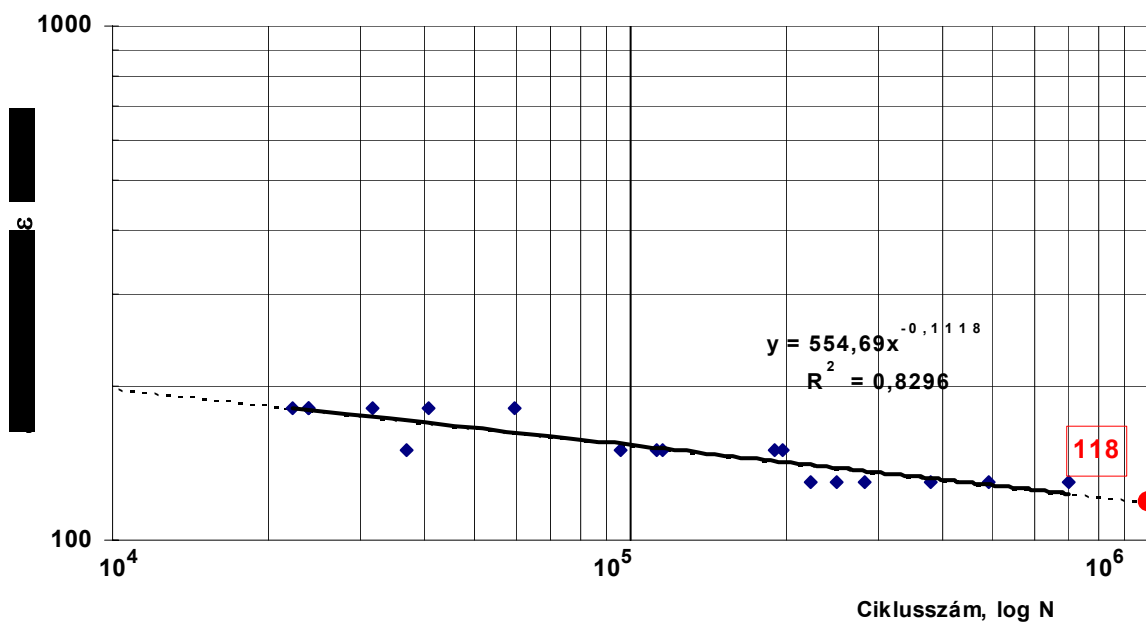
Keverék azonosító	A fáradás lefutásának időtartama a kezdeti merevség százalékában		
	50%	60%	70%
H61 GB	166	166	159
56B-BD	91	100	105
56B-DD	79	76	104
FB6-B	109	109	108
H91 GB	118	118	119



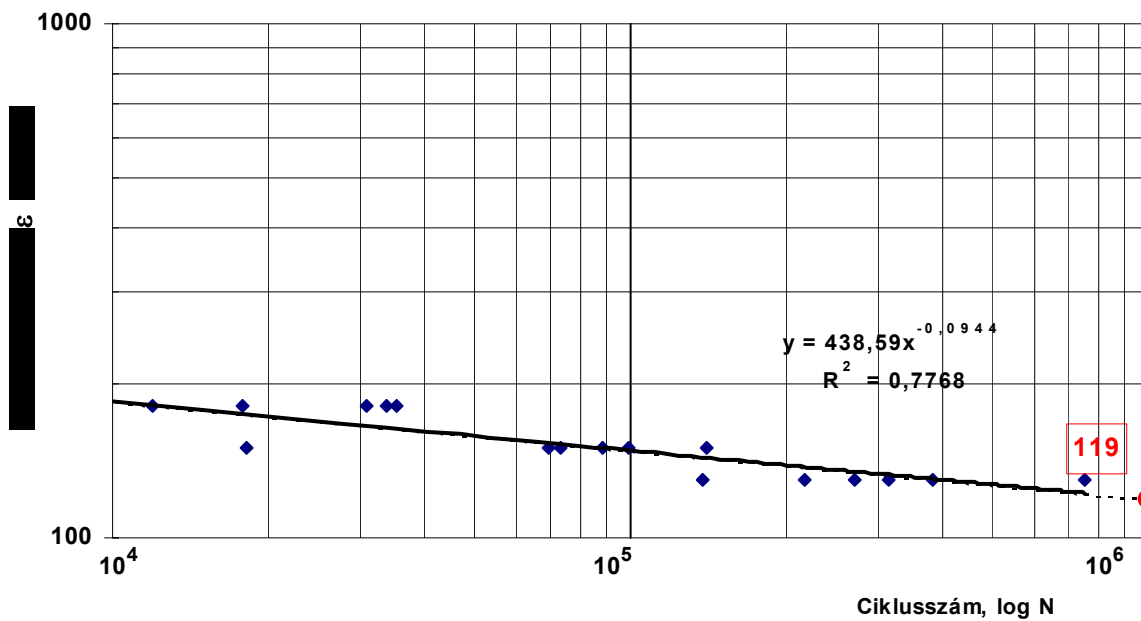
5.5. ábra A fáradási vizsgálat kiértékelése szabvány szerint



5.6. ábra A fáradási vizsgálat kiértékelése (a próbatestek fárasztását $N_{S^* \times 50\%}$ értékig folytattam)



5.7. ábra A fáradási vizsgálat kiértékelése (a próbatestek fárasztását $N_{S^* \times 60\%}$ értékig folytattam)



5.8. ábra A fáradási vizsgálat kiértékelése (a próbatestek fárasztását $N_{S \times 70\%}$ értékig folytattam)

5.3. ÖSSZEFOGLALÁS, TÉZISEK

A fejezetben bemutatam az aszfalt próbatestek hajlító-fárasztó vizsgálatok végrehajtása alapján felvett ciklusszám – merevségi modulus diagramjának részletes lefutását.

2.1. tézis: Az aszfalt próbatestek négyponos hajlító-fárasztó vizsgálata során a próbatest viselkedését nem csak a kezdeti merevség 50%-ához tartozó ciklusszám, hanem a ciklusszám–merevségi modulus görbére illesztett egyenes meredeksége is meghatározza.

2.2. tézis: A ciklusszám – merevségi modulus görbe két elkülöníthető szakaszból áll: a kezdeti merevség 80%-áig tartó konkáv, a kezdeti merevség 80%-ától a tönkremenetelig egy közel lineáris szakaszból. A lineáris szakaszra illesztett regressziós egyenes korrelációs együtthatója az esetek nagy részében $R^2 > 0,9$.

2.3. tézis: A hajlító-fárasztó vizsgálat lefolytatása során a regressziós egyenesek egyenletéből számított, tönkremenetelhez tartozó ciklusszám jól becsülhető akkor is, ha a próbatestet nem fárasztjuk el a tönkremeneteli kritériumig ($N_{50\%}$), hanem csak a kezdeti merevség 60%-áig. ($N_{60\%}$). Amennyiben a fárasztást csak a kezdeti merevség 60%-áig végezzük el, úgy a laboratóriumi vizsgálat (kb. 2-3 hét) időigényének kb. 25%-a (kb. 0,5-1 hét) megtakarítható.

6. A MEREVSÉGI PARAMÉTEREK ÖSSZEFÜGGÉSE AZ ASZFALT PÁLYASZERKEZET IGÉNYBEVÉTELEIVEL

Az aszfalt pályaszerkezetek mechanikai méretezése során minden egyes réteget a geometriai jellemzők (rétegek vastagsága) mellett mechanikai jellemzőivel is leírhatunk, úgymint:

- merevségi modulus
- Poisson-tényező

A mechanikai tulajdonságok mellett fontos szerepet kap a rétegek együttdolgozása. Ha a két réteg közötti tapadási felületen az együttdolgozás megvalósul, vagyis a rétegek nem „csúsznak” el a határfelületen, úgy a pályaszerkezet igénybevételei (ugyanazon teher hatására) kisebbek lesznek. Vizsgálhatók a teljes együttdolgozás és a teljes „elcsúszás” mellett részleges együttdolgozási állapotok is.

E fejezetben egy érzékenységvizsgálatot végeztem el, nevezetesen azt elemeztem, hogy az egyes rétegek merevségi modulusainak változása hogyan befolyásolja a pályaszerkezetek igénybevételeit.

6.1. A MÉRETEZÉS VÉGREHAJTÁSA

A mechanikai útpályaszerkezet-méretezéshez használt szoftverek közül az egyik elterjedt a BISAR (Bitumen Stress Analysis in Roads) nevű program, ezt a Shell-laboratórium (Amszterdam) dolgoztatta ki. A BISAR program alkalmas egy maximálisan 10 rétegű pályaszerkezeti rendszer kezelésére. A rétegeket a

- rétegvastagság
- merevségi modulus
- Poisson-tényező
- a rétegek határán történő elcsúszást jellemző szám

jellemzik. A legalsó réteg végtelen rugalmas féltér, így annak rétegvastagsága nincs. A terhelés nemcsak függőleges, hanem a fékezés-gyorsítás esetének megfelelően ferde irányú is lehet, külön megadható a függőleges és a vízszintes (a felülettel párhuzamos síkban ható) erő.

A terhelések egy koordinátarendszerben helyezkednek el, a program alkalmas több, kör alakú terhelés szuperpozíciójára is. A koordináta rendszerben tetszőlegesen definiálhatók x , y , z koordinátával megadott helyek, ahol a program a feszültségi állapotot, az összenyomódásokat és az elmozdulásokat vizsgálja.

Forgalmi terhelési osztály						
A	B	C	D	E	K	R
Tervezési forgalom, TF, millió egységtegel						
0,03 - 0,1	0,1 - 0,3	0,3 - 1	1 - 3	3 - 10	10 - 30	30 -
2. TÍPUS PÁLYASZERKEZETEK KÖTŐANYAG NÉLKÜLI SZEMCSÉS ALAPRÉTEGGEL						
2.3. MECHANIKAI STABILIZÁCIÓ M56						
2.4. FOLYTONOS SZEMMEGOSZLÁSÚ ZÚZOTTKŐ FZKA						
3. TÍPUS PÁLYASZERKEZETEK HIDRAULIKUS KÖTŐANYAGÚ STABILIZÁCIÓS ALAPRÉTEGGEL						
3.1. 150 milliméter vastagságú						
3.1. 200 milliméter vastagságú						
4. TÍPUS PÁLYASZERKEZETEK SOVÁNYBETON ALAPRÉTEGGEL						
4.1. 200 milliméter vastagságú						

6.1. ábra A számítás során figyelembe vett típus-pályaszerkezetek és a szükséges rétegvastagságok az A-R forgalmi terhelési osztályoktól függően

6.2. A PÁLYASZERKEZETEK FELÉPÍTÉSE

A dolgozatban vizsgált pályaszerkezeteket az ÚT -2-1.202:2005 jelű Útügyi Műszaki Előírás (ÚME) alapján készítettem el (6.1. ábra). A pályaszerkezet a következő rétegekből épül fel:

- kopóréteg;
- kötőréteg;
- felső alapréteg;
- alsó alapréteg;
- altalaj

Az idézett ÚME szerint hazánkban az ún. típus-pályaszerkezetek közül kell a pályaszerkezet-méretezés során a megfelelőt kiválasztani, a forgalmi terhelés és az építeni kívánt alapréteg függvényében.

6.2.1. Altalaj

Az altalaj végtelen féltér, így rétegvastagsággal nem rendelkezik. A merevségi modulus itt a statikus teherbírási modulus értékét jelenti (E_2). Az ÚT 2-1.202:2005 jelű ÚME alapján a földmű méretezési teherbírása a tervezési élettartam alatt várható legkedvezőtlenebb teherbírási érték. A hazai méretezési eljárás az $E_2=40 \text{ MN/m}^2$ értéket veszik figyelembe.

Jelen esetben – miután érzékenységvizsgálatot hajtottam végre, E_2 értékét 40 és 80 MN/m^2 között 10 MN/m^2 -es lépcsőkben változtatva vizsgáltam annak hatását az igénybevételekre.

6.2.2. Alsó alapréteg

Az alaprétegek típusait, rétegvastagságait és merevségi modulusait a 6.1. táblázat foglalja össze

Az M56 mechanikai stabilizáció modulusának meghatározására a SHELL képlet alkalmazható (Claussen, 1977). A képlet szerint a rétegmodulus függ az alatta található réteg modulusától (itt: altalaj):

$$E_{\text{szemcsés}} = E_{\text{alsóréteg}} * 0.2 * H^{0.45}$$

Az FZKA zúzottkő alap modulusának meghatározására a Barker (Barker et al., 1977) által felállított összefüggés használható, amely zúzottkő alapra a következő képlettel fejezhető ki:

$$E_{\text{zúzottkő}_\text{réteg}} = E_{\text{alatta}_\text{lévő}_\text{réteg}} * (1 + 10.52 * \log H_{\text{zúzottkő}_\text{réteg}} - 2.10 * \log E_{\text{alatta}_\text{lévő}_\text{réteg}} * \log H_{\text{zúzottkő}_\text{réteg}})$$

A CKt (telepen kevert hidraulikus kötőanyagú homokos kavics stabilizáció) merevségi modulusát 2 000 MPa értékben vettem fel. A hazai pályaszerkezet-méretezési eljárás is ezt az értéket feltételezi (Nemesdy, 1992b). Ennek oka, hogy az építés során ugyan nagyobb a mérhető

merevségi modulus, de a hidraulikus kötőanyagú stabilizáció már az élettartamon belül elfárad, repedések keletkeznek benne, így félig merev útalappá válik.

A beton alapréteg merevségi modulus értéke a betontechnológia képlete szerint az átlagos nyomószilárdságból számítható:

$$E_{\text{hidraulikus_réteg}} = 55000 \times \frac{R_{ny}}{20 + R_{ny}}$$

6.1. táblázat A számítás során alkalmazott alaprétegek tulajdonságai

Alapréteg típusa (Típus pályaszerkezetek alapján)	Vastagság [mm]	Merevségi modulus [MPa]	Poisson- szám [-]
M56	200	90	0,35
FZKA	200	135	0,35
CKt	150	2000	0,25
CKt	200	2000	0,25
soványbeton	200	20 000	0,25

6.2.3. Felső alapréteg

A felső alapréteg anyaga aszfalt (pl. JU-35), de a jelenlegi útépitésben egyre gyakrabban kötőréteg-keveréket építenek be (K-22, K-22/F) a felső alaprétegben is. Jelen számításban is ezt feltételeztem, így a merevségi modulus értékét lásd a **6.2.4. pontban**.

6.2.4. Kötőréteg

A kötőréteg anyaga túlnyomó többségben K-22, K-22/F keverék, amelynek merevségi modulusát IT-CY vizsgálattal lehet meghatározni. A BME Út és Vasútépitési Tanszék Városi Útpályaszerkezetek Laboratóriumában – a fővárosi útfelújításokhoz kapcsolódóan – számos aszfaltkeverék merevségi modulusának meghatározására került sor, IT-CY vizsgálat segítségével. Ennek alapján határoztuk meg a modellben alkalmazott K-22/F keverék merevségi modulus értékét (**6.2. táblázat**).

6.2.5. Kopóréteg

A kopóréteg anyagai jelen útépitéseinkben leggyakrabban AB-11, AB-11/F, AB-16, AB-16/F, ZMA-11 keverékek. A modellalkotás során AB-11/F keveréket alkalmazunk. A BME laboratóriumában számos AB-11/F keverék merevségének meghatározását végezték el, IT-CY vizsgálat segítségével. Ennek alapján határoztuk meg a modellben alkalmazott AB-11/F keverék

merevségi modulus értékét. (lásd: **6.2. táblázat**). Mindkét aszfaltréteg (kopóréteg, kötőréteg) esetében 3 féle modulussal számoltunk:

- a 95%-os valószínűséghez tartozó minimális érték;
- átlagérték;
- a 95%-os valószínűséghez tartozó maximális érték.

A minimum és maximum érték az átlag és a szórás alapján:

$$S_{\min, \max} = \text{átlag} \pm 1,64 \times \text{szórás}$$

6.2. táblázat A modellben alkalmazott aszfaltanyagok merevségének meghatározása

Keverék típusa	Keverékek száma	Merevségi modulus, S [MPa]			
		Átlag	Szórás	Min	Max
AB-11/F	57	12825	1253	10771	14879
K-22/F	43	14846	1594	12232	17460

6.2.6. Alkalmazott pályaszerkezetek

A **6.2.1.–6.2.5. pontban** leírt tulajdonságú anyagokból épülnek fel a modellezés során számított pályaszerkezetek. Jelen esetben a C, D, E, K forgalmi terhelési kategóriát vettük figyelembe. A pályaszerkezeteket úgy építettem fel, hogy azok megfeleljenek a forgalmi terhelési kategória és az alapréteg által meghatározott aszfaltréteg-vastagságnak. Az alkalmazható rétegvastagságok a **6.3. táblázatban** láthatók.

6.3. táblázat Aszfaltanyagok alkalmazható rétegvastagságai

Keverék típusa	Minimális rétegvastagság [mm]	Egy rétegben építhető maximális rétegvastagság [mm]
AB-11/F	35	60
K-22/F	70	100

A legkisebb rétegvastagságok figyelembe vételével a következő irányelveket tartottam a modellekben szem előtt az alkalmazott pályaszerkezetek megalkotásánál:

- A kopóréteg mindig AB-11/F keverék;
- A kötőréteg mindig K-22/F keverék;
- A felső alapréteg mindig K-22/F keverék, de amennyiben az előírt aszfaltvastagság olyan csekély, hogy a minimális rétegvastagságokkal 3 réteg nem beépíthető, úgy elhagyható.

Az így kialakított pályaszerkezetek a **6.4. táblázatban** láthatók.

A rétegek közötti elcsúszást úgy feltételeztem, hogy az altalaj és az alsó alapréteg, illetve az alsó alapréteg és a felső alapréteg között nincs együttdolgozás, a rétegek egymáson elcsúszhatnak. Az aszfaltrétegek közötti együttdolgozásra pedig ötféle eshetőséget vettünk figyelembe.

- teljes együttdolgozás
- 75%-os együttdolgozás
- 50%-os együttdolgozás
- 25%-os együttdolgozás
- teljes elcsúszás

6.3. A TERHELÉSEK

A modellezés során 50 kN nagyságú, egyes kerékterhet vettem figyelembe, amely függőleges irányban a legfelső rétegre hat, egyenletesen megoszló egy $R=0,15$ m sugarú körben ($p=0,707$ MPa).

6.4. táblázat A modellezés során alkalmazott pályaszerkezeti felépítések

Jel	Teljes aszfalt vtg. [mm]	kopóréteg		kötőréteg		felső alapréteg		alsó alapréteg	
		vastagság [mm]	típus	vastagság [mm]	típus	vastagság [mm]	típus	vastagság [mm]	típus
M56_C	160	60	AB-11/F	100	K-22/F			200	M56
M56_D	190	40	AB-11/F	70	K-22/F	80	K-22/F	200	M56
M56_E	230	50	AB-11/F	90	K-22/F	90	K-22/F	200	M56
M56_K	260	60	AB-11/F	100	K-22/F	100	K-22/F	200	M56
FZKA_C	150	50	AB-11/F	100	K-22/F			200	FZKA
FZKA_D	180	40	AB-11/F	70	K-22/F	70	K-22/F	200	FZKA
FZKA_E	220	40	AB-11/F	90	K-22/F	90	K-22/F	200	FZKA
FZKA_K	250	50	AB-11/F	100	K-22/F	100	K-22/F	200	FZKA
CKT1_C	130	40	AB-11/F	90	K-22/F			150	CKt
CKT1_D	180	40	AB-11/F	70	K-22/F	70	K-22/F	150	CKt
CKT1_E	200	40	AB-11/F	80	K-22/F	80	K-22/F	150	CKt
CKT1_K	240	40	AB-11/F	100	K-22/F	100	K-22/F	150	CKt
CKT2_C	110	40	AB-11/F	70	K-22/F			200	CKt
CKT2_D	140	50	AB-11/F	90	K-22/F			200	CKt
CKT2_E	190	50	AB-11/F	70	K-22/F	70	K-22/F	200	CKt
CKT2_K	230	50	AB-11/F	90	K-22/F	90	K-22/F	200	CKt
B_C	160	60	AB-11/F	100	K-22/F			200	Beton
B_D	180	40	AB-11/F	70	K-22/F	70	K-22/F	200	Beton
B_E	180	40	AB-11/F	70	K-22/F	70	K-22/F	200	Beton
B_K	190	50	AB-11/F	70	K-22/F	70	K-22/F	200	Beton

6.4. AZ IGÉNYBEVÉTELEK MEGHATÁROZÁSÁNAK HELYEI

A aszfalt burkolat élettartama szempontjából a legfontosabb igénybevétel az alsó szélső szál megnyúlása a függőleges hajlító terhelés hatására. A pályaszerkezetben a teherismétlődések nagy száma miatt az aszfaltrétegek fáradásnak vannak kitéve. Az aszfaltréteg ismétlődő megnyúlása minél nagyobb értékű, annál kisebb tengelyáthaladási számot bír el az élettartama végéig (lásd: Wöhler-görbe). A cél tehát az aszfaltrétegek alsó síkján a megnyúlások meghatározása.

6.5. A SZÁMÍTÁSOK VÉGREHAJTÁSA

A számítások során:

- 5 típusú alapréteget (M56,. FZKA, CKt1 (150 mm vastagság), CKt2 (200 mm vastagság), soványbeton);
- 5 féle altalaj-teherbírási modulust;
- 3 féle kopóréteg (AB-11/F) merevségi modulust (minimum, átlagos, maximum);
- 3 féle kötőréteg (K-22/F) merevségi modulust (minimum, átlagos, maximum);
- 5 féle rétegek közötti elcsúszás értéket

vettem figyelembe, ezáltal összesen 1125 féle pályaszerkezetet definiáltam.

Arra kerestem a választ, hogy a pályaszerkezetek milyen tulajdonságainak változtatása van jelentős hatással a fáradásra. A fáradási értékeket két helyen tudjuk definiálni:

- A legalsó aszfaltréteg alsó szélső szálában: a teher alatt ebben a pontban várhatók a legnagyobb nyúlások, a terhelési elrendezés következtében. Az érték nagyságának a kötőréteg anyagának kifáradása szempontjából van jelentősége.
- A kopóréteg alsó szélső szálában: amennyiben az aszfaltrétegek között nem feltételezünk együttműködést (pl. kivitelezési elégtelenség), úgy a kopóréteg alsó szálában is nyúlások keletkeznek, ugyanis a rétegek külön-külön hajlított réteggé viselkednek. Meg kell vizsgálni tehát, hogy ebben az esetben a kopóréteg anyagának kifáradása nem mértékadó-e.

6.6. A SZÁMÍTÁSOK EREDMÉNYEI

6.6.1. Megnyúlások a kopóréteg alsó szélső szálában

A **kopóréteg alsó szélső szálában** keletkező húzófeszültség értéke természetesen csak akkor érhet el kifáradásra veszélyes nagyságot, ha az aszfaltrétegek között **bizonyos mértékű elcsúszást** feltételezünk. **Egyéb esetekben**, miután a kopóréteg alsó síkja a hajlítás semleges tengelye felett van, így a **nyomott zónába** kerül. Erre vonatkozó számítások végeredményei a

6.5. táblázatban láthatók. A táblázatból megállapítható, hogy még az aszfaltrétegek 50%-os együttdolgozása esetén is főként nyomott zónába kerül a kopóréteg teljes vastagsága, így fáradásról nem beszélhetünk.

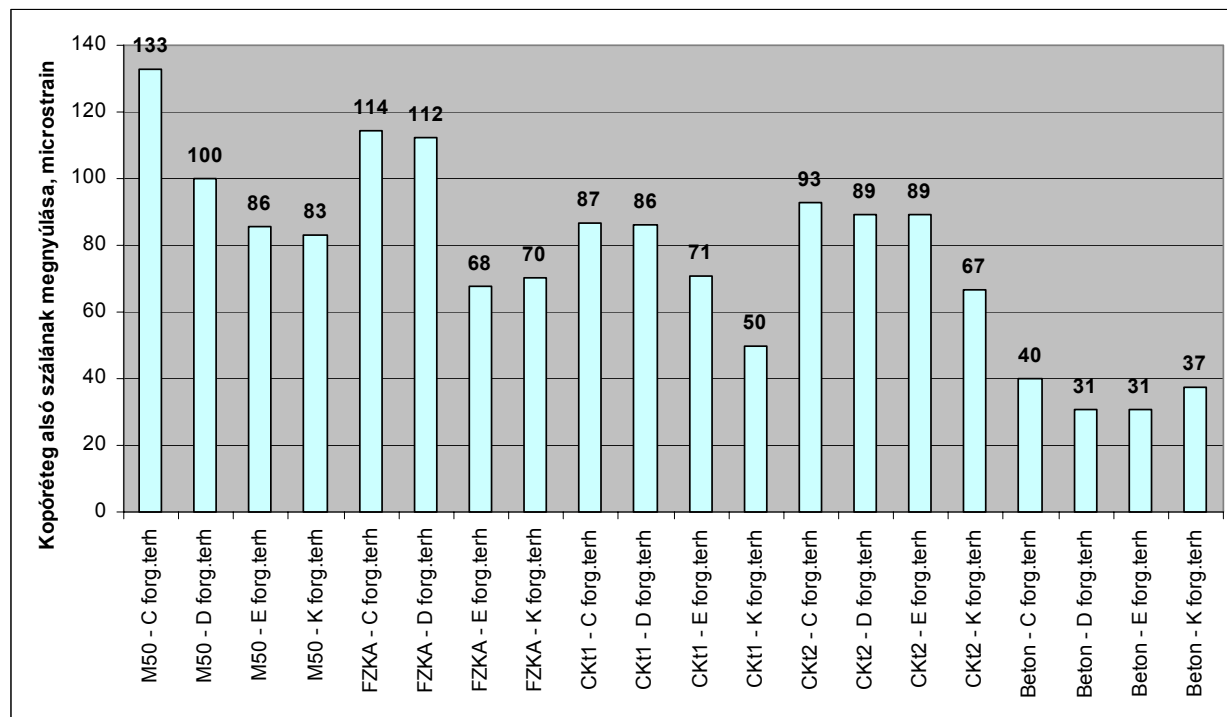
Megjegyzendő azonban, hogy a kopóréteg tönkremenetele – tekintettel arra, hogy e pályaszerkezeti réteg van kitéve a legjobban az időjárás viszontagságainak – más úton lehetséges (plasztikus deformáció, vízérzékenység, öregedés). Jelen dolgozatban azonban csak a fáradási tönkremenetellel foglalkoztam.

6.5. táblázat A kopóréteg alsó szálának megnyúlási spektruma a típus pályaszerkezetekben, 50%-os (félig) együttdolgozás esetén (microstrain)

Alapréteg típusa	Forgalmi terhelési osztály			
	C	D	E	K
M56 (200mm)	-12 ÷ +5	-22 ÷ -35	-13 ÷ -19	-3 ÷ -9
FZKA (200mm)	-7 ÷ -20	-23 ÷ -36	-20 ÷ -30	-10 ÷ -17
CKt1 (150mm)	-16 ÷ 32	-21 ÷ -32	-20 ÷ -30	-17 ÷ -25
CKt2 (200mm)	-2 ÷ -14	-9 ÷ +1	-7 ÷ -18	-8 ÷ -16
soványbeton (150mm)	4 ÷ 11	-7 ÷ -2	-8 ÷ -2	0 ÷ -3

Az aszfaltrétegek **teljes elcsúszása** esetén már más a helyzet: a **kopóréteg** is függetlenül hajlított, **alsó síkjában húzott szélső szállal** rendelkező réteg lesz. Ezeket az eseteket mutatja a **6.2. ábra**, itt a kopóréteg alsó szálának megnyúlása látható az egyes típus pályaszerkezetek esetén (5 féle alapréteg, illetve C, D, E, K forgalmi terhelési osztályok), a rétegek közötti teljes elcsúszás figyelembevételével. A **biztonság javára** történő közelítéssel az ábrán látható értékek a vizsgált pályaszerkezetek közül a **minimális kopóréteg, kötőréteg és földmű modulusok** esetét mutatják, amennyiben bármelyik modulust emeljük, az értékek csökkennek.

A számításokból levonható következtetés, hogy ebben a pontban a megnyúlások értéke főként az alapréteg típusának függvénye. A megnyúlás értéke kisebb mértékben függ a földmű modulusától (kb. 5%), és az aszfaltrétegek modulusától is (kb. 10%).



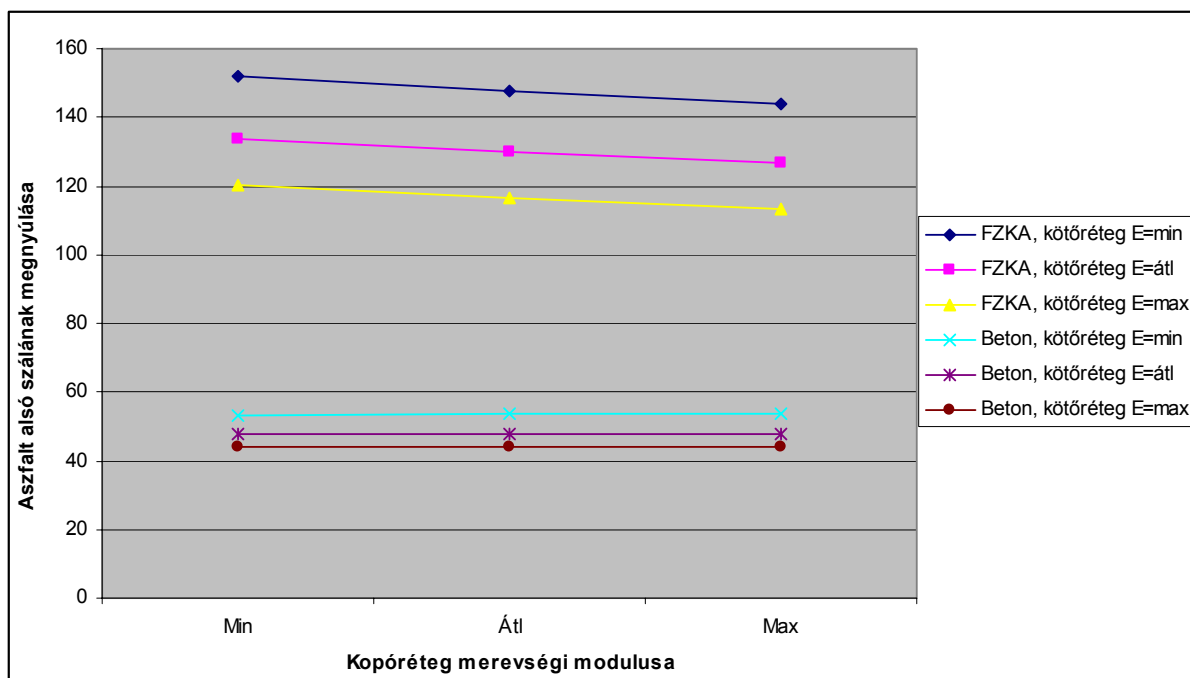
6.2. ábra Az aszfalt kopóréteg alsó szélső szálának megnyúlása a típus pályaszerkezetekben, teljes elcsúszás feltételezésével

Látható, hogy szélső szálak megnyúlásai csak szemcsés alaprétegek és C, D forgalmi terhelési osztály esetén érik el és haladják meg a 90-es értéket. A későbbiekben kitérünk arra, hogy ezen megnyúlás értékek milyen forgalmi terhelések elviselésére teszik alkalmassá a pályaszerkezetet, a kopóréteg fáradásának szempontjából.

6.6.2. Megnyúlások az alsó aszfaltréteg alsó szélső szálában

A **legelső aszfaltréteg alsó szélső szálában** keletkező igénybevételek – korábbi kutatások és tapasztalatok szerint – az egyik **fő okozói a burkolatok kifáradásának**, azaz itt keletkeznek a legnagyobb igénybevételek, megnyúlások. Jelen esetben azt célszerű ellenőrizni, hogy a pályaszerkezetek mely paramétereinek változtatása okozza a megnyúlás számottevő változását.

Az aszfaltrétegek merevsége és az alsó aszfaltszál megnyúlása közötti összefüggésre mutat egy példát a **6.3. ábra**. A számítás tapasztalatai alapján a **kopóréteg** merevségi modulusától kevésbé függ a szélső szál megnyúlása. **Azonos pályaszerkezet feltételezésével, csak a kopóréteg modulusát változtatva** kiszámítható a szélső szál megnyúlásának spektruma, amelyet a **6.6. táblázatban** követhetünk nyomon, a típus-pályaszerkezetekben szereplő különböző alaprétegekre vonatkozóan. Látható, hogy az alaprétegek minél erősebbek (CKt, beton), annál kisebb mértékben számít a kopóréteg merevségi modulusa a pályaszerkezet egészének viselkedése szempontjából.

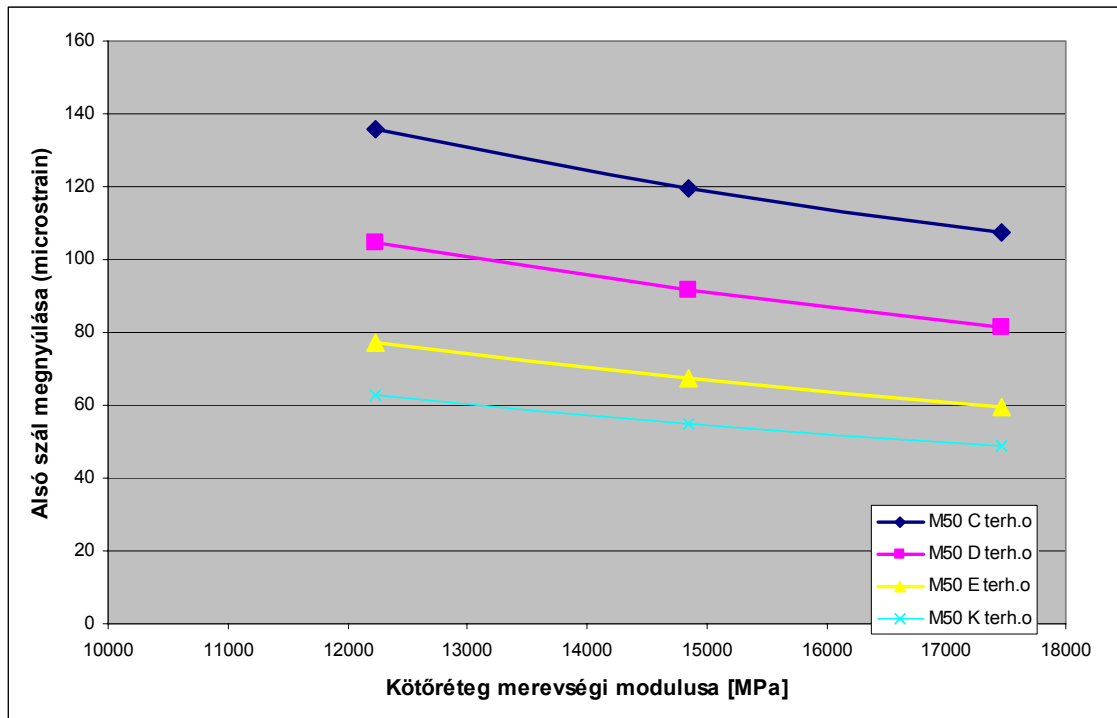


6.3. ábra Az aszfalt alsó szálának megnyúlása a kopóréteg merevségének függvényében (példák)

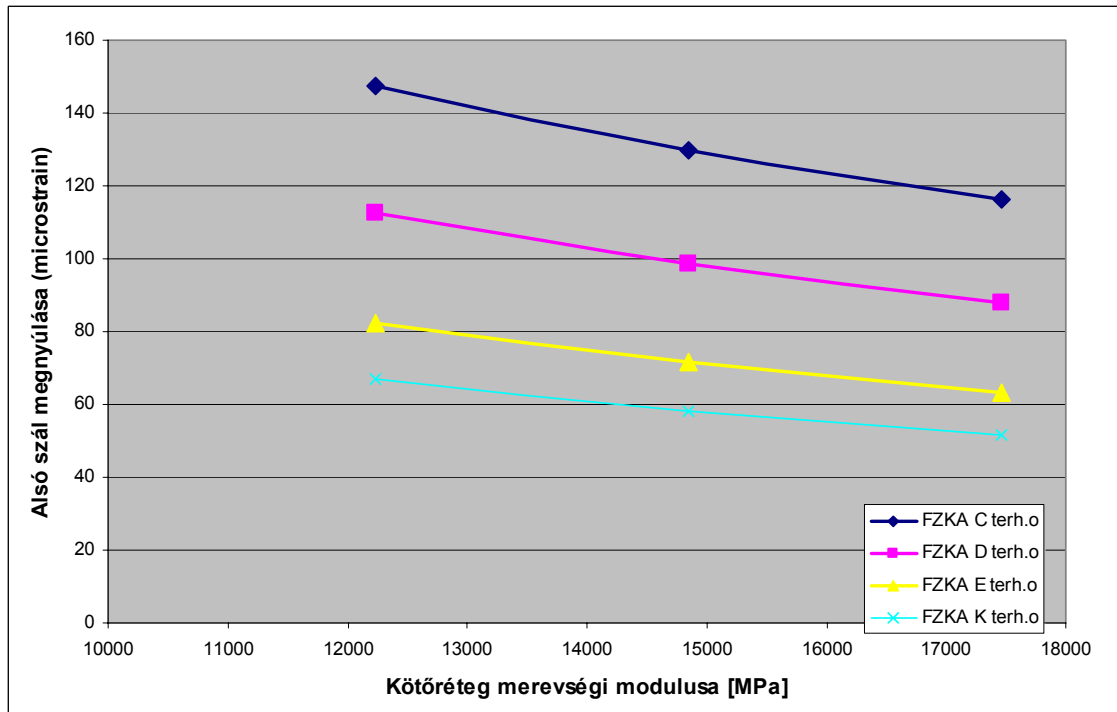
6.6. táblázat Az alsó aszfaltszál megnyúlásának terjedelme a kopóréteg merevség függvényében

Alapréteg típusa	Minimális terjedelem [%]	Maximális terjedelem [%]
M56 (200mm)	2%	7%
FZKA (200mm)	2%	6%
CKt1 (150mm)	1%	5%
CKt2 (200mm)	1%	5%
Soványbeton (150mm)	-1%	1%

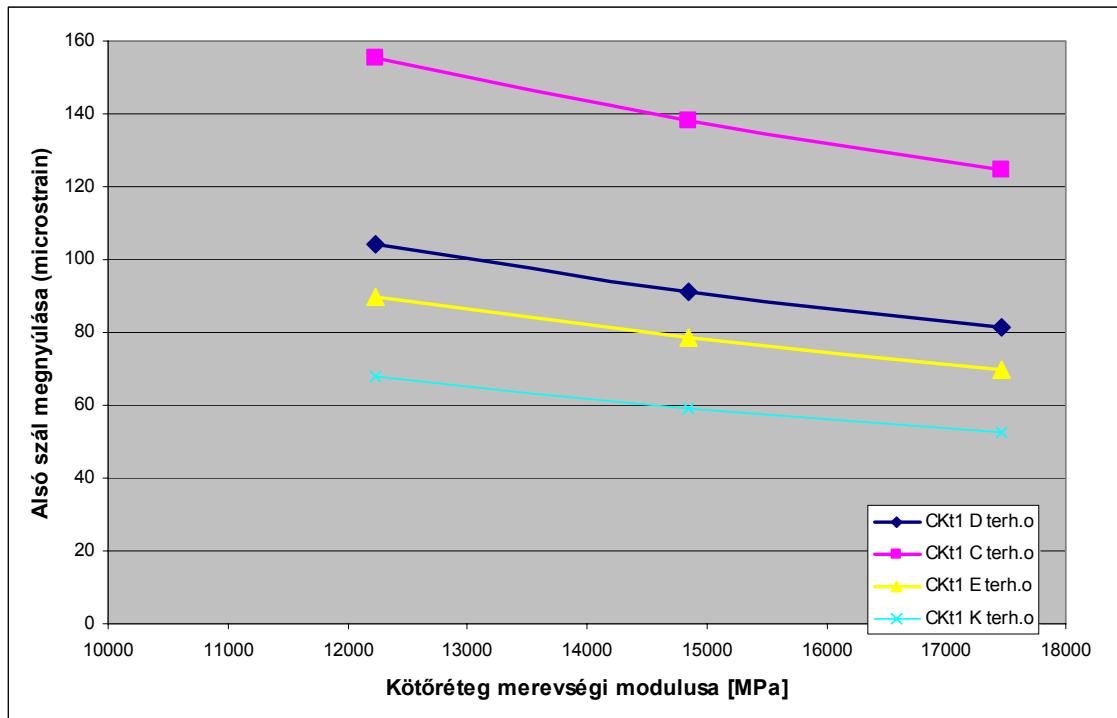
A **kötőrétegek** merevségi modulusa **sokkal jobban befolyásolja** a pályaszerkezet viselkedését. A **6.4. ábrasarozat** tanúsága szerint az ilyen irányú terjedelem az alaprétegek (M56, FZKA, CKt, soványbeton) merevségének növelésével ugyan kissé csökken, de ettől függetlenül számottevő marad (~15÷25%; lásd **6.7. táblázat**). Ezzel tehát egyértelművé tehető, hogy a **kötőréteg anyagminőségének, mechanikai paramétereinek változtatása javítja a pályaszerkezet élettartamát**: a megnyúlások kisebbek lesznek, kisebb megnyúlásokhoz pedig várhatóan nagyobb élettartam tartozik (vö. Wöhler-görbék).



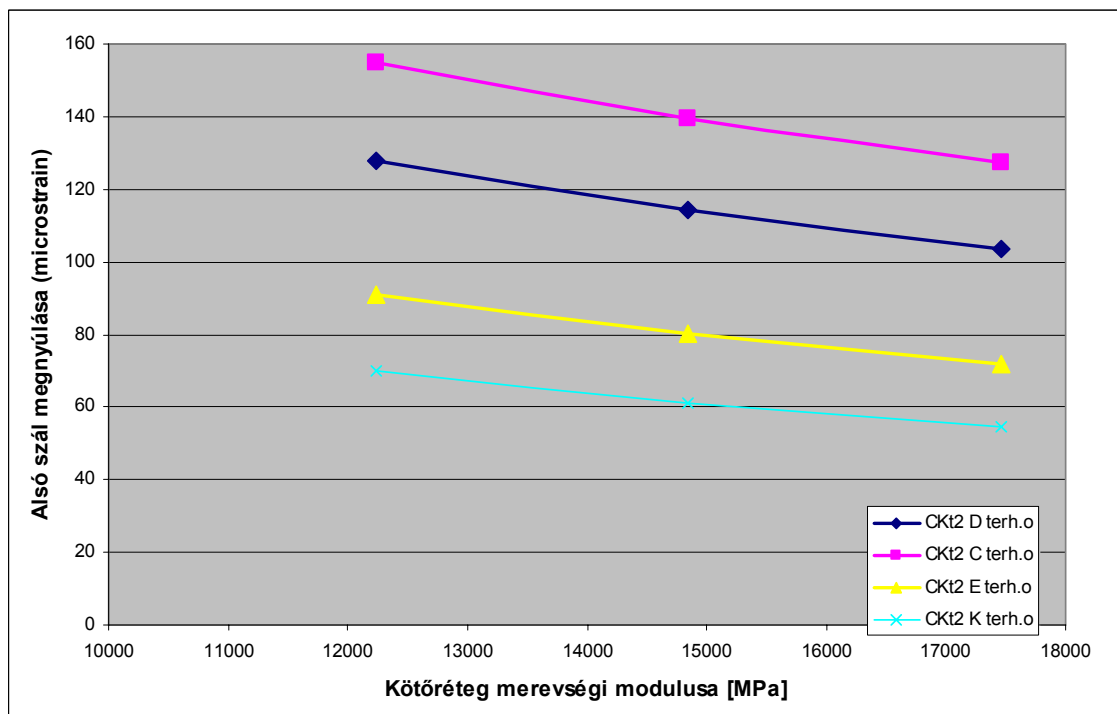
6.4./a. ábra Az aszfalt alsó szálának megnyúlása a kötőréteg merevségének függvényében (M56 alapréteg esetén)



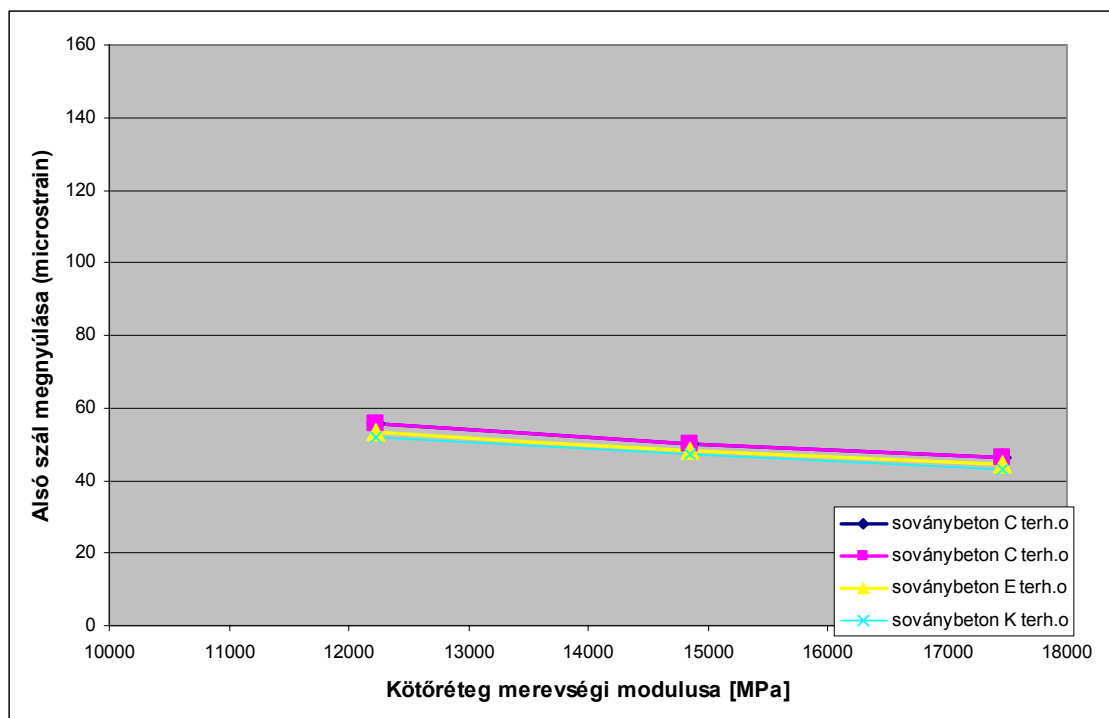
6.4./b. ábra Az aszfalt alsó szálának megnyúlása a kötőréteg merevségének függvényében (FZKA alapréteg esetén)



6.4./c. ábra Az aszfalt alsó szálának megnyúlása a kötőréteg merevségének függvényében (150 mm vastag CKT alapréteg esetén)



6.4./d. ábra Az aszfalt alsó szálának megnyúlása a kötőréteg merevségének függvényében (200 mm vastag CKT alapréteg esetén)



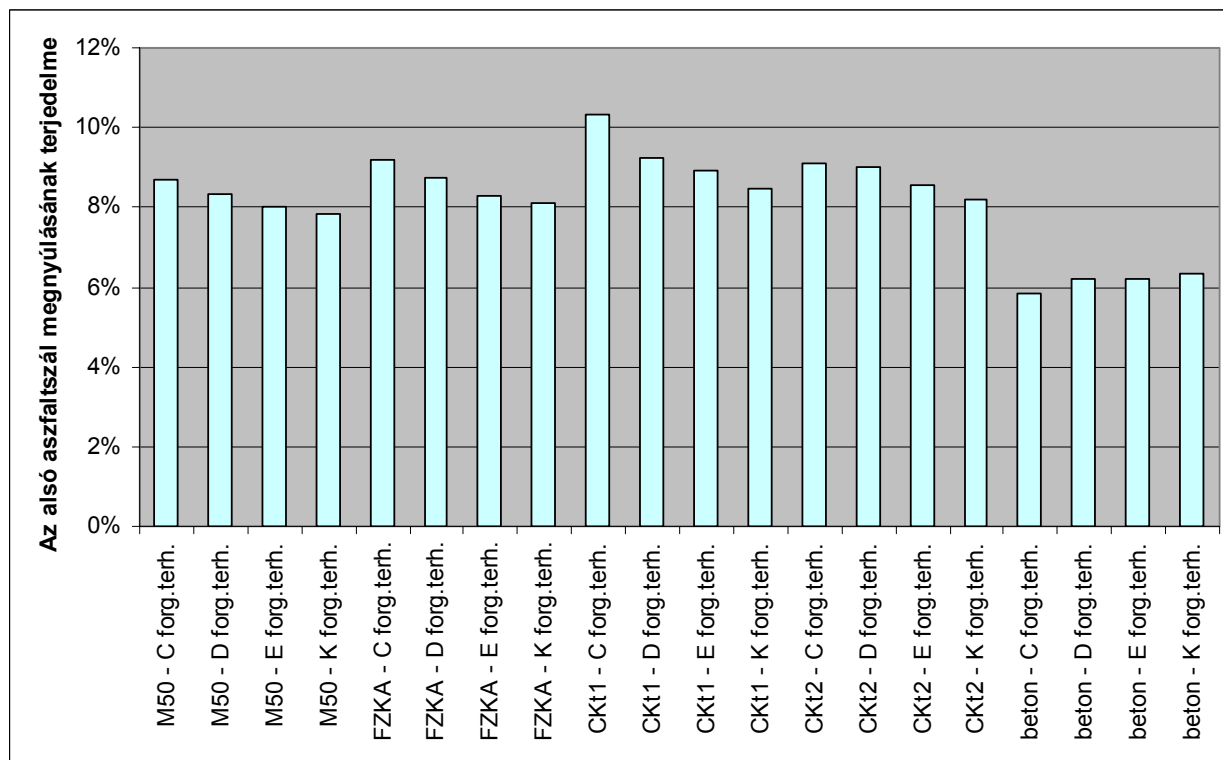
6.4./e. ábra Az aszfalt alsó szálának megnyúlása a kötőréteg merevségének függvényében (soványbeton alapréteg esetén)

A földmű modulusának hatása a pályaszerkezet viselkedésére az egyes alapréteg-típusoknál a 6.5. ábra adatai szerint alakul.

A földmű minimális megkövetelt modulusa $E_2=40 \text{ MN/m}^2$, amelyet a modellezés során 10 MN/m^2 lépcsőkben $E_2=80 \text{ MN/m}^2$ -re emeltem fel, ellenőrizve, hogy a nagyobb teherbírású altalaj számottevően csökkenti-e a pályaszerkezet igénybevételeinek nagyságát. A kapott eredmények alapján a terjedelem 8-10%, beton alapréteg esetén 6% körül alakul.

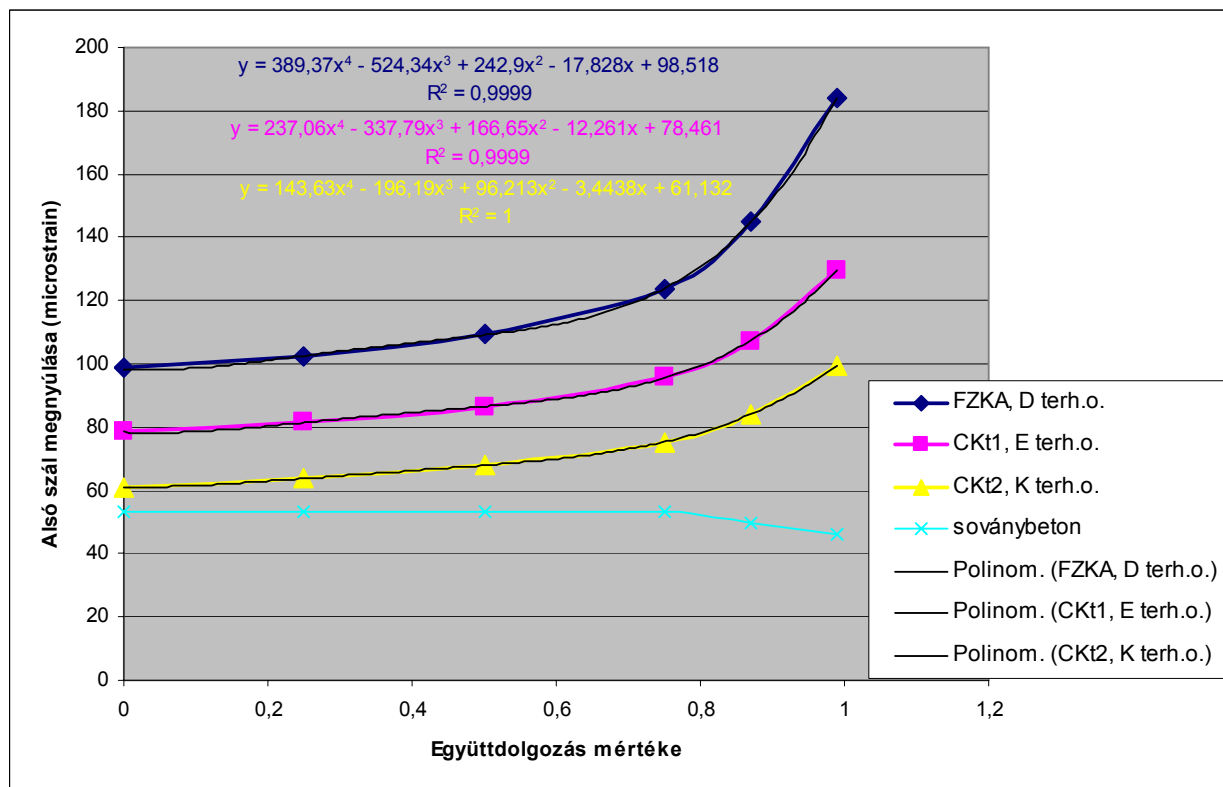
6.7. táblázat Az alsó aszfaltszál megnyúlásának terjedelme a kötőréteg merevség függvényében

Alapréteg típusa	Minimális terjedelem [%]	Maximális terjedelem [%]
M56 (200mm)	20%	24%
FZKA (200mm)	20%	24%
CKt (150mm)	18%	23%
CKt (200mm)	13%	22%
soványbeton (150mm)	14%	18%



6.5. ábra Az aszfalt alsó szálának megnyúlásának terjedelme a földmű merevségének függvényében az egyes típus-pályaszerkezetekben

A **6.6. ábrán** a rétegek közötti elcsúszás vizsgálata látható. Az elcsúszás mértékének (%) növelésével az alsó szélő szál megnyúlása rohamosan nő. Az eltérés a teljes együtdolgozás és a teljes elcsúszás között kétszeres is lehet, a függvényre jó korrelációval negyedfokú parabola illeszthető. Az ábrából az is kitűnik, hogy a beton alaprétegek feletti aszfaltrétegek szélő szál megnyúlása elcsúszás esetén sem változik, illetve abszolút értékben is nagyon kicsi. A sovány beton alaprétegek esetén ugyanis az aszfaltrétegek nem fáradásra méretezettek, hanem a betonalap fáradásának megakadályozására szolgálnak. Így a beton alaprétegen fekvő pályaszerkezet aszfalt burkolatának fáradási méretezésével a továbbiakban nem foglalkozom.



6.6. ábra Az aszfalt alsó szálának megnyúlása a rétegek közötti elcsúszás függvényében

6.7. A KÖTŐRÉTEG MEREVSÉGI MODULUS ÉRTÉKÉNEK HATÁSA A PÁLYASZERKEZET IGÉNYBEVÉTELEIRE

A 6.6. pontból kifolyólag az alábbiakban olyan pályaszerkezeti modelleket állítottam össze, ahol a kopóréteg vastagsága és merevsége nem változik (40 mm, $E=10000$ MPa), azonban a kötőréteg és a felső alapréteg vastagságát 1 cm-es lépcsőkben növeltem, annak érdekében, hogy pontosan megállapíthassam a kötőréteg merevség-csökkenésének hatását a pályaszerkezet igénybevételeire.

Így a 6.8. táblázatban látható pályaszerkezeti rétegrendek alakultak ki. Megjegyezzük, hogy a 6.3. táblázat adatai alapján a kötőrétegek maximális vastagsága miatt nem minden 1 cm-es lépcső valósítható meg (a számításba vett $D_{max}=22$ mm szemmagyságú kötőréteg vastagságának minimum értéke 70 mm).

E pályaszerkezeti rétegrendeket minden hajlékony és félmerev alapréteg-típusra (M56, FZKA, 150 mm vastag CKt, 200 mm vastag CKt) alkalmaztuk. A beton alapréteg számításokból történő kihagyásának oka, hogy a tapasztalatok szerint a beton alaprétegen alkalmazott aszfaltréteg fáradásra sosem megy tönkre, funkciója a beton felső síkjában mérhető húzószilárdság csökkentése, azaz az alapréteg tönkremenetelének megakadályozása. Így aszfalt fáradásra beton

alapréteggel rendelkező pályaszerkezetet vizsgálni nem érdemes. A pályaszerkezetek számítása többféle kötőréteg modulussal történt, 5000–17000 MPa tartományban, 2000 MPa lépcsőkben.

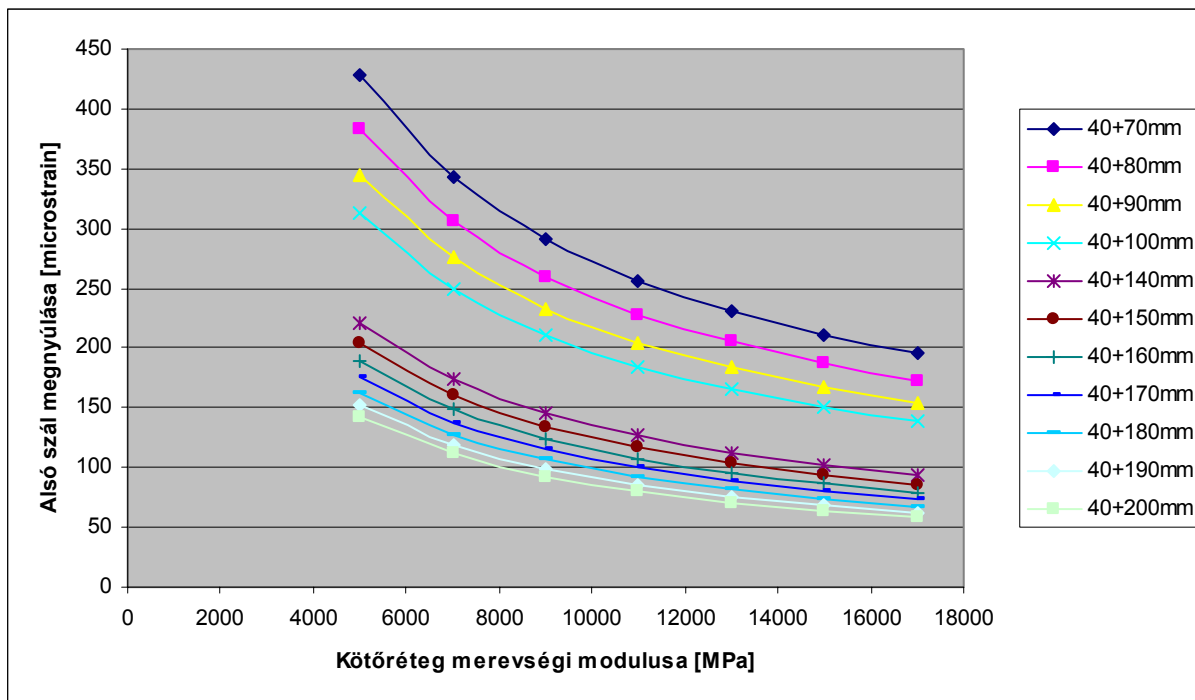
6.8. táblázat Pályaszerkezeti rétegrendek a kötőréteg szükséges vastagságának megállapításához

Jel	Teljes Aszfalt vtg. [mm]	1.rtg		2.rtg		3.rtg		4.rtg	
		vastagság [mm]	típus	vastagság [mm]	típus	vastagság [mm]	típus	vastagság [mm]	típus
A	110	40	AB-11/F	70	K-22/F	150/200	alaprtg.		
B	120	40	AB-11/F	80	K-22/F	150/200	alaprtg.		
C	130	40	AB-11/F	90	K-22/F	150/200	alaprtg.		
D	140	40	AB-11/F	100	K-22/F	150/200	alaprtg.		
E	180	40	AB-11/F	70	K-22/F	70	K-22/F	150/200	alaprtg.
F	190	40	AB-11/F	70	K-22/F	80	K-22/F	150/200	alaprtg.
G	200	40	AB-11/F	70	K-22/F	90	K-22/F	150/200	alaprtg.
H	210	40	AB-11/F	70	K-22/F	100	K-22/F	150/200	alaprtg.
I	220	40	AB-11/F	80	K-22/F	100	K-22/F	150/200	alaprtg.
J	230	40	AB-11/F	90	K-22/F	100	K-22/F	150/200	alaprtg.
K	240	40	AB-11/F	100	K-22/F	100	K-22/F	150/200	alaprtg.

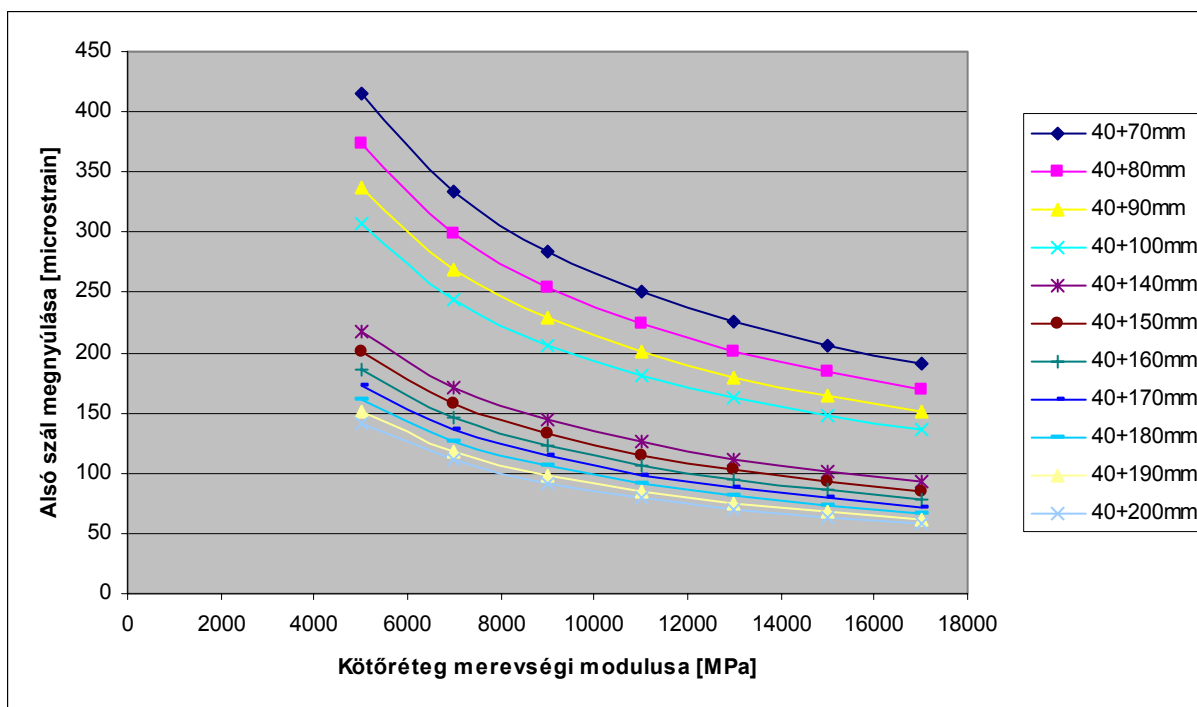
A számítás eredményeként a **6.7. ábrán** az M56, a **6.8. ábrán** az FZKA, a **6.9. ábrán** 150 mm vastagságú CKt, a **6.10. ábrán** 200 mm, vastagságú CKt alaprétegen mutatjuk be az aszfalt alsó szálának megnyúlását a kötőréteg és a felső alapréteg merevségének függvényében. Látható, hogy a merevségi modulus növelésével a szélső szál megnyúlása hatvány függvény szerint csökken; a görbékre $R^2 > 0,99$ korrelációval $\varepsilon = a \cdot S^b$ alakú (hatvány) görbe illeszthető. A görbék szorzója és hatványkitevője a **6.9.–6.10. táblázatban** található.

A **6.9. táblázatban** megfigyelhető, hogy a két szemcsés alapréteg (M56 mechanikai stabilizáció és a folytonos szemeloszlású zúzottkő alapréteg, FZKA) hatvány görbéi alig térnek el egymástól. Ennek oka, hogy a modellalkotás során a két réteg merevségi modulusait egymástól alig eltérően vettük fel (M56: 90 MPa, illetve FZKA: 135 MPa), és a szélső aszfaltszál megnyúlásai ilyen kismértékű változásra nem érzékenyek.

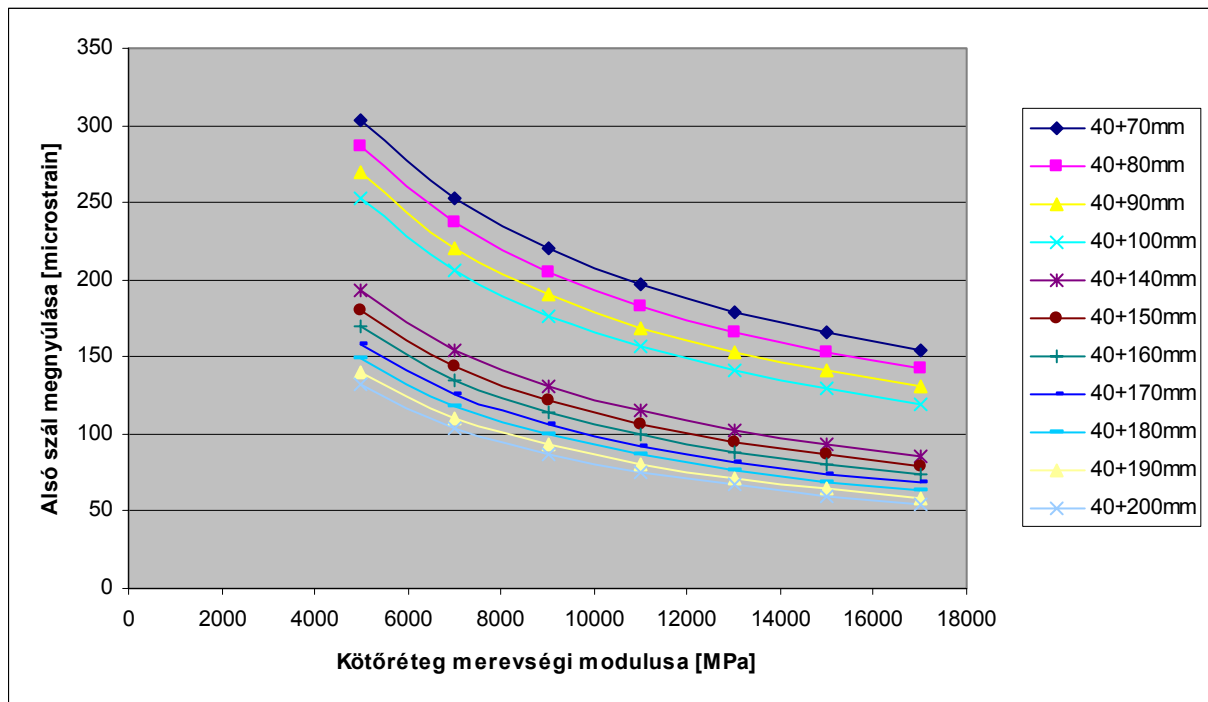
Amennyiben azt vizsgáljuk, hogy a kötőréteg vastagságának növelésével hogyan csökken az alsó szélső szál megnyúlása, exponenciális függvény szerint csökkenő görbét kapunk, kiváló korrelációval ($R^2 > 0,99$), amint az a **6.11.–6.12. ábrán**, a négyféle típus-pályaszerkezeti alapréteg (M56, FZKA, 150, illetve 200 mm vastag CKt) esetén látható. Itt a görbesereg egyes görbéi a kötőréteg merevségi modulusát reprezentálják, 2000 MPa nagyságú lépcsőkben.



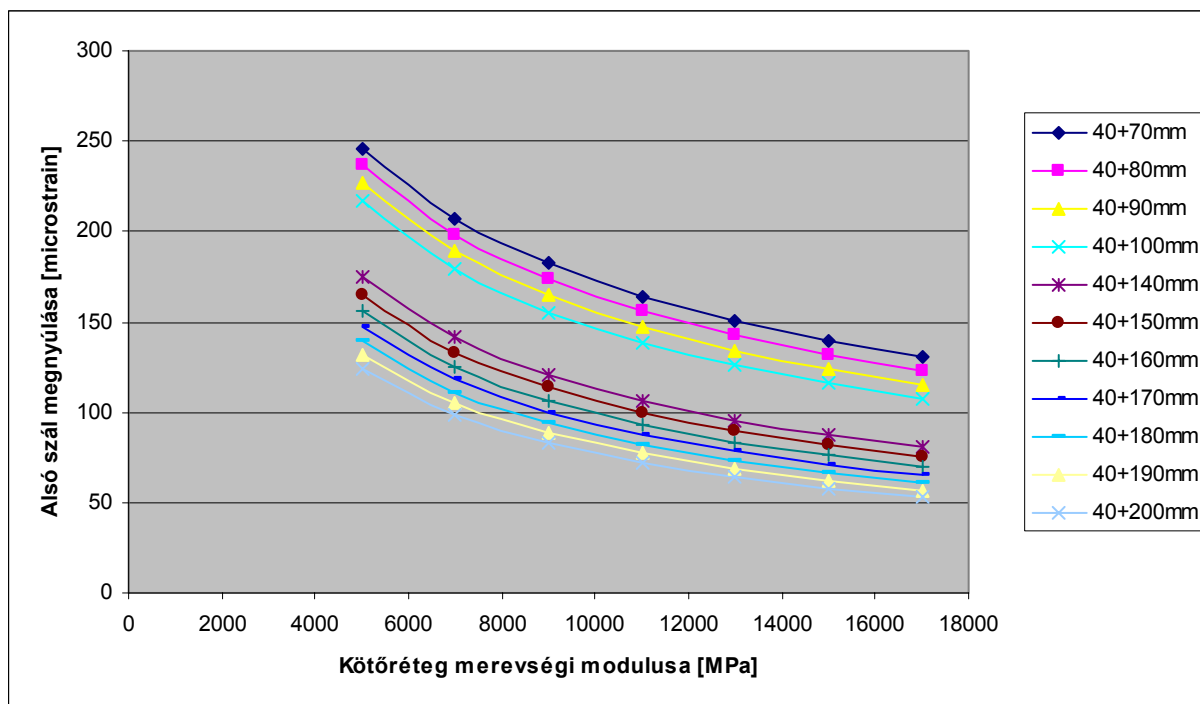
6.7. ábra Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg merevségének függvényében (M56 jelű mechanikai stabilizációs alapréteg esetén)



6.8. ábra Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg merevségének függvényében (FZKA alapréteg esetén)



6.9. ábra Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg merevségének függvényében
(150 mm vastagságú CKt alapréteg esetén)



6.10. ábra Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg merevségének függvényében (200 mm vastagságú CKt alapréteg esetén)

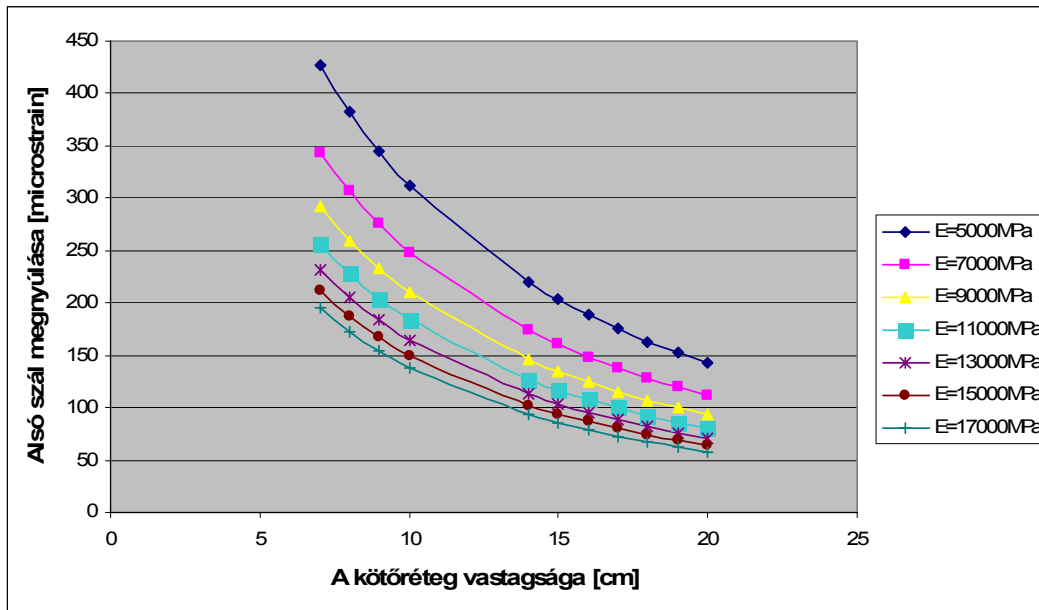
6.9. táblázat Hatvány görbék paramétereit a 6.6-6.7. ábrához

Kötőréteg+alapréteg vastagsága, mm	M56 alapréteg $\varepsilon = a \cdot S^b$		FZKA alapréteg $\varepsilon = a \cdot S^b$	
	a	b	a	b
70+0	1192,60	-0,64	1150,70	-0,64
80+0	1083,60	-0,65	1050,50	-0,64
90+0	991,05	-0,66	964,61	-0,65
100+0	910,44	-0,67	889,92	-0,66
70+70	674,87	-0,70	665,19	-0,70
70+80	631,13	-0,70	622,09	-0,70
70+90	590,92	-0,71	583,25	-0,71
70+100	554,56	-0,72	547,81	-0,72
80+100	521,47	-0,72	515,36	-0,72
90+100	491,49	-0,73	485,70	-0,73
100+100	462,84	-0,73	458,00	-0,73

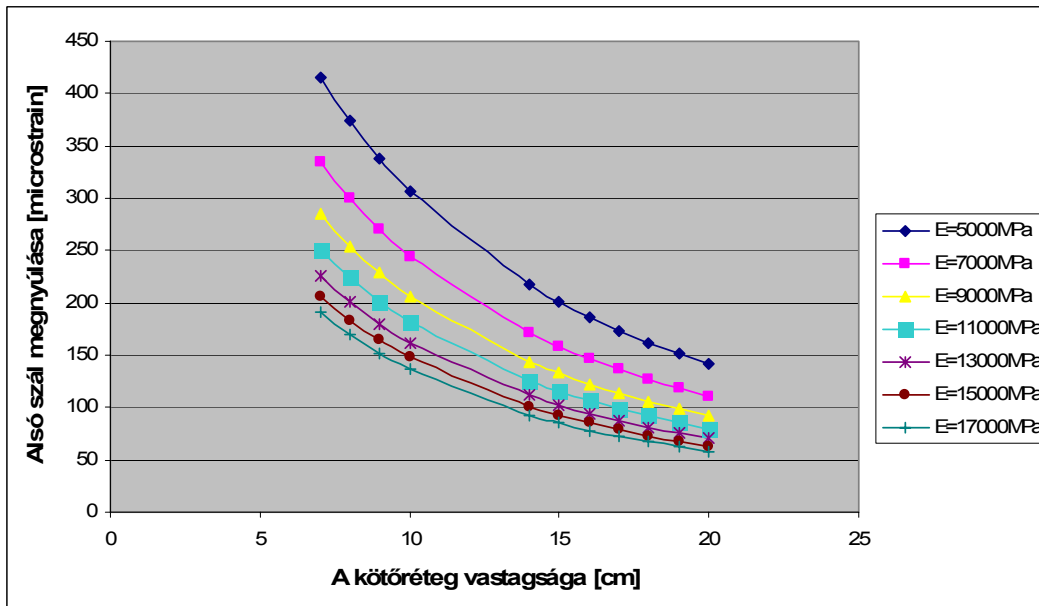
6.10. táblázat Hatvány görbék paramétereit a 6.8-6.9. ábrához

Kötőréteg+alapréteg vastagsága, mm	15cm CKt alapréteg $\varepsilon = a \cdot S^b$		20cm CKt alapréteg $\varepsilon = a \cdot S^b$	
	a	b	a	b

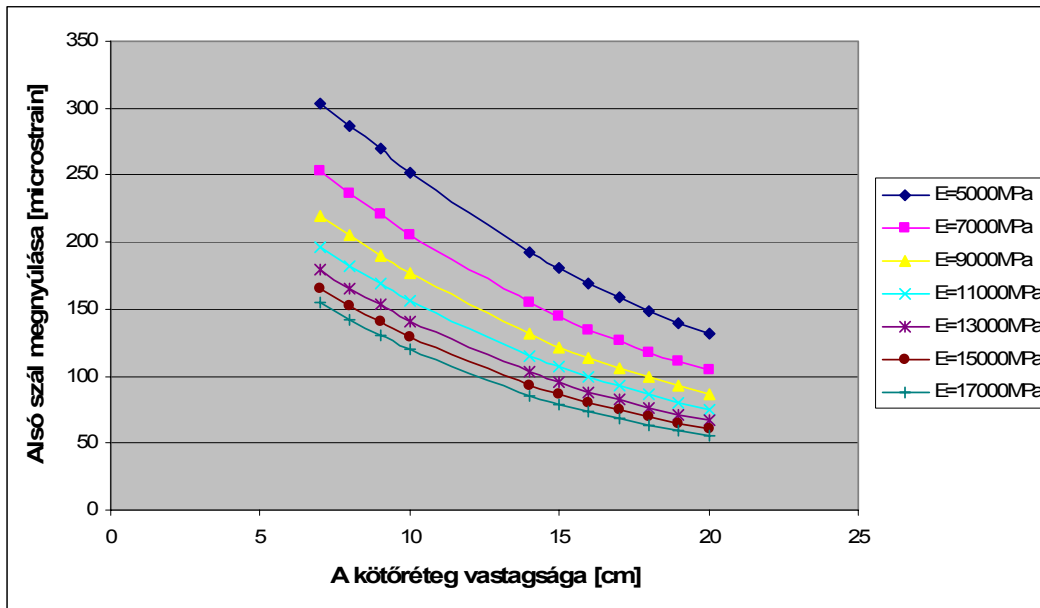
70+0	740,48	-0,553	564,54	-0,515
80+0	721,79	-0,573	562,08	-0,535
90+0	698,05	-0,591	555,33	-0,554
100+0	672,17	-0,609	545,36	-0,572
70+70	560,78	-0,662	484,91	-0,633
70+80	534,16	-0,673	467,31	-0,645
70+90	508,25	-0,682	449,66	-0,657
70+100	483,81	-0,691	432,11	-0,667
80+100	460,47	-0,700	414,64	-0,677
90+100	437,73	-0,707	397,71	-0,686
100+100	416,54	-0,714	380,96	-0,694



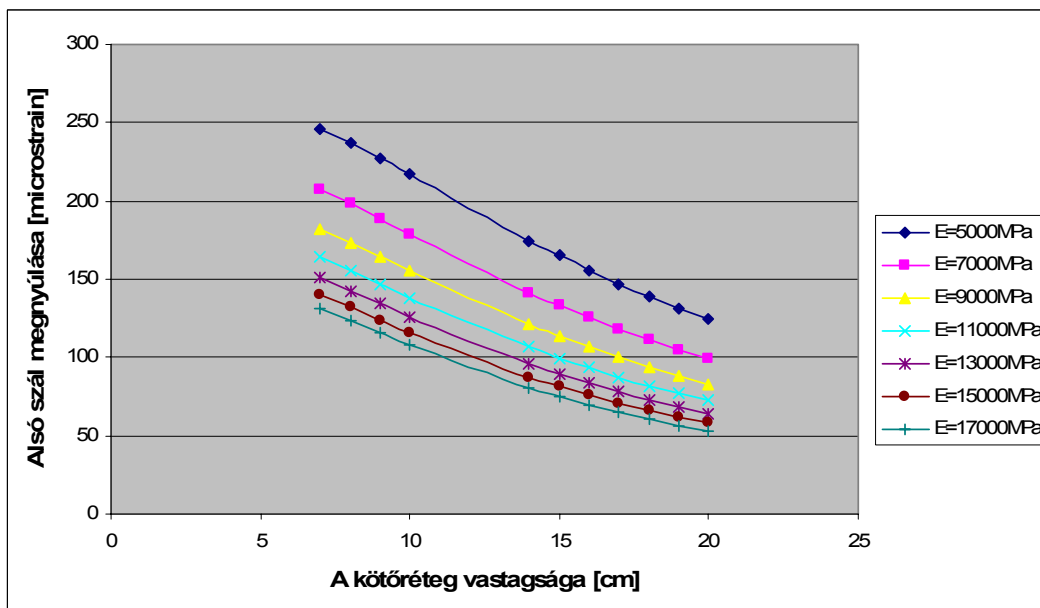
6.11. ábra Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg vastagságának függvényében (M56 alaprétég esetén)



6.12. ábra Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg vastagságának függvényében (FZKA alaprétég esetén)



6.13. ábra Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg vastagságának függvényében (150 mm vastagságú CKt alapréteg esetén)



6.14. ábra Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg vastagságának függvényében (200 mm vastagságú CKt alapréteg esetén)

6.8. ÖSSZEFOGLALÁS, TÉZISEK

A fejezetben elsőként a hazai szabvány alapján járatos típus-pályaszerkezeti modelleket építettem fel, majd változtattam a modellekben az egyes rétegek merevségi modulusát, illetve a rétegek együttdolgozását. A modellek igénybevételeinek számítása során lehetett következtetni arra, hogy mi befolyásolja a legjobban a pályaszerkezetben kialakul igénybevételeket, közvetett módon az élettartamot. A számítás alapján a kötőréteg merevségi modulusa számottevően befolyásolta az élettartamot, így új pályaszerkezeti modelleket építettem fel, immár elvonatkoztatva a típus pályaszerkezetek vastagságaitól, és csak a kötőréteg merevségét változtatva. Ebben az esetben megállapítható volt, hogy az aszfalt alsó szál megnyúlása a kötőréteg merevségétől és a pályaszerkezet vastagsági méretétől milyen módon függ.

3.1. tézis: A típus pályaszerkezetek kopórétegeiben csak akkor lép fel jelentősebb szélső szál megnyúlás, amennyiben az aszfaltrétegek között teljes elcsúszás tapasztalható, amely a gyakorlatban csak extrém esetekben fordulhat elő.

3.2. tézis: A típus pályaszerkezetek alsó aszfaltszálának megnyúlását a kopórétegek merevségi modulusa kevéssé, a kötőrétegek merevségi modulusa azonban jelentősen befolyásolja. Az alsó szélső szál megnyúlása a kötőrétegek merevségi modulusának függvényében – jó korrelációs együtthatóval ($R^2 > 0,99$) – hatvány függvény szerint csökken.

3.3. tézis: Az aszfaltrétegek közötti elcsúszás és az alsó aszfaltréteg szélső szál megnyúlása által meghatározott függvényre jó korrelációval ($R^2 > 0,99$) egy negyedfokú parabola illeszthető. A rétegek közötti elcsúszás 50%-os értéke felett az alsó aszfaltszálban keletkező igénybevételek rohamosan növekednek, így a pályaszerkezet fáradási élettartama jelentősen csökkenhet. A számítások szerint a teljes elcsúszás esete a teljes együttdolgozáshoz képest 70-80%-os, a félig együttdolgozás esetéhez képest pedig 55-65%-os megnyúlás-növekedést okoz az aszfalt alsó szélső szálában. A számításban a rétegek közötti elcsúszás csupán az aszfaltrétegek között változott, a legalsó aszfaltréteg és az alapréteg között minden esetben teljes elcsúszást vettem figyelembe.

7. A PÁLYASZERKEZET FÁRADÁSI ÉLETTARTAMA AZ ASZFALTKEVERÉKEK FÁRADÁSI GÖRBÉI ALAPJÁN

7.1. A LABORATÓRIUMBAN VIZSGÁLT ASZFALTANYAGOK WÖHLER-GÖRBÉI

A **6. fejezetben** ismertetett aszfalt-igénybevételek (szélső szál megnyúlások) nem elegendőek a burkolat élettartamának becsléséhez. Ennek megállapítására a Wöhler-görbék alkalmasak, amelyek összerendelik az aszfaltburkolat szélső szálának megengedett megnyúlását a tönkremenetelig elviselhető forgalmi terheléssel.

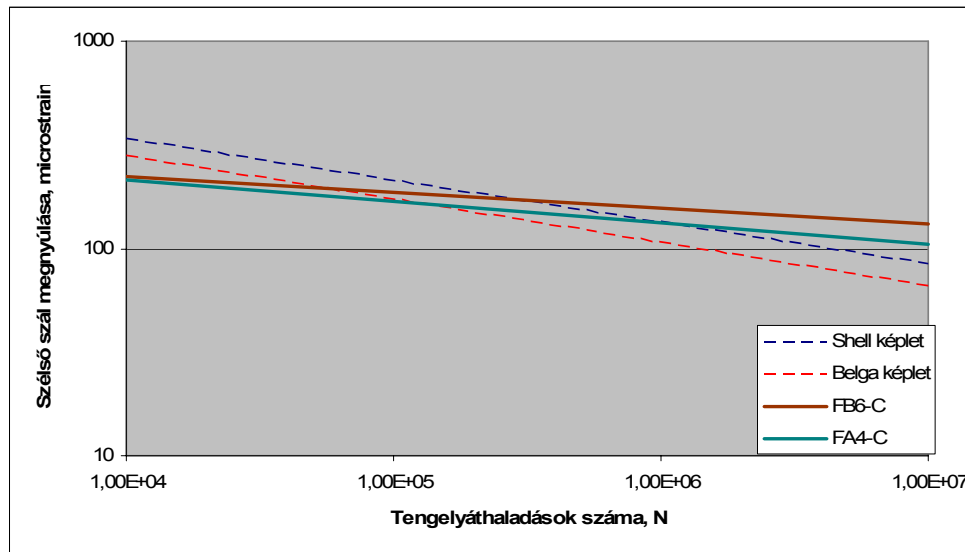
A már tárgyalt ismert közelítő Wöhler-görbék (**2. fejezet**) alkalmasak a fenti kapcsolat megállapítására. Azonban, mielőtt ezeket az eredményeket felhasználnánk, kísérletet tehetünk a közelítő görbék és a valós, laboratóriumi mérések közötti kapcsolat vizsgálatára. A BME Út és Vasútépítési Tanszék Városi Útpályaszerkezetek Laboratóriumában több aszfaltkeverék fárasztási vizsgálatát hajtottunk végre 2005-2008. években, négyponthoz hajlító-fárasztó vizsgálatsegítségével (MSZ EN 12697-24:2006). A fárasztási vizsgálatok több anyagcsoportra oszlottak:

- kopóréteg-keverék (AB-12/F);
- kötőréteg-keverék hagyományos (nem modifikált) bitumennel (K-20/F, K-22/F);
- kötőréteg-keverék modifikált bitumennel (mK-20/F, mK-20/NM, mK-22/F, mK-22/NM);

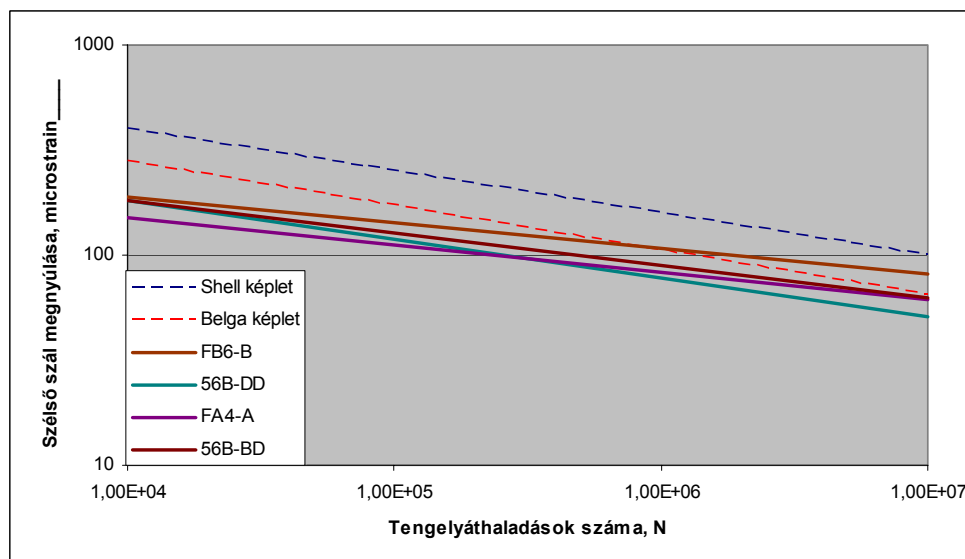
Jelen esetben nem teszek különbséget a régi magyar (pl. K-20/F), illetve az új EN (pl. K-22/F) szabványok szerint készült kötőréteg-keverékek között, miután – bár az alkalmassági vizsgálatnál alkalmazott szitasor eltér – jelentős különbség a szemmegoszlásukban nem mutatkozik.

A **7.1. ábrán** az AB-12/F keverékek, a **7.2. ábrán** a K-20/F keverékek, illetve a **7.3. ábrán** az mK-20/F, mK-20/NM keverékek fáradási görbéi láthatók, összehasonlításként az előrebecslő képletekből számított görbékkel. Előrebecslő képletekként a Shell és a Belgiumban kidolgozott előrebecslő képleteket alkalmaztam.

Összességében elmondható, hogy a mérések alapján felrajzolt Wöhler-görbék általában kisebb meredekséget adnak, mint a számítás során alkalmazott $0,20 \div 0,21$ kitevő (N, tengelyáthaladási számra vonatkoztatva). A kitevők értéke inkább $0,10 \div 16$ között változik, emellett AB-12/F anyagnál tapasztalható volt, hogy a mért értékek alapján rajzolt Wöhler-görbe magasabb fekvésű, azaz nagyobb fáradási élettartam várható, a K-22/F anyagoknál azonban a számított értékekhez képest a mért értékek alacsonyabb fekvésű Wöhler-görbét adtak, vagyis a mért fáradási élettartam nem hozza az előrebecslő képletekből számított értéket.



7.1. ábra AB-12/F anyagok mért és számított (előrebecsült) Wöhler-görbéi

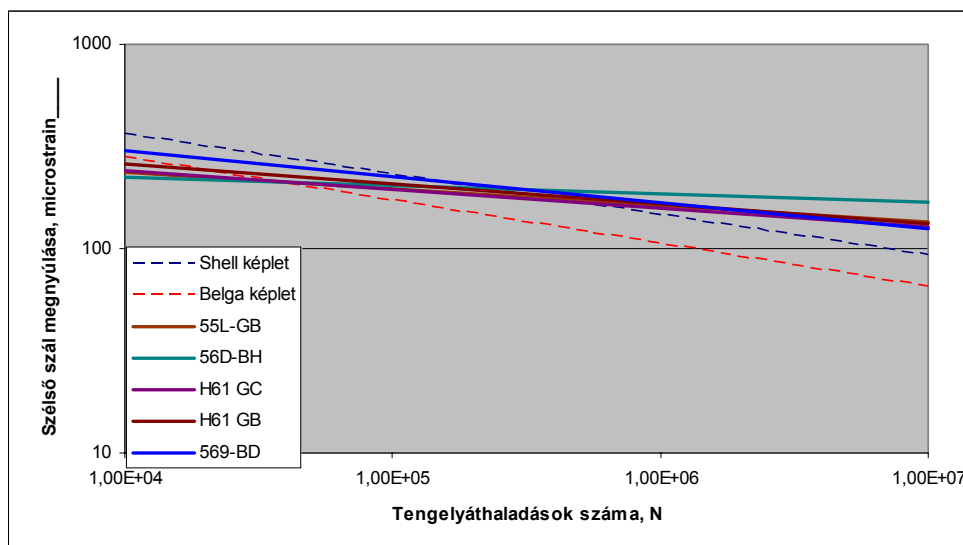


7.2. ábra K-20/F anyagok mért és számított (előrebecsült) Wöhler-görbéi

Amennyiben a modifikált bitumenekkel készült aszfaltok Wöhler-görbáját ábrázoljuk, az előrebecslő képletekkel számított értékekhez képest, úgy látható, hogy kb. 2×10^5 tengelyáthaladási szám érték felett az anyagok jobban teljesítenek, mint az anyagok előrebecslő képletekkel számított tulajdonságaiból várható lenne. Ez természetesen nem hasonlítható közvetlenül össze, hiszen az előrebecslő képleteket még nem modifikált bitumenekkel készült aszfaltanyagokra számították.

Megjegyzendő továbbá, hogy a modifikált bitumenekkel készült aszfaltkeverékek Wöhler-féle fáradási görbéje sokkal laposabb; az $\varepsilon = a \cdot N^b$ függvény alakú Wöhler-görbe esetében a b

hatványkitevő szokásos értéke a számításokban $-0,20 \div -0,21$ körüli értéket vesz fel, az általam elvégzett fárasztások során a vizsgált ötféle anyag esetében a „b” kitevő értéke a **7.1. táblázat** szerint alakult. A táblázatból látható, hogy egy kivétellel az anyagok Wöhler-görbéjének meredeksége $-0,09 \div -0,13$ közötti értéket vesz fel. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy ezen anyagok jóval érzékenyebbek a terhelés változásaira, mint azt az előrebecslő képletekkel feltételezzük, a másik oldalról azonban ha a terhelés (szélső szál megnyúlása) megfelelően kis értékű, úgy az élettartam rohamosan nő.



7.3. ábra mK-22/F, mK-22/NM anyagok mért és számított (előrebecsült)Wöhler-görbéi

7.1. táblázat Az mK-22/F, mK-22/NM keverékeken elvégzett fárasztási vizsgálatok eredményei

Keverék jele	Keverék típusa	a	b	$\varepsilon (N=10^6)^*$ [microstrain]
55L-GB	mK-20/NM	-0,080	495	164
56D-BH	mK-20/NM	-0,041	331	187
H61-GB	mk-22/F	-0,096	630	167
H61-GC	mK-22/NM	-0,093	569	158
569-BD	mK-20/NM	-0,130	1007	167

* 10^6 ciklusszámhoz tartozó megengedett megnyúlás érték

7.2. A VIZSGÁLT PÁLYASZERKEZETEK ÉLETTARTAMA

Az előzőekben ismertetett (BISAR szoftver segítségével számított) szélső szál megnyúlások, illetve a laboratórimban meghatározott Wöhler-görbék ismeretében számíthatók az egyes pályaszerkezetekhez tartozó élettartam-ismétlési számok, F100 egységtengelyre vonatkozóan.

A felvett pályaszerkezeti modellekben a fáradás szempontjából két határérték lehet mértékadó: teljes együtdolgozás esetén legalsó aszfaltréteg alsó szála, a rétegek közötti teljes elcsúszás esetén a kopóréteg alsó szála és a legalsó aszfaltréteg alsó szála.

A kopóréteg alsó szálának fáradási ellenőrzésére a Laboratóriumban elvégzett vizsgálatok **(4.7. pont)** eredményei közül a legkedvezőtlenebb fekvésű Wöhler görbét választottam ki, egyenlete:

$$\varepsilon = 562 \cdot N^{-0,104}$$

A **7.2. táblázatban** követhetők nyomon a megnyúlásokból, a Wöhler görbe alapján számított megengedett tengelyáthaladási szám, illetve a típus pályaszerkezetekhez az ÚT 2-1.202 alapján tartozó, elvben maximális egység tengely-áthaladási szám. A táblázat adatai alapján a pályaszerkezetek igen jól megfelelnek az élettartamnak, holott a biztonság javára több elhanyagolást is végeztünk:

- A modellek közül a legkisebb merevségű szerkezeteket vettem számításba
- Az egyes aszfaltrétegek között teljes elcsúszást feltételeztem, amely az útpályaszerkezetekben (főként az újonnan épült szerkezetekben) meglehetősen ritka
- A vizsgálat során a laboratóriumi körülmények közötti ciklusszámot tekintettem számításba, holott a valós pályaszerkezetben a terhelési szünetek hatása is érvényesül (healing effect), amely tovább növeli az élettartamot – ettől a hatástól jelen összehasonlításban, eltekinttem.

7.2. táblázat A megengedhető tengelyáthaladási számok az aszfalt kopóréteg alsó szélső szál megnyúlásának függvényében

Forgalmi terh. osztály	A kopóréteg alsó szálának megnyúlása (microstain)				Megengedett tengelyáthaladási szám [mET]				Tengelyáthaladási szám ÚT 2-1.202 szerint [mET]
	M56	FZKA	CKt (150 mm)	CKt (200 mm)	M56	FZKA	CKt (150 mm)	CKt (200 mm)	
C	133	114	87	93	1,1	4,5	66,4	34,2	1,0
D	100	112	86	89	16,7	5,5	68,5	48,8	3,0
E	86	68	71	89	71,3	685,1	450,7	48,5	10,0
K	83	70	50	67	96,7	508,9	13178,7	808,6	30,0

A kötőréteg alsó szálának ellenőrzésére egy kedvezőtlen fekvésű Wöhler görbét használtam a megvizsgált K-20/F keverékek eredményei közül:

$$\varepsilon = 1001 \cdot N^{-0,185}$$

illetve egy kedvezőtlen fekvésű Wöhler görbét használtam a megvizsgált mK-20/F keverékek eredményei közül

$$\varepsilon = 569 \cdot N^{-0,093}$$

A Wöhler-görbe és az alsó aszfaltszál megnyúlása egy élettartam-ismétlési számot ad, amelyet a **7.3.–7.4. táblázatban** a forgalmi terhelési osztályokkal hasonlítottam össze, mind a normál, mind a modifikált bitumenes keverék esetében.

A táblázat tanúsága szerint (a terhelési szünetek – shift faktor – figyelembe vétele nélkül) a K-20/F keverék beépítésével fáradásra egyik esetben sem megfelelőek a pályaszerkezetek, azonban még a leggyengébb mK-22/NM keverék esetében is megfelelő fáradási élettartamot adnak, sőt, a tönkremenetelig megengedhető értékek jelentősen felülmúlják az elvárt tengelyáthaladási számot. A fentiek alapján megállapítható, hogy a megfelelő fáradási (Wöhler-) görbével rendelkező anyagok útpályaszerkezetbe való beépítése jelentősen növeli a fáradási élettartamot.

Az is megállapítható továbbá, hogy az aszfalt alsó szál megnyúlásának csökkenésével a pályaszerkezet fáradási élettartama rohamosan nő, köszönhetően a kis meredekségű Wöhler-görbéknek. Tekintettel arra, hogy jelen esetben az előrebecslő képletek alapján számított típuspályaszerkezeti vastagságokkal számoltunk, természetes, hogy a nagyobb terhelési osztályokban túlméretezést mutattam ki. Az előrebecslő képletekből adódó Wöhler-görbék ugyanis sokkal meredekebbek (a kitevő 0,2 körüli érték), így kisebb szélső szál megnyúlásnál nem növekszik olyan mértékben a megengedhető tengelyáthaladási szám.

Nem szabad azonban megfeledkezni arról, hogy a lapos Wöhler-görbe sokkal érzékenyebb a túlterhelésekre. Nagyobb tengelysúlyok esetében a szélső aszfaltszál megnyúlása a tengelysúllyal egyenes arányban nő, azonban ehhez sokkal kisebb megengedett tengelyáthaladási szám tartozik, mint ha egy meredekebb Wöhler-görbe esetében beszélünk túlterhelésről.

7.3. táblázat A megengedhető tengelyáthaladási számok az aszfalt kötőréteg alsó szélső szál megnyúlásának függvényében (K-20/F keverék Wöhler-görbáját felhasználva)

Forgalmi terh. osztály	A kopóréteg alsó szálának megnyúlása (microstain)				Megengedett tengelyáthaladási szám [mET]				Tengelyáthaladási szám ÚT 2-1.202 szerint [mET]
	M56	FZKA	CKt (150 mm)	CKt (200 mm)	M56	FZKA	CKt (150 mm)	CKt (200 mm)	
C	140	152	158	156	0,04	0,03	0,02	0,02	1,0
D	107	116	106	130	0,17	0,12	0,18	0,06	3,0
E	79	84	92	93	0,90	0,64	0,41	0,38	10,0
K	65	68	69	71	2,68	1,97	1,82	1,59	30,0

7.4. táblázat A megengedhető tengelyáthaladási számok az aszfalt kötőréteg alsó szélső szál megnyúlásának függvényében (mK-20/F keverék Wöhler-görbáját felhasználva)

Forgalmi terh. osztály	A kopóréteg alsó szálának megnyúlása (microstain)				Megengedett tengelyáthaladási szám [mET]				Tengelyáthaladási szám ÚT 2-1.202 szerint [mET]
	M56	FZKA	CKt (150 mm)	CKt (200 mm)	M56	FZKA	CKt (150 mm)	CKt (200 mm)	
C	140	152	158	156	3,7	1,6	1,0	1,2	1,0
D	107	116	106	130	65,0	29,4	72,6	8,4	3,0
E	79	84	92	93	1738,8	889,1	361,1	319,3	10,0
K	65	68	69	71	15514,1	8390,9	7164,3	5427,9	30,0

7.3. AZ ASZFALT PÁLYASZERKEZETEK MEGENGEDETT TENGELYÁTHALADÁSI SZÁM – RÉTEGVASTAGSÁG ÖSSZEFÜGGÉSEI KONKRÉT ASZFALTANYAGOK MÉRÉSI EREDMÉNYEINEK FELHASZNÁLÁSÁVAL

A **7.2. pontban** kimutattam, hogy az eltérő fáradási tulajdonságokkal (Wöhler-görbével) rendelkező aszfaltanyagok megengedhető tengelyáthaladási száma lényeges különbségeket mutat. Ennek alapján azonban lehetőség nyílik a pályaszerkezet fáradásra történő méretezésére is.

A modellezés célja, hogy meghatározott, azaz laboratóriumi mérések során kiválasztott aszfalt-típusok merevségi és fáradási adatait (Wöhler-görbáját) a számított értékekkel összevetve meghatározzuk az ÚT 2-1.202 szerinti forgalmi terhelési kategóriákban szükséges aszfaltvastagságokat.

7.5. táblázat A modellezés során felhasznált aszfaltanyagok mechanikai tulajdonságai

Aszfaltanyag jele	Típusa	Merevségi modulus [MPa]*	Wöhler-görbe egyenlete
56B-DD	K-20/F	17 263	$\varepsilon = 1001 \cdot N^{-0,185}$
56B-BD	K-20/F	15 503	$\varepsilon = 753 \cdot N^{-0,155}$
H61-GB	mK-22/F	8 685	$\varepsilon = 630 \cdot N^{-0,096}$
H61-GC	mK-22/NM	14 774	$\varepsilon = 569 \cdot N^{-0,093}$

* négyponthas hajtó-fárasztó vizsgálatból meghatározott kezdeti merevség

A számítás elvégzéséhez a **7.5. táblázatban** látható aszfaltanyagokat választottam ki. A pályaszerkezet-méretezési modellek közül azokat vettem alapul, amelyekben a kopóréteg merevségi modulusa állandó, a kötőréteg merevségi modulusa és vastagsága változó. A **6.9. táblázatban** találhatóak azok a már meghatározott paraméterek, amelyek az egyes, változó

kötőréteg-vastagságú modellekhez tartoznak, és segítségükkel megállapítható az alsó aszfaltszál megnyúlása a kötőréteg merevségének függvényében. Ezen értékeket a **7.6. táblázat** mutatja be.

Az alsó aszfaltszál megnyúlásának meghatározása után lehetőség nyílik arra, hogy az egyes (10 mm-es lépcsőkben vastagított) pályaszerkezeti modellekhez hozzárendeljünk egy várható fáradási élettartamot. Ezt a Wöhler-görbe segítségével tehetjük meg.

7.6. táblázat A kiválasztott aszfaltanyagok merevségéből számított alsó szélső szál megnyúlások 150 mm CKt alaprétegen, az aszfaltvastagság függvényében

Kötő+felső alapréteg vastagsága [mm]	Aszfaltanyag jele és típusa			
	K-20/F (56B-DD)	K-20/F (56B-BD)	mK-22/F (H61-GB)	mK-22/NM (H61-GC)
70	153	163	224	167
80	141	150	209	154
90	129	138	194	142
100	119	127	180	131
140	85	91	134	94
150	79	85	125	87
160	73	78	116	81
170	68	73	109	75
180	63	68	101	70
190	58	63	95	65

Harmadik lépésként a megfelelő, 10 mm-es lépcsőkben változtatott kötőréteg-vastagságokhoz tartozó megengedett N tengelyáthaladási számot kell összevetni az egyes forgalmi terhelési kategóriákhoz tartozó tengelyáthaladási számmal. Minden egyes aszfaltanyagra (és alapréteg-típusra), jó korrelációval ($R^2 > 0,99$) exponenciális görbe illeszthető, melynek alakja:

$$TF = a \cdot e^{bx}$$

ahol

TF tervezési forgalom [ET]

a, b konstansok

x a kötőréteg+felső alapréteg együttes vastagsága [mm]

A **7.7. táblázatban** láthatók a fenti képletéhez tartozó a, b konstansok értékei. A képletet az alábbi módon átrendezve:

$$x = \frac{\ln(TF/a)}{b}$$

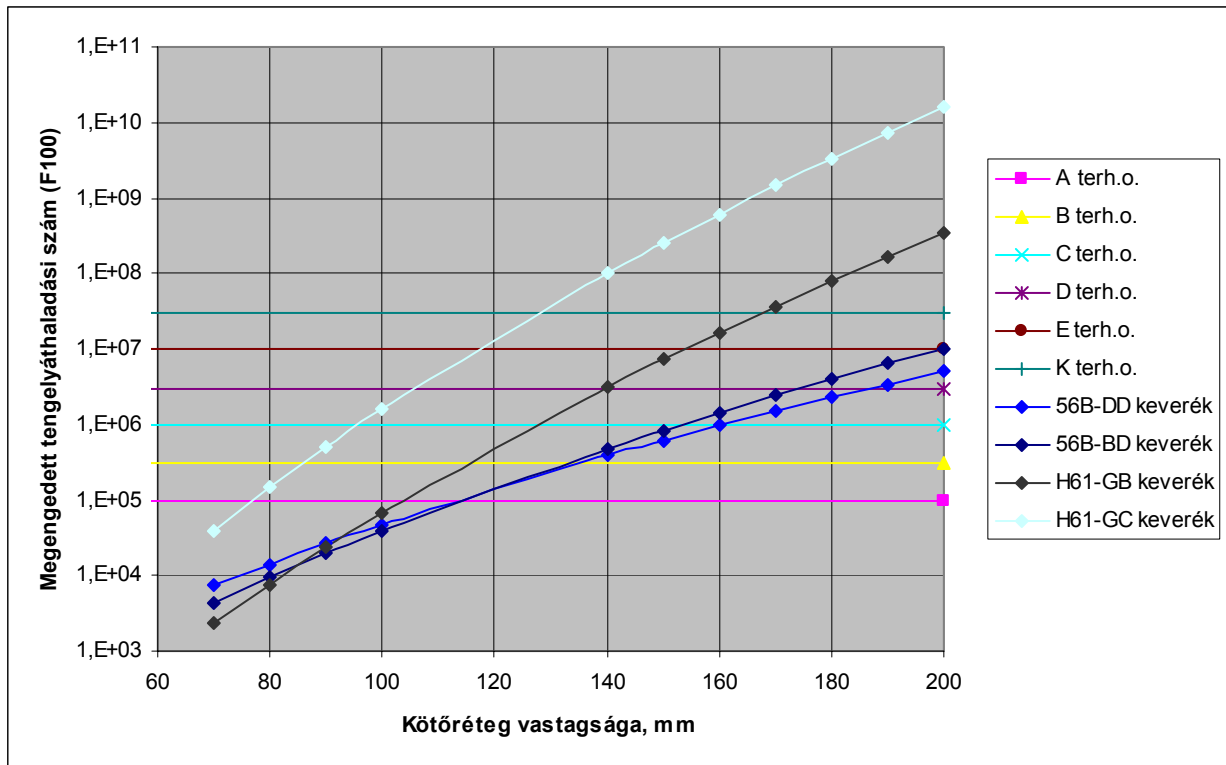
kiszámíthatók a forgalmi terhelés függvényében a beépítendő aszfaltvastagságok (a kopóréteg nélkül).

Az ehhez tartozó grafikon a 7.4.–7.7. ábrán látható, 150 mm vastag CKt alapréteg esetén. Az ábrán mind a négy, a 7.5. táblázatban felsorolt aszfaltkeverékre végigszámoltam a modelleket. Az ábrán vízszintes vonalakkal feltüntettem az A...K forgalmi terhelési osztályokhoz tartozó határ tengelyáthaladási számokat. Továbbá monoton emelkedő görbékkel ábrázoltam a 10 mm-enként változtatott kötőréteg-vastagságú pályaszerkezetek megengedett tengelyáthaladási számait – a négyféle aszfaltkeverék beépítése esetében. Az emelkedő görbék és a forgalmi terhelési osztályok metszéspontjában szintén leolvashatók a szükséges aszfaltréteg-vastagságok az egyes esetekben.

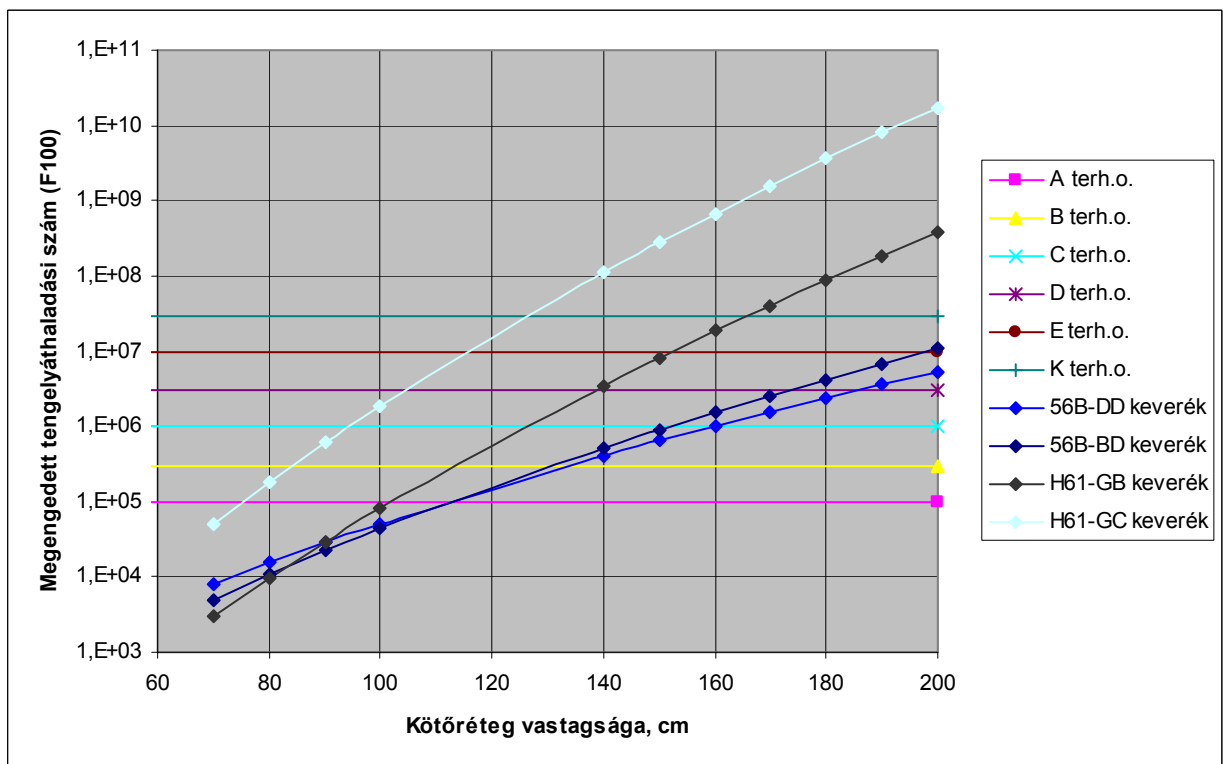
7.7. táblázat A rétegvastagság – tervezési forgalom görbe a, b konstansainak értékei

Alapréteg típusa	Aszfaltanyag típusa (jele)	a	b
M56	K-20/F (56B-DD)	276,9	0,05022
M56	K-20/F (56B-BD)	88,2	0,05966
M56	mK-20/NM (H61-GB)	5,9	0,09147
M56	mK-20/F (H61-GC)	62,6	0,09908
FZKA	K-20/F (56B-DD)	320,0	0,04965
FZKA	K-20/F (56B-BD)	105,3	0,05896
FZKA	mK-20/NM (H61-GB)	8,1	0,09018
FZKA	mK-20/F (H61-GC)	84,5	0,09790
150mm CKt	K-20/F (56B-DD)	1291,7	0,04335
150mm CKt	K-20/F (56B-BD)	604,0	0,05108
150mm CKt	mK-20/NM (H61-GB)	256,3	0,07460
150mm CKt	mK-20/F (H61-GC)	1642,2	0,08450
200mm CKt	K-20/F (56B-DD)	4080,2	0,03810
200mm CKt	K-20/F (56B-BD)	2481,6	0,04468
200mm CKt	mK-20/NM (H61-GB)	3362,2	0,06339
200mm CKt	mK-20/F (H61-GC)	17780,0	0,07376

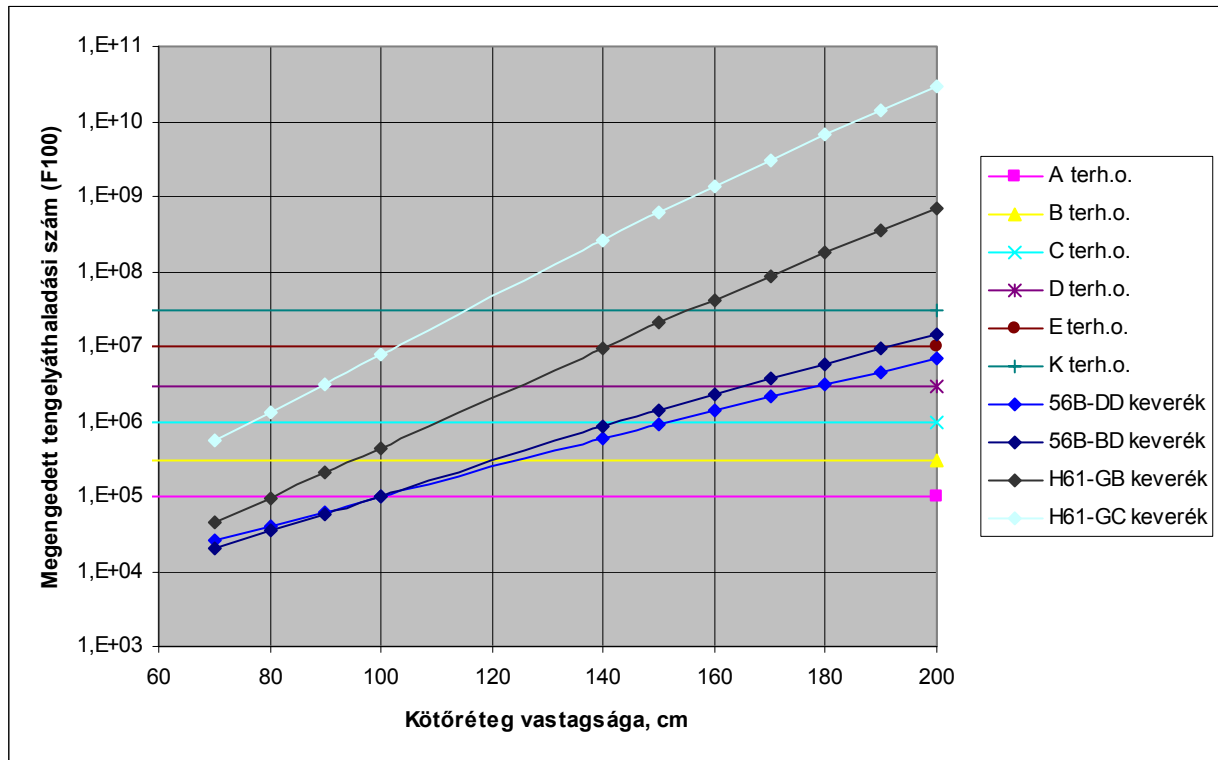
Az ábrából leolvasható, hogy noha a két K-20/F keverék (56B-BD és 56B-DD keverékek) Wöhler-görbéje kissé eltérő volt, mégis kb. 10 mm eltérést adtak a méretezés során a rétegvastagságban. A két, modifikált bitumennel készült keverék Wöhler-görbéje nagymértékben hasonlított egymáshoz, a méretezés során mégis nagy vastagsági eltérések adódtak. Ennek oka az egyik keverék kis kezdeti merevsége – kisebb, mint a normál bitumennel készült anyagoké –, amely a pályaszerkezetben nagy megnyúlást eredményezett. Ennek ellenére a szükséges aszfaltvastagságok – a lapos és magasan fekvő Wöhler-görbe hatására – még így is jóval kisebbre adódtak, mint a nem modifikált bitumennel készült aszfaltoknál.



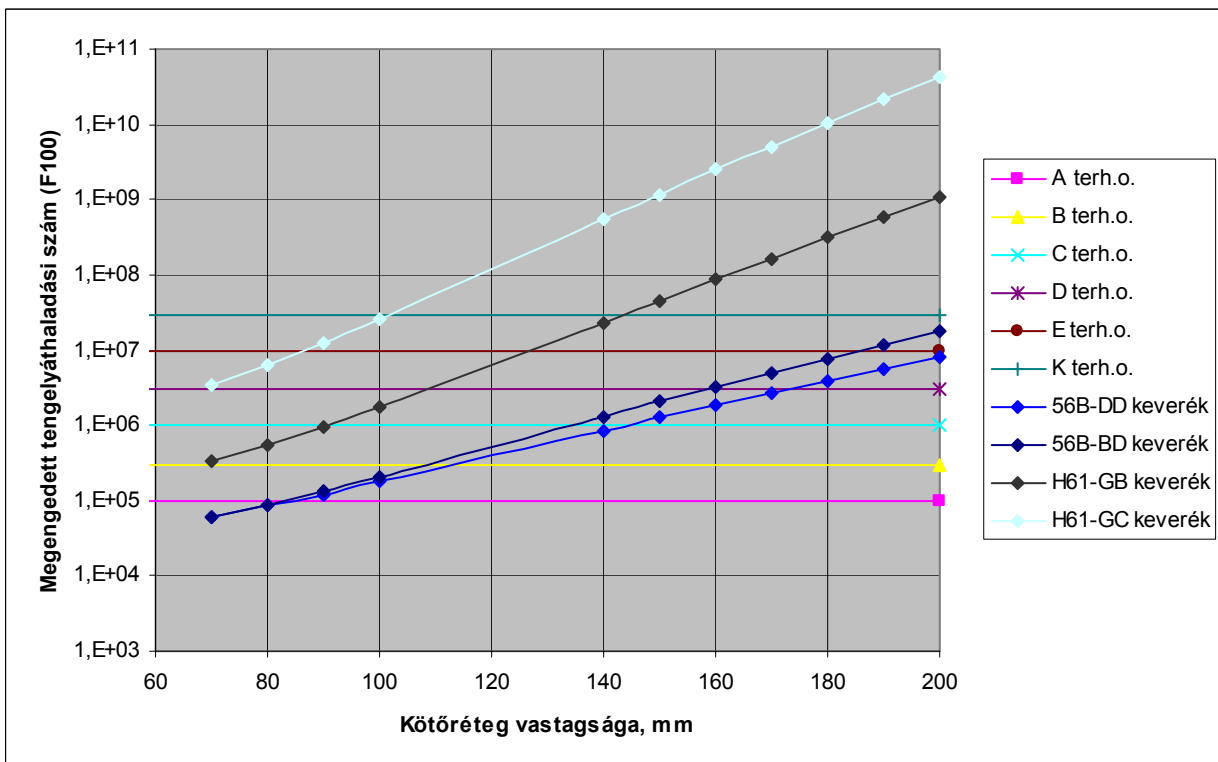
7.4. ábra Alkalmazható aszfaltvastagságok a (M56 mechanikai stabilizációs alaprétteg)



7.5. ábra Alkalmazható aszfaltvastagságok a (FZKA zúzottkő alaprétteg)



7.6. ábra Alkalmazható aszfaltvastagságok a (150 mm vastagságú CKt alaprteég)



7.7. ábra Alkalmazható aszfaltvastagságok a (200 mm vastagságú CKt alaprteég)

7.8. táblázat Alkalmazható aszfaltvastagságok [mm] (M56 alapréteg)

Forgalmi terhelési osztály	Aszfaltanyag jele és típusa			
	K-20/F (56B-DD)	K-20/F (56B-BD)	mK-22/F (H61-GB)	mK-22/NM (H61-GC)
A	120 (140*)	120 (140*)	110 (140*)	80
B	140	140	120 (140*)	90
C	170	160	140	100
D	190	180	150	110 (140*)
E	210	200	160	130 (140*)
K	240	220	170	140

* technológiai minimum érték

7.9. táblázat Alkalmazható aszfaltvastagságok [mm] (FZKA alapréteg)

Forgalmi terhelési osztály	Aszfaltanyag jele és típusa			
	K-20/F (56B-DD)	K-20/F (56B-BD)	mK-22/F (H61-GB)	mK-22/NM (H61-GC)
A	120 (140*)	120 (140*)	110 (140*)	80
B	140	140	120 (140*)	90
C	170	160	140	100
D	190	180	150	110 (140*)
E	210	200	160	120 (140*)
K	240	220	170	140

* technológiai minimum érték

7.10. táblázat Alkalmazható aszfaltvastagságok [mm] (150 mm vastagságú CKt alapréteg)

Forgalmi terhelési osztály	Aszfaltanyag jele és típusa			
	K-20/F (56B-DD)	K-20/F (56B-BD)	mK-22/F (H61-GB)	mK-22/NM (H61-GC)
A	110 (140*)	110 (140*)	80	50 (70*)
B	130 (140*)	130 (140*)	100	70
C	160	150	120 (140*)	80
D	180	170	130 (140*)	90
E	210	200	150	110 (140*)
K	240	220	160	120 (140*)

* technológiai minimum érték

7.11. táblázat Alkalmazható aszfaltvastagságok [mm] (200 mm vastagságú CKt alapréteg)

Forgalmi terhelési osztály	Aszfaltanyag jele és típusa			
	K-20/F (56B-DD)	K-20/F (56B-BD)	mK-22/F (H61-GB)	mK-22/NM (H61-GC)
A	90	90	60 (70*)	30 (70*)
B	120 (140*)	110 (140*)	80	40 (70*)
C	150	140	90	60 (70*)
D	180	160	110 (140*)	70
E	210	190	130 (140*)	90
K	240	220	150	110 (140*)

* technológiai minimum érték

7.4. ÖSSZEFOGLALÁS, TÉZISEK

A 7. fejezetben bemutattam a pályaszerkezetek fáradásra történő méretezését abban az esetben, ha a pályaszerkezeti modell számítása során konkrét aszfaltanyagokat alkalmazunk. Két normál és két modifikált bitumennel kialakított keveréket alkalmaztam, amelyeken elvégeztem a szükséges rétegvastagság összehasonlítását.

4. tézis: Az alsó aszfaltrétegekben használatos aszfaltkeverékek laboratóriumban mért merevségi modulusa és Wöhler-görbéje együttesen nagymértékben befolyásolja a pályaszerkezet fáradási élettartamát. A kezdeti merevség növekedése elsősorban a kisebb tengelyáthaladási számoknál, a Wöhler-görbe hajlása pedig elsősorban a nagyobb tengelyáthaladási számoknál jelent előnyt a pályaszerkezet vastagságának meghatározásakor.

5. tézis: A pályaszerkezet szükséges vastagsága (v) és a megengedett tengelyáthaladási szám (TF) között exponenciális kapcsolatot állapítottam meg, amennyiben az egyéb paraméterek változatlanok. Az exponenciális kapcsolatot leíró $TF = a \cdot e^{b \cdot v}$ görbe a , b paramétereinek ismeretében megállapítható az adott aszfaltanyag alkalmazása esetén a kötőréteg+felső alapréteg együttes rétegvastagsága.

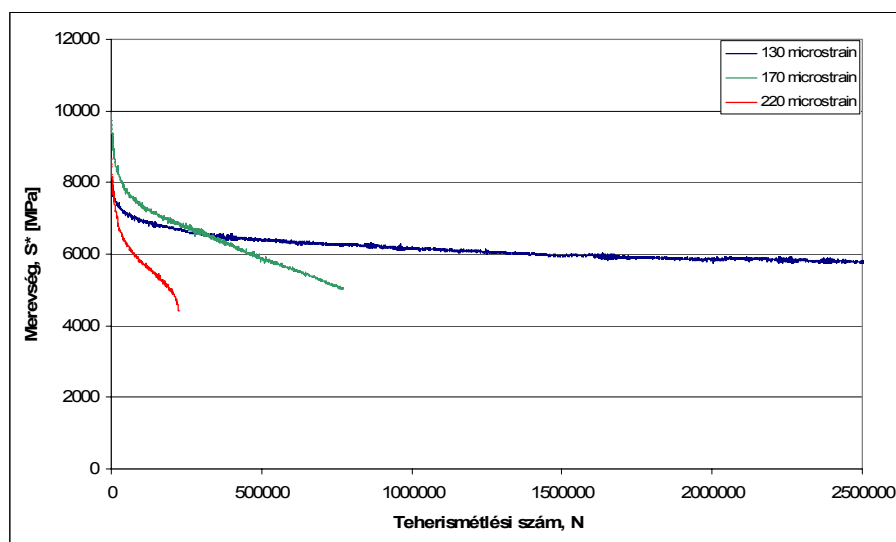
8. AZ ASZFALTRÉTEGEK MEREVSÉGCSÖKKENÉSÉNEK HATÁSA A PÁLYASZERKEZET ÉLETTARTAMÁRA

8.1. BEVEZETÉS

Az előző fejezetekben tárgyalt pályaszerkezeti modellek bemenő adataiként az egyes rétegek merevségi modulusai szerepeltek. A merevségi modulusok segítségével kiszámított aszfalt szélső szál megnyúlása behelyettesíthető a Wöhler görbébe (amely a megnyúlás–megengedett tengelyáthaladási szám közötti összefüggést hivatott megjeleníteni), így lehetővé vált megállapítani a megengedett tengelyáthaladási számot.

A fáradásból, mint jelenségből azonban következik, hogy a pályaszerkezetet felépítő aszfaltanyagok merevsége idővel csökken. Márpedig ha csökken, úgy a pályaszerkezet behajlása, illetve a szélső szál megnyúlása folyamatosan növekszik. A **6. fejezetben** ismertettem, hogy a pályaszerkezeti modellek futtatása során az alsó aszfaltréteg merevségének változtatása hat ki a legjobban az alsó aszfaltszál megnyúlására, így közvetetten az élettartamra.

Fentiekből következik, hogy a folyamatos merevség-csökkenés visszahat a szélső szál megnyúlására, az pedig az élettartamra. A Wöhler-görbéből is következtethetünk arra, hogy a szélső szál megnyúlása függvényében a hajlító-fárasztó vizsgálatokban a tengelyáthaladási szám – merevség görbe egyre meredekebb, vagyis a merevség csökkenése egyre intenzívebben kell, hogy lejátszódjon. A **8.1. ábrán** láthatunk egy példát a különböző terhelési szinten (szélső szál megnyúlással) futtatott hajlító-fárasztó vizsgálatok tengelyáthaladási szám – merevség lefutására.



8.1. ábra A fáradási görbe lefutása az egyes terhelési szinteken

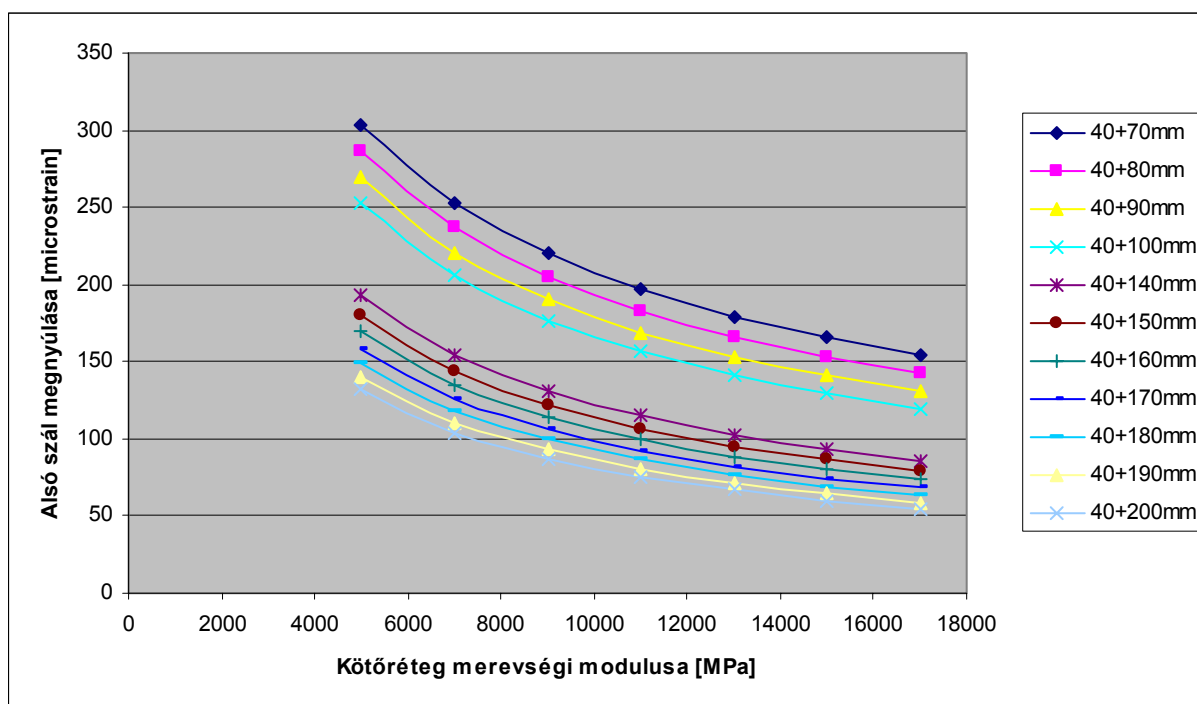
8.2. MÓDSZERTAN

Általános esetben a pályaszerkezet élettartamát az aszfalt próbatestek hajlító-fárasztó vizsgálatából nyert kezdeti merevségi modulusából és a Wöhler-görbéjéből nyerjük.

Az alsó aszfaltréteg kezdeti merevségéből következtethetünk az alsó szélső szál megnyúlására. Ennek számítását egyedileg a BISAR programmal végezhetjük el. A számítás megkönnyítésére kidolgoztam egy táblázatot, amely a megfelelő aszfaltvastagság kiválasztásával hatvány függvénnyel írja le a kezdeti merevség és a megnyúlás egymástól való függését. Ilyen görbesereg négyféle hajlékony típus-pályaszerkezetre létezik, példaként a **8.1. ábra** a 150 mm vastag CKt alaprétet mutatja be. A hatvány függvény alakja $\varepsilon = a \cdot S_0^b$, együtthatói táblázatos formában is rendelkezésre állnak (**8.1. táblázat**).

A függvénybe a kezdeti merevséget (S_0) behelyettesítve, megkapható az alsó szál megnyúlása (ε).

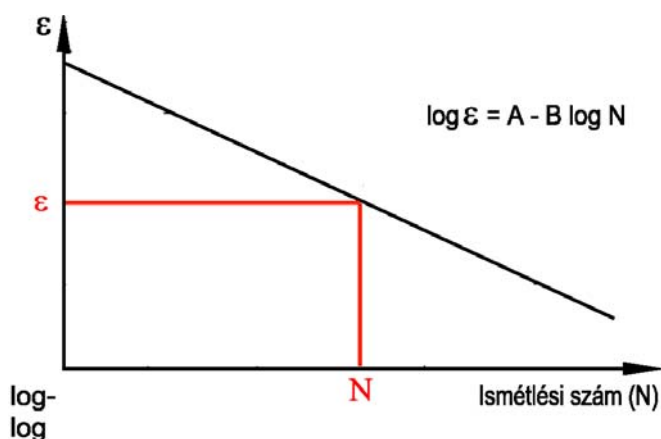
Az alsó szál megnyúlásából pedig a Wöhler-görbe segítségével meghatározható a tengelyáthaladási szám (**2. ábra**). A Wöhler-görbe alakja $\varepsilon = a \cdot N^b$, itt N (megengedett tengelyáthaladási szám) a keresett érték, amelyből a forgalom nagyság (ET/nap; ET/év) függvényében az élettartam (év) számítható.



8.1. ábra Aszfalt alsó szál megnyúlások a kötőréteg merevségének függvényében (150 mm vastagságú CKt alaprétet esetén)

8.1. Táblázat Hatvány görbék paraméterei a 8.1. ábrához

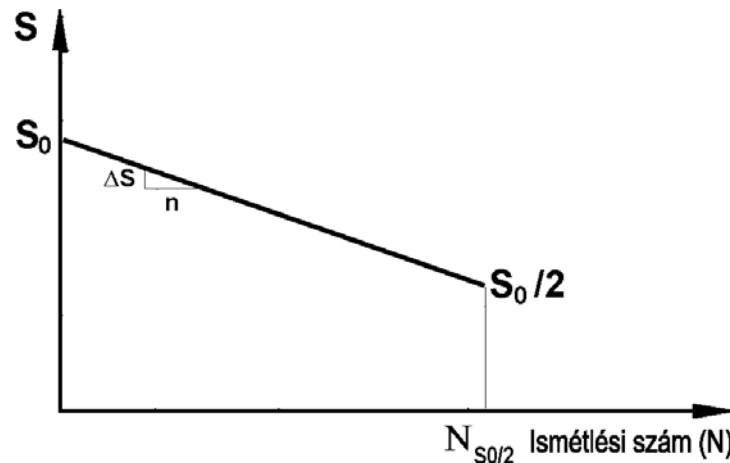
Kötőréteg+alapréteg vastagsága, mm	150 mm CKt alapréteg	
	a	b
70+0	740,48	-0,553
80+0	721,79	-0,573
90+0	698,05	-0,591
100+0	672,17	-0,609
70+70	560,78	-0,662
70+80	534,16	-0,673
70+90	508,25	-0,682
70+100	483,81	-0,691
80+100	460,47	-0,700
90+100	437,73	-0,707
100+100	416,54	-0,714



8.2. ábra Példa a Wöhler-görbe alkalmazására

A Wöhler-görbe – miután azt mondja meg, hogy egyes terhelési szinteken az aszfalt burkolat merevsége mennyi teherismétlés után éri el a kezdeti érték 50%-át (ez az egyezményes tönkremeneteli kritérium) – azt is megmutatja, hogy a merevség milyen ütemben csökken a teherismétlések hatására. A **8.2. ábra** példáját követve ha ϵ szélső szál megnyúlás alakul ki, akkor N tengelyáthaladási szám után a merevség a kezdeti merevség 50%-ára csökken. Ennek értelmében a tengelyáthaladási szám-merevség görbe egy szakaszán, arányossági tényezővel az aktuális merevség érték számítható (nem más, mint 'n' teherismétlés alatti merevségcsökkenés ($n < N$); **8.3. ábra**).

$$S_{akt} = S_0 - n \cdot \frac{S_0 / 2}{N_{S_0 / 2}}$$



8.3. ábra A merevségcsökkenés számítása arányossági tényezőkkel

Azonban megállapítható, hogy ha a merevség bármilyen értékkel csökken, akkor az az egész pályaszerkezetre hatást gyakorol, vagyis az alsó szélső szál megnyúlása (ε) megváltozik (vö. 8.1. ábra), ezt az aktuális S_{akt} merevség megfelelő behelyettesítésével kaphatjuk meg (8.1. táblázat) A megváltozott (megnőtt) alsó szélső szál megnyúláshoz azonban más (nyilvánvalóan kevesebb) megengedett tengelyáthaladási szám tartozik, amely szintén a Wöhler-görbéből olvasható le (8.2. ábra).

A fentiek alapján egy öngerjesztő folyamat jön létre:

csökkenő merevség → növekvő alsó szál megnyúlás → kisebb várható élettartam → intenzívebben csökkenő merevség → tovább növekvő alsó szál megnyúlás → stb.

Megfelelő 'n' érték felvételével rész-fáradásokat állíthatunk elő a Miner-hipotézis segítségével. Azt vizsgáljuk, hogy 'n₁' terhelési ciklus az adott merevséghez tartozó élettartam (N₁) hány %-a, majd a merevséget a fent említett módon csökkentve 'n₂' (=n₁) terhelési ciklust számítunk, amely – a csökkent merevség miatt – egy N₂ < N₁ élettartamhoz viszonyított %-os értéket ad. Ezeket a rész-értékeket a Miner-hipotézissel összegezve akkor éri el a pályaszerkezet a kifáradás határát, ha a kumulált érték az 1-et eléri:

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

8.3. EREDMÉNYEK

Az alábbiakban a korábban megvizsgált anyagok négyponos hajlító-fárasztó vizsgálattal meghatározott Wöhler-görbéjét és kezdeti merevségét vizsgáljuk. A fenti gondolatmenet alapján végigszámítottam azokat a megengedett tengelyáthaladási számokat, amelyek a kötőréteg

változó merevségi modulusának hatására, a Miner-hipotézissel összegezve, a tönkremenetelt okozzák.

A **8.4–8.7. ábrákon** nyomon követhető a korábban megvizsgált négyféle anyag – mint kötőréteg – beépítését feltételezve a két módszerrel számított megengedett tengelyáthaladási szám:

- A piros színű oszlop nagysága azt mutatja, hogy ha a merevség csökkenésének figyelembevétele nélkül, csak a kezdeti merevségből számított szélső szál megnyúlásból számítjuk az élettartamot a Wöhler-görbe segítségével;
- A zöld színű oszlop azt a – mindenképpen kisebb – élettartam ismétlési számot jelenti, amelyben figyelembe vettük a merevség csökkenését a forgalmi terhelés hatására, így a nagyobb szélső szál megnyúlások kisebb élettartam ismétlési számot eredményeznek.

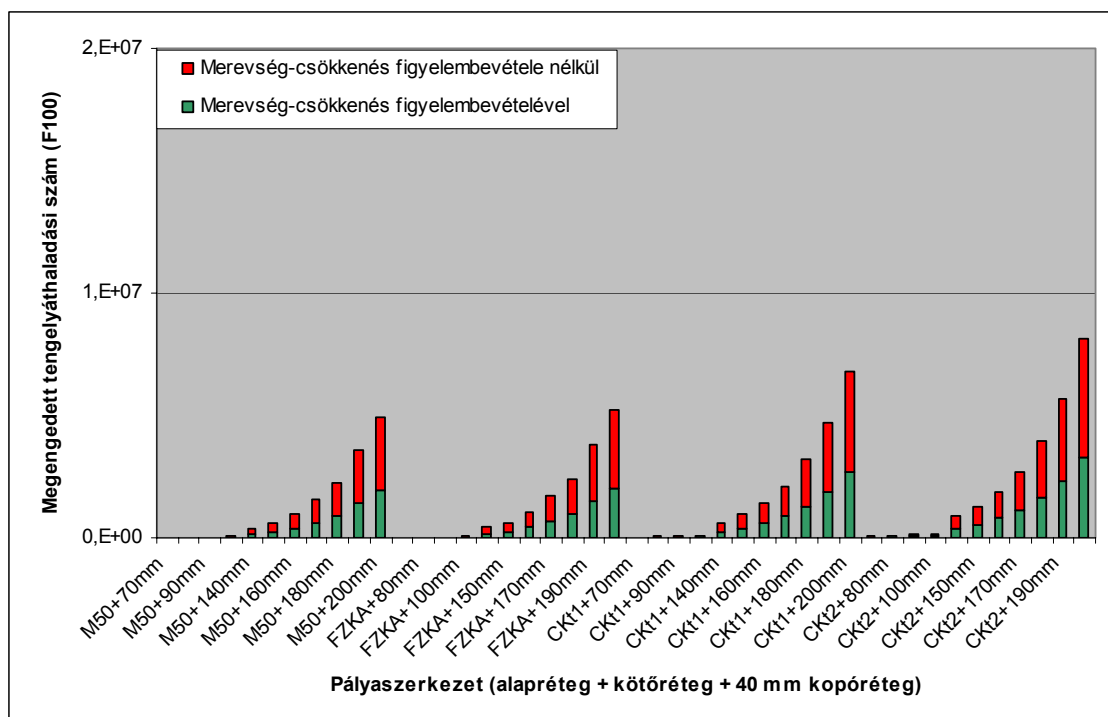
Az ábrákon négyféle alapréteg (M56, FZKA, CKt-150mm [jele az ábrákon CKt1], CKt-200mm [jele az ábrákon CKt2]) és 11 féle kötőréteg-vastagság (70, 80, 90, 100, 140, 150, 160, 170, 180, 190 és 200 mm) által felépített pályaszerkezetet számítottam végig, hasonlóan a **6. fejezethez**. Megjegyzendő, hogy a grafikonok y tengelyének léptéke eltérő, így közvetlenül nem összehasonlíthatóak. Ennek oka, hogy a fáradási élettartamhoz tartozó tengelyáthaladási számok nagyságrendekkel eltérnek, így azonos y tengely lépték esetén a grafikonok nem értelmezhetők.

A **8.2. táblázatban** található a merevség-csökkenés hatása miatti élettartam-csökkenés %-ban. Látható, hogy a modifikált bitumennel készült anyagoknál jóval többet számít e hatás figyelembe vétele, mint a hagyományos bitumennel készült keverékek esetében. A **8.8. ábrán** feltüntettük a Wöhler-görbe hajlása és az élettartam-változás %-a közötti összefüggést. Az ábra azt mutatja, hogy a két mennyiség között jó korrelációval lineáris kapcsolat mutatható ki. Ennek oka, hogy a laposabb hajlású Wöhler-görbével rendelkező anyagok – élettartam szempontjából – sokkal érzékenyebbek a terhelési szint (microstrain) változására, mint a meredek hajlású Wöhler-görbével rendelkezők. Márpedig a merevség csökkenése a pályaszerkezetben a szélső szál megnyúlásának növekedését hozza magával. Az ábra alapján az élettartam-csökkentő hatás a Wöhler-görbe ismeretében becsülhető.

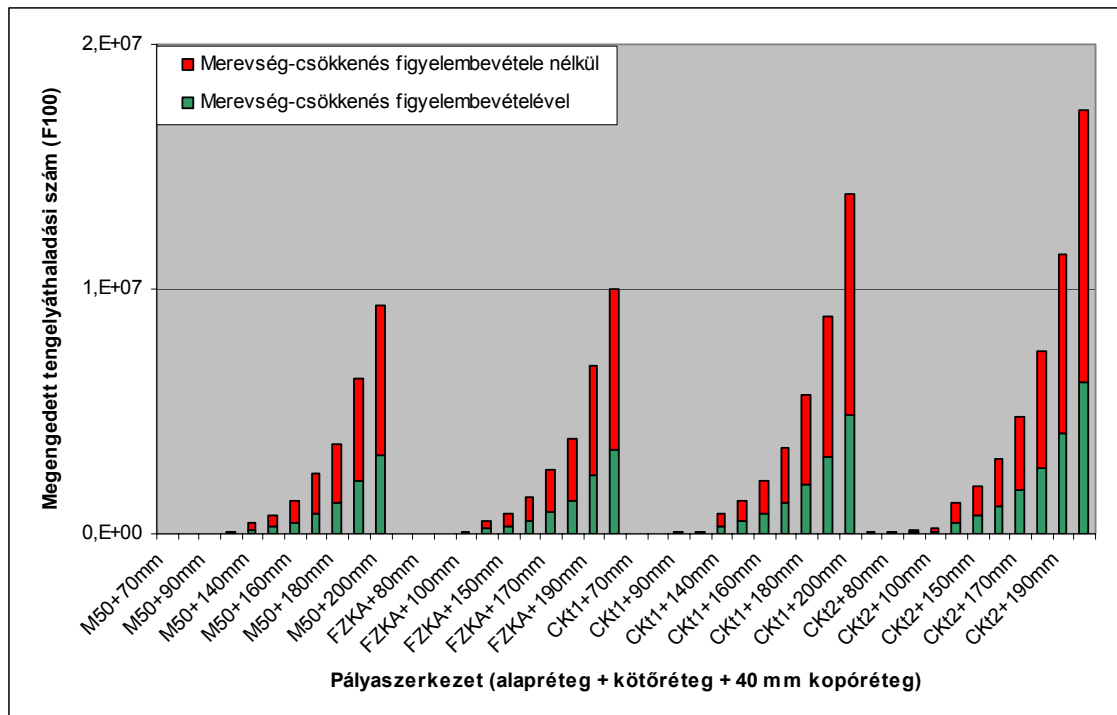
A **8.9. ábrán** látható a merevség csökkenésének lefolyása, amely leginkább egy másodfokú parabola függvénnyel közelíthető, 0,90 feletti korrelációval.

8.2. táblázat A merevség csökkenése miatti élettartam-csökkenés

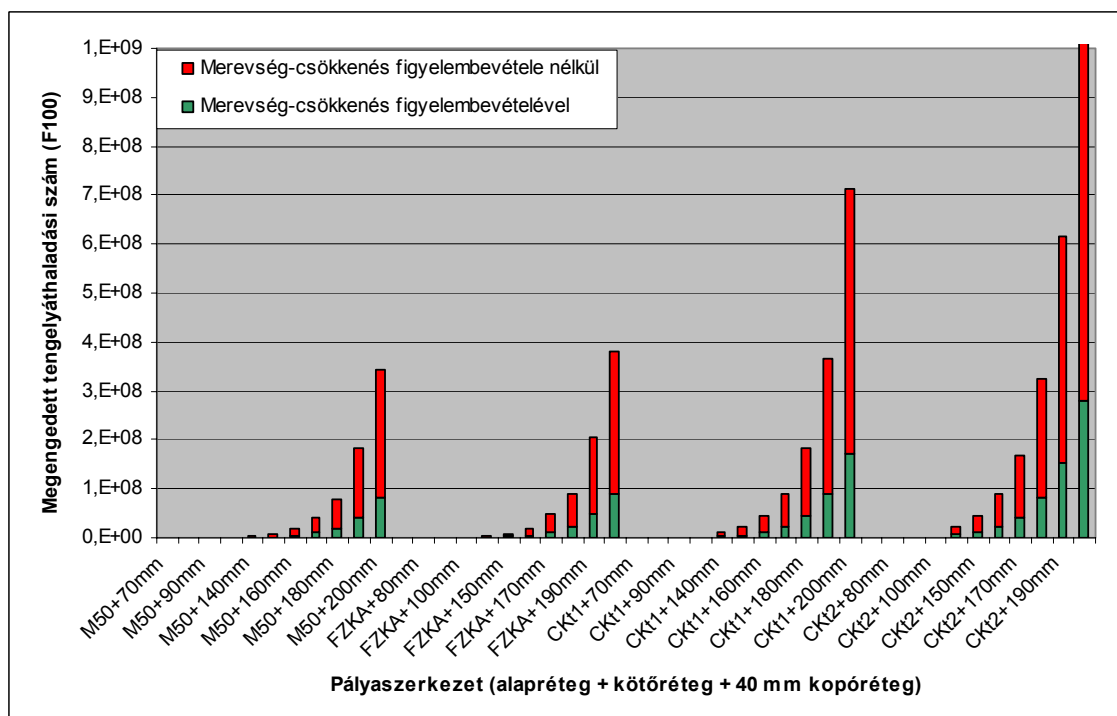
Aszfaltanyag jele és típusa	56B-DD (K-20/F)	56B-BD (K-20/F)	H61-GB (mK-20/NM)	H61-GC (mK-20/F)
Az élettartam az eredetileg számított élettartam %-ában [átlag]	42%	47%	26%	25%
Az élettartam az eredetileg számított élettartam %-ában [max]	49%	44%	31%	31%
Az élettartam az eredetileg számított élettartam %-ában [min]	39%	34%	23%	23%



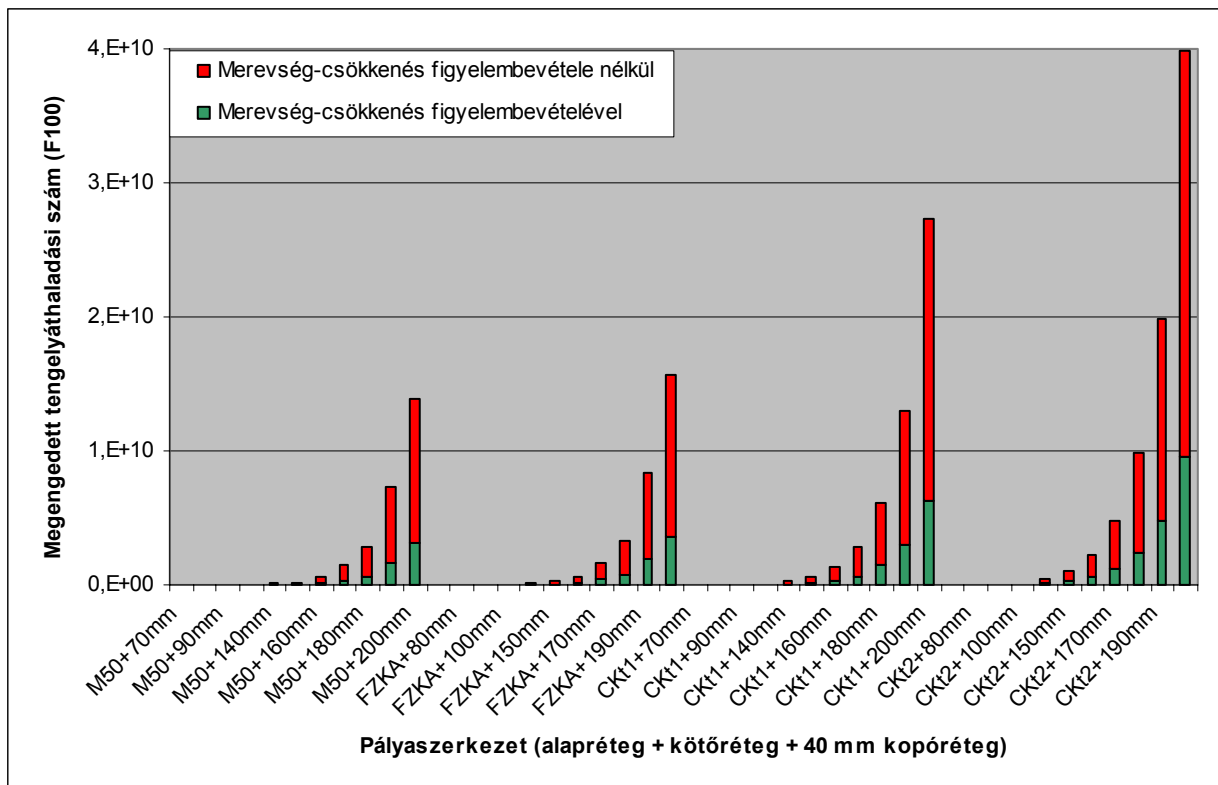
8.4. ábra Megengedett tengelyáthaladási számok 56B-DD (K-20/F) jelű kötőréteg alkalmazásával



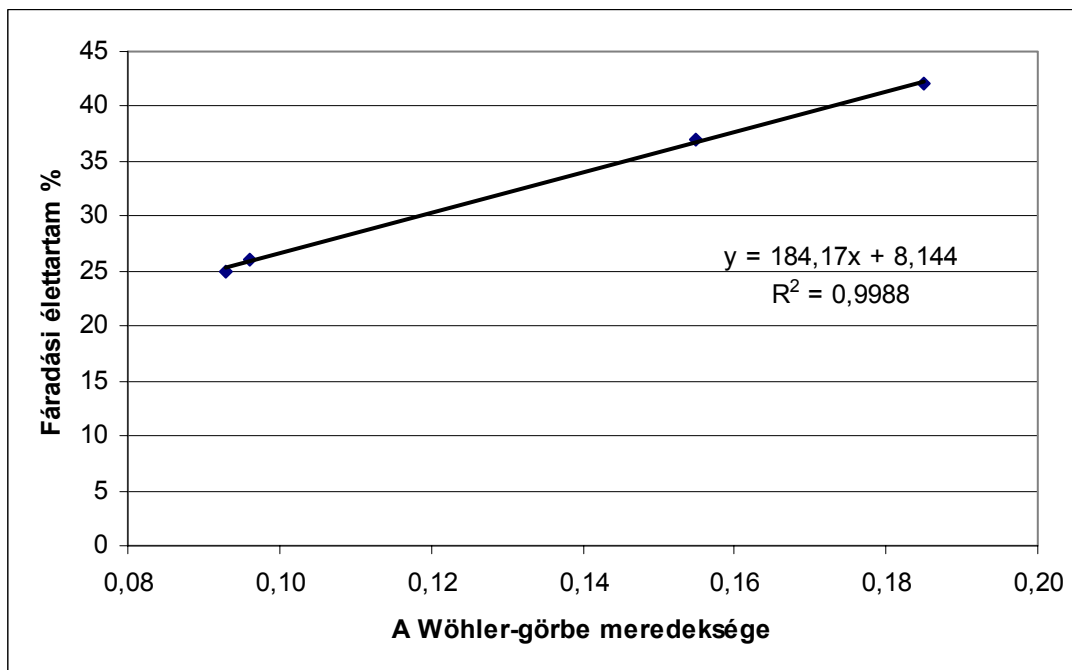
8.5. ábra Megengedett tengelyáthaladási számok 56B-BD (K-20/F) jelű kötőréteg alkalmazásával



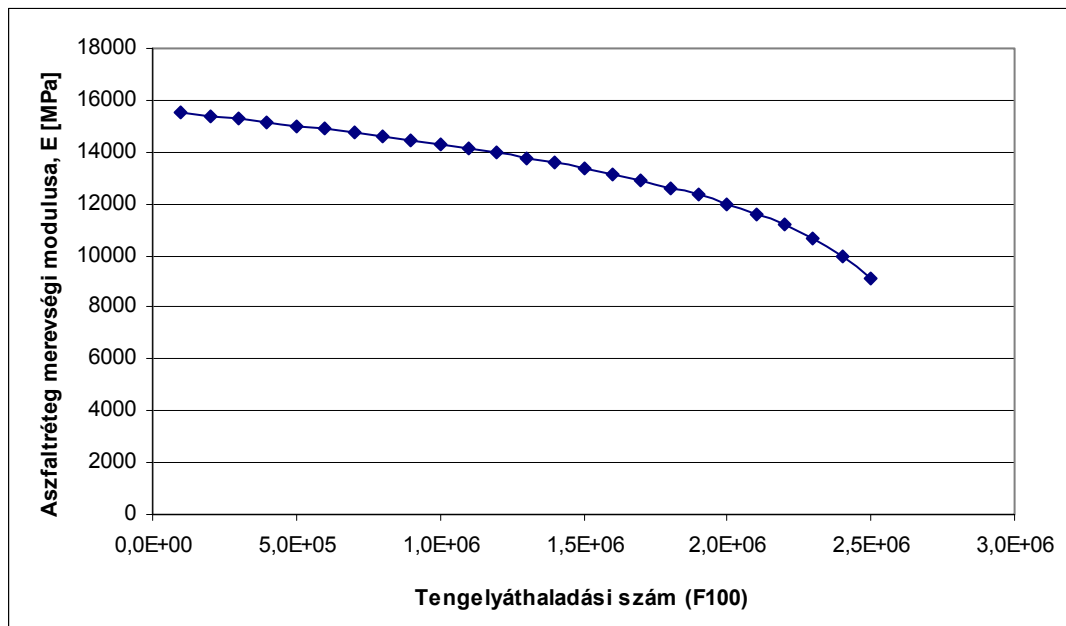
8.6. ábra Megengedett tengelyáthaladási számok H61-GB (mK-22/NM) jelű kötőréteg alkalmazásával



8.7. ábra Megengedett tengelyáthaladási számok H61-GC (mK-22/F) jelű kötőréteg alkalmazásával



8.8. ábra A Wöhler-görbe meredeksége és a merevség-csökkenés miatti élettartam összefüggése



8.9. ábra A merevség változása a tengelyáthaladási szám függvényében

8.4. ÖSSZEFOGLALÁS, TÉZISEK

6. tézis: A pályaszerkezet fáradása során fellépő merevség-csökkenés visszahat a pályaszerkezetben kialakuló igénybevételekre. A pályaszerkezet számított élettartama a Miner-hipotézis szerint, a pillanatnyi merevség-értékekből számított igénybevételekből adódó rész-fáradások összegzésével alakul. A Wöhler-görbe meredekségének ismeretében a hatás élettartam-csökkentő hatása jól becsülhető:

$$N = \left(\frac{\varepsilon}{a} \right)^{1/b} \cdot (-1,8417b + 0,08144)$$

9. ÖSSZEFOGLALÁS

9.1. ÖSSZEGZÉS

Jelen dolgozatban a hajlékony pályaszerkezetek periodikusan ismétlődő forgalmi terhelés hatására létrejövő fárasztó hatásaival foglalkoztam. A fárasztó terhelés hatására az aszfalt pályaszerkezetet alkotó rétegek merevségi modulusa csökken, majd a burkolat egy idő után – fáradás szempontjából – tönkrementnek tekinthető. Természetesen léteznek más tönkremeneteli formák is, ezekkel jelen disszertációban nem foglalkoztam.

A dolgozat első részében a mechanikai méretezés két bemenő adatával, a merevségi modulus és a fáradási görbe meghatározásával foglalkoztam.

A dolgozat második, fő része az előzőekben meghatározott paraméterek és a mechanikai méretezési eljárás közötti kapcsolatot tárgyalja. Ennek kidolgozásához típus-pályaszerkezeti modelleket állítottam fel (ÚT 2-1.202:2006 jelű Útügyi Műszaki Előírás), amelyben vizsgáltam az egyes pályaszerkezeti rétegek merevségi modulus-változásának hatását a pályaszerkezeti igénybevételekre. Kimutatható, hogy mely rétegek mely tulajdonságai okozzák leginkább a fáradási tönkremenetelt. Ezután bizonyos aszfaltanyagok kísérleti úton meghatározott merevségi modulusa és fáradási (Wöhler-) görbéje alapján meghatároztam a megengedhető élettartam-ismétlési számokat, összehasonlítva a jelenleg érvényes magyarországi szabályozással. A vizsgálat kimutatta, hogy az eltérő aszfaltanyagok eltérő mechanikai tulajdonságai nagy mértékben befolyásolják a fáradási élettartamot, amit a vonatkozó előírás nem vesz figyelembe.

Ahhoz, hogy a konkrét, mért mechanikai tulajdonságok és a hajlékony pályaszerkezetek összes vastagsági összerendelhetők legyenek, újabb, általános pályaszerkezeti modelleket állítottam fel, amelyek nem követik az előírás típus-pályaszerkezeteit, hanem az alsó aszfaltrétegek merevségi modulusa és vastagsága is lépcsőzetesen változik. Így – a felállított modellek közötti interpolációval – bármely aszfaltkeverék mért merevségi modulusa és fáradási görbéje alapján kiszámítható a fáradási szempontból szükséges aszfaltvastagság.

Vizsgáltam továbbá a pályaszerkezet fáradásra legjobban igénybevett teherhordó rétegében, a legalsó aszfaltrétegben a merevség időbeni változását (csökkenését), amely visszahat a pályaszerkezetben kialakuló igénybevételekre (növeli azokat). A vizsgálatok kimutatták, hogy a fáradási élettartam e hatás miatti csökkenése akár 50-75%-os is lehet, a Wöhler-görbe meredekségétől függően, azonban ez nagyságrendileg elmarad egy jó mechanikai paraméterekkel rendelkező aszfaltanyag fáradási élettartam-tartalékától.

9.2. GYAKORLATI FELHASZNÁLÁSI LEHETŐSÉGEK

A disszertációban elemzett fáradási méretezési megoldások közelebb hozzák az aszfaltanyagok laboratóriumi vizsgálati eredményeit az elméleti méretezési módszerekhez. Az egyes aszfaltrétegek mechanikai tulajdonságait célirányosan a pályaszerkezetben elfoglalt helye szerint állíthatjuk be. Itt jegyzendő meg, hogy pl. az útépítésben sokáig elterjedt JU alaprétegek fáradási tulajdonságai nem kimondottan jók, mégis legalsó aszfaltréteggént alkalmazzák azokat. A disszertációm azonban kimutatta, hogy az alsó aszfaltrétegnek van a legnagyobb szerepe a fáradás során, így célszerű a legkedvezőbb mechanikai paraméterekkel rendelkező aszfaltanyagot legalsó aszfaltréteggént építeni.

Természetesen egyéb hatások (pl. plasztikus alakváltozás, repedés áttükröződés) figyelembevételével hosszabb élettartamú pályaszerkezetek tervezhetők, esetlegesen anélkül, hogy a pályaszerkezet vastagságát jelentősen emelnénk. Pethő (2008) doktori disszertációjában egy más megközelítésben, a hőmérsékleti oldalról vizsgálta a pályaszerkezetek élettartamát. Az értekezés módszert ad a fáradás jelenségének hőmérsékletfüggő elemzésére, azonban a módszeréhez az előrebecslő képletekkel meghatározott fáradási görbéket alkalmazza. A hőmérsékleti hatás és az aszfaltanyagok valós fáradási görbéinek ötvözésével a pályaszerkezet fáradási szempontból történő vastagság-meghatározásában előrelépés történhet.

9.3. TOVÁBBI KUTATÁSI TÉMÁK

A disszertációban az aszfaltanyagok fáradási görbéjének előállításához 4 pontos fásztó berendezés által szolgáltatott adatokat használtam. A fáradási görbe meghatározásának másik, elterjedt módszere a két pontos hajlító-fásztó vizsgálat trapezoid próbatesteken, amelynél magasabb frekvenciát alkalmaznak. Érdemes lenne összehasonlítani azonos aszfaltanyagokon a kétféle vizsgálati módszert, illetve a kétféle Wöhler-görbét, majd a disszertációban ismertetettek alapján a fásztóvizsgálat eredményeinek hatását a pályaszerkezet fáradási méretezésére. A vizsgálati módszer eltérő megválasztása általában eltérő eredményt ad, de ebből a kísérletből megtudható, hogy az eltérő eredmények – mint a méretezés bemenő adatai – mennyiben befolyásolják a méretezést.

Hazánkban az új építésű utak mellett nagy szerepet kap az elhasználódott útvagyon megerősítése, újjáépítése. Ebben nagy szerepet kap, hogy a régi pályaszerkezet egyes rétegei a megerősítés után mennyire tudják betölteni a feladatukat, csakúgy, mint az új és a régi aszfaltrétegek együttdolgozása. További kutatási téma lehet a disszertációban említett módszerek kiterjesztése meglévő pályaszerkezetek megerősítésére.

9.4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK, TÉZISEK

Az alábbiakban ismertetem a mérési eredmények feldolgozása és a pályaszerkezeti modellek analízise során kimunkált téziseimet.

1. tézis: Nagy számú aszfaltkeverékből készült próbatestek IT-CY merevségi vizsgálatának elvégzése alapján megállapítható, hogy a Verstraeten által kidolgozott előrebecslő képlet a jelenleg gyártott aszfaltanyagokon is – a modifikált bitumenekkel készült kopórétegkeverékek kivételével – jól becsüli előre az aszfaltkeverék összetétele alapján a merevségi moduluszt, azaz az előzetes tervezéshez jól használható [4]

2.1. tézis: Az aszfalt próbatestek négyponos hajlító-fárasztó vizsgálata során a próbatest viselkedését nem csak a kezdeti merevség 50%-ához tartozó ciklusszám, hanem a ciklusszám–merevségi modulus görbére illesztett egyenes meredeksége is meghatározza [2].

2.2. tézis: A ciklusszám – merevségi modulus görbe két elkülöníthető szakaszból áll: a kezdeti merevség 80%-áig tartó konkáv, a kezdeti merevség 80%-ától a tönkremenetelig egy közel lineáris szakaszból. A lineáris szakaszra illesztett regressziós egyenes korrelációs együtthatója az esetek nagy részében $R^2 > 0,9$. [2]

2.3. tézis: A hajlító-fárasztó vizsgálat lefolytatása során a regressziós egyenesek egyenletéből számított, tönkremenetelhez tartozó ciklusszám jól becsülhető akkor is, ha a próbatestet nem fárasztjuk el a tönkremeneteli kritériumig ($N_{50\%}$), hanem csak a kezdeti merevség 60%-áig. ($N_{60\%}$). Amennyiben a fárasztást csak a kezdeti merevség 60%-áig végezzük el, úgy a laboratóriumi vizsgálat (kb. 2-3 hét) időigényének kb. 25%-a (kb. 0,5-1 hét) megtakarítható. [2]

3.1. tézis: A típus pályaszerkezetek kopórétegeiben csak akkor lép fel jelentősebb szélső szál megnyúlás, amennyiben az aszfaltrétegek között teljes elcsúszás tapasztalható, amely a gyakorlatban csak extrém esetekben fordulhat elő. [1]

3.2. tézis: A típus pályaszerkezetek alsó aszfaltszálának megnyúlását a kopórétegek merevségi modulusa kevéssé, a kötőrétegek merevségi modulusa azonban jelentősen befolyásolja. Az alsó szélső szál megnyúlása a kötőrétegek merevségi modulusának függvényében – jó korrelációs együtthatóval ($R^2 > 0,99$) – hatvány függvény szerint csökken. [1]

3.3. tézis: Az aszfaltrétegek közötti elcsúszás és az alsó aszfaltréteg szélső szál megnyúlása által meghatározott függvényre jó korrelációval ($R^2 > 0,99$) egy negyedfokú parabola illeszthető. A rétegek közötti elcsúszás 50%-os értéke felett az alsó aszfaltszálban keletkező igénybevételek rohamosan növekednek, így a pályaszerkezet fáradási élettartama

jelentősen csökkenhet. A számítások szerint a teljes elcsúszás esete a teljes együttdolgozáshoz képest 70-80%-os, a félig együttdolgozás esetéhez képest pedig 55-65%-os megnyúlás-növekedést okoz az aszfalt alsó szélső szálában. A számításban a rétegek közötti elcsúszás csupán az aszfaltrétegek között változott, a legalsó aszfaltréteg és az alapréteg között minden esetben teljes elcsúszást vettem figyelembe [1].

4. tézis: Az alsó aszfaltrétegekben használatos aszfaltkeverékek laboratóriumban mért merevségi modulusa és Wöhler-görbéje együttesen nagymértékben befolyásolja a pályaszerkezet fáradási élettartamát. A kezdeti merevség növekedése elsősorban a kisebb tengelyáthaladási számoknál, a Wöhler-görbe hajlása pedig elsősorban a nagyobb tengelyáthaladási számoknál jelent előnyt a pályaszerkezet vastagságának meghatározásakor [3].

5. tézis: A pályaszerkezet szükséges vastagsága (v) és a megengedett tengelyáthaladási szám (TF) között exponenciális kapcsolatot állapítottam meg, amennyiben az egyéb paraméterek változatlanok. Az exponenciális kapcsolatot leíró $TF = a \cdot e^{b \cdot v}$ görbe a , b paramétereinek ismeretében megállapítható az adott aszfaltanyag alkalmazása esetén a kötőréteg+felső alapréteg együttes rétegvastagsága [3].

6. tézis: A pályaszerkezet fáradása során fellépő merevség-csökkenés visszahat a pályaszerkezetben kialakuló igénybevételekre. A pályaszerkezet számított élettartama a Miner-hipotézis szerint, a pillanatnyi merevség-értékekből számított igénybevételekből adódó rész-fáradások összegzésével alakul. A Wöhler-görbe meredekségének ismeretében a hatás élettartam-csökkentő hatása jól becsülhető [3]:

$$N = \left(\frac{\varepsilon}{a} \right)^{1/b} \cdot (-1,8417b) + 0,08144$$

A tézisekhez kapcsolódó saját publikációk

- [1] Bocz, P. (2009), „*The Effect of Stiffness and Duration Parameters to the Service Life of the Pavement Structure*”, Periodica Polytechnica Ser. Civil Engineering 53/1. pp 35-41.
- [2] Bocz, P. (2009), „*Pre-Assumption of Final Results of the Asphalt Four-Point Flexing-Beam Fatigue Test*”, Acta Technica Jaurinensis (közlésre elfogadva 2009.04.15)
- [3] Bocz, P.– Pethő, L. (2009): „*Pályaszerkezetek fáradási élettartamának meghatározása aszfaltanyagok laboratóriumi vizsgálata alapján*” Közlekedésépítési Szemle (felelős szerkesztő által elfogadva)
- [4] Bocz, P. – Pethő L. (2009):: „*Aszfalt próbatestek merevségi modulusának meghatározása*” Mélyépítő Tükörkép Magazin 2009/3.; (főszerkesztő által elfogadva)

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Albert. W.A. (1838): Über Treiseile am Harz. Archiv für Mineralogie, Geognostic, Bergbau und Hüttenkunde. Vol.10, pp. 215-234
- [2] Ambrus K. – Karsainé L. K. – Pallós I. – Vinczéné Görgényi Á. (2003): "Lehetséges pályaszerkezeti változatok a rendkívül nehéz forgalmi terhelésű útszakaszok hosszú életciklusú pályaszerkezeteire a nemzetközi gyakorlat tükrében", Közúti és Mélyépítési Szemle, 53/12
- [3] Ambrus K.- Bartha G. (1999): „Tömör emlékeztető néhány aktuális aszfaltmechanikai fogalomra és eljárásra.” Közúti és Mélyépítési Szemle, XLIX.évf. 7-8.szám pp.301-309.
- [4] Ambrus K.- Pallós I. (1999): „Az aszfaltok dinamikus hajlítási fárasztó vizsgálatainak hazai tapasztalatai, összefüggésben a külföldi vizsgálatokkal”, Közúti és Mélyépítési Szemle, 49/7-8 pp.310-319.
- [5] Arand, W., (2007): „Az aszfalt fáradása alacsony hőmérsékleten”, Közúti és mélyépítési szemle, 57/7
- [6] Barker, W.R., Brabston, W.N., and Chou, Y.T. (1977): "A General System for the Structural Design of Flexible Pavements", Proceedings of the Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor pp.209-248
- [7] BME Út és Vasútépítési Tanszék – Közlekedéstudományi Intézet (2007): „Új pályaszerkezetek és burkolat-megerősítések méretezése a típus pályaszerkezetek szilárdsági tulajdonságai és a reálisan várható élettartamok alapján”, Kutatási jelentés, Budapest. 2007 december
- [8] Bocz P. (2006): „Aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. Próbatesteken végzett négyponos vizsgálatok eredményei”, Mélyépítő Tükörkép Magazin, 2006/5
- [9] Bonnaure, F.P., Huibers, A.H.J.J., Boonders, A. (1982): „A Laboratory Investigation, of the Influence of Rest Periods on The Fatigue Characteristics of Bituminous Mixes”, Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 51, pp.104-128
- [10] Brown, S.F., Brunton, J.M., Pell, P.S. (1982): „The Development and Implementation of Analytical Pavement Design for British Conditions”, Delft University of Technology, The Netherlands, August 23-26
- [11] Brunton, J.M., Brown, S.F., Pell, P.S. (1987): „Developments to the Nottingham Analytical Design Method for Asphalt Pavements”, Proceedings of the Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor
- [12] Claussen, A.I.M., Edwards, J.M., Sommer, P., Ugé. P. (1977): "Asphalt Pavement Design. The Shell Method", Proceedings of the Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. I, Ann Arbor, pp.39-74
- [13] Fairhurst, C.E., Kosla, N.P., Kim, Y.R. (1990): Resilient Modulus Testing of Asphalt Specimens in Accordance with ASTM D4123-82, Mechanical Tests for Bituminous Mixes, Proceedings of the 4th. International RILEM Symposium, pp.402-418
- [14] Fi I. (2007): "Helyzetkép és aktuális kutatási feladatok az útpályaszerkezetek tervezése, méretezése és a mérési módszerek témakörében", Közúti és Mélyépítési Szemle, 56.évf. 10.szám

- [16] Gáspár L. (1988): "Az útpályaszerkezet-erősítések várható élettartama", Közlekedéstudományi Szemle, 36.évf. 3-4.szám pp.117-127
- [17] Gáspár L. (1999), Munkabizottsági Tag: "COST 333 Development of New Bituminous Pavement Design Method. Final Report of the Action", In: European Commission Directorate General Transport. Bratislava, 1999. pp. 1-373.
- [18] Gáspár L. (2001): "A korszerű pályaszerkezet-tervezési modellek összehasonlítására irányuló nemzetközi AMADEUS-projekt egyes eredményei", Közúti és Mélyépítési Szemle 50.évf. 2.szám pp.45-51
- [19] Gáspár L. (2003): „A PIARC C7/8 "Útburkolatok" Műszaki Bizottsága” Közúti és Mélyépítési Szemle 53.évf. 10.szám pp.17-21
- [20] Gáspár L. (2004a): "Útburkolatok élettartama", Közúti és Mélyépítési Szemle, 54. évf. 8. szám pp. 2-6
- [21] Gáspár L. (2004b): „Az útburkolatok teljesítőképessége", Közúti és Mélyépítési Szemle, 54.évf. 11.szám pp.7-12
- [22] Gáspár L., Károly R. (2005): "A hosszú élettartamú útburkolatokkal foglalkozó ELLPAG-bizottság tevékenysége", Közúti és Mélyépítési szemle 55.évf. 9.szám pp.28-33
- [23] Karoliny M. (2005): "Minőség - új megközelítésben : Milyen lehetőségeket ad az EU?", Közúti és Mélyépítési Szemle, XLV.évf. 3.szám
- [24] KPM (Közlekedés- és Postaügyi Minisztérium) (1971): „Hajlékony Útpályaszerkezetek Méretezési Utasítása”
- [25] Miner, M.A. (1945): "Cumulative Damage in Fatigue", The American Society of Mechanical Engineers, Vol. 67, pp.159-164, Los Angeles
- [26] Monismith, C.L., Secor, K.E. and Blackmer, E.W. (1970): „Asphalt mixture behaviour in repeated flexure”, Proceedings Association. of Asphalt Paving Technologists Vol. 39, pp.207-236
- [27] MSZ EN 12697-24:2005 jelű Európai Szabvány (2005) „Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverék vizsgálati módszerei. 24. rész: Fáradási ellenállás”
- [28] MSZ EN 12697-26:2005 jelű Európai Szabvány (2005) „Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverék vizsgálati módszerei. 26. rész: Merevség”
- [29] Nemesdy E. (1992a): „Az aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének új szabályozása Magyarországon”, Közlekedésépítés- és Mélyépítéstudományi Szemle, XLII.évf., 6.szám
- [30] Nemesdy E. (1992b): „Az új magyar típus-útpályaszerkezetek mechanikai méretezésének háttere”, Közlekedésépítés- és Mélyépítéstudományi Szemle, XLII. évf., 8.szám
- [31] Nunn, M.E. (1996): "The Characterisation of Bituminous Macadams by Indirect Tensile Stiffness Modulus", TRL Report 160
- [32] Pallós I. - Nemesdy E. (1999): "A nagy modulusú aszfaltok főbb jellemzői és szerepük a korszerű útpályaszerkezetek kialakításában Európában", Közúti és Mélyépítési Szemle, XLIX. évf. 9. szám
- [33] Pell, P. S., Brown, S. F. (1972): „The Characteristics of Materials for the Design of Flexible Pavement Structures” Proceedings of the Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London

- [34] Pell, P.S. (1962): "Fatigue characteristics of bitumen and bituminous mixes.", Proceedings of the 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, 1962, pp. 310-323.
- [35] Pethő, L. (2008): A hőmérséklet eloszlás alakulása az aszfalt burkolatú útpályaszerkezetekben és ennek hatása a pályaszerkezeti rétegek fáradási méretezésére, technológiai tervezésére. PhD értekezés, Budapest
- [36] Quintus, H.L., Rauhut, J.B., Kennedy, T.W. (1982): "Comparisons of Asphalt Concrete Stiffness as Measured by Various Testing Techniques", Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 51, pp.35-52
- [37] Rankie, W.J.M.: On the causes of fracture of the axles of railway carriages. Min.Proc.Inst.Civ.Eng.Vol.3,Session 1843, 1842-1843.
- [38] Saal, R.N.J.; Pell, P.S. (1960): „Fatigue of Bituminous Road Mixes” Kolloidzeitschrift. pp. 61-71
- [39] Shell International Oil Product BV (1998) "BISAR 3.0 User Manual", Bitumen Business Group
- [40] Shook, J.F., Finn, F.N., Witczak, M.W., Monismith, C.L. (1982): "Thickness Design of Asphalt Pavements – The Asphalt Institute Method", Proceedings of the Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Delft, pp.17-45
- [41] Székely Z. (2005): "Nagy modulusú K-20/F NM kötőréteg és mZMA-8 vékonyaszfalt kopóréteg kifejlesztése és kísérleti beépítése", Közúti és Mélyépítési Szemle, 45/2.
- [42] Tóth L.- Rossmanith, P. (1999): "Kísérleti és numerikus feszültséganalízis. A törésmechanika és az anyagvizsgálat története", Miskolci Egyetem, egyetemi jegyzet
- [43] Török K. - Nemesdy E. - Pallós I. (1988): "Aszfaltok mechanikai vizsgálati rendszerének kialakítása a BME Útépítési Tanszék laboratóriumában", Közlekedésépítés- és Mélyépítéstudományi Szemle XXXVIII.évf. 11.szám
- [44] ÚT 2-1.202:2005 jelű Útügyi Műszaki Előírás (2005), „Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezése és megerősítése”
- [45] ÚT 2-3.301:2006 jelű Útügyi Műszaki Előírás (2006), „Útépítési aszfaltkeverékek és útpályaszerkezeti aszfaltrétegek”
- [46] Verstraeten, J. (1972): „Moduli and Critical Strains in Repeated Bending of Bituminous Mixes Application to Pavement Design”, Proceedings of the Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London, pp.729-738
- [47] Verstraeten, J., Romain, J.E., Veverka, V. (1977): "The Belgian Road Research Center's Overall Approach to Asphalt Pavement Structural Design", Proceedings of the Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, pp.298-324.
- [48] Witczak, M.W. (1978): "Development of Regression Model for Asphalt Concrete Modulus for Use in MS-1 Study", January 1978
- [49] Wöhler, A. (1866): "Resultate der in der Central-Werkstatt der Niederschlesisch-Märkischen Eisenbahn zu Frankfurt a.d.O. angestellten Versuche über die relative Festigkeit von Eisen, Stahl und Kupfer", Zeitschrift für Bauwesen, Vol. XVI. pp.67-84.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném köszönetemet mindazoknak, akik segítettek a disszertáció elkészítésében. Köszönetemet szeretném kifejezni témavezetőmnek, Dr. Fi István tanszékvezető egyetemi tanár úrnak, hogy mindvégig személyesen és szakmailag is támogatott és segítette munkámat. Köszönetemet szeretném kifejezni Dr. Pethő László egyetemi adjunktus kollegának, hogy hasznos tanácsokkal segítette a munkámat. Köszönet illeti a laboratórium technikus dolgozóit, Hudák Ágnes, Laufer Anikó és Páles Róbert kollegákat a laboratóriumi mérések végrehajtásáért.