



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar**

Aszfalt pályaszerkezeti rácsok viselkedése

Ph.D. értekezés

**Almássy Kornél
okl. építőmérnök, MBA**

**Témavezető
Dr. Fi István, egyetemi tanár
tanszékvezető, az MTA doktora**

Budapest, 2010. október 20.

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Út és Vasútépítési Tanszék
Budapest, 2010**

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	7
1.1. A disszertáció célja	9
1.2. A disszertáció felépítése	10
2. Fogalom meghatározás, alkalmazási célok, alapvető műszaki jellemzők	12
2.1. Fogalmi kérdések	12
2.2. Alkalmazási területek	14
2.3. Aszfaltrácsok műszaki jellemzői.....	15
2.3.1. E rugalmassági, merevségi modulus, mint méretezéshez szükséges jellemző. 17	17
3. Nemzetközi példák, tapasztalatok az aszfaltrácsok alkalmazásával kapcsolatosan 19	19
4. Próbatetest készítés és rács beépítés	26
5. A háló/rács együttdolgozása az aszfaltrétegekkel	29
5.1. Feltépés vizsgálat	29
5.1.1. A mérési eljárás ismertetése	29
5.1.2. Feltépés vizsgálat aszfaltrács beépítésével készült próbatesteken.....	31
5.1.3. Feltépés vizsgálati eredmények összefoglalása	33
5.2. Rétegek közötti elcsúszás vizsgálata.....	34
5.2.1. Mérési eljárás ismertetése	34
5.2.2. Elcsúszás vizsgálat aszfaltrács beépítésével készült próbatesteken	37
5.3. Leutner-féle nyírásvizsgálatok	39
5.3.1. Vizsgálat elve, nemzetközi példák	39
5.3.2. Leutner vizsgálat rácsbetéttel készült K-22-es aszfaltréteg esetében	41
5.3.3. Keréknyomvályú vizsgálat elvégzése után végzett Leutner-féle nyírásvizsgálat	43
5.4. Az együttdolgozás kérdésének értékelése	44
6. Rácserosítás hatása a keréknyomvályú képződésre	47
6.1. Aszfaltok meleg-alakváltozásának laboratóriumi vizsgálatai	47
6.2. Keréknyomvályú-képződés vizsgálat elvi alapjai	48
6.3. Nemzetközi példák rácsbetéttel készült próbatetest keréknyomvályú képződés vizsgálatára.....	50
6.4. „Kiskerekes” keréknyomvályú-képződési vizsgálatok aszfaltrács beépítéssel készült szerkezeteken	51
6.5. További kiskerekes keréknyomvályú-képződés vizsgálat „erősebb és gyengébb” keverék összetételű próbatesteken	53
6.6. Szövethordozós és hordozóanyag nélküli rácsok nyomképződési eredményének összehasonlítása	57
6.7. Keréknyomvályú képződési vizsgálat nagykerekes berendezéssel.....	58
6.8. A keréknyomvályú képződési vizsgálatok összefoglaló értékelése.....	58
7. Rácserosítás hatása az aszfaltburkolat élettartamára	60
7.1.1. A mechanikai méretezés alapjai és előnyei	60
7.1.2. Az igénybevételek meghatározása.....	60
7.1.3. A méretezéshez szükséges anyagtulajdonságok meghatározása	60
7.1.4. A határ igénybevételek meghatározása	61
7.1.5. A mértékadó és határ igénybevételek összehasonlítása.....	61
7.1.6. Fárasztási vizsgálatok az MSZ EN 12697-24:2005 szerint.....	61
7.2. Alakváltozás vezérelt 4 pontos hajlító vizsgálat rácserosítású próbatesteken	63
7.2.1. Próbatestek készítése 4 pontos hajlító vizsgálatához	63

7.2.2.	Az elmozdulás vezérelt vizsgálatok eredménye, a fáradási görbe	66
7.3.	Négy pontos hajlítás erővezérelt módszerrel	69
7.4.	Hajlító-fárasztó vizsgálati hazai és külföldi kutatási eredmények	72
7.4.1.	Hollandiai fárasztó vizsgálatok tapasztalatai rácsbeépítéssel készült próbatesteken	72
7.4.2.	Fárasztó vizsgálat végeelem modellezése	73
7.5.	Négy pontos hajlító- fárasztóvizsgálat nagygerendán	74
7.6.	A hajlítási eredmények összehasonlítása	75
8.	Rácsbetéttel erősített aszfalt próbatestek mestergörbájének meghatározása	77
8.1.	Elvi alapok	77
8.2.	Rács erősítésű próbatestek mestergörbéje	80
9.	Erősítő anyagokkal ellátott aszfaltszerkezetek hidegviselkedése	83
9.1.	Rács erősítés hidegviselkedési vizsgálata a nemzetközi gyakorlatban	83
9.1.	Hidegviselkedési vizsgálat elvi alapjai	84
9.1.1.	Példa a termikus repedések forgalmi terhelés nélküli létrejöttére	85
9.2.	Aszfalt repedési hőmérsékletének meghatározása (ARH vizsgálat)	87
9.2.1.	ARH vizsgálat S&P és Roadtex típusú rácsokon mAB-12/ keverék alkalmazásával	89
9.2.2.	ARH vizsgálat Geogrid típusú rácsokon AB-11/F keverék alkalmazásával	92
9.3.	Tiszta húzás vizsgálat	93
9.4.	Hidegviselkedési vizsgálatok értékelése	95
II. rész	Aszfaltrácsok viselkedésének számítógépes modellezése	97
10.	Pályaszerkezeti behajlások számítása a Shell-BISAR számítógépes programmal ..	97
10.1.	BISAR program működési elve	97
10.2.	BISAR számítások rács erősítésű pályaszerkezeti modelleken	99
10.2.1.	A modell felépítése	100
10.2.2.	A BISAR futtatások eredményének értékelése	105
11.	Végelem számítások az aszfalterősítő ráccsal egyenértékű aszfaltvastagság meghatározására	108
11.1.	Végelem vizsgálatok célja, európai használata a rács erősítés vizsgálatánál	108
11.2.	Az alkalmazott végelem modell ismertetése	109
11.2.1.	Geometria	109
11.2.2.	Alkalmazott végelem típusok	110
11.2.3.	Anyagmodell	111
11.2.4.	Megtámasztási viszonyok	112
11.2.5.	Terhek	112
11.2.6.	Analízis	112
11.3.	Az erősítő aszfaltráccsal egyenértékű aszfaltvastagság meghatározása	112
11.4.	Az eredmények értékelése	114
11.4.1.	Végelem számítások 20%-kal nagyobb kezdeti aszfalt merevségi modulus esetén	116
12.	Rácsbeépítéssel készült útszakaszok helyszíni szemrevételezése	118
12.1.	Jelentősebb rácsbeépítések Magyarországon	118
12.2.	Helyszíni szemrevételezés eredményei	119
12.3.	Megéri rács erősítést alkalmazni?	123
12.4.	A helyszíni szemrevételezés összegzése	124
13.	Összefoglaló megállapítások	125
13.1.	További kutatási lehetőségek, gyakorlati javaslatok	125
14.	Az értekezés tudományos eredményei, tézisek	126
15.	Irodalomjegyzék	139

Ábrajegyzék

2.1. ábra: A Tensar AR-G típusú rács lyukmérete	15
3.1. ábra: A Texas Transportation Institute által kifejlesztett repedésgátlás megfigyelésére alkalmas berendezés	21
3.2. ábra: Acélrács alkalmazása a kötőanyag nélküli alapréteg alján	23
5.1. ábra: A feltépő fej sematikus ábrája	30
5.2. ábra: Feltépő vizsgálatok eredményének összefoglalása	33
5.3. ábra: Az elcsúszás vizsgálatához alkalmazott fej.....	36
5.4. ábra: Nyíróerő – nyírási út diagram.....	40
5.5. ábra: Leutner-féle hasító (nyíró) vizsgálat rácserősítéssel készült K-22-es aszfalt próbatesteken.....	42
5.6. ábra: Leutner-féle vizsgálat eredményei a nagykeres keréknyomvályú képződési vizsgálat után.....	44
5.7. ábra: Feltépés és elcsúszás vizsgálati eredmények összehasonlítása	45
5.8. ábra: A referencia próbatestektől való eltérés az egyes vizsgálatoknál	46
6.1. ábra: Keréknyomvályú-képződés vizsgálat sematikus ábrája	48
6.2. ábra: Keréknyomvályú-képződési vizsgálatok különböző típusú rácsokkal erősített próbatesteken, változó keverékfajtákkal – módosított ábra	53
6.3. ábra: Szövethordozós és hordozóanyag nélküli rácsok nyomképződési eredményének összehasonlítása	57
7.1. ábra: Az erővezérelt hajlító vizsgálatához legyártott próbatest jellegábrája.....	64
7.2. ábra: Az elmozdulás vezérelt módszerrel vizsgált fáradási egyenesek összesítése	67
7.3. ábra: Dinamikus kétirányú hajlító fárasztó vizsgálat AB-12 és AC-11 kopórétegek közé beépítve.....	70
7.4. ábra: Erővezérelt módszerrel végzett rácserősítésű próbatestek fáradási egyenesei.....	71
7.5. ábra: A 4 pontos hajlítás vizsgálatához kialakított végeelem modell.....	73
7.6. ábra: A rácserősítésű, 2cm-el vékonyabb próbatestek és az erősítés nélküli próbatestek fáradási egyenesei	74
7.7. ábra: A rácsbetéttel készült próbatestek fárasztási eredményeinek eltérése a referencia próbatesttől	75
9.1. ábra: A repedési hőmérséklet értelmezése	88
9.2. ábra: A tiszta húzás vizsgálat eredményei.....	95
9.3. ábra: Az ARH vizsgálatok eredményének összefoglalása	96
10.1. ábra: BISAR pályaszerk. modell 10.1. táblázat: Aszf. merevségi modulusok.....	100
10.2. ábra: Behajlás (u_z) a pályaszerkezet tetején, az összes modell esetén	101
10.3. ábra: Behajlások (u_z) a 100.000 MPa, 10000 MPa rácsos és rács nélküli modellenél....	102
10.4. ábra: Rácserősítésű próbatestek vízszintes elmozdulás (megnyúlás vagy összenyomódás) esetén	103
10.5. ábra: Pályaszerkezeti megnyúlások a kötőréteg alatt, a rács, különböző mélységben történő elhelyezésénél	104
10.6. ábra: Pályaszerkezeti megnyúlások a 3. aszfaltréteg alatt, a rács, különböző mélységben történő elhelyezésénél	104
11.1. ábra: Az egyenérték vastagság meghatározásához alkalmazott végeelem modell geometriája	109
11.2. ábra: Végeelem háló, megtámasztások és terhek	111
11.3. ábra: Egyenérték vastagság 20000 MPa-os rács alkalmazásnál.....	115
13.1. ábra: Feltépés és elcsúszás vizsgálati eredmények összehasonlítása	127
13.2. ábra: A referencia próbatestektől való eltérés az egyes vizsgálatoknál	128

13.3. ábra: Keréknyomvályú-képződési eredmények különbségei a rács nélküli próbatestekkel történő összehasonlításban	129
13.4. ábra: A szövetes ráccsal és hordozóanyag nélküli ráccsal készült próbatestek eredményeinek összehasonlítása	130
13.5. ábra: A rácsbetéttel készült próbatestek fárasztási eredményeinek eltérése a referencia próbatesttől	131
13.7. ábra: Az ARH vizsgálatok eredményének összefoglalása	134
13.8. ábra: A tiszta húzás vizsgálat eredményei.....	135
13.9. ábra: Rácsos erősítés hatása a pályaszerkezet behajlására	136
13.10. ábra: Pályaszerkezeti megnyúlások a kötőréteg alatt, a rács különböző mélységben történő elhelyezésénél	137
13.11. ábra: Egyenérték vastagság 20000 MPa-os rács alkalmazásánál.....	138

Képijegyzék

1.1. kép: Extrém példa, amikor az aszfaltrács beépítése miatt ennyire nincs együttdolgozás a rétegek között	8
2.1. kép: Aszfaltrács (25x25 mm)	13
2.2. kép: Aszfaltrács (12,5x12,5 mm)	13
2.3. kép: Nem szótt kompozit.....	13
2.4. kép: Szótt kompozit.....	13
2.5. kép: Acélrács	14
2.6. kép: Drótháló.....	14
5.1. kép: Leutner féle nyírófeltét	40
5.2. kép: Próbatestek a keréknyomvályú vizsgálat után.....	43
7.1. kép: Hordozóanyag nélküli rács minta.....	64
7.2. kép: Szövetes ráccsal készült minta	64
7.3. kép: Vizsgáló fej.....	66
7.4. kép: 4 pontos hajlító vizsgáló berendezés	66
7.5. kép: Szövethordozós rács a vizsgálat után	68
7.6. kép: Szövethordozós rács a vizsgálat után	68
7.7. kép: Hordozóanyag nélküli rács vizsgálata.....	68
7.8. kép: Szinte sértetlen rácsszerkezet	68
7.9. kép: Nehezen leválasztható rács (hőlégfúvással készült).....	69
7.10. kép: Nehezen leválasztható rács (hőlégfúvással készült).....	69
9.1. kép: Az ARH berendezés	88
9.2. kép: Az ARH berendezés jellegábrája.....	88
9.3. kép: Normális tönkremeneteli mód	92
9.4. kép: Normális tönkremeneteli mód	92
9.5. kép: Ragasztás mentén szétválás.....	92
9.6. kép: Ragasztás mentén szétválás.....	92
12.1. kép: Teljes sáv szélességben futó keresztirányú repedés a Rákóczi úton	120
12.2. kép: Hosszirányú repedés a Podmaniczky utcában	121
12.3. kép: Kiöntött repedések 4 éves úthasználat után a Nagykovácsi úton	122

Táblázatjegyzék

2.1. táblázat: A Tensar AR-G típusú rács lyukmérete.....	15
2.2. táblázat: A Glas Grid és Tencate Polyfelt típusú rácsok műszaki jellemzői.....	16
2.3. táblázat: Különböző anyagú rácsok elemi szálainak rugalmassági modulusa	17
4.1 táblázat: A kutatásba bevon rács típusok	28
5.1. táblázat: Feltépés vizsgálatok eredményei	31
5.2. táblázat: Elcsúszás vizsgálati eredmények AB-12 réteg közé beépített aszfaltrácsoknál.	37
5.3. táblázat: Elcsúszás vizsgálat a Viacon Kft. különböző aszfaltrácsain AC-11-es keverék közé beépítve.....	38
6.1. táblázat: A svájci EMPA által végzett keréknyomvályú-képződés vizsgálat eredményei	51
6.2. táblázat: Rácserősítéssel készült AC-11-es aszfaltkeverék keréknyomvályú-képződés vizsgálati eredményei	55
6.3. táblázat: Rácserősítéssel készült SMA-11mF-es aszfaltkeverék keréknyomvályú-képződés vizsgálati eredményei	56
6.4. táblázat: Rácserősítéssel készült AC-22/F-es aszfaltkeverék keréknyomvályú-képződés vizsgálati eredményei	56
7.1. táblázat: Referencia próbatetek eredményei	65
7.2. táblázat: Hollandiai fárasztás vizsgálat eredménye.....	72
9.1. táblázat: Az ARH vizsgálatba bevont rács típusok	90
9.2. táblázat: Az ARH vizsgálatok eredménye.....	91
11.1. táblázat: Pályaszerkezeti modellek 10 C°-on	113
11.2. táblázat: Kezdeti merevségi modulusok a rácserősítéssel készült próbateteknél	116
11.3. táblázat: A referencia modellhez képest 20% merevségi modulussal megnövelt szerkezetek egyenérték/helyettesítő vastagság értékei.....	117

1. Bevezetés

Az utóbbi években jelentős változások történtek nem csak Magyarországon, hanem világ és Európa-szerte az aszfalt pályaszerkezetek megerősítő felújításában.

Új anyagok, új technológiák jelentek meg keresve a legjobb és leginkább alkalmas megoldást az aszfaltburkolatoknál tapasztalt hibák kiküszöbölésére.

Magyarországon 1979.-ben már készültek vizsgálatok különböző műanyaghálokon és textilanyagokon, melyeket aszfaltrétegek közé építettek be, de azt követően a 90-es évek végéig, 2000-es évek elejéig, a rácsok hazai tömeges megjelenéséig nem készültek laboratóriumi kutatások a megfelelő alkalmazásuk feltérképezésére. [Török K, 1979]

Az elmúlt évtizedben, hazánkban mondhatni divatossá vált az aszfaltrácsok beépítése. Ebben az időszakban több millió m²-nyi, különböző fajtájú és minőségű aszfalthálót és rácsot építettek be az ország majdnem minden útfelújításánál, anélkül, hogy bármiféle műszaki tapasztalat vagy átfogó szabályozás a beépítés körülményeire vonatkozóan rendelkezésre állt volna.

A különböző forgalmazók minden fajta marketing eszközt bevetve hirdették, hogy az aszfalt pályaszerkezetek minden károsodási problémájára megoldást nyújtanak az aszfalterősítő hálók, rácsok. A közelmúltban azonban egyfelől gyakran regisztrálhattunk károsodást több háló, rács beépítéssel készült szakaszon, másfelől pedig, laboratóriumi vizsgálatok születtek az egyes tulajdonságok feltérképezésére.

Az aszfaltrácsokat elsősorban a hidraulikus kötőanyagú alaprétegből áttükröződő repedések áthidalására kezdték el alkalmazni, hogy meggátolják a fölötte lévő aszfaltrétegben a repedések megjelenését. A tömeges beépítés megjelenésével a különböző hálókat és rácsokat forgalmazó gyártók megerősítés céljára is elkezdtek javasolni a termékeiket, azt sugallva, hogy az aszfaltszerkezet erősítésére, a megjelenő alakváltozások és feszültségek csökkentésére is alkalmas lehet ezen anyagok beépítése. A hidraulikus kötőanyagú alapréteg és bitumenes alapréteg közé beépítésre került rácsok és textíliák mellett egyre gyakrabban építik be a rácsokat a bitumenes kopó és kötőréteg közé is abból a célból, hogy erősítő hatás érjenek el.

Magyarországon az útépítésben a kilencvenes évek közepén jelent meg jelentősebb mennyiségben az aszfalterősítő rácsok alkalmazása. Hazai kísérletek műanyag rácsok

aszfaltban történő elhelyezésére már voltak korábban, a 80-as évek elején is, de az igazi robbanás a rendszerváltozás után, a nagy infrastrukturális beruházások elindulásával jelentkezett.

Az új aszfaltrétegek építésével történő felújítás a legjellemzőbb beavatkozási módszer annak érdekében, hogy az útpályaszerkezet életciklusát megnöveljük. Nyilvánvaló, hogy a kutatások, kivitelezési technológiák arra törekednek, hogy minél tartósabb, a terheléseknek, és a hidraulikus alapréteg repedéseinek ellenálló erősítő réteget építsenek meg, a lehető legköltséghatékonyabb módon. Az új, megfelelő hatékonyságú réteg beépítésére a következő lehetőségek adódnak [A.H. de Bondt, 1999]:

- A beépítendő új aszfaltréteg mechanikai jellemzőinek módosítása.
- Feszültség elosztó réteg beépítése a régi burkolat és az új aszfaltréteg közé.
- Aszfalterősítő anyag (háló, rács) alkalmazása az új réteg alatt.

A bevezetés elején rögtön álljon tanulságul egy kép, amely azt mutatja, hogy milyen károsodások következhetnek be akkor, ha nem megfelelő módon, nem megfelelő helyre, nem megfelelő rács típust építünk be. [Almássy – Joó, 2009]



1.1. kép: Extrém példa, amikor az aszfaltrács beépítése miatt ennyire nincs együttdolgozás a rétegek között

A későbbiekben bemutatásra kerülő külföldi és hazai szakirodalmi kutatásokból kiderül, a rácsok útpályaszerkezetbe történő beépítésénél leginkább a rácsok és hálók reflexiós repedésekkel szembeni ellenállását, illetve a hidraulikus kötőanyagú alaprétegen kifejtett hatását vizsgálták.

1.1. A disszertáció célja

Jelen dolgozat célja az, hogy az aszfaltrétegek közé beépített aszfalterősítő hálók és rácsok szerepéről, viselkedéséről adjon tiszta képet, amely a jövőben hozzájárul ahhoz, meg tudjuk határozni, hogy milyen körülmények között lehet, és milyen körülmények között tilos beépíteni hálót a pályaszerkezetbe. Az alábbiakban a következő kérdésekre kívánok választ adni az aszfalt pályaszerkezetekben alkalmazott rácsokkal kapcsolatban:

- A rácserősítés alkalmazásánál az egyik legfontosabb szempont az együttdolgozás kérdésének a szerepe. Meghatároztam többféle eljárással az együttdolgozás minőségét, erejét a rács és az aszfaltrétegek között, illetve értékelttem a hordozóanyag nélküli rácsok, szövethordozós kompozitok ez irányú viselkedését.
- A gyártók egy része keréknyomvályú-képződés csökkentésére is javasolja a rácserősítést, azonban kutatási eredmények nem támasztják alá pontosan ezt az állítást. Nagyszámú rács típus beépítésével elemeztem az aszfalt próbatestek keréknyomvályú képződésének kialakulását.
- Igazolni fogom a rácsbeépítésnek az aszfalt-pályaszerkezet élettartamára gyakorolt hatását, vizsgálatokkal kívánom bizonyítani, hogy a rácsbetétet milyen mértékben növeli meg az aszfaltszerkezet élettartamát.
- A szerkezet merevsége változásának megfigyelését is fontosnak tartottam, hiszen a rács alkalmazásának hatása függhet a szerkezet, és a rács merevségétől, illetve a terhelés nagyságától valamint az alkalmazott hőmérséklettől.
- A hidegben kialakuló termikus repedésekre adott válaszát, a termikus repedések megakadályozásában játszott szerepére is kitérek a kutatás kapcsán.
- Számítógépes vizsgálat segítségével meg kívántam határozni, hogy milyen vastagságú aszfaltot lehet megtakarítani a rácsbetétek alkalmazásával, mekkorára adódik a helyettesítő aszfaltvastagság.

- A kutatások során arra is választ kívántam kapni, hogy milyen összefüggés van a szerkezet állapota és a rács alkalmazásának hatása között, illetve, hogy milyen mechanikai és fizikai tulajdonságú rácsot érdemes alkalmazni az aszfalt-pályaszerkezetekben.

1.2. A disszertáció felépítése

A doktori értekezésem alapvetően két részből áll. A disszertáció első részében laboratóriumi vizsgálatok segítségével elemzem a rácsbeépítéssel készült szerkezetek viselkedését, a dolgozat második részében pedig számítógépes modellek alkalmazásával vizsgálom a rácsok alkalmazásának hatékonyságát. Az ötödik fejezettől, az egyes fejezeteken belül először bemutatom a vizsgálati módszerek, berendezések, modellek elméleti és szakirodalmi hátterét, majd azt követően kerül sor a vizsgálati, kutatási eredmények bemutatására, a tudományos megállapítások ismertetésére.

Az értekezés második fejezetében a fogalom meghatározásokat ismertettem, bemutatom a rácsok alkalmazási céljait és a legfontosabb műszaki jellemzőit.

A harmadik fejezetben az aszfaltrácsok alkalmazásával kapcsolatos nemzetközi tapasztalatokat, kutatási eredményeket mutatom be.

A negyedik fejezetben ismertetem a rácsbeépítésnek és a próbatest készítésnek a módszerét, illetve bemutatom az alkalmazott rácsfajtákat.

Az ötödik fejezetben a rácsok és az aszfaltrétegek közötti együttdolgozását elemzem különböző laboratóriumi vizsgálatok alkalmazásával.

A hatodik fejezetben a rácserősítés és a keréknyomvályú képződés kapcsolatát vizsgálom szintén laboratóriumi kísérletek elemzésével.

A hetedik fejezetben az általam elvégzett rácserősítésű próbatestek hajlító-fárasztó vizsgálatainak menetét és végeredményeit ismertetem, illetve megállapításokat teszek az eredmények alapján a rácserősítés élettartamra gyakorolt hatásáról is.

A nyolcadik fejezetben a rácserősítésű próbatestek és rács erősítés nélkül készült próbatestek mestergörbéit határozom meg, és az összehasonlításuk alapján teszek megállapításokat a rácserősítés terheléssel szembeni viselkedésére.

A kilencedik fejezetben az aszfalt repedési hőmérséklet és tiszta húzás vizsgálatokat mutatom be, melyek a leghatékonyabb hidegviselkedést jellemző vizsgálatok közé tartoznak. A rács

alkalmazásának hatását elemzem a hidegben kialakuló alakváltozások meggátlásával szemben.

A tizedik fejezetben pályaszerkezeti modelleket állítok fel, amelyeken a BISAR szoftver segítségével meghatározom a mértékadó pontokban keletkező igénybevételeket. A modellek viselkedésének alapján teszek megállapításokat a megfelelő merevségi modulusú rács típus alkalmazására, illetve arra, hogy a pályaszerkezetben, az aszfaltrétegek közé beépítve milyen mélységben működik leghatékonyabban a rács.

A tizenegyedik fejezetben szintén modelleket állítok fel, és végesem számítások segítségével elemzem, hogy milyen egyenérték/helyettesítő vastagság adódik a rács beépítésével.

A tizenkettedik fejezetben néhány hazai rácsbeépítéssel készült útszakasz jelenlegi műszaki állapotát mutatom be.

2. Fogalom meghatározás, alkalmazási célok, alapvető műszaki jellemzők

Az aszfalt pályaszerkezetek felújításánál a réteghatárokon fektetett textíliákat és a különféle kialakítású aszfalt-rácsokat a repedések továbbterjedésének megakadályozására, illetve az aszfalt pályaszerkezetet érő igénybevételek csökkentése, azaz a szerkezet erősítése céljából alkalmazhatók. Az utóbbi funkciót tekintve sokféle aszfaltrácsot használunk, de a felújítás tervezése és az építések során nem tesznek különbséget a különféle anyagok között. A gyakorlatban tapasztalt meghibásodások okán az első és legfontosabb feladat, hogy rendet tegyünk az aszfalterősítő anyagok között, tisztázzuk az egyes fogalmi és funkcionális kérdéseket, ösztönözzük a használati értéken alapuló műszaki szabályzat mielőbbi kidolgozását, bevezetését.

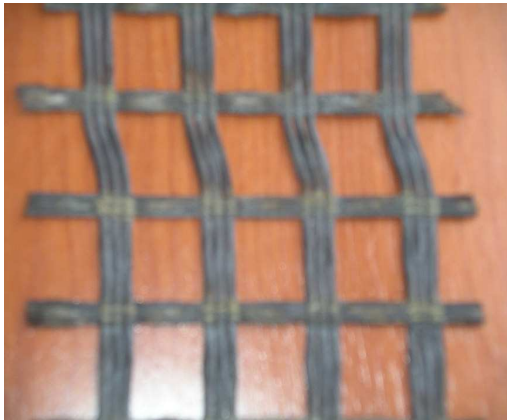
2.1. Fogalmi kérdések

Az útépitési célra használt textíliák, aszfaltrácsok alapanyaga az aramid (AR), polietilén teraftalát (PET), polipropilén (PP), polivinilalkohol (PVA), polietilén, (PE), valamint természetes anyagok, például. szén- és üvegszálak). Az útépitésben a pályaszerkezet erősítésére alkalmaznak acélból készült rácsokat is.

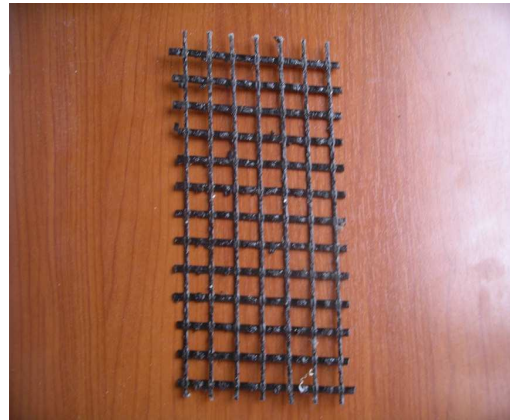
Textíliák: egymásra rétegelt, szabálytalanul elrendezett (végtelen hosszú) szálakból vagy 3-15 cm hosszú pászmákból álló szőnyegek szilárdításával varrással, szövással, tűnemezéssel, ragasztással, vagy hőkezeléses-ragasztással jönnek létre.

Aszfaltrácsok: Különféle szintetikus, vagy természetes, vagy mindkét anyag egymásra merőleges szálaiból, szálkötegeiből, szalagjaiból különféle csomóponthi kiképzéssel, különféle kötésekkel, különféle lyukbősséggel gyártott termékek. Az előállítási technológiától függően szőtt, nyújtott és fektetett rácsokat különböztethetők meg. A nagyobb modulusú, így kisebb alakváltozási képességű rácsokat vagy nagy modulusú üvegszálak rostjaiból, szénszálakból vagy nyújtott polimerekből állítják elő. A rácsok között megkülönböztetünk szőtt, hurkolt, nyújtott és fektetett rácsokat. A rácsok felületét általában vékony műanyag alapú, vagy bitumenes bevonattal látják el, ami víz (télen az olvasztó sókat is tartalmazó víz) károsító

hatását megakadályozza, ugyanakkor a ráépülő aszfalt hőjének olvasztó hatásával elősegíti a bitumen leragasztását. A különböző lyukméretre mutat példát az alábbi két kép.



2.1. kép: Aszfaltrács (25x25 mm)



2.2. kép: Aszfaltrács: (12,5x12,5 mm)

Kompozitok: A kompozitok a textíliák és rácsok felületi összekötésével kialakított anyagok, amelyek egyesítik mindkét anyag (előnyös) tulajdonságait. A műanyag hordozójú kompozitokat polimerekből és/vagy üvegszálakból készítik, a rácsokhoz öltéssel vagy ragasztással illesztik a textíliát. Az alábbi két képen egy ragasztott és egy szőtt kompozit rácsot láthatunk.



2.3. kép: Nem szőtt kompozit

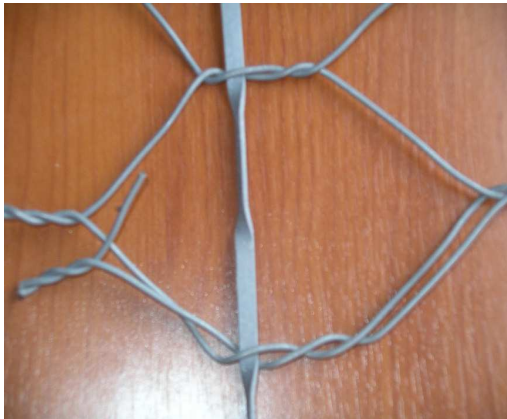


2.4. kép: Szőtt kompozit

Acélrácsok: Elkülöníthető kategóriát képeznek az aszfalttól nagy mértékben eltérő modulusú, acélhuzalokból készített acélrácsok. Ezek általában kétszer csavart acélhálók, amelyek galvanizált acélból és bizonyos közönséges keresztirányú acélrudakból állnak. Alkalmazásukkor az erősítő aszfaltrétegnek legalább 60 mm tervezési vastagságúnak kell lennie. A nagy lyukbőségű hálós struktúrában minden egyes acélszálnak lehetősége van arra, hogy beágyazódjon az őt

körülvevő aszfaltba, biztosítva az aszfaltalkotókkal az együttdolgozást, ezáltal magas nyírási ellenállási értékeket mutatva az erősítő- és az aszfaltréteg között. A fémhálót tartalmazó aszfalt újrahasznosítása problematikus. (Ezen kedvezőtlen hatás és az ebből is adódó gazdaságossági hátrány miatt az értekezésben ezen anyaggal csak érintőlegesen foglalkozom.)

Az alábbi képeken egy Bitufor típusú aszfalterősítő acélrácsot és egy közönséges, de laborkísérletek során felhasznált dróthálót láthatunk.



2.5. kép: Acélrács



2.6. kép: Drótháló

A doktori értekezésemben a megfelelő követhetőség kedvéért hordozóanyag nélküli rácsról, szövetes hordozó anyagú rácsról és aszfaltrácsról fogok beszélni, alapvetően így fogok különbséget tenni az egyes rács, háló és kompozit fajták között!

2.2. Alkalmazási területek

Az aszfalt pályaszerkezet réteghatárain elhelyezett rácsok használatának alapvető célja a felújítási életciklus növelése, a nagyobb használati érték kialakítása. Alkalmazásuk funkcionális céljai:

- a felújítandó pályaszerkezet fogadó rétegében lévő *repedések áttükröződésének csökkentése, megakadályozása*. (Az újépítésű félig merev pályaszerkezetek esetén is hasonló cél jöhet szóba, ekkor a hidraulikus kötésű alaprétegből induló reflexiós repedések kialakulásának csökkentése, késleltetése a kiindulási cél.),

vagy

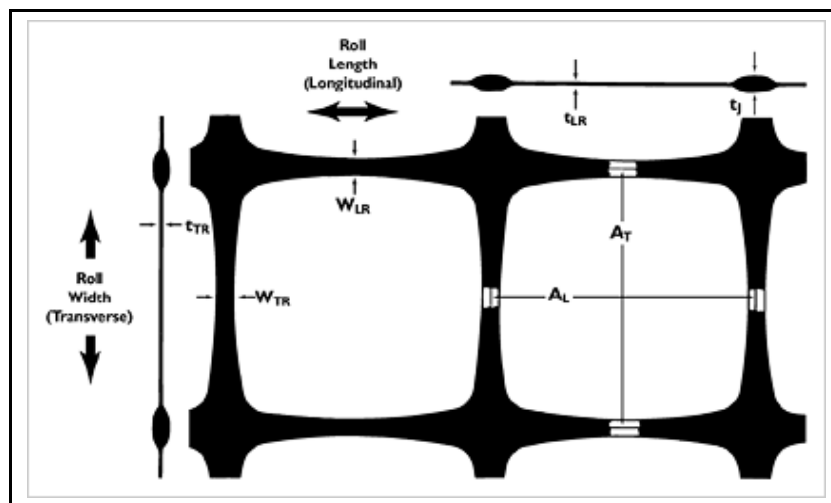
- az igénybevételek csökkentésével erősítő hatás kifejtése.

Mindkét fenti esetben járulékos pozitív hatásként még kisebb-nagyobb mértékű vízzáróság is elérhető.

2.3. Aszfaltrácsok műszaki jellemzői

Az aszfaltrácsok bemutatása kapcsán szükséges ismerni az Európában, és Magyarországon leggyakrabban alkalmazott rács típusok műszaki jellemzőit. Világviszonylatban 5-10 olyan gyártó és forgalmazó létezik, amely komoly múlttal rendelkezik a geoműanyagok területén, és nagy mennyiségben és ellenőrzött minőségben képes aszfaltrácsok előállítására. Ezen cégek fő profilja a talajerősítésben, földművekben alkalmazott geotextília gyártása volt, de az elmúlt két évtizedben kezdtek aszfaltépítésben is használható műanyag rácsokat gyártani. Sajnos az árverseny megjelenése itt is a minőség rovására ment és az elmúlt években megjelentek a piacon főként Kínában gyártott gyenge anyagminőségű rácsok és szövetes kompozitok.

A brit Tensar Ltd az egyik legnagyobb európai geoműanyag gyártó és forgalmazó. Az alábbiakban az AR-G típusú hordozóanyag nélküli rács keresztmetszetét láthatjuk.



2.1. ábra: A Tensar AR-G típusú rács lyukmérete

A_L	A_T	W_{LR}	W_{TR}	t_j	t_{LR}	t_{TR}
65	65	4.0	4.0	4.4	0.8	0.8

2.1. táblázat: : A Tensar AR-G típusú rács lyukmérete

Az alábbi táblázatban a svájci GlasGrid és a holland Tencate aszfaltrács termékek legfontosabb műszaki tulajdonságait találjuk meg.

Tulajdonságok		GlasGrid®							Tencate Polyfelt			
		8550	8501	8502	8511	8512	CG-50	CG-100	CG-200	PGM-G50	PGM-G100	PGM-G200
Tömeg	g/m ²	185	370	560	370	560	305	475	665	300	430	670
Szakítószilárdság H	kN/m	50	100	100	100	100	50	100	200	75	145	240
Szakítószilárdság K	kN/m	50	100	200	100	200	50	100	200	75	145	240
Szakadási nyúlás	%	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
Olvadáspont	°C	>218	>218	>218	>218	>218	>218	>218	>218	>400	>400	>400
Rácsméret	mm x mm	25x25	12,5x12,5	12,5x12,5	25x25	25x20	25x25	25x25	25x25	40x40	40x40	40x40

2.2. táblázat: A Glas Grid és Tencate Polyfelt típusú rácsok műszaki jellemzői

A svájci S&P Reinforcement Company is nagyon komoly forgalmazónak számít világviszonylatban. Két fajta rácsot gyártanak: az üvegszál aszfalt G és a szénszál aszfalt G rácsot. Az üvegszál aszfalt G rács 120 kN/m szakítószilárdsággal rendelkezik mindkét irányban, a szénszál aszfalt G rács viszont vízszintes, kereszt irányban nagyobb 200 kN/m-es szakítószilárdsággal rendelkezik. A rácsok szakadó-nyúlása 3,5-4,5 % között változik, a szénszál aszfalt G keresztirányú szálainál azonban ez a szám lecsökken 1,6%-ra.

A német Huesker cég által gyártott Hatelit szövethordozós rács szintén megbízható, jó minőségű terméknek számít, a rácsaik szakadó nyúlása 3,0 és 4,5% között változik, a rácslyuk méretük hasonlóan a GlasGrid termékekhez 12,5x12,5 és 25x25 mm közötti. [www.huesker.com, 2008]

Az olasz Geosintetici cég ARTER típusú szövetes és hordozóanyag nélküli bitumen bevonatú rácsai is kiváló minőséget adnak. A rácsok szakítószilárdsága széles skálán 50 és 500 kN/m között változik.

A fenti összeállításból jól látszik, hogy alapvetően szakítószilárdsági és szakadó-nyúlási értékkel jellemzik a gyártók és forgalmazók az adott aszfaltrácsokat. Ezekre az adatokra szinte minden esetben rá lehet lelni a gyártói katalógusokban. Fontos adatként megjelenik még a rácslyuk méret és az alkalmazott rács típus (polipropilén, üvegszál, szénszál)

olvadáspontja. A gyártó a göngyöleg tömegét és méretét is meg szokta adni, de a mi kutatásunk szempontjából természetesen ennek nincsen jelentősége.

2.3.1. E rugalmassági, merevségi modulus, mint méretezéshez szükséges jellemző

A rácsok vagy hálók általában 20 cm szélességben történő befogásával, szakító-húzó vizsgálat alkalmazásával határozzák meg szakítószilárdságát és nyúlását a rácsoknak, melyből számítható az elemi szál merevségi modulusa. Jelen dolgozat keretei között a rács merevségi modulusát ilyen módon nem lehetett pontosan megvizsgálni, mert befogási, szorítási problémák keletkeztek a szakítószilárdsági vizsgálatoknál.

Az E rugalmassági, merevségi modulus ismertetésénél így a szakirodalmi adatokra hivatkozom. Az S&P Reinforcement cég az alábbi elemi szál modulusokat határozta meg:

Szál típusa	E-modulus (N/mm ²)	Szakadó nyúlás %	Újrahasznosíthatóság
<i>Carbon, szénszál</i>	230-240.000	1,4-1,7	igen
<i>Aramid</i>	120.000	3,5	Problémás lehet
<i>Üvegszál</i>	65-70.000	2,5-3,0	igen
<i>Poliészter</i>	15.000	12,0	Problémás lehet
<i>Acél</i>	210.000	0,5	Problémás lehet

2.3. táblázat: Különböző anyagú rácsok elemi szálainak rugalmassági modulusa

A vasbeton az egyik legjobban ismert kompozit szerkezet az építőiparban. A betonnak 20-30 kN/mm², az acélnek 210 kN/mm² a merevségi modulusa. (Az arány ~ 1:7 a beton és az acél között.) A rácsszerkezetnek (mátrixnak) az E rugalmassági modulusa mindig kisebb mint az elemi szál E modulusa. A szakirodalmi adatok alapján egy 1,5-ös redukción kell alkalmazni az elemi szál modulusnál és így megkapjuk az alkalmazott aszfaltrács merevségi modulusát. (Szénszálalás rácsnál így 160.000 N/mm², üvegszálalás rács esetében pedig 47.000 N/mm² a merevségi modulus az S&P rácsoknál.) A bitumenes aszfalt rétegek 3000 és 15.000 N/mm² modulusal rendelkeznek, így egy szénszálalás vagy akár üvegszálalás rács komoly erősítést jelenthet. [www.sp-reinforcement.ch, 2006]

Az E modulust az elemi szál szakítószilárdsági vizsgálata (szakadó nyúlás, szakítószilárdság) alapján határozták meg. (az S&P leírása szerint a szénszál szakítószilárdsága $\sim 4000 \text{ N/mm}^2$ volt). [Scherer, 2006]

A Tencate cég által gyártott PGM típusú szövethordozós aszfaltrácsok mindegyikénél 81.000 MPa rugalmassági modulusot ír a gyártói katalógus. (Ez azért érdekes és egyúttal megkérdőjelezhető, mert a katalógus szerint a különböző szakadó szilárdsággal rendelkező rácsoknak azonos a rugalmassági modulusa. Feltételezem a gyártó csak egyszerűsítés miatt vette fel ezt az eredményt a polipropilén, üvegszál erősítésű Polyfelt rácsoknál.)

Sajnos az említett nagy aszfaltrács gyártó cégek közül mindössze kettő, az S&P és a Tencate adott meg elméleti rugalmassági modulus adatokat. (És csak az S&P esetében kaptunk információt a számítás módjára.) Az alábbiakban azonban ki fog derülni, hogy a rugalmassági modulusnak milyen jelentősége lehet az ráccsal készült szerkezetben, ezért sajnálatos, hogy a gyártók ezt az alapvető adatot nem adják meg az információk kiadványaikban.

3. Nemzetközi példák, tapasztalatok az aszfaltrácsok alkalmazásával kapcsolatosan

Az alábbiakban összefoglalom azokat a külföldi tapasztalatokat, amelyeket geoműanyagok, aszfaltrácsok út-pályaszerkezeti alkalmazása kapcsán nyertek. Az összefoglaló az egyes országokban szerzett általános tapasztalatokat, megfigyelt viselkedést írja le. Az egyes vizsgálatok, eljárások során, ha rendelkezésre áll, külön ismertetni fogom a nemzetközi kutatási eredményeket.

Olaszország

Az első aszfalterősítő beépítést 1998-ban, az észak-olaszországi Salmastro tartomány útfelújítása során kísérelték meg. Az alatta lévő talaj nagyon gyenge teherbírású volt, a megnövekedett járműforgalom a tervezési értékhez képest, nem jelentett biztonságos utazási feltételeket. Négy különböző erősítő anyagot használtak: acélháló, üvegszál háló, poliészterháló, és végül az erősítő nélküli referencia. A mérési eredmények arra vezettek, hogy az erősítő nélküli referencia szakaszt egy év után meg kellett javítani, az üvegszál és a poliészter megerősítő szakasz 4 évig, míg az acélerősítésű 6 évig jó állapotban maradt.

Olasz útügyi szakemberek az aszfaltban alkalmazott rácserősítések a pályaszerkezet élettartamának meghosszabbításában való hatásosságát vizsgálták [Agostinacchio, M. – Fiori, F, 2007]. Erre a célra végelelem-vizsgálatot végeztek, és azt tapasztalták, hogy repedések nélküli burkolatoknál a georácsok alkalmazása nem javítja érdemlegesen a feszültség-nyúlás kombinációt. Ugyanakkor azonban nagyon hatásosnak találták, ha olyan pályaszerkezetekben alkalmazzák, ahol a repedések a georács szintje fölé is tovább terjedtek. Ilyenkor a kialakuló vízszintes feszültségekben akár 20 %-os csökkentést is el lehet érni. Egyszerű eljárást dolgoztak ki a georácsok alkalmazásával elérhető élettartam-növekedés számszerűsítésére. Általában 2-3-szoros terhelésismétlési számot lehetett laboratóriumi mintákon elérni, amelynek alapján az üzemi élettartam meghosszabbodása is megbecsülhető.

Svédország

Az 1980-as évek közepétől számos tesztszakasz épült acél megerősítéssel. Legtöbb esetben a fagy okozta repedésekből adódtak a károk. 1999-ben a Svéd Nemzeti Útkezelő a teherbírást ejtősúlyos behajlásmérővel, míg a felületi profilokat lézeres technikával mérte. Az

eredmények azt mutatták, hogy a megerősített szakaszok teherbírása nagyobb, az alsó kötő rétegben mért nyúlások és a nyomvályúsodási eredmények kisebbek, mint a referencián.

[Márton, 2009]

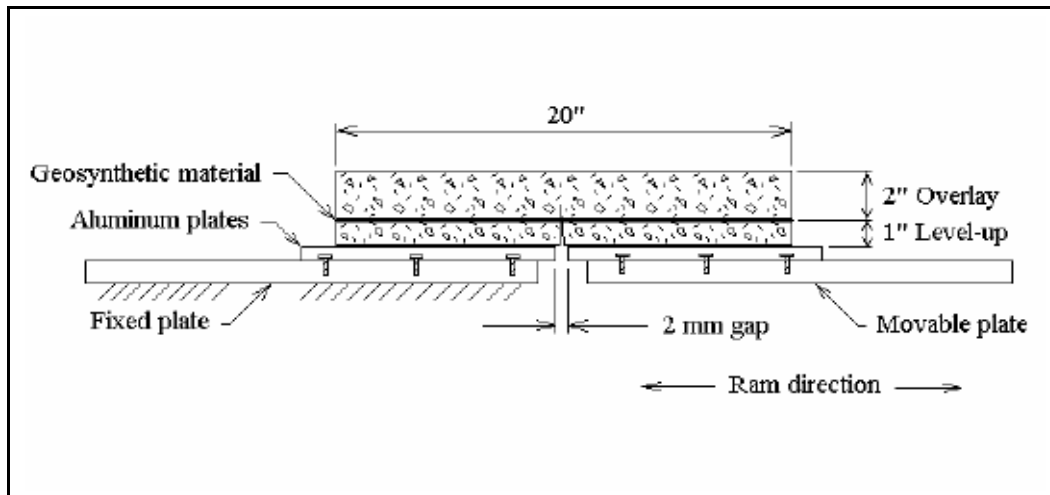
Egyesült Államok

A Texas A&M University kutatói laboratóriumi és terepi vizsgálatokat is végeztek ugyanarra a két különböző erősségű üvegszál erősítésre. A laboratóriumi fáradási vizsgálatok alapján az üvegszálás gerendák 2,6-szoros terhelést is képesek elviselni; míg a három szakaszon (US Federal Highway 190, 96 és az 513:02 szakaszok) alkalmazott üvegszál erősítések esetében 8 évnyi folyamatos monitoring után arra következtettek, hogy az üvegszálak 2-3-szorosára növelhetik a burkolat élettartamát, szemben azzal, ha nem lennének megerősítve.

A Wisconsin államban lefolytatott kutatások negatív eredménnyel jártak, ugyanis az állami utakon azt vizsgálták, hogy a GlasGrid cég által forgalmazott különböző lyukméretű üvegszálás rácsok képesek-e meggátolni a reflexiós repedések kialakulását, és megnövelni a régi beton pályára épített aszfalt kopóréteg élettartalmát. A válasz nemleges volt, mert a próbaszakaszos megfigyelések a referencia szakaszhoz képest nem mutattak ki kevesebb repedést a GlasGrid ráccsal épült szakaszokon.[Wisconsin, 2003]

A Texasi Közlekedési Intézet fejlesztette ki az aszfalterősítő rácsok vizsgálatához, az egyik legegyszerűbb vizsgáló készüléket. A berendezést gyakorlatilag húzási tönkremenetel tesztelésére tervezték. A húzó és nyomó feszültségek hatására horizontális elmozdulások, úgynevezett termikus repedések jönnek létre az aszfaltszerkezetben.

Az elmozdulás létrehozásához a berendezés egy rögzített lemezből és egy hidraulikus dugattyú által vezérelt mozgó lemezből áll. A berendezés ábrája látható az alábbi képen.



3.1. ábra: A Texas Transportation Institute által kifejlesztett repedésgátlás megfigyelésére alkalmas berendezés

Először egy réteg aszfaltot tömörítenek be, erre kerül rá a háló, majd az újabb aszfalt réteg. A gerendákat epoxival odaragasztják mindkét lemezhez. A létező repedés prezentálásához a két lemez csatlakozásánál 2 mm rést hagynak ki a gerenda közepén. A rés eléréséhez egy élére állított plasztik lemezt tesznek be a két fémlemez közé. Amikor eltávolítják a lemezt, akkor a rést ragasztó szalaggal fedik be, hogy megvédjék az epoxi gyantával bevont részt. Mindegyik gerendát fehérre van festve azokon a helyeken, ahol a repedés valószínűleg be fog következni. A próbatest elkészítése után a tönkremenetelig történő tesztelés két fázisban történik. A tönkremenetel akkor jön létre, amikor a gerenda minden oldalán létrejönnek a repedések, és a gerenda teteje teljesen végig repedt. Másodpercenként mérésre kerül az elmozdulás és terhelési érték, amiből a relaxációs modulus meghatározható. [TTI, 2002]

Németország

A 80-as évek eleje óta alkalmaznak a pályaszerkezetben elhelyezett műszaki szöveteket, vagy aszfalt és acélrácsokat azzal a céllal, hogy növeljék az útburkolatok élettartamát. Kezdetben a földmű építésben alkalmazott és ismert geotextíliákat és rácsszerkezeteket alkalmazták. Ezeket a termékeket először gyakran csak próbálgatás szerint építették be, és figyelték az idő múlásával a forgalmi terhelések hatására kialakult viselkedését az erősített szerkezeteknek. Pontos vizsgálatokat csak a 90-es évek közepétől – a negatív tapasztalatok miatt – indítottak a német útügyi szakemberek a hálós/rácsos erősítés hatásainak feltárására. Jelenleg egy 1992-ben kiadott „Állásfoglalás a textíliák, rácsszövetek és rácsok aszfaltburkolatú utakban történő alkalmazásáról” című dokumentumot alkalmaznak iránymutatásként a német útügyi szakemberek a rácsbeépítések alkalmazásánál.

Egyiptom

A vizsgálatok fontosabb következtetései arra mutattak rá, hogy a kötőréteg között elhelyezett geotextília esetében minimális deformáció jött létre. A hárompontos hajlító vizsgálatok során előálló eredmények szerint a kötőanyag közepén elhelyezett geotextília nagyobb ellenállást mutatott, a deformáció 13%-kal kisebb volt a megerősített, mint a megerősítés nélküli referencia próbatestekben. Minimális nyúlási tulajdonságok lehetővé tették, hogy a geotextília rugalmas maradjon, így meggátolja a reflexiós repedéseket. [Márton, 2009]

Svájc

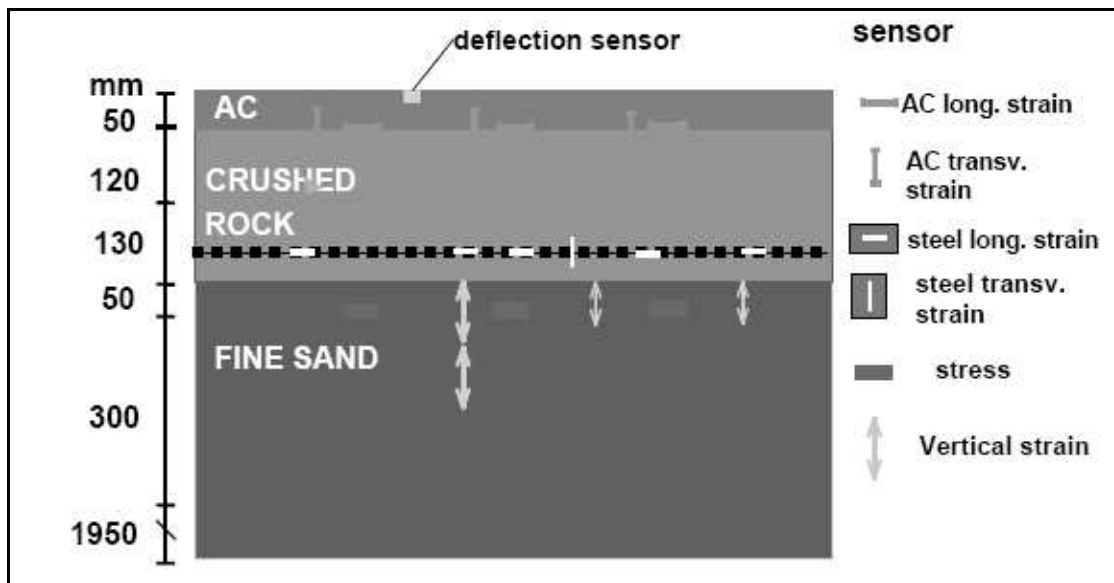
Svájcban is komoly fejlesztésre került sor az aszfaltburkolatok különböző rácsokkal és hálókkal történő erősítése tárgyában [KTI, 2007]. Hangsúlyozzák, hogy az aszalterősítő rács elmozdulását az építés ideje alatt meg kell akadályozni, egyébként nem várható az aszfaltrétegekkel megfelelő tapadás. Kedvezőtlen tapasztalatokat szereztek nagyobb hosszúságú szakaszokon, kissugarú ívekben, vagy pedig hernyótalpas útépitési munkagépek alkalmazásakor különösen, ha viszonylag nagy mennyiségű kellősítő anyagot permeteztek ki. Néhány éve forgalmazzák az üvegszál-erősítésű aszfaltrácsok legújabb generációját. A polimerrel modifikált bitumenre elhelyezett rácsok felületére kvarchomokot szórnak, másik oldalukat pedig leperzselhető fóliával látják el. Tapasztalat szerint olyan kedvező a tapadásuk, hogy a réteg nem mozdul el.

A svájci székhelyű S&P cég nagy figyelmet fordított a termék alkalmazások tudományos igazolására, ezért az elmúlt években Leutner vizsgálatot, hajlító-fárasztó vizsgálatot, a termikus repedések ráccsal történő megakadályozását igazoló hidegviselkedési vizsgálatot is végeztek. Nemzetközi gyakorlatban hazánk mellett egyedül Svájcban végeztek keréknyomvályú képződési vizsgálatot a svájci független anyagvizsgáló laboratórium az EMPA bevonásával. (A vizsgálatokat vázlatosan ismertetem a későbbiekben.)

Finnország

Finnországban a STEELSYNT projekt keretében vizsgálták az útpályaszerkezetbe beépített acélrácsok szerepét. (A tesztek során Polyfelt műanyag rácsot is vizsgáltak.) A kutatás, része volt az európai REFLEX programnak. A kísérletekhez úgynevezett Nehézgépjármű Szimulátort vettek igénybe (HVS-Heavy Vehicle Simulator) és 1:1-es mintán, teszt pályán, az altalajt, védőréteget és a kötőanyag nélküli alapréteget valóságosan megépítve tesztelték a beépített acélrács szerepét. A vizsgálatok célja az volt, hogy meghatározzák az erősített

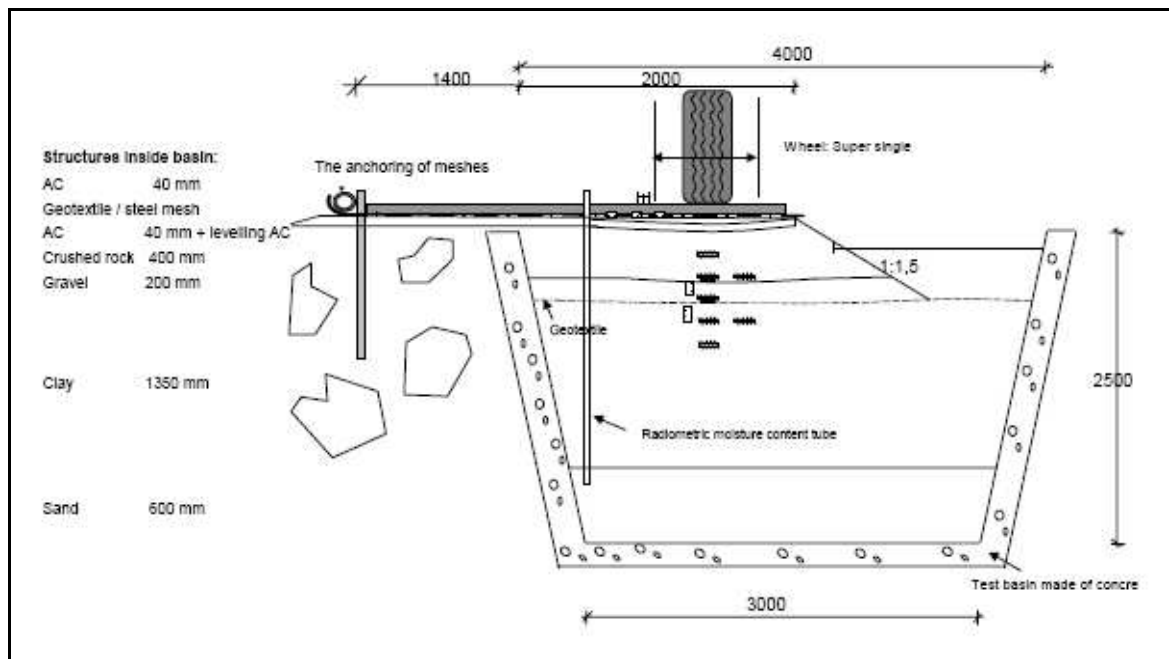
szerkezet maradó alakváltozását (keréknyomvályú-képződés), fáradási és reflexiós repedések kialakulását és a felületi egyenetlenségét.[*Finish Road Administration (FINRA), 2003*] Az alábbi képen látható a sematikus ábrája annak a vizsgált szerkezetnek, amikor az acélrácsot a kötőanyag nélküli alapréteg alján helyezték el. Az alábbi ábrán jól látszanak a szerkezetben elhelyezett szenzorok, melyek az elmozdulásokat mérték. [*Leena Korkiala-Tanttu, Markku Juvankoski, 2003*]



3.2. ábra: Acélrács alkalmazása a kötőanyag nélküli alapréteg alján

A következő ábrán pedig az a változat látható, amikor kopóréteg alatt 4 cm-en került beépítésre az acélháló, illetve a Polyfelt PGM 100/100 műanyag rács.

A vizsgálat eredményeképpen általánosságban elmondható, hogy a beépített acélrács – függetlenül attól, hogy a kötőanyag nélküli rétegekbe vagy a bitumen rétegek közé lett beépítve – csökkentette a nyomképződést. Az átlagos nyommélység csökkenés 40-60%-osnak mondható, és 50-100%-al növelte meg az erősítés a szerkezet élettartalmát az erősítés nélkül készült referencia próbatesthez képest. Érdekes, hogy az alkalmazott Polyfelt műanyag rács esetében gyakorlatilag ugyanakkora nyommélységet mutatott, mint a rácserősítésű szerkezet.



3.3. ábra: 1:1-es modell keresztmetszete, az acélrács a kopó és kötőréteg között helyezkedik el

Egyéb európai kutatások

A Netherlands Pavement Consultants cég kísérletsorozat keretében összehasonlította a tartós terhelésnek alávetett különböző típusú aszfalterősítések fáradási repedésekre gyakorolt hatását. [Netherlands Pavement Consultant bv, 2002]

A belga Centre De Resherces Routieres útvizsgáló intézet pedig a termikus repedések meggátolásában kifejtett hatását vizsgálta az aszfaltrácsoknak. [Centre De Resherces Routieres, 1995]

Litván kutatók aszfaltbeton burkolatú pályaszerkezetek erősítésére szolgáló geoműanyagok elméleti és gyakorlati tapasztalatairól számoltak be [Laurinavicius, A. – Oginskas, R. – Zilioniene, D.] [KTI, 2007]. Megállapítják, hogy a geoműanyagokat útépitésben környezetvédelmi célokra és erősítő célokra alkalmazzák. Az utóbbi esetben vagy a burkolatalapba, vagy pedig a burkolaton belülre kerül az erősítő geoműanyag. Ezeknek az anyagoknak a megfelelőségét általában a pályaszerkezetben mérhető maradó nyúlás, a reflexiós repedésekkel szembeni ellenállás, illetve a pályaszerkezet fáradási ellenállásához történő hozzájárulás formájában értékeli. A végrehajtott litván kísérlet során a legfelső aszfaltréteg alá helyeztek el különböző geoműanyagokat. Fél éves és egy éves forgalom után mérték az egyes részzszakaszok keréknyomvályú-mélységét, valamint meghatározták az aszfaltbeton réteg rugalmassági modulusát. Azt tapasztalták, hogy a nyári meleg előtt a geoműanyag nélkül készült referencia-szakaszon mélyebb nyomvályúk alakultak ki,

szeptemberben azonban a sorrend szinte teljesen megcserélődött. Regressziós elemzés segítségével az aszfaltbeton rugalmasságának és viszkozitásának a keréknyomvályú-mélységre gyakorolt hatását felmérték. Összességében a georácsok kedvezőbbnek mutatkoztak a pályaszerkezetben keletkező nyírási alakváltozások és keréknyomvályúk kialakulása szempontjából, mint a geotextíliák.

Európai szinten nincsen átfogó, egységes szabályozás az aszfalt pályaszerkezetekbe beépített rácsok, hálók, acélrácsok és kompozitok alkalmazási módjáról. A geotextíliáknak földművekben és alaprétegen történő alkalmazásáról áll csak rendelkezésre európai szintű szabvány. Ugyanakkor nyilvánvaló, hogy az európai szakemberek foglalkoznak a rács alkalmazási és szabályozási probléma megoldásával, és többek között emiatt került sor az európai tapasztalatokat összefoglaló COST 348-ra elkészítésére.

A 2002-ben kezdődött az a négy éves REIPAS fantázianevű COST-akció, amelynek címe: Acélhálókkal és geoszintetikus anyagokkal történő pályaszerkezet-erősítés (REIPAS – Reinforcement of Pavements with Steel Meshes and Geosynthetics) [COST 348, 2006]. Az akció célja az volt, hogy a különböző útpályaszerkezetekben alkalmazott erősítő elemekről (georácsok, geotextíliák, acélrácsok, műanyag vagy üvegrost rácsok, kompozit anyagok) európai szintű ismereteket gyűjtsenek, azokat szintetizálják és a tárgykörben javaslatokat készítsenek. Megállapították, hogy ezeket az anyagokat különböző aszfaltrétegekhez és kötőanyag nélküli anyagokhoz egyformán alkalmazzák, valamint az útpályaszerkezetek viszonylag kis költségű felújításához is elterjedtek. Egyik leggyakoribb alkalmazásuk az aszfaltrétegeken keresztül megjelenő reflexiós repedések időbeli elodázása érdekében történik. Az alkalmazásukból származó többletköltségeket bizonyos építési ráfordítás-csökkentés és/vagy megnövekedett üzemi élettartam ellensúlyozza.

Megállapították, hogy nem áll rendelkezésre olyan pályaszerkezet-méretezési eljárás, amely ezeknek az erősítő elemeknek a hatását tudományos megalapozottsággal figyelembe tudná venni. A COST akció zárójelentése hangsúlyozza annak a jelentőségét, hogy az erősítő termékek beépítését, illetve elhelyezését a terhelési módszertől és az éghajlati viszonyoktól függően, gondosan megtervezetten kell végrehajtani. A geoszintetikus anyagokat vagy acélhálókat tartalmazó pályaszerkezetek tervezésére általában még nincsenek megbízható modellek, ezért e jelentés készítői szükségesnek tartják, hogy egész Európából, vagy akár más kontinensekről is információkat gyűjtsenek a különböző terhelésű erősítő rétegekről, azok jellegzetes meghibásodás-típusairól, valamint felmérjék, hogy alkalmaznak-e tervezési és leromlási modelleket. [Gáspár – Szabacsi, 2007]

I. Rész: A beépített rácsok és aszfaltrétegek kölcsönhatásának kísérleti vizsgálata - Teljesítmény alapú vizsgálatok

A következőkben azon vizsgálati-, mérési módszereket mutatom be, amely a különféle aszfalthálók-, rácsok, kompozitok teljesítmény értékelését szolgálják, amelyek alapján az alapvető funkcionális célok ezen anyagok esetében megállapíthatóak. A vizsgálati terv meghatározásánál azokat a vizsgálati eljárásokat vettem figyelembe, amelyekkel a legelterjedtebbek az aszfaltmechanikai tulajdonságok meghatározására. A teljesítmény alapú vizsgálatok, ahogy a neve is jelzi, az aszfaltok teljesítményét kutatják különböző feltételek – terhelése, hőmérsékleti viszonyok – mellett. Nyilvánvaló, hogy az aszfaltrács hatékonyságának a megállapításához szükség van arra, hogy ezeket a vizsgálatokat, az aszfaltrács beépítése mellett elvégezzük.

4. Próbatess készítés és rács beépítés

A dolgozatban felsorolt és elvégzett vizsgálatokat 2003 és 2010 között végeztük el. A próbatess készítés eljárását 2003-ban alakítottuk ki. A felhasznált aszfaltanyagok típusa többször változott, de igyekeztünk az útépítésben leggyakrabban használt típusfajtákat használni a kutatásban. 2003-ban AB-12 és AB-12/F-es 2007-ben pedig AB-11/F és mAB-11/F-es, illetve a hajlításhoz AB-8-as anyagokat használtunk. A 2008, 2009-es évben igyekeztünk minél „gyengébb” minőségű aszfaltot beszerezni, a jobb modellezhetőség miatt, ezért ebben az időszakban AC-11-es aszfaltot használtunk a kísérletekhez. A 2010-es évben pedig egy jó minőségű SMA-11mF, és AC-22/F típusú aszfaltkeveréket használtunk fel a próbatess készítéshez.

A rácsok próbatesszerekre történő ragasztását minden esetben K-EA 60 (70/100) bitumenemulzióval hajtottuk végre. A szövethordozós aszfaltrács technológia utasítása szerint a felhordott bitumenemulzió mennyiségét úgy kellett megválasztani, hogy a bitumenemulzió törése után $1,1 \text{ kg/m}^2$ bitumen maradjon vissza. Ez a beépítési technológia azonban hidraulikus kötőanyagú rétegre való ragasztásra vonatkozik, a próbatess gyártás során azonban aszfalt felületre kellett mind a bitumenemulziót, mind az aszfaltrácsot felhordani. Ez utóbbi esetben az $1,1 \text{ kg}$ bitumenemulzió igen soknak bizonyult, így a felhordott bitumenemulzió mennyiségét a táblázatnak megfelelően 130 g/m^2 mennyiségre csökkentettük.

A technológiai utasítást értelmezve, laboratóriumi körülmények között ezt a megfelelő mennyiségű emulziót felületre ecseteléssel hordtuk fel. Utána helyeztük el a próbatesten a különböző típusú hálót.

A szövet hordozó nélküli aszfalterősítő rácsok (S&P és GlasGrid) bitumennel vannak átitatva, ennek megfelelően „öntapadók”, az alkalmazástechnikai leírás szerint, azonban ebben az esetben is bitumenes ragasztás (150-200 g/m²) lenne szükséges. A laboratóriumban a rács pászmáiba itatott bitumen melegítését csak a felületre helyezés után tudtuk hőlégfúvóval elvégezni (helyszíni beépítés esetén is a beépítőgép letekerés közben olvasztja meg a bitument).

A laboratóriumunkban általánosan használt lap próbatest a keréknyomvályú-képződési vizsgálat méretének megfelelően 200 x 305 mm-es, magassága 40 illetve 80 mm. A próbatesteket vibrációs tömörítéssel állítottuk elő, olyan módon, hogy az előzetesen elvégzett Marshall vizsgálatok alapján a próbatestek 100%-os tömörségéhez szükséges anyagmennyiséget mértük be, és ezt addig vibráltuk, míg a próbatestek a kívánt magasságot elérték. A rács beépítése miatt a szokványos készítési módszertől eltérő módon gyártottuk le a próbatesteket. Először egy 4 cm magas lapot készítettük el, majd erre rögzítettük a vizsgált hálótípust. Az alsó 4 cm-es próbatest keverék típusa a vizsgálat módjának megfelelően változott, melyet a továbbiakban részletezünk. A rács rögzítése után, második vibrációs menetben építettük be az újabb 4cm aszfaltréteget. Az előkészítés során a próbatestből mind annak a hosszából, mind pedig a szélességéből kb. 5-5 mm-t levágtunk. Az egyes alkalmazott vizsgálatokhoz ezeket a próbatesteket használtuk fel, a szükség szerinti méretre vágva azokat. A próbatest készítéshez mindig keverőtelepen előállított anyagot használtunk.

A laboratóriumunk a **4.1. táblázatban** szereplő rácsokat vizsgálta. A különböző kutatásokban, különböző számú és fajtájú termékeket vizsgáltunk az alábbiakban felsorolt fajtákból. A felhasznált aszfaltrács típusokat minden egyes vizsgálat bemutatása során ismertetni fogom.

Típus	Szakítószilárdság
Roadtex GR-G50-es szövet hordozós aszfaltrács	50 kN/m
Roadtex GR-G100-as szövet hordozós aszfaltrács	100 kN/m
Roadtex GR-G200-as szövet hordozós aszfaltrács *	200 kN/m
S&P Glaspghalt G aszfaltrács	120 kN/m
S&P Carbophalt G aszfaltrács*	200/120 kN/m
ALFA-MESH GR-G szövet hordozós aszfaltrács	
ARTER GTSA 50-50-35 aszfaltrács	50 kN/m
ARTER GTSV 50-50-35 szövet hordozós aszfaltrács	50 kN/m
GlasGrid 8501 (12,5 mm x 12,5 mm rácsméret)	100 kN/m
GlasGrid 8502 (12,5 mm x 12,5 mm rácsméret)	100/200 kN/m
GlasGrid 8511 (25 mm x 25 mm rácsméret)	100 kN/m
GlasGrid CG100 (25 mm x 25 mm rácsméret) szövet hordozós aszfaltrács	100 kN/m

4.1 táblázat: A kutatásba bevon rács típusok

5. A háló/rács együttdolgozása az aszfaltrétegekkel

Az aszfaltrétegek közötti együttdolgozás kérdése erősítés nélküli esetben is nagyon fontos kérdés, hát még akkor, amikor egy az aszfalttól eltérő, idegen anyagot teszünk be a rétegek közé. A nemzetközi szakirodalom az együttdolgozás minőségének a meghatározására az úgynevezett Leutner-féle nyírás vizsgálatot alkalmazza, melynek vizsgálati eredményeit én is ismertetem az alábbiakban. Ugyanakkor segít a rétegek közötti kapcsolat feltárásában a feltépő vizsgálat is, de véleményem szerint az együttdolgozás minőségéről a legjobb, és leginformatívabb adatot a BME Út és Vasútépítési Tanszéken kifejlesztett elcsúszás vizsgálat adja, mert ott a nyíróerőn túlmenően merőleges nyomásnak is ki van téve az erősített aszfaltszerkezet, és ez modellezi a legjobban a valóságot.

Az alábbiakban a feltépés és elcsúszás vizsgálat eredményeit is bemutatom.

5.1. Feltépés vizsgálat

A feltépés vizsgálat két aszfaltréteg kapcsolatát, a rétegek közötti együttdolgozás minőségét jellemzi és információt ad a felületre merőleges tapadó szilárdságról.

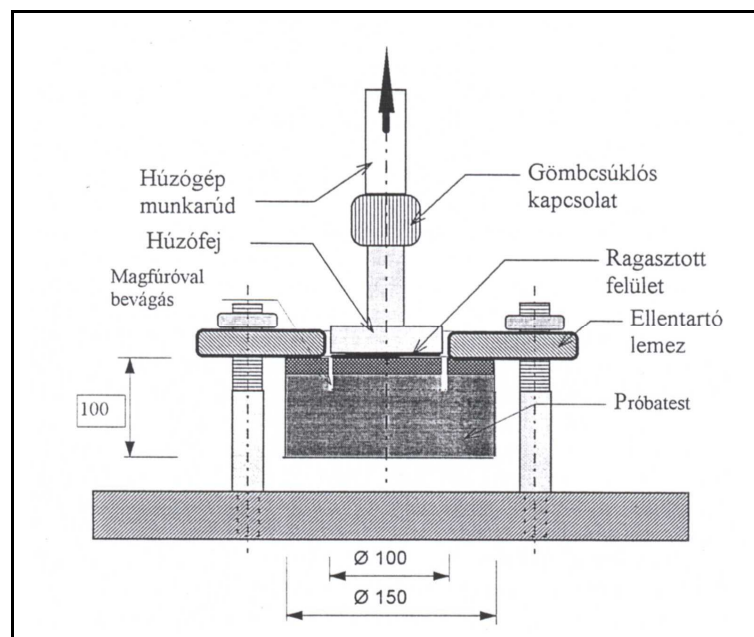
A vizsgálat eredeti célja az volt, hogy feltárja a vékonyaszfalt bevonat és az alatta lévő burkolat kapcsolatának minőségét, az úthasználói szempontból egyik legfontosabb jellemzőt, a felületre merőleges tapadószilárdságot. Elsősorban a modifikált bitumenemulziós kevert felületi bevonatokhoz, de szigetelési rendszerek vizsgálatára is alkalmas, a BME Útlaborban 1997-ben kifejlesztett laboratóriumi vizsgálat.

5.1.1. A mérési eljárás ismertetése

A vizsgálatot az útburkolatból kifúrt, legalább 80 mm vastagságú $\varnothing 150$ mm fúrt magmintán lehet elvégezni, melynek közepén (koncentrikusan) egy $\varnothing 100$ mm magfúróval a bevonat (a vizsgált réteg) vastagságát 5-10 mm-el meghaladó mélységű fúrást kell készíteni.

Amennyiben a magminta vastagsága nagyobb, erre a méretre szükséges levágni, a vizsgáló eszköz méretei miatt. A magminta forgalom által járt felületét a $\varnothing 100$ mm magon belül csiszolással meg kell tisztítani a ragasztó felkenése előtt. A ragasztó felkenése után a teljes

magmintát, annak belső \varnothing 100 mm megfűrt magrészét a feltépő fejre helyezik. A ragasztó nem kerülhet a vágatba és a húzófej külső palástjára. A próbatestet, a ragasztó előírt szilárdulási ideje után a feltépő fejjel együtt temperálják a $+10 \pm 0,5$ °C vizsgálati hőmérsékleten, ha előzőleg laboratóriumi hőmérsékleten volt, legalább 3 óra időtartamig. Ezután a próbatestet a feltépő fejjel a feltépő készülékbe helyezve (26. ábra) 200 N/sec állandó terhelési sebességgel (ami ebben az esetben megfelel $0,025$ N/mm² /s feszültség növekedési sebességének) növelik a húzóerőt a felszakadásig. A vizsgálatok az MTS- ÚT berendezésen kerültek végrehajtásra, ahol ez a terhelési sebesség beállítható. Az alábbi, **5.1. ábrán** a feltépéshez használt vizsgálófej rajzát láthatjuk. [Dr. Török Kálmán, 2000]



5.1. ábra: A feltépő fej sematikus ábrája

Számos feltépés vizsgálatot végeztünk a közelmúltban, köztük volt olyan, ahol laboratóriumban elkészített próbatesteken végeztük el a vizsgálatokat, és volt olyan, amikor a több éve beépítésre került pályaszerkezetből kivett mintán végeztük el a kísérletet. Az együttműködés jelentőségét jól szemlélteti a BME Út és Vasútépítési tanszék 2006 tavaszán elvégzett feltépés vizsgálata, mely a kátyúzás során felmerülő együttműködési problémákra kívánt választ adni. A 4 cm vastag AB-12 –es jelű aszfaltra zsirátoros tömörítéssel 3,7 cm vastag öntött aszfalt burkolatot építettek fel, a két aszfaltréteg közötti ragasztóanyag tért el az egyes minták esetében. Az első esetben poros felületre került az öntött aszfalt, a második esetben bitumenemulziót, a harmadik esetben forró bitument használtunk a leragasztásra. A vizsgálatok elvégzése nagyon meggyőző eredményt mutatott, hiszen a poros leragasztatlan

felületre esetében mérhető a legalacsonyabb szilárdsági érték (1,34 N/mm²). Emulzióval (1,96 N/mm²), illetve meleg bitumenes (2,23 N/mm²) felületi kenéssel a feltépési ellenállás 46-67%-kal növekszik. [Dr. Fi I, 2006] Ez a vizsgálat jól szemléltette a megfelelő együttdolgozás fontosságát, illetve azt, hogy a milyen nagy jelentősége van a két aszfaltréteg közötti „idegen anyag” jelenlétének (por vagy emulzió).

5.1.2. Feltépés vizsgálat aszfaltrács beépítésével készült próbatesteken

A rácsoknak a rétegek együttdolgozásával kapcsolatos szerepének vizsgálatához először 2004-ben végeztem laboratóriumi feltépő vizsgálatokat. Az alábbi **5.1. táblázatban** mutattam be az AB-12-es aszfaltrétegek közé beépített rácsbetéttel készült próbatestek feltépés vizsgálati eredményét. (A dőlt és a normál betűvel szedett próbatestek ugyanazon anyagból, de nem egy időben készültek.):

Próbatest azonosító	Szakítószilárdság N/mm ²	Hol vált szét a fűrt minta?
S&P Glasphalt G rács (AB-12 aszfalt közé építve)	1,35	100%-ban a 2. réteg határán
S&P Glasphalt G rács (AB-12 aszfalt közé építve)	0,79	100%-ban a 2. réteg határán
Roadtex GR-G100-as rács (AB-12 aszfalt közé építve)	0,91	100%-ban a 2. réteg határán
Roadtex GR-G100-as rács (AB-12 aszfalt közé építve)	0,31	100%-ban a 2. réteg határán
<i>ARTER GTSA 50-50-35, aszfaltrács</i>	0,91	100%-ban a réteghatáron
<i>ARTER GTSV 50-50-35, szövehordozós rács</i>	0,51	100%-ban a réteghatáron
Nincs rács a 2 rétegű AB-12 aszfalt között	1,01	
Nincs rács a 2 rétegű AB-12 aszfalt között	1,31	
<i>Nincs rács a 2 rétegű AB-12 aszfalt között</i>	1,40	

5.1. táblázat: Feltépés vizsgálatok eredményei

A 2004.-es vizsgálatban a szövetes Roadtex GR-G100-as és az ARTER GTSV aszfaltrácsot valamint az S&P Glasphalt G és ARTER GTSA hordozóanyag nélküli rácsot vizsgáltuk. A rács nélküli referencia próbatest és az S&P próbatest értéke közel megegyező volt, és messze az elvárt $1,0 \text{ N/mm}^2$ érték felett maradt. A szövethordozó anyagú Roadtex aszfaltrács átlagértéke viszont jóval az elvárt érték alatt maradt. A hordozóanyag nélküli ARTER GTSA mind a szövethordozós ARTER GTSV háló rosszabb eredményt produkált a rács nélküli referencia próbatestnél. Az is egyértelműnek látható, hogy a szövethordozós aszfaltrács adja a rosszabb eredményt. A két aszfaltréteg közötti elválás annyiban volt érdekes, hogy a feltépés után a rács a felső aszfaltréteghez tapadva vált el, mert a melegen rátömörített aszfaltréteghez volt jobb tapadása. [Almássy-Dr. Ambrus-Dr.Fi-Bocz, 2005]

A laboratóriumi minták szétválasztása után kíváncsi voltam arra is, hogy valós körülmények között, azaz útpályaszerkezetből kifúrva milyen feltépés vizsgálati eredményeket kaphatunk. A rácsnak a felső aszfaltréteghez történő tapadása tömörítése, laboratóriumi modellalkotási problémákat is felvetett, vibróasztalon történő tömörítéssel ugyanis nem lehet pótolni a beépítésnél alkalmazott hengerek statikus súlyát.

Fúrásokat végeztünk az M1-es autópálya 130+000 és 130+500 km szelvényei között, és innen aszfaltmintákat vittünk be a laboratóriumunkba feltépés vizsgálat céljából. A szakaszon szövethordozó anyagú háló volt beépítve. A mintákon azonban nem tudtunk vizsgálatokat végezni, mert már a fúrásnál szétváltak a réteghatáron a hálónál a minták. Véleményem szerint ez a tény is a szövetes háló szétválasztó hatását mutatja be.

Szintén az M1-es autópálya 130+500 és 131+000 Km szelvényei közül tudtunk behozni S&P, hordozóanyag nélküli hálós mintát. Ezen fúrt minták vizsgálata során egy esetben (a 76-os mintánál) kiváló 1 N/mm^2 feletti értéket kaptunk, egy esetben pedig, nem megfelelő $0,4 \text{ N/mm}^2$ alatti értéket kaptunk.(A fúrt minták ZMA-12-es minőségű kopórétegből és K-12-es kötőrétegből álltak mind az öt minta esetén.) A többi három mintánál az értékek a köztes, megfelelő tartományban voltak. Érdekesnek mondható továbbá az is, hogy három esetben a minták nem a réteghatáron, a rácsnál, hanem a réteghatár alatt váltak szét.

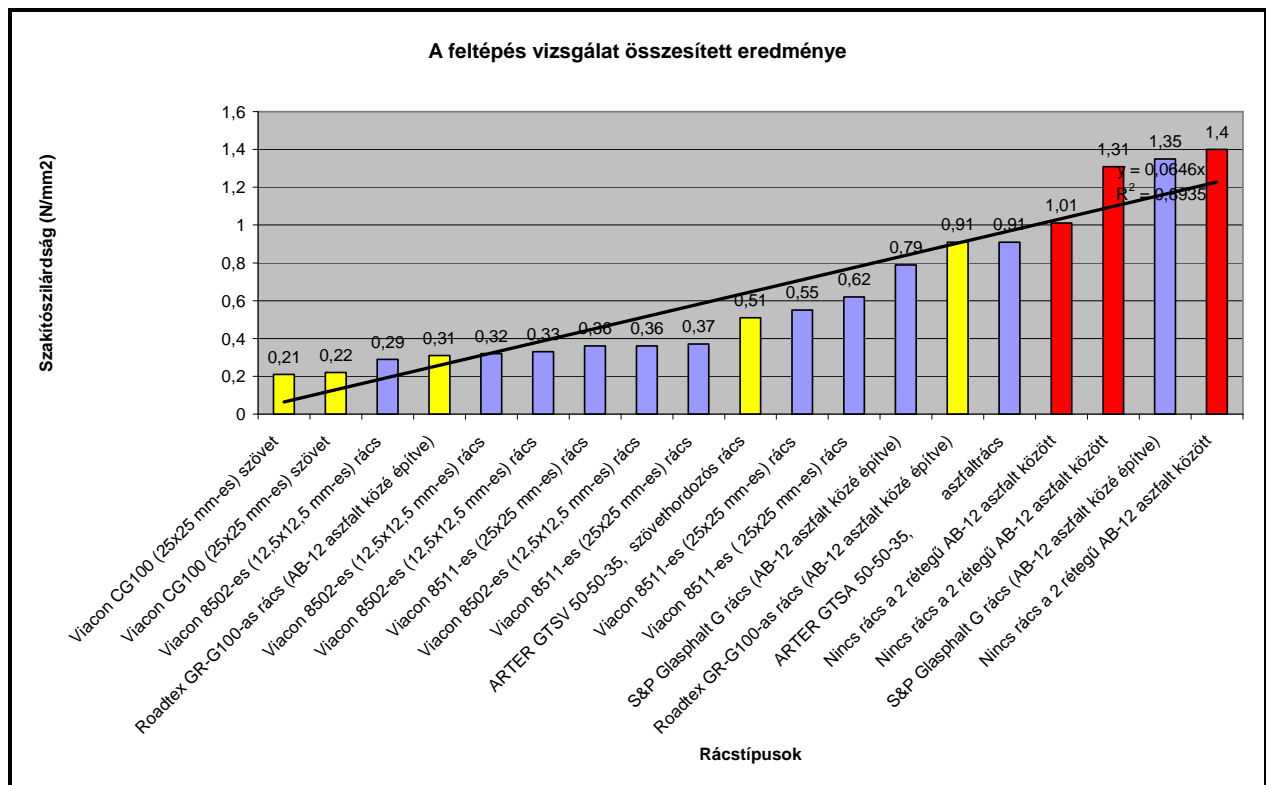
A fővárosi Istenhegyi útról is történt mintavétel, a feltépés vizsgálati eredmények az M1-es autópálya eredményeihez hasonló értéket adnak, és ebben az esetben sem érik el a konvencionális aszfaltrács nélküli két aszfaltréteg között átlagosnak mondható $1,0 \text{ N/mm}^2$ -es értéket.

A feltépés vizsgálat során újabb rácstípusok bevonásával akartam pontosítani az eredményeket, olyan tekintetben hogy a rácsok lyukméretének a nagyságát illetve a szövetes hordozóanyaggal készült rács viselkedését kívántam újra kielemezni. Az AC-11-es

aszfaltréteg közé GlasGrid 8511-es számú, 25x25 mm lyukméretű rácsot, a 8501-es, 12,5x12,5 mm lyukméretű rácsot és a szintén GlasGrid termék CG100 25x25 mm lyukméretű szövethordozós rácsot építettük be és végeztük el a vizsgálatot. Az eredmények egyértelműen igazolták a korábbi vizsgálatok feltételezését, hogy a szövethordozós rács adja az szövet elválasztó hatása miatt a legrosszabb szakítószilárdsági eredményt. Ebbe a tendenciába illik a kis lyuk méretű, 12,5x12,5 mm-es rács eredménye is, hiszen a kisebb lyukméret miatt rács nem képes az aszfaltkeverék kőváza közé beékelődni. A GlasGrid rácsokon végzett feltépő vizsgálatok részletes eredményssora a **Mellékletben** található.

5.1.3. Feltépés vizsgálati eredmények összefoglalása

Az alábbi diagramon összefoglaltuk az összes feltépés vizsgálat eredményét. Az ábrán sárgával jelöltük a szövethordozós rácsok eredményét, kékkel a hordozóanyag nélküli rácsok eredményét és pirossal a rács beépítés nélküli próbatestek eredményét. (A diagramon nem tüntettük fel a burkolatból kivett fűrt minták feltépés vizsgálati eredményeit.)



5.2. ábra. Feltépő vizsgálatok eredményének összefoglalása

A fenti ábra alapján az alábbi következtetéseket vontam le a feltépés vizsgálat eredményeiből:

- A szövetes hordozóanyagú próbatestek adják a legrosszabb szakítószilárdsági eredményt. Az elválasztó hatás itt érvényesül a legjobban.
- A rácslyuk mérete befolyásolja a feltépésnél fellépő szakítószilárdságot, hiszen átlagosan 29%-al rosszabb eredményt kaptam a 12,5x12,5 mm-es rácslyuk méretű rácsoknál, mint a 25x25 mm-es lyukméretű rácsok esetében.
- A fűrt minták a jobb tömörség miatt minden esetben jobb feltépési szakítószilárdságot adnak.
- Az a feltételezésem is igazolást nyert, hogy a rács nélkül készült próbatestek produkálják a legjobb szakítószilárdsági eredményeket. A hordozóanyag nélküli rácsok képesek megközelíteni ezt az eredményt.

5.2. Rétegek közötti elcsúszás vizsgálata

5.2.1. Mérési eljárás ismertetése

A rétegek közötti együtt dolgozást illetve együtt nem dolgozást támasztja alá az úgynevezett elcsúszásvizsgálat is, mely vizsgálatot elsősorban hídszigetelések és az aszfaltszerkezet tapadásának megállapítására használnak a gyakorlatban.

E vizsgálat módszer feladata főként a hídszigetelési rendszerek rétegei közötti legkisebb nyírószilárdság meghatározása, 30° esésű lejtőre helyezett, - a rendszer rétegeiből felépített próbatesten,- a lejtővel párhuzamos csúsztató és a felületre merőleges normál erővel. A vizsgálati módszer az osztrák RVS 15.361 hídszigetelés építési irányelvet követi.

Fogalom meghatározások és a vizsgálat lényeges elemei:

- *A rétegek közötti elcsúszás vizsgálata* egy többrétegű rendszer, 200×150 mm alapterületű és legfeljebb 110 mm összvastagságú próbatesten, +50 °C-on, 30°C-os lejtőn, 50 mm/perc előtolású függőleges erővel létrehozott, a lejtővel (a rétegfelületekkel) párhuzamos erő által okozott elcsúszás a réteghatáron.
- *A rendszer rétegek közötti nyírószilárdsága* az elvégzett vizsgálat eredményeként mért maximális csúsztató erő és az elcsúsztatott felület hányadosa: τ [N/mm²].
- *Az elcsúsztatási modulus* a maximális csúsztató erő és annak létrejöttéig mért erő (lejtő) iránytű réteg elcsúszás alapján számítva.

- A többrétegű 305×200 mm méretű próbatestet kettévágva, két 150×200 mm méretű vizsgálatra alkalmas próbatest jön létre. Az előkészített próbatesteket a vizsgálat előtt legalább 20 órán keresztül +50 ± 1°C hőmérsékleten kell kondicionálni.
- Az +50 °C hőmérsékletű próbatestet az ugyanilyen hőmérsékletű klímaterben lévő nyírókészülékbe úgy kell elhelyezni, hogy a 200 mm hosszúságú oldal a lejtő irányában, és a függőleges erő tengelyében legyen a próbatest középpontja a várható elcsúszási síkban.

A leggyengébb kapcsolatú rétegek közötti elcsúszást, az 50 mm/perc előtolási sebességű nyomófej közvetítésével átadott függőleges erő által létrehozott lejtőirányú ($0,5 \times F$) csúszató erő okozza, a felületre merőleges normál erő ($0,888 \times F$) mellett. A felső elcsúszó rétegek vízszintes elmozdulása a függőleges elmozdulásnak 1,73 szoros, a lejtő irányú elmozdulás a függőleges kétszerese. A vízszintes elmozdulás lehetőségét a nyomófej biztosítja. A függőleges erőt (F) és a lejtőirányú elmozdulást (csúszást) a vizsgálat folyamán folyamatosan rögzítik.

Rétegek közötti legkisebb nyírószilárdság:

$$\tau = \frac{0,5 \times F_{\max}}{a \times b}$$

Ahol F_{\max} : a maximális nyomóerővel [N]

a, b: a nyírt felület oldal méretei [mm]

Elcsúszási modulus:

$$G_e = \frac{0,5 \times F_{\max}}{a \times e_{\max}}$$

Ahol **a**: próbatest lejtőirányra merőleges oldalhossza (150 ± 5 mm)

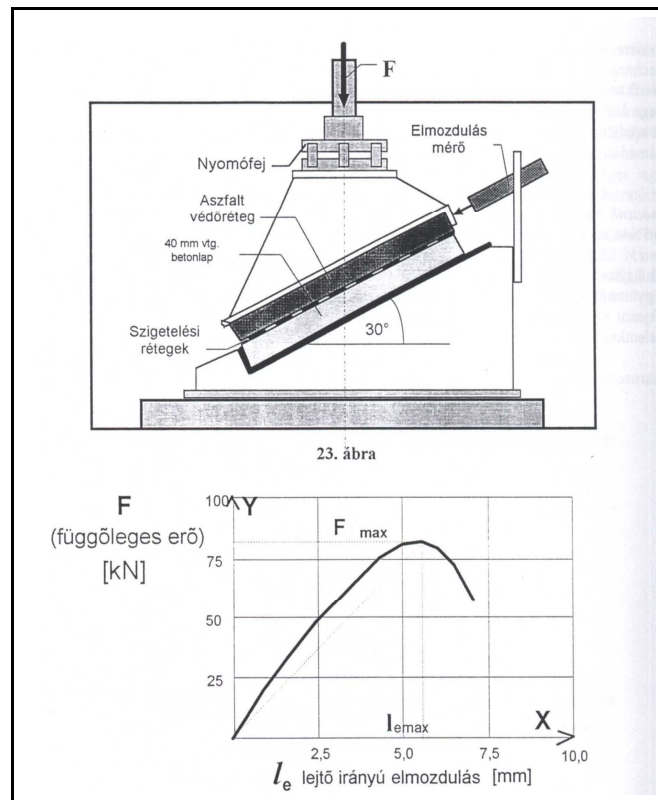
e_{\max} függőleges nyomóerő és a lejtővel párhuzamos elcsúszás egyidejű mérési görbéjéből erőhöz tartozó elcsúszása.

A rétegek közötti elcsúszás vizsgálat eredményét legalább két párhuzamos számtani átlagában kell megadni, ha a két érték eltérése nem haladja meg a következő értékeket:

Nyírószilárdság: $\Delta\tau = 0,20 \text{ N/mm}^2$

Elcsúszási modulusnál: $\Delta G_e = 5 \text{ N/mm}^2$

Az alábbi képen látható a vizsgáló berendezés és a vizsgálati görbe sematikus ábrája.



5.3. ábra: Az elcsúszás vizsgálatához alkalmazott fej

A vizsgálat célja meghatározni azt a maximális nyíróerőt, ami a két aszfaltréteg között a felületre merőleges és azzal párhuzamos igénybevétel során fellép. A vizsgálat annyiban más, mint az egyébként ismert réteghatáron végzett nyírás vizsgálat, hogy itt a felület nyomva is van.

Bár a vizsgálati eljárást elsősorban hídszigetelések tesztelésére fejlesztették ki, véleményem szerint tökéletesen alkalmazható aszfaltrácsok együtt dolgozásának a vizsgálatára is. Az eljárás nagy előnye a többi réteg együttdolgozást mérő berendezéshez, hogy két irányú igénybevétel éri a szerkezetet egy függőleges nyomó erő és egy a réteg határral párhuzamos csúsztató vagy nyíró erő, ráadásul a próbatest többi vizsgálatához képes nagyobb méretben, a valóságot jobban modellezve kerül tesztelésre.

5.2.2. Elcsúszás vizsgálat aszfaltrács beépítésével készült próbatesteken

Amint az a fenti leírásban szerepel a vizsgálatot 50°C hőmérsékleten, a 200x300 mm lapot kettévágva 200x140 mm-es próbatesten végeztük. A **5.2. táblázatban** az AB-12 réteg közé beépített S&P, Roadtex és ARTER rácsok vizsgálati eredményeit közlöm.

Különböző rácsbetétes próbatestek	Nyírómodulus GE [N/mm ²]	Nyíró-átlag szilárdság τ [N/mm ²]
<i>Rács nélkül</i>	52,0	1,08
<i>Roadtex</i> <i>GR-G50 szövet hordozós aszfaltrács</i>	36,4	0,75
<i>Roadtex</i> <i>GR-G100</i> <i>szövet hordozós aszfaltrács</i>	23,1	0,34
<i>S&P</i> <i>Glasphalt G</i> <i>rács</i>	48,6	1,32
<i>Rács nélkül</i>	26,1	1,52
<i>ARTER</i> <i>G TSA 50-50-35-ös</i> <i>rács</i>	20,39	1,19
<i>ARTER</i> <i>G TSV 50-50-35-ös szövet hordozós</i> <i>rács</i>	13,7	0,79

5.2. táblázat: Elcsúszás vizsgálati eredmények AB-12 réteg közé beépített aszfaltrácsoknál

Az eredményeket összefoglaló fenti táblázatból jól látszik, hogy a szövet hordozós rácsok sokkal rosszabb nyírószilárdsági és nyíró modulus értékeket produkáltak, mint a hálónélküli szerkezetek, viszont a hordozóanyag nélküli rácsok jó eredményt mutatnak. Az elvárt 1,0 N/mm²-es nyírószilárdsági érték felett teljesítettek a rács nélküli és hordozóanyag nélküli rácsos próbatestek. A legjobb nyírószilárdsági eredményt a rács nélküli próbatestek produkálták, viszont ettől alig maradnak el a hordozóanyag nélküli rácsos próbatestek. A szövet hordozós minták azonban messze elmaradnak az elvárt értéktől.

Újabb elcsúszás vizsgálatokat végeztünk S&P hordozóanyag nélküli és Roadtex szövet hordozós rácsokon, illetve bevontuk a vizsgálatba a GlasGrid 8501 és 8511-es rácsait,

valamint egy acélrács fajtát is melyeket AC-11-es aszfaltréteg közé építettünk be. Az **5.3. táblázatban** található eredmények alapján itt is egyértelműen kijelenthető, hogy bármilyen típusú szövetes hordozóanyagú aszfaltrács elválasztó réteggé működik, és komolyan rontja az együttdolgozást, a nyírási ellenállást. A hordozóanyag nélküli aszfaltrácsok viszont ennél a vizsgálati sornál is gyakorlatilag azonos eredményeket produkáltak a háló/rács beépítés nélkül készült próbatestekkel. Az eljárás során újdonságnak számított, hogy bevontam a vizsgálati sorba egy kisebb 12,5x12,5 mm lyukméretű rácsot, és egy acélrácsot. A kisebb lyukméretű rács alkalmazásával azt kívántam megvizsgálni, hogy a rács mennyire képes beágyazódni a kőváz közé, mennyire képes az együttdolgozást biztosítani. Az acélrács és a kis lyukú aszfaltrács esetében a nyírószilárdsági eredmények a referencia próbatesttől kicsit elmaradó, de nagyjából azonos értéket mutatnak. (A kisebb eltérés csak az elcsúszás mértékében adódik.)

Próbatest neve	Nyírószilárdság (N/mm ²)	Elcsúszás mértéke maximális erőnél	Nyíró modulus értéke (N/mm ²)
2008 év vége			
„A” jelű, hordozóanyag nélküli üvegszál aszfaltrács	0,92 N/mm ²	18,2%	50,5 N/mm ²
„B” jelű, hordozóanyag nélküli szénszál aszfaltrács	0,87 N/mm ²	15,0%	59,03 N/mm ²
„C” jelű szövetes, üvegszál aszfaltrács	0,60 N/mm ²	31,3%	19,19 N/mm ²
„D” jelű szövetes, szénszál aszfaltrács	0,52 N/mm ²	40,6%	12,85 N/mm ²
Nincs rács - referencia	0,88 N/mm ²	18,4%	48,69 N/mm ²
2009 év eleje			
Sűrű duplaszál aszfaltrács (GlasGrid 8502)	0,83 N/mm ²	23,5%	36,31 N/mm ²
Ritka duplaszál aszfaltrács (GlasGrid 8511)	0,88 N/mm ²	24,9%	42,71 N/mm ²
Acélrács	0,88 N/mm ²	21,9%	41,16 N/mm ²
Nincs rács - referencia	0,88 N/mm ²	16 %	55,69 N/mm ²

5.3. táblázat: Elcsúszásvizsgálat különböző GlasGrid aszfaltrácsokon, AC-11-es keverék közé beépítve

5.3. Leutner-féle nyírásvizsgálatok

5.3.1. Vizsgálat elve, nemzetközi példák

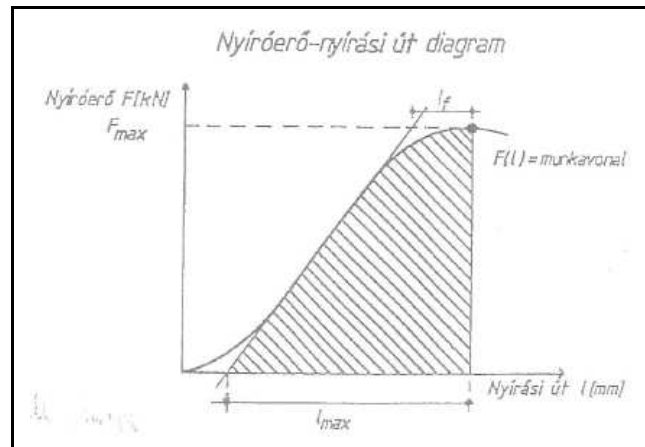
A réteggel párhuzamos közvetlen nyírást vizsgáló készüléket Németországban Prof. Dr. Ralph Leutner 1979-ben fejlesztette ki. A napjainkban alkalmazott vizsgálatokat az EMPA svájci anyagvizsgáló intézet által módosított változaton végzik. A módosított LPDS vizsgálati eszköz illeszkedik egy közönséges szervohidraulikus Marshall törőgéphez, és lehetséges 150 mm átmérőjű magminták vizsgálata is. A svájci szakemberek célja különböző aszfalt-betonrétegek között lévő közbenső réteg tulajdonságainak és a víznek a tapadásra gyakorolt hatásának vizsgálata volt. Egy másik vizsgálatosorozat régi beton pályaszerkezetek aszfalttal, fémráccsal vagy üvegszálalás műanyag ráccsal készített, illetve anélküli közbenső bitumenes réteg megerősítésével történő felújítására fókuszált. A vizsgálati eredmények kiértékelésekor hangsúlyozták a nyírási teljesítmények fontosságát, illetve hogy nem megfelelően beépített bitumenes feszültségelnyelővel bevont hálók súlyos problémákhoz vezethetnek.

A burkolatból fúrt kétrétegű mintát a palástra merőleges irányban a réteghatáron terheljük és meghatározzuk a réteg leszakadásához erőt (legnagyobb nyíróerő), valamint a réteg leszakadásakor fellépő elmozdulást (legnagyobb nyírási út). [ÚT 2-3.313 *Útügyi Műszaki Előírás*] Legalább 60kN erő mérésére alkalmas, $\pm 3\%$ leolvasási pontosságú, hitelesített, erőmérővel ellátott gép, amelynek előtolási sebessége 50 ± 3 mm percenként. A nyomógép tartozéka a középpontosan elhelyezett nyírófeltét, amely két párhuzamosan vezetett nyírópofából és a próbatest nem vizsgált részeinek a vizsgálat alatt elmozdulás mentes rögzítésére szolgáló tartószerkezetből áll. A felső mozgó félháj önsúlyát a vezető rúdhoz kapcsolódó két acélrugó kompenzálja.

Az alábbi képeken látható a Leutner-féle vizsgálatához szükséges nyírófeltét és a nyíróerő-nyírási út diagram, amelyet a vizsgálat kiértékeléséhez használunk.



5.1. kép: Leutner féle nyírófeltét



5.4. ábra: Nyíróerő – nyírási út diagram

A legnagyobb nyírási út a vizsgálat során regisztrált erő-elmozdulás diagramból határozható meg. A diagramnak azon tartományában, ahol a nyírási út a nyíróerővel lineárisan változik, a diagramra egyenest fektetünk. Az egyenes l_0 kezdőpontja és az F_{max} elmozdulás irányú vetülete közötti távolság a legnagyobb nyírási út (l_{max}). A vizsgálati eredményekből többek még az alábbi jellemzők számíthatóak ki:

$$\text{Nyírási merevségi modulus: } M_m = \frac{F_{max}}{L_{max}} \text{ (kN / mm)}$$

$$\text{Nyírószilárdság: } \tau_{max} = 7,55 \times 10^2 \times F_{max} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

Svájci kutatók bemutatták, hogy a rétegek közé építetett háló és rács 1/3-1/5-re csökkenti a rétegek együtt-dolgozását jellemző nyírószilárdságot, a cikkben azonban nem került azonban részletezésre, hogy milyen hordozó anyagú volt a háló. [Raqab, M. N. Partl, 2002]

Egy másik svájci vizsgálat szintén a kötési nyíróerő csökkenését jelzi az S&P Carbophalt rácsok beépítésénél is. A keréknyomvályú-képződési vizsgálat után elvégzett Leutner-féle nyírásvizsgálat azt mutatta ki, hogy míg a háló nélküli próbatetek átlagos nyíróerő értéke 21 kN, addig a 4 cm mélységben elhelyezkedő szénszálal hálóval készült szerkezet 13,37 kN, 3 cm mélységben lévő 10,32 kN, a 3 cm mélységben, de előzetesen lemart felületre helyezett hálóval pedig 18,33 kN értékre adódott. Az értékekből egyértelműen kijelenthető, hogy az erősítő rács jelenlétében fellazulnak az aszfaltrétegek közötti határfelületek, és ez eredményezi a tapadásnál fellépő nyíróerő csökkenését. A marás után elhelyezésre került háló

magasabb - a referencia próbatesttel majdnem megegyező – értéke igazolja, hogy az érintkezési felület előkezelése javítja a két réteg közötti tapadást, és ezáltal növeli a szénszálás megerősítés hatékonyságát.

A lengyel szabályozás szintén foglalkozik a nyírási tulajdonságokkal és „A geotermékek útburkolatok aszfaltrétegeinél történő alkalmazásai” [66/2004-es számú füzet, *IBDIM, Varsó, 2004*] című kiadvány azt írja, hogy az aszfaltburkolat tartóssága érdekében az egyes aszfaltrétegek közötti kapcsolódások Leutner szerinti nyírószilárdsága el kell, hogy érje a legalább 1,3 MPa értéket.

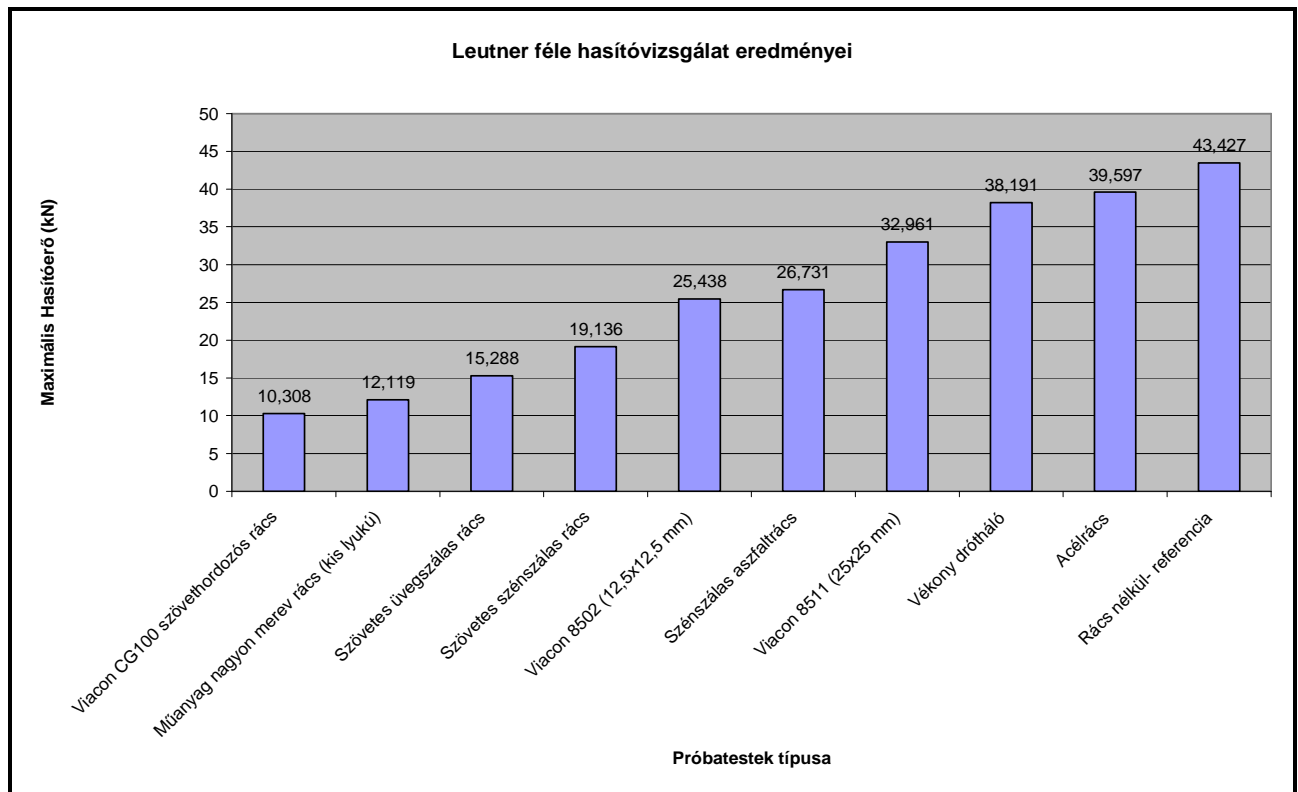
Hollandiában a Delft-i Műszaki Egyetemen készítettek véges elem modellt a Leutner-féle vizsgálathoz és vele párhuzamosan laboratóriumi vizsgálatot is végeztek. Az eredmények azt mutatták, hogy a réteghatáron vagy határfelületen – esetünkben a rács mentén – egyenletesen oszlik el a nyírófeszültség, amely az elválasztó erősítő réteg alacsony merevségi értékének tudható be. A nyírási merevsége a határfelületen lévő rácsnak vagy bitumenes rétegnek a réteg vastagságának a csökkentésével arányosan növekszik. Az alkalmazott bitumen merevségi modulusának a növelése szintén hozzájárul a határfelületi erősítőréteg nyírási merevségének a növeléséhez. [*A.H. de Bondt, 1999*]

5.3.2. Leutner vizsgálat rácsbetéttel készült K-22-es aszfaltréteg esetében

A BME Út és Vasútépítési Tanszéken, az általam belső konzulensként vezetett, 2009 nyarán elkészült diplomamunkában [*Márton Miklós, 2009*] is végeztünk Leutner-féle nyírásvizsgálatot különböző rács beépítéssel készült aszfaltszerkezeten. A vizsgálatot K-22-es aszfaltrétegen végeztük és az alábbi típusú rácsokat építettük be a rétegek közé:

- Roadtex GR-G100 szövethordozós üvegszálás rács
- Roadtex GR-G200 szövethordozós szénszálás rács
- S&P Carbophalt G szénszálás, hordozóanyag nélküli aszfaltrács
- GlasGrid CG100 (25 mm x 25 mm rácsméret) szövetes rács
- GlasGrid 8502 sűrű szövésű (12,5 mm x 12,5 mm rácsméret) aszfaltrács (hordozóanyag nélkül)
- GlasGrid 8511 ritka szövésű (25 mm x 25 mm rácsméret) aszfaltrács (hordozóanyag nélkül)

- Bekaert Bitufort (acélrács)
- Műanyag, nagyon merev, kis lyukú rács (a gyártó ismeretlen)
- Vékony drótháló (közönséges „tyúkketrec” kerítés)



5.5. ábra: Leutner-féle hasító (nyíró) vizsgálat rács erősítéssel készült K-22-es aszfalt próbatesteken

A vizsgálat alapján megállapítható, hogy a legjobb eredményt a rács nélküli próbatestek, a legrosszabb eredményt pedig, a szerkezetbe beilleszkedni nem tudó szövetes hálók adják. A vizsgálat érdekessége, hogy nagy szemcseátmérőjű K-22-es aszfaltba beépítve kerültek tesztelésre a különböző típusú rácsok, ezért aztán a szemcsék beékelődésnek különös jelentősége volt az együttműködés szempontjából. Az eredményeken ez is jól látszik, hiszen miközben a szövetes rácsok elválasztó réteggé működnek és rossz eredményt adnak, szintén a sor végén kullognak a kis lyukméretű rácsok (műanyag, merev rács, vagy a GlasGrid 8502-es kis lyukú rács). Az acélrácsok – még a közönséges drótháló is – kiváló, a referencia próbatest értékét megközelítő eredményt adnak, a nagyobb rácslyuk méret segíti az együttműködést.

5.3.3. Keréknyomvályú vizsgálat elvégzése után végzett Leutner-féle nyírásvizsgálat

Nagykerékes keréknyomvályú-képződési vizsgálatot végeztünk Roadtex GR-G100 szövetes üvegszálás rácson, GlasGrid 8502-es sűrű szövésű hordozóanyag nélküli rácson és GlasGrid 8511-es ritka szövésű hordozóanyag nélküli rácson. A keréknyomvályú és Leutner-féle vizsgálat elvégzése utáni állapotot mutatják meg az alábbi képek.



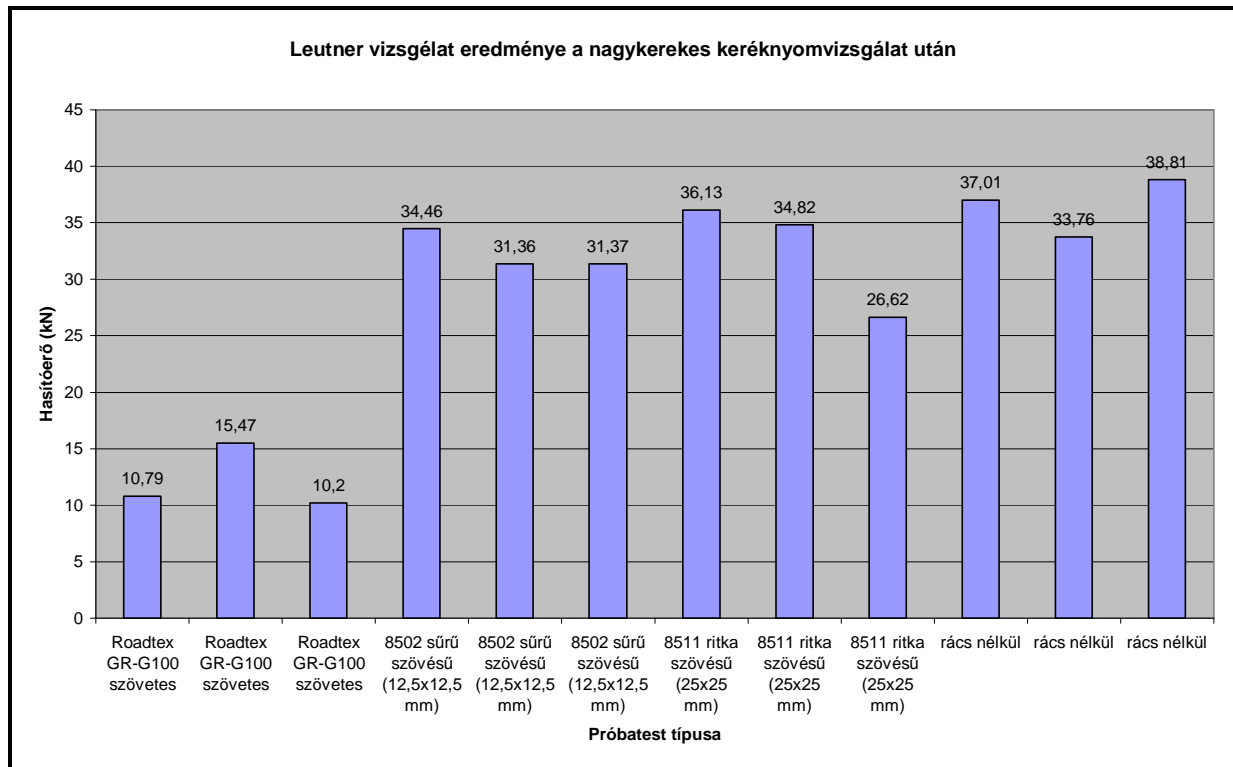
5.2. kép: Próbatetek a keréknyomvályú vizsgálat után



5.3. kép: Próbatetest a Leutner után

A keréknyomvályú-képződési vizsgálat elvégzése után 3-3 db 150 mm átmérőjű mintát fűrtünk ki a levizsgált próbatetekből és ezeken végeztük el 20 C°-on a Leutner-féle nyírásvizsgálatot.

Az eredmények nem mutatnak eltérést a korábbi vizsgálatok eredményéhez képest, hiszen itt is a szövetes rácson elnyírásához kellett a legkisebb hasító erő, a legjobb együttműködést itt is a rácson nélküli referencia próbatetek produkálták.



5.6. ábra: Leutner-féle vizsgálat eredményei a nagykeres keréknyomvályú képződési vizsgálat után

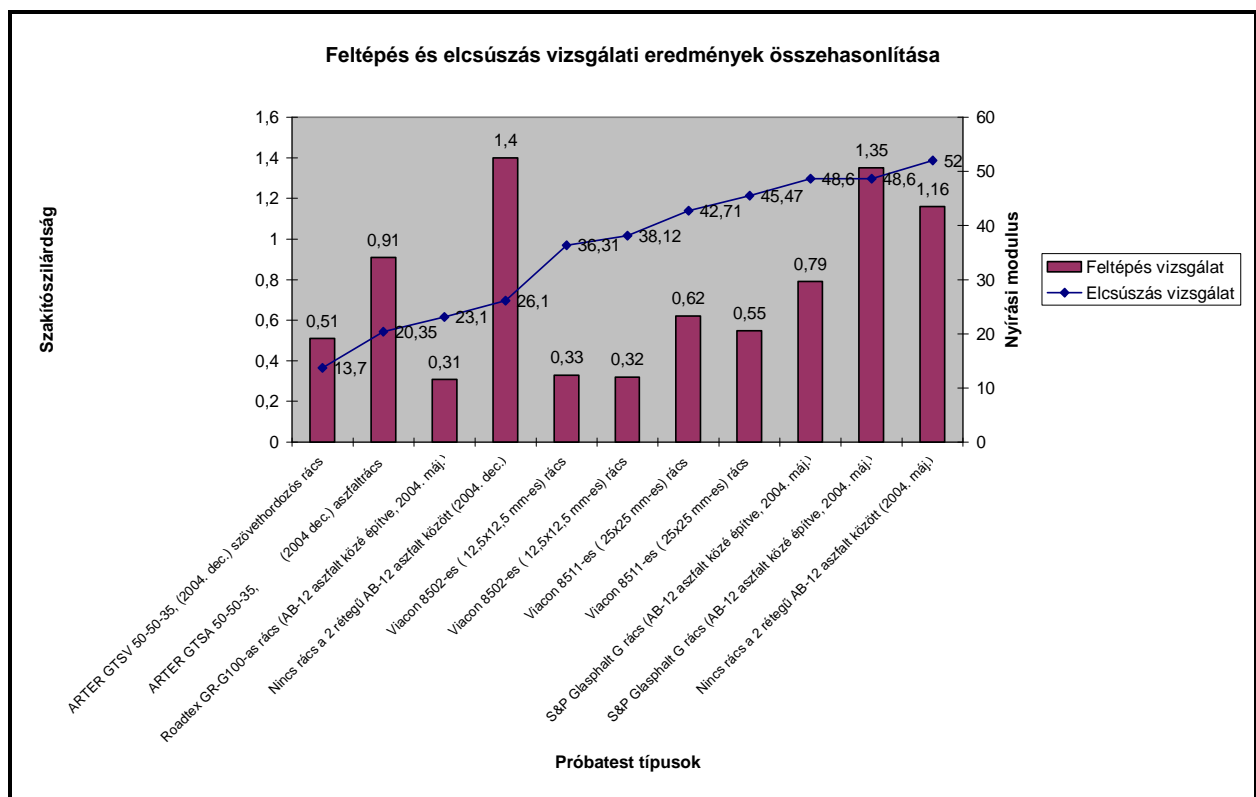
Érdekes ugyanakkor, ha a Leutner-féle vizsgálat és a nagykeres keréknyomvályú-képződés vizsgálat eredményeit összevetjük, hiszen az egyébként rossz együttdolgozást jelentő alacsony hasító erőt produkáló szövetes próbatest esetében kaptuk a legjobb nyomképződési eredményt, és a legjobban együttdolgozó rács nélküli próbatest adja a legrosszabb, azaz legmagasabb fajlagos nyomvályú mélységi értéket. (Az összehasonlításról készült ábra a **Mellékletben** látható.)

5.4. Az együttdolgozás kérdésének értékelése

Az elvégzett vizsgálatok mindhárom vizsgálati eljárás (feltépés, elcsúszás és Leutner-féle nyírásvizsgálat) esetében azt mutatták, hogy kisebb vagy nagyobb mértékben az aszfalt rétegek közé beépített szövetes háló, aszfaltrács, vagy acélrács rontja a rétegek közötti együttdolgozás mértékét.

Az alábbi ábrán az összehasonlítható, azaz azonos aszfaltrétegbe, azonos rács típusok beépítésével készült próbatestek feltépés és elcsúszás vizsgálati eredményeit hasonlítottam össze.

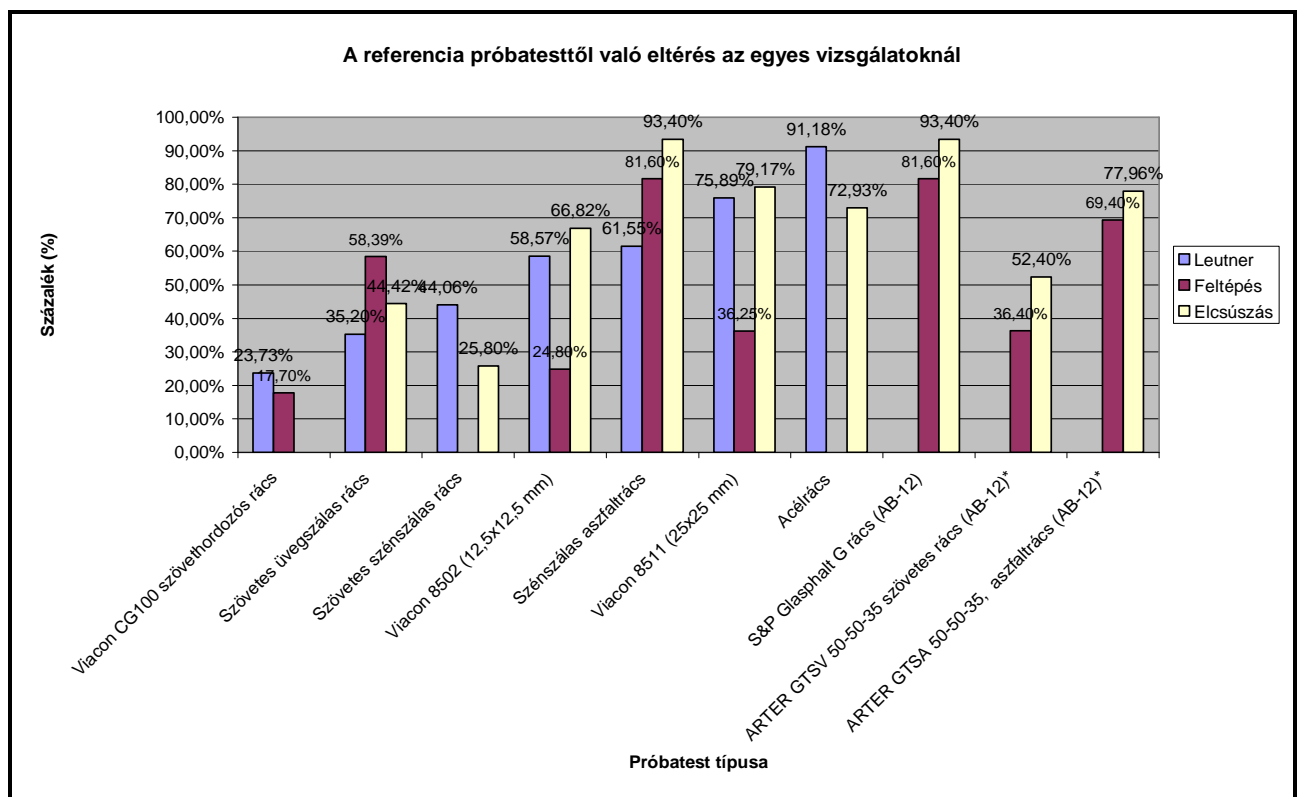
Az ábrán jól látszik az a tendencia, hogy a rács nélküli próbatetek adják a legjobb feltépesi szakítószilárdsági és elcsúszási nyíró modulus értéket, ezt követik a hordozóanyag nélküli aszfaltrácsok, és a sor végén pedig a szövetes hordozóanyagú rácsok találhatóak. Az ábrán az ARTER rácsok kapcsán végzett vizsgálatok lógnak ki a sorból (a referencia próbatest is), mert míg a feltépes vizsgálati eredmények követik a trendet, addig az elcsúszás vizsgálati eredményeik a többi eredménytől eltérnek, mindhárom esetben – a két különböző típusú rács és a referencia próbatest esetében is – kisebb eredményt adnak, de az alapsorrendet követik. (Szövetes adja a legrosszabb eredményt, utána a hordozóanyag nélküli rács és referencia próbatest).



5.7. ábra: Feltépes és elcsúszás vizsgálati eredmények összehasonlítása

Elvégeztem annak elemzését is, hogy az egyes vizsgálatokon belül a különböző rácsbetétet tartalmazó próbatetek mennyiben térnek el a referencia mintától. Mindhárom elemzés esetén igazolást nyert, hogy a rácsok jelenléte gyengíti a rétegek közötti együttdolgozást, az is igazolást nyert, hogy a szövet hordozós rácsok a hordozóanyag nélküli rácsokhoz képest nagyobb mértékben csökkentik az együttdolgozást. A vizsgálati eredmények továbbá azt is kimutatták, hogy a kisebb rácslyuk méretnek is fontos szerepe van, hiszen a kisebb lyukak közé nem tud beékelődni a kőváz.

Az alábbi ábrán látható az az összehasonlítás, amelyen a Leutner, elcsúszás és feltépés vizsgálatok eredményeinek referencia értéktől történő százalékos eltérését mutatom be. A diagramba azokat az eredményeket ábrázoltam, ahol az adott rácsbetétes próbatestnél legalább két fajta vizsgálati eredmény állt rendelkezésre. Az eredményekből jól látszik, hogy a referencia próbatestektől való legkisebb eltérést a legtöbb esetben (6 esetben) az elcsúszásvizsgálatok eredményei adták. Ez azért van így, mert a próbatestre nem csak nyíró vagy szakító erő hat, hanem felületre merőleges nyomóerővel is terhelt a szerkezet. A tehereloszlás miatt az elcsúszás vizsgálat képes a legjobban modellezni a valóságot, az együttdolgozás erősségét.



5.8. ábra: A referencia próbatestektől való eltérés az egyes vizsgálatoknál

Az összesen 109 próbatest 3 fajta vizsgálati módszerrel végzett kutatás során mindösszesen egy esetben (egy hordozóanyag nélküli szénztálás rácsnál) kaptunk jobb eredményt a referencia próbatestnél.

6. Rácserosítás hatása a keréknyomvályú képződésre

6.1. Aszfaltok meleg-alakváltozásának laboratóriumi vizsgálatai

A nehéz gépjárműforgalom által a nyári meleg és forró napokon az aszfaltburkolaton okozott igénybevételeknek megfelelő, ellenálló aszfalttulajdonságokat röviden az aszfalt meleg-viselkedésének nevezzük. Nyáron, 8-10 egymást követő kánikulai nap után, az aszfaltburkolat átlagos hőmérséklete meghaladhatja az 50 C°-os hőmérsékletet, a felső néhány centiméteren, pedig akár a 60 C°-ot is meghaladhatja. A nyári gyors hőmérsékletváltozások következtében nem jöhetnek létre termikus húzó vagy nyomó feszültségek, mert ezeken a hőmérsékleten már rendkívül gyors az aszfalt relaxációja, a viszkózus állapotú aszfaltrétegben ébredő feszültségek minden irányban eloszlanak. A járműforgalom terhelése következtében azonban az aszfaltban függőleges nyomófeszültségek jönnek létre, melynek következményeként

$$\varepsilon_{rug} = \frac{\sigma_{nyomó}}{E_{rugalmas}} \text{ fajlagos rugalmas összenyomódás}$$

és a viszkózus, időtől is

$$\varepsilon_{permanens} = \sigma_{nyomó} \cdot \eta \cdot t \quad \text{fajlagos maradó összenyomódás jön létre.}$$

Természetesen a rugalmas összenyomódás mértéke is függ a terhelési időtől és a sebességtől. A két alakváltozás aránya és nagysága a hőmérséklettől, az alkalmazott bitumen kötőanyag viszkozitási jellemzőitől, az aszfalt ásványi vázának belső súrlódásától és kerék terhelésétől, illetve annak áthaladási sebességétől függ. [Dr. Török Kálmán, 2000.]

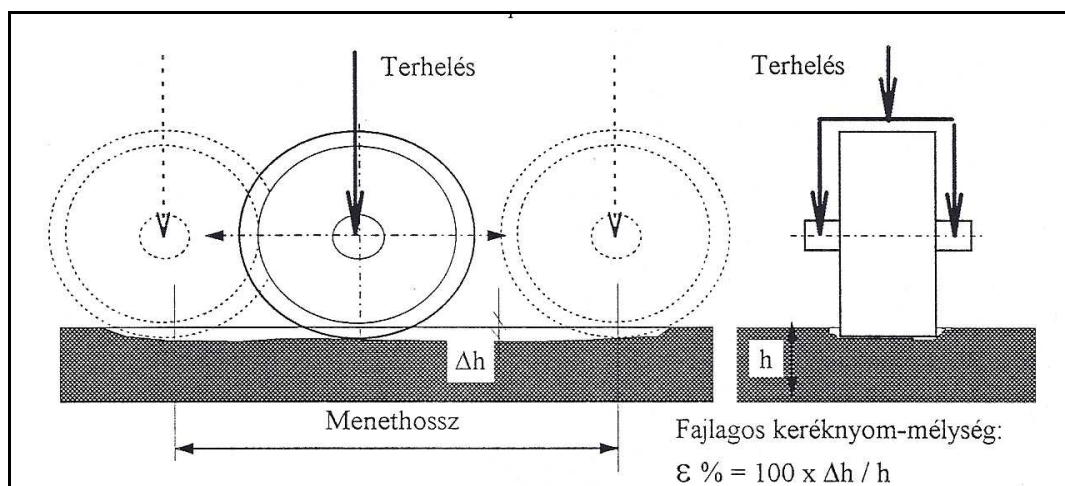
Az aszfalt meleg-viselkedési jellemzőit vizsgálják a legrégebb óta, hiszen a 60 C°-on végzett Marshall stabilitás vizsgálat, a 40 C°-os kocka nyomószilárdság vizsgálat is ezt a tulajdonságát ellenőrzi az aszfaltnak. A megnövekedett igénybevételek miatt azonban a 70-es években új, a forgalmi igénybevételt jobban szimuláló vizsgálati módszereket kezdtek kifejleszteni az aszfalt meleg-viselkedési jellemzőinek vizsgálatához. Az ötvenes évek végétől kezdve világszerte különböző vizsgálatok alkalmazásával kísérelték meg jellemezni az aszfaltok meleg-viselkedési tulajdonságait. (Marshall stabilitás és folyás vizsgálat, Aszfalt próbakockák nyomószilárdsága 40 C°-on, Pecsétnyomó próba, Kuszás vizsgálatok)

Ezek a vizsgálatok azért voltak lényegesek, mert segítettek a korszerű, a meleg-viselkedési problémát legjobban leíró keréknyomvályú-képződési vizsgálat kifejlesztéséhez.

6.2. Keréknyomvályú-képződés vizsgálat elvi alapjai

Angliában és Franciaországban, a hetvenes években egy a gyakorlati kerékterhelést és a terhelt aszfaltréteg valós kapcsolatát a környezetével a korábbi vizsgálatoknál sokkal jobban szimuláló laboratóriumi kísérleti módszert dolgoztak ki az útügyi szakemberek.

A kidolgozott módszer alapelve mindkét országban teljesen azonos; egy terhelt kerék (vagy a próbatest) mozog oda-vissza egy lapformátumú aszfalt próbatesten. A BME Útépítési Tanszék laboratóriumában 1982-ben egy angol berendezés tervei és paramétereire alapján (Dr. Fi István irányításával) készült el a dinamikus keréknyomvályú-képződést vizsgáló berendezés, mely eddig közel kétezer három órás (8360 kerékátmenetes) vizsgálatot folytatott le. A tömörgumi-kerekes vizsgálóberendezést eredendően a londoni Transport and Road Research Laboratory fejlesztette ki, ez az EN szerinti ún. "kiskerekes" berendezés. A berendezés a vizsgálati eredményeket számítógépes mérésadat-felvétellel és feldolgozással szolgáltatja. A következő képen látható a keréknyomvályú-képződés vizsgálat sematikus ábrája.



6.1. ábra: Keréknyomvályú-képződés vizsgálat sematikus ábrája

A vizsgálattal kapcsolatos lényeges fogalmakat az alábbiak:

- Terhelési ciklus: a terhelt kerék áthaladása a nyom egy keresztmetszetén kétszer (oda-vissza)

- Keréknyomvályú: a vizsgált minta felületén a terhelőkerékkel bejárt felületen látható és mérhető benyomódás
- Keréknyomvályú-mélység: a vizsgált keresztmetszetben és kerék-áthaladási számnál az eredeti felület és a keréknyomvályúban létrejött új felület szintkülönbsége, az átlagos keréknyomvályú-mélység az adott kerék-áthaladási számnál a több keresztmetszetben mért keréknyomvályú-mélységek átlaga
- Fajlagos deformáció: az átlagos keréknyomvályú-mélység és a próbatest vastagságának hányadosa %-ban kifejezve.

A vizsgálati feltételek a következők [ÚT 2-3.301, *Útügyi Műszaki Előírás*]:

A 200 mm átmérőjű, 50 mm szélességű, 80 Shore keménységű tömör gumi-abroncsos kereket $P = 0,4 \text{ N/mm}^2$ kerékterhelésre kell beállítani. A terhelő kerék 200 milliméteres hosszon, 0,3 Hz frekvenciával oda-vissza gördülő mozgást végez. A vizsgálat során a kerékátmenetek száma $N = 8340$, ami 3 órás vizsgálati időtartamnak felel meg. Vizsgálati hőmérséklet $T = 60 \text{ °C}$, klimatizált légtérben. A vizsgálatához előkészített próbatestet ezen hőmérsékleten és légtérben előzetesen legalább 12 órán át kell temperálni.

Vizsgálati próbatestek

- Aszfaltburkolatból vett magminták esetén: három 150 mm, vagy egy 225 mm átmérőjű mag mintából fűrészeléssel-illesztéssel, formasablonban való gipszágyazásos elhelyezéssel kell a próbatesteket előkészíteni, az egyes rétegek beépítési vastagságainak megfelelő vastagsággal.
- Ömlesztett mintákból vibrációs tömörítéssel, laboratóriumban készített próbatestek esetén: 305x200 mm alaplátványú, a $D_{\max} \geq 16 \text{ mm}$ aszfaltfajták esetében 80 mm, a $D_{\max} < 16 \text{ mm}$ aszfaltfajták esetében pedig 40 mm magasságú (vastagságú) lapformátumú próbatestek.

Vizsgálati eredmények

A 8340 kerékátmeneti számhoz tartozó átlagos nyommélységnek (Δm , mm) a próbatest vastagságához (m , mm) viszonyított százalékos értéke az ε , % jellemző érték ($\varepsilon, \% = 100 \Delta m/m$).

6.3. Nemzetközi példák rácsbetétrel készült próbatest keréknyomvályú képződés vizsgálatára

A nemzetközi szakirodalom egy példát említ mindössze rácsbetétrel készült próbatest keréknyomvályú képződés vizsgálatára vonatkozóan. Az EMPA Svájc vezető független anyagvizsgáló laboratóriuma végzett keréknyomvályú képződési vizsgálatot aszfaltráccsal erősített próbatesteken. (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, vizsgálatszám: Prüfbericht NR. 439669, 2006)

Egy összességében 6 cm vastag, 1800x870 mm-es alaprajzi méretekkel rendelkező, kétrétegű aszfalt próbatestet rugalmas ágyazatra fektetve az EMPA forgalom szimulátorának – mely nem teljesen felel meg a mi fogalmaink szerinti keréknyomvályú, vagy „wheel tracking” vizsgáló berendezésnek - segítségével ciklikusan ismétlődő kerékterhelésnek vetették alá.

Az aszfalterősítés anyagául minden esetben ugyanazt a bitumennel átítatott rácsot használták, melyet az egyes próbatesteknél különböző magasságokban helyeztek el (a K1 jelű referencia-próbatestnél nem volt erősítőháló, a K2-nél a próbatest legalján 6 cm- es mélységben, a K3-nál 4 cm-mélységben, K4-nél a próbatest közepén: 3 cm mélységben volt az aszfaltrács). A kísérletben használt aszfaltrács összetételét tekintve a szálak mellett kizárólag polimer bitument, mint kötőanyagot tartalmaz. A próbatestek elkészítése az útépitési gyakorlatnak megfelelően történt.

A kísérletet megelőzően a próbatestek alsó síkján a keréknyomvályúval párhuzamosan és rá merőlegesen is, illetve a keréknyomvályútól távolabb is nyúlásmérő bélyegeket helyeztek el. A ciklikus terhelés hatására a nyomvályú vonalába helyezett nyúlásmérő bélyegek a deformációk gyors növekedését mutatták. Körülbelül 50.000 átgördülést követően a nyúlások növekedése lelassult. A próbatestek szélső részeire helyezett nyúlásmérő bélyegeknél ugyancsak megfigyelhető volt a deformációk hirtelen megnövekedése, de később enyhe csökkenést lehetett tapasztalni, mely a keréknyomvályú melletti zónák tehermentesülésére utal.

A vizsgálati jegyzőkönyv tanúsága szerint a kerékterhelés 500.000 átgördülést követően az alakváltozások átlagos értéke a következők szerint alakult az egyes próbatestek esetében. [Sokolov-EMPA, 2006]

Vizsgált elem	A szénszál erősítés helye	A próbatest alsó síkjában, a keréknyom vonalában a nyúlások átlaga	Alakváltozás és feszültségcsökkenés
<i>K1</i>	Nincs	0,04325	0
<i>K2</i>	Próbatest alsó síkján	0,03978	-8 %
<i>K3</i>	4 cm mélyen	0,02509	-42%
<i>K4</i>	3 cm mélyen	0,02867	-34%

6.1. táblázat: A svájci EMPA által elvégzett keréknyomvályú-képződés vizsgálat eredményei

6.4. „Kiskerekes” keréknyomvályú-képződési vizsgálatok aszfaltrács beépítéssel készült szerkezeteken

A kiskerekes keréknyomvályú-képződés vizsgáló berendezés segítségével végeztem vizsgálatokat különböző aszfaltrácsokkal gyártott próbatesteken. Az aszfaltok plasztikus deformációra való hajlamosságát legjobban keréknyomvályú-képződés vizsgálattal lehet vizsgálni. A ráccsal erősített aszfalt próbatesteken elvégzett vizsgálatok eredményeképpen választ vártam arra a kérdésre, hogy a különböző igénybevételeknek kitéve milyen reakciók jelentkeznek az aszfaltszerkezetben, illetve, hogy az egyes terhelések esetén valóban jelentkezik-e a beépített rácsok feltételezett aszfalterősítő szerepe.

Az elmúlt években számos keréknyomvályú-képződési vizsgálatot végeztem rácsbetéttel erősített próbatesteken. A kutatások során a legelterjedtebb aszfaltrács fajtákat vizsgáltuk, és ezen anyagok beépítése is a hazánkban leggyakrabban alkalmazott aszfaltfajtákkal történt. 2004 és 2008 között az alábbi rácsokat és aszfaltfajtákat alkalmaztam a vizsgálatok elvégzéséhez:

- Roadtex GR-G50 szövehordozós, üvegszálás rács (50 kN/m szakítószilárdsággal)
- Roadtex GR-G100 szövehordozós üvegszálás rács, (100 kN/m szakítószilárdsággal)
- Roadtex GR-G200 szövehordozós szénszálás rács (100 kN/m szakítószilárdsággal)
- Roadtex GR-G100 szövehordozós üvegszálás rács, fordítva beépítve (100 kN/m szakítószilárdsággal)
- S&P Glasphalt G üvegszálás, hordozóanyag nélküli aszfaltrács (120 kN/m szakítószilárdsággal)
- S&P Carbophalt G szénszálás, hordozóanyag nélküli aszfaltrács (200/120 kN/m szakítószilárdsággal)
- ARTER GTSA hordozóanyag nélküli aszfaltrács (50 kN/m szakítószilárdsággal)

- ARTER GTSV szövethordozós rács (50 kN/m szakítószilárdsággal)

A hálók lyukmérete minden esetben 20 mm x 20 mm-es méretű volt.

A keréknyomvályú képződési vizsgálatok során több fajta aszfaltkeveréket alkalmaztunk. A keverékek minden esetben az útépítésben alkalmazott kopóréteg fajtáknak feleltek meg:

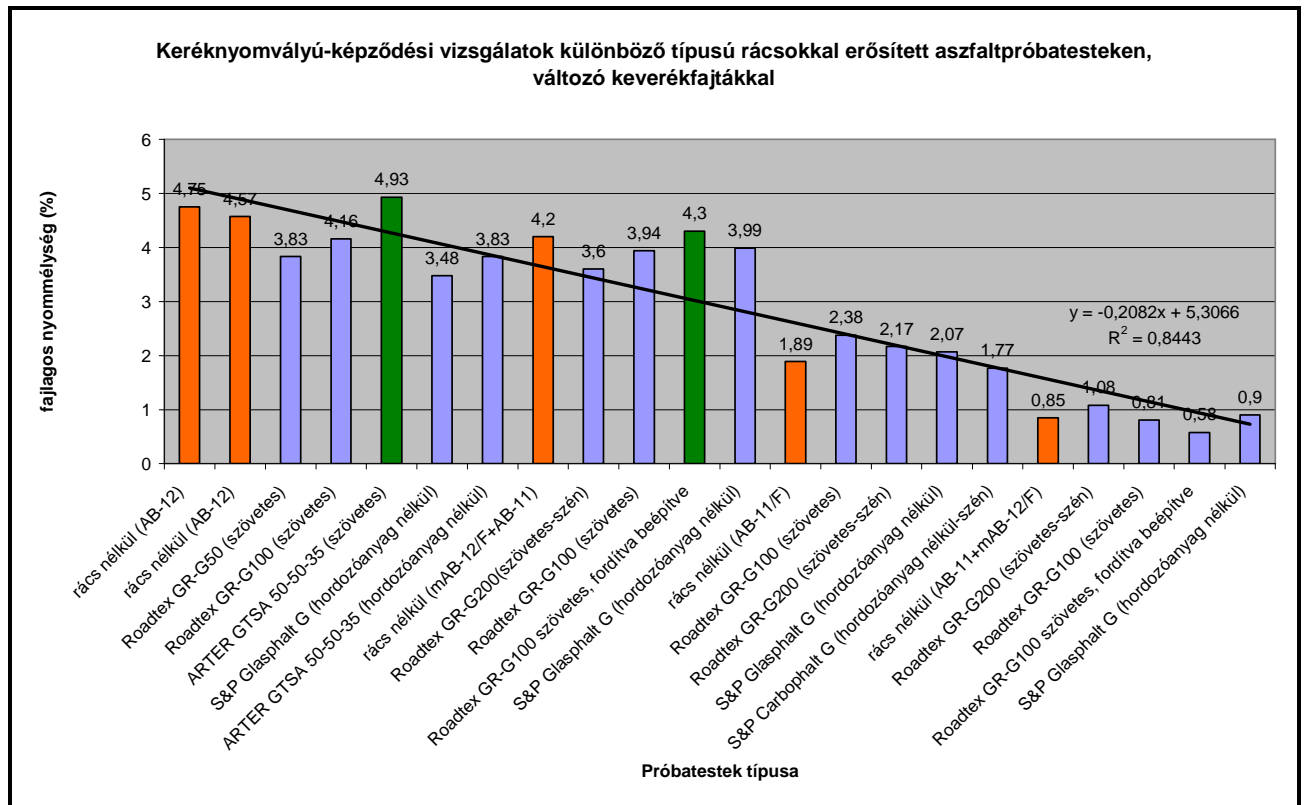
- AB-12-es aszfaltkeverék 4+4 cm vastagságban
- 4 cm mAB-12/F kötőréteg + 4 cm AB-11 kopóréteg
- 4 cm AB-11 kötőréteg + 4 cm mAB-12/F kopóréteg
- AB-11/F-es aszfaltkeverék 4+4 cm vastagságban

Fontos indokolni, hogy a vizsgálatok során mért kopórétegnek megfelelő aszfaltkeverék lett alkalmazva, és miért nem vizsgáltam K-20/F, K-22 vagy AC-22 típusú kötőréteg fajtákon a rács beépítés hatásait.

Nos, a vizsgálatokba azért nem lettek bevonva e keverékfajták, mert egyfelől a próbatest készítéshez a kötőrétegfajták laboratóriumiban rosszul tömöríthetőek, másfelől feltételeztük, hogy a nagyobb szemcseméret miatt nem tud a rács megfelelően beagyazódni a rétegek közé. Fontos szempont volt továbbá, hogy az aszfaltrácsokat leggyakrabban lemart, régi kopórétegen alkalmazzák, amely legtöbb esetben valamely AB vagy AC típusú kopóréteg. [Almássy-Dr. Ambrus-Dr.Fi-Bocz, 2005]

A próbatestek elkészítésénél a rács nélküli próbatestek esetében $0,9 \text{ kg/m}^2$, a Roadtex típusú rácsoknál $1,5 \text{ kg/m}^2$, az ARTER típusú hálóknaál $0,5-0,8 \text{ kg/m}^2$ mennyiségnek megfelelő bitumenemulziót használtunk fel a ragasztáshoz, úgy hogy a szükséges mennyiséget ecsettel vittük fel a próbatestek felületére. A S&P típusú hálókat hőlégfúvóval felmelegítettük, és úgy ragasztottuk fel a próbatestre.

A különböző típusú aszfaltkeverékeken elvégzett vizsgálatok az alábbi eredményeket mutatták. (Az ARTER rácsok indokolatlanul kiugró egyedi mérési eredménye miatt módosítani kellett az eredménykort. Az eredeti ábra a **Mellékletben** található.)



6.2. ábra: Keréknyomvályú-képződési vizsgálatok különböző típusú rácsokkal erősített próbatesteken, változó keverékfajtákkal – módosított ábra

A fenti ábrán jól látszanak az egyes aszfaltfajták közötti különbségek, hiszen az AB-12-es próbatesteknél jelentkezik a legnagyobb fajlagos nyommélység, ezt követi az AB-11-es kopóréteggel készült próbatestek eredménye. A legjobb eredményt, azaz a legkisebb nyommélységet a mAB-12/F-es kopóréteggel készült próbatestek adták. A regressziós összefüggésben jól látszik, hogy a kedvezőbb keverék összetétel kisebb nyommélységet ad, azonban az egyes keverékeken belül a rácsos beépítés hatására különböző mértékben változtak egymáshoz a rácsbetéttel és anélkül készült próbatestek nyomvályú mélység különbségei.

6.5. További kiskerekes keréknyomvályú-képződés vizsgálat „erősebb és gyengébb” keverék összetételű próbatesteken

A fenti eredmények értékeléséből azt a következtetést vontuk le, hogy a rácsos erősítésű próbatestek javítják az aszfaltszerkezet keréknyomvályú-képződési tulajdonságait, de ez a pozitív hatás akkor jelentkezik, ha gyengébb, egyszerűbb keverék összetételű aszfaltok közé építjük be a rácsbetétet. A különböző rács típusokkal lefolytatott vizsgálat azt is megmutatta, hogy ahol, a rácsbetét hatására rosszabb nyommélység eredményt kaptunk, ott hét esetből

ötben szövetes hordozóanyagú rács került beépítésre. A fentiek okán, a gyengébb keverék összetétel miatt a nagyobb nyomképződési hajlandóságot mutató AC-11-es aszfalt kopóréteg és a csúcsaszfalt minőséget jelentő kis nyomképződési hajlamot mutató SMA-11mF kopóréteg, valamint nagyon jó minőségű, de nagy szemcse méretű AC-22/F kötőréteg közé építettünk be rácsokat és végeztük el azokon nagy számban a keréknyomvályú-képződési vizsgálatokat. A vizsgálatokhoz az alábbi típusú rács fajtákat alkalmaztunk:

- GlasGrid CG100 (25 mm x 25 mm rácsméret) szövetes rács
- GlasGrid 8501 (12,5 mm x 12,5 mm rácsméret) sűrű szövésű aszfaltrács (hordozóanyag nélkül)
- GlasGrid 8511 ritka szövésű (25 mm x 25 mm rácsméret) aszfaltrács (hordozóanyag nélkül)
- Fémháló (közönséges kerítés rács, 16,5x16,5 mm)

Az alábbi táblázatban látható az AC-11-es keveréken lefolytatott vizsgálatok eredményének az összesítése. A hatékony értékeléséhez igyekeztünk minél több számú próbatestet megvizsgálni. A korábbi vizsgálatok tapasztalata lapján azt a feltételezésünket kívántuk megerősíteni, hogy a hordozóanyag nélküli rácsos próbatestek javítják az aszfaltszerkezet nyomvályú-képződéssel szembeni ellenállását. A mérésekhez 6 db szövetes hordozóanyagú rácsot és 20 db hordozóanyag nélküli rácsot használtunk fel.

Rács fajta	fajlagos nyommélység (%)	fajlagos nyommélység (%) átlagérték
szövetes rács	2,82	2,68
szövetes rács	2,54	
szövetes rács	2,72	
szövetes rács	2,98	
szövetes rács	3,08	
szövetes rács	2,79	
100/200 sűrű szövésű rács	3,09	2,65
100/200 sűrű szövésű rács	2,21	
100/200 sűrű szövésű rács	2,11	
100/200 sűrű szövésű rács	2,33	
100/200 sűrű szövésű rács	2,03	
100/200 sűrű szövésű rács	2,04	
100/100 ritka szövésű rács	2,32	2,16
100/100 ritka szövésű rács	2	
100/100 ritka szövésű rács	2,03	
		2,11

100/100 ritka szövésű rács	2,2	
100/100 ritka szövésű rács	2,86	
100/100 ritka szövésű rács	2,25	2,55
100/100 ritka szövésű rács	2,38	2,425
100/100 ritka szövésű rács	2,47	
100/100 ritka szövésű rács	2,73	2,625
100/100 ritka szövésű rács	2,52	
100/100 ritka szövésű rács	2,13	2,19
100/100 ritka szövésű rács	2,25	
100/100 ritka szövésű rács	2,18	2,28
100/100 ritka szövésű rács	2,39	
Nincs háló - referencia	4,03	
Nincs háló - referencia	4,48	4,25
Nincs háló - referencia	4,29	
Nincs háló - referencia	4,57	4,43

6.2. táblázat: Rács erősítéssel készült AC-11-es aszfaltkeverék keréknyomvályú-képződés vizsgálati eredményei

Az eredmények ismételtlen visszaigazolták abbéli feltételezésemet, hogy a rácsos erősítésű szerkezetek esetében jobb keréknyomvályú-képződési eredményeket kaptunk, mint a rács nélküli referencia próbatesteknél. A szövés erőssége okán nincs gyakorlatilag különbség a nyomképződésben, tehát a ritka vagy sűrű szövés jelentősége nem jelenik meg a keréknyomvályú - képződésben.

Elvégeztem a vizsgálatokat a legjobb minőségű SMA-11mF aszfaltkeveréken, mert szerettem volna látni a rács erősítés hatását (vagy hatástalanságát) olyankor is, amikor a keveréknek kicsi a nyomvályú-képződési hajlama. A következő táblázatban a láthatóak az SMA-11mF keveréken elvégzett vizsgálatok eredményei. (Ebbe a vizsgálati sorba a GlasGrid 8501-es kisebb lyukméretű rácsot nem vettem be.)

	Rács nélküli fajlagos nyommélység (%)	8511 szövet nélküli rács (25x25 mm)fajlagos nyommélység (%)	CG100 szövetes rács fajlagos nyommélység (%)
	1,72	1,73	1,87
	1,38	1,53	1,67
	2,47	2,4	2,7
	2,55	2,22	2,95
		2,26	
		2,74	
		1,8	

		2,17	
		1,88	
		2,14	
Átlag érték	2,03	2,087	2,2975
<i>Szórás</i>	0,57230528	0,356621492	0,62297004
<i>A mérések maximuma</i>	2,55	2,74	2,95
<i>A mérések minimuma</i>	1,38	1,53	1,67

6.3. táblázat: Rács erősítéssel készült SMA-11mF-es aszfaltkeverék keréknyomvályú-képződés vizsgálati eredményei

A kezdeti feltételezésem itt is igazolást nyert, hiszen gyakorlatilag nem jelentkezik különbség a rács erősítésű és a rács nélkül készült próbatestek nyomképződési eredménye között, kismértékű különbség ugyanakkor látszik a szövetes rácsok és szövet hordozóanyag nélküli rácsok között. A vizsgálat kapcsán azt is meg kell jegyezzük, hogy nagy szórás volt az egyedi eredmények között.

Kíváncsi voltam arra is, hogy miként működik a rács kötőanyag közé beépítve, ezért választottam az AC-22/F-es aszfalttípust. A vizsgálat során azt is fel kívántam deríteni, hogy a nagy szemcse méret ($d_{max} = 22$ mm) és a kis rácslyuk méret (12,5x12,5 mm) milyen összefüggésben lehet egymással, valamint megvizsgálásra került egy nem szabványos fémrács is.

A vizsgálatok során kismértékű nyomképződés csökkenést figyelhettünk meg a fémrács és nagylyukú 8501-es rács alkalmazása esetén. A kis lyukú, 12,5x12,5 mm-es rács azonban a referencia próbatesthez nagyon közeli nyomképződési értéket mutatott, amely azt mutatja, hogy a $d_{max} = 22$ mm méretű szemcse nem megfelelően ágyazódik be a rácslyukakba, azaz nem tökéletes a két anyag együttdolgozása.

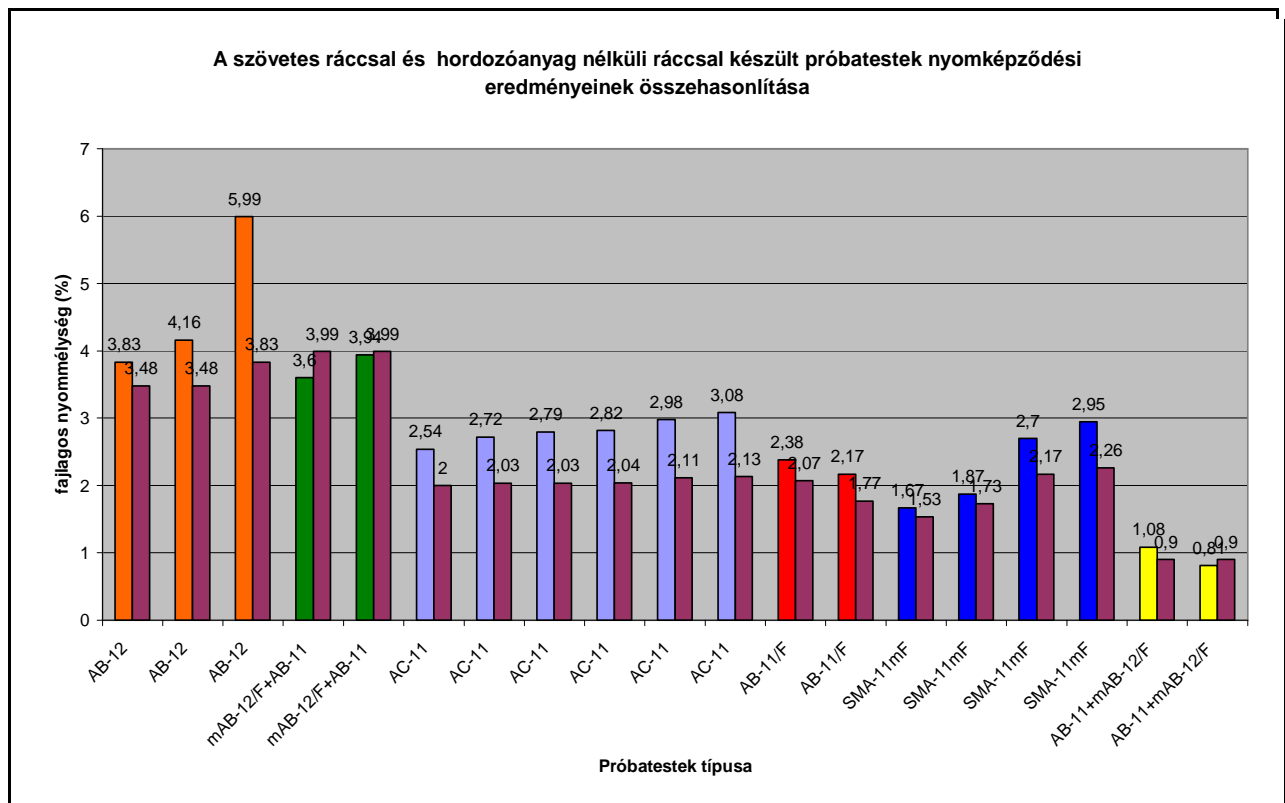
Próbatest típusa	Rács nélküli fajlagos nyommélység (%)	8511 szövet nélküli rács (25x25 mm) fajlagos nyommélység (%)	8501 szövet nélküli rács (12,5x12,5 mm) rács fajlagos nyommélység (%)	Fémrács (kerítés rács, 16,5x16,5 mm)
	1,91	1,98	1,95	1,81
	2,3	1,64	2,07	1,61
Átlag érték	2,105	1,81	2,01	1,71

6.4. táblázat: Rács erősítéssel készült AC-22/F-es aszfaltkeverék keréknyomvályú-képződés vizsgálati eredményei

Az AC-11-es és SMA-11mF keverékeken elvégzett vizsgálatok egyértelműen igazolták, hogy a rács erősítés csak a rosszabb keverék összetételű anyagoknál fejt ki erősítő hatását. A jobb minőségű SMA-11mF keveréknél ugyanis nem keletkeznek akkora megnyúlások, hogy a rácsbetét elkezdjen „dolgozni”. A kötőanyagon elvégzett vizsgálatok is igazolták, hogy a rács alkalmazása javítja a nyomképződés ellenállást, azonban kötőanyagra történő terítéskor a jobb együttműködés érdekében a keverék legnagyobb szemcseméretéhez közelítő, vagy annál nagyobb lyukméretű rácsot javasolt alkalmazni.

6.6. Szövethordozós és hordozóanyag nélküli rácsok nyomképződési eredményének összehasonlítása

A korábbi több fajta aszfaltkeveréken, illetve az AC-11-es keverékeknél megvizsgált szövet hordozós próbatetek és a hordozóanyag nélküli ráccsal készült próbatetek eredményeit is összehasonlítottam.



6.3. ábra: Szövethordozós és hordozóanyag nélküli rácsok nyomképződési eredményének összehasonlítása

Az ábrán különböző színnel jelöltem az egyes aszfaltkeverék fajtákhoz tartozó szövetes rácsok nyomképződési eredményeit. (Narancssárga: AB-12, Zöld: mAB-12/F+AB-11, Világoskék: AC-11, Piros: AB-11/F, Sötétkék: SMA-11mF Sárga: AB-11+mAB-12/F). A hordozóanyag nélküli rácsok esetében nem használtam külön színt. Már a 2005 áprilisi első, a rácsok keréknyomvályú-képződési ellenállás javító cikkben [Almássy-Dr.Ambrus-Dr.Fi-Bocz, 2005] feltételeztük, hogy a próbatestek deformációja kisebb, mint a rács nélküli mintáké, illetve, hogy az elválasztó hatás miatt a hordozóanyag nélküli rács viselkedése kedvezőbb, mint a szövetes ráccsal erősített próbatesté. Az elmúlt években elvégzett vizsgálatok összesítése, és az AC-11-es keverékeken végzett vizsgálatok igazolták a korábbi feltételezésemet.

Az eredményekből az látszik, hogy a szövet hordozós rácsok az esetek nagy részében nagyobb nyomképződést mutatnak, mint a hordozóanyag nélküli rácsok. Azokban az esetekben, ahol fordított a helyzet, ott viszont nem szignifikáns a különbség a nyomképződési értékek között. A szövetes rácsok rosszabb nyomképződési eredményét a nem megfelelő rétegek közötti együttlengésnek, a kőváz és a szövetes anyag rossz kohéziós tulajdonságának tudom be.

6.7. Keréknyomvályú képződési vizsgálat nagykeres berendezéssel

A nagyobb igénybevétel okán és amiatt, hogy biztosabb képet kapjunk a beépített hálók keréknyomvályú képződési tulajdonságairól úgynevezett nagykeres berendezéssel is végeztünk vizsgálatokat az MSZ EN12697-22 szabvány előírásai szerint. A vizsgálatba szövethordozós üvegszálalás rácsokat, hordozóanyag nélküli rácsokat és egy speciális acélrácsot vontam be. A vizsgálati eredmények és tendenciák megegyeztek a kiskereses keréknyomvályú képződés vizsgálatban tapasztaltakkal. A nagykeres keréknyomvályú képződési vizsgálat vizsgálati elvét, az alkalmazott anyagokat és a részletes kutatási eredményeket a **Mellékletben** mutattam be.

6.8. A keréknyomvályú képződési vizsgálatok összefoglaló értékelése

Az elmúlt években elvégzett, most már számosak mondható úgynevezett kiskereses és nagykeres keréknyomvályú-képződés vizsgálatok alapján az elmondható, hogy bár van szórás a vizsgálati eredmények között, a rácsok, gyakorlatilag fajtájuktól függetlenül kis mértékben javítják az aszfalt keréknyomvályú képződési tulajdonságait. A háló/rács típusok szakítószilárdsága közti különbség ugyanakkor nem jelenik meg számottevően az

eredményekben és igazából szignifikáns különbség az üvegszálás és a szénszálás erősítésű szerkezet között sem jelentkezik. Ugyanakkor kimutatható, hogy a szövethordozó anyag nélküli rácsok nagyobb mértékben gátolják a nyomvályú képződés kialakulását, mint a szövethordozós rácsok. Komoly erősítést és ezáltal pozitív hatást fejt ki az acélrács jelenléte az aszfaltszerkezetben, azonban itt beépítési és újrahasznosítási problémák adódhatnak. A vizsgálatok során az is megállapítás nyert, hogy a rácsos erősítés is csak a gyenge minőségű szerkezetekben fejt ki a hatását. (A gyenge minőségű keverék, vagy szerkezet alatt, többek között rosszabb minőségi kővázsal, valamint modifikáló szer alkalmazása nélküli bitumennel készült keveréket értem. De szintén gyengébb szerkezet alatt értem azt is, amikor már egy évek óta használt, nagy forgalomnak kitett szerkezetről beszélünk, és azt erősítjük rács alkalmazásával.)

7. Rácserosítás hatása az aszfaltburkolat élettartamára

7.1.1. A mechanikai méretezés alapjai és előnyei

Teherbíró burkolatalapok, egyedi igényű pályaszerkezetek esetén a hagyományos méretezési módszerek sokszor csak korlátozottan, vagy gazdaságtalanul használhatóak fel. A mechanikai méretezés alkalmazásával azonban a burkolat állapotának (teherbírásának, rétegtulajdonságainak) ismeretében egyedi méretezések hajthatóak végre, mely méretezés során a geometriai kötöttségek figyelembe vétele mellett az egyes rétegekbe építhető „teljesítő képesebb” aszfaltok, illetve a teljesítményt növelő technológiák, például az aszfaltrácsok, használatának gazdaságossága is kimutatható.

7.1.2. Az igénybevételek meghatározása

Az analitikus módszereknél az igénybevételeket általában a Burmister által kidolgozott többrétegű rendszerekre vonatkozó differenciálegyenletek aktuális viszonyok közötti megoldásával lehet nyerni. Ezek számítására valamilyen méretező szoftvert használnak (pl. SHELL – BISAR vagy ALIZÉ). A számításhoz előre fel kell venni a rétegek számát, a rétegek geometriai méretét (vastagságát), rugalmassági modulusát (Young modulus, E) illetve Poisson tényezőjét (μ).

Ezeket, továbbá a terhelési adatokat inputként alkalmazva a különböző szoftverekben lehetséges az igénybevételek (feszültségek, illetve megnyúlások) meghatározása. A fejlettebb szoftverek képesek kezelni az egyes rétegek közötti kapcsolat (tapadás) jellegét és mértékét, ezáltal a valósághoz elvileg közelebb álló eredményeket lehet kapni.

7.1.3. A méretezéshez szükséges anyagtulajdonságok meghatározása

A méretezéshez szükséges anyagtulajdonságok a Young modulus és a Poisson tényező, amelyek közül lényegében egyik sem tekinthető szigorúan a Hooke törvény szerint viselkedőnek. Az aszfaltkeverékek esetében az anyagtulajdonságok (modulus értékek) mind a terhelési időtől, mind a tág határok között változó hőmérséklettől jelentős mértékben függenek.

7.1.4. A határ igénybevételek meghatározása

A pályaszerkezeteket alkotó különböző anyagoknál a határ igénybevételként az adott anyagnak a fáradási szempontból értelmezhető igénybevételét értjük, mely aszfaltkeveréknél a megengedett megnyúlást jelenti. A konkrét értékeket fárasztóvizsgálatokkal lehet meghatározni, aminél felvéve – több terhelési szinten a tönkremenetel okozó igénybevételt (feszültséget, megnyúlást) – meghatározhatjuk az anyagra vonatkozó Wöhler görbét és ebből a feladatnál szükséges terhelésisméltési számnál (mértékadó tengelyáthaladásnál) leolvasható a határ igénybevétel nagysága.

7.1.5. A mértékadó és határ igénybevételek összehasonlítása

A méretezési adatok felhasználásával számított igénybevételeket össze kell hasonlítani a megengedett (a teherisméltódsi számtól függő) igénybevételekkel. A pályaszerkezet az igénybevételekre méretezettnek tekinthető, amennyiben a megengedett igénybevételek nagyobbak, mint a számított igénybevételek.

7.1.6. Fárasztási vizsgálatok az MSZ EN 12697-24:2005 szerint

A fárasztó vizsgálatokat, - jelen esetben a hajlító vizsgálatokat - az MSZ EN 12697-24:2005 szabvány alapján végeztük el. A vonatkozó szabvány az aszfaltkeverékek fáradásának jellemzésére alternatív módszereket ír elő, köztük hajlító, húzó és hasító-húzó vizsgálatokat is. A hajlító vizsgálatokat szinuszos vagy más módon vezérelt terheléssel, különböző típusú próbatesteket és feltéteket használva, tömörített aszfaltanyagon kell elvégezni. Az eljárást az aszfaltkeverékek besorolására használjuk, a pályaszerkezetben viszonyított teljesítményükre utaló fáradási ellenállás alapján, ahhoz hogy adatokat kapjunk a szerkezeti viselkedés értékelésére az útban és a vizsgálati adatokat az aszfaltkeverékek előírásainak megfelelően meg lehessen ítélni.

Mivel a vonatkozó szabvány nem ír elő egy adott típusú vizsgálóeszközt, a vizsgálati körülmények pontos megválasztása a használt eszköztől és annak működési tartományától függ.

A szabvány szövegezése szerint a különböző vizsgálati módszerekkel kapott eredmények nem biztos, hogy összehasonlíthatók egymással, erre nézve széles körű tapasztalat nem áll rendelkezésre.

Mivel azonos módon, azonos keverékből előállított próbatesteket alkalmaztunk és vizsgáltunk azonos körülmények között, az eredmények alapján a viselkedésekre nézve egy relatív, de használható mérőszámot kapunk eredményül.

A próbatest fáradási élettartama (fatigue life) a periódusok száma az egyezményes tönkremeneteli kritériumnak megfelelő vizsgálati feltétel mellett (hőmérséklet, frekvencia és terhelési mód; pl. állandó behajlás érték vagy állandó erő és vagy egyéb más állandó terhelési feltétel mellett). A fáradás (fatigue) alatt értjük az anyag szilárdságának csökkenését ismételt terhelés hatására, az egyszeri terheléskor adódó szilárdságához képest. A tönkremenetel hagyományos kritériuma alatt értjük (állandó elmozdulás esetén) a terhelésismétlések $N_f/50$ számát, amelynél a komplex merevségi modulus az eredeti értékének felére csökkent. A vizsgálat során alapadatként így mérjük a kezdeti komplex merevségi modulus értékét is, mely a 100 terhelési ismétléshez tartozó érték.

A vizsgálati terheléseket és frekvenciákat úgy kell megválasztani, hogy az eredmények interpolálással és ne extrapolálással legyenek számíthatók.

A hasáb alakú próbatesteken elvégzett négyponos hajlító vizsgálat az aszfaltkeverékek viselkedését jellemzi fárasztóterhelés alatt, szimmetrikusan elhelyezett belső és külső befogókkal ellátott négyponos, hajlítást vizsgáló gépben, karcsú, derékszögű (hasáb alakú gerenda) próbatesteken. A hasáb alakú gerendát négyponos, periodikus hajlításnak kell alávetni minden terhelési és támaszpontban, szabad forgással és mozgással. A hajlítást a két belső terhelési pontban (belső befogók) függőleges irányú, a gerenda hossz tengelyére merőleges terheléssel kell megvalósítani. A végtámaszokat (külső befogók) függőleges helyzetben kell rögzíteni. Ez az elrendezés állandó nyomatékot, így állandó fajlagos nyúlást kelt a két belső befogó között. Az alkalmazott terhelés szinuszos kell legyen. A vizsgálat alatt a próbatest hajlításához szükséges terhelést, a behajlást és a két jel közötti fáziskésést az idő függvényében kell mérni. A vizsgált anyag fáradási jellemzőit ezen mérésekkel kell meghatározni.

A BME Út és Vasútépítési Laboratóriumában 1982 óta rendelkezünk az MTS- ÚT fárasztó berendezéssel, melyhez kialakítottunk egy kétirányú hajlító készüléket és vizsgálati módszert, majd ennek korszerűsített változata 1991-ben készült el. Pályázati beszerzésnek köszönhetően 2004-től kezdve rendelkezésre áll egy brit fejlesztésű NU-Cooper 4 pontos hajlító-fárasztó

berendezés is. Az alábbi vizsgálatok során az MTS berendezést erővezérelt vizsgálathoz, az NU-Cooper készüléket elmozdulás vezérelt eljáráshoz használtam.

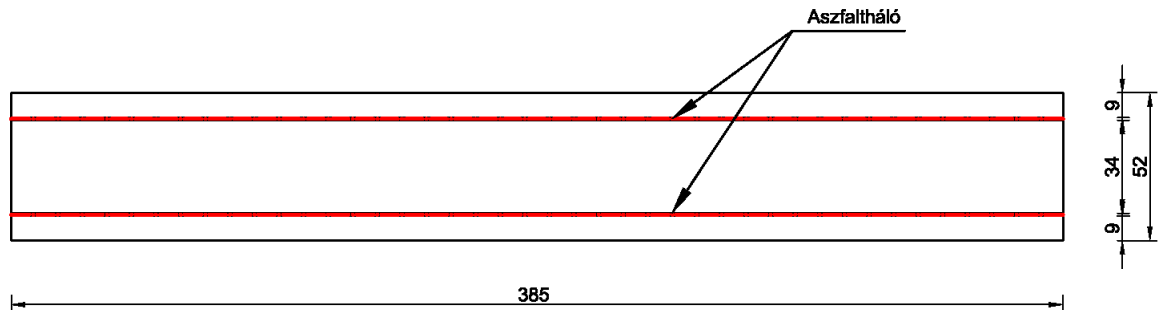
7.2. Alakváltozás vezérelt 4 pontos hajlító vizsgálat rácserősítésű próbatesteken

7.2.1. Próbatestek készítése 4 pontos hajlító vizsgálathoz

Minden vizsgálatot alakváltozás vezérelt módban, kétirányú terheléssel, 10°C hőmérsékleten, 10 Hz frekvenciával hajtottunk végre. A kétirányú hajlítás miatt olyan próbatesteket kellett előállítani, melyek mindkét hajlított oldalán jelen van az erősítő rács, a szimmetrikus terhelés miatt. Annak érdekében, hogy az aszfalterősítő háló hatékonyan tudjon dolgozni a próbatestben, a hálónak a semleges tengelytől minél távolabb kell elhelyezkedni, de minimális aszfalttakarás szükséges, hogy legyen a hálón. Tekintettel kellett lenni továbbá a próbatestek maximális magasságára is. Fenti peremfeltételek által azonban nem lehetett a teherhordó rétegek anyagát a vizsgálatra felhasználni, mivel a vágott felületek után a d_{\max} mértéke alá csökkent volna a hálót takaró külső aszfaltréteg. Mindezek figyelembe vételével konvencionális AB-8 keveréket alkalmaztunk valamennyi gerendafárasztási vizsgálathoz.

A próba lapokat, melyekből 3-3 próbatestet lehetett kivágni, három menetben állítottuk elő. Első lépésként egy 34 mm magas próbalap került bevibrálásra. A sablonból a próbalapot nem szereltük ki, erre ragasztottuk fel megfelelő mennyiségű bitumenemulzió felhordásával, vagy hőlégfúvással a vizsgált hálót. Második lépésként plussz 16 mm-es réteget vibráltunk rá az így elkészült próbalapra, mely vastagsága ez által 50 mm lett. Harmadik lépésként a próbalapot átszereltük egy magasabb sablonba, és egyúttal meg is fordítottuk; az így kapott felületre került rá a második háló, természetesen a már ismertetett ragasztási technikával. A meglévő próbalapra 23 mm vastagságú réteg került bevibrálásra, mely által a két hálót tartalmazó próbalap vastagsága összesen 73-74 mm lett. Az aszfalterősítő rácsokkal párhuzamos síkkal a próbalapokból olyan vastagságú szelet került levágásra, hogy a próbatest magját (mely 34 mm és két oldalán hálóval ellátott) 9-9 mm aszfalttakarás fogja közre. Az aszfaltrácsokat minden esetben úgy helyeztük el, hogy az a valós pályaszerkezetben keletkező igények irányultságának megfelelő legyen. Egy próbalapból három próbatest fűrészelt ki. Az egy lapból nyert három próbatesten minden esetben 3 igénybevételi szinten hajtottuk végre a vizsgálatokat, csökkentve ez által a próbatestek gyártásából eredő esetleges bizonytalanságokat.

A próbatest jellegábráját az **7.1. ábra** mutatja be, a valós rácserősítésű próbatesteket pedig a **7.1. kép** (bitumen bevonatú, hordozó nélküli rác), valamint a **7.2. kép** (szövet hordozójú, üvegszál erősítéses rác) mutatja be.



7.1. ábra: Az erővezérelt hajlító vizsgálathoz legyártott próbatest jellegábrája



7.1. kép: Hordozóanyag nélküli rác minta



7.2. kép: Szövetes ráccsal készült minta

A vizsgálatokat három igénybevételi szinten, 220, 160, 130 microstrain állandó elmozdulással hajtottuk végre, egy-egy próbatestet természetesen csak egy vizsgálatnak vetettünk alá. Minden elemi vizsgálathoz a két belső és a két külső befogót szimmetrikusan kell elhelyezni a hasáb próbatest középpontjához $L_{10l}/2$ viszonyítva, a két belső befogóra állandó és egyenlő terhelést kell adni. A ráadott terhet, a behajlást, valamint az erő és a behajlás közötti (rendszer) fáziskésést kell rögzíteni.

A vizsgálatba referencia próbatest mellett két rács fajtát vontuk be, és a hordozóanyag nélküli rácsot kétféle módon építettük be:

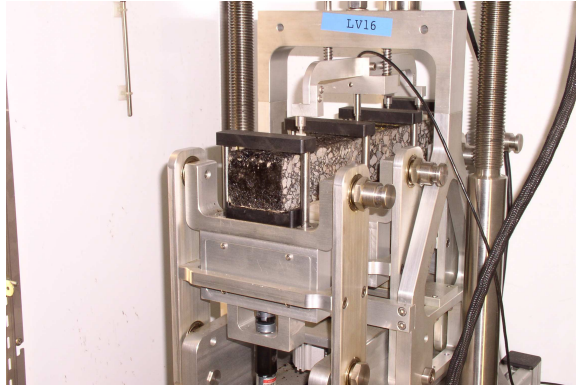
- Roadtex GR-G100 szövethordozós rács
- S&P Glasphalt G üvegszálás, hordozóanyag nélküli aszfaltrács bitumen emulzióval ragasztva
- S&P Glasphalt G üvegszálás, hordozóanyag nélküli aszfaltrács, hőlégfúvóval ragasztva

Az **7.1. táblázatban** a referencia próbatest összes vizsgálati eredményét – a kezdeti merevségét, a ciklusszámát – feltüntettem, a rácserősítéssel készült próbatestek eredményeit, hasonló formában a Mellékletben mutatom be.

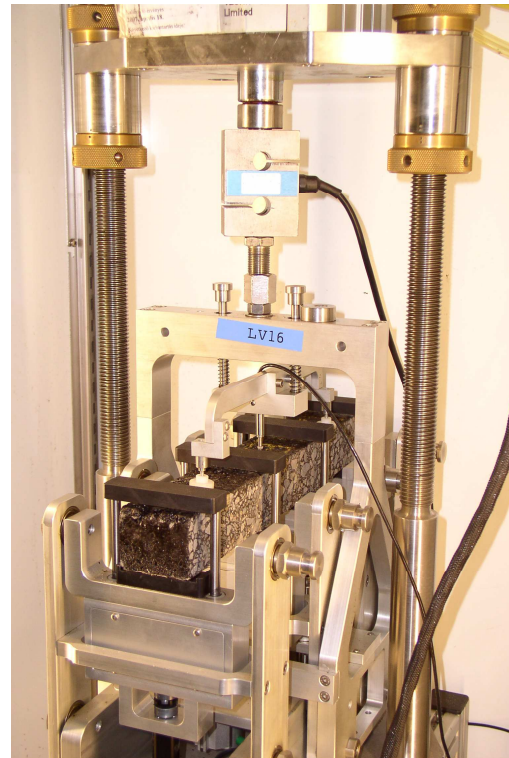
4 pontos gerendafárasztási vizsgálat, referencia						
vizsgált próbatestek vizsgálati jellemzői és eredményei						
gyártó	szálak típusa	próbatestek kódja	megnyúlás	kezdeti merevség (S ₀)	ciklusszám (N)	emulzió mennyisége
			microstrain	(N/mm ²)	db	(g/m ²)
·	·	GEX 013	130	9 144 253	1 372 000	1 300
		GEX 023	130	13 858 332	542 500	
		GEX 033	130	10 864 398	1 962 500	
		GEX 011	160	8 345 170	984 000	
		GEX 031	160	10 134 978	703 000	
		GEX 021	160	18 201 256	82 800	
		GEX 022	220	11 113 899	33 900	
		GEX 032	220	11 747 443	79 200	
		GEX 012	220	8 445 971	93 400	

7.1. táblázat: Referencia próbatestek eredményei

A vizsgálati eszközt a **7.3. kép**, valamint a **7.4. kép** ábrázolja.



7.3. kép: Vizsgáló fej



7.4. kép: 4 pontos hajlító vizsgáló berendezés

7.2.2. Az elmozdulás vezérelt vizsgálatok eredménye, a fáradási görbe

A fáradási görbe meghatározásához az azonos vizsgálati feltételek esetén ismételt elemi vizsgálatokhoz homogén csoportból kell a próbatesteket venni. A vizsgálatokat a választott terhelési feltételnek megfelelően különböző szinteken kell megismételni (pl. állandó behajlási módozat esetén különböző behajlási szintek vagy állandó erő alkalmazása esetén különböző erőszintek). A keverék fáradási görbéjét a választott vizsgálati feltételekkel (frekvencia, hőmérséklet és terhelési mód kiválasztása) kell előállítani, és a következő értékeket kell kiszámítani az alábbiak szerint:

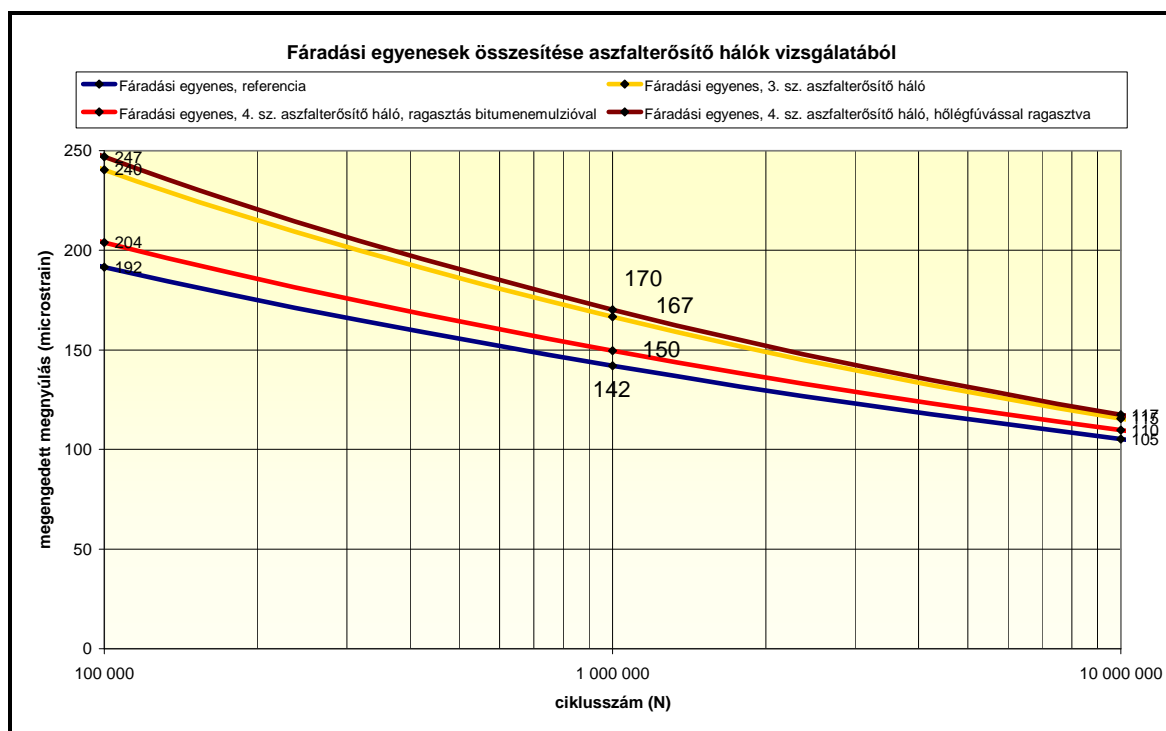
- a terhelési mód vizsgálati feltételeinek Q terhelési szintjét (az általunk végrehajtott vizsgálatokban 220, 160 illetve 130 microstrain), a választott k tönkremeneteli kritérium szerinti;
- 10^6 periódusszámú fáradási élettartamon;
- a lg-lg koordináta-rendszerben ábrázolt fáradási görbe p iránytényezőjét;

Megjegyezzük, hogy az adott vizsgálati eljárás igen időigényes. Az **7.1. táblázat** és a **Melléklet** táblázataiban részletezett vizsgálatok 10 Hz frekvenciával számolt tiszta vizsgálati időtartama, közel 1250 óra, ami 52 nap időtartamnak felel meg.

Az **7.1. táblázat** és a rácserősítésű próbatestek **Mellékletben** található adataiból készített fáradási egyeneseket, összevonva egy diagramon a Hiba! A hivatkozási forrás nem található. mutatja be.

Az egyes fáradási egyenesek adatait a korrelációs függvények felhasználásával egy diagramba gyűjtöttem. Az ábrán szemléletesebben látszik a 10^6 terhelési ciklusszámhoz tartozó megengedett megnyúlás értéke. A nagyszámú fáradási vizsgálatokból rajzolt egyenesekből egyértelműen kirajzolódik az aszfalterősítő rácsoznak a fáradásra gyakorolt pozitív hatása.

Hangsúlyozzuk, hogy az eredmények a fáradási élettartamra adnak útmutatást, mellyel egyidejűleg a járulékos technológiai (rétegtapadás) illetve beépítési problémákat is figyelembe kell venni.



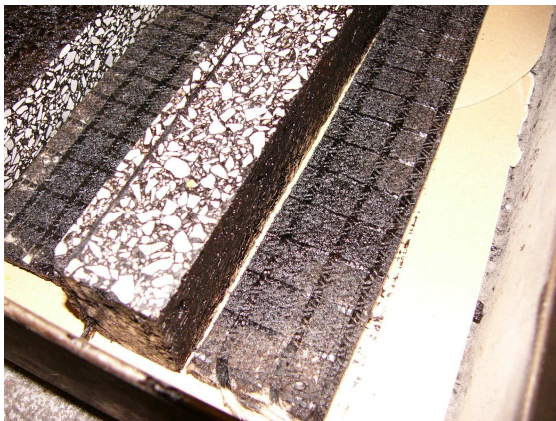
7.2. ábra: Az elmozdulás vezérelt módszerrel vizsgált fáradási egyenesek összesítése

A vizsgálatok befejezése után a három típusú (típusonként 6-6 db) próbatestet 100 °C -ra melegítettük. A három típus a szövet hordozójú üvegszálalás rácso, bitumenemulzióba ragasztva, a szövet hordozó nélküli bitumennel bevont rácso, bitumenemulzióba ragasztva, valamint a szövet hordozó nélküli bitumennel bevont rácso hőlégfúvással volt ragasztva.

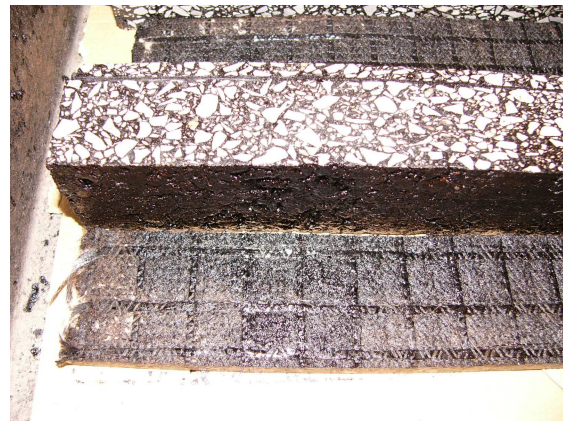
A 100 °C-ra történő melegítést követően a 9 mm vastag aszfaltréteg takarást spaklival eltávolítottuk. Tapasztalataink szubjektív megítélésűek, annak ellenére, hogy mind a három típusú próbatest szétválasztását ugyanazon személy végezte. A szövet hordozójú üvegszálalás rács esetén, ahol a háló bitumenemulzióba volt ragasztva a próbatest oldalra fordítását követően a 9 mm aszfalttakarás önmagától, saját súlyhatása következtében leesett, minimális erő kifejtésre sem volt szükség az eltávolításhoz (**7.5. kép, 7.6. kép**).

A szövet hordozó nélküli bitumennel bevont rács esetén, ahol a háló bitumenemulzióba volt ragasztva, már némi erő kifejtésre szükség volt, a 9 mm aszfalttakarás azonban egyben, kisebb szakadásokkal leválasztható volt. Annak ellenére, hogy a próbatest készítés során 160 °C hőmérsékletű aszfalt került a rácsra, a hordozó fólia több helyen is sértetlen maradt (**7.7. kép, 7.8. kép**). A szövet hordozó nélküli bitumennel bevont rács esetén, ahol a rács hőlégfúvással került rögzítésre, a 9 mm aszfalttakarás nem volt egyben eltávolítható, a néhány centiméteres lemezek leválasztásához is viszonylag nagy erőhatásra volt szükség (**7.9. kép, 7.10. kép**).

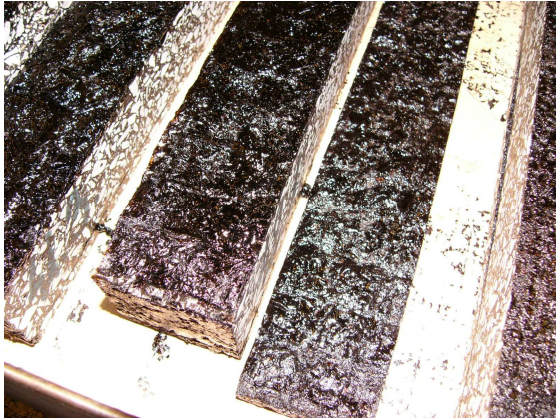
Az így nyert tapasztalatok ismételten alátámasztják az 1. és 2. tézisben, a rétegek együttműködésének fontosságáról felállított megállapításaimat.



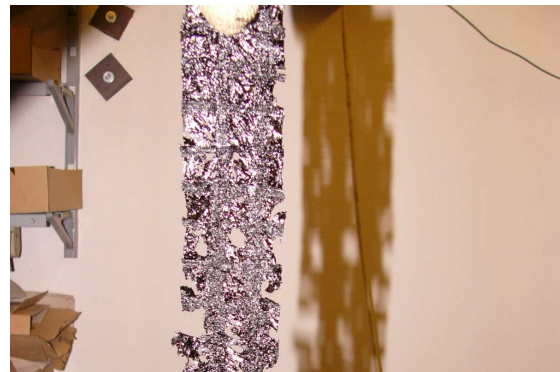
7.5. kép: Szövethordozós rács a vizsgálat után



7.6. kép: Szövethordozós rács a vizsgálat után



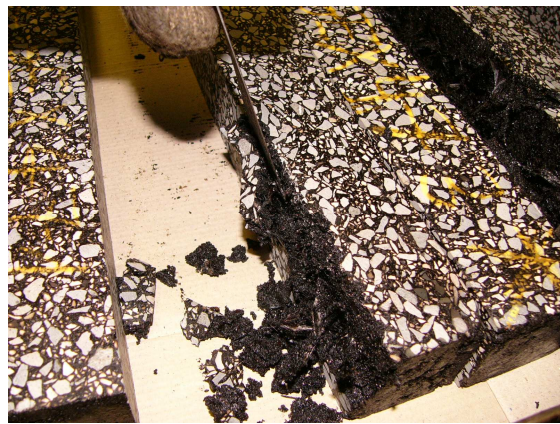
7.7. kép: Hordozóanyag nélküli rács vizsgálata



7.8. kép: Szinte sértetlen rácsszerkezet



**7.9. kép: Nehezen leválasztható rács
(hőlégfúvással készült)**



**7.10. kép: Nehezen leválasztható rács
(hőlégfúvással készült)**

7.3. Négypontos hajlítás erővezérelt módszerrel

2004 májusában végzett a laboratóriumunk először vizsgálatokat az aszfaltrácsok tulajdonságainak, pozitív és negatív hatásainak feltérképezése céljából. Ezen vizsgálatok során építettük be először az erősítő rácst a négypontos hajlításhoz tartozó gerenda próbatestbe, az akkori hajlító vizsgálatokat 2009-ben megismételtük. Az erővezérelt vizsgálathoz a próbatesteket úgy állítottuk elő, hogy a felső réteg az átlagos kopóréteg vastagságát adja, ezért 4 cm vastagságot építettünk be, az alsó rétegből pedig annyit vágunk le, hogy 1 cm takarás maradjon a beépített háló alatt. A vizsgálatokhoz használt próbatestek tehát 5 cm vastagságúak voltak. A kutatásba az elmúlt években az alábbi hálótípusokat vontuk be:

- Roadtex GR-G50 szövethordozós rács

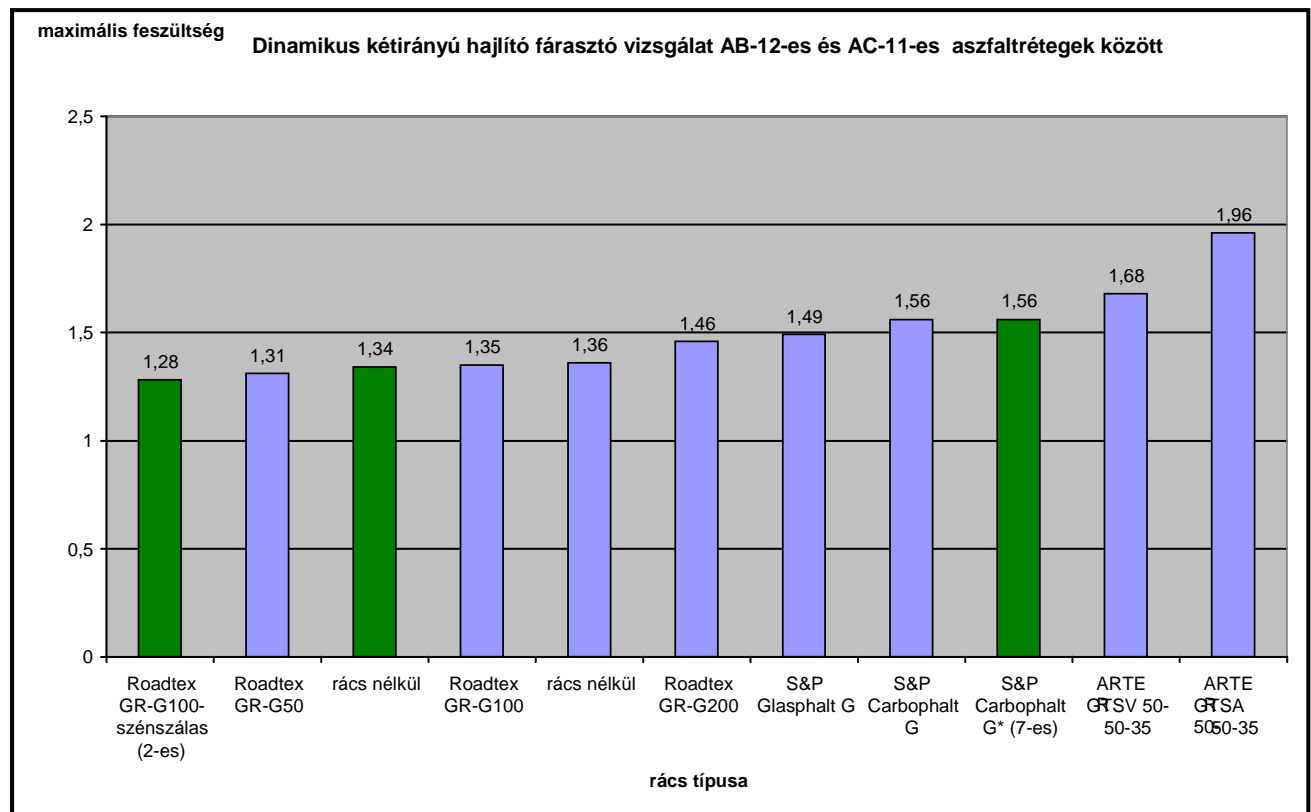
- Roadtex GR-G100 szövethordozós rács
- S&P Glasphalt G üvegszálás, hordozóanyag nélküli aszfaltrács
- Roadtex GR-G200 szövethordozós rács
- S&P Carbophalt G szénszálás, hordozóanyag nélküli aszfaltrács
- ARTER GTSA hordozóanyag nélküli
- ARTER GTSV szövethordozós rács

A próbatesteket AB-12-es és AC-11-es aszfaltból készítettük el. A vizsgálatot a 2007-es kutatástól eltérően – mivel más berendezéssel dolgoztunk – erővezérelt módszerrel, 10 Hz-en és 10 C°-on végeztük el.

Ezen vizsgálat során is a hálók/rácsok élettartamra gyakorolt hatására voltunk kíváncsiak. Amint az az alábbi diagramból kiderül, egyértelmű, hogy a hordozóanyag nélküli aszfaltrácsok viselkedtek a legjobban. A rács nélküli, illetve a Roadtex GR-G50 és GR-G100 típusú rácsok azonosan viselkednek, hiszen bár nagyobb hajlító-húzó szilárdságot kaptunk a két ráccsal készült próbatestnél, de az eredmények mindösszesen 5%-al voltak nagyobbak a rács nélküli próbatest értékénél.

Lényegesen hatékonyabb az S&P Carbophalt és Glasphalt üvegszálás illetve szénszálás, hordozóanyag nélküli aszfaltrács. Ahogy az eredményből látható 20%-al magasabb hajlító-húzószilárdság adódott az S&P hálókkal. A nagy szakítószilárdságú Roadtex GR-G200-as rács szintén jó eredményt mutatott, azonban nem tudta felülmúlni a hordozóanyag nélküli rácsok eredményét, pedig nagyobb szakító szilárdsággal rendelkezik, mint az S&P aszfaltrácsok.

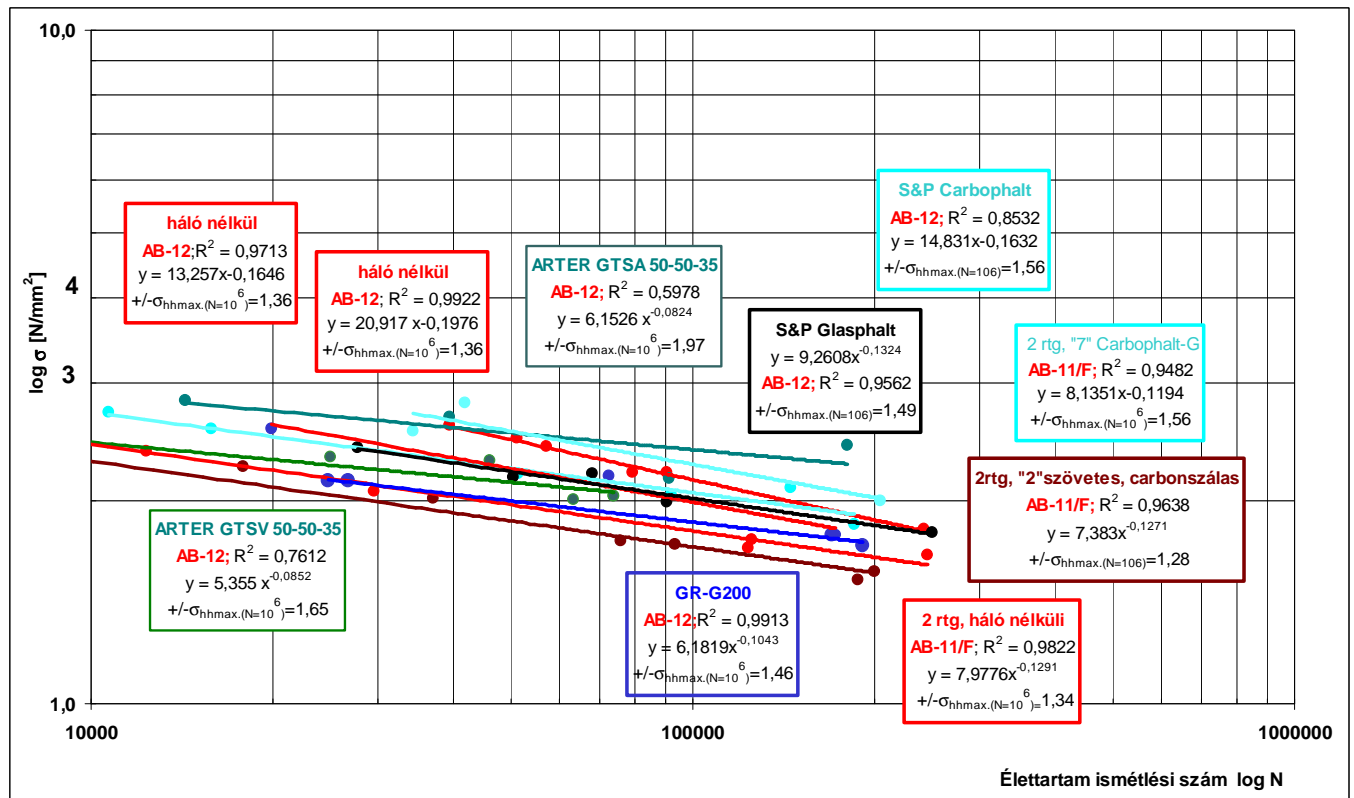
Nyilvánvalónak tűnik, hogy az aszfaltréteg együttdolgozásának hatása ennél a vizsgálatnál is érzékelhető. Az S&P hálóknál az együttdolgozás jobban jelentkezik, és ehhez adódik hozzá az üvegszálak, illetve a szénszálak az erősítő hatása.



7.3. ábra: Dinamikus kétirányú hajlító fárasztó vizsgálat AB-12 és AC-11 kopórétegek közé beépítve

Hasonló fárasztó vizsgálatot hajtottuk végre egy olasz gyártó két fajta, ARTER GTSA hordozóanyag nélküli és ARTER GTSV szövet-hordozós rács típusán AB-12 aszfaltkeverék közé építve, és mindkét esetben jobb eredményt kaptunk, mint a rács nélküli referencia próbatétel esetén. A szénsszálás S&P aszfaltrácson megismételt vizsgálatok is jobb eredményt adtak, mint a rács nélküli próbatételek.

Az alábbi ábrán foglaltuk össze az erővezérléssel készült vizsgálatok fáradási egyeneseit és a hozzájuk tartozó korrelációs együtthatók függvénykapcsolatait. (A vizsgálatok eredményeit táblázatos formában, a **Mellékletben** is összefoglaltam.)



7.4. ábra: Erővezérelt módszerrel végzett rácserősítésű próbatetek fáradási egyenesei

A 10 db fáradási egyenesből a két kiemelkedően jó ARTER típusú rácoknak rossz a korrelációs együtthatója, a többi egyenes 0,9 feletti értéket mutatott. Az erővezérelt fárasztási vizsgálatok eredményei egyértelműen kimutatták a rácok erősítő szerepét.

7.4. Hajlító-fárasztó vizsgálati hazai és külföldi kutatási eredmények

7.4.1. Hollandiai fárasztó vizsgálatok tapasztalatai rácbeépítéssel készült próbatesteken

4 pontos hajlítást, erővezérelt módszerrel Hollandiában végeztek 2002-ben. A kutatások során az S&P szén és üvegszálás rácseit, polipropilén nem szőtt textíliát és poliészter rácot vizsgáltak nagyméretű, 600x180x90 mm-es gerendába beépítve. A vizsgálatot 5 C°-on, 29,3 Hz-en 4500 N erő alkalmazásával folytatták le.

Az eljárás érdekessége, hogy a tönkremenetelt nem a kezdeti merevség felére történő lecsökkenésében határozták meg, hanem akkor, amikor a gerenda eltörik, azaz a fázis szög rögzítése a továbbiakban nem lehetséges. Az eredmények összehasonlításához a tönkremenetelnél megállapított teherismétlés számot adták meg, mely a következőképpen alakult:

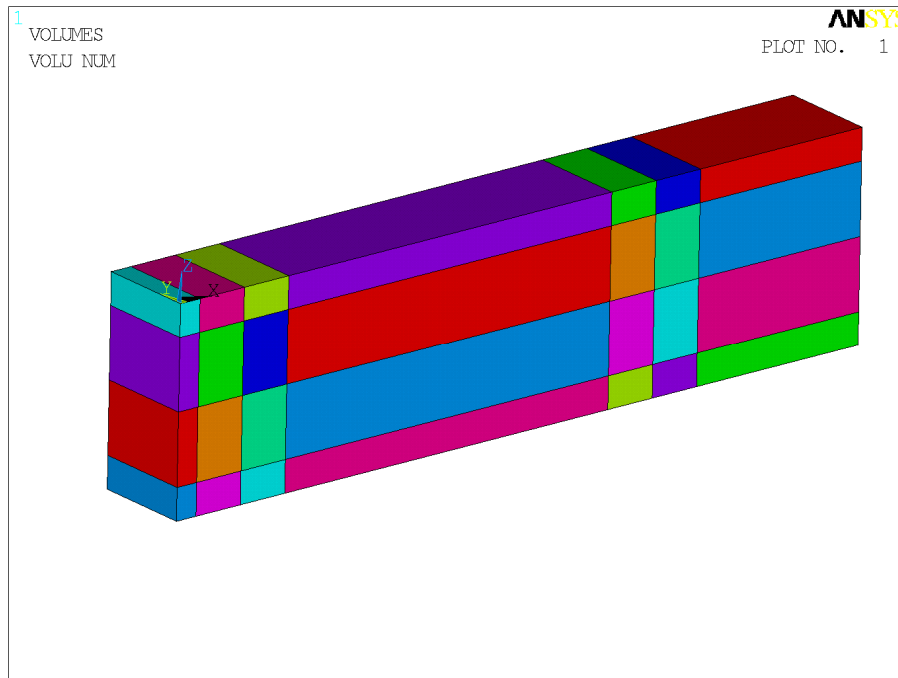
Rács típus	N_f = teherismétlési szám a tönkremenetelnél
<i>S&P szénszálas rács</i>	1.150.000
	1.020.000
<i>S&P üvegszálas rács</i>	181.100
	187.200
<i>Poliészter rács</i>	84.800
	95.100
<i>Polipropilén nem szőtt textília</i>	71.200
	74.200
<i>Referencia próbatest</i>	13.700
	28.000
	29.900

7.2. táblázat: Hollandiai fárasztás vizsgálat eredménye

Az eredmények hatalmas különbséget mutatnak a szén és üvegszálas termékek javára, ami véleményem szerint nem reális. A kutatási jelentésből nem derült ki, hogy hány próbatestet vizsgáltak az adott hálónál, illetve a hazai és EN-szabánytól eltérően csak egy terhelési szinten végezték el a fárasztó terhelést. A hollandiai kutatás azonban azt a tézisémet mindenképpen igazolja, hogy a rács nélküli szerkezetek élettartama jóval alacsonyabb a rácsbetéttel erősített szerkezetnél. [*Netherlands Pavement Consultant bv, 2002,*]

7.4.2. Fárasztó vizsgálat végelem modellezése

A BME Út és Vasútépítési Tanszék és a Hidak és Szerkezetek Tanszék közös vizsgálatának eredményeképpen készült el a fárasztó, 4 pontos hajlító vizsgálat véges elem modellje. A kutatási cél kialakításában, az eredmények kiértékelésében én is részt vettem. [*BME Út és Vasútépítési Tanszék, 2009*] A cél elérése érdekében először az alkalmazott program által nyújtott lehetőségeket kihasználva kifejlesztettük az aszfaltfáradás elemzésére képes végeselemes anyagmodellt. A végeelem modell megalkotásához szükséges alkalmazott aszfalt anyagmodell és számítási eljárás paramétereinek megválasztása az aszfalt fárasztási kísérletek alapján lett felvéve, úgy, hogy a kísérlet során mért fáradási ismétlésszámot kapjuk. Az így létrehozott aszfalt anyagmodell egy geotextíliával erősített aszfalt próbatest numerikus modelljébe lett beépítve, majd ezen a modellen került elvégzésre a numerikus fáradásvizsgálat. Az eredmények alapján meghatározásra került a háló hatása az aszfalt fáradási viselkedésére. Az alábbi ábrán látszik a végeelem számításához megalkotott modell.

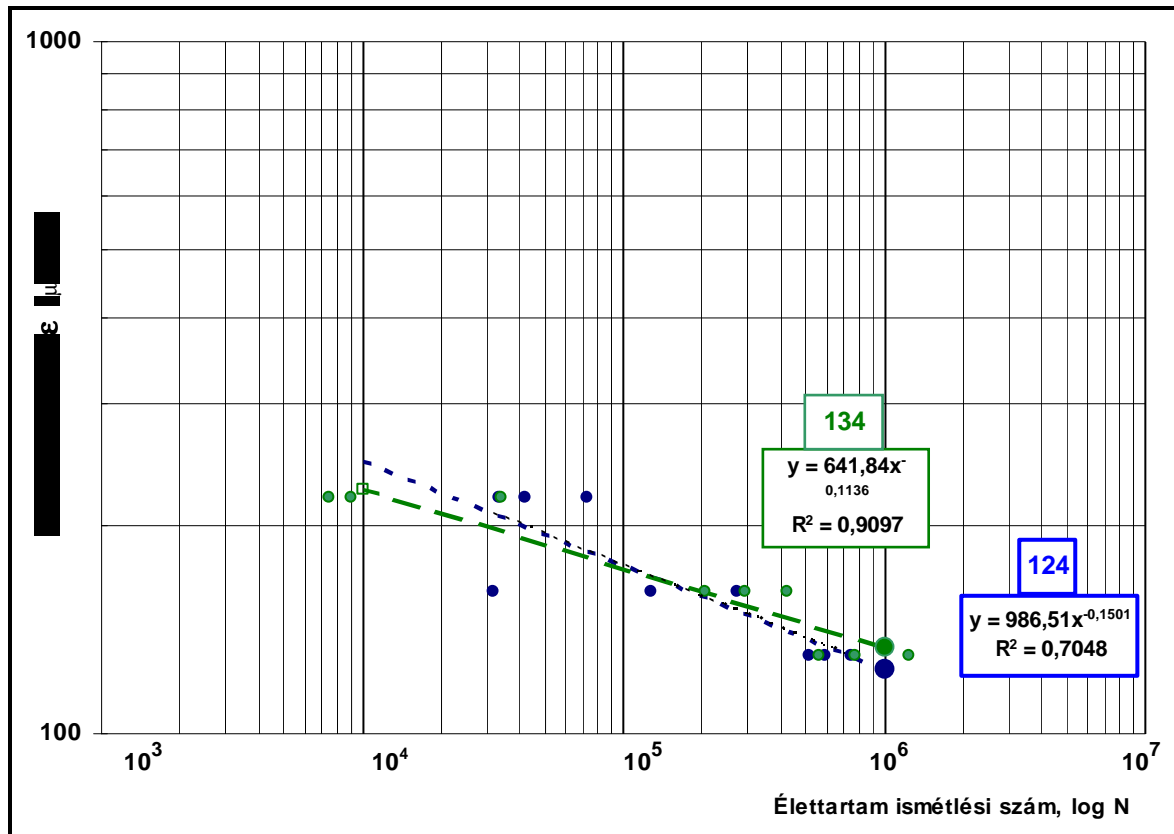


7.5. ábra: A 4 pontos hajlítás vizsgálathoz kialakított végelem modell

A modellezés során nem kaptuk vissza a fáradási hajlító vizsgálat kapcsán a rácserősítésű és a referencia próbatestek között mért különbséget, aminek valószínűleg az az oka, hogy csupán 5000 MPa-ra állítottuk a rács merevségi modulusát. A fáradási vizsgálat végelem számításának részletesebb elemzése a **Mellékletben** található.

7.5. Négy pontos hajlító- fárasztóvizsgálat nagygerendán

Rácserősítéssel készült próbatestek 4 pontos hajlító- fárasztóvizsgálatát végeztem el úgynevezett „nagygerendán”. A kísérlet célja az volt, hogy nagyobb méretű mintán is végezzek vizsgálatokat, feltételezve azt, hogy ebben az esetben a rácserősítés hatása szignifikánsabban jelentkezik. A gerenda hosszúsága minden esetben 50 cm, a szélessége átlagosan 8,7 cm volt. A gerenda magasságát, vastagságát azonban nem vettem állandóra, hiszen a rácserősítésű próbatestnél 7 cm magas, a rácserősítés nélküli próbatestnél pedig 9 cm magas gerendát alkalmaztam. A csökkentett magassági mérettel arra voltam kíváncsi, hogy a rácserősítés vajon milyen mértékű vastagság csökkenést eredményezhet. A vizsgálatot AC-11-es aszfaltkeveréket használtam, a beépített rács GlassGrid 8502-es hordozóanyag nélküli aszfaltrács volt. A vizsgálatot 10 C°-on, 10 Hz-en elmozdulás vezérelt módszerrel végeztük el. A beállított terhelési szint 130, 160 és 220 microstrain volt.



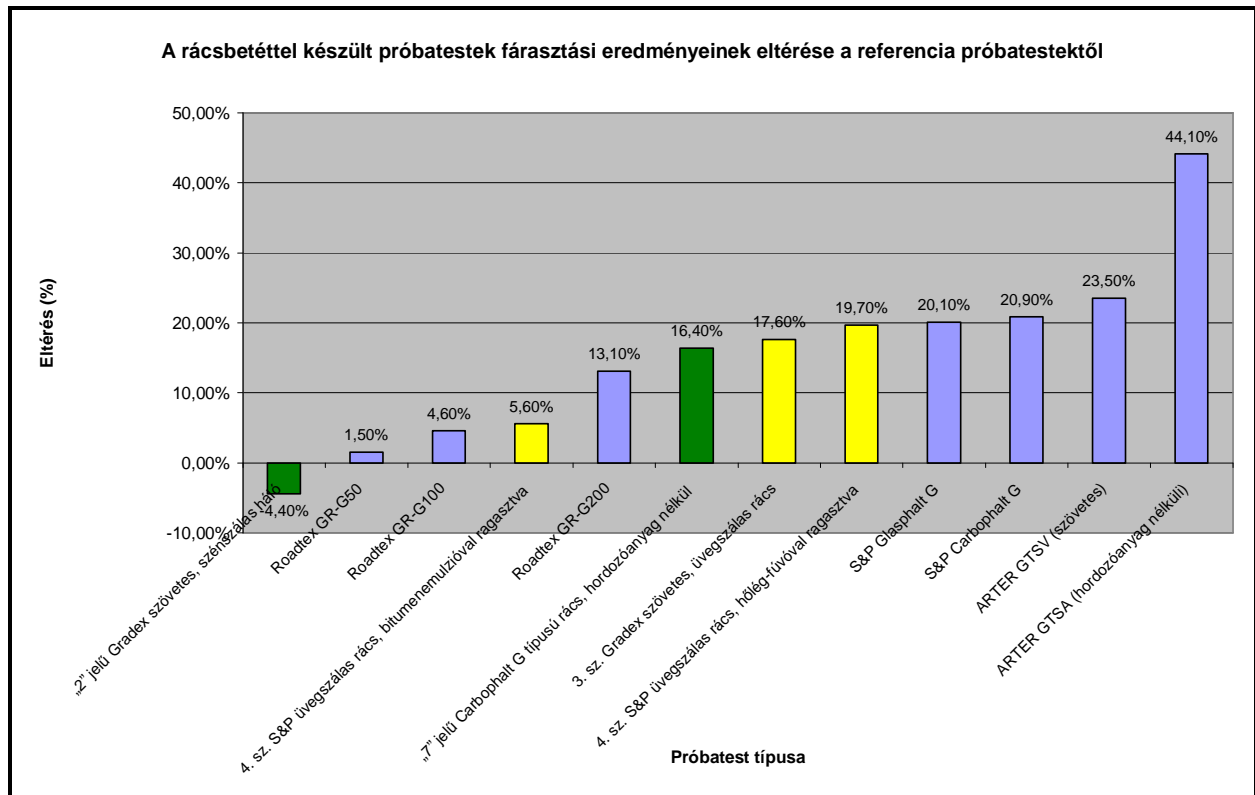
7.6. ábra: A rács erősítésű, 2cm-el vékonyabb próbatetek és az erősítés nélküli próbatetek fáradási egyenesei

A fenti **7.6. ábrán** nyilvánvalóan látható a rács erősítés kiváló hatása, ugyanis a 10^6 terhelési ciklusszámhoz tartozó megengedett megnyúlás értéke a zölddel jelölt, mindössze 7 cm vastag rács erősítésű szerkezetnél 134 microstrainre adódott (zöld egyenes), míg a 9 cm vastag erősítés nélküli szerkezet megengedett megnyúlás értéke mindössze 124 microstrain (kék egyenes) volt. A modell kísérlet tehát szemléletesen bizonyította, hogy a rácsbeépítés – megfelelő körülmények között – komoly erősítést jelenthet az aszfaltszerkezetnek, jelentősen megnövelheti annak élettartamát.

7.6. A hajlítási eredmények összehasonlítása

A fentiekben részletezett vizsgálatokat nem lehet teljesen összevetni egymással, hiszen más-más évben, más-más aszfaltkeverékkel készültek. (A 2007.-es próbateteknél AB-8-as típusú aszfaltot használtak, míg a 2004.-es évben AB-12-est, de két azonos típusú, de máskor készült aszfaltkeveréket sem lehet ebben az esetben összehasonlítani az eltérő keverék tervek miatt.) A vizsgálatok nagyobbik része erővezérelt módszerrel történt, és csak 4 sorozatot vizsgáltunk elmozdulás vezérelt módszerrel.

Az alábbi ábra arra vizont alkalmas, hogy a különböző típusú rácsos próbatestek eredményeinek eltérését a referencia mintáktól összehasonlítsa, a tendenciákat megmutassa.



7.7. ábra: A rácsbetéttel készült próbatestek fásztási eredményeinek eltérése a referencia próbatesttől

Az ábrán zöld színnel vannak jelölve az AC-11-es keveréken készült próbatestek eredményei, sárgával az elmozdulás vezérelt AB-8-as keverék eredményei, és kézzel pedig az AB-12-es mintákon végzett erővezérelt vizsgálatok eredményét láthatjuk.

Az eredményekből egyértelműen kiderül, hogy a rács nélküli esetekben kisebb feszültségeket és alakváltozást képesek elviselni a próbatestek, és a korábbiakban bemutatott fáradási egyenesekből is kiderül, hogy a rácsbetéttel készült próbatestek élettartama megnő.

Az AB-12-es mintákon végzett vizsgálat szerint a szövetes rácsok csak néhány százalékkal növelik meg a kapott eredményeket, és egy esetben az AC-11-es mintába beépített szövetes rács esetében rosszabb eredményt kaptunk. A többi esetben szignifikáns 15%-ot meghaladó eredmények mutatkoznak. Az is egyértelműnek tűnik, hogy a hordozóanyag nélküli rácsok bírják el a legnagyobb feszültséget és alakváltozást. (A 2007-es bitumenemulzióval történt ragasztásos rács rosszabb eredményét, a nem megfelelő beépítési technológiának tudom be.

Az ARTER rácsok eredményét nem tartom átlagképzőnek, mert rosszabb lett a regressziós együtthatójuk.)

A BME Út és Vasútéptérsi Tanszéke által vezetett kutatás során készült 4 pontos hajlítást modellező végeelem vizsgálat nem mutatott szignifikáns különbséget a rácsbetétrel készült szerkezet javára. Ugyanakkor a 4 pontos fárasztó vizsgálatok egyértelmű eltérést mutatnak a rácselőszítés javára.

Nagyon hasznos volt a 4 pontos hajlító vizsgálat „nagymeretű” gerendán, hiszen a 2 cm-el vékonyabb rácselőszítésű próbatest közel 10% nagyobb alakváltozást képes elviselni, mint a rácselőszítés nélküli próbatest. Ezzel a vizsgálattal szemléletesen lehetett bizonyítani, azt hogy milyen vastagság csökkentést, illetve élettartam növekedés lehet elérni a megfelelő minőségű rács alkalmazásával. Összességében kijelenthető, hogy a hordozóanyag típusától és a beépítési technikától függően 5-25%-kal nagyobb feszültséget vagy alakváltozást képesek elviselni a ráccsal erősített aszfalt szerkezetek.

8. Rácsbetéttel erősített aszfalt próbatestek mestergörbájének meghatározása

A mestergörbék meghatározásával olyan idő és frekvencia tartományokban vizsgálhatjuk az aszfaltok viselkedését, amelyet kísérletileg nem, vagy csak nagyon nehezen lehetne megoldani. A mestergörbék meghatározásával egyfelől kíváncsi voltam a ráccsal illetve, anélkül készült próbatestek merevségbeli különbségére, különböző frekvencia szinteken, másfelől ebből következtetést kívántam levonni arra vonatkozólag, hogy rács mikor kezd „dolgozni”, pozitív hatást kifejteni.

8.1. Elvi alapok

Az idő-hőmérséklet szuperpozíciós alapelv kimondja, hogy a thermoreológiai szempontból azonos módon viselkedő anyagok relaxációs időállandói a hőmérsékletváltozás hatására azonos mértékben változnak, azaz a terhelési időtől függő mennyiségek, mint például a komplex modulus az időtengely mentén a hőmérséklettől függő mértékben eltolható. Ezzel a módszerrel a különböző hőmérsékleten mért anyagi jellemzők egyetlen diagramon ábrázolhatóak. Az így kapott görbét mestergörbének nevezzük.

Idő- Hőmérséklet szuperpozíciós alapelv lehetővé teszi, hogy a különböző hőmérsékleti értékek és frekvenciák mellett begyűjtött adatokat egy referencia hőmérséklethez vagy frekvenciához viszonyítva vízszintes irányba elmozdítsuk, s ezzel a különböző izotermákat összehangolva egyetlen mestergörbét alakítsunk ki. A szuperpozíció matematikailag az ún. redukális frekvencia (f_r) bevezetésével valósítható meg. Az $a_{(T)}$ eltolási tényező határozza meg a vízszintes tengely mentén kívánt elmozdulást az adott hőmérsékleten. A tényleges frekvenciát ezzel az eltolási tényezővel kell elosztani, hogy megkapjuk a mestergörbe redukált frekvencia (f) értékét. A referencia hőmérsékleten az elmozdulási tényező természetesen:

$$a_{(T)} = 1$$

$$(f_r) = \frac{f}{a_{(T)}}$$

Természetesen ezzel ellenértékű, ha a frekvencia helyett a terhelési idővel számolunk, ekkor értelemszerűen a redukált terhelési idő (t_r) kell megadni az eloszlási tényező segítségével az alábbiak szerint:

$$(t_r) = \frac{t}{a_{(T)}}$$

Az MSZ EN 12697-26 szabvány csak általánosságban ismerteti a mestergörbe meghatározásának az elvét: „Egy adott hőmérsékleten a mestergörbét úgy kell meghatározni, hogy egy másik hőmérsékleteken felrajzolt izotermákat, szigorúan csak a terhelési időtartam tengelyével párhuzamosan, eltolunk. Az eltolási tényező értékét grafikusán vagy számítással lehet meghatározni úgy, hogy a kívánt hőmérsékleten folytonos görbét kapjunk.”

Mint a fentiekből is látszik, az eltolási tényező értékének meghatározását a szabvány nem közli.

A reológiában két leggyakrabban alkalmazott összefüggés az eltolási tényező meghatározására, az Arrhenius féle és a Williams-Landel-Ferry (WLF) egyenlet. [Tóth Cs, 2010]

Az Arrhenius féle egyenlet:

$$\log[a_{(T)}] = \log e \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) = C \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)$$

Ahol:

$a_{(T)}$ - eltolási tényező

T - kísérleti hőmérséklet, K

T_{ref} - referencia hőmérséklet, K

C - konstans, K

ΔH - aktiválási energia, J/mol

R - egyetemes gázállandó: 8314 J/mol

A szakirodalom szerint aszfaltkeverékek esetén használható néhány konstans érték:

$C = 10920 \text{ K}$ (Francken et al, 1988), $C = 13030 \text{ K}$ (Lytton et al, 1993) $C = 7680 \text{ K}$ (Jacobs, 1995)

A Williams-Landel-Ferry (WLF) egyenlet

$$\log[a_{(T)}] = -\frac{C_1 \cdot (T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}}$$

Ahol:

$a_{(T)}$ - eltolási tényező

T - kísérleti hőmérséklet, K

T_{ref} - referencia hőmérséklet, K

C_1, C_2 - konstans, K

A nemzetközi szakirodalom szerint a konstansok értéke a következők szerint alakul: $C_1 = 9,5$ és $C_2 = 95$ (Sayegh, 1967) vagy $C_1 = 19$ és $C_2 = 92$ (Lytton et al, 1993) [Tóth Cs, 2010]

A harmadik modell, amit a leginkább alkalmazunk a gyakorlatban, az úgynevezett szigmoid modell. Az aszfaltkeverék esetében a mestergörbe egy alul-felül korlátos függvény, amely egy nemlineáris „s” alakú, úgynevezett szigmoid függvénnyel leírható, melynek általános képlete az alábbi:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{(-a \cdot x)}}$$

A mérések lefolytatás után megszerkeszthető a keverék mestergörbéje, amely az alábbi képlettel írható le.

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \cdot (\log(t_r))}}$$

Ha a mestergörbét nem a terhelési idő, hanem a frekvencia függvényében adjuk meg, az összefüggés az alábbiak szerint módosul:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \cdot (\log(f_r))}}$$

Ahol:

$ E^* $	merevség, MPa
$\delta, \gamma, \beta, \alpha$	konstans paraméterek
t	redukált terhelési idő, s
f_t	redukált frekvencia

A képletekben δ az $|E^*|$ minimum értéke, a $\delta + \alpha$ az $|E^*|$ maximumértéke, β és γ pedig a szigmoidális függvény paraméterei. Az alábbi ábra a grafikus értelmezést mutatja. Ezt követően az eltolási tényezőt független változóként kell kezelni. Az optimálás elvégzése után az eltolási tényezőt a nemzetközi szakirodalom jellemzően például az alábbi másodfokú függvénnyel javasolja megadni [Tóth Cs, 2010]:

$$\log a_{(T)} = a \cdot T^2 + b \cdot T + c$$

Ahol:

$a_{(T)}$	eltolási tényező
T	kísérleti hőmérséklet
a, b, c	konstans, K

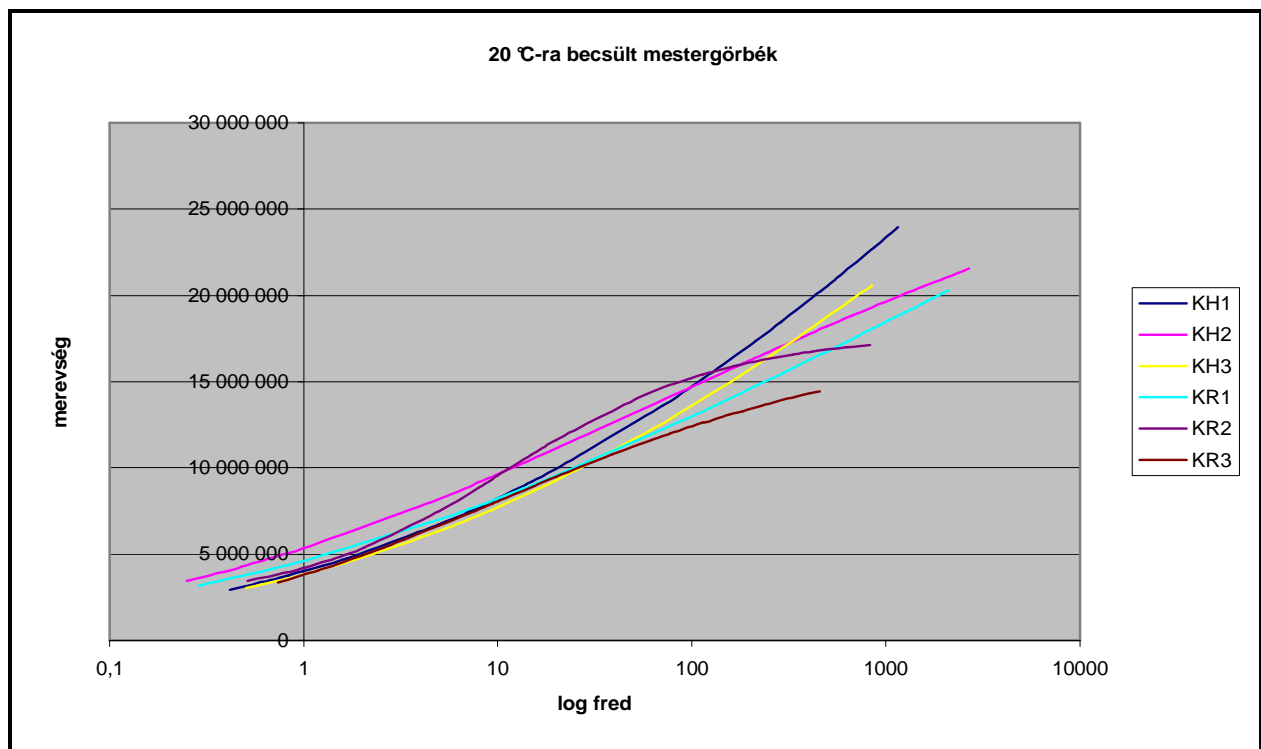
A mestergörbék eltolási tényezői három féle módon kerültek meghatározásra, de érdemi különbség nem jelentkezik a felrajzolt görbék között, a legújabb kutatási eredményeknek megfelelően a szigmoid modellel vettem fel az eltolási tényező értékét,

8.2. Rácserosítású próbatestek mestergörbéje

Az MSZ EN 12697-26 szabvány előírása szerint, mely legalább 4, egymástól legfeljebb 10 °C-kal eltérő hőmérsékleten és mindegyik hőmérsékleten, a logaritmikus skálán egyenletesen elosztott legalább 3 különböző frekvenciával vettem fel a komplex modulus értékét úgy, hogy a szélső frekvencia értékek aránya legalább 10 volt. A kezdeti merevségi modulust a 45-ödik és a 100-adik terhelésismétlés közé eső periódusban határoztam meg. Az esetek 90%-ában a kezdeti merevségi modulust a 100. periódusban határoztam meg, kivétel azokban az esetekben, amikor a fajlagos alakváltozási amplitúdó nem érte el a célértéket, illetve a fázis szög nem állt be az ennek megfelelő szögértékre. A vizsgálatot a négy pontos hajlító

berendezés elmozdulás vezérlő programjának elindításával, és a fenti módon történő értékek rögzítésével hajtottam végre. [Almássy-Tóth, 2010]

A vizsgálat lefolytatásához először 3 db AC-11-es típusú aszfaltkeverékből készített referencia próbatestet és 3 db ráccsal erősített (GlasGrid 8502-es) próbatestet készítettünk el. A próbatestek 7 cm vastagságban készültek el, és alul-felül 1 cm takarás ráhagyásával lett beépítve a rácsbetét a szerkezetbe. A referencia minta esetén is meghagytuk a réteghatárokat, de itt rács helyett csak bitumenemulziót kentünk a rétegek közé. A mintaszám elérésének növelése, illetve nagyobb méretű modell kísérlet elvégzése érdekében a vizsgálatot megismételtem úgynevezett „nagy gerendán”, ahol a próbatest 50 cm hosszú, 8,7 cm széles és 9 cm magas volt. A rácsbetét alul-felül szintén 1 cm takarás ráhagyásával került beépítésre a szerkezetbe. A fenti GlasGrid 8502-es rács mellé a kísérletbe bevontam egy acélrácsot (kereskedésben vásárolt 15x15 mm rácslyuk méretű, merev kerítésrács) is, és azt is a fenti módon építettem be a szerkezetbe. Az alábbi diagramon láthatóak a fenti elvek szerint készült, a szigmoid modellt követő ráccsal, acélráccsal, illetve anélkül készült kisméretű gerenda alkalmazásával készült próbatestek mestergörbéi. A nagygerendás próbatestek mestergörbéit a Mellékletben lehet megtalálni.



8.1. ábra: A ráccserősítésű és rács nélküli próbatestek mestergörbéi (KH jelű: rács, KR jelű referencia)

A referencia és rácserősítéssel készült próbatestek mestergörbéinek értékelésénél a következőt állapítottam meg:

- A mestergörbék mindegyike – referencia és a ráccsal készült is – a közepes frekvencia tartományban (1 és 50 Hz között) hozzávetőlegesen azonos merevségi értéket vesz fel.
- Alacsony frekvencia tartományban megfigyelhető, hogy gyorsabban csökken az aszfalt saját merevsége, mint a ráccsal erősített próbatesté.
- A magasabb frekvencia tartomány esetén az egyébként viszkózus tulajdonságú aszfalt, terhelésre adott válaszreakciója nem tud olyan merevség növekményt mutatni, mint az elasztikus rácsbetétellátott anyag. Ennek következtében ezekben a frekvencia tartományokban az aszfalt és a rács merevségi viszonyszáma eltolódik a rács javára.
- A mestergörbék elemzése igazolja azt a más vizsgálatoknál – keréknyomvályú-képződés, hajlítás - tapasztalatot, hogy minél gyengébb az aszfalt merevsége annál jobban érvényesül a merevebb háló hatása.

9. Erősítő anyagokkal ellátott aszfaltszerkezetek hidegviselkedése

A hazai klimatikus viszonyok miatt kiemelten fontos, hogy ne csak a „melegoldali” viselkedését vizsgáljuk az aszfaltnak, hanem megnézzük, hogy miként viselkedik hidegben, szélsőséges körülmények között. A rácsbetéttel készült aszfaltszerkezetek hidegviselkedésének vizsgálatát is fontosnak tartottam megvizsgálni, hiszen a fellépő termikus feszültségek komolyan károsíthatják a pályaszerkezetet, és kérdés, hogy a beépített rács mennyiben segíti ezen igénybevételekkel szembeni ellenállást.

Az aszfalterősítő hálók/rácsok esetén az aszfalt repedési hőmérsékletének meghatározáshoz szükséges vizsgálatot, és tiszta húzási vizsgálatot végeztünk el.

9.1. Rács-erősítés hidegviselkedési vizsgálata a nemzetközi gyakorlatban

Az aszfalterősítő rácsok hidegviselkedési szerepét, a termikus repedés képződés megakadályozásában vállalt hatását csak beton alapréteg és aszfaltréteg összeépítéséből készült próbatesteken vizsgálták többféle eljárással. Aszfalt és aszfalt közé beépített rács hidegviselkedését – információim szerint – nem vizsgálták sem itthon, sem az USA-ban, vagy Európa más részén.

A Belga Útügyi Kutató Intézet a 90-es évek közepén végzett hidegviselkedési vizsgálatot az S&P üvegszálalás rács beton alapréteg és aszfalt réteg közé történő beépítésével. A vizsgálat során a próbatest végeit rögzítették – gyakorlatilag gátolták az alakváltozását – és 0 és 60 C° közötti ciklikus hőmérsékletváltozást hajtottak a mintadarabon végre. A 60 C°-ot másfél óra alatt érték el, majd fél óra alatt csökkentették vissza hőmérsékletet 0 C°-ra. Ez a ciklikus terhelést tönkremenetelig folytatták és ez alatt mérték a megjelenő repedések vastagságát és hosszát, illetve az erősítő réteg elmozdulását. Az S&P üvegszálalás ráccsal ellátott szerkezet 56 ciklust bír ki, a rács nélküli referencia próbatest 2 ciklust bír ki! [*Centre De Resherces Routieres, 1995*]

9.1. Hidegviselkedési vizsgálat elvi alapjai

Az aszfaltburkolatok egyik gyakori tönkremeneteli módja, hogy a késő őszi, téli és kora tavaszi időszakban a gyakori gyors lehülések következtében, amikor az aszfaltrétegben ébredő termikus húzófeszültségek elérik az aszfalt húzószilárdságát repedések keletkeznek az aszfaltrétegben. Ezek a repedések először a levegővel közvetlenül érintkező kopórétegben jönnek létre, de később a vízbehatolás és a pályaszerkezet keresztmetszet csökkenése miatti teherbírás csökkenés következtében az alsóbb aszfaltrétegekre is áterjednek. A kopórétegen keresztirányú, hosszirányú (a sávcsatlakozásoknál) repedések, majd a termikus és forgalmi terhelésekből származó húzófeszültségek szuperponálódása következtében mozaikos repedezettség és kátyú keletkezik a keréknyomvályúban.

Az aszfalt hidegviselkedését ($+5^{\circ}\text{C}$ alatti hőmérsékleten) négy jellemzője határozza meg:

- húzószilárdsága,
- merevségi modulusa,
- hőtágulási együtthatója,
- relaxációs képessége.

Az aszfaltoknak ezen négy jellemzője a hőmérséklet függvényében nagy mértékben változik. A -25°C nagyságú hőmérséklet csökkenés a húzószilárdság 60 %-os, a modulus és a relaxációs idő 3-4 szeres növekedését okozhatja. A lineáris hőtágulási együttható is változik, csökken, de csak kis mértékben. A húzószilárdság növekedése természetesen pozitív változás, de a többszörösére növekedő modulus érték és relaxációs időtartam a repedés képződés szempontjából rendkívül hátrányos aszfalt tulajdonságok, melyeket úgyszólván csak a kötőanyag minőségi tulajdonságaival és mennyiségével vagyunk képesek befolyásolni, vagyis csökkenteni. Az aszfalt kopórétegben a repedés létrejöttét a fenti aszfaltjellemzőkön kívül a lehülési sebesség és a réteg, felülettel párhuzamos elmozdulásának akadályoztatása is befolyásolja, illetve ezek megfelelő mértéke nélkül nem is jöhet létre a repedést létrehozó termikus feszültség.

Télen, -20°C -on az aszfalt merevsége, húzószilárdsága eléri, sőt meghaladja a jobb cementbeton azonos jellemzőit (25000N/mm^2 merevség, $\sigma_{\text{Hh}} = 4,0\text{ N/mm}^2$). A lineáris hőtágulási együtthatója viszont csak a nagy hézagtartalmú aszfaltoknak (drén-, vagy

zajelnyelő aszfalt) csökken le $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ értékig. Aszfalt relaxációs képessége a hőmérséklettel együtt csökken, de a beton ezen képességét (mely a hőmérséklettel alig változik) alacsony hőmérsékleten is meghaladja.

Csökkenő hőmérsékleten az előbbieket követően az aszfalt útpályaszerkezetek teherbírása növekszik. Így az együttműködő aszfaltrétegek esetén az alsó és a felső réteg szélső felületein a kerékterhelés hatására keletkező ismétlődő hajlító- húzófeszültségek önmagukban nem okoznak repedéseket az aszfaltrétegekben. Ugyanakkor az **5 °C/óra lehülési sebességgel gyorsabb hőmérséklet csökkenések** esetén a felső aszfaltrétegekben (az alsó, még magasabb hőmérsékletű rétegek általi akadályoztatások miatt) ébredő termikus húzófeszültségek már csak csekély része épül le (az aszfalt relaxációs képességétől függően), nagyobb rész felhalmozódik, és amikor a húzófeszültség eléri az aszfaltréteg azon a hőmérsékleten meglévő húzószilárdságát, **létrejön a termikus repedés.**

A termikus húzófeszültség a relaxáció figyelembevétele nélkül:

$$\sigma_t = \alpha \times E \times \Delta t \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Ahol, α : az aszfalt lineáris hőtágulási együtthatója, átlagosan 25×10^{-6} [1/C]

E: aszfalt merevségi módosulás, - 5 C –on átlagosan 15000N/mm²

Δt : a hőmérsékletváltozás (különbség) °C

Ha $\Delta t = 10$ °C –os étékkal számolunk, akkor:

$\sigma_t = 25 \times 10^{-6} \times 15000 \times 10 = 3,75$ N/ mm², ami alig kisebb az átlagos aszfalt -5 °C-on mérhető húzószilárdságnál.

Természetes, ha a kopórétegben felhalmozódott termikus húzófeszültségekhez *hozzáadódik egy átgördülő kerék okozta hajlító- húzófeszültség*, és ha így lépi túl a húzószilárdságot, szintén létrejöhetnek a keréknyomvályúba és peremén a burkolatrepedések.

9.1.1. Példa a termikus repedések forgalmi terhelés nélküli létrejöttére

A termikus repedések létrejöttéhez azonban nem szükséges forgalom, ennek ékes bizonyítékaként álljon itt két példa:

Az M7-es autópálya 1975-ben megépített jobb oldali (soha nem üzemelő) holt útszakaszait említjük meg, melyeknek 1990-ben nagyobb mértékű volt a repedezettsége, mint a 15 éven keresztül nagy forgalmat lebonyolító bal pálya burkolatának, mely utóbbit nyilvánvalóan éppen a forgalom gyógyította meg egy kissé nyaranta.

A másik, aktuálisabb példa az M35-ös gyorsforgalmi út építése során történt meg. 2005 őszén a kivitelező elvégezte a CKt burkolat beépítését és feszültségmentesítését. A CKt alaprétegre háló-SAMI kompozit feszültségmentesítő elválasztó réteget terítettek le, és még a tél beállta előtt beépítették egy rétegben az mK-22/F-NM bitumenes alapréteget. 2006. február utolsó napjaiban a Kivitelező észlelte és jelezte, hogy az elkészült CKt és az arra ráhelyezett mK-20/F-NM rétegen számos, alapvetően keresztirányú repedés keletkezett. A repedési helyekről vett fúrásminták vizsgálata alapján a Kivitelező megállapította, hogy a repedések a teljes CKt rétegben és az aszfaltrétegben egyaránt és együtt megtalálhatóak. Egyértelműen megállapította azt is, hogy a háló-SAM rendszer, a leragasztásához használt bitumenemulzióval együtt sértetlen maradt.

A hiba oka egyrésztől visszavezethető a nem megfelelő mikro repesztése, másfelől azonban a téli hónapok során nagyon komoly hőingadozások alakultak ki (0°C és-18°C között).

A téli időszakban előfordult, ismétlődő alacsony és nagy hőingadozású hőmérsékletek hatására a jelentős és nagyon egyenletes szilárdságú CKt jelentős mértékben összehúzódott, amelyet a jó szilárdságú cement kötőanyagú réteg nem volt képes repedés nélkül elviselni.

A CKt és az aszfaltréteg között meglévő jelentős súrlódás miatt a hidraulikus réteg hosszváltozása az aszfaltréteget is azonos jellegű és mértékű alakváltozásra készítette, amely összehúzódást ez az igen rideg aszfalttípus repedés nélkül nem volt képes elviselni.

Érdekes és egyértelmű megállapítást jelez a hidraulikus kötőanyagú alapréteg és az aszfaltréteg kapcsolatáról a szakvélemény, hiszen túl nagy súrlódási tényezőt, azaz a túl jó együttműködés tette részben felelőssé a hibákért. Egyértelmű, hogy hidraulikus alapréteg és aszfaltréteg között az elválasztó szerepnek kell érvényesülni. Ezzel szemben a bitumenes alaprétegen megjelent repedések orvoslására, a következő aszfalt réteg felé a repedésáttükröződés meggátolására már szövet hordozó anyag nélküli, üvegszál, vagy karbonszál erősítőanyagút (pl. a S&P Carbophalt G háló 200/120 kN/m-es szakítószilárdsággal, amely anyagnál a szénszál az egyik irányban bitumennel átítatott) kell teríteni és ezen réteg tapadását mind a fogadó, mind a rákerülő aszfalthoz biztosítani kell. Ezen háló funkciója ezért kizárólag a repedés feletti aszfalt megerősítése, elválasztó hatással nem szabad rendelkeznie. [Karoliny - Dr. Fi, 2006]

A fenti két eset is jól mutatta, hogy a termikus repedések mindig a lehülés (gyors lehülés) folyamán jönnek létre, főként 4-5 méterenként megjelenő keresztirányú repedések formájában.

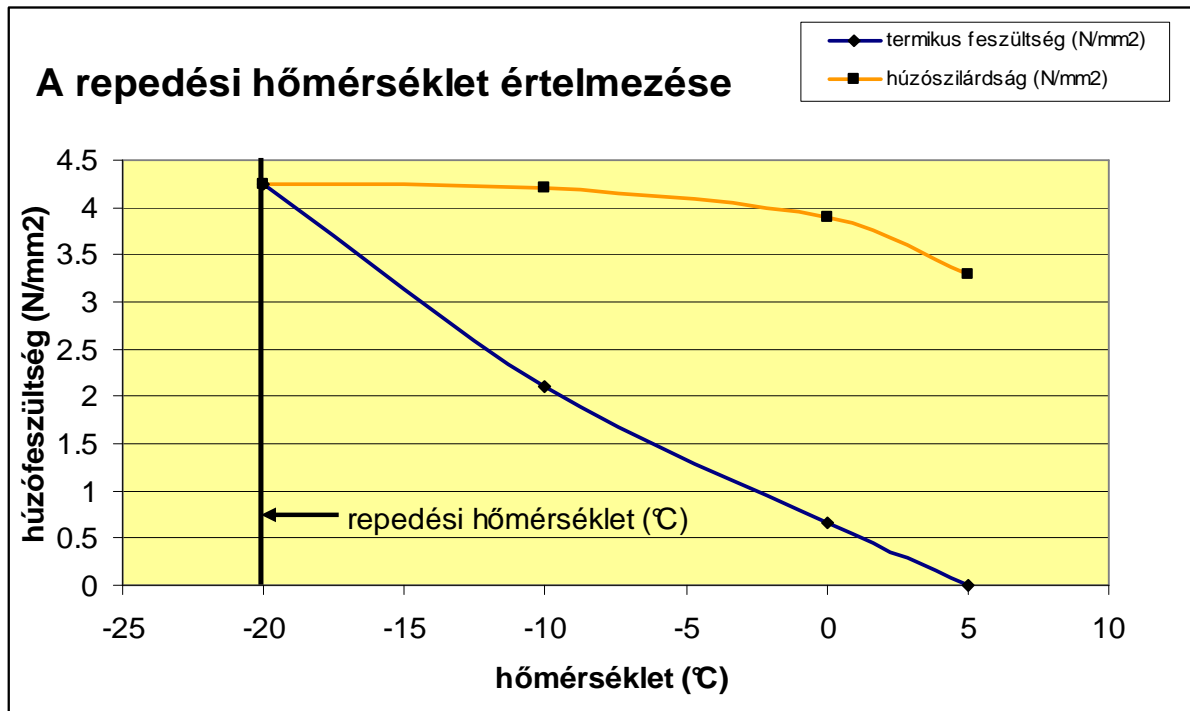
9.2. Aszfalt repedési hőmérsékletének meghatározása (ARH vizsgálat)

Az aszfalt repedési hőmérséklete (ARH) az aszfaltkeverék hőmérsékletváltozás következtében beálló repedési érzékenységre, az úgynevezett hidegviselkedési tulajdonságaira nyújt összegző információt. Ez a vizsgálat szimulálja legjobban a gyakorlati körülményeket. A vizsgálati módszert a Nemzeti Autópálya Rt. által MF 3/2004 számon kiadott Műszaki Szállítási Feltételekben írta elő (A nagymodulusú aszfaltkeverékekből készült hasáb alakú próbatestek adott hőmérsékletváltozás mellett történő szakadásához tartozó hőmérséklet meghatározása).

A hivatkozott műszaki előírás ugyan a nagymodulusú keverékek vizsgálataként írja elő az aszfalt repedési hőmérsékletének meghatározását, azonban mivel a vizsgálat során a vizsgálati körülmények rögzítettek, valamint a referencia próbatestek, illetve a hálóval erősített próbatestek tönkremeneteli állapotát vizsgáltuk azonos keverék felhasználásával, az adott vizsgálat a különböző módon előállított próbatestek összehasonlítására ad relatív mérőszámot.

A Tanszékünkön már korábban kifejlesztett vizsgálat során hasáb alakú próbatesteket állítottunk elő. A hasáb alakú próbatesteket vibrációs tömörítéssel, 100%-os tömörségre tömörítettük be, majd ezekből a tömörített lapokból kerültek kialakításra a minden oldalán vágott felülettel rendelkező próbatestek. A próbatestek mérete 50*50*250 mm, a műszaki előírásnak megfelelő mérettűrésekkel.

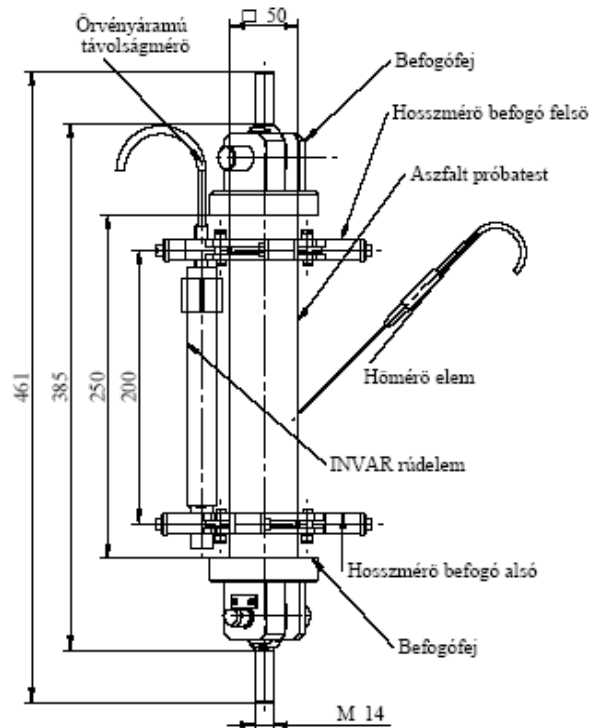
Az ilyen módon előállított próbatestet két véglapjára felragasztott acél húzófejekhez rögzíthető a feszítőmű, mely erőmérővel szabályozott. A próbatest hosszirányú alakváltozását mérő úradók révén a próbatest bázishossza a meghatározott kezdeti hőmérsékleten rögzíthető. A próbatestet körülvevő szigetelt klímaterben a próbatestre rögzített elektronikus hőmérők által vezérelve a hűtőberendezés a meghatározott gradiensnek megfelelő sebességgel hűti a próbatestet. A próbatest elszakad, amennyiben benne a gátolt alakváltozás miatt, hőmérséklet hatására felépülő feszültség eléri az adott hőmérsékleten lévő húzószilárdságot (9.1. ábra). Ezt a hőmérsékletet tekintjük repedési hőmérsékletnek. A vizsgálatra előkészített próbatestet a vizsgálóeszközbe rögzítve a **9.1. kép** mutatja be. A vizsgálat jellegábráját a **9.2. kép** mutatja be.



9.1. ábra: A repedési hőmérséklet értelmezése



9.1. kép: Az ARH berendezés



9.2. kép: Az ARH berendezés jellegábrája

A vizsgálat során a próbatesteket $10^{\circ}\text{C} \pm 0,6^{\circ}\text{C}/\text{óra}$ hűtési sebességgel kell hűteni, a vizsgálat a $+5^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten kezdődik. A próbatest hosszúságának változását a vizsgálat kezdetétől ($+5^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$) indulva meg kell akadályozni, melyet a feszítőmű végez.

9.2.1. ARH vizsgálat S&P és Roadtex típusú rácsokon mAB-12/ keverék alkalmazásával

Az ARH vizsgálat során megkíséreltem kimérni, hogy az aszfalterősítő rácsok milyen módon befolyásolják az aszfaltkeverék repedési hőmérsékletét.

Az ARH vizsgálatban először mAB-12/F keveréket alkalmaztunk. Az összehasonlíthatóság miatt referencia próbatesteket készítettünk aszfalterősítő rács nélkül, melyeket szövet alapú üvegszálás, és hordozó nélküli rács aszfalterősítő rácsokkal készített próbatestek vizsgálati eredményeit hasonlítottuk össze.

A próbatesteket minden esetben két rétegből állítottuk össze. A referencia próbatestek előállításánál 4 cm aszfaltlap vibrációs tömörítése után bitumenemulziót hordtunk föl a rétegre. Az így elkészült lapot 8 cm magas sablonba átszereltük, majd a forró keveréket a meglévő lapra tömörítettük rá.

Ugyanígy módon gyártottuk le a két fajta rácshoz készített próbatesteket is, tehát a bitumenemulzió felhordása után az aszfalterősítő rácsokat a 2. réteg vibrálása előtt helyeztük az alsó próbatestre.

Az aszfalterősítő hálók hatékonyságát más módon előállított próbatesteken is megmértük. A próbatesteket ebben az esetben olyan módon állítottuk elő, hogy az alsó lap keverékét a 8 cm-es sablonba a beépítési hőmérsékletnek megfelelő hőfokon beöntöttük, majd spaklival elegyengettük. Az így elegyengetett felületre helyeztük az aszfalterősítő hálót (bitumenemulzió nélkül), majd a 2. réteg keverékét erre ráöntve a három réteget (4 cm aszfalt, aszfalterősítő háló, 4 cm aszfalt) együtt tömörítettük. A próbatestekhez szükséges aszfaltmennyiséget úgy mértük ki, hogy a próbatestek tömörsége 100 % legyen.

8 cm magas próbalapok mindegyikéből 3 hasábot lehetett kivágni. A hasábok szélessége a műszaki előírásnak megfelelően került kialakításra, a megfelelő magasságra történő vágás során pedig a két lap által képzett réteghatárral párhuzamosan vágunk le a próbatestek 8 cm-

es magasságából 1,5-1,5 cm-t, olyan módon, hogy a réteghatár (aszfalterősítő ráccsal, illetve a nélkül) vízszintes értelemben a szimmetriatengelyt képezze.

Az ARH vizsgálatba bevont rácsok típusát, illetve a próbatest készítés módját a **9.1. táblázatban** foglaltuk össze.

vizsgálatba bevont aszfalthálók								
ARH vizsgálat								
jelölés a vizsgálatok során	gyártó	szálak típusa	próbatest gyártásának módja		próbatestek kódja	átlagolás szerinti jelölés	emulzió mennyisége (g/m ²)	
0	-	-	2*4 cm lap	az alsó lap kihülése után a felső lap forrón rávibrálva	H12 GBX	081	H12 GBX 0	1300
						082		
						083		
						091		
						092		
3	Gradex	üvegszál	2*4 cm lap	az alsó lap kihülése után a felső lap forrón rávibrálva	H12 GBX	381	H12 GBX 3A	1300
						382		
						383		
						391		
						392		
		1*8 cm lap	az alsó réteg sablonban való elterítése és elegyengetése után hálófektetés, majd a felső réteg keverékének elegyengetése; a 3 réteg együtt történő tömörítése	H12 GBX	301	H12 GBX 3B	0	
					302			
					303			
					371			
					372			
4	S&P	üvegszál	2*4 cm lap	az alsó lap kihülése után a felső lap forrón rávibrálva	H12 GBX	481	H12 GBX 4A	400
						482		
						483		
						491		
						492		
		1*8 cm lap	az alsó réteg sablonban való elterítése és elegyengetése után hálófektetés, majd a felső réteg keverékének elegyengetése; a 3 réteg együtt történő tömörítése	H12 GBX	401	H12 GBX 4B	0	
					402			
					403			
					471			
					472			
473								

9.1. táblázat: Az ARH vizsgálatba bevont rács típusok

A vizsgálatok eredményeit a **9.2. táblázatban** foglaltam össze.

próbatest kódja	próbatest típusa kódja	húzószilárdság	aszafalt repedési hőmérséklet (ARH)	aszafalt repedési hőmérséklet (ARH)				
				max	min	terjedelem	átlag	szórás
				°C	°C	°C	°C	°C
H12 GBX	H12 GBX 0	5.4	-26.0	-27.0	-24.0	3.0	-25.9	1.1
		5.1	-26.1					
		4.3	-24.0					
		5.7	-25.4					
		5.4	-27.0					
		5.8	-26.9					
H12 GBX	H12 GBX 3A			-26.6	-25.1	1.5	-26.0	0.7
		5.5	-26.6					
		4.9	-26.4					
		5.0	-25.1					
		5.0	-26.0					
H12 GBX	H12 GBX 3B			-28.4	-28.0	0.4	-28.2	0.3
		ragasztás elvált -19,7 °C-on						
		ragasztás elvált -21,7 °C-on						
		6.0	-28.0					
		hibás vizsgálat						
		5.5	-28.4					
H12 GBX	H12 GBX 4A	4.2	-25.7	-25.9	-22.9	3.0	-24.9	1.4
		4.0	-22.9					
		próbatest eltört előkészítés alatt						
		5.0	-25.1					
		5.7	-25.9					
H12 GBX	H12 GBX 4B	5.2	-24.7	-26.9	-24.7	2.2	-25.9	1.1
		5.5	-26.9					
		hibás vizsgálat						
		5.4	-26.8					
		5.7	-25.3					

9.2. táblázat: Az ARH vizsgálatok eredménye

A H12 GBX 3B (textília hordozóra erősített üvegszálás rács, 1*8 cm vastagságban bevibrálva) sorozat vizsgálati eredményei nagyon jó értékeket mutatnak, sajnálatos módon 2 próbatest is a ragasztás mentén ment tönkre a vizsgálata során.

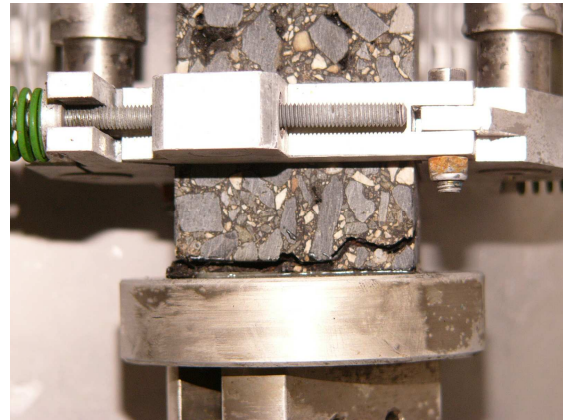
A H12 GBX 4A és 4B (textília hordozó nélküli, bitumennel bevont üvegszál) eredményei nem mutatták ki a várt nagyon jó eredményt (az eredmények a referencia próbatesthez hasonlítanak), azonban a rácsok rögzítése nem hőlégfúvós ráolvasztással történt, a háló a

bitumenemulzió felhordásával került leragasztásra. Mint ahogyan a gerenda fárasztási vizsgálatok esetében is láttuk, a hőlégfúvással történő ragasztás jelentősen megváltoztatta a vizsgálati eredményeket.

Az ARH vizsgálat alatt végbement normális tönkremeneteli módot mutat be a **9.3. kép**, valamint a **9.4. kép**, a ragasztás mentén való elválást pedig **9.5. kép** és a **9.6. kép** szemlélteti.



9.3. kép: Normális tönkremeneteli mód



9.4. kép: Normális tönkremeneteli mód



9.5. kép: Ragasztás mentén szétválás



9.6. kép: Ragasztás mentén szétválás

9.2.2. ARH vizsgálat Geogrid típusú rácsokon AB-11/F keverék alkalmazásával

Az aszfaltrepedési hőmérséklet vizsgálatot megismételtem más típusú rácsfajtákon, AB-11/F-es keverék alkalmazásával. A próbatestet két rétegben, külön-külön tömörítettük be.

A vizsgálatba Geogrid Kft. által forgalmazott alábbi rács típusokat vontuk be:

- AGC 100/100 két oldali szövethordozóval ellátott rács (kompozit)

- Bitutex Composite egy oldali szövethordozóval ellátott rács (kompozit)
- AG hordozóanyag nélküli aszfaltrács

A rácsok egyaránt 100 kN szakítószilárdsági és 3%-os szakadó nyúlási értékkel rendelkeztek.

Az eredmények hasonlóak voltak az S&P és Gradex típusú rácsok esetében tapasztaltakkal, hiszen nem jelentkezett itt sem, a rács hidegviselkedést javító esetleges hatása. A legrosszabb eredményt ebben az esetben is az aszfaltrácsok adták, a szövethordozós rácsok – leginkább a kétoldali szövethordozós – pedig megközelítették a referencia, rács nélküli próbatestek repedési hőmérsékletét.

9.3. Tiszta húzás vizsgálat

Az aszfaltrepedési hőmérséklet meghatározása mellett megpróbálkoztunk egy másik hidegviselkedési jellemző meghatározásával is. Az úgynevezett tiszta húzás vizsgálat során lassan, állandó sebességgel húzzák a változatlan hőmérsékletű próbatestet egészen a szakadásig és közben folyamatosan mérik, ellenőrzik a próbatest megnyúlását és a keletkező húzófeszültséget. Ha ezt több hőmérsékleten megismételjük, megkapjuk az adott húzási sebességre vonatkozó szakítószilárdság, szakadó-nyúlás és a hőmérséklet összefüggését.

Ha ismerjük a lehülési sebességnek megfelelő α (lineáris hőtágulási együttható) értékét akkor a választott lehülési sebességnek megfelelő húzási sebesség kiszámítható

$$\epsilon_{\text{fajlagos megnyúlás}} / \text{óra} = \text{lehülési sebesség} \quad [^{\circ}\text{C} / \text{óra}] \times \alpha [1/^{\circ}\text{C}]$$

Például: $10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{óra} \times 18 \times 10^{-6} = 180 \times 10^{-6} / \text{óra}$ fajlagos megnyúlás, vagyis 100 mm próbatest hosszon **$18 \times 10^{-3} \text{ mm/óra}$** húzási sebességgel lehet az adott lehülési sebességet szimulálni.

Ez olyan kis sebesség, hogy egyrészt technikailag nehezen valósítható meg, másrészt magasabb (-5 és +5°C) hőmérsékleten a nagy *relaxáció* miatt akár egy napig is nyújtható a próbatest.

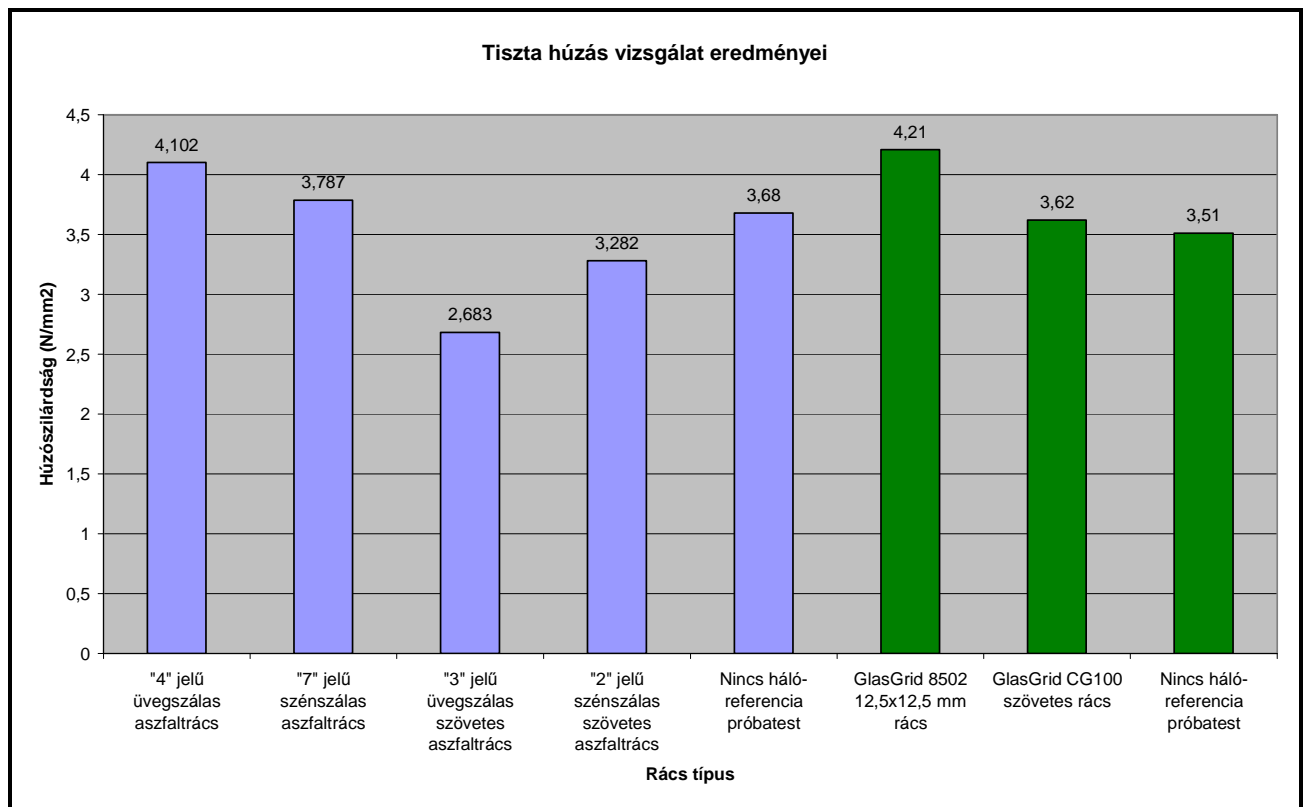
A szakirodalomból (USA Asphalt Institute 1982. szeptemberi kiadványában Bernard F. Kallas: Low-Temperature Mechanical Properties of Asphalt Concréte) megismert amerikai kutatásnál alkalmazott húzási sebesség a 90 mm hosszú próbatesten az előbbi sebesség sokszorososa: **$390 \times 10^{-3} \text{ mm/óra}$** . Ez az érték az előbbi lineáris hőtágulási együtthatóval számítva kb. $217 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{óra}$ lehülési sebességnek felel meg. Ezzel a sebességgel a magasabb

hőmérsékleten is néhány órán belül megtörténik a szakadás. Természetesen tudomásul kell vennünk, hogy ez a nyújtás sokkal drasztikusabb a természetben előforduló legnagyobb ilyen igénybevételnél és így az aszfalt relaxációs képessége csak korlátozottan jelenhet meg a vizsgálati módszerben.

A fenti terhelési és hőmérsékleti modell probléma ellenére a -10 C° -on végzett tiszta húzás vizsgálat alkalmasabb lehet a beépített hálók hidegviselkedésben betöltött szerepének vizsgálatára. A fentiekben részletezett ARH vizsgálatban gátolt alakváltozás mellett jön létre húzófeszültség, ezért nem is tud hatást kifejteni a beépített rácsszerkezet, ebben az esetben viszont -10 C° -on kezdjük el húzni a rögzített próbatestet, és így vizsgáljuk az anyag húzószilárdságát. A vizsgálat megkezdése előtt azt feltételeztem, hogy a húzófeszültségből többet képes felvenni a ráccsal készített próbatest, mint a rács nélküli referencia minta.

A vizsgálatokat AB-11/F-es és AC-11-es aszfaltkeverékek alkalmazásával az alábbi rács típusokon, -10 C° -on végeztük el:

- Roadtex GR-G100 szövethordozós, üvegszálalás rács (3-as jelű)
- Roadtex GR-G200 szövethordozós szénszálalás rács (2-es jelű)
- S&P Glasphalt G üvegszálalás, hordozóanyag nélküli aszfaltrács (4-es jelű)
- S&P Carbophalt G szénszálalás, hordozóanyag nélküli aszfaltrács (7-es jelű)
- GlasGrid 8502 (12,5x12,5 mm rácslyuk méretű) hordozóanyag nélküli üvegszálalás rács
- GlasGrid CG100 szövethordozós, üvegszálalás rács



9.2. ábra: A tiszta húzás vizsgálat eredményei

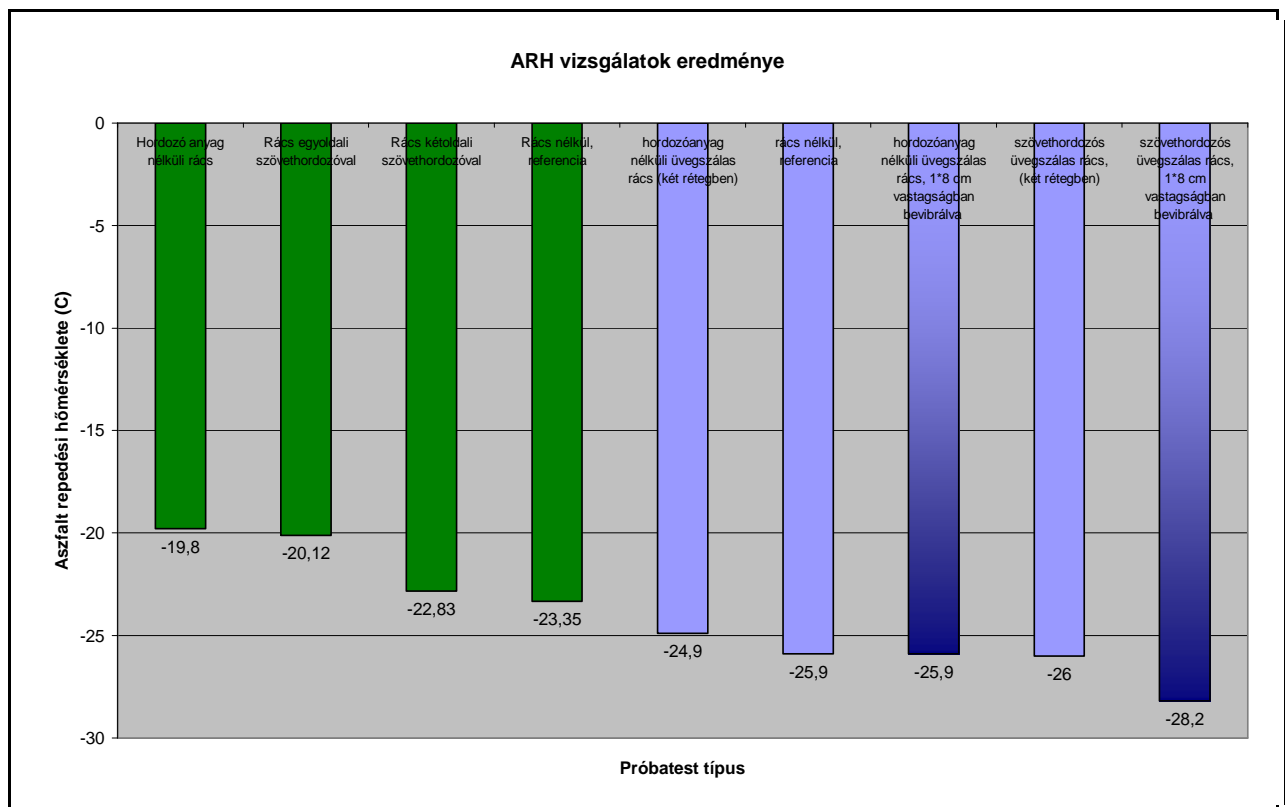
Az AB-11/F aszfaltkeverékkel készült próbatestek eredményeit késsel, az AC-11-es aszfaltkeverékkel készült próbatestek eredményeit pedig zölddel jelöltem. A vizsgálatokból az látszik, hogy a szövetes rácsok rosszabb húzószilárdsági értékeket produkálnak a rácsbetét nélküli próbatesteknél, a hordozóanyag nélküli aszfaltráccsal készült próbatestek húzószilárdsági értékei viszont felülmúlják a rácsbetét nélküli próbatestek eredményeit. Meglepő ugyanakkor, hogy az AB-11-es keverék legjobb átlageredményét az üvegszál és nem a szénszál próbatestek eredményei adták.

A tisztahúzás vizsgálat eredményei alapján kijelenthető, hogy a hordozóanyag nélküli rácsok kis mértékben ugyan, de javítják a húzószilárdsági eredményeket -10 C°-on, tehát tovább képesek meggátolni a hidegben, terhelés hatására létrejött repedések megjelenését, ezzel szemben a szövetes rácsok, vélhetően a nem megfelelő együttdolgozás miatt nem javítják a húzószilárdsági értékeket.

9.4. Hidegviselkedési vizsgálatok értékelése

Az aszfalt repedési hőmérsékletét folyamatos, egyenletes hűtéssel, gátolt alakváltozással 5 féle rács típuson AB-11/F és mAB-11/F aszfalt rétegek alkalmazásával vizsgáltuk meg. Az

AB-11/F-es próbatesteket zölddel jelöltem, az mAB-11/F-es mintákat késsel és ezen belül sötétkékre átmenő árnyalattal jelöltem az 1x8 cm vastagságban bevibrált próbatestek átlag eredményét. A vizsgálatok során összesen 60 db próbatesten végeztünk vizsgálatokat, ezek közül mindösszesen 4 db-ot nem tudtunk felhasználni az értékeléskor, a próbatestek hibás készítése miatt.



9.3 ábra: Az ARH vizsgálatok eredményének összefoglalása

A fenti ábrából jól látszik, hogy az aszfaltrepedési hőmérsékletének meghatározásánál nem jelentek meg számottevő különbségek a rácsbetéttel és anélkül készült próbatestek között, és hacsak kis mértékben is, de a vizsgálatokon belül az alacsonyabb hőmérsékleti értékeket, a hordozóanyag nélküli ráccsal készült próbatestek adták. (Nyilvánvaló, hogy a két fajta aszfaltkeverékkel készült próbatestek eredményét külön kell értelmezni, de mind a két esetből ugyanaz a következtetés vonható le.) Az ARH vizsgálat eredményével szemben azonban, a mérési bizonytalanságot meghaladó különbséggel javítja a húzószilárdsági értékét az aszfaltszerkezetnek a hordozóanyag nélküli aszfaltrács, illetve rontja a szövethordozós aszfaltrács. A fentiekben, a **9.3. ábrán** bemutatott tiszta húzás vizsgálat eredménye alapján kijelenthető, hogy az aszfaltrácsok javítják, a szövetes rácsok pedig rontják az aszfaltszerkezet húzószilárdságát hideg (-10 C°) körülmények között.

II. rész Aszfaltrácsok viselkedésének számítógépes modellezése

10. Pályaszerkezeti behajlások számítása a Shell-BISAR számítógépes programmal

10.1. BISAR program működési elve

A BISAR klasszikus pályaszerkezet modellező program segítségével a függőleges irányú koncentrált feszültség, a rétegek vastagságainak, merevségi modulusainak, kontrakciójukat jellemző Poisson-tényezőnek és a rétegek közötti tapadási érték megadása után számítható az adott sík mentén a keletkező x-y-z irányú feszültség, megnyúlás és elmozdulás.

Jelenleg az útpályaszerkezetekben keletkező igénybevételek meghatározásának az egyik legelterjedtebb és legmegbízhatóbb módja a számítógépes programok alkalmazása.

Jelenleg több olyan szoftver áll rendelkezésre (pl.: BISAR, ALIZE, CHEVRON, CIRCLY, WIPI, NOAH), amelyek segítségével rugalmas állapot feltételezéssel a rétegek tetszőleges pontjában, vagy a réteghatárokon a feszültségek, alakváltozások, behajlások számíthatók.

[Adorjányi, 1999, Pethő, 2009]. A méretezési modellek alapján a SHELL- BISAR 3.0 szoftver segítségével végeztük el a különböző pályaszerkezeti rétegek igénybevételének meghatározását. A Shell Kutatóközpont az 1970-es években dolgozta ki nagyszámítógépre a BISAR (Bitumen Structure Analysis in Road) programot, melyet a Shell Pavement Design Manual (1978) méretezési diagramjainak készítéséhez használtak felé [De Jong, Peutz, Korswagen 1973]. A BISAR személyi számítógépeken futtatható változatát 1987-ben dolgozták ki, amely a hosszú számítási idő miatt nem tartalmazta az eredeti változat minden opcióját. A DOS verzióban 1995-re elkészített 2.0 változat az eredeti nagyszámítógépes program minden opcióját magában foglalta. Az eredeti változattal megegyező, Windows környezetben futó 3.0 változatot 1998-ra készítették el [Shell, 1998].

A BISAR programmal feszültséget, relatív alakváltozást és elmozdulást lehet számolni egy függőleges erővel terhelt rugalmas többségű rendszeren, amely a következő réteg és anyagi paraméterekkel definiált:

- a rendszer egyenletes vastagságú, vízszintes rétegekből áll és végtelen féltér támasztja alá;
- a rétegek vízszintes irányban végtelen kiterjedésűek;
- minden réteg anyaga homogén és izotóp;

- az anyagok lineárisan rugalmasak.

A rendszer a felépítmény tetején terhelt egy vagy több kör felületen megoszló terhelőerővel, egyenletes feszültséget biztosítva a terhelt területen. A program lehetőséget kínál a függőleges, illetve vízszintes igénybevételek kiszámítására és magában foglalja annak a lehetőségét, hogy figyelembe vehető legyen a rétegek közötti (részleges) elcsúszás.

BISAR- ban történő számítás bemenő adatai:

- a rétegek száma;
- a rétegek rugalmassági modulusa;
- a rétegek Poisson tényezője;
- a rétegek vastagsága (a végtelen féltér (földmű) kivételével);
- a csatlakozó felületek nyírési együtthatója minden ilyen csatlakozó felületnél;
- a terhelések száma;
- a terhelések középpontjának koordinátái,
- a következő kombinációk közül egy, ami jelöli a terhelés függőleges (normál) összetevőjét: feszültség és terhelés, terhelés és sugár, feszültség és sugár;
- a terhelés vízszintes (tangenciális) komponense és ennek a nyíró terhelésnek az iránya (szabadon választható);
- a szükséges kimenő adatok helyzetének koordinátái.

A terhelés középpontja és mindazok a helyek, ahol a feszültségeket, megnyúlásokat és elmozdulásokat akarjuk számolni, koordinátaként kerülnek megadásra, Az esetleges különböző terhelések egyidejű hatása pontosan megegyezik a különálló egyes terhelések hatásának összegével, ezt az eredmények transzformációjával végzi el a program.

A program kiszámolja a feszültég és a megnyúlás tenzorok sajátértékeit és sajátvektorjait, a fő feszültségeket, valamint a megnyúlásokat és a fő irányokat. A maximum és a minimum értékek a maximum és a minimum normál feszültségeket és megnyúlásokat jelentik. A ponton átfutó síkok normál irányban kifejezik a fő irányokat, annak figyelembevételével, hogy ezek a nyírófeszültségek nem hatnak és megnyúlásoktól mentesek.

Megállapítható, hogy nem minden pályaszerkezet alkotó anyaga mutat lineárisan rugalmas viselkedést. Azok a modellek, amelyek nem lineárisan rugalmas anyagmodelleket

alkalmaznak (gyakran végeelem módszerrel összekapcsolva) néhány esetben pontosabban írják le a pályaszerkezet viselkedését. Megállapítható azonban, hogy a lineárisan rugalmas anyagmodelleket alkalmazó többrétegű modellek meglehetősen jó közelítést adnak a pályaszerkezet viselkedését illetően a mozgó kerékterhekből adódó rövid terhelési idő és a relatív kis alakváltozások miatt.

10.2. BISAR számítások rács erősítésű pályaszerkezeti modelleken

A számítógépes modellel a szerkezet élettartalmára utaló behajlási valamint megnyúlási és feszültségi adatokat számítottam ki különböző merevségű, állapotú pályaszerkezetek és különböző merevségű rácsok esetén. A modellezés során változtattuk a rétegek közötti tapadás mértékét, és olyan aszfaltrács nélküli pályaszerkezet eredményével hasonlítottuk össze az erősített szerkezetet, ahol az össz-vastagság egyező volt.

A BISAR program egyik igen fontos lehetősége, hogy tudja kezelni a rétegek közötti részleges vagy teljes tapadás meglétét. A részleges együttlétezés figyelembevételére a BISAR alkotói létrehozták a „shear spring compliance” fogalmát, mely során azzal a közelítéssel éltek, hogy két felület között egy végtelenül vékony réteg helyezkedik el, amely rugóállandóval írható le. Ennek a fizikai jelentése az, hogy a nyírási igénybevétel a felületen a két réteg relatív elmozdulását eredményezi. Ez a felületen ható feszültséggel egyenes arányban van. Az elcsúszás mértéke a terhelő felület nagyságától függ, mivel nem anyagtulajdonsághoz köthető. A terhelő tárcsa 100 szoros értéke a program alkotói szerint teljes elcsúszást jelent. [Pethő László, 2009]

Rács erősítéssel készült BISAR modellszámítást az S&P Reinforcement cég megbízásából készült kutatás során találtam. Az S&P által felállított modellben azonban a rács erősítés úgy nyert értelmet, hogy az eredeti, referenciaként szolgáló 12+4 cm vastag aszfalterősítés helyett 8+4+4 cm vastagságban került az aszfalt betervezésre, úgy hogy a 4 cm vastag kopóréteg és a 4 cm vastag kötőréteg között értelmezték a rácsot, és a mind a két rétegnek a referencia modellhez képest 25-30%-al megnövelték a rugalmassági modulusát. Így tehát a modellben fizikailag nem szerepelt a rács, hanem mintegy kompozit szerkezetként nagyobb merevségi modulusal tervezték az aszfaltrétegeket.

Az alábbiakban is látható modell alkotásom során azonban én kihasználtam a BISAR programban rejlő azon lehetőséget, hogy modellezni lehet a rétegek közötti együttlétezést,

úgyhogy egy elméleti, 0,5 cm-es vastagsággal külön számítottam be a rácsot a modell felépítésbe. Az S&P által kialakított, a rácsot és az aszfaltot egy, kompozit réteggént kezelő modellt a végeelem számítások során fogom alkalmazni. [www.sp-reinforcement.ch, 2006]

10.2.1. A modell felépítése

Az alábbi **10.1. ábrán** látszik az az alapmodell, amit felállítottam a BISAR számításához, a CKt merevségi modulusa minden esetben ugyanannyi volt, mint ahogy a talaj 50 MPa-s merevségi modulusa sem változott. A Poisson tényező az aszfaltrétegek és az altalaj esetén 0,35 volt, a CKt esetén 0,25-re állítottuk be az értékét. A **10.1. táblázatban** pedig, az aszfaltrétegek modulus értékeit láthatjuk, 6 különféle esetben, gyengébb és erősebb pályaszerkezetekhez társítva.

E=10000 MPa 5 cm rtg vastagság	1. E _{1rtg} =10000 MPa, E ₂ és 3rtg=12000 MPa 2. E _{1rtg} =8000 MPa, E ₂ és 3rtg=10000 MPa 3. E _{1rtg} =4000 MPa, E ₂ és 3rtg=8000 MPa 4. E _{1rtg} =2000 MPa, E ₂ és 3rtg=4000 MPa 5. E _{1rtg} =400 MPa, E ₂ és 3rtg=1500 MPa 6. E _{1rtg} =400 MPa, E ₂ és 3rtg=900 MPa
E= 12000 MPa 8 cm rtg. vastagság	
E= 12000 MPa 9 cm rtg. vastagság	
E= 4000 MPa 20 cm rtg. vastagság	
CKt	

10.1 ábra: BISAR pályaszerk. modell

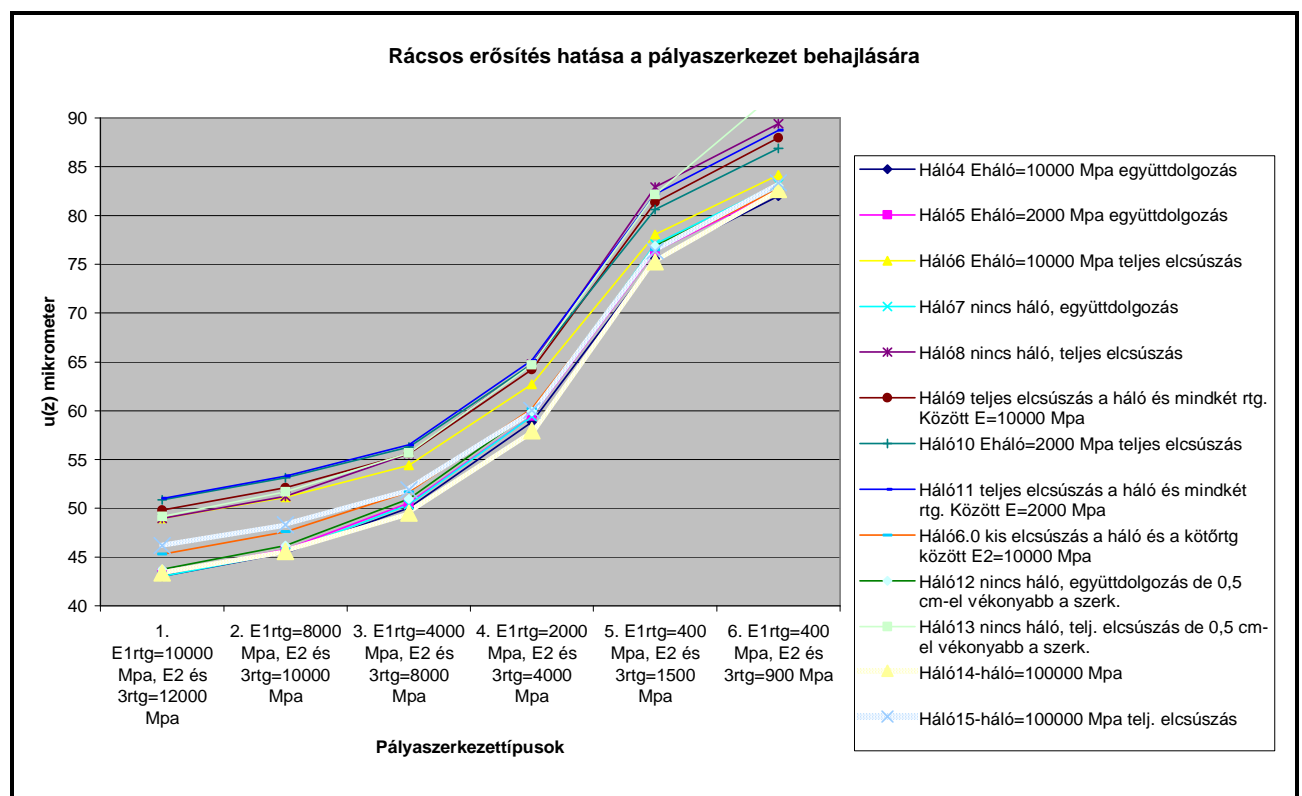
10.1. táblázat: Aszf. merevségi modulusok

A fenti modell mellett kialakítottunk egy olyan modellt, ahol nem volt aszfaltrács, viszont a felső réteg vastagsága 5,5 cm volt. Ezzel akartuk modellezni a rácsbetétes és rácsbetét nélküli szerkezetek különbségét. A modellbe beépített aszfaltrács értékét 100000, 10000 és 2000 MPa értékkel vettük figyelembe, felállítottunk minden ráccsal és rács nélküli esetben teljesen együttműködő és teljesen elcsúszó modellt egyaránt, sőt a rácsos esetekhez olyan modellt is felállítottunk, amikor a rács a kopó és a kötőréteg mentén is teljesen elcsúszik. Teszteltem egy olyan változatot is, ahol nem alkalmaztam rácsot, és a felső kopóréteg vastagsága 5 cm volt. A 1000 MPa és a 100000 MPa merevségi modulusú rács esetében olyan modellt is futattam, ahol a shear spring compliance-t (együttműködési tényező) 1,5 és 3,0 m-re (kb. 10 és 20%-os elcsúszás) állítottam.

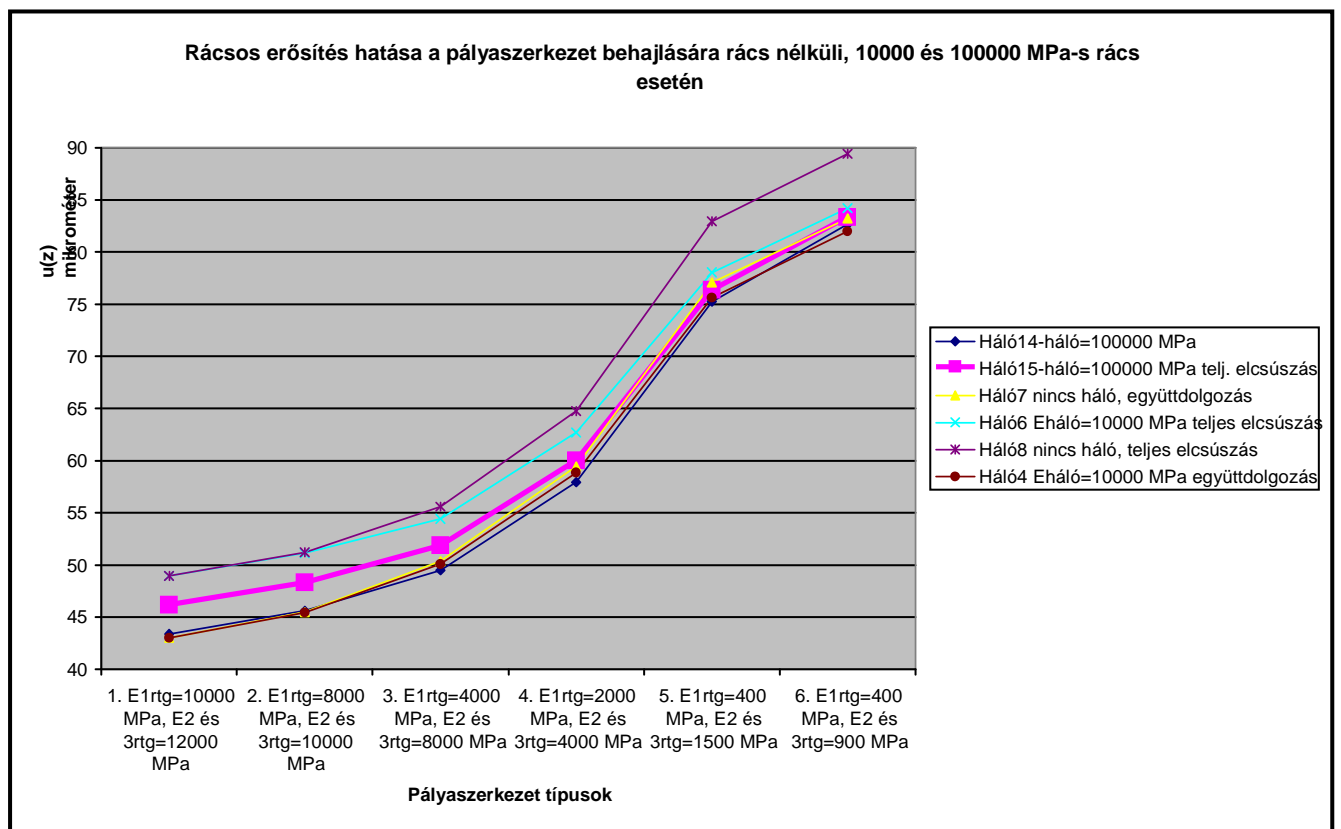
A BISAR futtatások eredménye az alábbi ábrákon látható. A diagramokon a teljes szerkezet jellemző behajlást (u_z) és néhány esetben a rács betét alatt (5, 6 cm-nél) mérhető vízszintes megnyúlást ábrázoltuk. Az ábrán külön színnel kiemeltem a Háló 14-es és Háló 15-ös görbéket, ugyanis ebben a két esetben a korábbi szakirodalmi leírásnak [Scherer, 2005] megfelelően, az üvegszálalás rács esetében feltételeztem magas, 100000 MPa-s merevségi moduluszt alkalmaztam.

A Háló 18, Háló 19 és Háló 20-as modellek esetében a rácsot más pályaszerkezeti mélységben helyeztem el, mint a megelőző futtatásokban. A Háló 18-as modellnél a kötőréteg alatt 13 cm vastagságban került elhelyezésre a rács, a Háló 19-es modell esetében a 6 cm-re került a rács, alatta pedig a korábbiakhoz képest 1 cm-re csökkent a kötőréteg vastagsága. A Háló 20-as modellnél 4 cm-re csökkentettük a kopóréteg vastagságát, ez alá került beépítésre a rács, a kötőréteg vastagsága itt viszont így 1 cm-el megnőtt.

A **10.2. ábrán** az összes modell pályaszerkezeti behajlása (u_z) látható, a **10.3-as ábrán** külön ábrázoltam a rács nélküli, 10000 és 100000 MPa-s merevségű ráccsal készült modellek eredményeit, teljes elcsúszás és együttdolgozás esetén is. Az ábrán a jobb összehasonlítás és értékelés érdekében vastagon kiemeltem az 100000 MPa merevségi modulus értékkel rendelkező rácsos modellt, amelynél teljes elcsúszást feltételeztem.

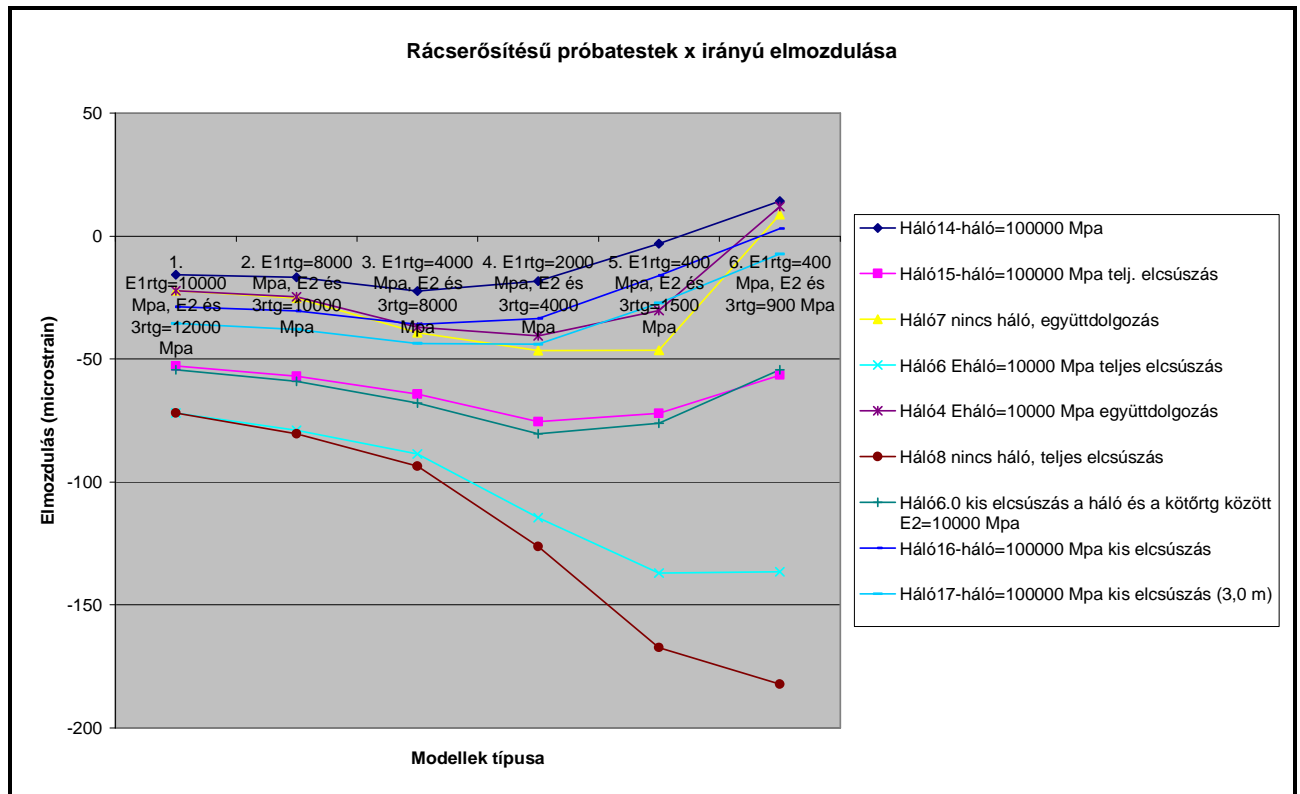


10.2. ábra: Behajlás (u_z) a pályaszerkezet tetején, az összes modell esetén



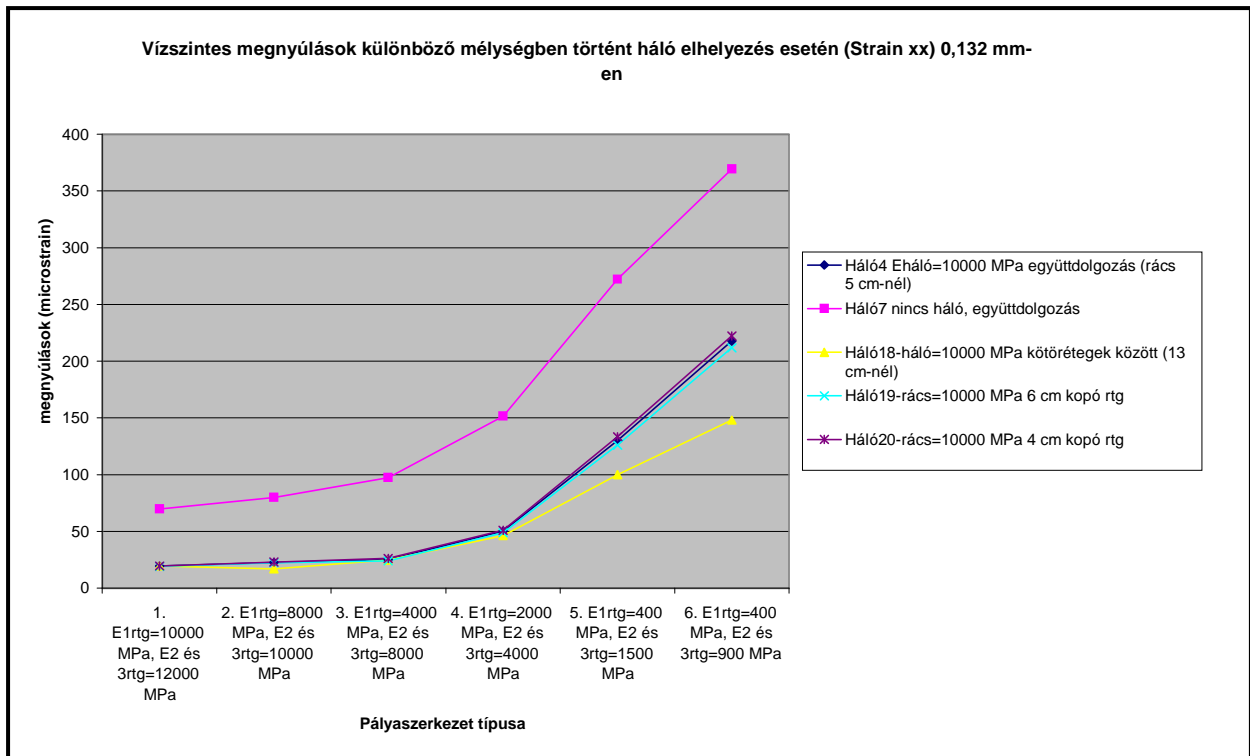
10.3. ábra: Behajlások (u_z) a 100.000 MPa, 10000 MPa rácsos és rács nélküli modell esetén

A következő ábrán a vízszintes megnyúlási (elmozdulási) értékeket ábrázoltam, de nem minden futtatás esetén. Kiemeltem a 10000 MPa, a 100000 MPa rács erősítésű és a rács nélkül készült modelleket, melyeket együttdolgozással, teljes és kisebb (10, 20%-os) elcsúszással is megjelenítettem. A vizsgálat célja az volt, hogy érzékeltessem a nagy merevségű rács hatását, és a megnyúlásban fellépő különbségek nagyságát, mely jobban megjelenik ebben az esetben, mint a teljes szerkezetet jellemző behajlás esetén.

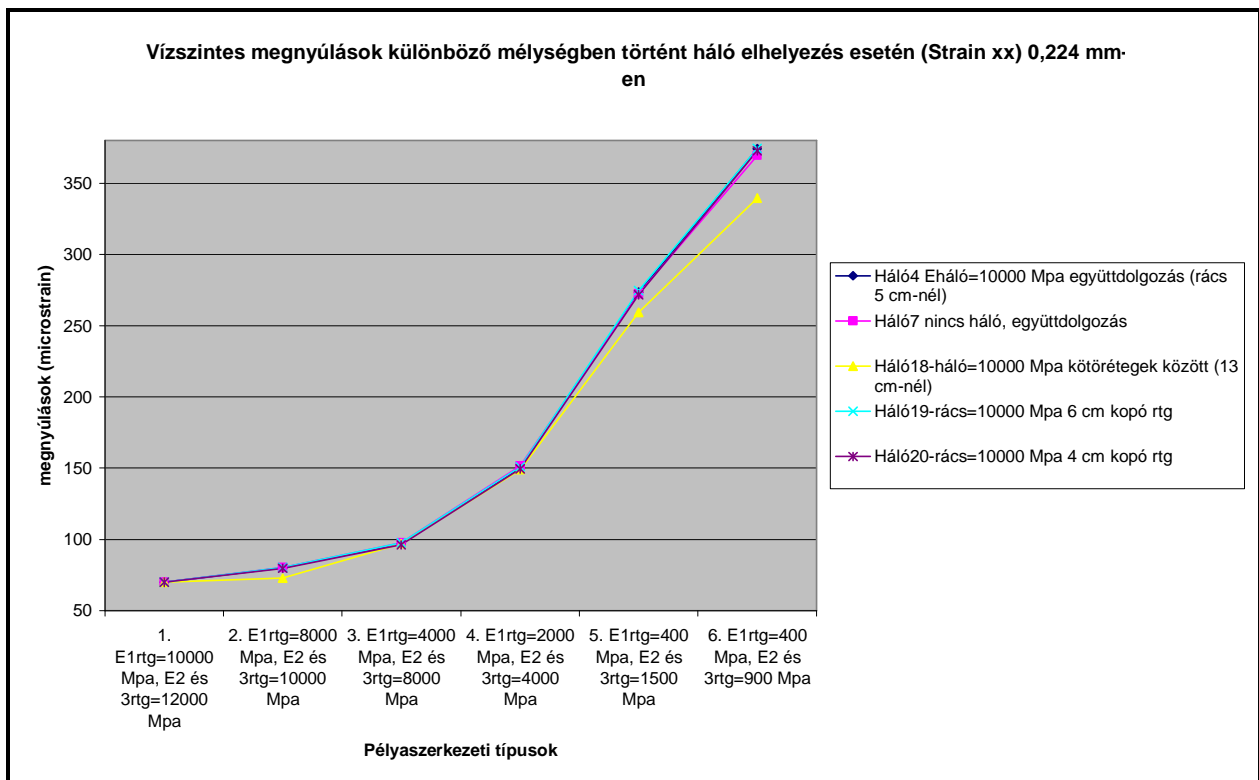


10.4. ábra: Rácsrősítésű próbatestek vízszintes elmozdulás (megnyúlás vagy összenyomódás) esetén

A **10.5. és 10.6 ábrán** a különböző pályaszerkezeti mélységben elhelyezett rácsok hatását hasonlítottam össze, a BISAR modellben lévő 2. és 3. aszfalréteg alján mért megnyúlások segítségével. A rács úgymond ideális helyének a megtalálása az aszfaltszerkezetben régi, sok vitát kiváltó probléma. Egyiptomban 3 pontos hajlító berendezésen végeztek kutatásokat a rács „optimális” mélységének, helyének meghatározásához [Gomaa K. M. Moussa, 2003], de számítógépes modell kísérletről nincs ismeretem. Számítógépes futtatásokkal szerettem volna tehát megtudni, hogy melyik a legideálisabb, optimálisabb mélység rács elhelyezésére a szerkezetben. A többi ábrától eltérően itt a 2. és 3. aszfalrétegek alján vett megnyúlásokat vettük figyelembe, mert ezeken a helyeken keletkezik már biztosan húzás a rétegekben, melyet a rácsok fel tudnak venni, és így hatással lehetnek az egész szerkezet viselkedésére.



10.5. ábra: Pályaszerkezeti megnyúlások a kötőréteg alatt, a rács, különböző mélységben történő elhelyezésénél



10.6. ábra: Pályaszerkezeti megnyúlások a 3. aszfalréteg alatt, a rács, különböző mélységben történő elhelyezésénél

10.2.2. A BISAR futtatások eredményének értékelése

A BISAR futtatások egyfelől a lehajlás nagyságát veszik alapul, ezekből az eredményéből a szerkezet élettartalmára lehet következtetni. A vízszintes megnyúlási (elmozdulási) értékekből pedig a hajlító-fárasztó és keréknyomvályú-képződési vizsgálatoknál fellépő hatásokra lehet következtetni. A felrajzolt eredmények alapján a következő folyamatokat, trendeket lehet kiolvasni a BISAR vizsgálat eredményeiből:

1. A rácsbetét nélküli és aszfaltrácsos erősítésű szerkezetek gyakorlatilag azonos behajlást produkálnak abban az esetben, ha teljes együttdolgozás van a rétegek között.
2. Elhanyagolható, minimális a különbség teljes együttdolgozás mellett a különböző merevségű ráccsal erősített szerkezetek között.
3. Abban az esetben, amikor gyengül a szerkezet minősége (vagyis az egyes aszfaltrétegek merevsége csökken), elkezd az aszfaltrács dolgozni, ugyanis, ha kis mértékben is, de az aszfaltrácsos szerkezetek kisebb behajlást produkálnak ekkor, mint az anélküli szerkezetek. Sőt a rácsos, de teljes elcsúszást feltételező modellünk eredménye is megközelíti gyenge szerkezet esetében a rács nélküli, együttdolgozó szerkezet behajlási értékét.
4. Abban az esetben, amikor teljes elcsúszást feltételezünk a szerkezetek között, ott az erősebb szerkezetek esetében a rács nélküli modell adja az egyik legjobb eredményt, de ahogy gyengébbé válik a szerkezet, úgy a rácsos szerkezetek dominanciája tovább nő.
5. Komoly jelentősége van az együttdolgozás kérdésének, hiszen a merevebb szerkezeteknél több mint 10% különbség lehet a behajlási értékek között, az együttdolgozó szerkezetek javára. Ez a különbség csökkenthető az együttdolgozás javításával.
6. A rács merevségi modulusának is nagy szerepe van a szerkezet viselkedésében, hiszen egyértelmű, hogy a magasabb merevség adja a legjobb, azaz a legkisebb behajlási eredményt minden esetben. Ugyanakkor az itt meglévő, a rács erősítésű és a rács nélküli próbatestek behajlási értéke között szinte alig van különbség.
7. A vízszintes elmozdulási értékeknél érdemes külön-külön elemezni az egyes görbéket:
 - A rács nélküli (háló7) görbe és a rács erősítésű (háló 14) 100.000 MPa merevségű modell esetén komoly különbségek alakulnak ki. A még jó állapotú szerkezetnél ez a különbség kisebb, aztán fokozatosan növekszik a különbség a

két elmozdulási érték között, egészen a szerkezet a tönkremenetelig. Ugyanez a folyamata jelenik meg a 10000 MPa merevségi modulusú rács esetében is azzal a különbséggel, hogy az eltérés a rács erősítésű modell javára csak a szerkezet leromlásával jelentkezik. Ez a viselkedés is bizonyítja, hogy a rács erősítés a pozitív hatását igazából a szerkezet leromlása esetén, illetve nagy merevségi modulusú rács alkalmazása esetén tudja kifejteni.

- A teljes elcsúszású, 100.000 MPa merevségű rácsnak azonban komoly hátránya van a megnyúlások tekintetében a rács nélküli modellel szemben. Ez a különbség sokkal kevésbé jelenik meg, ha szerkezet behajlását vizsgáljuk (lásd. **10.2. ábra**), hiszen a behajlások tekintetében minimálisak a különbségek, sőt a szerkezet leromlása, tönkremenetele esetén ezek a különbségek el is tűnnek.
 - Az együttlétezés kérdése összefüggésben van a rács merevségű modulusával, hiszen a 100.000 MPa merevségű, de kis mértékben (10-20%-1,5-3,0 m) – háló 16 és 17-es - elcsúszó modell esetében abban az esetben, amikor a szerkezet a kezdeti aszfalt merevséghez képest el kezd leromlani, jobb, kisebb elmozdulási értéket kapunk, mint a rács nélküli, de teljesen együttlétező (háló7) szerkezet esetében.
8. A különböző pályaszerkezeti mélységben elhelyezett rácsok közül a 2. aszfaltréteg alján, 13,4 cm-es mélységben mért megnyúlások esetén minden változatban a legjobb eredményt az a modell adta, ahol a rácsot a kötőréteg 13 cm-es mélységben a kötőréteg alá tettem be. Számottevő különbség itt is csak a szerkezet teherbírásának gyengülése után következik be, de akkor már 26-43%-al kisebb megnyúlás következhet be a kötőréteg alján. Abban az esetben is a kötőréteg alján elhelyezett modell a legjobb, amikor a 3. aszfaltréteg alján (azaz a CKt felett) vizsgáltam a megnyúlásokat. Nyilvánvaló, hogy itt a hatás jóval kisebb, mint a 2. aszfaltréteg alján. A rács ebben az esetben is a szerkezet gyengülése esetén kezd hatást kifejteni – csökkenteni a megnyúlásokat – de csak 4,8-9,8%-al. Gyakorlati különbség a két mért helyen nem alakult ki a megnyúlásokban, abban az esetben, amikor a kopóréteg alá 4, 5 és 6 cm-re tettem be a rácsokat. A legkisebb megnyúlást a 3 modell közül a 6 cm-en lévő rács adta, a legrosszabb megnyúlási értéket pedig a 4 cm-en lévő rács. A kötőréteg alján (13,4 cm-en) lévő megnyúlásokat jelentősen javítja a rács jelenléte, hiszen akár 4-szer kisebb megnyúlást kaphatunk a kötőréteg alján még abban az esetben is, ha a kopóréteg alatt helyezkedik el a beépített rács. A számítógépes

modellezés végkövetkeztetése egyébként megegyezik az egyiptomi kutatások következtetésével, hiszen ott a legkisebb deformációt és a legnagyobb terhelést az a modell viselte el a 3 pontos hajlító vizsgálatnál, ahol a georács a kötőréteg közepén, a terheléstől legtávolabb helyezkedett el. [Gomaa K. M. Moussa, 2003]

A BISAR programmal készült számítások többek között is azt megmutatták, hogy a gyengébb szerkezetet még akkor is erősíti az aszfaltrács jelenléte, ha teljes elcsúszás van a rétegek között, ugyanakkor a rács nélküli, nagy merevségű szerkezet teljes együttműködés esetén közel ugyanolyan behajlást produkál, mint a rácsos pályaszerkezet. Ezt a megállapítást a gyártó által megadott szakadó nyúlási értékből a Hook törvény alapján is levezettük.

Ha gyártói leírásokat nézzük, akkor láthatjuk, hogy a rácsok szakadó nyúlását minden esetben megadják. Az egyik legjellemzőbb szakadó nyúlási értéke ezeknél az anyagoknál $100 \text{ kN/m} = 100 \text{ N/mm}$ terhelésnél 3 %. (A gyártók 3 és 4,5% közötti értéket szoktak legtöbbször megadni. Léteznek persze kisebb és nagyobb szakadó nyúlású rácsok, de a leggyakoribb a fenti érték.)

10 N terhelés esetén ez 3‰ azaz 300 microstrain. A modifikált bitumennel rendelkező aszfalt keverékek egymillió terhelési ismétlés után hozzávetőlegesen 130 microstrain megnyúlást képesek felvenni, mely azt jelenti, hogy az aszfalt fáradási megnyúlása esetén a hálóban $10/2,307 \text{ N}$ ($300 \text{ microstrain}/130 \text{ microstrain} = 2,307$) = 4,33 N feszültség keletkezik. Ez az érték közel azonos az aszfaltban keletkező feszültséggel ezért a rács csak az aszfalt tönkremenetele, átrepedése után kezd el dolgozni.

Ha egy másik megközelítéssel a Hook törvényt is alkalmazzuk, azt látjuk egy ilyen típusú háló (100/100-as 3% szakadó nyúlású), $E = 100/0,03 = 3333 \text{ N/mm}^2 = 3333 \text{ MPa}$ merevségi modulust jelent a rácsnak, amely egy közepes minőségű és merevségű aszfaltnak felel meg.

A még jó állapotban lévő aszfaltot nem segíti, mert ahhoz alacsony a merevsége, és a rács dolgozni is, ezzel a közepes merevséggel is csak az aszfalt réteg tönkremenetele után kezd.

A fenti számítások, modellezések azt jelentik, hogy vagy merevebb tehát kisebb megnyúlást engedélyező rácsot kell alkalmazni, és ebben az esetben az aszfaltot valóban erősíti a rács, vagy pedig kisebb szakadó nyúlású terméket kell alkalmazni, olyat, amelynél hamarabb átveszi a megnyúlásokat az aszfaltháló vagy rács.

11. Végeelem számítások az aszfalterősítő ráccsal egyenértékű aszfaltvastagság meghatározására

11.1. Végeelem vizsgálatok célja, európai használata a rács-erősítés vizsgálatánál

A végeelem vizsgálatokat az aszfalt pályaszerkezetek mechanikai viselkedésének modellezésére előszeretettel alkalmaznak a világ minden részén, azzal a céllal, hogy pontosabban leképezzék és megvizsgálják az aszfalt pályaszerkezetekben végbemenő folyamatokat. A végeelem program alkalmazása kiváló lehetőséget nyújt a rács erősítés hatásainak a modellezésére, hiszen a szerkezetben beépített rácsot pontosan lehet geometriailag definiálni, a körülötte lévő aszfalt és maga a rács is leírható különböző anyagmodell fajtákkal.

Hollandiában végeztek síkbeli és térbeli végeelem modellezést a rácsok viselkedésének feltérképezésére. A vizsgálat célja alapvetően a hordozóanyag nélküli rácsok és a szövetes kompozitok viselkedési különbségének a meghatározása volt. A modellben a rácsoknak egységesen 50000 MPa merevségi modulust adtak. A rács, nyíró merevségi értékével modellezték a rács vagy szövetes kompozit és az aszfaltrétegek közötti adhéziós kapcsolat minőségét. A rácsnak 2 N/mm/mm^2 nyírómerevségi modulust állítottak be, a szövetes kompozit alkalmazásánál ezt az értéket $0,02 \text{ N/mm/mm}^2$ értékre csökkentették.

A síkbeli modell vizsgálata esetén megállapították, hogy a rács/szövetes kompozit kapcsolatának a minőségét, a létrejövő feszültségi, alakváltozási változást a rács esetében a rácslyuk mérete határozza meg nagymértékben, a szövetes kompozit esetében pedig a szövet és az aszfaltréteg közötti adhézióknak van komoly jelentősége.

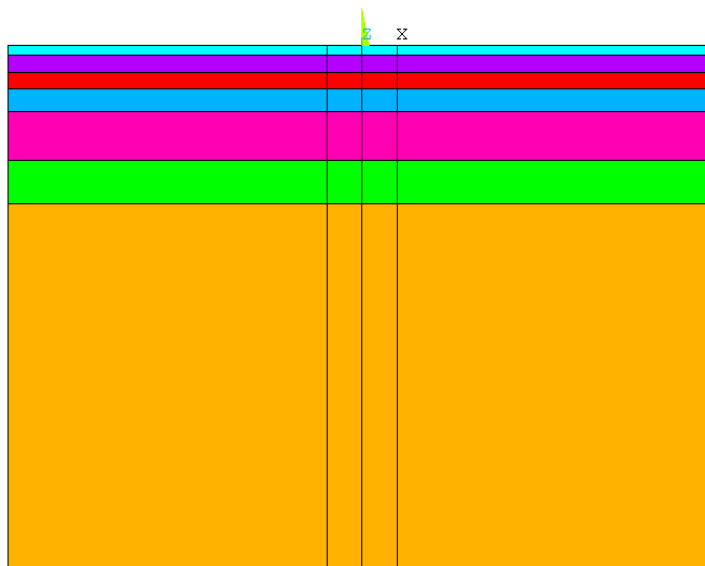
A térbeli modellezés hasonló paraméterekkel hasonló megállapításra jutott. A vizsgálat megállapította, hogy a rácsok esetében az a szerencsés, ha az egyes rács rudak közötti távolság minél kisebb, azért, hogy ne kerülhessen sor a kifeszített rács rudak deformációjára. A vizsgálat azt is megállapítja, hogy természetesen helyett kell biztosítani arra, hogy a kőváz be tudjon illeszkedni a rácslyukak közé. A szövetes kompozitok esetén is minél kisebb rúdtávolságot javasol a kutatás, illetve a rudak minél vastagabb méretét irányozza elő, annak a céljából, hogy a hosszirányban kialakuló nagy nyírófeszültségek kialakulása elkerülhető legyen. A nagy rúd vagy pászma vastagságot a nagyobb adhéziós felület miatt javasolja a holland elemzés. [de Bondt A. H., 1999]

A hálók erősítő hatásának megállapítására, együttműködve a BME Hidak és Szerkezetek Tanszékével végesem modellt dolgoztam ki. A feladat, különböző réteg felépítésű pályaszerkezetek esetén alkalmazott, változó merevségű termékek hatásának meghatározása volt, az aszfaltban fellépő nyúlásra. Minden rétegfelépítés és rács párosítás esetén kerestem azt az egyenértékű aszfaltvastagságot, ahol visszakaphatjuk az alsó aszfaltrétegben a rács nélkül fellépő nyúlást. A vizsgálatokat egy, kettő, és ahol lehetett három rács, rétegek közötti elhelyezésével végeztük el. Az alábbiakban bemutatom a modell geometriai jellemzőit, az alkalmazott végelemeket, megtámasztási viszonyokat, valamint az egyenértékű vastagság meghatározásának módját és eredményeit.

11.2. Az alkalmazott végelem modell ismertetése

11.2.1. Geometria

Az alakváltozások meghatározására, valamint az erősítő aszfaltráccsal egyenértékű vastagság meghatározására irányuló paraméteres vizsgálat sorozatok különböző rétegződésű pályaszerkezeteket tartalmaztak. A legösszetettebb pályaszerkezetre látunk példát a **11.1. ábrán**.



11.1. ábra: Az egyenértékű vastagság meghatározásához alkalmazott végelem modell geometriája

Ebben a felső négy réteg aszfalt, a következő réteg cementstabilizációs (CKt) alapréteg, és a legalsó réteg az altalaj. Az aszfalt és az alaprétegek vastagsága a paraméteres vizsgálat során változik, az altalaj vastagsága az alakváltozások meghatározásánál minden esetben 3000 mm.

A végeselemes modell az út pályaszerkezet 2 dimenziós metszete, egy síkbeli tárcsamodell. A különböző anyagú rétegek között minden esetben kontaktvonalakat tételeztünk fel, ahol a végeselemek elcsúszása és eltávolodása engedélyezett, a felületek csak nyomásra dolgoznak együtt. A kontaktvonalak között teljes elcsúszást tételeztünk fel. [Almássy –Joó, 2009/2]

A szerkezetbe beépített rács alapesetben a legalsó aszfaltréteg alatt helyezkedik el, ennek vastagsága minden esetben 0,5 mm.

A futtatások során számoltam olyan modellel is, ahol a két illetve három rács került beépítésre. Abban az esetben, amikor 4 aszfaltréteg volt a modellben, akkor a második rácsot 3. és 4. alapréteg alá tettük be, a harmadik rácsot pedig a 2. és 3. réteg közé tettük be. A kopóréteg alá azokban az esetekben került rács, ahol 2, illetve 3 aszfaltréteg került a modellbe.

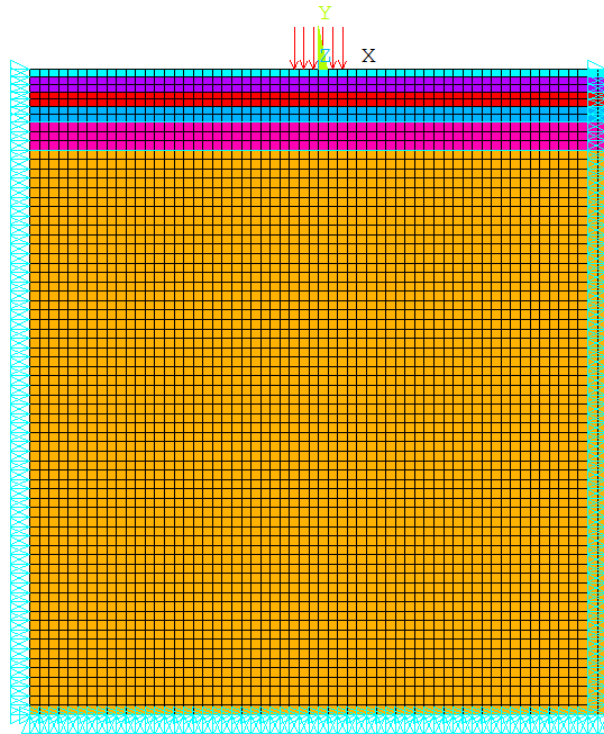
11.2.2. Alkalmazott végeelem típusok

Az útpálya szerkezet modellezésére az Ansys általános célú végeelem programot használtam. Mindkét modell felépítésére ugyanazokat a végeelem típusokat alkalmaztuk. A szerkezeti elemek (aszfalt, burkolati alapok, altalaj) modellezéséhez az Ansys PLANE 42 síkbeli alakváltozási állapotú tárcsaelemet alkalmaztuk, mely 4 csomóponttal és minden csomópontban 2 szabadságfokkal rendelkezik (UX, UY a jelenleg alkalmazott koordináta-rendszerben).

A pályaszerkezeti elemek közötti kontakt-probléma megoldásához a CONTA 172 és a TARGE 169 vonalelemeket használtam melyek 2 csomóponttal és minden csomópontban 2 szabadságfokkal írják le az elmozdulásmezőt. A kontakt vonalpárok képesek eltávolodni egymástól, nyomásra azonban teljes mértékben együtt dolgoznak.

Az aszfaltrétegek alatt elhelyezkedő háló modellezésére a LINK 1 rúdelemet használtam, amely 2 csomóponttal és minden csomópontban 2 szabadságfokkal rendelkezik (UX és UY).

Az elemek vastagsága – síkbeli alakváltozási állapotú elem esetén – 1 egység.



11.2. ábra: Végeselem háló, megtámasztások és terhek

Az aszfalt egyenérték vastagság meghatározására felállított Modell 1-nél a végeselemek nagyságát minden esetben 50 mm-re állítottuk, a rácshoz alkalmazott rúdelemet pedig 0,5 mm x 1 mm keresztmetszettel vettük fel. Az Ansys által generált végeselem hálózata a **4.2. ábrán** látható. Alakváltozások meghatározása esetén ez a legösszetettebb modell 4331 csomópontot és 4440 elemet tartalmaz, így a csomóponti szabadságfokok száma (az egyenletrendszer mérete) 8771.

11.2.3. Anyagmodell

Az alakváltozás, az erősítő aszfaltráccsal egyenértékű vastagság, valamint a pályaszélesítés esetén lévő alakváltozás meghatározása esetén a végeselemes modellezés során lineárisan rugalmas anyagmodellel dolgoztunk. A szerkezeti elemek Poisson tényezőit minden esetben 0,35-re vettük fel.

11.2.4. Megtámasztási viszonyok

A modellt az altalaj alsó élénél megtámasztottuk függőleges és vízszintes elmozdulás ellen. A modell jobb és baloldali függőleges élén pedig a csomópontok vízszintes elmozdulását akadályoztuk meg.

11.2.5. Terhek

Az aszfalt felső élére merőlegesen 1 db 50 kN kerékterhet definiáltunk. A terheket merőleges felületi nyomásként definiáltuk, melynek értékének meghatározásánál figyelembe vettük a kerék 300 mm-es szélességét, illetve a vizsgált keresztmetszvény egységnyi vastagságát. Az alkalmazott nyomás értéke $50000 \text{ N}/(1 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}) = 166,67 \text{ N/mm}^2$

11.2.6. Analízis

A vizsgálat során nem lineáris analízist hajtottunk végre nagyelmozdulások figyelembevételével. A nemlineáris számításra a kontaktelemelek alkalmazása miatt volt szükség. Az analízis során a teher felvitele 10 lépésben történt.

11.3. Az erősítő aszfaltráccsal egyenértékű aszfaltvastagság meghatározása

A különböző rétegfelépítéseket, és a 10 °C-os hőmérsékletekhez tartozó rugalmassági modulusokat az **11.1. táblázat** tartalmazza. Ezen pályaszerkezetek kerültek modellezésre $E=1000, 2000, 5000, 10000$ és 20000 MPa merevségű rácsfajták rétegek közé történő beépítésével. A 30 °C-os modellhez tartozó rugalmassági modulusok a az AC-11/F kopóréteg esetében lecsökkennek 2000 MPa -ra, a AC-22/NM kötőrétegnél 4000 MPa -ra, az AC-22/F kötőréteg esetében pedig 3500 MPa -ra csökkennek le a modulus értékek. Az 50 °C-os modellnél a fenti típusú kopóréteg 400 MPa -ra, a kötőrétegek pedig 1500 és 900 MPa -ra csökkennek le. A **Mellékletben** található táblázatokban részletesen láthatjuk a 30 °C és 50 °C-os hőmérsékletre tartozó pályaszerkezeti változatokat.

<i>Pályaszerkezet típus</i>	<i>Kopóréteg</i>	<i>2. aszfalt réteg</i>	<i>3. aszfalt réteg</i>	<i>4. aszfalt réteg</i>	<i>CKt</i>
Merevségi modulusok 10°C-on					
37_1_Aszf_A	4 cm, AC-11/F E=4000 MPa	9 cm, AC-22/NM E=8000 MPa			
38_2_Aszf_D	4 cm, AC-11/F E=4000 MPa	8 cm, AC-22/NM E=8000 MPa	9 cm, AC-22/NM E=8000 MPa		
39_3_Aszf_R	4 cm, AC-11/F E=4000 MPa	9 cm, AC-22/NM E=8000 MPa	9 cm, AC-22/NM E=8000 MPa	9 cm, AC-22/NM E=8000 MPa	
40_4_Aszf_A	4 cm, AC-11/F E=4000 MPa	9 cm, AC-22/F E=6000 MPa			
41_5_Aszf_D	4 cm, AC-11/F E=4000 MPa	8 cm, AC-22/F E=6000 MPa	9 cm, AC-22/F E=6000 MPa		
42_6_Aszf_R	4 cm, AC-11/F E=4000 MPa	9 cm, AC-22/F E=6000 MPa	9 cm, AC-22/F E=6000 MPa	9 cm, AC-22/F E=6000 MPa	
44_8_CKt(15)_D	4 cm, AC-11/F E=4000 MPa	13 cm, AC-22/NM E=8000 MPa			15 cm CKt E=5000 MPa
45_9_CKt(15)_R	4 cm, AC-11/F E=4000 MPa	8 cm, AC-22/NM E=8000 MPa	8 cm, AC-22/NM E=8000 MPa	8 cm, AC-22/NM E=8000 MPa	15 cm CKt E=5000 MPa
47_11_CKt(15)_D	4 cm, AC-11/F E=4000 MPa	13 cm, AC-22/F E=6000 MPa			15 cm CKt E=5000 MPa
48_12_CKt(15)_R	4 cm, AC-11/F E=4000 MPa	8 cm, AC-22/F E=6000 MPa	8 cm, AC-22/F E=6000 MPa	8 cm, AC-22/F E=6000 MPa	15 cm CKt E=5000 MPa

11.1. táblázat: Pályaszerkezeti modellek 10 C°-on

Az útpálya szerkezet vége-selemes modelljét az Ansys programnyelvének (Ansys Parametric Design Language) segítségével paraméteresen készítettük el. A modell paraméterei a következők voltak:

- vizsgálat: az adott vizsgálat jele,
- h_i : az adott réteg vastagsága,
- E_i : az adott réteg rugalmassági modulusa ($i=1..7$ -ig, ahol 7 a rétegek maximális száma).

A **11.1. táblázatban** (és a **Melléklet** 30 °C és 50 °C-os hőmérsékletre tartozó táblázataiban) megadott paraméterek alapján 27 különböző rács nélküli alapeset és 135 ráccsal erősített eset állt elő. Minden egyes eset külön sorszámot kapott, illetve az egyes esetekre jellemző paramétereket egy karakterláncba vontuk össze. A macro szóval hívja be az Ansys az általunk készített makrót fájlt, és a futtatást az ezt követő paraméterekkel hajtja végre. A különböző paramétereket vessző választja el egymástól. Az első paraméter a vizsgálat jele, az eredményeknél csak ezzel hivatkozunk az adott karakterláncra. A vizsgálat jelének értelmezése: egy globális sorszámmal kezdődik (értéke:1-től 162-ig), majd egy rétegfelépítésre utaló sorszám következik (értéke: 1-től 10-ig), ezt követi az adott rétegfelépítésre vonatkozó forgalmi terhelési osztály jele (A-D-R).

A vizsgálat jelét követik párban az egyes rétegek vastagsági és rugalmassági modulus értékei. Abban az esetben, ha nincs összesen 4 réteg aszfalt vagy nincs alapréteg, a vesszők közé nem került érték. A rétegek adatai után hasonló módon található az altalaj vastagsági és rugalmassági modulus értéke (300 cm és 40 MPa). (A karakterlánc végén még találhatóak az illesztésre és a teher helyére vonatkozó jelzések.) A sor legvégén pedig a rácsra vonatkozó jellemzők helyezkednek el: van-e (0=nincs, 1=van), és ha van, a rács rugalmassági modulusa (1000, 2000, 5000, 10000 és 20000 MPa).

Az aszfalt egyenértékű vastagságának meghatározására fokozatos közelítés módszere lett alkalmazva. A háló nélküli referencia nyúlás értékét eltároltam (ezentúl referencia nyúlásként hivatkozunk rá), és ehhez hasonlítottam az aszfalt vastagság csökkentésével kapott nyúlás értéket. Kiindulásként $\delta = 10$ mm-rel csökkentettem a vastagságot, és ezt addig végeztem, míg a referencianyúlásnál nagyobb értéket nem kaptam eredményül. Ekkor növelni kezdtem a vastagságot, mindig megfelezve az előző δ értéket. Ilyen módon bármilyen egyenértékű vastagsági értéket meg lehetett határozni. Leállási feltételként a referencia nyúlás és az éppen aktuális vastagsághoz tartozó nyúlás értékek százalékos arányát adtam meg: ha a két érték 0,1 ezreléknél kisebb mértékben tért el egymástól, akkor már 4 értékes jegyre azonos nyúlás-értékeket kaptunk vissza. Ez elegendő volt ahhoz, hogy tizedmilliméter pontossággal kapjuk meg az egyenértékű vastagságot.

Bizonyos rétegfelépítéseknél nem található egyenértékű vastagság, itt az volt a leállási feltétel, ha a legfelsőt kivéve az összes aszfaltréteg vastagsága nullára csökkent.

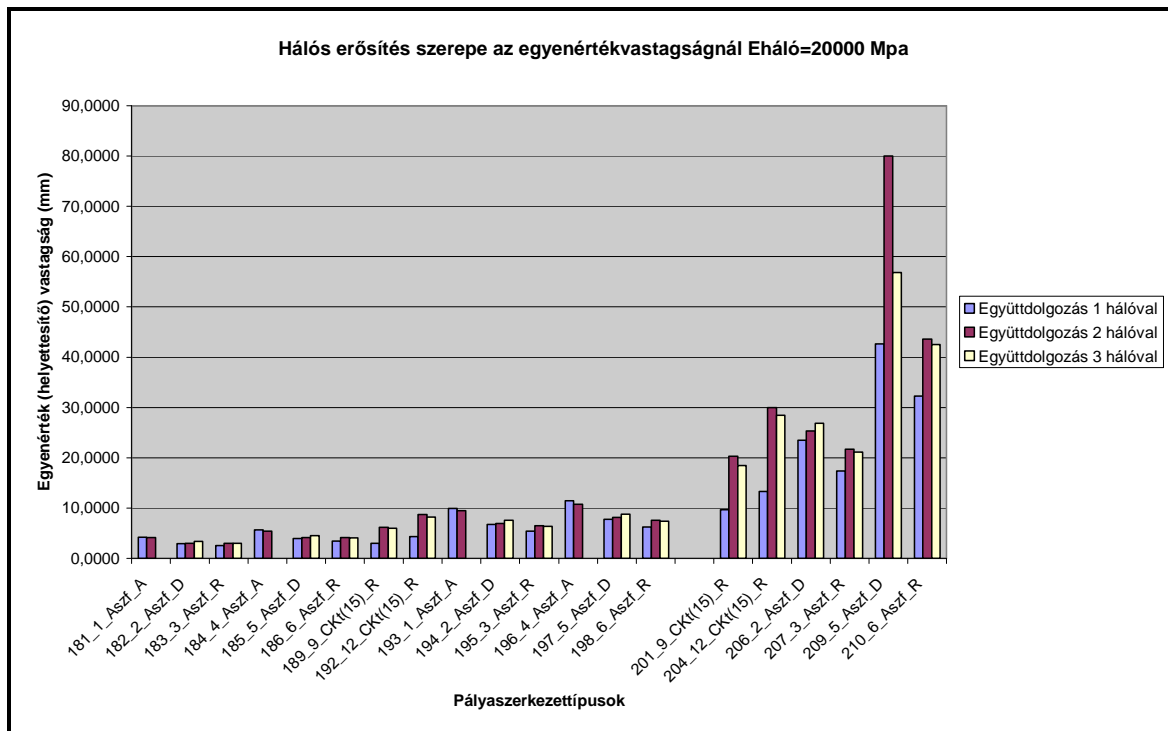
11.4. Az eredmények értékelése

A modell vizsgálata során az alábbi eredményeket lehetett kigyűjteni:

- maximális megnyúlás az aszfalt alsó szélső szálában [mm/mm], rács nélküli eset eredménye (referencianyúlás)
- maximális megnyúlás az aszfalt alsó szélső szálában [mm/mm], ráccsal erősített eset eredménye
- maximális megnyúlás az aszfalt alsó szélső szálában [mm/mm], egyenértékű vastagsághoz tartozó eredménye (amennyiben található)
- az egyenértékű vastagság eléréséhez szükséges csökkentő δ vastagság [mm], (amennyiben található)

Az egyszerű követhetőség kedvéért csak a számomra fontos egyenérték vastagsági eredményeket (csökkenthető delta vastagságokat) gyűjtöttem össze a **Mellékletben**.

Szintén a **Mellékletben** találhatóak, aszfaltrács merevség szerinti bontásban, grafikus formában az eredmények. Az alábbi **11.3.** ábrán a leglátványosabb, cm-es nagyságú erősítést jelentő, 20.000 MPa merevségű aszfaltráccsal készült szerkezetek egyenérték (helyettesítő) vastagsági eredményei láthatóak.



11.3. ábra: Egyenérték vastagság 20000 MPa-os rács alkalmazásnál

A "nem konvergált" és a "nem található ekv. vastagság" esetek azt jelentik, hogy a ráccsal kapott nyúlás érték a rács nélküli (referencia) nyúlásnál kisebb, így elkezdtem csökkenteni az aszfalt vastagságát, növekedni kezdett a nyúlás, de bármekkora csökkentés hatására se nő meg annyira az értéke, hogy a referencianyúlást elérjük. (Valójában ezekben az esetekben egy darabig növekedett a nyúlás, de azután elkezdett csökkenni, és egy idő után átváltott összenyomódásba.) A fentiek okán azt itt kapott futtatásokat nem tettem be az eredmény sorba. Az eredményekből jól látszik, hogy főleg a teljes aszfalt pályaszerkezetek esetén találhatóak egyenértékű vastagságok, míg CKt alaprégű aszfalt pályaszerkezetek esetén a legtöbb felépítésnél nincs ilyen vastagság.

A rács alkalmazásával a modellezés szerint az esetek túlnyomó többségében csak milliméteres nagyságrendű aszfaltcsökkentés engedhető meg, centiméteres nagyságrendet csak a nagyobb,

10-20000 MPa merevségű rácsok és 30 illetve 50°C hőmérsékletű pályaszerkezet kombinációjánál értünk el.

A modell felállítása után változtattam a rács vastagságán (a rúd, vagy pászma vastagságán) és a modellben alkalmazott 0,5 mm helyett 3 mm-t vettem fel. A vastagság növekedésével arányos, átlagosan közel 6-szoros helyettesítő vastagság növekedés jelentkezett a végelem számítások eredményeiben. A nyilvánvaló linearitás miatt ezt az alkalmazást a többi modell változatnál már nem futtattam le.

A végelem futtatásokból az is kiderül, hogy a 2. rács, alkalmazása újabb erősítés jelent a szerkezetnek, hiszen ezekben az esetekben az egyenérték-vastagság szinte minden esetben – az „A” osztályú teljes aszfaltszerkezet kivételével (de itt is elhanyagolható a különbség) - megnőtt. A harmadik rács alkalmazása viszont már nem minden esetben jelent plusz erősítést, a két ráccsal készült szerkezethez képest. Azokban az esetekben, ahol a harmadik rács a kopóréteg alatt helyezkedik el, ott minimális növekedést olvashatunk le az egyenérték-vastagságban, abban az esetben viszont, amikor CKt alapréteg vagy 4 rétegű aszfaltszerkezet modelleztünk, ott kis mértékben csökken az egyenérték-vastagság a harmadik rács alkalmazása esetén.

11.4.1. Végelem számítások 20%-kal nagyobb kezdeti aszfalt merevségi modulus esetén

Az előző fejezetben (10.2. fejezet) már említett svájci kutatás alapelvét, valamint a 4 pontos fárasztás során kapott kezdeti merevségi modulus értékeket figyelembe véve készítettem olyan végelem futtatást is, ahol egységesen kezeltem a pályaszerkezeti rétegeket, azaz nem vettem be a rácsot a modellezésbe, viszont az aszfalt rétegek merevségi modulusát 20%-kal megnöveltem minden réteg esetén. [www.sp-reinforcement.ch, 2006] Az alábbi táblázatban szereplő átlag kezdeti merevségi modulus értékeket vettem figyelembe a modellalkotás során.

<i>Acélráccsal készült szerk. merevségi modulusa (MPa)</i>	<i>Viacon/Glassgrid 8502-es ráccsal készült szerk. merevségi modulusa (MPa)</i>	<i>Referencia próbatest merevségi modulusa (MPa)</i>
8999,333333	10218	8458
5,27% növekedés	19,53% növekedés	

11.2. táblázat: Kezdeti merevségi modulusok a rács erősítéssel készült próbatesteknél

A végeelem számításokat az elméleti egyenérték/helyettesítő vastagság megállapítására a következő táblázatban található pályaszerkezetek esetén 10 és 30 C° változatokra végeztem el. A számítások során a korábbi aszfaltréteg merevségi modulust növeltem meg 20%-kal.

<i>Pályaszerkezet típus</i>	<i>Kopóréteg</i>	<i>2. aszfalt réteg</i>	<i>3. aszfalt réteg</i>	<i>4. aszfalt réteg</i>	<i>Egyenérték/helyettesítő vastagság</i>
Modellek és eredmények 10°C-on					
37_1_Aszf_A	4 cm, AC-11/F E=4800 MPa	9 cm, AC-22/NM E=9600 MPa			28,1445
38_2_Aszf_D	4 cm, AC-11/F E=4800 MPa	8 cm, AC-22/NM E=9600 MPa	9 cm, AC-22/NM E=9600 MPa		26,2695
39_3_Aszf_R	4 cm, AC-11/F E=4800 MPa	9 cm, AC-22/NM E=9600 MPa	9 cm, AC-22/NM E=9600 MPa	9 cm, AC-22/NM E=9600 MPa	29,8047
40_4_Aszf_A	4 cm, AC-11/F E=4800 MPa	9 cm, AC-22/F E=7200 MPa			29,4141
41_5_Aszf_D	4 cm, AC-11/F E=4800 MPa	8 cm, AC-22/F E=7200 MPa	9 cm, AC-22/F E=7200 MPa		28,4375
42_6_Aszf_R	4 cm, AC-11/F E=4800 MPa	9 cm, AC-22/F E=7200 MPa	9 cm, AC-22/F E=7200 MPa	9 cm, AC-22/F E=7200 MPa	31,2891
Modellek és eredmények 30°C-on					
49_1_Aszf_A	4 cm, AC-11/F E=2400 MPa	9 cm, AC-22/NM E=4800 MPa			35,3906
50_2_Aszf_D	4 cm, AC-11/F E=2400 MPa	8 cm, AC-22/NM E=4800 MPa	9 cm, AC-22/NM E=4800 MPa		33,1641
51_3_Aszf_R	4 cm, AC-11/F E=2400 MPa	9 cm, AC-22/NM E=4800 MPa	9 cm, AC-22/NM E=4800 MPa	9 cm, AC-22/NM E=4800 MPa	33,7500
52_4_Aszf_A	4 cm, AC-11/F E=2400 MPa	9 cm, AC-22/F E=4200 MPa			36,2500
53_5_Aszf_D	4 cm, AC-11/F E=2400 MPa	9 cm, AC-22/F E=4200 MPa	9 cm, AC-22/F E=4200 MPa	9 cm, AC-22/F E=4200 MPa	34,5312
54_6_Aszf_R	4 cm, AC-11/F E=2400 MPa	9 cm, AC-22/F E=4200 MPa	9 cm, AC-22/F E=4200 MPa	9 cm, AC-22/F E=4200 MPa	34,8438

11.3. táblázat: A referencia modellhez képest 20% merevségi modulussal megnövelt szerkezetek egyenérték/helyettesítő vastagság értékei

Az eredmények egyértelmű, cm-es nagyságrendű erősítést mutatnak a merevségi modulus 20%-kal történő megnövelése után. Nyilvánvaló, hogy ez az eredmény nem meglepő, ugyanakkor kezdeti merevség megnövekedése és a fentiekben bemutatott fárasztás vizsgálat **(Lásd. 7.5. fejezet)** okán szemléltetni kívántam azt is, hogy milyen eredményt, milyen helyettesítő vastagságot kaphatunk abban az esetben, ha a rács jelenlétét az aszfaltréteg merevségi modulusának megnövekedésébe számítjuk be.

12. Rácsbeépítéssel készült útszakaszok helyszíni szemrevételezése

12.1. Jelentősebb rácsbeépítések Magyarországon

Magyarországon lassan több mint egy évtizede alkalmaznak georácsokat, hálókat aszfaltrétegek közé beépítve, vagy a hidraulikus kötőanyagú alaprétegre terítve a különböző hazai útfelújításoknál. A rácsokat repedés áttükröződés megakadályozása érdekében, valamint erősítés céljából alkalmazták új pálya építések és felújítások során.

A hazánkban az aszfaltrétegek közé, illetőleg a hidraulikus kötőanyagú alapréteg és az aszfaltréteg közé beépített rácsok összmenyiségéről nem készült átfogó felmérés, csak megközelítőleg tudjuk megbecsülni a beépítésre került mennyiség nagyságrendjét. A becslésekkor a kereskedők/gyártók által közreadott referenciákat kell alapul vennünk.

Berényi az S&P Reinforcement cég termékeinek magyarországi alkalmazásáról készített anyagot [Berényi, 2006]. A következő jelentősebb referenciákat említette:

- S&P Carbophalt G négy budapesti útszakaszon, illetve autóbussmegállóban,
- S&P Carbophalt GS az M7-es autópálya Letenye és Becsehely közötti szakaszán,
- S&P Glasphalt G budapesti utcákon és autóbussmegállóknban, az M7-es autópálya Letenye és Becsehely közötti szakaszán, az M1-es és az M5-ös autópálya felújításakor, dabasi utak szélesítésekor, a 89. út Szombathelyet elkerülő szakaszán, a 86-os úton, valamint egyes hódmezővásárhelyi útfelújítások során,
- S&P Glasphalt GS az M1-es, az M6-os, az M7-es, az M70-es és az M35-ös autópálya építésekor, valamint egy győri körforgalmi csomópontban,
- S&P Glasphalt bit a 86-os út 2 km-es hosszúságú szakaszán, Budapesten a Déli pályaudvar melletti autóbussmegállóknban és a Rákóczi úton, az EMKE melletti buszmeállóban.

Az S&P Reinforcement, a honlapjukon található információk alapján csak az M6-os autópályán (Érd-Dunaújváros) 1.200.000 m²-nyi aszfaltrácsot épített be. (Megjegyzem, hogy itt kivitelezői kérésre érdekes módon fordítva (a pászmaák kerültek alulra és felülre került a szövetes hordozóanyag) került beépítésre az aszfaltrács. Meghibásodásokról egyelőre nincsenek információim.

A Viacon Hungary - szintén a honlapjukról származó információ alapján - a Glasgrid típusú rácsaiból 2007-ig 330.000 m²-t épített be. Olyan helyeken építettek be aszfalt rácst (hordozóanyag nélküli aszfaltrácsot), mint például az M7-es Balatonkeresztúri szakasza, az M3-as autópálya, 41.sz főút, és a 4.-es számú főút. [www.viaconhungary.hu, 2007]

A Gradex Kft. esetében - mint az egyik legnagyobb hazai gyártó és forgalmazó - a 2006-os útfelújítások során történt rácscserekről rendelkezem pontos adatokkal. E szerint a Soroksári úton, a Gyáli úton, a Nánási úton, a Nagykovácsi úton közel 90.000 m²-en történt rácscsere az aszfaltrétegek közé. A cég ugyanakkor számos referenciával rendelkezik más fővárosi utak esetében, illetve jelentős mennyiségben épített be rácst – minden esetben szövet-hordozó anyagút – a hazai újjépítési autópálya szakaszok hidraulikus alaprétégre. (M6-os, M7-es autópályák)

Információim szerint a 2004-es évtől kezdve minden újonnan épült autópálya szakaszon és gyorsforgalmi úton a hidraulikus kötőanyagú alaprétégre fektettek repedés képződés meggátlásának céljából, elválasztó réteggént aszfalterősítő rácst. Ez a mennyiség meghaladhatja a 10 millió m²-t is.

12.2. Helyszíni szemrevételezés eredményei

Az aszfaltszerkezetbe beépített rácscsere viselkedésének vizsgálata során több olyan útszakaszt is megvizsgáltam, ahol alkalmaztak rácserősítést, és már több éves tapasztalat áll rendelkezésre az útszakasz állapotáról. Sajnos olyan referencia szakaszok melynek építési éve, szerkezeti vastagsága, az alkalmazott aszfaltkeverék fajtája megegyezett volna a rácserősítésű szakaszokéval nem álltak rendelkezésemre a szemrevételezés elvégzésekkor. (Ez a fővárosi út adatbank hiányának köszönhető elsősorban). A kiválasztott utak állapotfelvétele során, az egyes rácscsere készült szakaszok általános állapotáról tudtam csak információt gyűjteni. Az alábbi, helyszíni állapot felvétel ismertetése során helyt adok olyan korábbi kutatásnak is, amely talán az egyetlen olyan esetet mutatja be, ahol referencia szakasz alkalmazásával vizsgálták hazánkban a rácscsere hatását. [*Veszélka, 1996*]

Rákóczi út:

Rákóczi útnak a Blaha Lujza tér és Keleti pályaudvar közötti szakaszának átépítésére 2001-ben került sor. A felújítás során a homokos kavics ágyazatra és soványbeton alapra, 35 000 m²-en, a TENCATE cég PGM 14 jelű pályaszerkezeti textíliáját terítették, amelyre összesen 10 cm-es vastagságban kétrétegű aszfaltburkolat készült. A textíliát, a sok közműszerelvény miatt, 1 m-es csíkokban terítették el. Egy 2007-es kutatás során szemrevételezésre került az érintett útszakasz. A vizsgálat a beépítés után 6 évvel vizsgálta a szakaszt és megállapította, hogy rendkívül intenzív forgalom mellett is a burkolat felületén kevés és viszonylag rövid repedés volt látható. A teljes forgalmi sávon áthúzódó repedésből egy sem volt található. A 2010 nyári helyszíni felmérés megállapította, hogy a városközpont felé vezető szakasz rosszabb állapotban van, mint a centrumból a Keleti pu. irányába tartó szakasz. Ezen a szakaszon 50-60 kisebb-nagyobb keresztirányú repedés látható, a sáv elválasztásoknál néhol hosszirányú repedés is látható. Az útszakasz, a buszsáv kivételével, a két forgalmi sávban nyomosodik, a keréknyomvályú 0,5 -0,7 cm. A Keleti pu. felé vezető szakaszon 25-30 kisebb keresztirányú repedés látszik, hosszirányú repedésből mindössze 10-20 m hosszon, 2-3 db található a szakaszon. Keréknyomvályú ugyanakkor nem látható ezen a szakaszon.



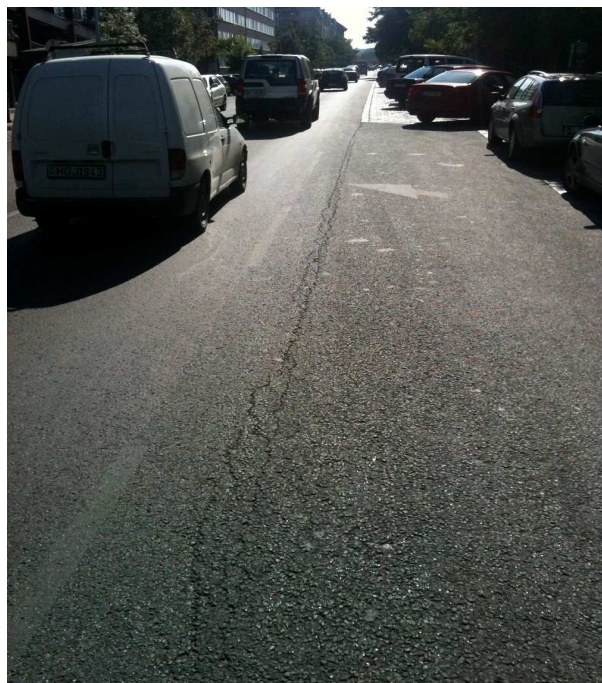
12.1. kép: Teljes sávszélességben futó keresztirányú repedés a Rákóczi úton

Podmaniczky utca

A fentiekben már említett 2007-es kutatás során a Podmaniczky utca vizsgálatra is sor került, a Dózsa György út és a Ferdinánd-híd közötti szakaszon. A Rákóczi úton alkalmazotthoz (2 rétegben 10 cm aszfalt kopóréteg) hasonló pályaszerkezet részét képezi a PGM 14 jelű textília, 1,50 m-es szélességű csíkokban elterítve. Az állapotfelvétel az 5 éves erős forgalom után, csak néhány keresztirányú repedést mutatott, ezek is általában akna fedlapok sarkától indultak ki. Tehát 5 év eltelte után itt sem volt tapasztalható reflexiós repedés a pályán.

A 2010. nyári felmérés, 8 éves működés után szintén azt állapította meg, hogy a szakasz kopórétege alapvetően jó állapotú. Már megjelentek keresztirányú repedések, ezek száma azonban nem haladta meg az egész útszakaszon a 20 db-ot, és ezek egyike sem volt a burkolat teljes hosszában átmenő repedés.

Hosszirányú repedések megjelentek a MÁV kórház előtti szakaszon, illetve a Ferdinánd híddal szemben lévő útszakaszon, de ezekben az esetekben a repedések minden esetben a sárválasztásnál látszanak (parkolósávnál, valamint a sávközépen, de ez inkább szokványos beépítési hiba a hossz-csatlakozások esetén.)

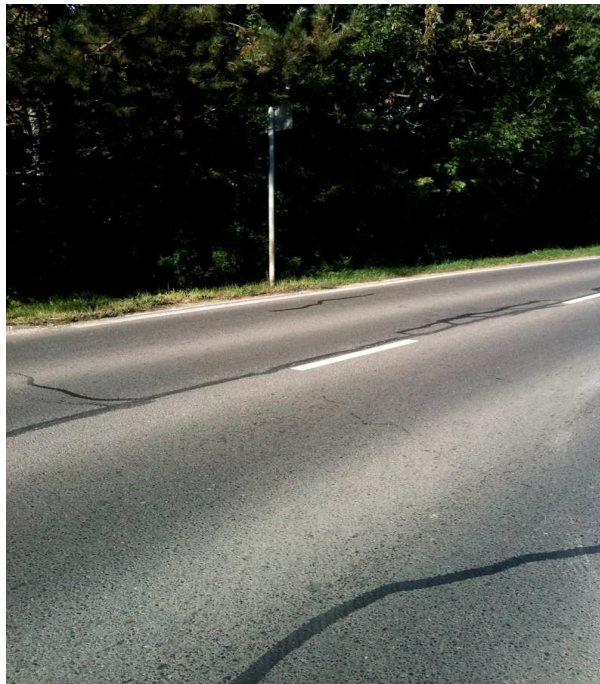


12.2. kép: Hosszirányú repedés a Podmaniczky utcában

Nagykovácsi út

A Nagykovácsi utat a Hűvösvölgyi út és a Budapest határ között 2006.-ban újították fel. A szakaszon a kopóréteg alá a teljes hosszon Roadtex 100-as (forgalmazó: Gradex Kft.)

aszfaltrácsot építették be. Az útszakaszt a burkolat állapota alapján két részre lehet osztani. Az első szakaszon, a Hűvösvölgyi út és Nagyrét utca között a kopóréteg szinte hibátlan állapotban van, néhány apróbb repedés található mindössze rajta. Ezzel szemben a második szakaszon a Nagyrét utca és a Budapest határ között számos kereszt és hosszirányú repedés található (~ 120 – 150 db). A repedéseket az adyligeti szakaszon már ki is öntötték bitumennel, azonban Nagyrét utcától induló meredek, több mint 4%-os emelkedőn még számos kijavíthatlan repedés maradt, sőt a burkolat szélén, a keréknyomvályúban nyomosodás is látható. Feltételezhetően az útszakaszon a repedések megjelenésének köze van a rács nem megfelelő alkalmazásához is, hiszen egyfelől nincs ésszerű magyarázat arra, hogy a nagyobb forgalmi terhelésnek kitett belső szakaszon miért nem jelentek meg repedések, másfelől korábbi szakirodalmi, sőt gyártó előírások is utaltak arra, hogy nagyobb esésű szakaszokon a rácsbeépítés problémát okozhat, mert megcsúszhat az aszfalt a felületén.



12.3. kép: Kiöntött repedések 4 éves úthasználat után a Nagykovácsi úton

Soroksári út:

A Soroksári út IX. kerületi szakaszán a 2006-os útfelújítások során kísérleti jelleggel 3 különböző rácsfajtát építettek be – Gradex, Polyfelt és S&P gyártók termékeit - a kötőréteg alá, majd két rétegben 2x5 cm AB-12/F-es aszfaltot terítettek rá. A Gradex és a Polyfelt rácsok szövethordozósak voltak, az S&P hordozó anyag nélküli üvegszálalás rácsot alkalmazott. A szakasz helyszíni szemrevételezése 2010 nyarán történt, és ez alapján

elmondható, hogy nincsen meghibásodásra utaló jel a burkolaton, így a beépített rácsfajták viselkedése között sem mutatható ki különbség.

A Szintetikus anyagokból készült aszfaltrácsok szabályozása című KTI zárójelentés [KTI, 2007] megemlíti továbbá, hogy 2002-ben az M7-es autópályán több aszfaltrács fajta került beépítésre kísérleti jelleggel a régi betonburkolatra terítve a 12 cm vastag új aszfaltréteg alá. Sajnos nincsen arról információnk, hogy a pontosan melyik szelvényben melyik típusú, gyártói rács került beépítésére, így ennek a nagyon hasznosnak tűnő kísérletnek az elemzését nem tudtuk elvégezni. A kutatás egyébként említ még több beépítési helyet, ahol aszfaltrácsokat alkalmaztak (M5 bevezető szakasz, Hódmezővásárhely utcái, Bartók Béla út), de sajnos pontos szelvény szám, vagy szakaszhatár nem állt a zárójelentés szerzőinek rendelkezésére, így az állapotfelmérésre sem kerülhetett sor.

A 90-es évek elején a 47.út 92+400 és 92+550 km szakaszai között, valamint a 44. út 93+500 és a 93+650 km szakaszai között HaTelit típusú poliészter alapanyagú georácsot építettek be kísérletként a pályaszerkezet átrepedésének meggátlása céljából. A háló szakítószilárdsága mind hossz-, mind pedig keresztirányban 50 kN/m. Referencia szakasz kialakítása céljából azonban mindkét szakaszon csak az egyik forgalmi sávon terítették el aszfalthálót. Néhány év után már komoly különbség alakult ki a két sáv között. A 47.-es út referencia szakaszán megjelentek a reflexiós repedések, ugyanakkor a rácserősítésű szakaszon a csak jóval később jelentek meg a hibák. A 44.-es sz. főúton pedig a keréknyomvályú képződést tudta meggátolni, késleltetni a rács jelenléte, szemben a rács nélküli referencia szakasszal.

[Veszélka, 1996]

Egy korábbi a BME Út és Vasútépítési Tanszék által kiadott, általam megírt szakvéleményben a 21. sz. főút egyik szakaszának, rácsbeépítés hatására bekövetkezett meghibásodást vizsgáltam. A szakvéleményben megfogalmaztam, hogy az érintett szakaszon a meghibásodást az aszfaltrétegnek és az alkalmazott rácsnak nem megfelelő együttdolgozása okozta. A szakaszon szövet hordozós rácsot, mindössze 4 cm vastag kopóréteg alá építettek be.

12.3. Megéri rácserősítést alkalmazni?

Magyarországon nem történt ez idáig semmilyen költség-haszonelemzés arra vonatkozólag, hogy megéri –e rácserősítést alkalmazni az útfelújítások, új építésű utak esetében. Jelen

dolgozat keretei csak néhány mondatban alkalmasak arra, hogy ezt a problémát felvessék és néhány szó erejéig beszéljünk az aszfaltrácsok áráiról, bekerülési költségeiről is:

Függetlenül attól, hogy szövetes hordozóanyagú rácscról, vagy hordozó anyagnélküli aszfaltrácsról beszélünk az anyag négyzetméter ára 450 és 500 Ft+Áfa között mozog. Adtak már el 350 Ft+Áfa/m² és 650 Ft+Áfa/m² árért is aszfaltrácsot, de az átlagár az előbb említett összegnél helytálló. A rácsok beépítési költsége nem tekinthető jelentősnek, hozzávetőlegesen 150-200 Ft+ Áfa/m² árról beszélhetünk ebben az esetben. A gyártók és a megrendelők sem rendelkeznek pontos adattal a beépítés mennyiségét illetően, de a fentiekben részletezett, általam megismert beépítési helyek alapján kijelenthető, hogy több milliárd forint elköltéséről is beszélünk akkor, amikor az aszfalterősítő rácsok/hálók szerepét, hasznosságát vizsgáljuk, értékeljük. A fenntartási és felújítási költségek tekintetében sem történ hazai elemzés a rácserősítés alkalmazása kapcsán. Az Egyesült Államokban, Texasban azonban készítették átfogó összehasonlítást a különböző felújítási és fenntartási technológiák költségeiről. Az elemzés során 370 útszakasz 5-6 éves üzemeltetés utáni állapotát vizsgálták, az útszakaszok különböző építési felújítási technológiával készültek. [TRI, 2005]

A kiterjedt vizsgálat egyik fontos megállapítása az volt, hogy azokban az esetekben, amikor a burkolatállapot kátyúzást (foltozást) nem igényelt, - a burkolat nincsen teljesen leromlott használhatatlan állapotban - a geotextília alkalmazása gazdaságilag hatékonyabbnak mondható a hideg eljárással történő recycling technológiánál.

12.4. A helyszíni szemrevételezés összegzése

A fentiekben bemutatott helyszíni szemrevételezéssel elemeztem néhány rácsbeépítéssel készült útszakasz állapotát. Az állapotfelvételhez sajnos nem álltak rendelkezésre az összehasonlítást megkönnyítő referencia szakaszok.

A helyszíni szemrevételezés alapján kimondható, hogy a rácsbeépítéssel készült útszakaszok többségén komoly meghibásodás nem látszik, illetve azokon a szakaszokon, mely már 8 éve forgalmi terhelésnek van kitéve, kevesebb meghibásodás található, mint amilyenekkel rácserősítés nélkül készült útszakaszok esetében találkozhatunk. (Rákóczi út, Podmaniczky utca). Meghibásodást egyedül a Nagykovácsi úton tapasztaltam, de ott a nagy esés okán, a hibás szakaszon eleve nem lett volna szabad szövethordozós rácsbeépítést alkalmazni. A 21. sz. főút is a nem megfelelő technológia megválasztása és a vékony aszfaltréteg beépítése okozta a meghibásodásokat. Összességében tehát kijelenthető, hogy az aszfaltrácsok alkalmazása a gyakorlatban, a valós úthasználat során is pozitív tapasztalatokat mutat.

13. Összefoglaló megállapítások

A dolgozatomban áttekintettem az útpályaszerkezetekbe beépített aszfaltrácsok viselkedését, a disszertáció során elsősorban azt vizsgáltam, hogy az aszfaltrétegek között hogyan viselkedik az alkalmazott rácsszerkezet. A kutatási eredmények alapján az alábbiakban megfogalmazom a további kutatási lehetőségeket, javaslatot teszek a gyakorlati alkalmazásban szükséges változtatásokra és bemutatom a nagyszámú laboratóriumi vizsgálat és számítógépes modellezés alapján megállapított tudományos eredményeket, téziseket.

13.1. További kutatási lehetőségek, gyakorlati javaslatok

Az elvégzett kutatások alapján mindenképpen szükségesnek érzem javasolni, hogy készüljön végre átfogó szabályozás, útügyi műszaki előírás, amelyben a fogalmak, beépítési feltételek, műszaki jellemzők (kiemelten javaslom a rugalmassági modulussal történő jellemzést is) tisztázásra kerülnének. A geotextíliák útépitésben történő alkalmazásáról, beépítési szabályairól ugyan már készült európai műszaki szabvány [MSZ EN 15381: Geotextíliák és rokon termékeik. Az útburkolatokban és aszfalt fedőrétegekben való használat jellemzői], azonban ez túl általános és az alapfogalmak ismertetésén túl érdemi útmutatást és szabályozást nem tartalmaz. Időszerű lenne tehát, hogy egy részletes útügyi műszaki szabályozás, vagy legalább tervezési útmutató szülessen az aszfaltrétegek közé, vagy hidraulikus kötőanyagú alaprétegre történő rácsbeépítések szabályairól. A fenti kutatási eredmények kisméretű modellek laborvizsgálatainak alapulnak, amelyekben nem minden esetben tükrözik százszázalékosan a valóságos viselkedést. Az értekezésemben bemutattam néhány helyszíni szemrevételezés alapján készült állapot felvételi eredményt, de továbbra is javaslom, hogy átfogó, az egész országra kiterjedő helyszíni vizsgálatok – szemrevételezés, repedéskép felvétel, behajlás mérés – történjenek olyan útszakaszokon, ahol rács került beépítésre az aszfaltrétegek közé, természetesen úgy, hogy legyen olyan összehasonlítható, referencia szakaszunk, ahol nem került rács beépítésre. (Lásd a fentiekben bemutatott Texas Research International Company több éves kutatási terve, és annak eredménye.)

Érdeemes lenne továbbá a rács, beépítés után megmaradó merevségi modulusát is meghatározni, hiszen a beépített elemi szálnak, vagy rács rászternek nyilvánvalóan a beépítési hőmérséklet és tömörítés hatására lecsökken a merevségi modulusa. A rács merevségi modulusának pontosabb meghatározása elősegítené a hatékonyabb tervezést, erősebb és műszakilag tartósabb szerkezetek létrejöttét.

14. Az értekezés tudományos eredményei, tézisek

1. tézis

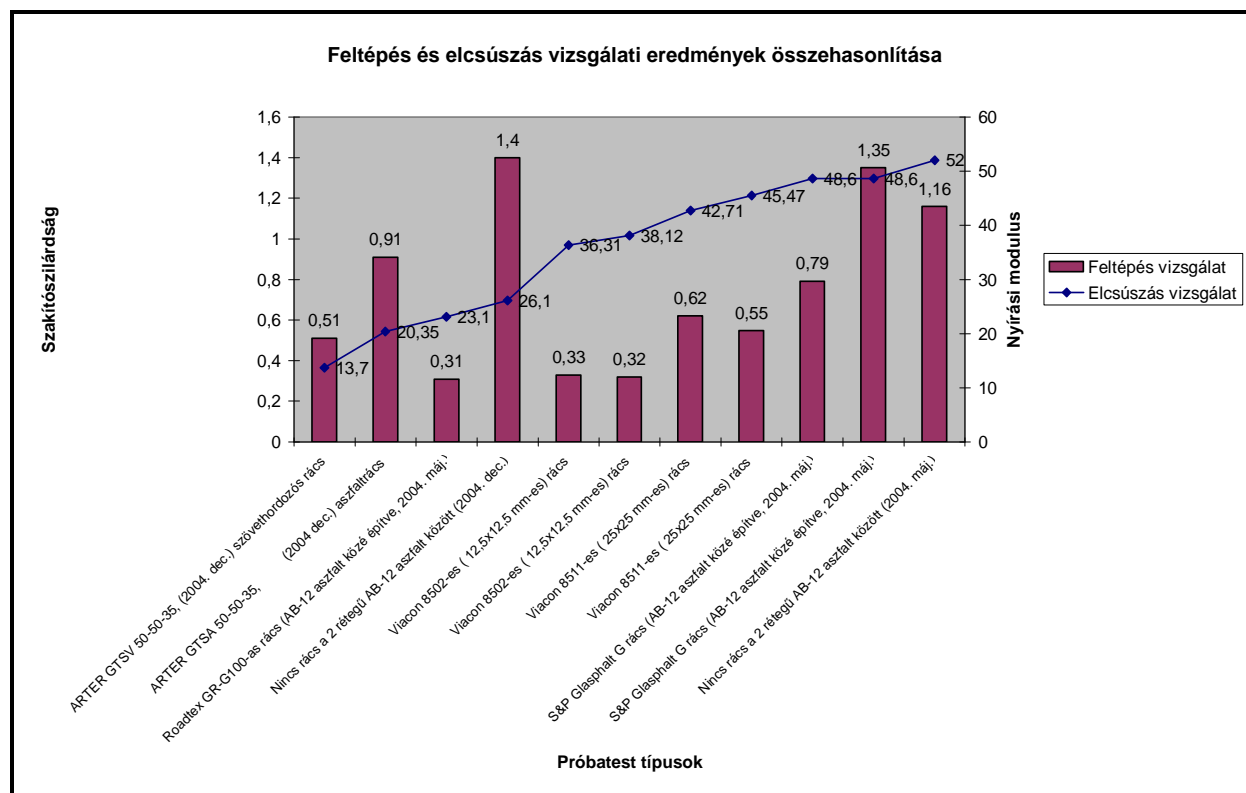
Háromféle vizsgálat alkalmazásával igazoltam, hogy az aszfaltrétegek közötti együttdolgozás hatékonyságát rontja az aszfaltrács jelenléte az aszfalt rétegek között. Az aszfaltréteg és az erősítőanyag közötti legrosszabb együttdolgozást a szövetes hordozó anyagú hálók adják, azért mert a szövet elválasztó hatást fejt ki. A hordozóanyag nélküli aszfaltrácsok is rosszabb együttdolgozást, azaz az együttdolgozást minősítő nyíró modulus, vagy nyíróerő értéket adnak, mint az erősítő háló/rács nélkül elkészített próbatestek. Az aszfaltrétegek közé beépített hordozóanyag nélküli aszfaltrácsok 60-90%-os, a szövethordozós rácsok pedig 20-40%-os együttdolgozást tudnak produkálni. [4. Almássy, 2011], [8. Almássy – Joó, 2009], [9. Almássy – Joó, 2009]

Háromféle vizsgálat – feltépő vizsgálat, elcsúszás vizsgálat és Leutner-féle nyírásvizsgálat – elvégzésével igazoltam az első tézist.

Az elvégzett vizsgálatok mindhárom vizsgálati eljárás esetében azt mutatták, hogy kisebb vagy nagyobb mértékben az aszfalt rétegek közé beépített szövetes háló, aszfaltrács vagy acélrács rontja a rétegek közötti együttdolgozás mértékét.

Az alábbi ábrán az összehasonlítható, azaz azonos aszfaltrétegbe, azonos rács típusok beépítésével készült próbatestek feltépés- és elcsúszás-vizsgálati eredményeit hasonlítottam össze. Az ábrán jól látszik az a tendencia, hogy a rács nélküli próbatestek adják a legjobb feltépési szakítószilárdsági és elcsúszási nyíró modulus értéket, ezt követik a hordozóanyag nélküli aszfaltrácsok, és a sor végén pedig a szövetes hordozóanyagú rácsok találhatóak.

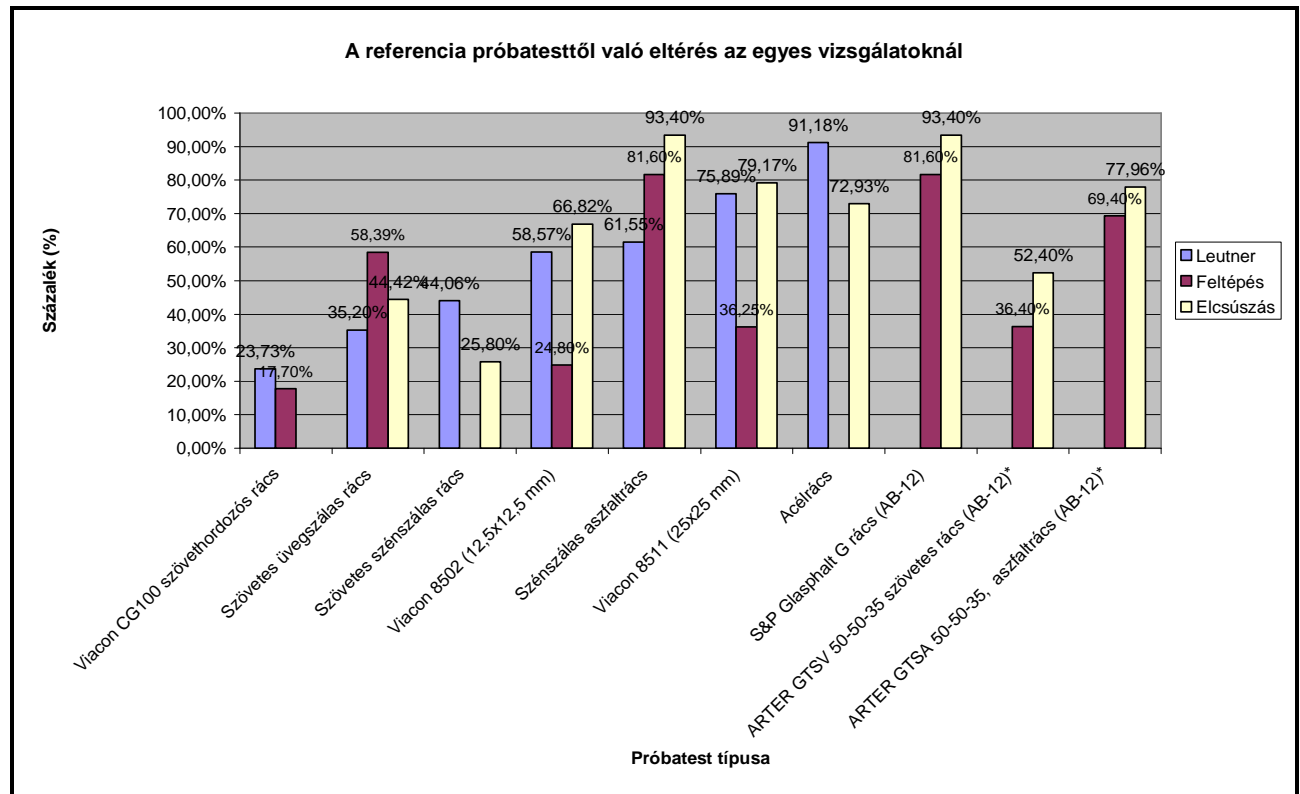
Az összesen 109 próbatest 3 fajta vizsgálati módszerrel végzett kutatás során mindösszesen egyetlen esetben (hordozóanyag nélküli szénszálas rácsnál) kaptunk jobb eredményt a referencia próbatestnél.



13.1. ábra: Feltépes és elcsúszás vizsgálati eredmények összehasonlítása

Elvégeztem annak elemzését is, hogy az egyes vizsgálatokon belül a különböző rácsbetétet tartalmazó próbatestek mennyiben térnek el a referencia mintától, azaz a referencia próbatest eredményének hány százalékát teszik ki. Mindhárom elemzés esetén igazolást nyert, hogy a rácsok jelenléte gyengíti a rétegek közötti együttdolgozást, az is igazolást nyert, hogy a szövet hordozós rácsok a hordozóanyag nélküli rácsokhoz képest nagyobb mértékben csökkentik az együttdolgozást.

Az alábbi **13.2. ábrán** látható az az összehasonlítás, amelyen a Leutner-féle nyírás, elcsúszás és feltépes vizsgálatok eredményeinek referencia értéktől történő százalékos eltérését mutatom be. (A diagramba azokat az eredményeket ábrázoltam, ahol az adott rácsbetétes próbatestnél legalább két fajta vizsgálati eredmény állt rendelkezésre.) Az eredményekből egyértelműen kiderül, hogy függetlenül a vizsgálati eljárás típusától, a referencia, azaz rács nélküli próbatestekhez képest, a szövetes hordozóanyagú próbatestek adják a legrosszabb együttdolgozást jelentő értékeket (hasító erő, nyírómodulus, szakítószilárdság).

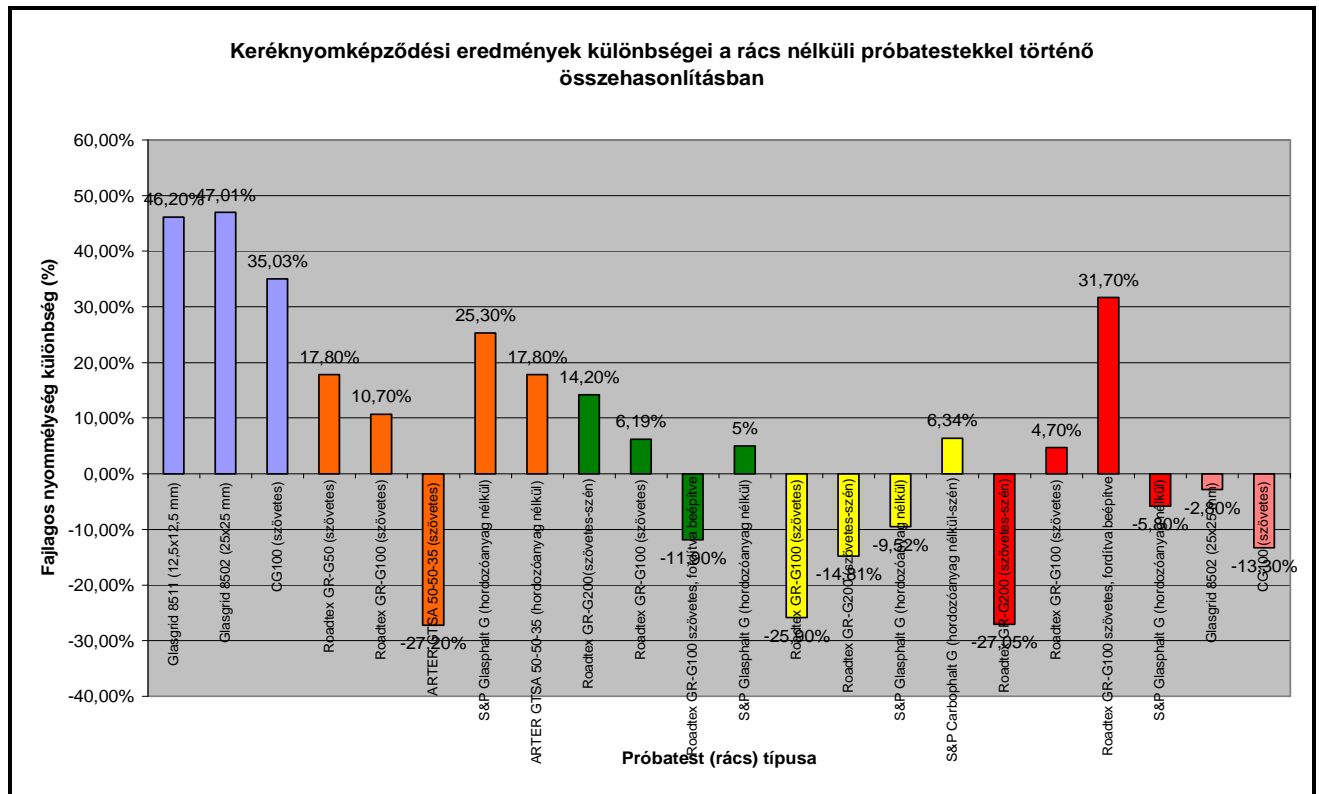


13.2 ábra: A referencia próbatesttektől való eltérés az egyes vizsgálatoknál

2. 1. tézis

A keréknyomvályú képződési vizsgálatok elvégzésével igazoltam, hogy az aszfaltrács használat kisebb merevségű (rosszabb keverék-összetételű: gyengébb minőségű bitumennel és kővázalattal készült) aszfaltkeverék esetén javítja a szerkezet keréknyomvályú-képződési tulajdonságát, a rács fajtától (hordozóanyag nélküli vagy szövetes rács, különböző merevséggel) függően akár 40%-kal. Ilyen esetben értékelhetően kisebb fajlagos nyomvályú mélységet adtak ezek a vizsgálatok a rács nélküli aszfaltszerkezet eredményénél. Ugyanakkor a jobb plasztikus deformációs hajlammal rendelkező keverékek – hazánkban az F jelölésű aszfaltok - esetén a változás nem mértékadó. [4. Almássy, 2011], [8. Almássy – Joó, 2009], [9. Almássy – Joó, 2009]

A 13.3. ábra segítségével kielemeztem az különböző aszfaltfajtákhoz viszonyítva, az adott vizsgálatnál a rácsbetét beépítésének hatására adódó különbségeket. Az elemzésbe az egyes rácstípusok átlagértékeit illetve azok eltérését vettem figyelembe az elemzésnél.

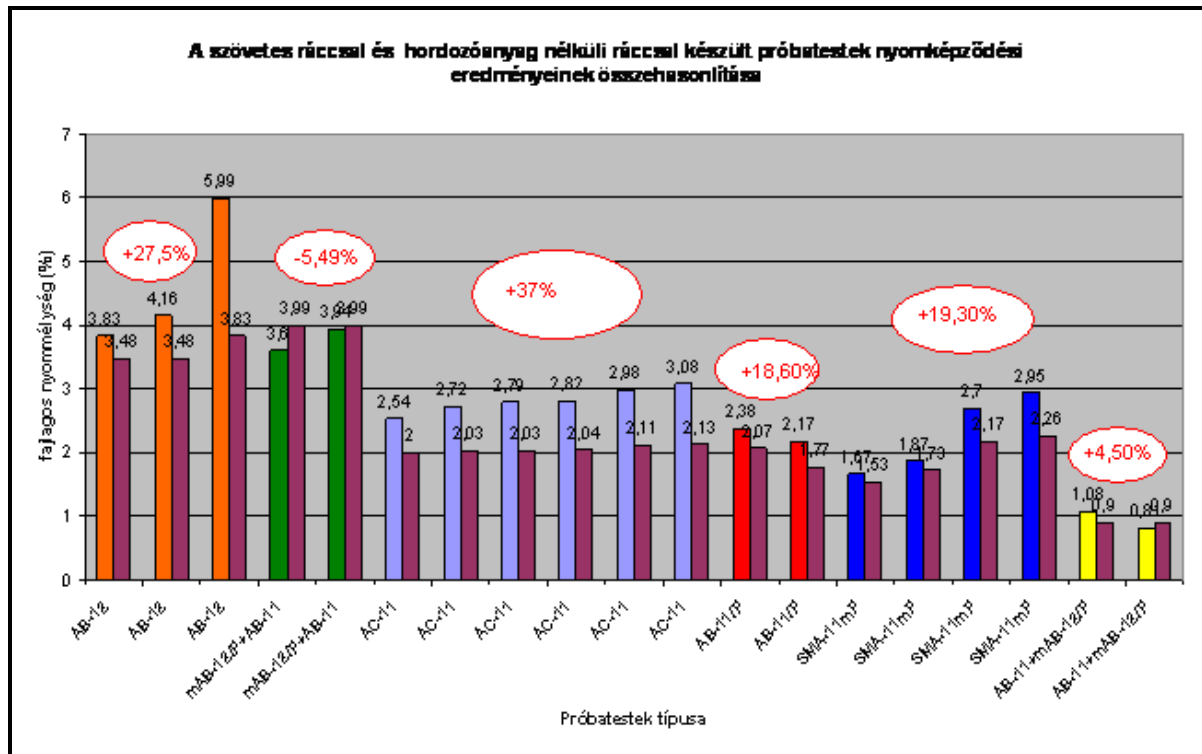


13.3. ábra: Keréknyomvályú-képződési eredmények különbségei a rács nélküli próbatestekkel történő összehasonlításban

Az ábrán a kékekkel jelölt oszlopok adják az AC-11-es próbatestek nyommélységének százalékos különbségét a rácsbetét nélküli próbatestekkel történő összehasonlításban. Az AB-12-es kopóréteg esete narancssárgával, az AB-11-es zölddel, az AB-11/F-es sárgával az mAB-12/F-es pirossal, az SMA-11/mF kopóréteg pedig, rózsaszínnel lett jelölve. Az eredmények pozitív különbségeket mutatnak az AC-11-es, AB-12-es és AB-11-es aszfaltkeverékek esetében, míg több negatív eredmény adódott a jobb minőségű keverék összetételű jelentő AB-11/F-es, mAB-12/F-es és SMA-11/mF aszfalttípusok esetében.

2.2 tézis

A vizsgálatok elemzése során kimutattam, hogy egyértelmű előny mutatható ki a nyomvályú képződés kialakulásának meggátolásában a hordozóanyag nélküli rács javára a szövetes hordozóanyagú ráccsal szemben. A hordozó anyag nélküli rács alkalmazása kisebb nyomképződést okoz, mint a szövetes hordozóanyagú aszfaltrács. [4. Almássy, 2011], [8. Almássy – Joó, 2009], [9. Almássy – Joó, 2009]



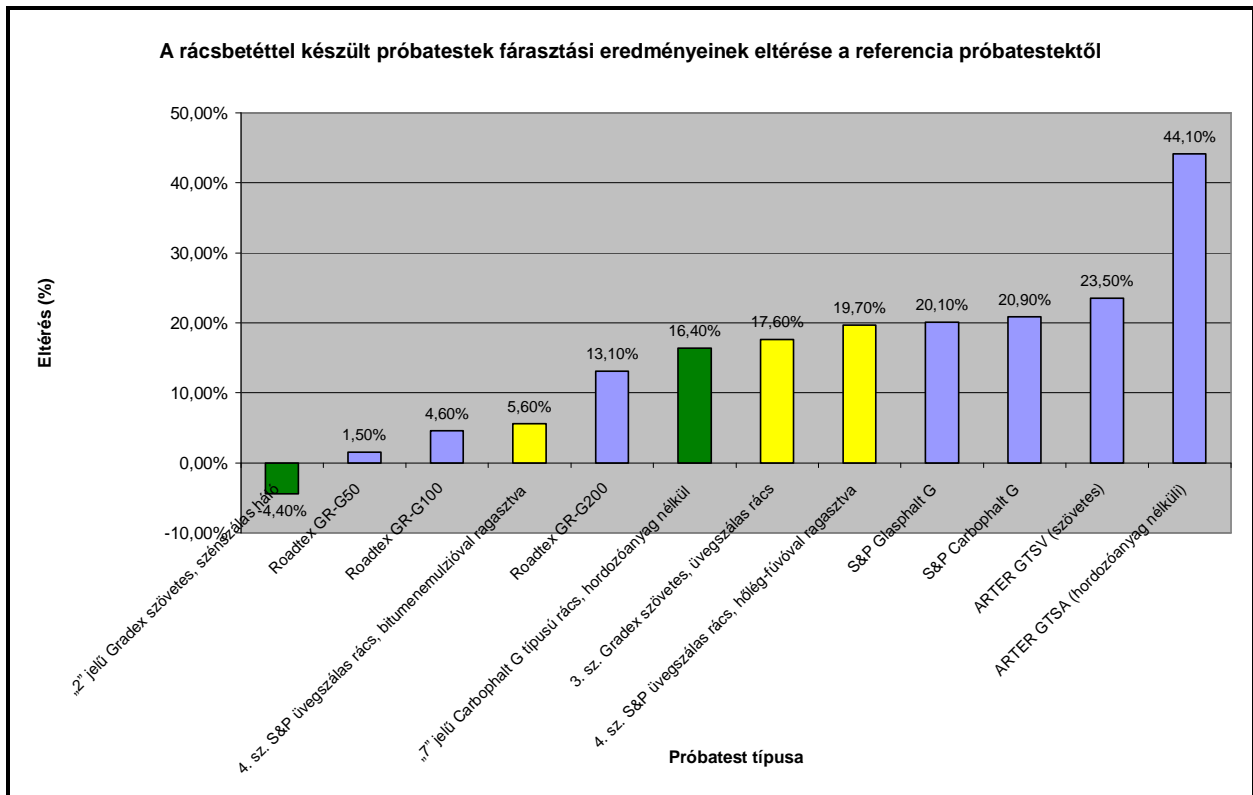
13.4. ábra: A szövetes ráccsal és hordozóanyag nélküli ráccsal készült próbatetek eredményeinek összehasonlítása

Az eredményekből jól látszik (13.4. ábra), hogy a szövet hordozós rácsok az esetek nagy részében nagyobb nyomképződést mutatnak, mint a hordozóanyag nélküli rácsok. Azokban az esetekben, ahol fordított a helyzet, ott viszont nem szignifikáns a különbség a nyomképződési értékek között. Különböző színnel jelöltem az egyes aszfaltkeverék fajtákhöz tartozó szövetes rácsok nyomképződési eredményeit. (Narancssárga: AB-12, Zöld: mAB-12/F+AB-11, Világoskék: AC-11, Piros: AB-11/F, Sötétkék: SMA-11mF Sárga: AB-11+mAB-12/F). A hordozóanyag nélküli rácsok esetében nem használtam külön színt.

3. tézis

Hajlító-fárasztó vizsgálatok elvégzésével igazoltam, hogy az áttört rácsos beépítéssel készült aszfaltszerkezetek nagyobb feszültségeket és alakváltozást képesek elviselni, mint a rácsbetét nélkül készült szerkezetek, tehát a rácsos erősítésű aszfaltok élettartama megnő. Az aszfaltszerkezetek élettartalmát 5-25%-kal növelheti meg a rácsbetét jelenléte. A hordozóanyag nélküli aszfaltrácsok – a jobb rétegek közötti együttműködés, adhéziós-kohéziós tulajdonság miatt - viselik el a legnagyobb feszültségeket és alakváltozásokat, ezek az anyagok növelik meg leginkább az

élettartalmát az aszfaltszerkezeteknek. [4. Almássy, 2011], [8. Almássy – Joó, 2009], [9. Almássy – Joó, 2009]



13.5. ábra: A rácsbetéttel készült próbatestek fárasztási eredményeinek eltérése a referencia próbatesttől

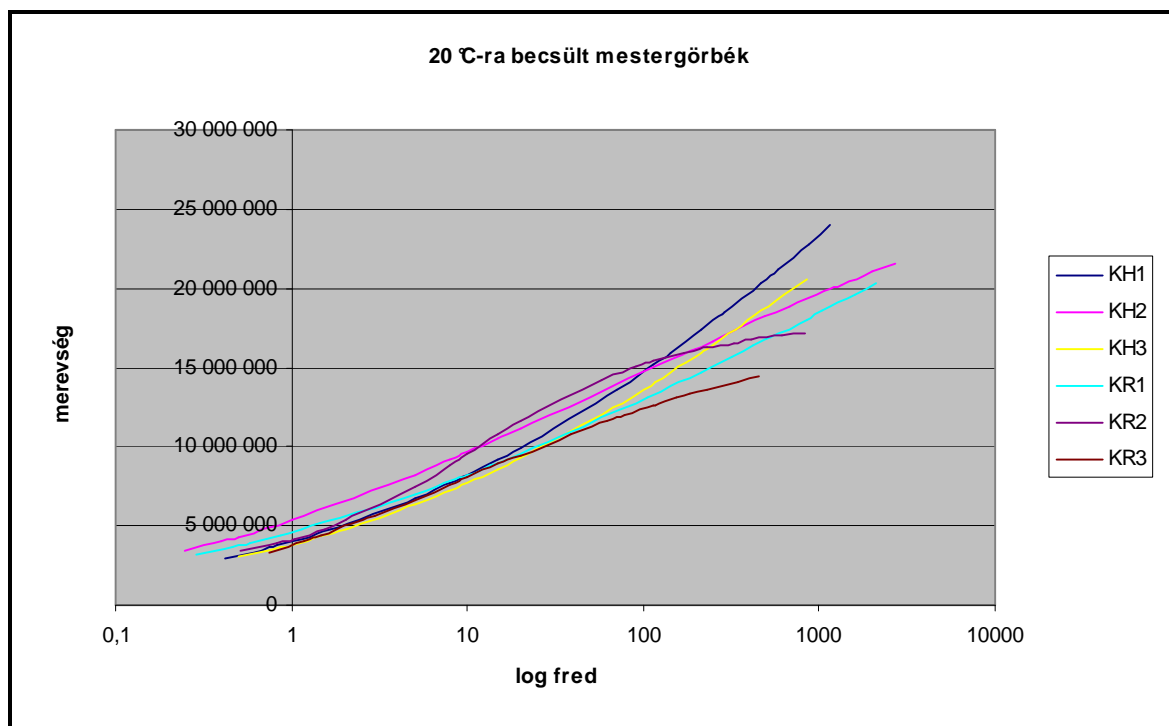
A fenti **13.5. ábra** eredményeiből egyértelműen kiderül, hogy a rács nélküli esetekben kisebb feszültségeket és alakváltozást képesek elviselni a próbatestek, és a korábbiakban bemutatott fáradási egyenesekből is kiderül, hogy a rácsbetéttel készült próbatestek élettartama megnő. (Az ábrán zöld színnel vannak jelölve az AC-11-es keveréken készült próbatestek eredményei, sárgával az elmozdulás vezérelt AB-8-as keverék eredményei, és késsel pedig az AB-12-es mintákon végzett erővezérelt vizsgálatok eredményét láthatjuk.)

Az AB-12-es mintákon végzett vizsgálat szerint a szövetes rácsok csak néhány százalékkal növelik meg a kapott eredményeket, és egy esetben az AC-11-es mintába beépített szövetes rács esetében kaptunk rosszabb eredményt. A többi esetben szignifikáns 15%-ot meghaladó eredmények mutatkoznak. Az is egyértelműnek tűnik, hogy a hordozóanyag nélküli rácsok bírják el a legnagyobb feszültséget és alakváltozást. (A 2007-es bitumenemulzióval történt ragasztásos rács rosszabb eredményét, a nem megfelelő beépítési technológiának tudom be. Az ARTER rácsok eredményét nem tartom átlagképzőnek, mert rosszabb lett a regressziós együtthatójuk.) Összességében kijelenthető, hogy a hordozóanyag típusától és a beépítési

technikától függően 5-20%-kal nagyobb feszültséget vagy alakváltozást képesek elviselni a ráccsal erősített aszfalt szerkezetek.

4. tézis

Mestergörbék megrajzolásával bebizonyítottam, hogy az aszfaltszerkezet merevsége magasabb frekvencia tartományban megnő a rácsbetéttel készült próbatest javára. Közepes frekvencia tartományban a rácsbetéttel készült szerkezet azonos merevségi értékkel rendelkezik, mint a rácsbetét nélküli aszfaltszerkezet. [4. Almássy, 2011], [5. Almássy, 2010], [6. Almássy-Tóth, 2010]



13.6. ábra: A rácsbetéttel és rács nélküli próbatestek mestergörbéi (KH jelű: rács, KR jelű referencia)

Szigmoid modellt alkalmazva határoztam meg a mestergörbék eltolási tényezőjét. A referencia és rácsbetéttel készült próbatestek mestergörbéinek értékelésénél a következőt állapítottam meg:

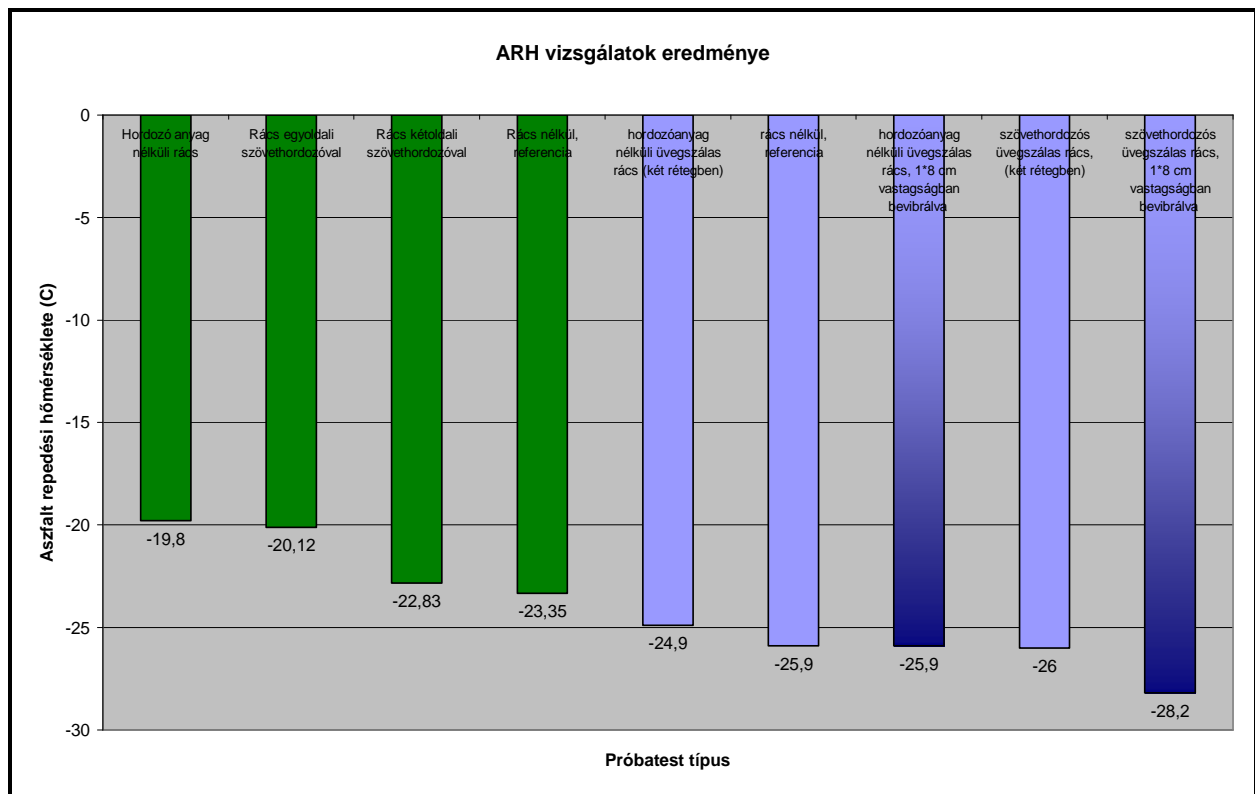
- A mestergörbék mindegyike – referencia és a ráccsal készült is – a közepes frekvencia tartományban (1 és 50 Hz között) hozzávetőlegesen azonos merevségi értéket vesz fel.

- Alacsony frekvencia tartományban megfigyelhető, hogy gyorsabban csökken az aszfalt saját merevsége, mint a ráccsal erősített próbatesté.
- A magasabb frekvencia tartomány esetén az egyébként viszkózus tulajdonságú aszfalt, terhelésre adott válaszreakciója nem tud olyan merevség növekményt mutatni, mint az elasztikus rácsbetéttel ellátott anyag. Ennek következtében ezekben a frekvencia tartományokban az aszfalt és a rács merevségi viszonyozása eltolódik a rács javára.
- A mestergörbék elemzése igazolja azt a más vizsgálatoknál – keréknyomvályú-képződés, hajlítás - tapasztalatot, hogy minél gyengébb az aszfalt merevsége annál jobban érvényesül a merevebb háló hatása, azaz a nagyobb igénybevétel mellett fejt ki erősítő hatását a beépített rács.

5. tézis

Igazoltam, hogy az aszfalt repedési hőmérsékletének meghatározásához használt gátolt alakváltozási vizsgálat elvégzése során nem jelentkezik szignifikáns eltérés az aszfalt repedési hőmérsékletében attól függően, hogy a szerkezetbe sor került aszfalterősítő háló, vagy rács beépítésére. A gátolt alakváltozási vizsgálat elve nem alkalmas a rács-erősítés vizsgálatára, mert a rács hossza változatlan marad, így a hőmérséklet hatására létrejövő alakváltozás során az aszfaltban bekövetkező deformációból feszültséget nem tud átvenni. Ezzel szemben a -10 C° elvégzett tiszta húzó szilárdság vizsgálat alapján kijelenthető, hogy az aszfaltrétegek közé beépített, hordozóanyag nélküli (áttört) aszfaltrács, a mérési bizonytalanságot meghaladó mértékben, 11-19%-kal javítja a húzószilárdság értékét. [4. Almássy, 2011], [5. Almássy, 2010]

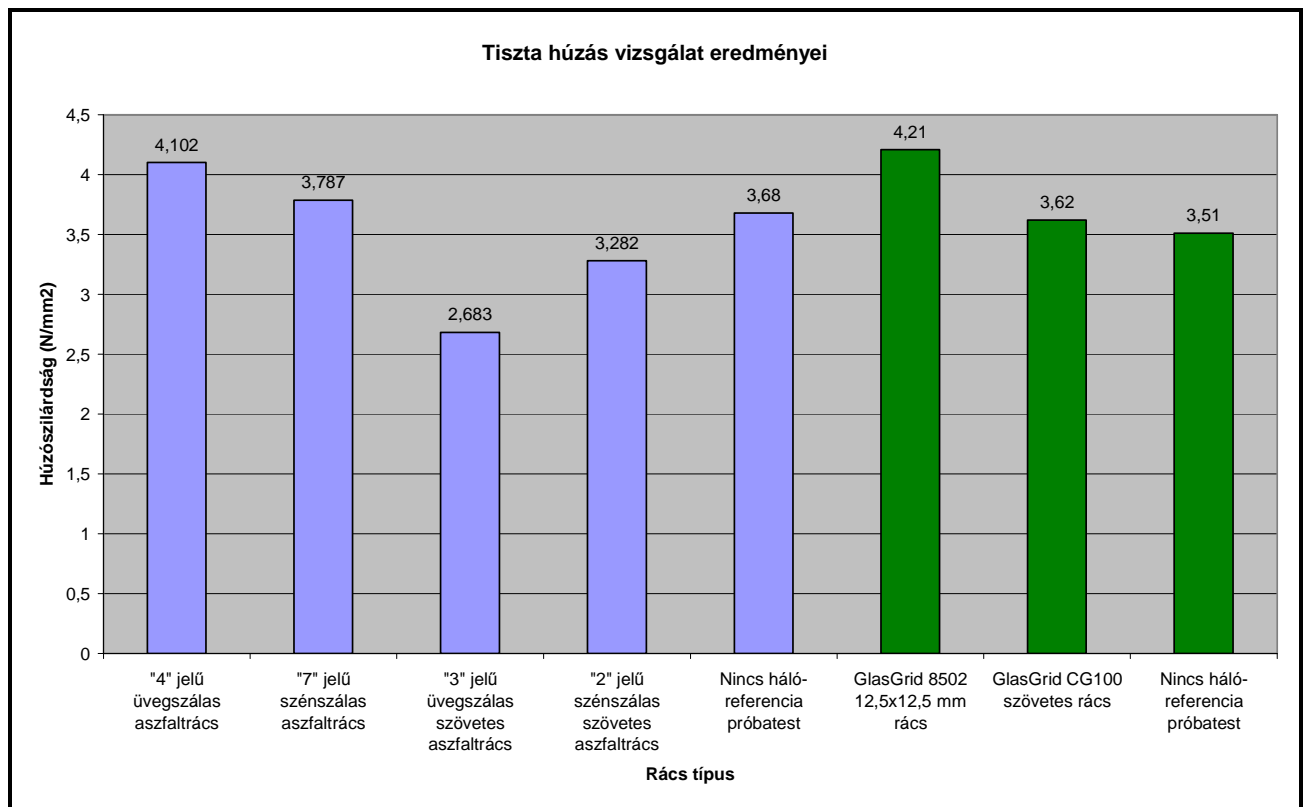
Az aszfalt repedési hőmérsékletét folyamatos, egyenletes hűtéssel, gátolt alakváltozással 5 féle rács típuson AB-11/F és mAB-11/F aszfalt rétegek alkalmazásával vizsgáltuk meg. Az AB-11/F-es próbatesteket zölddel jelöltem, az mAB-11/F-es mintákat késsel és ezen belül sötétkékre átmenő árnyalattal jelöltem az 1x8 cm vastagságban bevibrált próbatestek átlag eredményét. A vizsgálatok során összesen 60 db próbatesten végeztünk vizsgálatokat, ezek közül mindösszesen 4 db-ot nem tudtunk felhasználni az értékeléskor, a próbatestek hibás készítése miatt.



13.7 ábra: Az ARH vizsgálatok eredményének összefoglalása

A fenti, **13.7. ábrából** jól látszik, hogy az aszfaltrepedési hőmérsékletének meghatározásánál nem jelentek meg számottevő különbségek a rácsbetéttel és anélkül készült próbatestek között. A gátolt alakváltozás elve szerint működő vizsgálat során ugyanis a rácsszerkezet nem tudja lekövetni az aszfaltban végbemenő összehúzódást, ezért nem is játszik szerepet a szerkezet hőmérséklet hatására bekövetkező alakváltozásában.

A -10 C° -on végrehajtott ún. tiszta húzás vizsgálat esetében azonban, szemben az ARH vizsgálat eredményével, a mérési bizonytalanságot meghaladó különbséggel javítja a húzószilárdsági értékét az aszfaltszerkezetnek a hordozóanyag nélküli aszfaltrács.

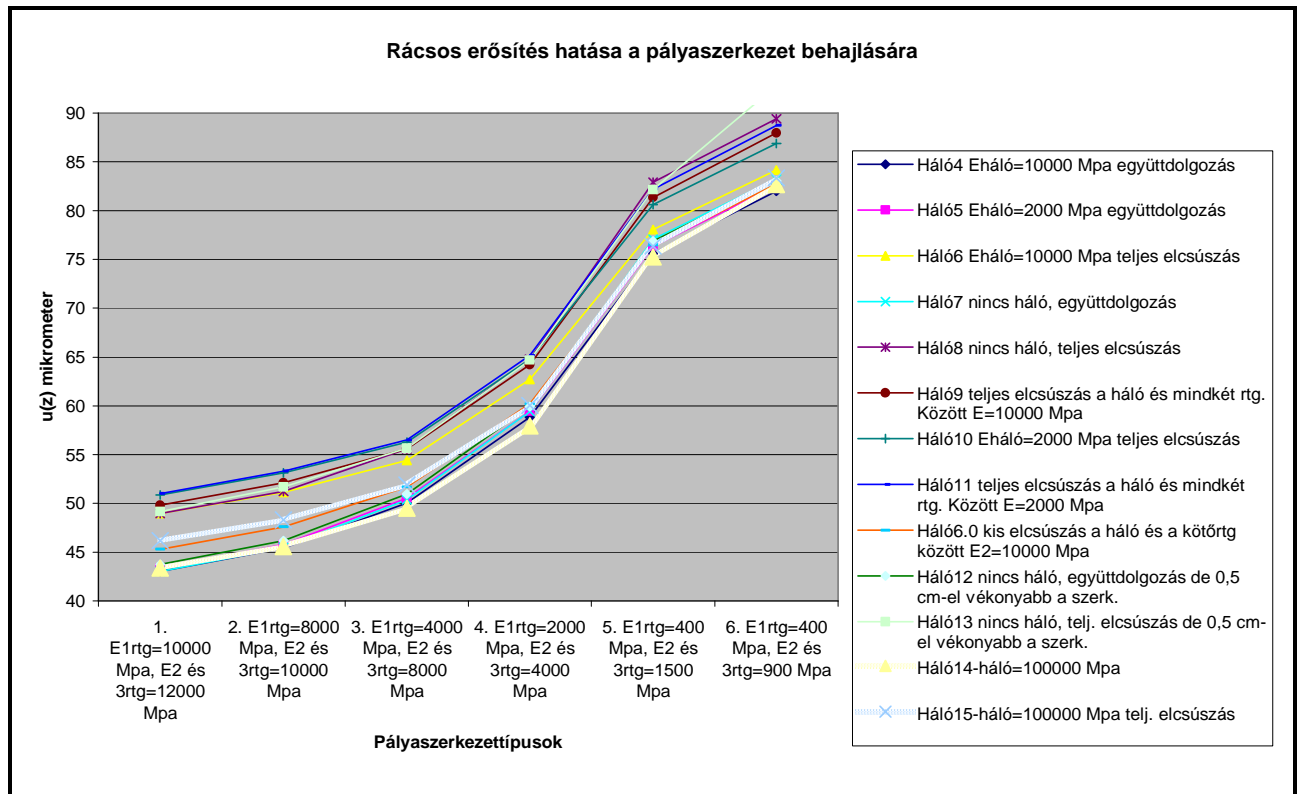


13.8. ábra: A tiszta húzás vizsgálat eredményei

6.1. tézis

A BISAR futtatásokkal igazoltam, hogy az aszfaltrács csak akkor kezd el dolgozni, amikor a felette lévő aszfalt merevsége lecsökken, teherbírési hiba, repedés okán. Ebben az esetben egyfelől igazolható, hogy a repedés áthidalásra alkalmas a rács, mert ha mégis megindulna felfelé a repedés, akkor az elkezd dolgozni, másfelől pedig a nem nagy merevséggel rendelkező aszfalt esetén, már a kezdetektől átvesz terhelést az aszfalttól. Ilyen esetben minél nagyobb merevséggel, kisebb fajlagos nyúlással rendelkező aszfaltrácsot (kompozitot) szükséges alkalmazni. [4. Almássy, 2011], [5. Almássy, 2010]

Az alábbi ábrán jól átható, hogy milyen óriási szerepe van a rács merevségi modulusának, hiszen a legkisebb behajlási értéket a 100.000 MPa-s merevségi modulusú rácsok adják, és még teljes elcsúszás mellett is jelentkezik a rács, erősítő szerepe.

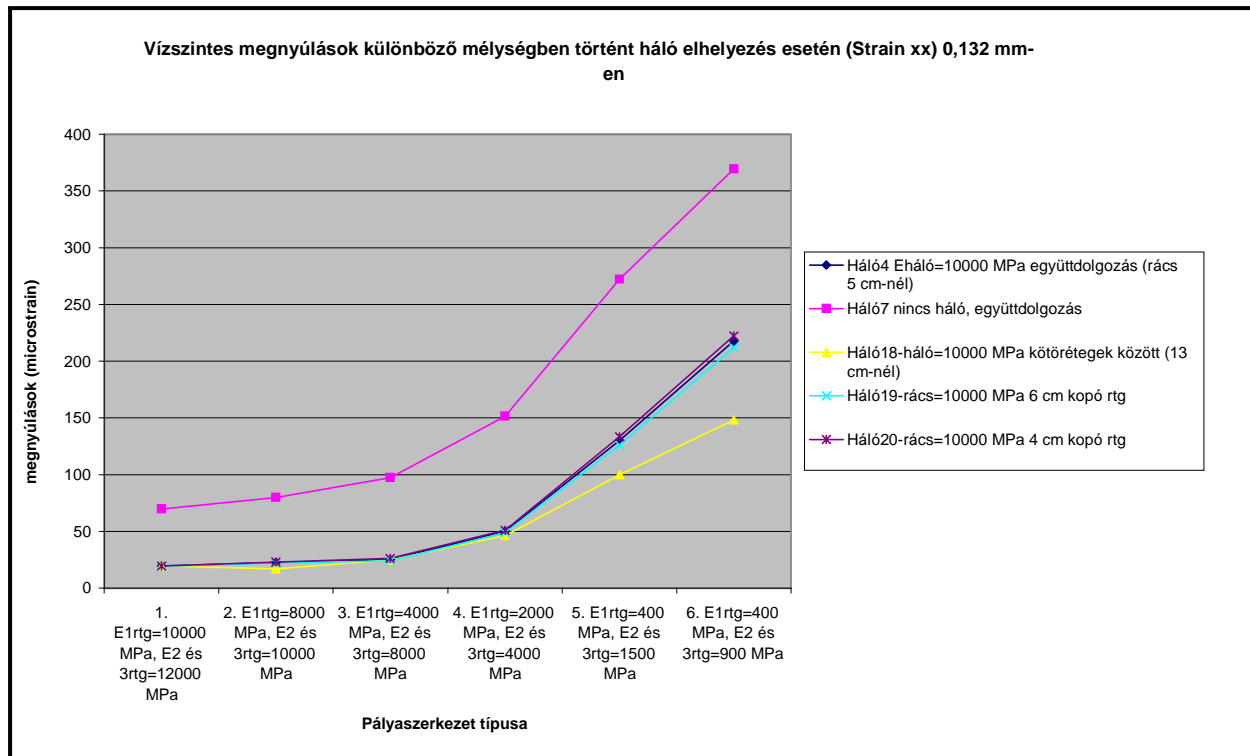


13.9. ábra: Rácsos erősítés hatása a pályaszerkezet behajlására

6.2. tézis

Igazoltam, hogy a kötőréteg alatt 13 cm-es mélységben elhelyezett aszfaltrácsok esetén lesz a legkisebb a 2. illetve 3. aszfaltréteg alján mért megnyúlás értéke, szemben a rácsokat 4-5-6 cm-en elhelyezett modellel. A megnyúlások a szerkezet leromlásától függően 26-43%-kal lehetnek kisebbek abban az esetben, ha a kötőréteg alá építjük be a rácsot. [4. Almássy, 2011], [5. Almássy, 2010]

A különböző mélységben alkalmazott rácsok modelljei közül, a legkisebb megnyúlást a kötőréteg alatt, a kötőréteg alá, 13 cm-es mélységben elhelyezett rácsok modelljei adták, szemben a 4-5-6 cm mélységben elhelyezett rácsok beépítésével készült modellektől. A **13.10. ábrán** az is látszik, hogy szignifikáns különbség a modellek között a szerkezet leromlása környékén adódik, és ezekben az esetekben, a kötőréteg alatt 13,4 cm-es mélységben akár 26-43%-kal kisebb megnyúlások is adódhatnak.



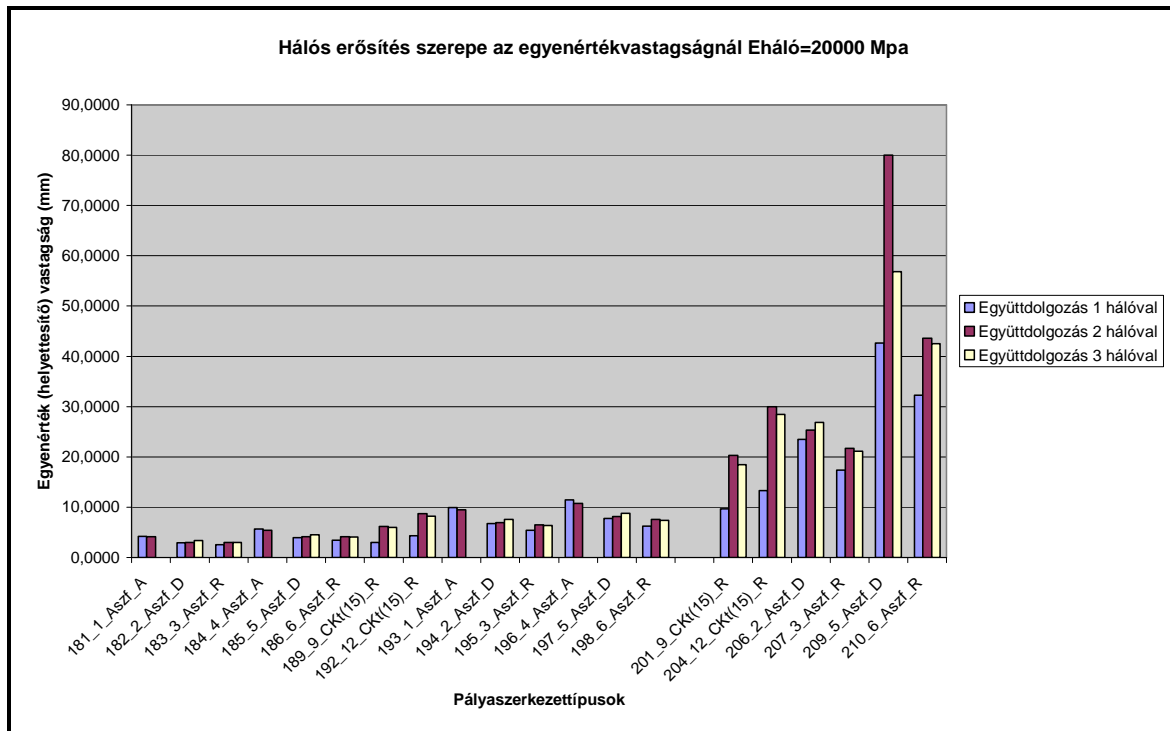
13.10. ábra: Pályaszerkezeti megnyúlások a kötőréteg alatt, a rács különböző mélységben történő elhelyezésénél

Tézis7

A végeelem modellezés segítségével megállapítottam, hogy az aszfaltrácsok alkalmazása függetlenül attól, hogy hány réteghatáron alkalmazunk rácsot a szerkezetben, jelenthet helyettesítő aszfaltvastagságot. A helyettesítő vastagság nagysága előnyösen nőhet gyengébb szerkezetek esetében a háló alkalmazása esetén. Igazán komoly (centiméter nagyságrendű erősítést), azaz helyettesítő vastagságot akkor lehet elérni, ha a beépítésre került aszfaltrács nagy merevségi modulussal bír (10000-20000 MPa). Második, a kötőréteg alatti háló alkalmazása tovább növeli az egyenérték-vastagságot, a harmadik háló alkalmazása viszont már nem eredményezi a szerkezet erősítését. [4. Almássy, 2011], [8. Almássy – Joó, 2009], [9. Almássy – Joó, 2009]

A végeelem vizsgálat futtatásai alapján megállapítottam, hogy a rács jelenléte a szerkezetben minden esetben jelent bizonyos, milliméter nagyságrendű erősítést, ugyanakkor centiméteres nagyságrendű erősítést, azaz helyettesítő (vagy egyenérték vastagságot) csak nagy merevségű 10.000 és 20.000 MPa merevségi modulussal rendelkező rácsok esetében kaptam. Az

eredményekből az is kiderül, hogy az igazi erősítést, azaz helyettesítő vastagság növekedést magasabb hőmérsékleten (30 és 50 C°-on) lehet elérni a rácserősítés alkalmazásával.



13.11. ábra: Egyenérték vastagság 20000 MPa-os rács alkalmazásánál

A végeelem futtatásokból az is kiderül, hogy a 2. rács, alkalmazása újabb erősítés jelent a szerkezetnek, hiszen ezekben az esetekben az egyenérték-vastagság szinte minden esetben – az „A” osztályú teljes aszfaltszerkezet kivételével (de itt is elhanyagolható a különbség) - megnőtt. A harmadik rács alkalmazása viszont már nem minden esetben jelent plusz erősítést, a két ráccsal készült szerkezethez képest. Azokban az esetekben, ahol a harmadik rács a kopóréteg alatt helyezkedik el, ott minimális növekedést olvashatunk le az egyenérték-vastagságban, abban az esetben viszont, amikor CKt-alapréteg vagy 4 rétegű aszfaltszerkezet modelleztünk, ott kis mértékben csökken az egyenérték-vastagság a harmadik rács alkalmazása esetén.

15. Irodalomjegyzék

1. A.H. de Bondt: Anti-Reflective Cracking Design of Asphaltic Overlays, Ph.D thesis, TU Delft, 1999, 362 p
2. Adorjányi Kálmán, Dr: Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek megerősítésének méretezése ejtősúlyos behajlások alapján, Közúti és Mélyépítési Szemle, 1999/12 pp.495-499
3. Agostinacchio, M. – Fiori, F.: A finite element model to evaluate the role of interlayer fibreglass geogrids in retarding reflective cracking in flexible pavements. International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials, 20-22 June 2007, Athens, Greece. Proceedings, pp. 1393-1402.
4. Almássy Kornél: The behaviour of grids and nets in asphalt pavement, Periodica Polytechnica, 2011/1, 55. szám, (under review, lektorálás alatt)
5. Almássy Kornél: Tisztul a kép: Újabb vizsgálati eredmények az aszfalterősítő rácsoknál, Mélyépítő Tükörkép Magazin, 2010/6, pp.52-54.
6. Almássy Kornél – Tóth Csaba: Applying master curves at the grids strengthened asphalt structures, Building Materials- Építőanyag, 2010/4 (megjelenés alatt, közlésre elfogadva, 2010. augusztus 26.)
7. Almássy Kornél – Joó Attila: Special materials in the road building – Grids and nets application terms for improving the pavement structures, Building Materials- Építőanyag, 2009/2, pp. 55-59.
8. Almássy Kornél – Joó Attila: Aszfalterősítő hálók: Előnyök és hátrányok, Mélyépítő Tükörkép Magazin, 2009. december, pp 32-34.
9. Almássy Kornél: Szakvélemény az M1-es autópálya 129+260-129+460 km szelvényében, fűrt mintákon végzett feltépés vizsgálat eredményéről. BME Út és Vasútépítési Tanszék, 2007. augusztus. 6 p
10. Berényi Szabolcs: Aszfalterősítések magyarországi alkalmazásai. S&P Reinforcement Magyarország Kft. 2006. 6. p

11. BME Út és Vasútépítési Tanszék által a KKK megbízásából készült kutatási jelentés: Aszfalterősítő rácsok és hálók viselkedése, Témavezető: Dr. Fi István, a kutatásban részt vett: Almássy Kornél, Pethő László és Joó Attila, 2009, 158 p.
12. Centre De Recherces Routieres: Thermal Cracking Test on S&P Glasphalt, Bruxelles, 1995
13. Characterisation of S&P Carbophalt, Netherlands Pavement Consultant by, Utrecht 2002
14. COST 348 Action REIPAS (Reinforcement of Pavements with Steel Meshes and Geosynthetics). Draft Final Report, 2006. 69 p
15. Finish Road Administration (FINRA): Effect of steel grids on the durability of the roads, FINRA Engineering News No. 13, 2003, pp. 1-3.
16. Gáspár László, dr. – Szabacsi Lujza: Geoműanyagok útépítési alkalmazása és felhasználásának víziói az útépítésben, KTI évkönyv 2007, pp. 69-73.
17. Gomaa K. M. Moussa: The optimum location of geotextile reinforcement in asphalt layers, Alexandria Engineering Journal, 2003, pp. 106-107., pp. 110.
18. Josef Scherer: Fejlesztések az aszfalterősítésben, S&P Reinforcement, Brunnen, Svájc, 2006, pp. 5-6.
19. Karoliny Márton - Dr. Fi István: Szakvélemény az M-35 autópálya CKt és alsó aszfaltrétegén kialakult repedésekről, valamint helyreállításukról, H-TPA – BME Út és Vasútépítési Tanszék, 2006. március, pp. 1-7.
20. Kárpáti László: Aszfalt pályaszerkezetek megerősítése. SYTEC GlasGrid. Mélyépítő Tükörcép Magazin 2006/5. pp. 24-25.
21. Kiril Sokolov: Legújabb kutatási eredmények az aszfaltrácsoknál, EMPA kutatási anyag, Dübendorf, Svájc, 2006, pp.4-7.
22. KTI által készített zárójelentés a Magyar Közút Zrt. számára: Szintetikus anyagokból készülő aszfaltrácsok szabályozása: Témafelelős: Gáspár László, dr., Konzulens: Boromissza Tibor, dr., Közreműködő: Pallós Imre, dr., 2007, pp. 8-28.
23. Laurinavicius, A. – Oginskas, R. – Zilioniene, D.: Research and evaluation of Lithuanian asphalt concrete road pavements reinforced by geosynthetics, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. 2006. Vol. 1, No. 1, pp. 21-28.
24. Leena Korkiala-Tanttu, Markku Juvankoski:HVS-Nordic, The activity of the second period in Finland 2000-2003, FINRA Report, Finish Road Administration, 45/2003, pp 16, 26-27.

25. Márton Miklós: Aszfalterősítő hálók és rácsok, Diplomamunka, BME Építőmérnöki Kar, 2009. június, 68 p
26. MSZ EN 12697-24:2008: Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. 26. rész: Fáradási ellenállás
27. MSZ EN 12697-26:2005: Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. 26. rész: Merevség
28. MSZ EN 15381: Geotextíliák és rokon termékeik. Az útburkolatokban és aszfalt fedőrétegekben való használat jellemzői
29. Netherlands Pavement Consultant bv:Reinforcement Research Test Report, Utrecht 2002
30. Oginskas Rolandas: Rutting associated with shear deformations on asphalt concrete road pavemens reduction by means of geosynthetic material, Summary of Doctoral Dissertation, Vilnius Gediminas Technical University, 2006, pp. 8-15.
31. Pethő László: A hőmérséklet eloszlás alakulása az aszfaltburkolatú útpályaszerkezetekben és ennek hatása a pályaszerkezeti rétegek fáradási méretezésére, technológiai tervezésére. Doktori Értekezés, BME, 2008. június, pp. 118-120.
32. Raqab, M. N. Partl: Rétegek közötti nyírás teljesítmény, tapasztalat különféle pályaszerkezetekkel, Az Aszfalt, 2004/1. szám, pp.15-20.
33. Shell International Oil Product, BV: Bisar 3.0 User Manual, 1998.
34. Texas Transportaion Institue (TTI): Geosynthetics in flexible and rigid pavement overlay systems to reduce reflection cracking, Texas, 2002
35. Tóth Csaba: Aszfaltkeverékek mestergörbéjének meghatározása, Közlekedésépítési Szemle, 60 évfolyam, 2. szám, 2010. február, pp. 14-19.
36. Török Kálmán, dr.: Műanyaghálók és textilanyagok aszfalt pályaszerkezetekben való viselkedésének vizsgálata, BME Útépítési Tanszék vizsgálati jelentése, 1979. november
37. Török Kálmán, dr: Az aszfaltkeverékek mechanikai és fizikai tulajdonságainak laboratóriumi vizsgálatai, BME Út és Vasútépítési Tanszék Útépítési Laboratóriumának belső kiadványa, 2000. március, 48 p.

38. Texas Research International Company: Study of Pavement Maintenance Techniques used on Greenville County Maintained Roads, Phase 2, Report: IRI Environmental, June 2005. 32 p.
39. ÚT 2-3.301 Útépitési Aszfaltkeverékek és Útpálya-szerkezeti Aszfaltrétegek
40. ÚT 2-3.313 Útügyi Műszaki Előírás: Aszfaltrétegek tapadásvizsgálata nyírással
41. Wisconsin Department of Transportation: GlasGrid Pavement Reinforcement Product Evaluation, Final Report, 2003 április, pp. 8-9.
42. www.huesker.com/product/hatelit, 2008
43. www.sp-reinforcement.ch: Pre-bitumenised S&P grids for asphalt pavement, Fibre rovings for asphalt pavement interlayers, 2006, pp 5- 7.
44. www.sp-reinforcement.ch: Pre-bitumenised S&P grids for asphalt pavement, Design concepts for C-fibre reinforced asphalt pavements, 2006, pp 15- 16.
45. www.viaconhungary.hu/referenciák, 2007.

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. Ambrus Kálmán egyetemi adjunktus kollegának, hogy hasznos tanácsokkal, ötletekkel segítette a munkámat. Köszönet illeti a laboratórium technikus dolgozóit, Hudák Ágnes, Laufer Anikó, Kentner József, Balogh László, Bimbó László, Ládné Klári és Páles Róbert kollegákat a laboratóriumi mérések végrehajtásáért valamint Fazekasné Franciska kolleganőmet, aki szintén rengetek technikai segítséget nyújtott.

Külön köszönet illeti Joó Attila, Bocz Péter, Tompai Zoltán és Tóth Csaba kollégáimat, akikhez bármikor fordulhattam, ha valamely munkafázis során elakadtam és szükségem volt szakmai tanácsra. Nagy segítséget jelentett a disszertáció összeállításában Pallós Imre kollegám, aki pontosította a mondataimat, értő szemmel tekintette át a dolgozatomat.

Köszönöm a segítséget testvéremnek Almássy Gábor, harmadéves építőmérnök hallgatónak, aki a disszertáció beadása előtti véghajrában nyújtott pótolhatatlan technikai segítséget.

Szükség volt arra is, hogy valaki bölcsész szemmel is áttekintse a dolgozatomat, illetve a disszertáció beadásához elengedhetetlenül fontos angol nyelvű cikkeimet lektorálja. Köszönöm ezért a segítséget Huber Szébasztián és Ágh Norbert barátaimnak.

Végül, de nem utolsó sorban köszönöm a családomnak, feleségemnek Renátának, valamint Áron és Levente fiainak, hogy támogattak a munkában és kitartóan elviselték, hogy engem nem ritkán hétvégén is lekötöttek a disszertációval kapcsolatos kutatások.

Budapest, 2010. október 20.

Almássy Kornél

Mellékletek

Az egyes fejezetekhez tartozó ábrák, számítási sorok, eredmények és vizsgálati leírások

A rács/háló rossz beépítéséből, alkalmazásából származó hibák: (1. fejezet)



A textília beépítés hatására a kopóréteg megsűszott, és a keréknyomvályú ezért alakult ki a felújított főúton.

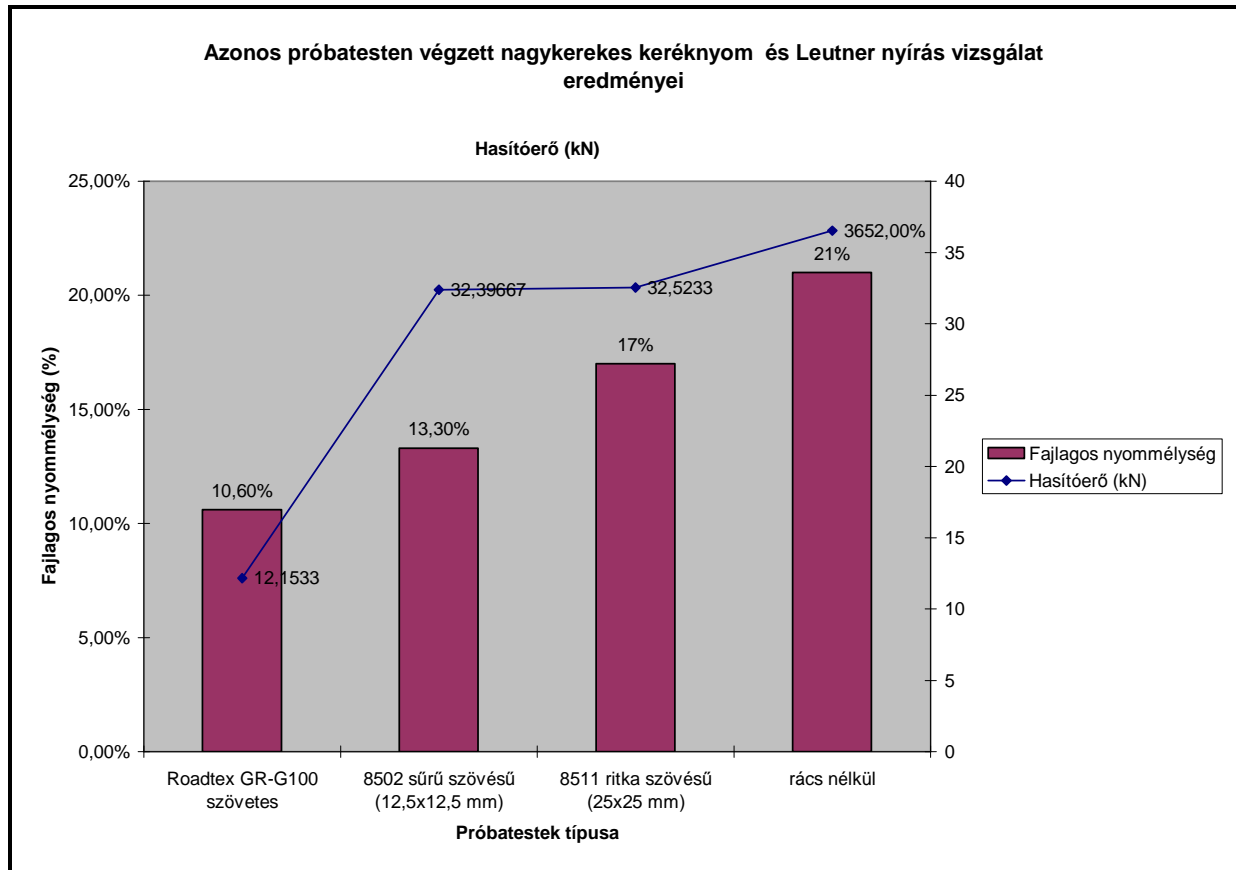
Feltépés vizsgálat a különböző GlasGrid rácson (5. fejezet)

Rács típusa	Feltépési eredmény, szakítószilárdság (N/mm²)
GlasGrid 8511-es (25x25 mm-es) rács	0,37
GlasGrid 8511(25x25 mm-es) rács	0,36
GlasGrid 8511(25x25 mm-es) rács	0,62
GlasGrid 8511(25x25 mm-es) rács	0,55
GlasGrid 8502-es (12,5x12,5 mm- es) rács	0,32
GlasGrid 8502(12,5x12,5 mm-es) rács	0,29
GlasGrid 8502(12,5x12,5 mm-es) rács	0,36
GlasGrid 8502(12,5x12,5 mm-es) rács	0,33
GlasGrid CG100 (25x25 mm-es) szövet	0,21
GlasGrid CG100 (25x25 mm-es) szövet	0,22
GlasGrid CG100 (25x25 mm-es) szövet	0,23
GlasGrid CG100 (25x25 mm-es) szövet	0,24

Az elcsúszás vizsgálat részletes eredményssora (5. fejezet)

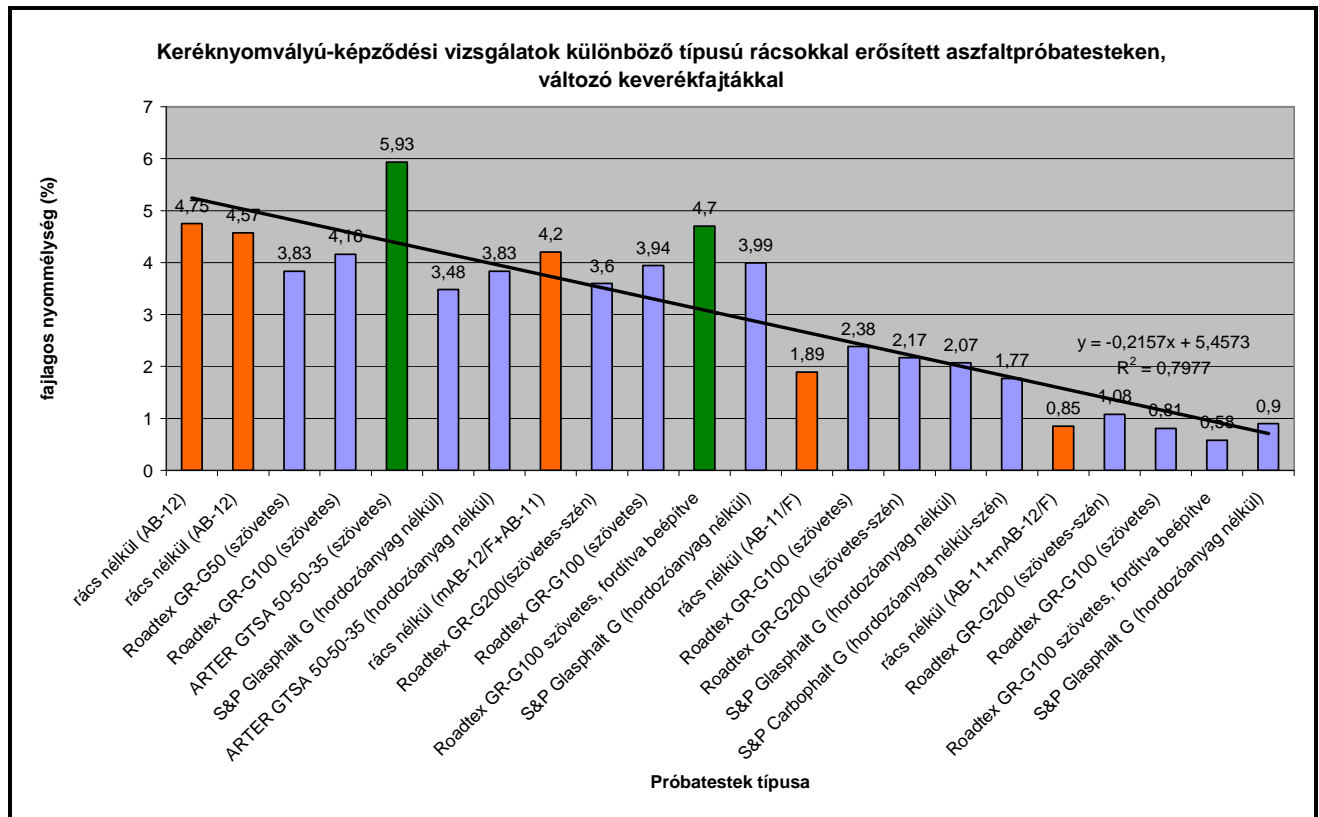
Különböző rácsbetétes próbatestek	Nyírómodulus GE [N/mm²]	Nyíró-átlag szilárdság τ [N/mm²]	Max. nyírószilárdság τ [N/mm²]	Min. nyírószilárdság τ [N/mm²]
<i>Rács nélkül</i>	52,0	1,08	1,19	0,96
<i>Roadtex GR-G50 szövet hordozós aszfaltrács</i>	36,4	0,75	0,83	0,66
<i>Roadtex GR-G100 szövet hordozós aszfaltrács</i>	23,1	0,34	0,37	0,30
<i>S&P Glasphalt G rács</i>	48,6	1,32	1,32	1,32
<i>Rács nélkül</i>	26,1	1,52	1,62	1,39
<i>ARTER GTSA 50-50-35- ös rács</i>	20,39	1,19	1,30	1,05
<i>ARTER GTSV 50-50-35- ös szövehordozós rács</i>	13,7	0,79	0,92	0,63

Azonos próbatesteken végzett nagykereskes keréknyomvályú képződés vizsgálat és a Leutner-féle nyírásvizsgálat eredményeinek összehasonlítása (5. fejezet)



Azonos próbatesten elvégzett nagykereskes keréknyomvályú és Leutner féle nyírásvizsgálat eredményei

Keréknyomvályú képződési vizsgálatok – „Kiskerekes” vizsgálatok eredményei (6. fejezet)



Keréknyomvályú-képződési vizsgálatok különböző típusú rácsokkal erősített próbatesteken, változó keverékfajtákkal

A fenti ábrán az összes elvégzett keréknyomvályú vizsgálatot összesítettem, és külön jelöltem narancssárgával a hálónélküli próbatesteket, és külön kiemeltem zölddel a „trendből” kieső két, szövetes aszfaltrács eredményét. A két eredmény nagyon kilóg a sorból; az ARTER GTSA szövet hordozós rács a rossz együttdolgozás, beépítési hiba miatt adott ilyen rossz eredményt, a másik trendbe nem illő eredmény pedig a fordítva beépített szövetes Roadtex rács adja, ahol szintén a szokatlan beépítés okozta az eltérést. A disszertációban található ábrán már korrigáltam két eredményt. Az ARTER rács végeredményét az egyik köztes mérés értékére csökkentettem le, a fordítva beépített rács eredményét, pedig a mérési tartomány legrosszabb értékéhez közelítettem 10%-al.

A nagykereskes keréknyomvályú-képződés vizsgálat elvi alapjai (6. fejezet)

Az úgynevezett nagykereskes vizsgáloberendezést eredendően a francia Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées (LCPC) dolgozta ki, ez az EN szerinti ún. "nagykereskes" berendezés.

Vizsgálati feltételek

A készüléken egy időben két párhuzamos minta vizsgálata történik. A 400 mm átmérőjű, 80 mm nyomszélességű, sima felületű gumikerekek belsejét 6 bar nyomásra, a kerékátmenetek hosszát 410 milliméterre kell beállítani. A kerekek által kifejtett 4 kN nagyságú, 1 Hz frekvenciájú dinamikus terhelés hatására 60 ezer (20 ezer, 6 ezer, 2 ezer) áthaladás után meghatározzuk az aszfaltminta felületén keletkezett nyomvályú mélységet milliméterben. A vizsgálati hőmérséklet 60 °C, amelyen legalább 12 órán keresztül kell a mintát temperálni a vizsgálat előtt. Az utótömörödés befolyásoló hatását kiküszöbölendő a mintákat a temperálás előtt 15-25 és 60 °C-on kétezer áthaladási számmal terhelni kell.

A kerék-áthaladási számok nagyságát az előírás alábbiak szerint szabályozza (kerék-áthaladási számok 10 centiméteres vastagságú próbatesten):

- kopóréteg típusok vizsgálatakor: $n = 60\ 000$
- kötő- és alapréteg-típusok vizsgálatakor: $n = 20\ 000$
- 5 cm és ennél vékonyabb próbatestek esetében: $n = 6\ 000$ (minden rétegtípusnál)

Vizsgálati próbatestek

Aszfaltburkolatból vett magminták esetén négy, 150 mm átmérőjű mag mintából fűrészeléses illesztéssel, szükség esetén gipszeléses oldalkiöntéssel kell a 180x500x100 milliméteres próbatesteket elkészíteni. A vizsgálandó próbatest vastagságának megfelelően a 10 centiméteres magasság különböző fémbetétekkel 3-10 cm között, 0,5 centiméteres lépcsőkben változtatható. Ömlesztett aszfaltmintából gépi sajtolással kell a fenti méretű próbatesteket előállítani.

Vizsgálati eredmények

A vizsgálat során kialakult nyomvályú-mélységet a próbatest hosszában egyenletesen elosztva öt helyen, mindenütt három méréssel határozzuk meg, a helyre jellemző érték a mérési

eredmények számtani középértéke. A kiindulópontot természetesen a szobahőmérsékleten végzett 2000 áthaladás után állapítjuk meg.

A méréseket 200, 600, 2000, 6000, 20 ezer és 60 ezer áthaladás után elvégezzük. A kerékátmenetek számától függő nyomvályú-kialakulást bemutató ábra a vizsgálati eredmény melléklete. Az ε , % érték az előírt számú kerékáthaladás hatására kialakult átlagos nyommélységnek (Δm , mm) a próbatest vastagságához (m , mm) viszonyított százalékos értéke (ε , % = $100 \Delta m / m$).

Rácsbetéttel készült AC-22-es és AC-11-es keverékek nagykereskes keréknyomvályú-képződés vizsgálati eredménye (6. fejezet)

A nagyobb igénybevétel okán és amiatt, hogy biztosabb képet kapjunk a beépített hálók keréknyomvályú képződési tulajdonságairól úgynevezett nagykereskes berendezéssel is végeztünk vizsgálatokat az MSZ EN 12697-22 szabvány előírásai szerint. A vizsgálatokat két ütemben végeztük, más-más típusú hálókon.

A próbatestek készítése során laboratóriumi szegmenstömörítő eszközt alkalmaztunk. A 2008-as vizsgálatnál a próbatest készítésének első lépése az volt, hogy 6cm vastagságban konvencionális AC-22 keveréket tömörítettünk, erre elhelyeztük az adott típusú aszfalthálót, vagy aszfaltrácsot, majd 4cm vastagságban konvencionális AC-11 keveréket tömörítettünk be. A próbatest hőmérsékletét beállítottuk vizsgálati hőmérsékletre. A vizsgálati hőmérséklet 60°C volt, a vizsgálati próbatestet ezen feltételek szerint kellett 12-16 órán keresztül kondicionálni. A 2009. szeptemberi vizsgálatnál kötő és kopóréteggént is egyaránt AC-11-es réteget használtunk, a próbatest készítés a fentiekben részletezett módon történt itt is. A jobb együttműködés biztosítása érdekében a hálókat oldalra kifeszítettük, hozzáerősítettük a próbatest oldalához is.

A nagykereskes keréknyomvályú vizsgálatba az alábbi rács típusokat vontuk be. Megjegyezzük, hogy az eddigi hazai gyakorlatban kevésbé ismert Bitufor acélrács vizsgálatát is elvégeztük.

- S&P Glasphalt G üvegszál aszfaltrács (hordozó anyag nélküli)
- Gradex Alpha Mesh GR-G (szövetes, üvegszál)
- GeoGrid Bitutex GMC 50/50 (kétoldali szövet)

➤ Bekaert Bitufort (acélrács)

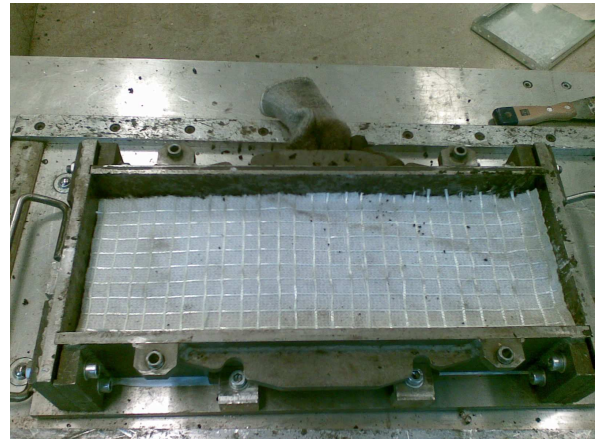
A 2009. szeptemberi vizsgálatba pedig a következő rács típusokat vontuk be:

- GlasGrid CG100 (25 mm x 25 mm lyukméret) szövetes rács
- GlasGrid 8502 sűrű szövésű (25 mm x 25 mm lyukméret) aszfaltrács (hordozóanyag nélkül)
- GlasGrid 8511 ritka szövésű (12,5 mm x 12,5 mm lyukméret) aszfaltrács (hordozóanyag nélkül)
- Bekaert Bitufort (acélrács)

Az alábbi két képen látszik egy hordozóanyag nélküli, és egy szövetes rácsfajta beépítési módja.

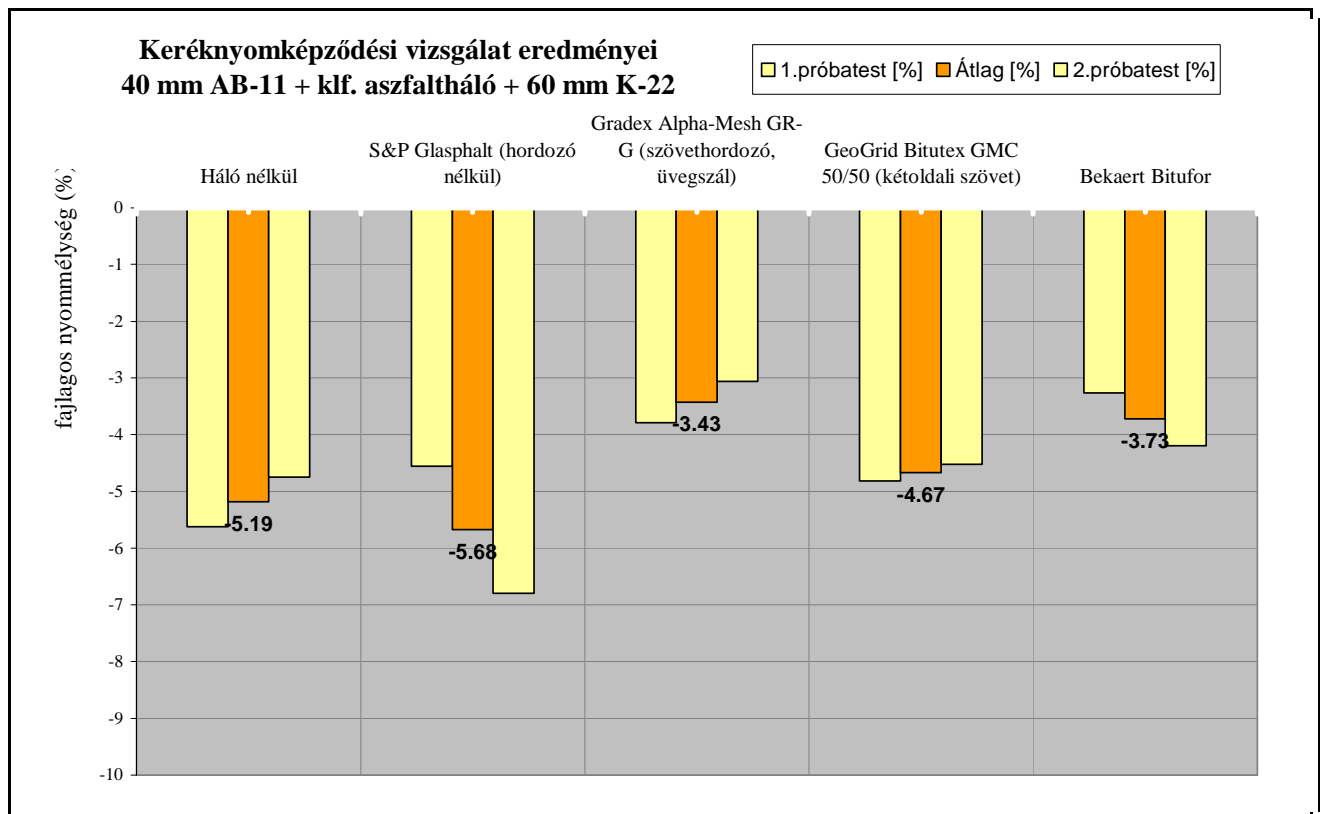


Nagykereskes próbatest (rács)



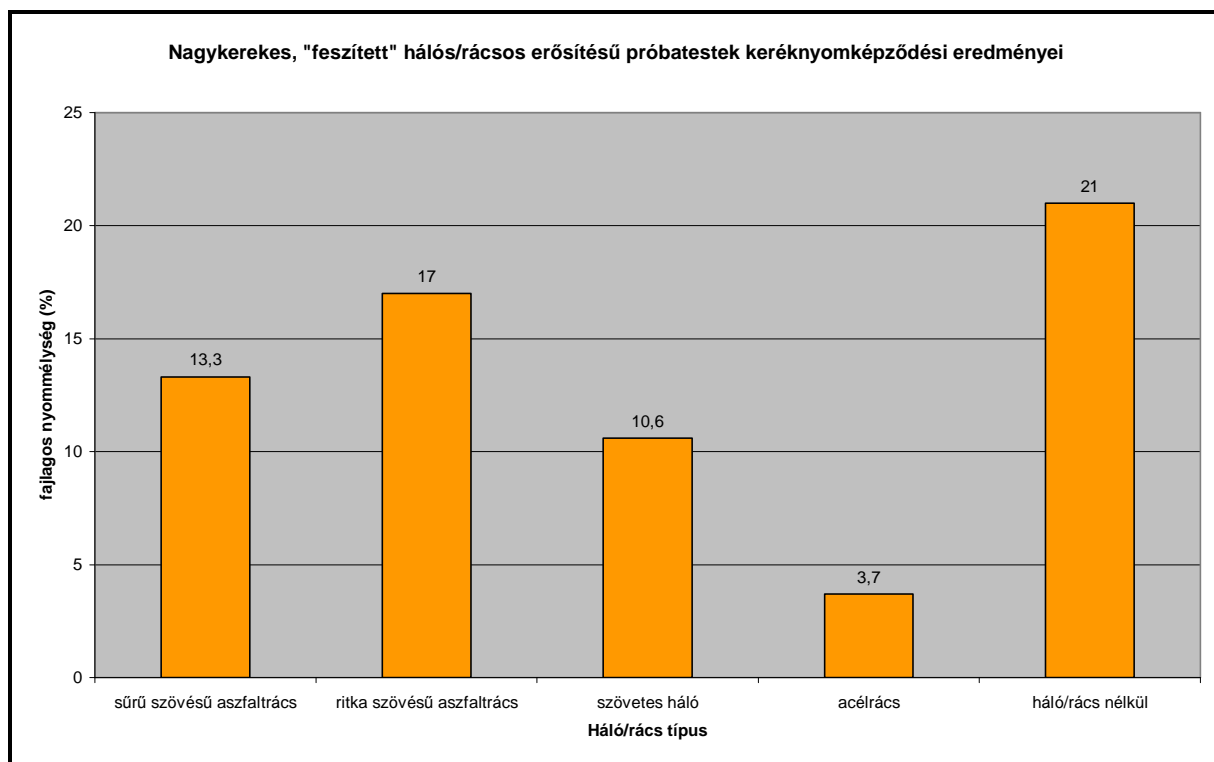
Nagykereskes próbatest (szövet)

A 2008 év végi vizsgálatok eredménye látszik az alábbi ábrán. Némileg meglepő, hogy a hordozóanyag nélküli S&P aszfaltrács produkálta a legrosszabb átlageredményt, de ez a nagyon rossz, feltételezhetően beépítési hiba miatt bekövetkezett egyik vizsgálati eredménye miatt következhetett be. A többi háló mind jobb eredményt mutat, mint a referencia próbatest értékei. A Gradex Alpha Mesh GR-G szövetes háló viszont meglepő jó eredményt mutatott, ez a viselkedése ellentétes a korábbi kiskereskes vizsgálati eredményével.



A nagykereskes keréknyomvályú képződési vizsgálat eredményei (40 mm AB-11+60 mm K-22-es keverék)

A **következő ábrán** látszanak az AC-11-es aszfaltkeveréken lefolytatott vizsgálat eredményei. Ez a vizsgálat is igazolta azt a feltételezésünket, hogy a hálós/rácsos erősítés kis mértékben javítja a keréknyomvályú-képződési tulajdonságokat. A vizsgálatokat AC-22-es kötőrétegen végeztük el, és az eredményekből jobban látszanak az egyes hálók közti különbségek, és természetesen ilyen keverék mellett a nyomosodási hajlam is jelentősebb. Az acélháló biztosan hozza a korábbi kiváló eredményét. Az a feltételezésünk is igazolást nyert, hogy rossz minőségű aszfalt esetében a szövetbetétes rács adja a legjobb eredmény, hiszen az anyag felépítése miatt jobban ellen képes állni a keréknyomvályú terhelésnek.



Keréknyomvályú-képződési vizsgálat eredményei AC-11-es keveréken

Elmozdulás vezérelt hajlító-fárasztó vizsgálatok részletes eredményei (7. fejezet)

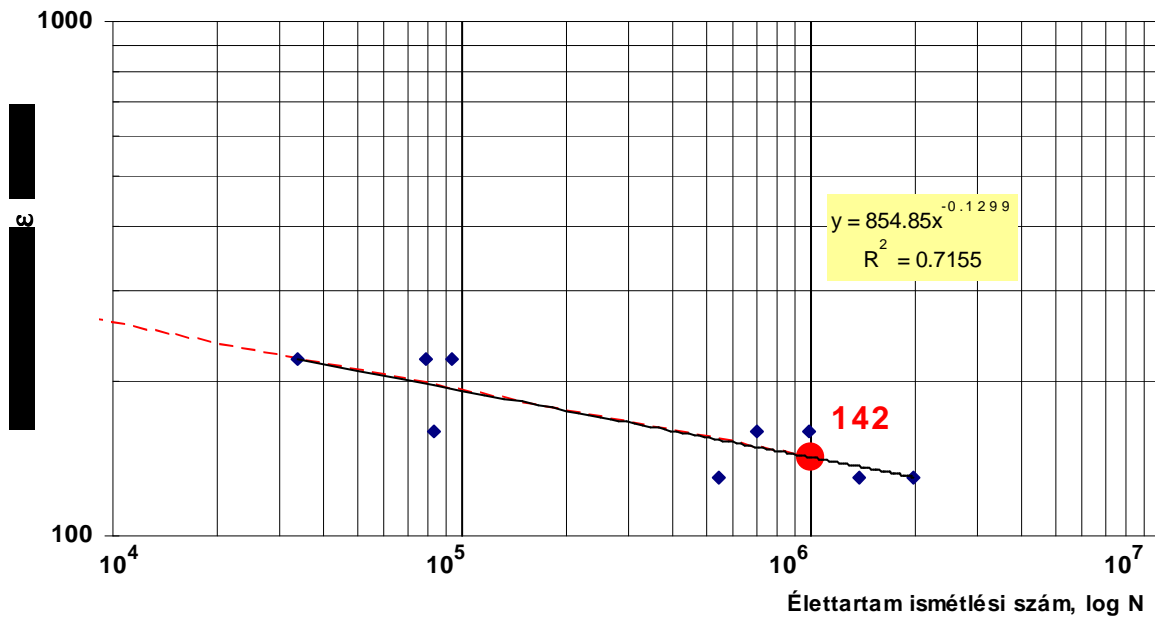
4 pontos gerendafárasztási vizsgálat, 3.sz. aszfalterősítő háló						
vizsgált próbatetek vizsgálati jellemzői és eredményei						
gyártó	szálak típusa	próbatetek kódja	megnyúlás	kezdeti merevség (S ₀)	ciklusszám (N)	emulzió mennyisége
			microstrain	(N/mm ²)	db	(g/m ²)
Gradex	üvegszál	GEX 323	130	10 329 496	3 273 800	1 300
		GEX 333	130	10 508 055	5 602 400	
		GEX 321	160	9 298 228	1 790 600	
		GEX 311	160	9 072 976	987 500	
		GEX 341	160	6 737 963	1 473 100	
		GEX 351	160	10 819 501	502 000	
		GEX 361	160	11 822 567	1 342 800	
		GEX 312	220	9 135 643	488 800	
		GEX 342	220	9 530 468	214 200	
		GEX 322	220	9 167 593	283 000	
		GEX 352	220	11 350 833	148 100	
		GEX 332	220	10 067 281	146 000	
		GEX 362	220	10 969 283	135 450	

Szövetes ráccsal készült próbatetek eredményei

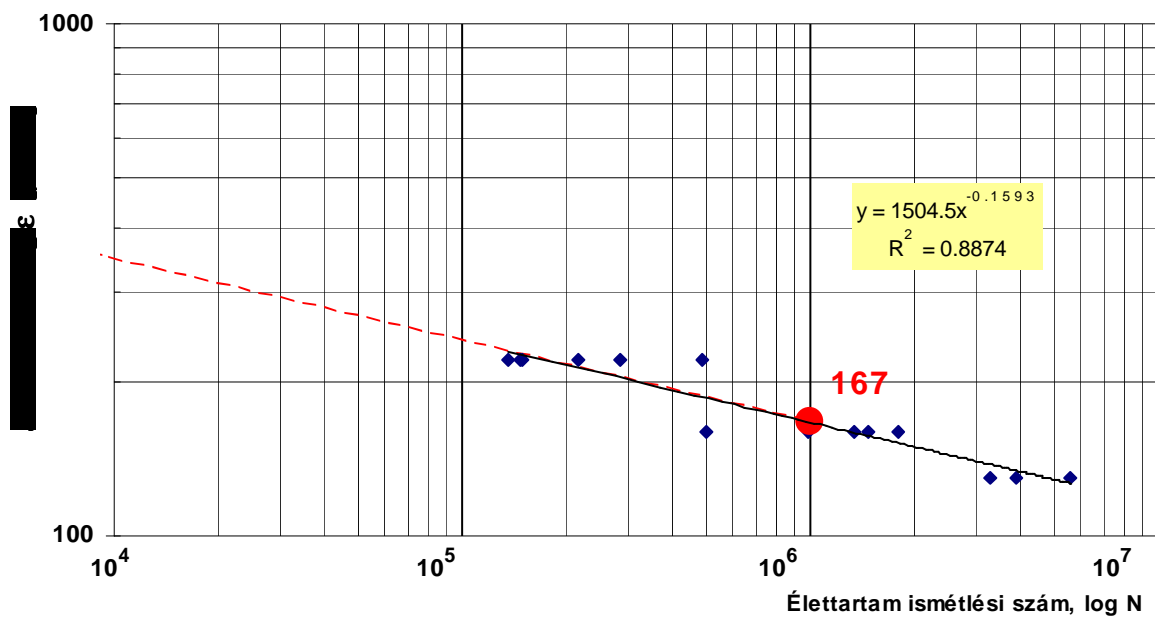
4 pontos gerendafárasztási vizsgálat, 4. sz. aszfalterősítő háló						
vizsgált próbatetek vizsgálati jellemzői és eredményei						
gyártó	szálak típusa	próbatetek kódja	megnyúlás	kezdeti merevség (S ₀)	ciklusszám (N)	emulzió mennyisége
			microstrain	(N/mm ²)	db	(g/m ²)
S&P	üvegszál	GEX 413	130	11 352 272	838 600	400
		GEX 423	130	11 407 855	1 934 800	
		GEX 433	130	12 361 382	4 604 400	
		GEX 453	130	6 909 095	1 422 700	
		GEX 463	130	12 588 174	4 900 800	
		GEX 421	160	12 627 039	709 200	
		GEX 441	160	11 647 922	877 300	
		GEX 411	160	10 577 156	941 100	
		GEX 461	160	12 643 819	588 700	
		GEX 431	160	12 524 721	322 000	
		GEX 442	220	12 423 654	95 700	
		GEX 452	220	12 180 339	109 500	
		GEX 432	220	13 632 702	56 900	
		GEX 412	220	15 071 569	61 800	
		GEX 462	220	15 019 187	36 800	
		GEX 422	220	12 352 827	69 100	
S&P	üvegszál	GEX 471	160	8 336 732	817 800	bitumenemulzió s ragasztás nélkül, hőlégfúvóval történő rámelegítéssel
		GEX 473	160	12 778 623	1 043 500	
		GEX 481	160	13 845 862	2 423 100	
		GEX 472	220	11 914 597	214 000	
		GEX 482	220	10 980 244	289 400	
		GEX 483	220	12 327 954	208 600	

Hordozóanyag nélküli ráccsal készült próbatetek eredményei

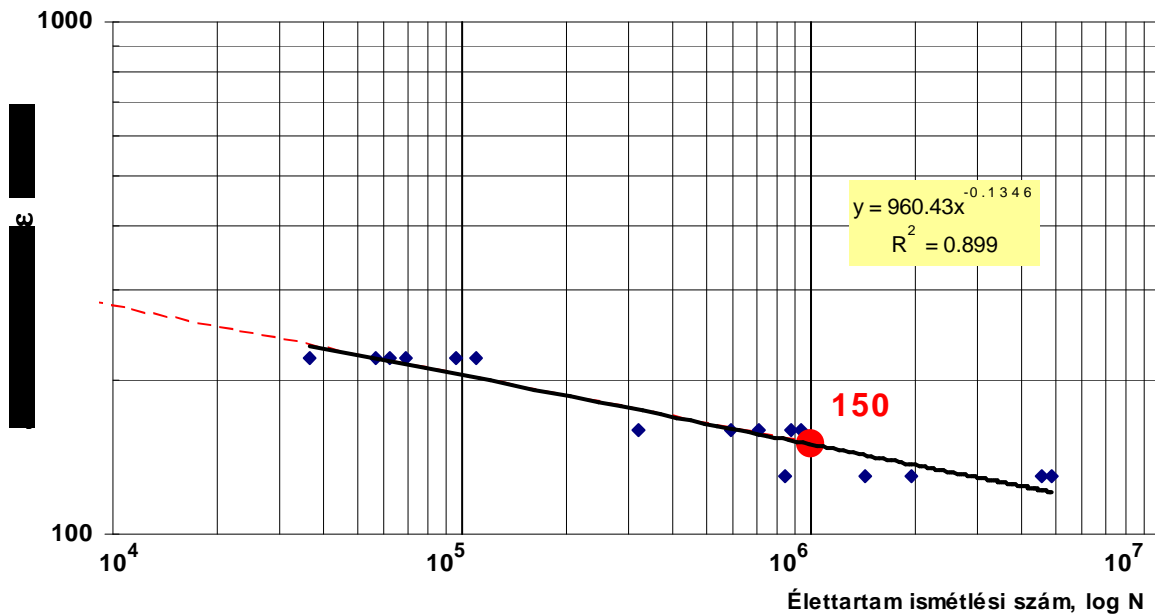
Fáradási egyenes, referencia



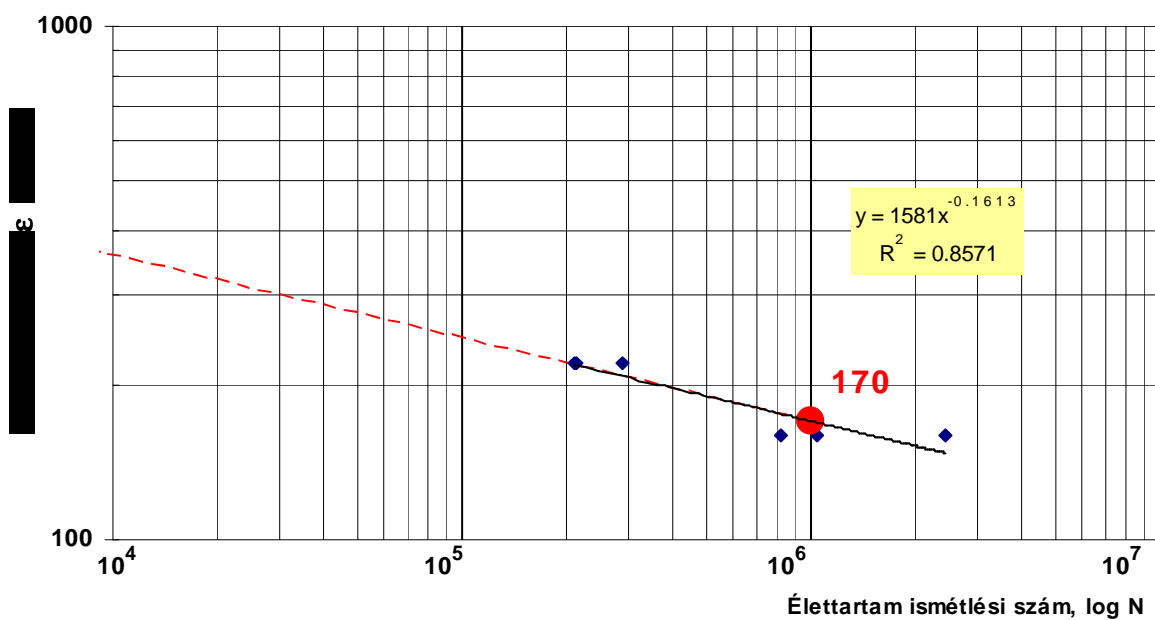
Fáradási egyenes, 3. sz. aszfalterősítő rács (Gradex, szövet alapú, üvegszálalás)



Fáradási egyenes, 4. sz. aszfalterősítő rács (S&P, szövet hordozó nélkül, bitumennel bevont rács), ragasztás bitumenemulzióval



Fáradási egyenes, 4. sz. aszfalterősítő rács (S&P, szövet hordozó nélkül, bitumennel bevont rács), hőlégfúvással ragasztva



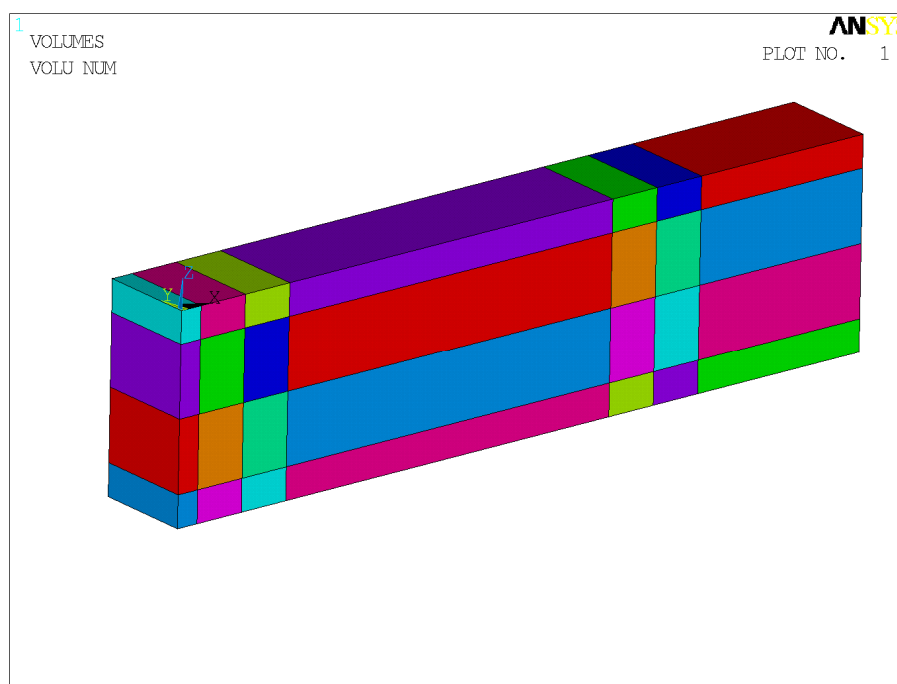
Elmozdulás és erővezérelt 4 pontos hajlító-fárasztó vizsgálatok fáradási egyenletei (7. fejezet)

<i>Korrelációs együttható</i>	<i>Rács típusa</i>	<i>Fáradási egyenlet változása a terhelés függvényében</i>	<i>+/- $\sigma_{hh_{max.(N=10^6)}}$</i>	<i>Keverék típusa</i>
R2 = 0,9638	2rtg, "2"szövetes, carbonszálal	$y = 7,383x-0,1271$	1,28	AB-11/F
R2 = 0,9822	2 rtg, háló nélküli	$y = 7,9776x-0,1291$	1,34	AB-11/F
R2 = 0,9713	háló nélkül	$y = 13,257x-0,1646$	1,36	AB-12
R2 = 0,9922	háló nélkül	$y = 20,917 x-0,1976$	1,36	AB-12
R2 = 0,9913	GR-G200	$y = 6,1819x-0,1043$	1,46	AB-12
R2 = 0,9562	S&P Glasphalt	$y = 9,2608x-0,1324$	1,49	AB-12
R2 = 0,8532	S&P Carbophalt	$y = 14,831x-0,1632$	1,56	AB-12
R2 = 0,9482	2 rtg, "7" Carbophalt	$y = 8,1351x-0,1194$	1,56	AC-11
R2 = 0,7612	ARTER GTSV 50-50-35	$y = 5,355 x-0,0852$	1,65	AC-11
R2 = 0,5978	ARTER GTSA 50-50-35	$y = 6,1526 x-0,0824$	1,97	AC-11

A fáradási egyenesek adatainak összesítése

4 pontos hajlító-fárasztó vizsgálat végelem modellezése (7. fejezet)

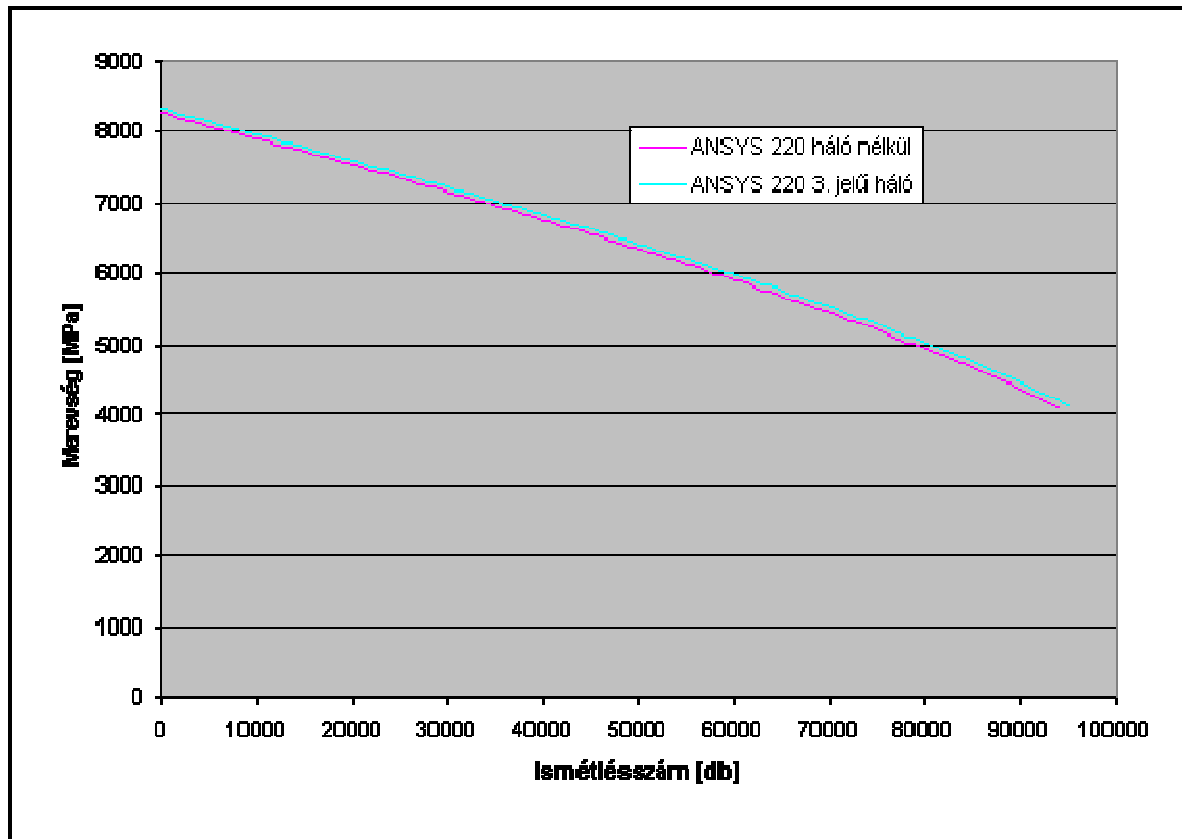
A hajlító-fárasztó vizsgálatokhoz készített végelem számítások esetén az aszfalt modellezéséhez SOLID 185 test lett alkalmazva, mely 8 csomóponttal és minden csomópontban 3 szabadságfokkal rendelkezik (UX, UY, UZ). Továbbá alkalmas plasztikus, hiperelasztikus viselkedés, kúszás modellezésére, nagy elmozdulásokat is képes kezelni. A ráccsal erősített aszfalt végelem modellje esetén a különbség összesen az, hogy a rács síkjában SHELL 181 típusú felületszerkezeti elemek lettek definiálva, membrán opció bekapcsolásával. .



A 4 pontos hajlítás vizsgálatához kialakított végelem modell

A modellezés során külön lett vizsgálva az aszfaltszerkezeti modell, majd a rács teszteléséhez be lett kapcsolva a modellbe a rács anyagmodellje. A végelem modellel végzett futtatás eredményeképpen megkaptuk a tönkremenetelig megtett lépésszámok különbségét, illetve megfigyelhetjük az ismétlés-merevség görbe jellegi eltéréseit.

Az alábbi ábrán láthatjuk a 220 microstrain terhelésű kísérlet rács nélküli, illetve a 3. jelű ráccsal készített modell összehasonlítását.

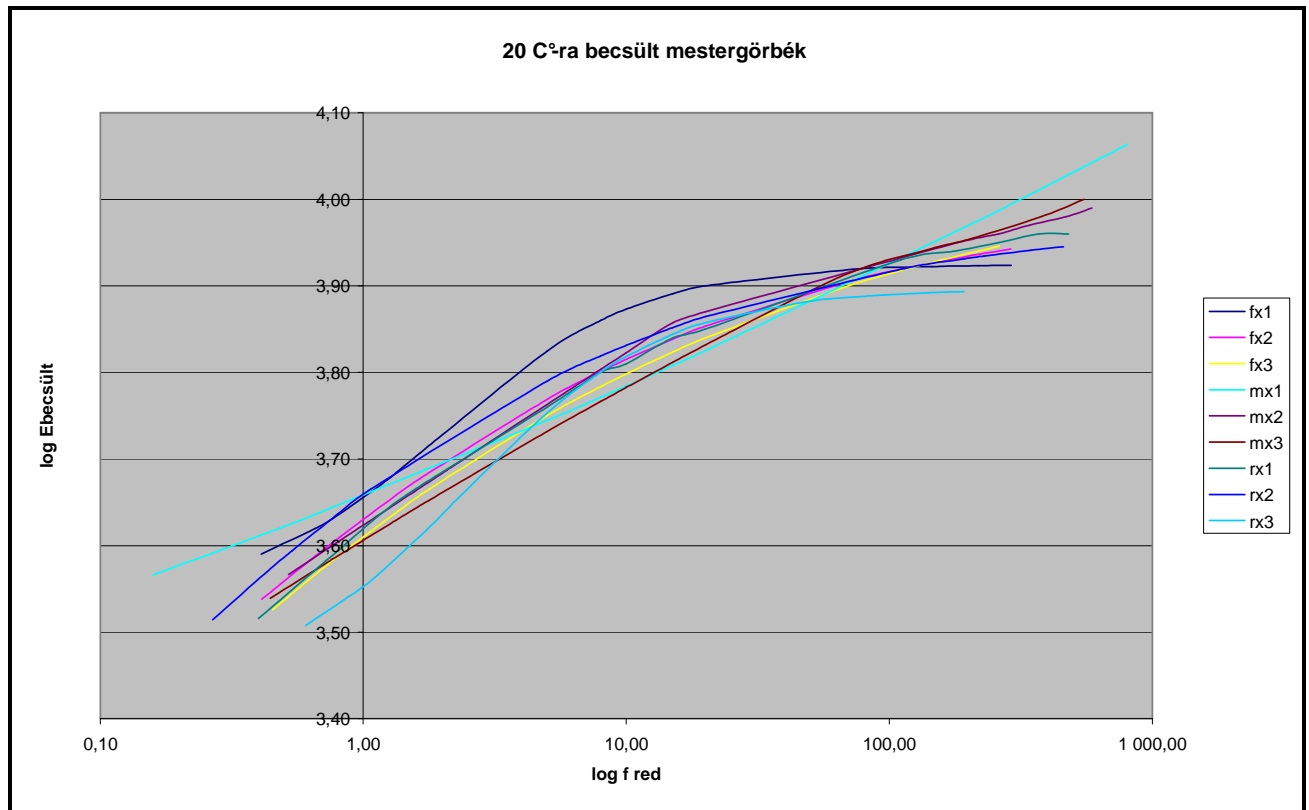


Hajlító vizsgálat véges elem modell utáni eredménye 220 microstrain-nél, a szövetes rác és a rác nélküli modell eredményeinek összehasonlítása

Jól látszik az ábrán, hogy a rác alkalmazásával nem keletkezik lényegese különbség. A rác nélküli 94000 ismétlés után, míg a „3. jelű” rácsbetéttel. A vizsgálat során a 160 és a 130 microstrain terhelésű modellek is hasonló viselkedést mutattak a 220 microstrain terhelési szinthez, azaz nem jelentkezett számottevő különbség a rácsbetéttel illetve anélkül készült modell fáradási viselkedését jellemző tönkremeneteli ismétlési számban.

A modellezésnél tehát nem kaptuk vissza a fáradási hajlító vizsgálat kapcsán mért különbséget, azonban meg kell jegyezzük, hogy a rác merevségi modulusát csupán 5000 MPa-ra állítottuk be.

„Nagygerendás” vizsgálati eredményekből megrajzolt mestergörbék (8. fejezet)



A rácserősítéssel, acélráccsal és rács nélkül készült próbatestek mestergörbéi (mx jelű: rács, rx jelű: referencia, fx jelű: acélrács)

Végeselem számítás részletes eredményei: Pályaszerkezeti modellek (11. fejezet)

<i>Pályaszerkezet típus</i>	<i>Kopóréteg</i>	<i>2. aszfalt réteg</i>	<i>3. aszfalt réteg</i>	<i>4. aszfalt réteg</i>	<i>CKt</i>
Merevségi modulusok 30°C-on					
49_1_Aszf_A	4 cm, AC-11/F E=2000 MPa	9 cm, AC-22/NM E=4000 MPa			
50_2_Aszf_D	4 cm, AC-11/F E=2000 MPa	8 cm, AC-22/NM E=4000 MPa	9 cm, AC-22/NM E=4000 MPa		
51_3_Aszf_R	4 cm, AC-11/F E=2000 MPa	9 cm, AC-22/NM E=4000 MPa	9 cm, AC-22/NM E=4000 MPa	9 cm, AC-22/NM E=4000 MPa	
52_4_Aszf_A	4 cm, AC-11/F E=2000 MPa	9 cm, AC-22/F E=3500 MPa			
53_5_Aszf_D	4 cm, AC-11/F E=2000 MPa	9 cm, AC-22/F E=3500 MPa	9 cm, AC-22/F E=3500 MPa	9 cm, AC-22/F E=3500 MPa	
54_6_Aszf_R	4 cm, AC-11/F E=2000 MPa	9 cm, AC-22/F E=3500 MPa	9 cm, AC-22/F E=3500 MPa	9 cm, AC-22/F E=3500 MPa	
56_8_CKt(15)_D	4 cm, AC-11/F E=2000 MPa	13 cm, AC-22/NM E=4000 MPa			15 cm CKt E=5000 MPa
57_9_CKt(15)_R	4 cm, AC-11/F E=2000 MPa	8 cm, AC-22/NM E=4000 MPa	8 cm, AC-22/NM E=4000 MPa	8 cm, AC-22/NM E=4000 MPa	15 cm CKt E=5000 MPa
60_12_CKt(15)_R	4 cm, AC-11/F E=2000 MPa	8 cm, AC-22/F E=3500 MPa	8 cm, AC-22/F E=3500 MPa	8 cm, AC-22/F E=3500 MPa	15 cm CKt E=5000 MPa

Pályaszerkezeti modellek 30 C°-on

<i>Pályaszerkezet típus</i>	<i>Kopóréteg</i>	<i>2. aszfalt réteg</i>	<i>3. aszfalt réteg</i>	<i>4. aszfalt réteg</i>	<i>CKt</i>
Merevségi modulusok 50°C-on					
61_1_Aszf_A	4 cm, AC-11/F E=400 MPa	9 cm, AC-22/NM E=1500 MPa			
62_2_Aszf_D	4 cm, AC-11/F E=400 MPa	8 cm, AC-22/NM E=1500 MPa	9 cm, AC-22/NM E=1500 MPa		
63_3_Aszf_R	4 cm, AC-11/F E=400 MPa	9 cm, AC-22/NM E=1500 MPa	9 cm, AC-22/NM E=1500 MPa	9 cm, AC-22/NM E=1500 MPa	
64_4_Aszf_A	4 cm, AC-11/F E=400 MPa	9 cm, AC-22/F E=900 MPa			
65_5_Aszf_D	4 cm, AC-11/F E=400 MPa	9 cm, AC-22/F E=900 MPa	9 cm, AC-22/F E=900 MPa		
66_6_Aszf_R	4 cm, AC-11/F E=400 MPa	9 cm, AC-22/F E=900 MPa	9 cm, AC-22/F E=900 MPa	9 cm, AC-22/F E=900 MPa	
69_9_CKt(15)_R	4 cm, AC-11/F E=400 MPa	8 cm, AC-22/NM E=1500 MPa	8 cm, AC-22/NM E=1500 MPa	8 cm, AC-22/NM E=1500 MPa	15 cm CKt E=5000 MPa
72_12_CKt(15)_R	4 cm, AC-11/F E=400 MPa	8 cm, AC-22/F E=900 MPa	8 cm, AC-22/F E=900 MPa	8 cm, AC-22/F E=900 MPa	15 cm CKt E=5000 MPa

Pályaszerkezeti modellek 50 C°-on

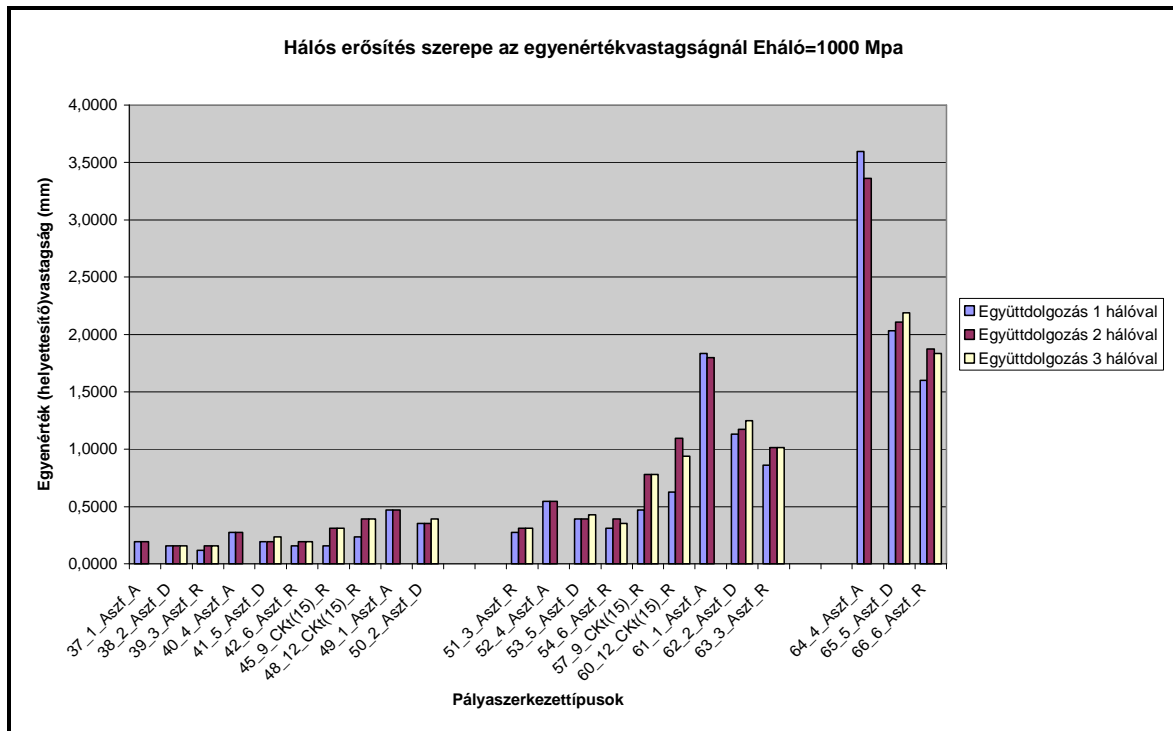
**Végelem számítás részletes eredményei: Egyenérték/helyettesítő
vastagságok az összes modell esetén (11. fejezet)**

Pályaszerkezet típus	Együtt 1h	Együtt 2h	Együtt 3h
A 0,5 mm vastag háló merevségi modulusa E=1000 Mpa			
37_1_Aszf_A	0,1953	0,1953125	-
38_2_Aszf_D	0,1563	0,15625	0,15625
39_3_Aszf_R	0,1172	0,15625	0,15625
40_4_Aszf_A	0,2734	0,2734375	-
41_5_Aszf_D	0,1953	0,1953125	0,234375
42_6_Aszf_R	0,1563	0,1953125	0,1953125
44_8_CKt(15)_D	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	-
45_9_CKt(15)_R	0,1563	0,3125	0,3125
47_11_CKt(15)_D	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	-
48_12_CKt(15)_R	0,2344	0,390625	0,390625
49_1_Aszf_A	0,4688	0,46875	-
50_2_Aszf_D	0,3516	0,3515625	0,390625
51_3_Aszf_R	0,2734	0,3125	0,3125
52_4_Aszf_A	0,5469	0,546875	-
53_5_Aszf_D	0,3906	0,390625	0,4296875
54_6_Aszf_R	0,3125	0,390625	0,3515625
56_8_CKt(15)_D	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	-
57_9_CKt(15)_R	0,4688	0,78125	0,78125
60_12_CKt(15)_R	0,625	1,09375	0,9375
61_1_Aszf_A	1,8359	1,796875	-
62_2_Aszf_D	1,1328	1,171875	1,25
63_3_Aszf_R	0,8594	1,015625	1,015625
64_4_Aszf_A	3,5938	3,359375	-
65_5_Aszf_D	2,0313	2,109375	2,1875
66_6_Aszf_R	1,6016	1,875	1,8359375
69_9_CKt(15)_R	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.
72_12_CKt(15)_R	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.
A 0,5 mm vastag háló merevségi modulusa E=2000 Mpa			
73_1_Aszf_A	0,4297	0,41015625	-
74_2_Aszf_D	0,293	0,29296875	0,33203125
75_3_Aszf_R	0,2539	0,3125	0,29296875
76_4_Aszf_A	0,5469	0,546875	-
77_5_Aszf_D	0,3906	0,4296875	0,44921875
78_6_Aszf_R	0,3516	0,41015625	0,390625
80_8_CKt(15)_D	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	-
81_9_CKt(15)_R	0,3125	0,625	0,5859375
83_11_CKt(15)_D	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	-
84_12_CKt(15)_R	0,4688	0,859375	0,78125
85_1_Aszf_A	0,9766	0,9375	-
86_2_Aszf_D	0,6641	0,703125	0,7421875
87_3_Aszf_R	0,5469	0,625	0,625
88_4_Aszf_A	1,0938	1,0546875	-
89_5_Aszf_D	0,7812	0,8203125	0,859375

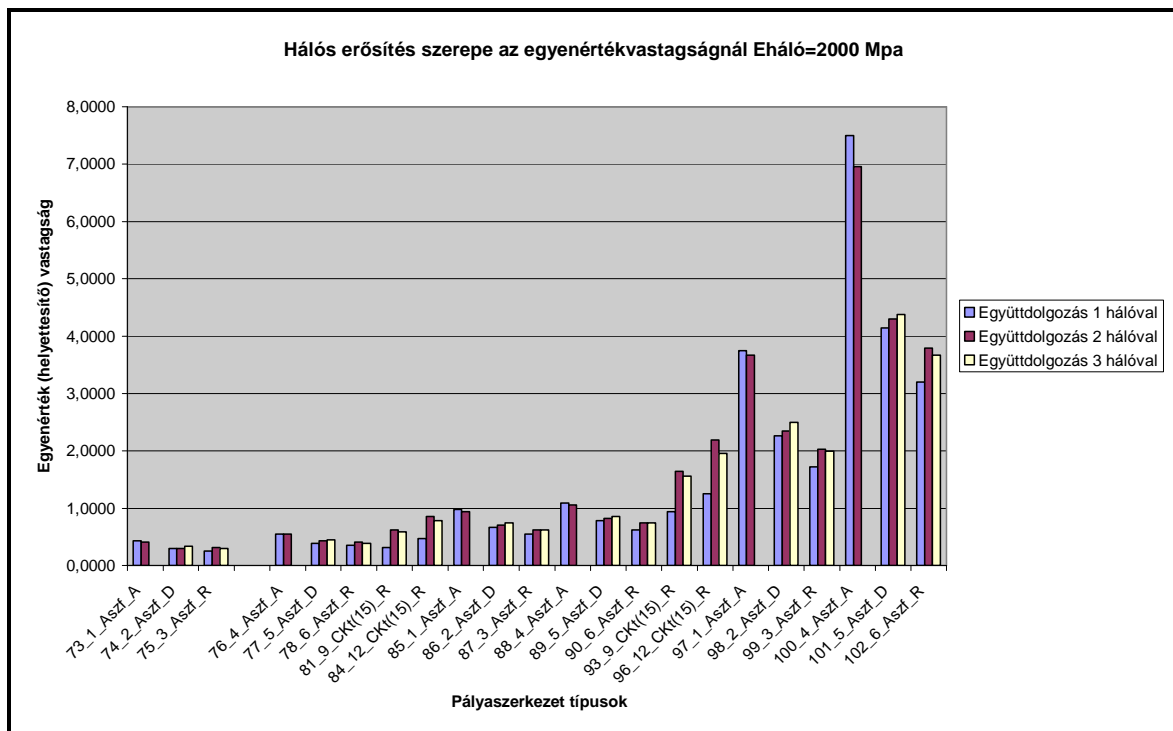
90_6_Aszf_R	0,625	0,7421875	0,7421875
92_8_CKt(15)_D	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	-
93_9_CKt(15)_R	0,9375	1,640625	1,5625
96_12_CKt(15)_R	1,25	2,1875	1,953125
97_1_Aszf_A	3,75	3,671875	-
98_2_Aszf_D	2,2656	2,34375	2,5
99_3_Aszf_R	1,7188	2,03125	1,9921875
100_4_Aszf_A	7,5	6,953125	-
101_5_Aszf_D	4,1406	4,296875	4,375
102_6_Aszf_R	3,2031	3,7890625	3,671875
105_9_CKt(15)_R	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.
108_12_CKt(15)_R	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.
A 0,5 mm vastag háló merevségi modulusa E=5000 Mpa			
109_1_Aszf_A	1,0547	1,015625	-
110_2_Aszf_D	0,7227	0,7421875	0,83984375
111_3_Aszf_R	0,625	0,7421875	0,7421875
112_4_Aszf_A	1,4062	1,3671875	-
113_5_Aszf_D	0,9961	1,03515625	1,1328125
114_6_Aszf_R	0,8594	1,015625	1,015625
116_8_CKt(15)_D	-	nem található ekv.v.	-
117_9_CKt(15)_R	0,7422	1,484375	1,484375
119_11_CKt(15)_D	-	nem található ekv.v.	-
120_12_CKt(15)_R	1,0938	2,109375	2,03125
121_1_Aszf_A	2,4219	2,34375	-
122_2_Aszf_D	1,6797	1,71875	1,875
123_3_Aszf_R	1,3672	1,6015625	1,5625
124_4_Aszf_A	2,7734	2,65625	-
125_5_Aszf_D	1,9531	2,03125	2,1875
126_6_Aszf_R	1,5625	1,875	1,8359375
128_8_CKt(15)_D	-	nem található ekv.v.	-
129_9_CKt(15)_R	2,3438	4,21875	3,90625
132_12_CKt(15)_R	2,9688	5,46875	5
133_1_Aszf_A	9,9219	9,453125	-
134_2_Aszf_D	5,7031	5,859375	6,328125
135_3_Aszf_R	4,375	5,15625	5
136_4_Aszf_A	23,0469	19,765625	-
137_5_Aszf_D	10,3906	10,9765625	11,2109375
138_6_Aszf_R	8,0078	9,6484375	9,4140625
141_9_CKt(15)_R	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.
144_12_CKt(15)_R	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.
A 0,5 mm vastag háló merevségi modulusa E=10000 Mpa			
145_1_Aszf_A	2,0703	2,05078125	-
146_2_Aszf_D	1,4453	1,484375	1,6796875
147_3_Aszf_R	1,2695	1,484375	1,484375
148_4_Aszf_A	2,8125	2,6953125	-
149_5_Aszf_D	1,9922	2,0703125	2,265625
150_6_Aszf_R	1,7188	2,0703125	2,03125
152_8_CKt(15)_D	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	-
153_9_CKt(15)_R	1,4844	3,046875	2,9296875
155_11_CKt(15)_D	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	-
156_12_CKt(15)_R	2,1875	4,21875	4,0625

157_1_Aszf_A	4,8828	4,6875	-
158_2_Aszf_D	3,3203	3,4375	3,7890625
159_3_Aszf_R	2,7344	3,203125	3,1640625
160_4_Aszf_A	5,5859	5,3515625	-
161_5_Aszf_D	3,9062	4,0625	4,3359375
162_6_Aszf_R	3,1641	3,75	3,671875
164_8_CKt(15)_D	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	-
165_9_CKt(15)_R	4,6875	8,90625	8,203125
168_12_CKt(15)_R	6,25	11,875	10,78125
169_1_Aszf_A	23,5156	20,703125	-
170_2_Aszf_D	11,5234	11,953125	12,8515625
171_3_Aszf_R	8,6719	10,4296875	10,1953125
172_4_Aszf_A	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	-
173_5_Aszf_D	21,1719	23,203125	23,3984375
174_6_Aszf_R	16,0156	20	19,53125
177_9_CKt(15)_R	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.
180_12_CKt(15)_R	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.
A 0,5 mm vastag háló merevségi modulusa $E=20000$ Mpa			
181_1_Aszf_A	4,1797	4,1015625	-
182_2_Aszf_D	2,8906	2,96875	3,359375
183_3_Aszf_R	2,5391	3,0078125	2,96875
184_4_Aszf_A	5,6445	5,4296875	-
185_5_Aszf_D	3,9844	4,16015625	4,53125
186_6_Aszf_R	3,4375	4,1015625	4,0625
188_8_CKt(15)_D	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	-
189_9_CKt(15)_R	3,0078	6,171875	5,9375
191_11_CKt(15)_D	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	-
192_12_CKt(15)_R	4,375	8,671875	8,28125
193_1_Aszf_A	9,9219	9,453125	-
194_2_Aszf_D	6,6797	6,953125	7,578125
195_3_Aszf_R	5,4297	6,484375	6,3671875
196_4_Aszf_A	11,4453	10,78125	-
197_5_Aszf_D	7,8125	8,203125	8,75
198_6_Aszf_R	6,2891	7,5390625	7,421875
200_8_CKt(15)_D	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	-
201_9_CKt(15)_R	9,6875	20,3125	18,4375
204_12_CKt(15)_R	13,2812	29,99995001	28,4375
205_1_Aszf_A	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	-
206_2_Aszf_D	23,4766	25,3125	26,875
207_3_Aszf_R	17,3828	21,6796875	21,1328125
208_4_Aszf_A	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	-
209_5_Aszf_D	42,6562	80	56,875
210_6_Aszf_R	32,3047	43,59375	42,5
213_9_CKt(15)_R	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.
216_12_CKt(15)_R	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.	nem található ekv.v.

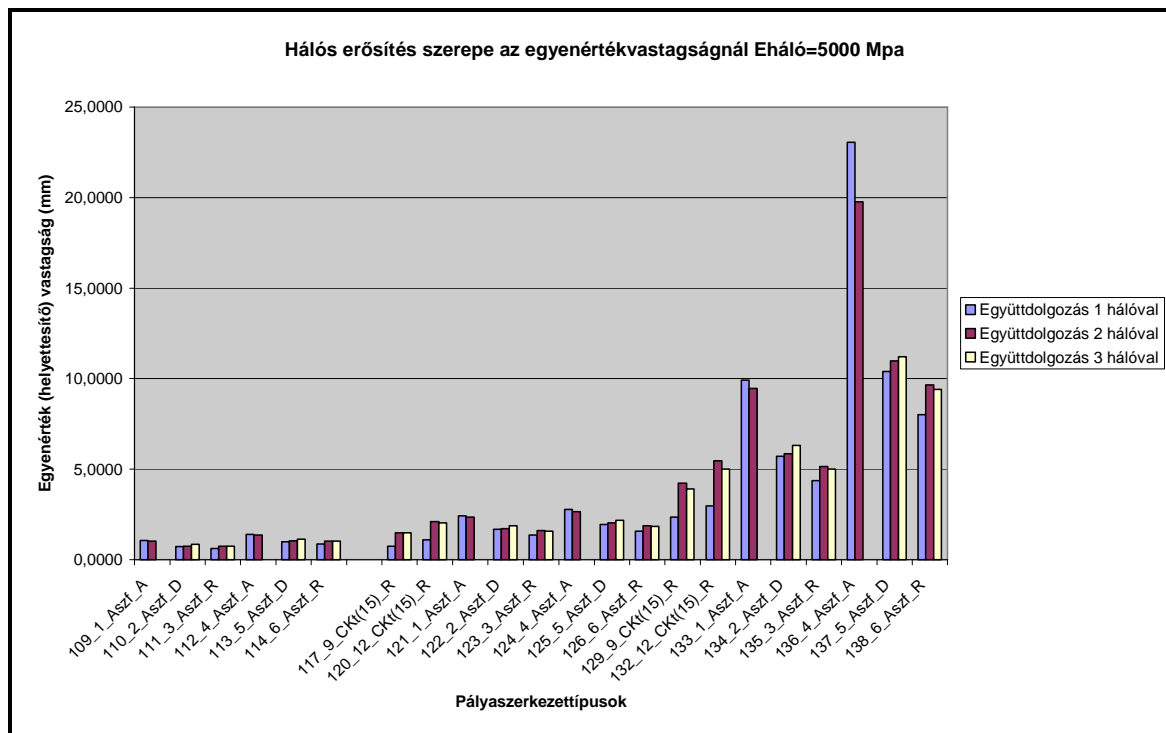
Az egyenérték (helyettesítő) vastagságok az összes modell esetében



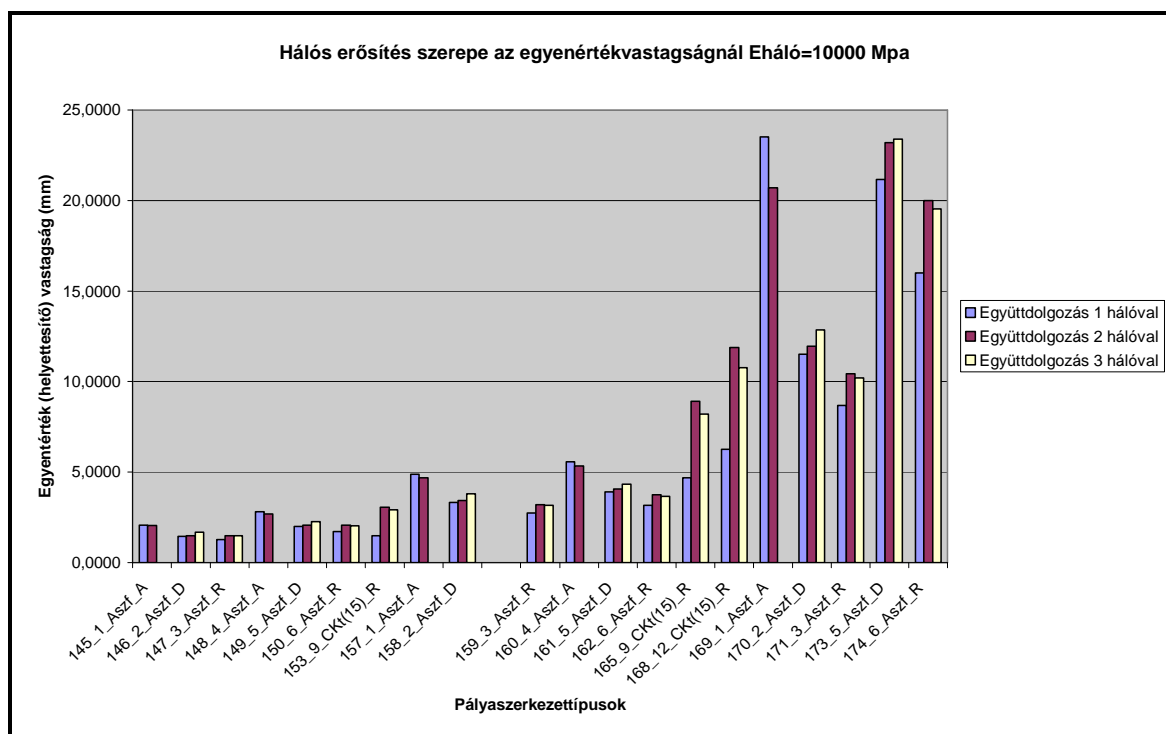
Egyenérték vastagság 1000 MPa-os rács alkalmazásánál



Egyenérték vastagság 2000 MPa-os rács alkalmazásánál

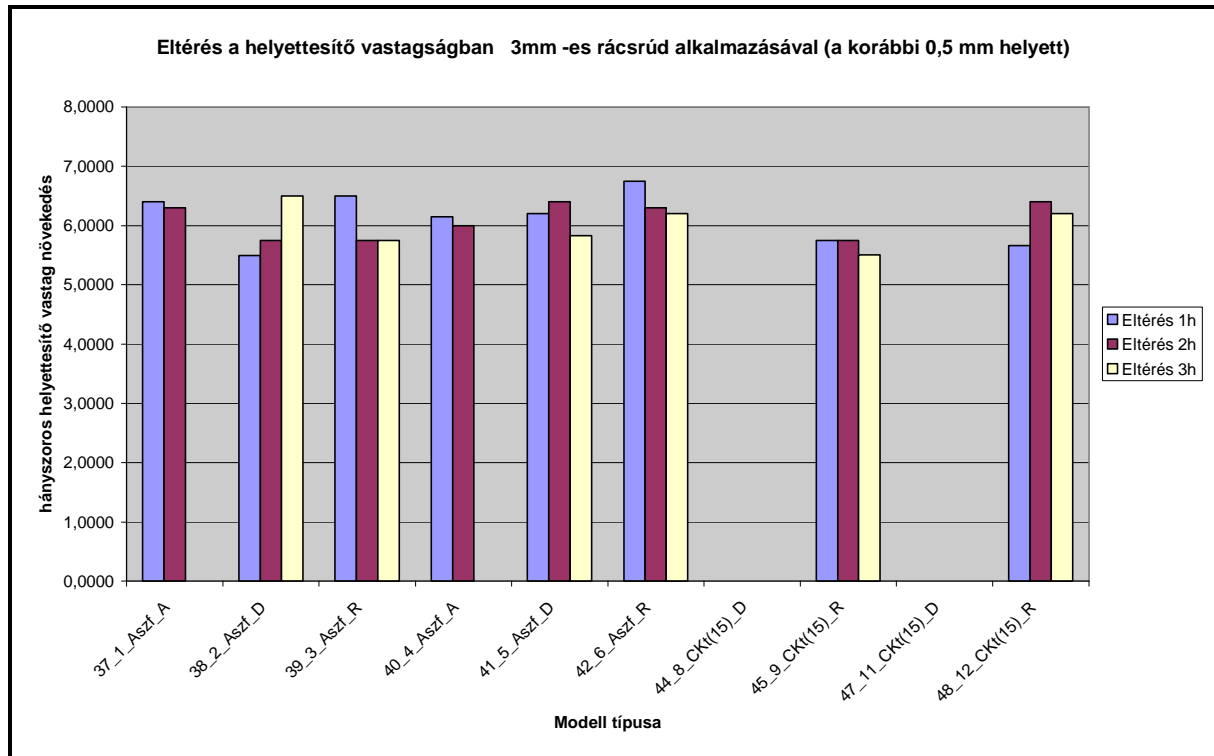


Egyenérték vastagság 5000 MPa-os rács alkalmazásánál



Egyenérték vastagság 10000 MPa-os rács alkalmazásánál

Végeselem számítás 0,5 mm helyett 3 mm-es rács vastagsággal számolva



Eltérés a helyettesítő vastagságban 3 mm-es rácsvastagság alkalmazásával