

KÖZÚTI ÉS MÉLYÉPÍTÉSI SZEMLE

57. ÉVFOLYAM 7. SZÁM

2007. JÚLIUS



# tartalom

## 1 DR. GÁSPÁR LÁSZLÓ

Levezető elnöki megnyitó a H-TPA Kft. „Aszfaltkeverékek tulajdonságai” című konferencián

## 2 EGBERT BEUVING

Fejlődés Európában az aszfaltkeverékek tulajdonságainak jellemzése területén

## 4 DR. WOLFGANG ARAND

Az aszfalt fáradása alacsony hőmérsékleten

## 11 DR. FROHMUT WELLNER

Aszfalt burkolatok méretezése számítással

## 14 JAN JÄHNIG

Aszfalttal végzett triaxiális vizsgálatok

## 16 GAJÁRI GYÖRGY

A „Critical state theory” alkalmazása a magas hőmérsékletű aszfalt képlékeny viselkedése

## 21 KAROLINY MÁRTON

Aszfaltok tulajdonságainak modellezése

## 24 TAKÁCS MIKLÓS

A forgalomszimulációs modellezés metodikai vizsgálata II. rész

### TANÁCSADÓ TESTÜLET:

Apáthy Endre, Dr. Boromisza Tibor, Csordás Mihály

Dr. Farkas József, Dr. Fi István, Dr. Gáspár László

Hórvölgyi Lajos, Huszár János, Jaczó Győző

Dr. Keleti Imre, Dr. Mecsi József, Molnár László Aurél

Pallay Tibor, Dr. Pallós Imre, Regős Szilveszter

Dr. Rósa Dezső, Schulek János, Schulz Margit,

Dr. Schváb János, Dr. Szakos Pál, Dr. Szalai Kálmán,

Tombor Sándor, Dr. Tóth Ernő, Varga Csaba,

Veress Tibor

**FELELŐS KIADÓ** László Sándor (Magyar Közút Kht.)

**FELELŐS SZERKESZTŐ** Dr. Koren Csaba

**SZERKESZTŐK** Dr. Gulyás András

Rétháti András

Szőnyi Zsolt

Dr. Tóth-Szabó Zsuzsanna

### KÖZÚTI ÉS MÉLYÉPÍTÉSI SZEMLE

Alapította a Közlekedéstudományi Egyesület.

A közlekedésépítési és mélyépítési szakterület mérnöki tudományos havi lapja.

Az újság elérhető a [web.kozut.hu](http://web.kozut.hu) honlapon is.

A cikkekben szereplő megállapítások és adatok a szerzők véleményét és ismereteit fejezik ki és nem feltétlenül azonosak a szerkesztők véleményével és ismereteivel.

A H-TPA Kft. 2007. április 5-én Visegrádon szervezett konferenciája az „Aszfaltkeverékek tulajdonságai” összefoglaló címet viseli. Témája rendkívül fontos és időszerű, hiszen a világszerte legelterjedtebben épített útburkolat-típus anyagának minőségével foglalkozik.

Amikor az aszfaltkeverékek minőségét meghatározó jellemzőket választották a neves külföldi és hazai szakemberek előadásuk témájaként, olyan tényezőcsoporttal foglalkoznak, amely az útburkolatok teljesítményének (performance) egyik legfontosabb befolyásoló tényezője. Nyilvánvaló ugyanis, hogy nem megfelelő minőségű aszfaltkeverékek a helyszínre szállítás és a bedolgozás szabályainak teljes mértékű betartása mellett sem képezhetik olyan pályaszerkezeti rétegek anyagát, amelyek az úthasználati igények hosszú távú kielégítését lehetővé teszik.

A konferencia előadói általában Közép-Európa országait képviselik, olyan régiót tehát, amelyet szélsőséges éghajlat (meglehetősen meleg nyár és esetenként nagyon hideg tél) jellemez. Így az aszfalttechnológusoknak olyan keverék-receptúrákat kell tervezniük, amelyek az aszfaltretegek kedvező hideg és kedvező meleg viselkedését egyaránt biztosítják. Ennek a kihívásnak csak bölcs kompromisszum megtalálása révén lehet megfelelni, egyébként a bitumenes kötőanyagú rétegeket tartalmazó pályaszerkezetek rövid időn belül történő összeroppedezésére vagy pedig – a másik típusú tönkremeneteli módnak megfelelően – idő előtti deformációjára (pl. keréknyomvályúk képződésére) kell számítani. A konferencia előadói érdekes eredményekről számolnak be az aszfaltok mindkét időjárási szélsőség mellett történő vizsgálatainak és technológiai fejlesztésének tárgyában.

Állítható tehát, hogy az új aszfalttechnológiai eredmények nem közvetlenül, hanem közvetve vál(hat)nak jelentőssé, amennyiben hozzájárulnak az útburkolatok gazdaságos kezeléséhez. Az utak tulajdonosai (és kezelői) számára nyújtanak segítséget a hatékony vagyongazdálkodás (asset management) megvalósítása tekintetében. Közismert, hogy a közúti vagyongazdálkodás a rendkívül nagy értékű úthálózat vagyoneértékének megőrzését, valamint az úthasználóknak az infrastruktúra-elemmel szemben támasztott többirányú követelményeinek folyamatos és magas szintű kielégítését tűzi ki elsődleges céljául. Nyilvánvaló, hogy a jó aszfaltminőség mindkét tekintetben kedvező hatást gyakorol egyrészt a nettó/bruttó értékarány magas szintjének hosszabb ideig történő megőrzése révén, illetve azért, hogy a jó minőségű aszfaltretegek tartósan kedvező burkolat-teljesítményt és késői (ritka) úthasználati zavarást eredményeznek a burkolat-felújítási tevékenységek során.

Az elhangzó előadások számos elméleti alapú és laboratóriumi újdonsággal szolgálnak az aszfalttechnológia terén. Ezek hasznosságát nem vitatva, fel kell hívni a figyelmet azokra az elvi különbségekre, amelyek a felvett anyagjellemzőkkel operáló tervezési modellek outputjai, a laboratóriumi vizsgálatok eredményei, a próbapályákon kapott viselkedési információk és az üzemben lévő utak teljesítményi jellemzői között tapasztalhatók. Nyilvánvaló ugyanis, hogy az útpályaszerkezetek tényleges állapotváltozását olyan sok tényező befolyásolja, hogy az említett elméleti és gyakorlati alapú modellek csupán többé-kevésbé tudnak közelíteni. Még a viszonylag megbízható próba-pályaviselkedés is eltérő eredményeket szolgáltat a normál forgalom

alatt lévő út állapotváltozásához képest, hiszen – egyebek mellett – sem a ciklikusan változó környezeti hatásokat, sem pedig az aszfaltnak az esetenként nagyobb terhelési szünetekből származó „öngyógyuló hatását” (healing effect) nem képes modellezni. A hosszú távon optimális forráselosztás alátámasztására szolgáló útburkolat-gazdálkodási rendszer (PMS) –, valamint az útgazdálkodás egyéb részrendszerei – nagymértékben támaszkodnak a (hajlékony) pályaszerkezetek leromlási folyamatának előrebecslését elősegítő aszfalttechnológiai információkra. Nyilvánvaló ugyanis, hogy azok optimalizációja megbízható információkat igényel az új építés után várható ciklusidők hosszáról éppen úgy, mint a felújítások után várható tényleges állapotjavító hatásról, valamint az azokat követő ciklusidők jellemzőiről. Mindezek alakulását az aszfalttechnológiai ismeretek bővülése mind megbízhatóbban előrebecsülhetővé teszi.

Az említett problémakörhöz tartozik a különböző állapotparaméterek kritikussá válásának kérdése. Az aszfaltburkolatú pályaszerkezetek méretezéséhez világszerte szinte kizárólag vagy az aszfaltok fáradási jellemzőit, vagy pedig alakváltozási ellenállásukat jellemzik laboratóriumban. Bár ezek számítanak a leggyakoribb tönkremeneteli módoknak, egyáltalán nem kizárólagosak. Az aszfalt anyagú kopórétegek elsíkosoedása, kipergése-kátyúsodása, lokális süllyedések, stb. szintén szolgálhatnak burkolat-felújítási indokként, tehát válhatnak kritikus állapotparaméterekké. Ez a tény ugyan nem von le semmit a konferencián is elhangzó, a fáradással és a deformációval összefüggő aszfaltmechanikai újdonságok jelentőségéből, de a problémakör teljességének felvillantásához ennek megemlítése szükséges volt. Ebből következik, hogy az útburkolatnak az említett két aszfaltjellemző laboratóriumi vizsgálatán alapuló teljesítmény-előrebecslését a tényleges üzemi jellemzők gyakran nem igazolják vissza. Állítható tehát, hogy egyes burkolatok idő előtti tönkremenetelében igazában nem váratlan esemény, csupán a ható tényezők korlátozott körű figyelembevételének a következménye.

Ezeknek a gondolatoknak a jegyében nyitom meg az „Aszfaltkeverékek tulajdonságai” című konferenciát, amelynek holland, német és magyar előadói a szakma kiváló művelői, és akiktől jelentős tudományos eredményeket tükröző, ugyanakkor a gyakorlatban is kiválóan hasznosítható előadás-sokra számíthatunk.

### Summary

#### Chairman's introduction of the H-TPA Conference on „Asphalt mixture properties”

The chairperson's introduction of the conference emphasizes the significance of the asphalt technological presentations to be delivered, however, it points out their being as inputs for several complex road management activities.

<sup>1</sup> okl. mérnök, okl. gazd.mérnök, az MTA doktora, kutató professzor Közlekedéstudományi Intézet Kht, egyetemi tanár Széchenyi István Egyetem gasparl@freemail.hu

## 1. Bevezetés

Az utolsó 25 év nagymértékű változásokat hozott az európai aszfaltiparban. Ezek a változások a mintegy 350 millió tonna keveréket előállító iparágban arra készítik az EAPA – t, hogy a 17 tagállamban lévő aszfaltgyártók érdekeit még intenzívebben képviselje. Ennek érdekében a következő célokat fogalmazta meg:

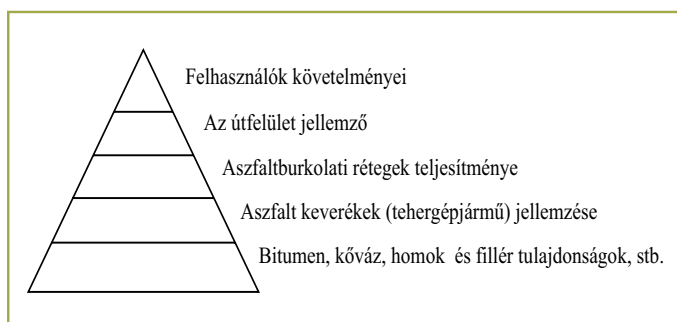
- Az aszfalt hatékony használatának elősegítése
- Az aszfaltipar európai képviselete
- Az európai szabványosításban való részvétel
- Az információk gyűjtése és terjesztése
- A tagok közötti információcsere javítása
- Az iparról kialakult kép javítása
- A kutatások elősegítése és összegyűjtése
- A közösségi projektek ösztönzése és irányítása

## 2. Trendek az aszfaltiparban

Az aszfaltipar legfontosabb trendjei levezethetők a keverékek tulajdonságainak jellemzését szolgáló módszerek és eljárások fejlődéséből (1. ábra).

A legelső időkben az aszfaltkeveréket alapanyagainak tulajdonságaival jellemezték, a fejlődés egy későbbi periódusában már az elkészült (ömlesztett állapotú) keverék tulajdonságait értékelték. A következő fázisban a pályaszerkezeti rétegek teljesítménye vált a legfontosabb értékelési szemponttá, aztán egyre nagyobb jelentőséget nyertek a felületi tulajdonságok végül – napjainkban – már a szinte korlátozás nélküli felhasználói követelmények jelentek meg.

Ennek megfelelően a múltban a közútkezelő mindent részletesen előírt, szinte recept szintig, jelentős tudással és tapasztalattal rendelkezett, előírásait a vállalkozó feltétlenül végrehajtotta, ennek megfelelően a felelősség legnagyobb részben a megbízón volt.



1. ábra: Az aszfaltipar követelményei

Ma már egyre több felelősség terhelődik át a vállalkozóra, ennek megfelelően egyre növekszik a technológiai tudás, a részletes előírások helyett egyre inkább funkcionális igények jelennek meg. Ennek megfelelően a szabályozás súlypontja mind nemzeti szinten, mind az EU szintjén ebbe az irányba helyeződik át.

A jövő az egyre nagyobb tudást és felelősséget igénylő vállalkozói oldal számára a funkcionális szerződések, ahol a követelményeket az élettartam jelentős részén át figyelik és szankcionálják, megjelennek az erre a célra alkalmas EU szabványok, a közútkezelői oldal egyre inkább projektmenedzseri feladatokat fog ellátni.

Ennek megfelelően a vállalkozói oldal számára a következtetések az alábbiak:

- Több ismeretre van szükség
- Nő a felelősség a termékkel kapcsolatban – keveréktervezés
- A funkcionális követelményeket keveréktulajdonságokra kell lefordítani
- Fontos a tartósság meghatározása különböző szituációkban
- Útfenntartási stratégiákhoz kell alkalmazkodni
- Kockázatkezelés szükséges a tartósság kérdéseivel kapcsolatban

Az úthasználók új típusú követelményei a következők:

- Biztonságos utak
- Kényelmes utak
- Kevesebb zaj
- Kevesebb sár és vízfelverődés
- Kevesebb karbantartás, rövid idejű útlezárások
- Környezetbarát – 100% - ban felhasználható
- Energiafelhasználás csökkentése
- Fenntartható, színes, rugalmas használat

## 3. Aszfalttechnológiai fejlesztések

Az aszfaltkeverékek fejlesztésében már megjelentek az útfelhasználói igények, így elsősorban a biztonság, zaj, vízfelverődés csökkentése területén. A 2. ábra jól illusztrálja az ezen a területen a porózus aszfaltokkal elérhető eredményt.



2. ábra: Vízfelverődés a hagyományos és porózus aszfalton

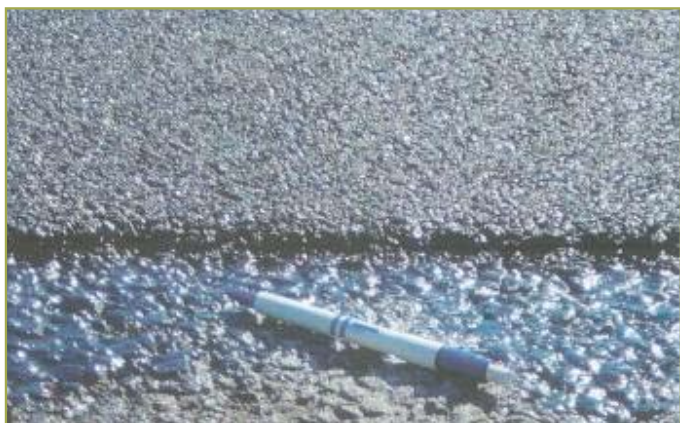
A fenntartás gazdaságosságának fokozása életre hívta a szupervékony rétegeket, amelyek egyidejűleg a zajemisszió, vízköd, sűrűlódás iránti útfelhasználói igényeket is teljesítik. A 3. ábrán látható réteg vastagsága néhány mm – ben mérhető, aminek elérése a közelmúltban alig volt lehetséges.

Megjelentek az igények – elsősorban ökológiai oldalról – a víz-áteresztő pályaszerkezetek megvalósítására, hogy az út környe-

<sup>1</sup> Fordította: Ureczky Judit, okl. építőmérnök, H-TPA Kft.

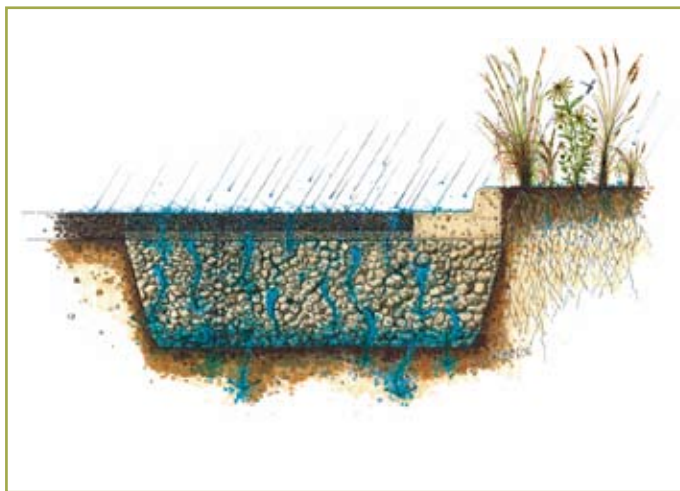
<sup>2</sup> Műszaki igazgató, European Asphalt Pavement Association (Európai Aszfaltburkolatok Szövetsége) - EAPA





3. ábra: Mm-ben mérhető rétegvastagság

zetében a flóra zavartalanul tudjon élni, ennek elvi megoldását a 4. ábrán látjuk.



4. ábra: Vízáteresztő pályaszerkezet elve

Összefoglalásképpen megállapítható, hogy az aszfaltkeverékek tulajdonságaival kapcsolatos igények nagyon nagymértékben változnak, az aszfaltiparnak egyre nagyobb kihívásokkal kell megbirkóznia.

#### 4. Aszfaltkeverékek tulajdonságainak jellemzése

Az aszfaltkeverékek tulajdonságainak jellemzése a múltban az alapanyagok tulajdonságain keresztül történt. A későbbi időszakban a Marshall eljárás bevezetése után a próbatest tulajdonságaiban keresztül kísérelték meg jellemezni a keveréket.

A forgalmi terhelés növekedésével megjelentek a keverék deformációs és fáradási tulajdonságait meghatározó vizsgálatok, ezzel egyidejűleg erős törekvések voltak a tulajdonságok analitikus megközelítésére is.

Egyre nőtt a vizsgálati oldal fegyvertára, megjelentek a triaxiális vizsgáló berendezések a négy pontos hajlítóvizsgálathoz szükséges készülékek, a porozitás vizsgálatához áteresztőképességi vizsgálatot fejlesztettek ki, a sűrűlódás prognosztizálásához speciális berendezések jelentek meg, külön terület lett az olajellenállás és a jégoldó vegyszerekkel szembeni ellenállás vizsgálata.

A tulajdonságok jellemzéséhez mind empirikus, mind fundamentális úton el lehet jutni, az EU – a Római Szerződésben rögzített – alapelveinek megvalósításához ezért dolgozta ki az aszfaltokra vonatkozó szabványait. Ezek jelen állapotukban 2008 – tól kezdve lesznek kötelezőek, de egyidejűleg előmunkák folynak a következő generációs szabványok megalkotására is.

#### 5. Kihívások és lehetőségek

Az aszfaltiparral szembeni kihívások röviden az alábbiakban foglalhatók össze.

- Kevesebb karbantartás
  - Tartósság – jó minőségű burkolatok
  - Magas élettartalmú burkolatok
  - Éjszakai karbantartás
- Kevesebb energia és károsanyag kibocsátás
  - Alacsony hőmérsékletű aszfalt
- Nagy sebességű karbantartás
  - Új fenntartási technikák
  - Új építési technikák

Az ezeknek való megfelelés teljesen más gondolkodást, komplex fejlesztéseket tesz szükségessé, amelyek közül – példaként – a ROLLPAVE innovációt említtem meg.

Az üzemi körülmények között előállítható, előregyártott, tekercselt aszfalt technológia jól példázza azokat a lehetőségeket, amelyeket az aszfaltiparnak ki kell használni, hogy helyét a versengő egyéb technológiákkal a jövőben is biztosítani tudja (5. ábra).



5. ábra: Előregyártott tekercselt aszfalt

#### Summary

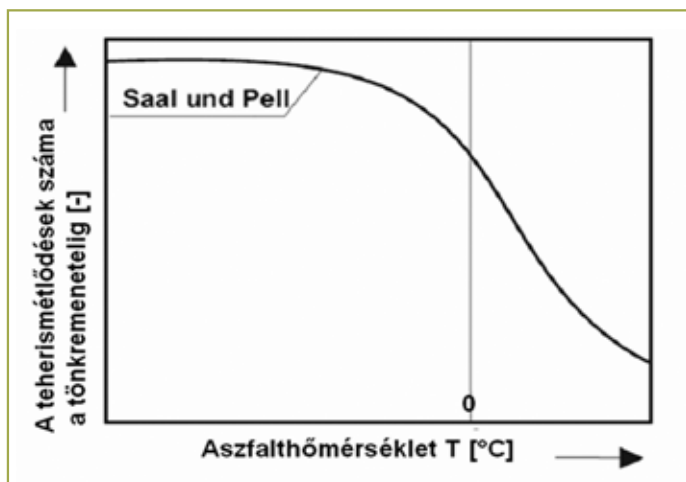
##### European developments in asphalt mix characterisations

The main goal and mission of EAPA is to help the European Asphalt Industry to keep the international trends. These trends in the field of asphalt mixtures show the need to fulfil the special requirements of the users. According to these trends the responsibility and knowledge is moved to the sphere of contractors. For the better success of environmental, economical requirements. The European standardization has core role in this process, and the EAPA has also considerable role on it better meet the environmental, economical requirements. The European standardisation has a core role in this process, and the EAPA has also a considerable role in it.

## 1. Bevezetés: A fáradás elve

A terhek vagy kényszerek utak vagy repülőterek aszfaltjára gyakorolt hatásai kis, külsőleg nem látható szerkezeti károsodást okoznak. Amennyiben ezek a hatások ismétlődnek, a hatások összeadódnak egészen addig, amíg az ismétlődések igen nagy száma után észlelhető kár keletkezik. Végül ez az aszfalt teljes tönkremenetelét – pl. repedésképződést – eredményezi. Ezt a folyamatot általában fáradásnak nevezzük. A fáradás tehát a tönkremenetelt megelőző anyagkárosodás. Terhelés alatt a külső erők – pl. a forgalom – hatását értem. A „kényszer” fogalom egy építményrészben a gátolt alakváltozás esetén keletkező feszültségeket írja le – elsősorban a hőmérsékletváltozás következtében, amint az a hézagmentes építési módoknál, de nedvességváltozásoknál is kényszerszerűen fellép.

Sall és Pell [1] vitathatatlan érdeme, hogy már az '50-es évek végén / '60-as évek elején utaltak a fáradás jelenségére, és kifejlesztették az aszfalt fáradással szembeni ellenállása kísérleti meghatározásának módszerét. Aszfalt próbatestekkel vizsgálatokat végeztek, amelyek során meghatározták a periodikusan egymást követő nyomási és húzási igénybevételeket. A fáradási vizsgálataik eredményeképpen megállapították, hogy az aszfalt fáradási ellenállása – a tönkremenetelig elviselhető teherátaladással kifejezve, tehát az ún. törési teher (N) – a hőmérséklet csökkenésével monoton nő (1. ábra). Ez az eredmény nem fedti a gyakorlati tapasztalatokat, amelyekre később még részletesen kitérek. Először azonban röviden az európai szabványokról szeretnék említést tenni.



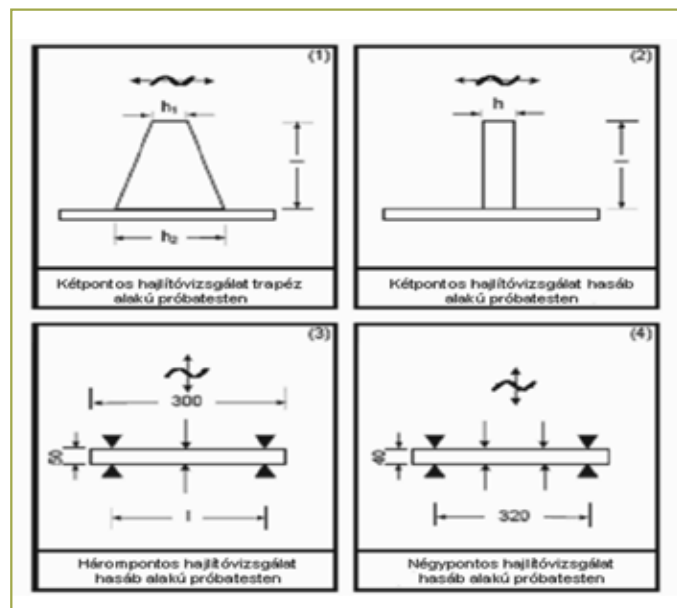
1. ábra: A teherismétlések száma az aszfalt tönkremenetelig, mechanikai teher hatására a T hőmérséklet függvényében

## 2. Az európai szabványok

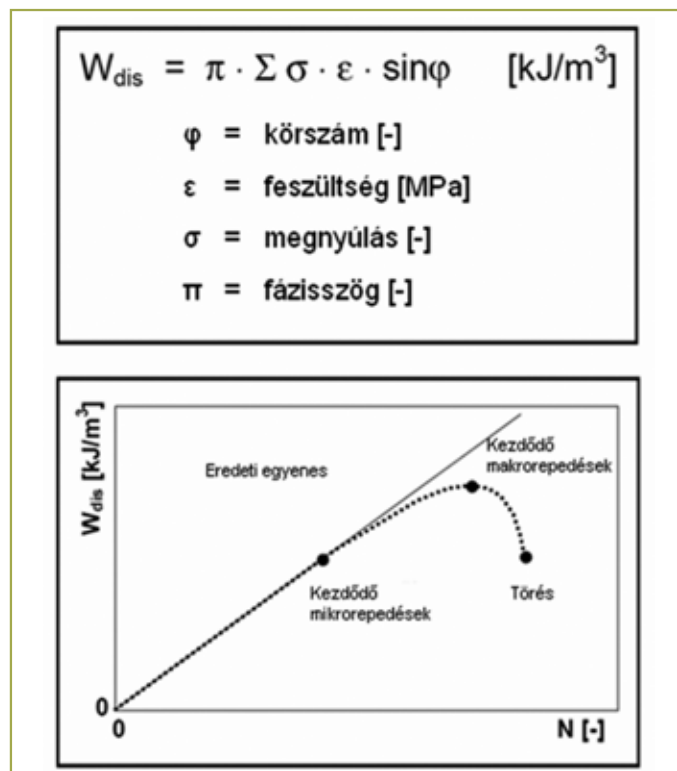
2003. májusában az Európai Szabványügyi Bizottság közzé tette az 12697 sz. „Aszfalt – Vizsgálati eljárás meleg aszfaltok esetén – 24. rész: Fáradással szembeni ellenállás” vizsgálati szabvány tervezetét [2]. Ebben négy dinamikus hajlító vizsgálatot és egy dinamikus hasító vizsgálatot írnak le.

A dinamikus hajlító vizsgálatok típusai (2. ábra):

- kétpontos hajlító vizsgálat trapéz-alakú próbatesten
- kétpontos hajlító vizsgálat hasáb-alakú próbatesten



2. ábra: Aszfalt fáradási kísérletek a prEN 12697-24 szerint, dinamikus hajlító vizsgálat



3. ábra: Disszipált energia és az R energiaviszony

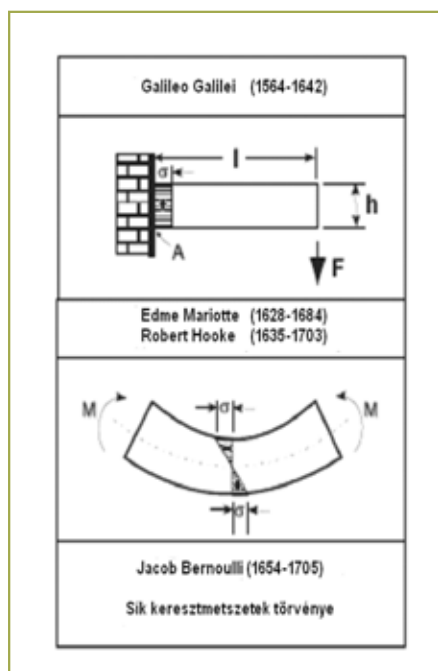
- hárompontos hajlító vizsgálat trapéz alakú próbatesten és
  - hárompontos hajlító vizsgálat hasáb alakú próbatesten.
- Általános esetben a dinamikus hajlító vizsgálatokat ún. útszálabályozott vizsgálatként, a próbatest nyugalmi helyzetéből periodikusan állandó, szinusz-alakú kilendítéssel, meghatározott frekvencia mellett és állandó – de nem mindig előírt – vizsgálati

<sup>1</sup> Fordította: Ureczky Judit, okl. építőmérnök, H-TPA Kft.

<sup>2</sup> Egyetemi tanár, Braunschweigi Műszai Egyetem, Útügyi Tanszék

hőmérsékleten végzik el. Legalább 10, illetve legalább 18 próbatestet kell vizsgálni. Az erőből és a kilendítésből, ismert próbatest-geometria esetén, a klasszikus hajlítási elmélet képleteit használva kiszámítjuk a  $\delta$  feszültségeket, az  $\epsilon$  alakváltozásokat, végül pedig a  $\varphi$  fázisszöget. Ezáltal minden egyes teherismétlődésre meghatározható a disszipált (elnyelt, szétszóródott) energia – tehát a felhasznált mechanikai energiának azt a része, amely hővé alakul (3. ábra).

Rowe [3] megmutatta, hogy a teherismétlődésenkénti disszipált energia összegének felvitele a teherismétlődési számmal (N) szemben lehetővé teszi a fáradási folyamat egyes szakaszainak vizsgálatát (4. ábra). Elméletileg a teherismétlődésenkénti disszipált energiák összegének ki kell adnia az eredeti egyenest, ha nem volt mérhető fáradás. A fáradási vizsgálat kezdeténél valóban ez az eset áll fenn: gyakorlatilag csak nem érzékelhető szerkezeti károsodás lép fel. Egy bizonyos teherismétlődési szám (N) elérése után kezd azonban a kísérletileg meghatározott görbe eltávolodni az eredeti egyenestől. Ezt szokás az aszfalt mikrorepedés-képződései kezdetének nevezni. Végül a görbe eléri a kísérletileg meghatározott disszipált energia maximumát, ami Rowe szerint a makrorepedések kialakulásának kezdetét jelenti. A görbe végén bekövetkezik a tönkremenetel, vagyis a törés. Az egész hihetőnek hangzik. De valóban megengedhető-e a klasszikus hajlítási elmélet képleteinek alkalmazása? Ahhoz, hogy erre a kérdésre választ adhassunk, vissza kell



4. ábra: A hajlítási elmélet fejlődése

nyúlunk a műszaki mechanika egzakt elveihez.

## 2.1 Hajlító vizsgálatok a műszaki mechanika egzakt elveinek háttérével

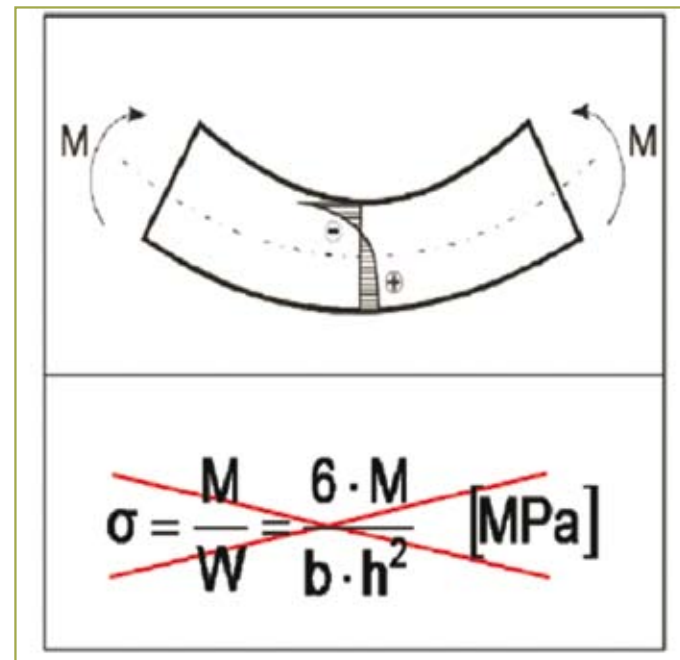
Az olasz fizikus Galileo Galilei már 400 évvel ezelőtt foglalkozott az egyik végén befogott, a másik végén koncentrált erővel terhelt, négyszög keresztmetszetű tartó problémájával. Arra az eredményre jutott, hogy a tartóban ébredő feszültség egyenesen arányos az F erő és az l erőkar szorzatával (tehát a hajlító nyomatékkal), és fordítottan arányos a keresztmetszet szélességének és magasságának szorzatával. A feszültség és az alakváltozás arányának ismeretének hiányában (amelynek létezését csak jóval később Mariotte és Hooke kutatásainak köszönhetjük) Galilei – ami a meghatározó mennyiségek problémáját érinti – egy bár elvileg helyes egyenlethez jut, amelynél azonban az ellenállási nyomatéknál hibás 1/2 arányossági tényezőt használ az 1/6 helyett.

Végül, a hajlított tartó keresztmetszetének állandóságának feltételezése mellett Jacob Bernoulli jutott el a közismert képlethez, amely a hajlításra igénybevett négyszög keresztmetszetű tartó  $\sigma$  peremfeszültségének meghatározására szolgál.

Fel kell tennünk a kérdést, hogy ez a képlet alkalmazható-e a szabvány szerinti fáradási vizsgálatok értékelésénél. Ezzel a kérdéssel részletesebben foglalkoztam a Bitumen folyóirat 2004 tavaszi számában megjelent cikkemben [4]. Itt csak a klasszikus hajlítási egyenlet alkalmazásának legfontosabb feltételeit szeretném röviden felsorolni.

- A próbatest tengelyének egyenesnek kell lennie. Ez a feltétel minden szabvány szerint végzett vizsgálatnál teljesül.
- A próbatest hossza a próbatest magasságának legalább négyszerese legyen: mégpedig a kétpontos hajlítási vizsgálatoknál legalább a négyszerese, többpontos hajlítási vizsgálatoknál legalább nyolcszorosa. Ezek a feltételek nem teljesülnek minden szabványos vizsgálatnál; így a tönkremenetel nem mindig a hajlítás következményeképpen jön létre, hanem gyakrabban a keresztirányú erőtlől függő nyírási igénybevétel miatt, ami azt jelenti, hogy nem számolhatunk a hajlítási egyenletekkel.
- A Bernoulli-feltételek szerint a hajlított tartó keresztmetszetének állandónak, és a próbatest tengelyére merőlegesnek kell lennie. Ezek a feltételek csak akkor teljesülhetnek, ha a Hooke-törvény teljesül, és az aszfalt rugalmassági modulusa nyomásra és húzásra egyforma. Ezt tudomásom szerint még nem igazolták.

Tudjuk azonban, hogy az aszfalt nyomó- és húzószilárdsága nagymértékben függ a hőmérséklettől, és a nyomószilárdság igen alacsony hőmérsékleten könnyen a húzószilárdság nyolcszorosára nőhet. Amennyiben – akár csak távolról is – hasonló eset állna fent a rugalmassági modulussal kapcsolatban is, akkor nem beszélhetünk a keresztmetszet állandóságáról. A nulltengely a semleges vonaltól a nyomott oldal felé tolódik (5. ábra), amelynek következménye, hogy a feszültség a nyomott oldalon sokkal nagyobb, mint a húzott oldalon. Ekkor termé-



5. ábra: Építmények valós feszültségeloszlása

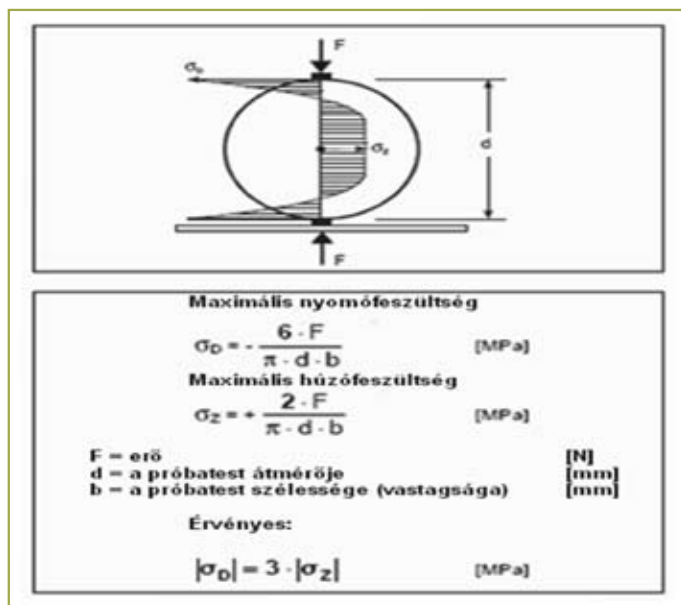
szetesen nem számolhatunk a klasszikus hajlítási elmélet képleteivel.

## 2.2 Dinamikus hasító-húzó vizsgálatok

Engedjék meg, hogy tegyek néhány megjegyzést a dinamikus hasító-húzó vizsgálatokkal kapcsolatban. Ez tulajdonképpen a

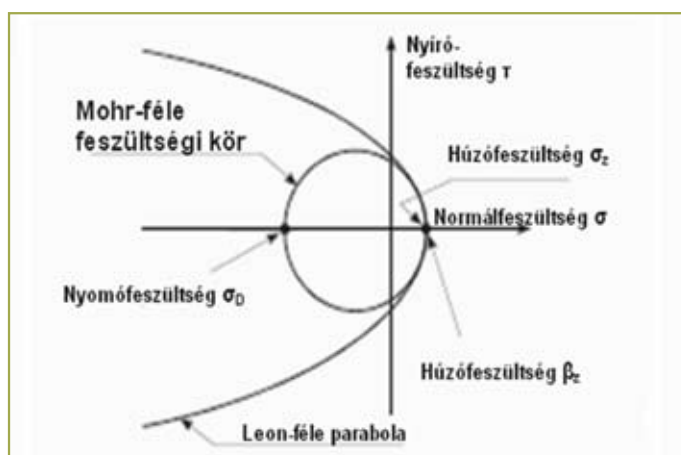


betontechnológiából ered. A vizsgálat során két, a henger alakú próbatestre diametrálisan felvitt, és a próbatest tengelyével párhuzamos terhelési tengely mentén függőleges nyomóerőt fejtünk ki. Ez a próbatest szélein vízszintes nyomóerőt, a közepén pedig megközelítőleg egyenletes eloszlású vízszintes húzófeszültséget eredményez, ahol a korábbi az utóbbi háromszorosa (6. ábra).



6. ábra: Hasító-húzó vizsgálat

Az építőanyagok vagy építési elemek spontán tönkremenetele közismerten azon a tényen alapul, hogy az igénybevételek eléri az építőanyag nyírószilárdságát vagy húzószilárdságát. Leonnak [5] köszönhetjük, hogy mindkét tönkremeneteli mód leírható egyetlen szilárdsági hipotézissel. A róla elnevezett parabola (7. ábra) egyfelől növekvő nyomó igénybevételnél növekvő nyírószilárdságot ad eredményül, másfelől azonban metszi a pozitív normál feszültség tengelyt, ezért bizonyos igénybevételi esetekben a tiszta húzási törést is magyarázza.



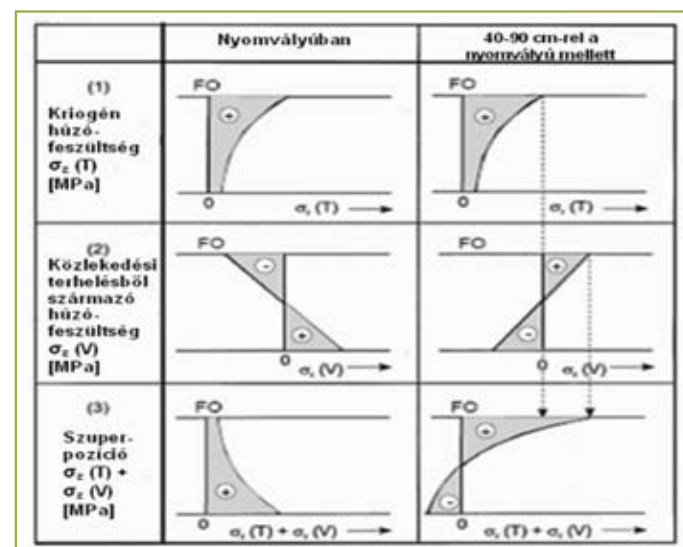
7. ábra: A Leon-féle parabola

Tisztán matematikailag megmutatható, hogy húzási törés hasító vizsgálatnál csak akkor léphet fel, ha a nyomószilárdság és a húzószilárdság hányadosa  $c \geq 8$  [6]. Ez azonban aszfaltnál csak nagyon alacsony ( $T = -25^\circ\text{C}$  alatti) hőmérsékleten lép fel. Még ha a viszkoelaszticitás ekvivalencia elve tartalmazza is az időt és a hőmérsékletet - amint az a szabványtervezetben szerepel - fagyáspont alatti hőmérsékleten nem felel meg a fizikailag kor-

rekt vizsgálati eljárásnak. Ha azonban mégis a hasító-húzó vizsgálat mellett szólunk, tudományosan igazolni kell, hogy az az aszfalt korrekt értékeléséhez használható.

### 3. Az aszfalt időjárási forgalmi igénybevétele

A szabványtervezetben leírt vizsgálati eljárás elegendő ahhoz, hogy az aszfalt, mint terhelés - vagyis forgalom - alatti fáradási viselkedését megfelelően megbízhatóan leírja, amennyiben sikerül a vizsgálati és értékelési modalitásokat úgy kialakítani, hogy az általam leírt fenntartások tárgytalanná válnak. Ehhez például célszerű lehet a feszültségeket, alakváltozásokat és fáziszögeket a végeelem módszer segítségével kiszámítani, hogy ezáltal a disszipált energia becslésére megbízható kiinduló értékeket kapjunk. Ez önmagában azonban nem elég ahhoz, hogy az aszfaltút terhelés és kényszer - vagyis forgalom és időjárás - alatti terhelését megbecsüljük. Ha nincs forgalom, akkor is létrejönnek a burkolatban alacsonyabb hőmérsékleten a lehűlés következtében kriogén húzófeszültségek. Ezek a burkolat felületén - a hőmérsékleti gradiens következtében - érik el maximumukat, amely a mélység növekedésével a burkolat felülete alatt degresszív módon csökken (8. ábra). Ezek a kriogén húzófeszültségek a forgalom hatására forgalmi terhelési hajlító feszültségekké alakulnak át. A burkolat felszínén a keréknyomban ezek a hajlító feszültségek nyomó komponenssel, míg az alján húzó komponenssel rendelkeznek. Más a helyzet a terhelési tengelyt területén kívül, a keréknyomtól 40 és 90 cm távolságban. Ott a burkolat felületén húzó, a burkolat alsó részén pedig nyomó igénybevétel alakul ki. Amennyiben a forgalmi igénybevételből



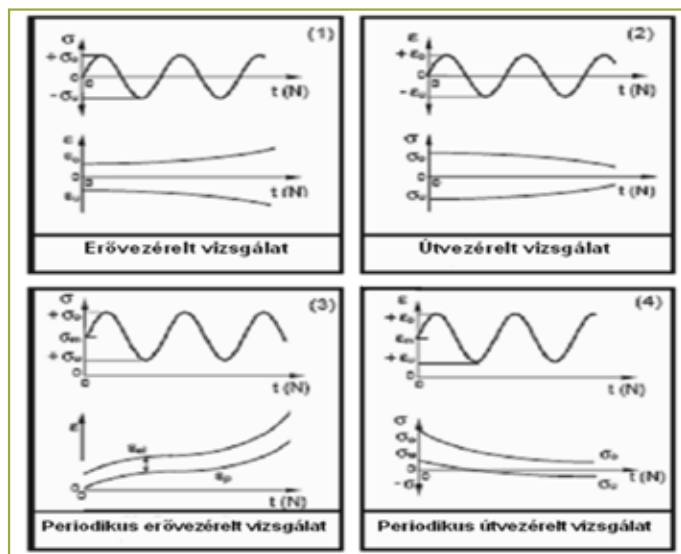
8. ábra: A kriogén  $\sigma_z(T)$  és a közlekedési terhelésből származó  $\sigma_z(V)$  húzófeszültségek aszfalt burkolat esetén, a mélység függvényében

eredő húzó és nyomófeszültségekhez hozzáadódnak a kriogén feszültségek, akkor az a keréknyom területén a felszínen húzófeszültségek jelentős csökkenését, alul pedig a húzófeszültségek növekedését eredményezi.

Más a helyzet a terhelési tengelyen kívüli területen, a keréknyomtól 40 ill. 90 cm távolságban. Ott a burkolat felületén a forgalmi terhelés hatására húzó, míg a burkolat alján nyomó igénybevétel keletkezik. Ha a forgalmi terhelésből eredő húzó és nyomófeszültségekhez hozzáadódnak a kriogén feszültségek, akkor a keréknyomok mellett a felszínen jelentősen megnő a húzófeszültség, jöllehet a forgalmi terhelés által keletkezett hajlító feszültség a keréknyomon kívül kisebb értékeket ér el, mint azon belül. E terhelés ezen formája az aszfaltburkolatokban a keréknyomokkal



párhuzamos hosszirányú repedéseinek – tehát a tipikus fáradási repedések - kialakulásának oka, amelyek a burkolat felületén kezdődnek, és onnan haladnak tovább lefelé. Megfelelően alacsony hőmérsékleten, amely a fáradási repedések fellépésének feltétele – magas hőmérsékleten a fáradás alakváltozássá alakul –, a burkolat felületén megfigyelhető húzófeszültségek ennek következtében a kriogén feszültség, mint alsó küszöbérték, és a kriogén feszültség és a forgalom által létrejövő húzófeszültség összegéből, mint felső küszöbérték közötti tartományban mozognak. Az aszfalt burkolatban kialakuló fáradási viselkedés gyakorlati megközelítéséhez tehát a szabványtervezetben leírt váltakozó igénybevétel helyett olyan periodikus vizsgálatokat kellene elvégezni, amelynél az igénybevétel nagysága egy alsó és egy felső érték között ingadozik anélkül, hogy közben előjelet váltana (9. ábra).

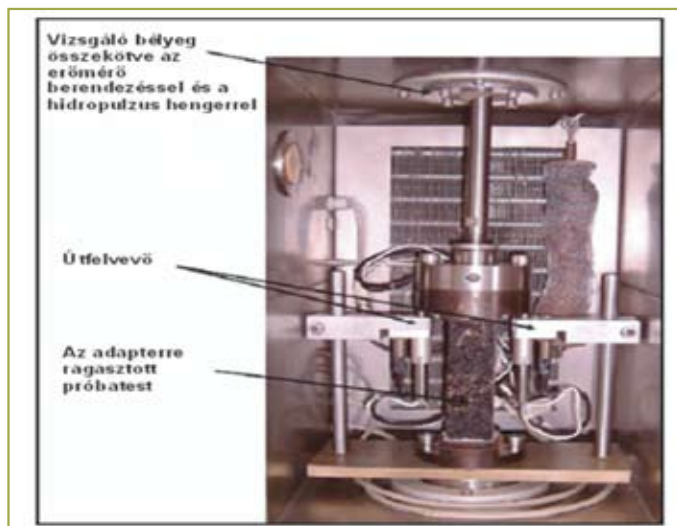


9. ábra: Hagyományos és a gyakorlatnak megfelelő fáradási vizsgálatok aszfalton

Ezek alapvetően erő-, vagy útszabályozott vizsgálatok lehetnének. Gazdasági megfontolásokból azonban az erőszabályozott vizsgálatot célszerű előnyben részesíteni, mert az útszabályozott vizsgálat a relaxációs folyamat következtében sokszorosan több időt vesz igénybe. Alkalmanként az általunk kifejlesztett erőszabályozott egytengelyű húzó-duzzasztó vizsgálat ellen hozzák fel, hogy túlságosan költséges. Ez azonban nem igaz: a fáradással szembeni állékonyság vizsgálattechnikai ráfordítása a mi eljárásunkkal csak három gátolt hosszirányú alakváltozású hűtési vizsgálat a kriogén húzófeszültségek meghatározására, ill. három-három húzó-duzzasztó vizsgálat elvégzése 4 különböző vizsgálati hőmérsékleten. Összesen tehát 15 próbatetest szükséges. Ez tehát azonos mennyiség – de inkább kevesebb – mint a szabvány szerinti hajlító vizsgálatoknál. Ezzel szemben viszont az eredmények információ tartalma sokkal nagyobb, mert azok az aszfalt fáradási viselkedésének hőmérsékletfüggőségét is leírják.

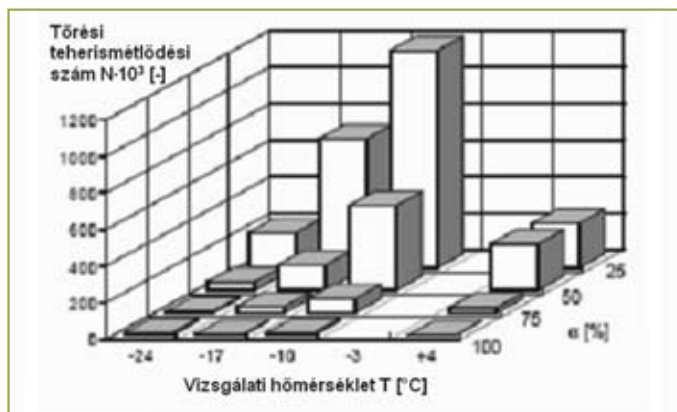
### 3.1 A periodikus húzóvizsgálatok eredményei

Az itt bemutatott ötlet kísérleti ellenőrzéséhez a Braunschweigi Műszaki Egyetem Útügyi Tanszékén kifejlesztettek egy szervo-hidraulikus vizsgáló készüléket (10. ábra), amely lehetővé teszi, hogy a hasáb alakú aszfalt próbatestet  $T = +20\text{ °C}$  és  $T = -40\text{ °C}$  között periodikus húzóvizsgálatnak vessük alá. A fáradással szembeni ellenállást értékelő jellemző ezeknél a vizsgálatoknál a próbatest tönkremenetelig mérhető teherismétlődési szám – vagyis a törési teherismétlődési szám (N).



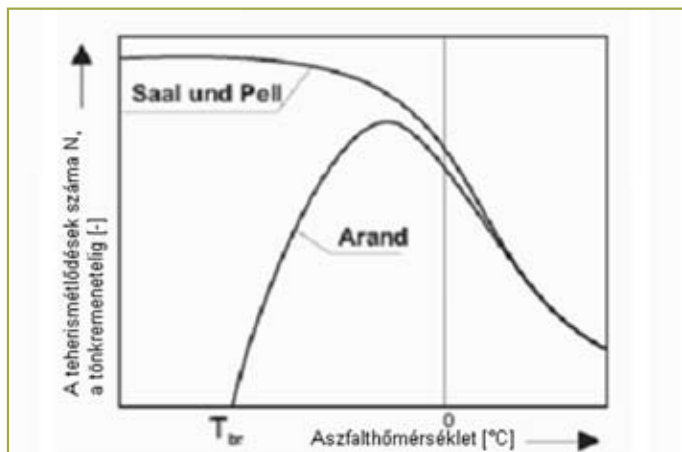
10. ábra: Szervo-hidraulikus vizsgáló berendezés

A 11. ábrán látható a B65-ös bitumennel (ma B50/70) készült 0/11 aszfaltbeton törési teherismétlődési száma – a T vizsgálati hőmérséklet, és a (burkolat felületén mért) forgalomfüggő húzófeszültségek kvantilis értékének függvényében.  $\alpha = 100\%$  megfelel az 5,75 tonnás kerék hatására létrejövő lehetséges legnagyobb húzófeszültségnek.  $\alpha \leq 100\%$  reprezentálja a kisebb kerékterhelésű könnyebb tehergépjárműveket. Ebből az ábrából két következtetést vonhatunk le: egyszer látható, hogy a levehető kerékterheléssel a törési teherismétlődési számok aránytalanul nagymértékben nőnek; másrészt látható, hogy a törési teherismétlődési számok – a kerékterheléssel nagyságától függetlenül – normál keménységű bitumennel készült aszfaltbeton esetében kb.  $T = -10\text{ °C}$ -os vizsgálati hőmérsékleten érik el maximumukat. Alacsonyabb hőmérsékleten a kriogén húzófeszültségek jelentős növekedése a törési teherismétlődési számok jelentős csökkenését eredményezi.



11. ábra: Teherismétlések száma a tönkremenetelig, 0/11-es aszfalt és B65-ös bitumen esetén

Ha elvonatkoztatunk a törési teherismétlődési szám és a vizsgálati hőmérséklet közötti, a 11. ábrán látható összefüggésektől, mégpedig úgy, hogy a forgalom által előidézett húzófeszültségek normált – vagyis a mindenkor maximum értékre vonatkoztatott – értékeit kiszámítjuk, adódik a 12. ábrán látható alsó görbe. A kriogén feszültségek figyelembe vételénél tehát a tönkremenetelig elviselhető teherismétlődési szám – ellentétben Saal és Pell által a kriogén húzófeszültségeket nem figyelembe vett kijelentéseivel – egy maximális érték elérése után tovább csökkenő hőmérséklet mellett jelentősen csökken egészen addig, amíg a hűtési vizsgálatnál meghatározott  $T_{br}$  törési feszültség el nem éri az  $N=0$  értéket.



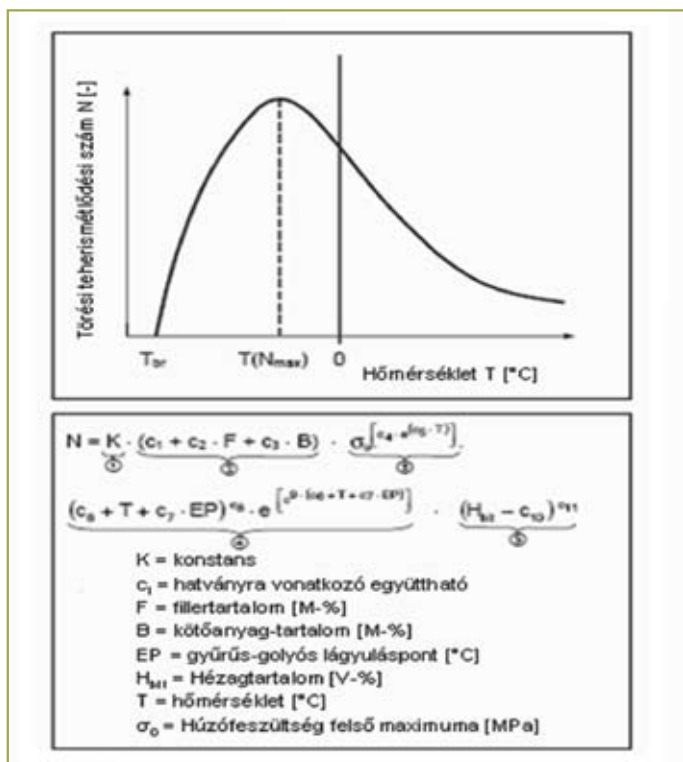
12. ábra: A teherismétlések száma (N) a tönkremenetelig, mechanikai, valamint mechanikai és kriogén húzófeszültségek hatására, aszfalt esetén a T hőmérséklet függvényében

### 3.2 A törési teherismétlődési szám becslésének algoritmusai

Egy a Braunschweigi Műszaki Egyetem Útügyi Tanszékén végzett kísérletsorozat lehetővé tette, hogy megpróbáljuk a kísérletileg meghatározott eredményeket egy meghatározott algoritmus segítségével matematikailag közelíteni. Ezeknek a vizsgálatoknak az eredményét a 13. ábrán látható képlet szemlélteti, amely tisztán 5 különböző tagra bontható.

A K konstans (1. tag) együttthatók és kitevők mellett a választott függvénynek a kísérletileg meghatározott adatokhoz való mennyiségi illesztésre szolgál, ami célszerűen az evolúciós stratégia segítségével történik.

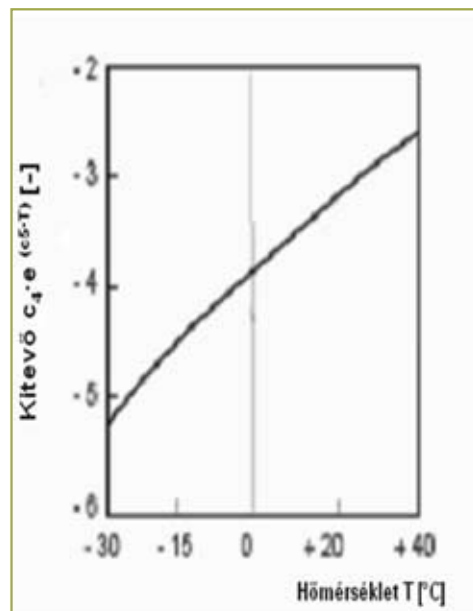
A második, és kerek zárójelben lévő tag jellemzi a töltőanyagoknak és bitumentartalomnak a tönkremenetelig elviselhető teherismétlődésre tett hatását, ahol a  $c_2$  és  $c_3$  tényezők számos vizsgálatnál pozitív előjelűek voltak, ami azt jelenti, hogy a magasabb töltő-



13. ábra: A teherismétlések száma a tönkremenetelig, 0/11-es aszfaltbeton esetén, a fillertartalom, kötőanyag-tartalom, lágyuláspont, hézagtartalom, hőmérséklet és a húzófeszültség maximumának függvényében

anyag tartalom és a magasabb kötőanyag tartalom a hengerelt aszfalt fáradási ellenállását elméletileg növeli. A határokat az határozza meg, hogy a viszonylag magas habarccstér fogat hátrányosan befolyásolhatja a hengerelt aszfalt alakváltozási ellenállását.

A harmadik tag a  $\sigma_0$  húzó-duzzasztófeszültség felső küszöbértékével alakpént szolgál, és a szögletes zárójelbe tett kitevő tartalma



14. ábra: Az aszfalt fáradási viselkedésének hőmérsékletérzékenysége

tartalmazza a kriogén és a forgalomból származó húzófeszültséget. Mivel a  $c_4$  paraméter negatív előjelű és a zárójelben lévő kifejezés biztosan  $>1$ , a  $\sigma_0$  húzófeszültség növekedése a törési teherismétlődési szám aránytalanul nagymértékű csökkenését eredményezi. Az a tény, hogy a kitevő a  $\sigma_0$  alapra  $T = +40^\circ\text{C}$  hőmérsékleten  $-2$  és  $-3$  értékeket vesz fel, és  $T = -30^\circ\text{C}$ -os hőmérsékleten  $-5,0$  érték alá csökken ezen kívül azt mutatja, hogy az aszfalt fáradással szembeni érzékenysége a hőmérséklet csökkenésével erősen nő (14. ábra). Az egyenlet negyedik tagja a bitumen viszkozitásának – a gyűrűs-golyós lágyuláspont segítségével – és a hőmérsékletnek a törési teherismétlődési számra tett együttes hatását írja le. Ez adott hőmérsékleten mértékadó a törési teherismétlődési szám maximumának kialakulása szempontjából.

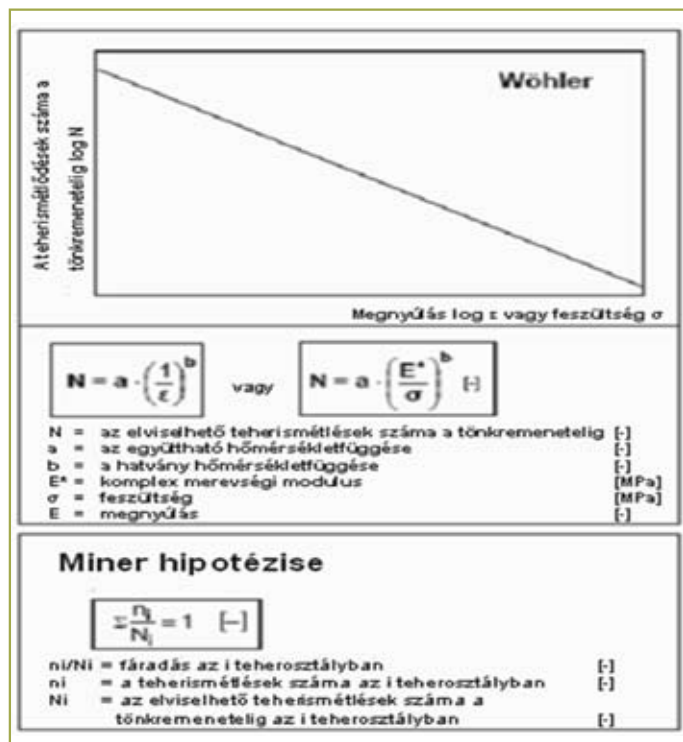
Az egyenlet ötödik, és utolsó tagja lehetővé teszi az aszfaltbeton  $H_{bit}$  hézagtartalmának figyelembe vételét a törési teherismétlődési szám meghatározásánál, miközben a  $c_{10}$  paraméter  $c_{10} = 1,0$  és  $c_{10} = 2,2$  közötti, átlagosan  $c_{10} = 1,5$  értéket vesz fel; ennél a hengerelt aszfalt hézagtartalma csak nehezen tud kisebb lenni. Az a tény, hogy a  $c_{11}$  kitevő mindig negatív és, ha  $c_{11} = -2$  azt jelenti, hogy a nagy hézagtartalmak negatívan befolyásolják a fáradással szembeni ellenállást.

A 13. ábrán látható egyenletet kísérleti eredmények analitikus leírására a kutatómunkák során rendszeresen alkalmaztuk. Ennek során a meghatározott, a közelítés helyességét jellemző korrelációs együtttható kivétel nélkül  $r=0,91$  fölött, általában  $R=0,98$  és  $r=1,00$  között volt. Célszerű lenne egy nagyvolumenű kutatási munka keretében az itt felsorolt meghatározó tényezőkhöz szisztematikus variációban meghatározni a függvények együttthatóit és kitevőit ahhoz, hogy diszkrét aszfaltok fáradással szembeni ellenállását különösebb kísérleti ráfordítás nélkül előre meg tudjuk becsülni.

### 3.3 Igazolás és alkalmazhatóság

Az aszfalt fáradásának húzó-duzzasztó vizsgálattal történő meghatározásának témakörében kidolgozott elméleti igazolások alapján készült egy számítási program, amely lehetővé teszi a bitumen keménységének a különböző felépítésű és különböző vastagságú aszfalt burkolatok fáradási viselkedésére tett hatásának egy elméleti használati időtartam formájában történő becslését az aljzat teherbírásának, a forgalmi terhelés és a burkolat hőmérsékletének

függvényében [7]. A modulokból felépülő program alapját képezik az óránként fellépő általános sugárzások, léghőmérséklet, relatív nedvesség tartalom és szélesség, valamint az aszfalt hőtechnikai jellemzői alapján meghatározott burkolathőmérsékletek, és az azokból levezethető  $\sigma_z(T)$  kriogén húzófeszültségek, valamint a BISAR-programok segítségével kiszámított, forgalomtól függő  $\sigma_z(V)$  húzófeszültségek. Az elméleti használati idő „év” egységben a Miner-féle hipotézis alapján történik (15. ábra).

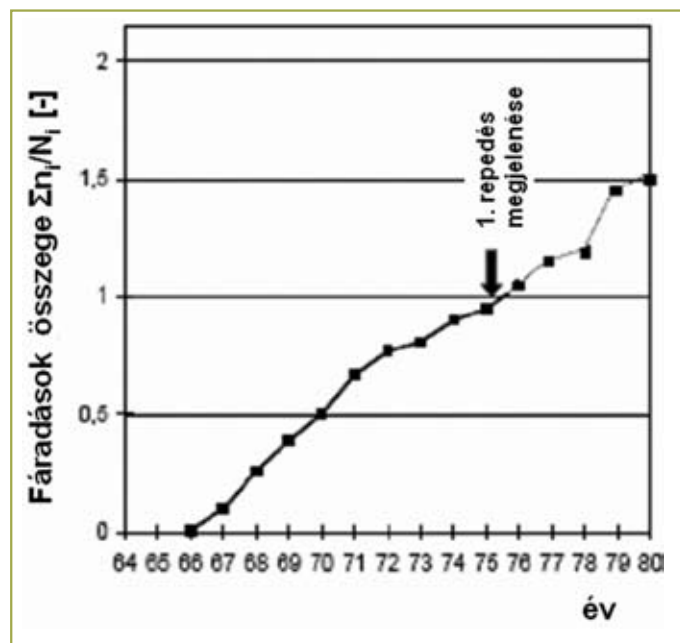


15. ábra: A fáradás elve

A fáradási modell alkalmazása 11 Hessen tartománybeli út közül 10 esetben megegyezett a repedésképződések gyakorlati megfigyeléseinek számítási eredményeivel, amint az példaképpen a 16. ábrán egy út esetében látható. Pontosán kiszámítottuk azt a tavaszt, amikor az első repedés fellépett (nyíllal jelölve). A megmaradt 11. esetben a forgalmi terheléssel összehasonlított eredmények utólag hibásnak bizonyultak: Az út egy kőbányába vezetett, amelybe a tehergépkocsik üresen hajtottak be, majd megrakodva hajtottak ki, így az egymással szemben lévő forgalmi sávok teljesen más terhelést kaptak. Ezen peremfeltételek ismeretében a várható használati idő számításával történő becslése nem lehetett helytálló. Joggal állapíthatjuk meg tehát, hogy a periodikus húzóvizsgálatok kifejlesztésének alapjául szolgáló elméleti megfontolások beigazolódtak, és a gyakorlatban alkalmazhatóak.

#### 4. A bitumen viszkozitásának és a hézagtartalomnak a fáradásra tett hatása

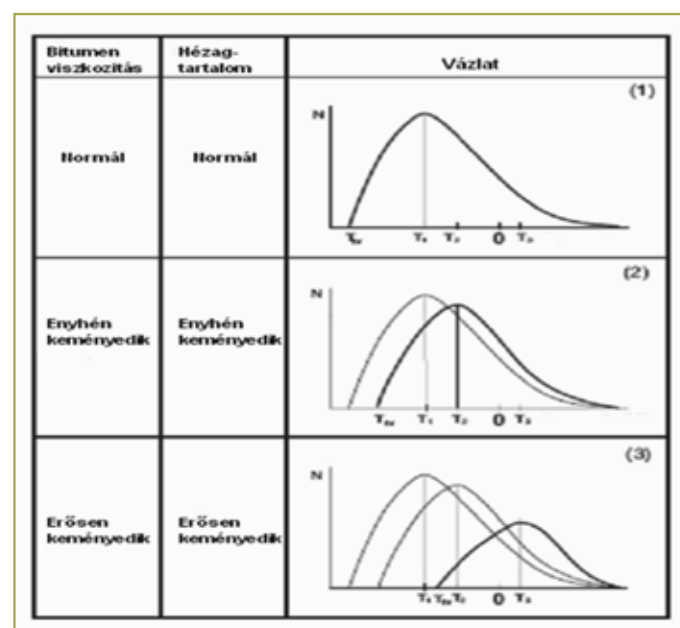
A 17. ábra alapján szeretném megmutatni, hogy milyen hatása van a bitumen viszkozitásának és a hézagterfogatnak az aszfalt fáradására. Amint azt az első sorban láthatjuk, a normál keménységű bitumennel és normál hézagtartalommal készült aszfaltbeton egy meghatározott, fagyponthoz alatti  $T_1$  vizsgálati hőmérsékleten tudják elviselni a maximális teherismétlődést. Az ún. törési hőmérsékleten ( $T_{br}$ ) az elviselhető teherismétlődés a tönkremenetelig nullához tart. Ha a bitumen mérsékelten keményedik, akkor a törési teherismétlődési szám (N) maximuma egy magasabb hőmérsékleti tartományba tolódik, és ezzel egyidejűleg a



16. ábra: A fáradások összege évente, egy németországi úton, az első felismerhető repedésképződés időpontjában

rosszul tömöríthető aszfalt kötőanyagának keményedése miatt mérsékelten megnövekedett hézagtartalom következtében valamivel alacsonyabb is lesz (17. ábra, 2. sor).

Ha a bitumen jelentősen keményedik, akkor az elviselhető teherismétlődési szám maximuma még a fagyáspont fölötti hőmérsékleti tartományba is eltolódhat. A  $T_1$  hőmérsékleten – ez az a hőmérséklet, amelynél a normál keménységű bitumennel készült, és normál hézagtartalmú aszfalt a legnagyobb törési teherismétlődési számot (N) tudja elviselni – a jelentősen felkeményedett kötőanyagot tartalmazó, és jelentősen megnövekedett hézagtartalmú aszfaltnál a törés (repedésképződés) már spontán módon az első terhelés felvitelekor megtörténhet. Ezen kívül a törési teherismétlődési szám maximuma a normál keménységű bitumennel készült aszfalttal összehasonlítva, a rossz tömörítés miatt megnőtt hézagtartalom miatt, szignifikánsan alacsonyabb (17. ábra, 3. sor).



17. ábra: A teherismétlés (N) száma az aszfaltbeton tönkremenetelig, a bitumen keménysége és a hézagtartalom függvényében



Ezen a példán látható, hogy elengedhetetlenül szükséges az aszfalt fáradással szembeni ellenálló képességét különböző hőmérsékleteken vizsgálni, ha azt szeretnénk elérni, hogy a várható használati viselkedés megbízható legyen. Ez különösen akkor fontos, ha a bitumen viszkozitása optimálisan megfeleltethető a régió időjárási feltételeinek, ezáltal megteremthetők az igazolás és az alkalmazhatóság [7] megfontolásainak feltételei.

## 5. Összefoglalás

A műszaki mechanika egzakt elméletei alapján láthattuk, hogy az európai szabványtervezetben leírt hajlító vizsgálat és a dinamikus hasító-húzó vizsgálat alkalmazásával szemben olyan kétségek merülnek fel, amelyek azon a tényen alapulnak, hogy a hajlító vizsgálatok kiértékelésénél a klasszikus hajlítási elmélet képleteit használják anélkül, hogy megvizsgálták volna, hogy ez megengedhető-e, és hogy a dinamikus hasító-húzó vizsgálatot olyan hőmérsékleten végzik, amelynél az alkalmazhatóság elméleti feltételei nem teljesülnek. Emiatt a Braunschweigi Műszaki Egyetem Útügyi Tanszéke kifejlesztett egy olyan aszfalt periodikus húzóvizsgálatot, amely lehetővé teszi, hogy nemcsak a forgalmi igénybevételeket, hanem az időjárás hatását is figyelembe vegyük az aszfalt fáradási viselkedésének becslésénél. A vizsgálati eljárást diszkrét utak viselkedése alapján a gyakorlatban igazoltuk és alkalmazhatónak találtuk. A periodikus húzóvizsgálat ezen kívül megfelel a vizsgált anyag igénybevételi állapotához tartozó homogenitási követelményeknek, amelyek csak akkor adóttak, ha a próbatest minden pontjában ugyanaz a feszültség-alakváltozási állapot van [8]. Reméljük, hogy az itt bemutatott gondolatok bekerülnek az Európai Szabványba. Megköszöném, ha ez irányú törekvésemet Önök is támogatnák.

## 6. Irodalom

- [1] Saal, R.N.J.; Pell, P.S.: Fatigue of Bituminous Road Mixes. Kolloidzeitschrift 1971 (1960) 1, 61 – 71
- [2] prEN 12697-24: Bituminous Mixes – Test methods for hot mix asphalt – part 24: Resistance to fatigue. European Committee for Standardisation, Brussels May 2003
- [3] Rowe, G.M.: Performance of Asphalt Mixtures in the Trapezoidal Fatigue Test. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 62 (1993) 344 – 385
- [4] Arand, W.: Zur prüftechnischen Ansprache der Ermüdungsbeständigkeit von Asphalten. Bitumen 66 (2004) 1, 2 – 7 und 2, 70 – 75
- [5] Leon: Über das Maß der Anstrengung bei Beton. Ingenieur Archiv, IV. Band, 1933
- [6] Arand, W.: Neue Überlegungen zur Anwendbarkeit des Spaltzugversuches auf Asphalte. Die Asphaltstraße – Das stationäre Mischwerk 24 (1990) 6, 41 – 43
- [7] Arand, W.; Lorenz, H.: Einfluß der Bitumenhärte auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltbefestigungen unterschiedlicher Dicke in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit der Unterlage, der Verkehrsbelastung und der Temperatur; Teil 2. Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“ des Bundesministers für Verkehr, Heft 696, Bonn-Bad Godesberg 1995
- [8] Des Croix, P.: New evaluation performance through mechanical fatigue testing. Ninth International Conference of Asphalt Pavements, Copenhagen 2002. St. Paul, MN: International Society for Asphalt Pavements, 2003, Paper No. 3: 3 – 8, 10 pages.

## Summary

### Fatigue of asphalt at low temperatures

A special periodical tensile test of asphalt specimens was developed by the Technical University of Braunschweig, Department of Roads which makes possible the consideration not

only the traffic effects but the effects of climate influence in the prediction of asphalt fatigue. The practical verification of new method based on behaviour of several roads. The periodical tensile test is fit the homogeneity criteria of the examined materials in special stress state. These homogeneity criteria are given if the stress-strain condition is same in every point of test specimen.

## PÁLYÁZATI KIÍRÁS

A Közúti Szakemberekért Alapítvány Kuratóriuma a fiatal mérnökök képességfejlesztésének támogatása, munkájuk hatékonyságának ösztönzése érdekében megalapítja

„Az év fiatal mérnöke” cím díjat, amelyet pályázat útján lehet kiérdemelni.

A díjra minden olyan fiatal (35 év alatti) mérnök pályázhat, aki a közúti szakterületen (kivitelezőként, tervezőként, lebonyolítóként, közútkezelőként, kutatóként) dolgozik és az elmúlt évben önálló munkájáért értékelhető létesítmény tervezését, lebonyolítását, kivitelezését végezte, vagy más mérnöki feladatot teljesített, amely országos megmérettetésre alkalmas.

A pályázatokat az Alapítvány Kuratóriuma értékeli és minden évben 3 főnek „Az év fiatal – tervező, kivitelező, lebonyolító, stb. – mérnöke” cím odaítéléséről dönt. „Az év fiatal – ..... – mérnöke” cím átadására az évenkénti Útügyi Napokon kerül sor.

„Az év fiatal mérnöke” elismerő díszoklevelet kap és egyenként 150 000,- Ft – 150 000,- Ft anyagi elismerésben részesül pályázatának a szakmai közvélemény előtti ismertetése mellett.

„Az év fiatal mérnöke” címre történő pályázat tartalmi követelménye:

- pályázhat minden 35 év alatti mérnök, aki a közúti szakterületen kivitelező, tervező, lebonyolító, közútkezelő, vagy kutatói munkát végez és egy mérnöki létesítményhez kötődő teljesítményét úgy lehet értékelni, hogy méltó a cím odaítélésére.
- A pályázatnak részletesen tartalmaznia kell a fiatal szakember pályafutásának lényeges állomásait, valamint az utolsó év olyan kiemelkedő létesítmény, tevékenység leírását, amely a cím odaítélésére érdemesnek tartható.
- A pályázat minimum öt, maximum tíz oldal terjedelmű legyen, amelyből megítható a pályázó egyéni teljesítménye. Tetszés szerinti mellékletekkel színesebbé lehet tenni a pályázatot (fénykép, egyéb dokumentum).
- A pályázathoz csatolni kell a pályázó munkahelyi vezetőjének véleményét a fiatal mérnök tevékenységéről és a pályázat minőségéről.
- A pályázatot minden évben – először 2007. évben – augusztus 13-ig kell beküldeni postán, vagy elektronikus levelezéssel a Közúti Szakemberekért Alapítvány címére: 1141 Budapest, Álmos vezér köz 5. iroda@finnut.hu

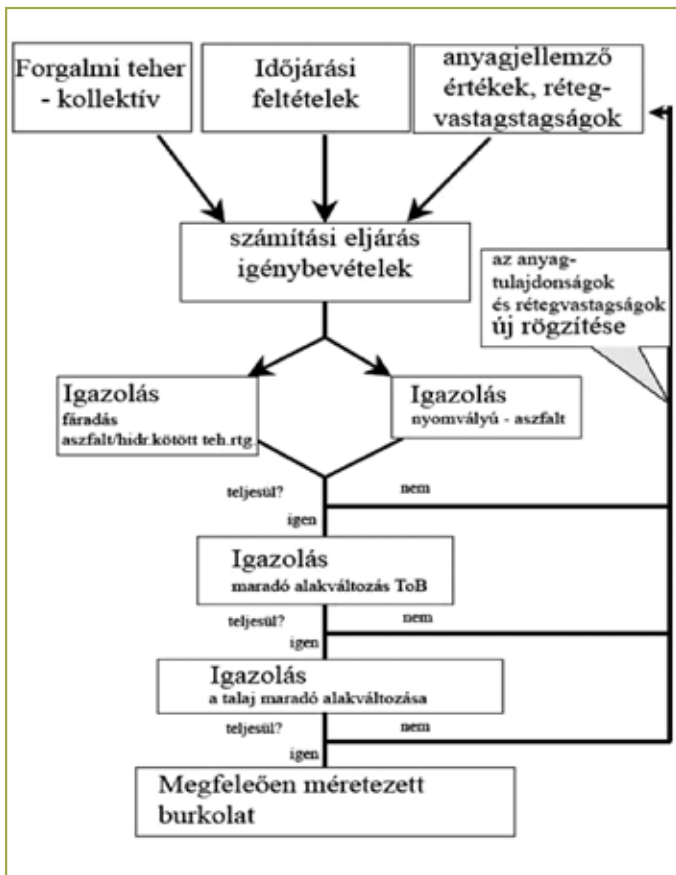
Budapest, 2007. június 06.

Közúti Szakemberekért Alapítvány  
Kuratóriuma



## 1. Előzetes megjegyzések

Az útburkolatok méretezése Németországban eddig az RStO (Közlekedési felületek szabványosítására vonatkozó irányelv) alapján történt, ami azt jelentette, hogy a burkolatokat előre megadott terhelési osztályok (építési osztályok), a helyi adottságok és időjárási feltételek szerint csoportosították. Az anyagtulajdonságok figyelembevételi lehetőségeinek javításához, valamint az időjárási viszonyok figyelembe vételére a Drezdai Műszaki Egyetem Útépitési Tanszéke kidolgozott egy számítási eljárást az aszfaltburkolatok méretezésére, és elkészítette ennek a programját is. Az eljárás az 1. ábrán látható.



1. ábra: Az aszfaltburkolatok méretezésére szolgáló számítási eljárás sematikus ábrázolása

Az eljárás bemenő adatai a forgalmi terhelés figyelembe vételével a mért tengelyterhelés-kollektíva (a tengelyterhek és a hozzájuk tartozó előfordulási gyakoriság az adott osztályon belül), az időjárási viszonyok (a hőmérséklet lefolyása az aszfaltrétegben, és a hozzá tartozó előfordulás gyakorisága az év során), valamint az anyagjellemző értékek (rugalmas anyagjellemzők) és a kiindulási rétegvastagságok. Ezek alapján a program meghatározza azokat az igénybevételeket, amelyek az aszfaltban és a hidraulikus kötőanyagokkal készült aszfalt teherhordó rétegekben a fáradással szembeni ellenállás igazolásához szükségesek, és amelyeket az aszfalt nyomképződésének és a kötőanyag nélküli teherhordó rétegek és aljtalaj maradó alakváltozásának meghatározásánál használnak. Iteratív eljárással meghatározhatók azok az anyagjellemzők és/vagy rétegvastagságok, amelyek alkalmazásával a

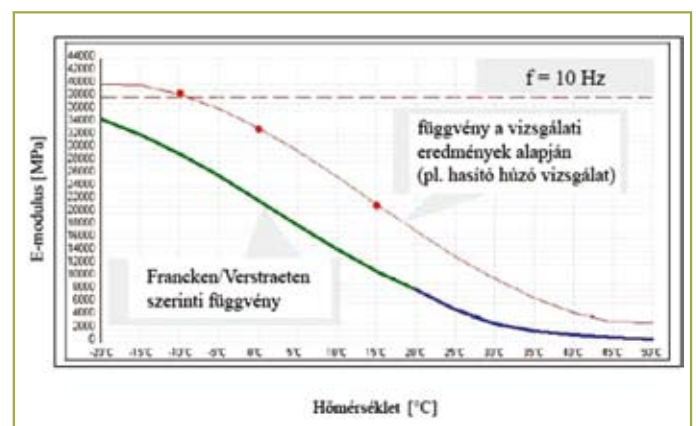
burkolat megfelelően lesz méretezve a tervezett használati időtartam alatt. Az eljárásnak az RStO rétegvastagságainak bizonyos feltételeire történő kalibrálásával továbbá abból indulhatunk ki, hogy a burkolatok méretezése az RStO biztonsági szintjének analógiájára történik. Ezt az eljárást az FGSV 4.5 „Méretezés” munkacsoportja egy irányelv első tervezetében (Aszfaltburkolattal ellátott közlekedési felületek felépítményének méretezése számítással”, RDO - Asphalt) foglalta össze. A BMBF (Német Szövetségi Oktatási és Kutatási Minisztérium) által finanszírozott „Tartós útépités, méretezési modell összekötő projekt kis és közepes útépitő vállalatok versenyképességének támogatásához” keretében elkészült a nyomvályúképződés és repedésképződés előrejelző modellje, amelyet a szerkezeti állapot előrejelzéséhez használhatunk, amely a megfigyelési szakasz alapján történő megfelelő kalibrálás mellett megadhatja a szerkezeti állapot előrejelzését. Erre építve a BMVBS (Német Szövetségi Közlekedési, Építési és Városfejlesztési Minisztérium) által finanszírozott 04/199/2004/ARB „Az aszfalt burkolatok hátralevő élettartamának előrejelzése” c. kutatási téma keretében lehetőség nyílt ezen eljárás kalibrálására a szerkezeti állapot és a fáradási repedésképződés értékeléséhez.

## 2. Anyagi és rétegparaméterek

Az itt tárgyalt probléma a repedések és nyomvályúk keletkezésével kapcsolatos, számítással meghatározható paraméterekkel foglalkozik.

### 2.1 Repedésképződés (fáradás)

Az anyag- és rétegparaméterek meghatározásához és figyelembe vételéhez először is ki kell dolgozni a releváns anyag- és rétegparaméterek meghatározásának, és azok a méretezési ill. előrejelzési eljárásba való beültetésének módszerét. Az anyag- és rétegparaméterek meghatározásához szükséges a felhasználásra szánt aszfaltból vett próbatest vizsgálata. Célszerű legalább 9 vizsgálandó próbatestet készíteni ahhoz, hogy statisztikailag alátámasztva meghatározhassuk a rugalmassági modulus- és a



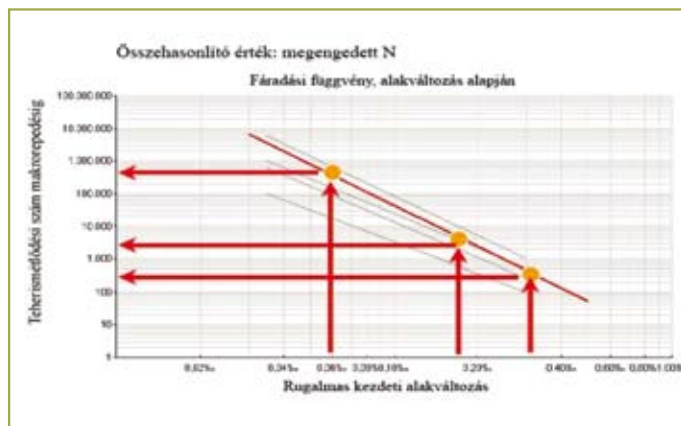
2. ábra: Az E-modulus-függvény meghatározása a hasító-húzó vizsgálatok eredményeiből

<sup>1</sup> Fordította: Ureczky Judit, okl. építőmérnök, H-TPA Kft.

<sup>2</sup> okl. építőmérnök, tanszékvezető egyetemi tanár, Drezdai Műszaki Egyetem, Útépitési Tanszék

fáradási függvényeket. Hasító-húzó vizsgálatok alapján legalább 3 különböző vizsgálati hőmérséklethez (többszintű vizsgálatok) 3-3 E-modulust kell meghatározni. Ezeket az értékeket használhatjuk az E-modulus-függvény meghatározásához (2. ábra). Ez a függvény (az ábrán pirossal jelölve) grafikailag illeszthető ismert – pl. a Francken és Verstraeten eljárásából kiszámított – függvényekre (a 2. ábrán zölddel/kékkel ábrázolva). Az aszfaltrétegek igénybevételének kiszámítása ezen, a vizsgálati eredményeken alapuló függvény alapján történhet.

Azzal a feltétellel, hogy ezek E-modulus meghatározásához szükséges többszintű vizsgálatokat csekély alakváltozási szinten, és alacsony teherismétlődés mellett végezzük, a fűrészminták említésre méltó károsodása ezen igénybevétel által a vizsgálat alatt kizárható. Ezért a próbatestek a fáradási vizsgálatokhoz újra felhasználhatók. A fáradási függvényt legalább három különböző igénybevételi szinten kapott mérési értékek alapján kell meghatározni (3. ábra). Aszfaltburkolatok kötött rétegeiben a térbeli igénybevételi állapot hatásának megfelelően jó felvételéhez a fáradási függvényt a kezdeti alakváltozások alapján a következő alakban írhatjuk fel:



3. ábra: A fáradási függvény meghatározása a hasító-húzó vizsgálatok eredményeiből

$$N = \frac{SF}{F} \cdot a \cdot \varepsilon^k \quad (1)$$

ahol

- N [-] az aszfalt rétegben a repedésképződésig megengedett teherismétlődési szám
- a [-] anyagjellemző, fáradási vizsgálatból regresszióval meghatározva
- ε [-] alakváltozás
- k [-] anyagjellemző, fáradási vizsgálatból regresszióval meghatározva
- SF [-] Shift-tényező, dinamikus indirekt húzóvizsgálathoz (hasító húzás) SF = 1500 feltételezhető
- F [-] biztonsági tényező, az RStO 01-hez kalibrálandó
- Ezzel a függvénnyel lehetővé válik, hogy a burkolatok méretezésének számítási eljárása során figyelembe vegyünk a szerkezeti károsodásokat.

A 3. ábrán példaként látható egy fáradási függvény, amelyet fűrészmintákból (hengertömörítővel készített lemezekből) határoztunk meg. A 4. ábrán látható a fáradási állapot előrejelzése valósághoz közeli forgalmi terhelés és időjárási viszonyok esetén 30 év feletti használati időszakkal. Ha az ábrán látható előrejelzési

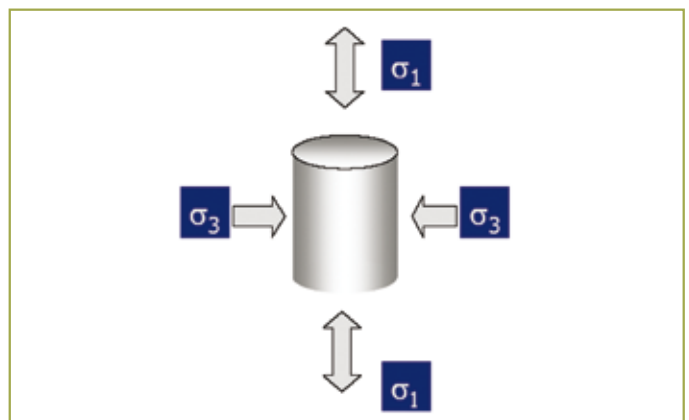


4. ábra: Példa a repedés előrejelzésére

függvény eléri a 100%-ot, a valóságban a burkolat tönkremenetele várható.

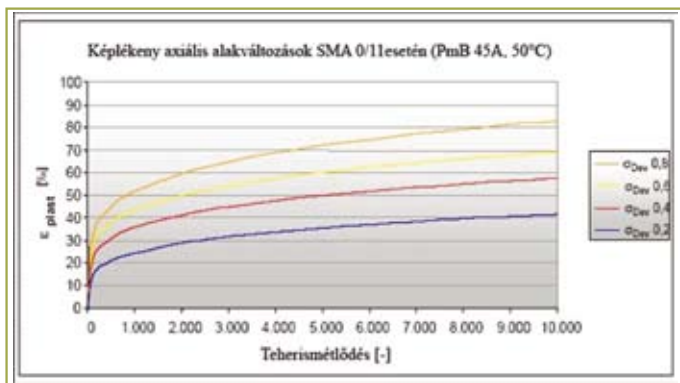
## 2.2. Nyomvályúképződés

Egy térbeli elem képlékeny alakváltozása, amely a nyomvályú kialakulásának az előfeltétele, egy alakváltoztató igénybevétel következtében jön létre. Ez legkönnyebben deviátor-feszültségekkel írható le. A deviátor-feszültség a mindenkor adott irányból ható feszültség és a hidrosztatikus feszültség (= a főfeszültség összegének egyharmada) különbsége. A kerék felfekvési felülete alatti terhelési tengelyben ez a deviátor-feszültség a függőleges feszültség és a hajlítófeszültség különbségéből (kopó- és kötőrétegekben általában hajlító-nyomó feszültség) adódik. Ez az igénybevételi állapot a valóságnak megfelelően triaxiális vizsgálattal képezhető le (5. ábra). A  $\sigma_1$  függőleges feszültség és a  $\sigma_2$  vízszintes feszültség különbségéből adódik az a deviátor-feszültség, amely a térbeli elem képlékeny alakváltozásának feltétele.

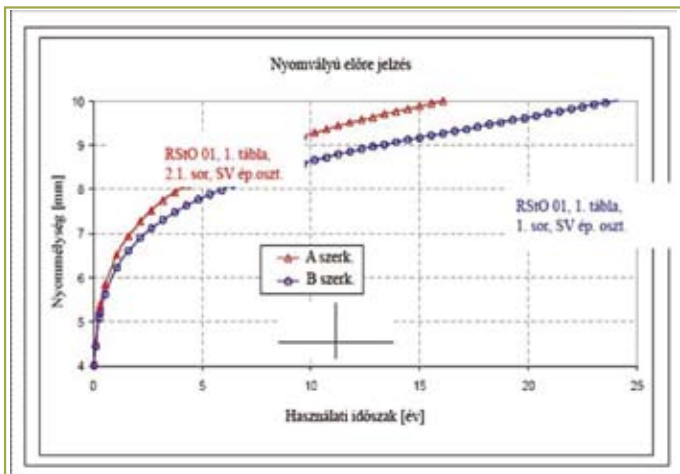


5. ábra: A triaxiális vizsgálat igénybevételének elve

A 6. ábrán egy olyan triaxiális vizsgálat eredményei láthatók, amelyet egy 15 cm átmérőjű és 30 cm magas próbatesten végeztek a Drezdai Műszaki Egyetem triaxiális vizsgáló készülékével. Ezen vizsgálati eredményeket alapul véve a kiszámított deviátor-feszültségek alapján a terhelési tengelyben, az aszfalt felületének 40, 45 és 50°C-os hőmérséklete mellett először is a számítási ráfordítás csökkentésére csak egy 5 tonnás egység-kerékterheléssel (10 t tengelyteher) 32 millió teherismétlődés mellett (SV építési osztálynak felel meg) a 7. ábrán látható első számítási eredményeket lehetett elérni. Az eredmények értékelésénél figyelembe kell venni, hogy a valóságban lényegesen nagyobb kerékterhek is felléphetnek (akár 23,5 t) valamint, hogy alacsonyabb felületi hőmérsékleti tartományban (<40°C) is keletkezhetnek nyomvályúk, amelyeket eddig még nem tudtunk figyelembe venni. Mindkét egyszerűsítés a nyomvályúmélység abszolút értéké-



6. ábra: Egy SMA 0/11 S triaxiális vizsgálati eredményei különböző deviátor feszültségekre



7. ábra: Nyomvályú előrejelzés

nek növekedését, és így a kiszámított maximális érték gyorsabb elérését eredményezi. Ezért az várható, hogy a számítási eredmények a gyakorlatból ismert gyorsabb nyomvályúképződéshez közelítenek. Jelenleg még dolgozunk a számítási eljárás javításán, így hamarosan lehetőség nyílik a nyomvályúk valósághoz közeli előrejelzésére.

Ezekből az első számítási eredményekből azonban már most látható, hogy az RStO 01 (Aszfalt, hidraulikusan kötött teherhordó rétegen) 1. táblájának 2.1. sorának megfelelő burkolat lényegesen hajlamosabb a nyomvályúképződésre, mint az RStO 01 (Aszfalt, fagyvédő rétegen) 1. táblájának 1. sorának megfelelő burkolat. Ebben a példában a hidraulikusan kötött teherhordó rétegen lévő aszfalton már kb. 16 év után akkora nyomvályúmélységek mérhetők, mint a fagyvédő rétegen lévő aszfalton kb. 24 év után. Ez azzal magyarázható, hogy a hidraulikusan kötött teherhordó réteg a nagyobb merevség miatt a fagyvédő réteggel szemben csökkenti az aszfalt burkolati rétegekben a hajlítási igénybevételt. Ez állandó függőleges feszültség mellett a kerék-kontaktnyomás következtében kényszeresen a deviátor-feszültség növekedését eredményezi, és ezáltal növeli a nyomvályúképződésre való hajlamot.

### 3. Összefoglalás és kitekintés

Ebben a cikkben bemutattam egy eljárást, amely a szerkezeti állapot számítással történő méretezését fáradási előrejelzés vonatkozásában írja le, továbbá bemutattam egy eljárást, amely a nyommelység számítással történő előrejelzésére szolgál. A modell az RStO felépítményeire való megfelelő kalibrálás mellett a forgalmi terhelést és az időjárási feltételek alakulását figyelembe vevő számítási méretezést tesz lehetővé. A laborvizsgálatok alapján készült első számítások hihető eredményeket szolgáltattak, amelyek azonban még alátámasztásra szorulnak.

## Summary

### Design of bituminous pavements

The study deals with a method, which determine a design method based on the calculated structural properties in relation with the forecast of fatigue behaviour. The other focal point is a method to forecast the rut depth by calculation. Beside the reliable calibration of the model for the special structures defined in RStO it makes possible a design method which incorporates the traffic loads and the changes of temperature circumstances. The trial calculations based on laboratory testing were promising, but the verification of them is needed.

### Újrafelhasznált aszfalt alkalmazása kisforgalmú utak alaprétegében

Use of Reclaimed Asphalt in Road Bases of Low Volume Roads

Herald Piber

Routes/Roads 2006. 2. p. 36-39. á:1, t:2, h:-

Ausztriában évente 1,4 millió tonna aszfalthulladék keletkezik, melynek jelentős részét újrahasznosítják. Mintegy 800 ezer tonna újrahasznosított aszfaltot használnak fel az útépitésben, és ennek csak 10 %-a kerül az új keverékekbe, a többségéből alaprétegeket és nemesített padkákat építenek. Alaprétegek esetén a beépítési vastagságot a deformációs hajlam miatt 10 cm-ben korlátozzák. A jellemző alkalmazási terület a kisforgalmú utak, emellett kerékpárutak és járdák is építhetők az újrafelhasznált aszfalt alapréteggel, melyre általában 4 cm új aszfalt vagy egyszerűen csak felületi bevonat kerül. Az újrafelhasznált aszfalt minőségére vonatkozó szabvány szerint a kötőanyag tartalom legalább 3,5 tömeg% kell legyen. Mart aszfalt vagy bontott tört aszfalt egyaránt alkalmas lehet, ha az előírt minőségi követelményeket teljesíti. A különböző felhasználható típusokat a legnagyobb aszfalt-darab mérete és a bitumen extrakciója után mérhető maximális kőanyag méret határozza meg. A beépítés során törekedni kell a minél nagyobb tömörség elérésére. A gondos kivitelezési minőségellenőrzés az újrafelhasznált aszfalt alkalmazása esetén különösen fontos. A jövőben egyre több újrafelhasználható aszfaltanyag keletkezik a nagyforgalmú utak felújítási munkái miatt. Kisforgalmú utakon az újrahasznosított aszfalt alapréteg gazdaságos megoldást nyújt. A teljes burkolat költségének 5-10 %-a megtakarítható a számítások szerint, emellett mintegy 20%-kal kisebb lesz a nyersanyag felhasználás is.

G. A.



## 1. Előzetes megjegyzések

A Német Szövetségi Oktatási és Kutatási Minisztérium által támogatott „Fenntartható útéptetés” kutatási munka célja az aszfalt utak felépítmények egyedi méretezési eljárásának kidolgozása. Ezáltal eszközt biztosítunk a jövőbeni létesítmények kivitelezőjének és megbízójának a teljesítményelvű szerződések ajánlatainak elkészítéséhez és értékeléséhez. A kutatási munka központi témája az állapotalakulás előrejelzése (repedésképződés, nyomvályúképződés), amelyet a Drezdai Műszaki Egyetem Útéptetés Tanszéke (Wellner professzor) a Braunschweigi Műszaki Egyetem Útéptézési Tanszékével (Leutner professzor) együtt dolgoz ki.

A munka célja ezért egy olyan analitikus tervező és előrejelző eljárás kifejlesztése, amelynek segítségével számos hatás figyelembe vehető. Az analitikai alapon nyugvó eljárás segítségével az eddigiektől eltérően előrejelezhetők a szükséges felületi tulajdonságok, és burkolatokat ill. megerősítő rétegeket méretezhünk meglévő aszfaltburkolatok számára. Ennek során előrejelezzük a burkolat élettartamát, ill. a meglévő burkolat hátralevő élettartamát.

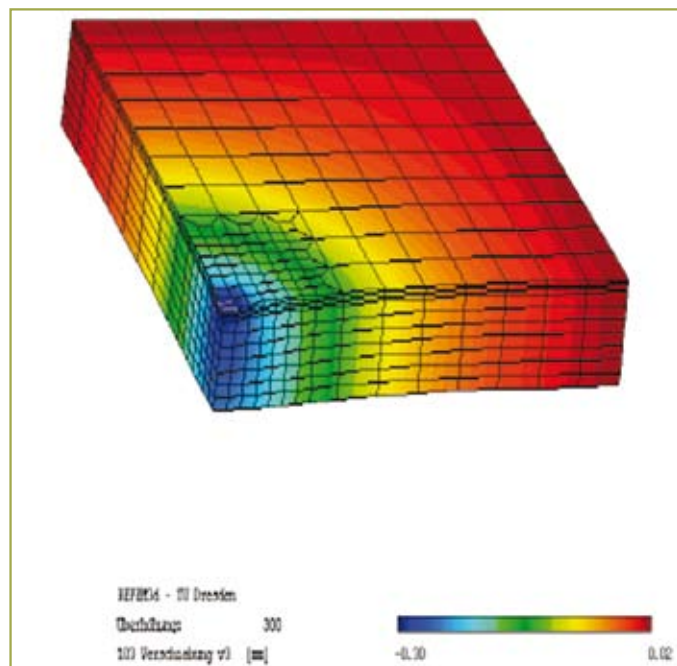
Az aszfalt utak igénybevételi állapotából kiindulva dinamikus laborvizsgálatokat végeztünk aszfalt próbatesteken -10-50°C-os hőmérsékleti tartományban, és meghatároztuk a mechanikai tulajdonságokat. Példaként az 1. ábrán egy végeelem módszerrel végzett számítás eredménye látható (REFEM3d program – Drezdai Műszaki Egyetem, Statika Tanszék). Egy forró nyári nap és az abból adódó aszfalt merevségek esetére kiszámítottuk és felnagyítva ábrázoltuk a burkolat felszínének függőleges rugalmas lesüllyedéseit.

## 2. Vizsgálati program

Dinamikus triaxiális vizsgálattal, dinamikus támasznyomást alkalmazva átfogóan leírtuk az aszfalt anyagviselkedését, és anyagtörvények formájában integráltuk a méretezési eljárásba. Kiegészítésként jellemző anyagparamétereket határoztunk meg egyszerűbb dinamikus eljárással, úgy mint egytengelyű periodikus nyomásvizsgálattal, hogy a jövőben pl. bővített alkalmassági vizsgálatok keretében egyedi méretezéseket végezhesünk el.

A Drezdai Műszaki Egyetem vizsgálatainak közép-pontjában az aszfalt próbatestek (h=300 mm, d=150 mm) triaxiális vizsgálatának elvégzése áll. Ezeket a vizsgálatokat -10°C és +50°C közötti hőmérsékleti tartományban, és az (RStO 01 szerinti) SV-III építési osztályok reprezentatív pályaszerkezeteinek megfelelő igénybevételi tartományában végeztük el (2. ábra).

Ezeket a triaxiális vizsgálatokat lüktető (dinamikus) támasznyomásokkal végeztük el, hogy ezáltal a valóságban fellépő igénybevételeknek a lehető legjobban megfelelő körülményeket állítsunk elő. A Drezdai Műszaki Egyetem vizsgálati programjának további különlegessége, hogy a triaxiális vizsgálatok során a próbatestekre függőleges irányban nyomó- és húzóerőt is kifejtettünk. Ez azt jelenti, hogy az aszfalt feszültségi és alakváltozási viselkedésének leírásához a dinamikus periodikus nyomás, és a húzásvizsgálatokat is dinamikus támasznyomással végeztük el.

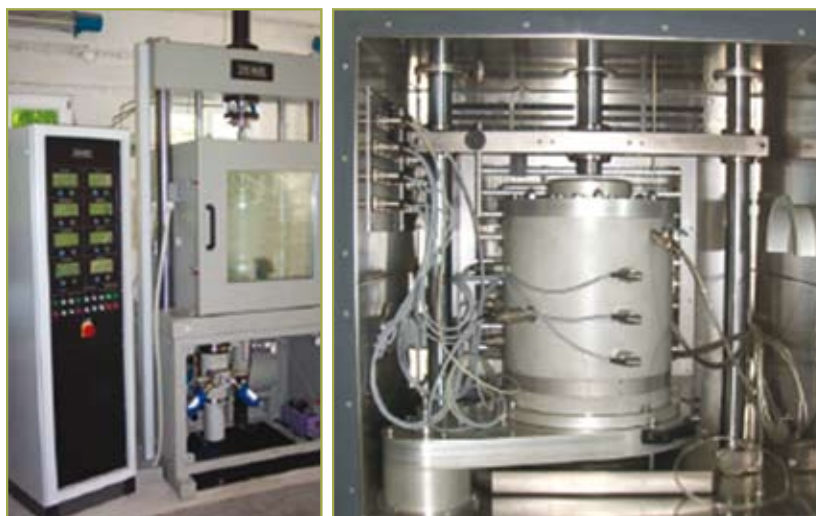


1. ábra: Függőleges behajlások a terhelő kerék alatt

Ezzel az eljárással eltértünk az EN 12697-25 szerinti triaxiális vizsgálati feltételektől. Az ott ajánlott statikus támasznyomást ( $\sigma_{2/3}$ =konstans) a kutatómunka keretében szinuszos hullámterheléssel helyettesítettük (3. ábra). A valóságban az aszfaltburkolaton fellépő igénybevételeknek így sokkal pontosabban meg tudunk felelni. Így a különbözőképpen felvitt igénybevételeket változtatva lehetőség nyílik a képlékeny alakváltozás előrejelzésére a próbatestben keletkező  $\sigma_1$  és  $\sigma_{2/3}$  feszültségek függvényében (3. pont).

## 3. Vizsgálati eredmények

Az aszfalt magas hőmérsékleten fellépő alakváltozási viselkedésének leírásához dinamikus támasznyomást használó dinami-

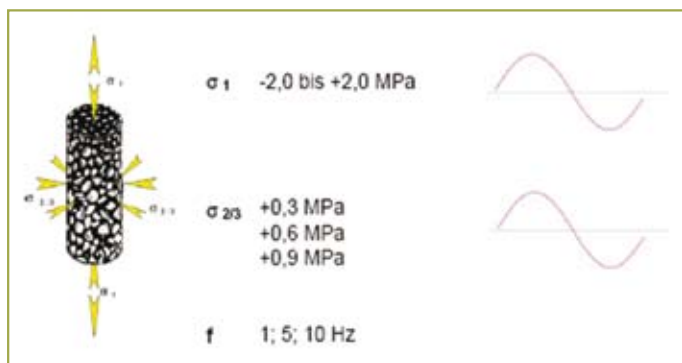


2. ábra: Triaxiális vizsgáló készülék a Drezdai Műszaki Egyetem Útéptetés Tanszékén

<sup>1</sup> Fordította: Ureczky Judit, okl. építőmérnök, H-TPA Kft.

<sup>2</sup> okl. építőmérnök, Drezdai Műszaki Egyetem, Útéptézési Tanszék



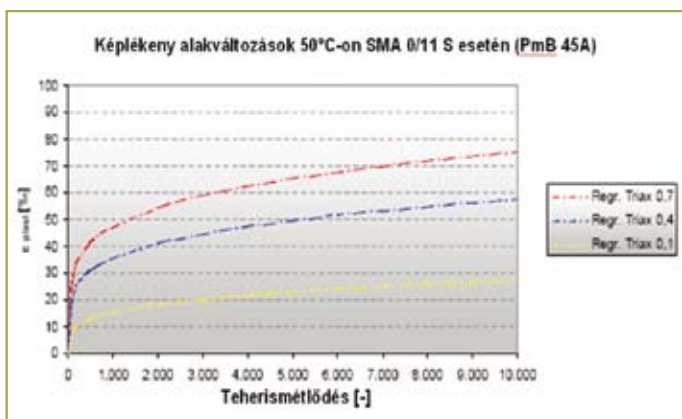


3. ábra: A triaxiális vizsgálatok vizsgálati feltételei (Drezdai Műszaki Egyetem)

kus periodikus nyomásvizsgálatokból (triaxiális vizsgálatokból) impulzus görbéket kell meghatározni. Így egyértelmű összefüggést írhatunk fel a próbatestre felvitt többtengelyű igénybevétel és a mért (többtengelyű) alakváltozások között, továbbá megkapjuk az anyagmodellezés bemenő paramétereit.

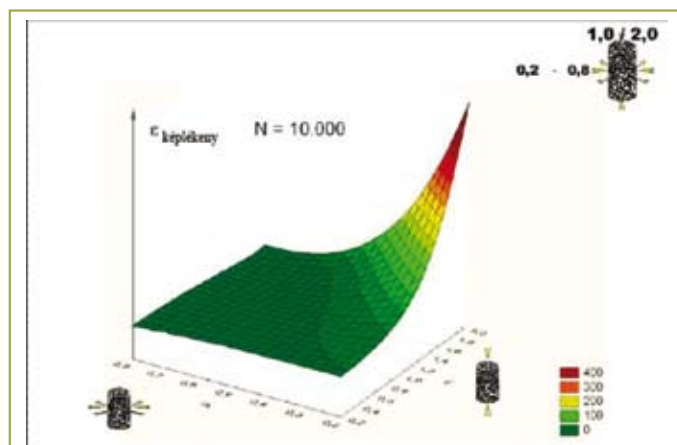
A függőleges feszültség ( $\sigma_1$ ) és a vízszintes feszültség ( $\sigma_{2/3}$ ) különbségéből adódik a deviátor-feszültség, amely az aszfalt képlékeny alakváltozásának feltétele. A 4. ábrán láthatók a Drezdai Műszaki Egyetemen 0,1 MPa; 0,6 MPa és 0,7 MPa deviátor-feszültségekkel elvégzett triaxiális vizsgálatok eredményei.

Ezeknél a vizsgálatoknál a  $\sigma_1=1,0$  MPa axiális feszültséget állandó értéken tartottuk, a dinamikus támasznyomás értékét 0,9 MPa, 0,6 MPa és 0,3 MPa között változtattuk, amelyből a 4. ábrán látható deviátor-feszültségek adódtak. Látható, hogy ugyanazon axiális terhelés mellett csekély támasznyomással a képlékeny axiális alakváltozások növekednek.



4. ábra: Impulzusgörbék SAM 0/11 S triaxiális vizsgálatából

Számos szisztematikusan elvégzett triaxiális vizsgálat alapján, a megadott peremfeltételek mellett meg lehet határozni a nyomképződés előrejelzéséhez szükséges bemenő adatokat. Az 5. ábrán meg vannak adva a 3. ábrán megadott igénybevételi tartományra a 10 000 teherismétlődés utáni maradó alakváltozások. Látható, hogy a legnagyobb alakváltozások  $\sigma_1$



5. ábra: Eredő próbatest deformáció ( $\epsilon_1$ ) 10.000 teherismétlődés után

maximális igénybevétel és  $\sigma_{2/3}$  minimális támasznyomás mellett lépnek fel. Az 5. ábrán bemutatott összefüggés funkcionális leírása alapján előrejelezhető a valóságos útburkolat maradó alakváltozása (nyomvályúképződés), ha a pályaszerkezetben fellépő igénybevételeket pl. az 1. ábrán szereplő módon számítjuk ki. Ennek eredményeit az e számban közölt Wellner cikk tartalmazza.

#### 4. Összefoglalás

A „Tartós útépités” szövetségi kutatási munka keretében a tervezett létesítmények kivitelezői és a megbízói számára olyan eszközt hoztunk létre, amely a teljesítményelvű szerződések ajánlatainak elkészítésénél és értékelésénél használható. A nyomvályúképződés előrejelzése képezte a kutatómunka súlyponti részét. Dinamikus támasznyomással végzett triaxiális vizsgálatok eredményei alapján adott hőmérsékleti és igénybevételi tartományban szisztematikusan megvizsgáltuk az aszfalt feszültségi és alakváltozási viselkedését. A vizsgálati eredmények alapján kifejlesztettünk egy eljárást, amely lehetővé teszi a valóságos útpályaszerkezetek nyomvályúképződésének előrejelzését.

#### Summary

#### Triaxial tests of asphalt mixes

Under the frame of German national Research work „Sustainable Road Construction” a special tool was established for the clients and contractors of designed projects which could be used in the preparation and evaluation of performance based contracts. The research work was focused on the forecasting of rut depth development. The stress and strain behaviour of asphalt mixes was examined by triaxial tests at various temperatures and stress levels. Based on the test results a new method was developed to forecast the rutting of the real scale pavements.

## 1. Bevezetés

A magas hőmérsékleten bekövetkező maradó alakváltozás (nyomképződés) jelenségét eddig döntően az aszfalt viszkózus folyásának tulajdonították. A maradó alakváltozással szembeni ellenállás laboratóriumi vizsgálatai az egytengelyű és a triaxiális „dinamikus kúszás”-i (helyesebben: ciklikus terhelési) vizsgálatok [1]. Ennek a felfogásnak az úgynevezett MAXWELL, vagy BURGER féle viszko-elasztikus reológiai modellek felelnek meg [1][2]. A maradó alakváltozás másik lehetséges forrása a képlékeny folyás. A képlékeny folyás nem cserélendő össze a folyadék viszkózus folyásával. A képlékeny folyás szilárd halmazállapotú testeknél, így a fémeknél, vagy a szemcsés anyagoknál, mint például a talajok, megfigyelhető jelenség. Korábbi reológiai vizsgálataim arra az eredményre vezettek, hogy az aszfalt statikus terhelés elviselésére is képes, vagyis a szilárd halmazállapotnak megfelelő viselkedést is mutat [3]. Ez a tulajdonság csakis a szemcsés ásványi adalékra volt visszavezethető. Ezért figyelmem a képlékeny szemcsés anyag hőmérséklettől független szilárdsági tulajdonsága felé fordítottam, hiszen ennek mobilizálása révén lehetséges - magas hőmérsékleten - a maradó alakváltozással szembeni ellenállás növelése.

E gondolatmenettel áll összhangban egy mértékadó és friss szakirodalmi forrás egyik mondanivalója is [2], mely szerint: „a maradandó alakváltozást főleg a plasztikus folyás eredményezi és nem a viszkózus alakváltozások...” Hosszas gondolkodás után a szerzők arra a következtetésre jutottak, hogy a maradandó alakváltozás legjobb megközelítése az, ha a károsodás plasztikus kifejlődésének elvét alkalmazzuk”.

## 2. A képlékeny triaxiális aszfaltminta

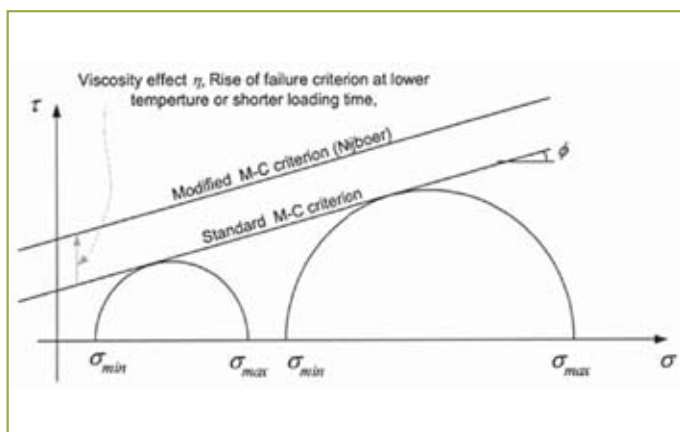
Az ásványi eredetű szemcsés adalékanyag halmaza tömörített állapotban nyírószilárdsággal rendelkezik. A nyírószilárdság NIJBOER szerint leírható a MOHR-COULOMB féle kritériummal, melyet az 1. ábra mutat [4].

A szilárdságnak e feltétel szerint két komponense van, melyek:

- a kohézió  $c = \tau(\sigma = 0)$ , és a
- belső súrlódás szöge:  $\varphi$ .

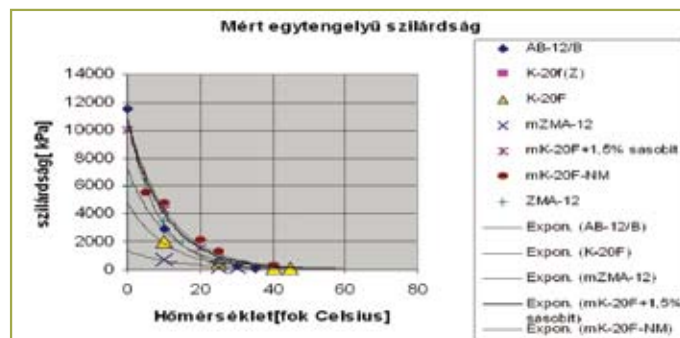
A törési (képlékenységi) feltétel egyenlete:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$



1. ábra: MOHR-COULOMB féle képlékenységi („törési”) feltétel

Itt  $\tau$  a nyírófeszültséget, vagy ellenállást,  $\sigma$  pedig a nyírt felületre ható merőleges irányú nyomást jelenti. A kohézió a körök érintő egyenes és a  $\tau$  - tengely metszéspontja. Saját méréseim szerint az egytengelyű szilárdság, melyet a belső súrlódás elhanyagolásával a kohézió kétszeresével gondolhatunk egyenlőnek, a hőmérséklet növelésével exponenciálisan csökken, ahogyan ezt a 2. ábra mutatja. A belső súrlódás csak triaxiális, vagyis térbeli feszültségállapotban mérhető.

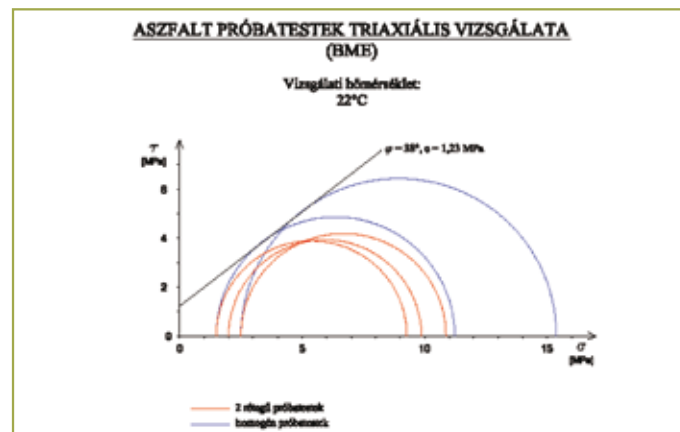


2. ábra: A kohézió növekvő hőmérséklettel exponenciálisan csökken

A 3. ábrán látható kísérletet a BME Útépítési Tanszéke megbízásából készítettem. A meghatározott szilárdsági paraméterek a homogén, AB-12 aszfaltból készült zsirátorminta esetén:

- $c = 1,23 \text{ MPa}$  és
- $\varphi = 38^\circ$

voltak.



3. ábra: Triaxiális vizsgálat a BME-n, 22 °C hőmérsékleten

A 4. ábra egy, a Drezdai Műszaki Egyetem Útépítési Tanszéke triaxiális berendezésén végzett kísérletsorozat eredményeit mutatja. A vizsgálatok a H-TPA megbízásából készültek AB-12/F típusú aszfaltból előállított, 150 mm átmérőjű zsirátormintákon, a 60 °C-on jelentkező deformációs ellenállás (szilárdság) meghatározása céljából.

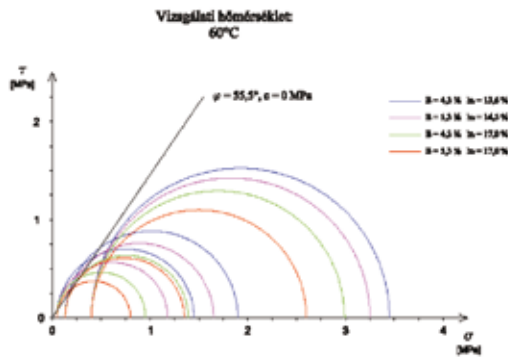
Az ábrán feltüntetett egyenesnek megfelelő szilárdsági paraméterek:

- $c = 0$  és
- $\varphi = 55,5^\circ$

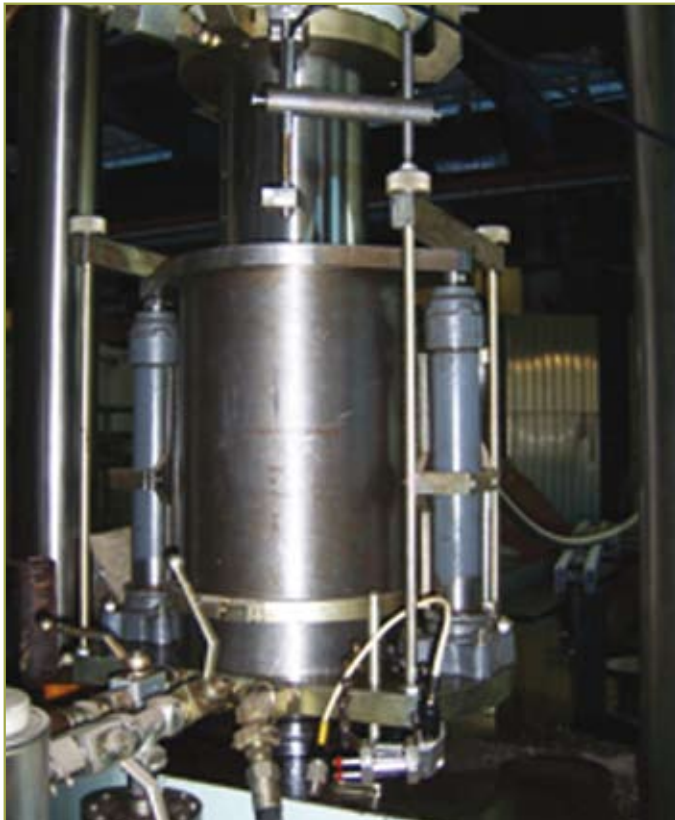
<sup>1</sup> okl. bányamérnök, technológus, H-TPA Kft.

Aszfaltmechanikai Laboratórium gyorgy.gajari@tpaqi.com

### ASZFALT PRÓBATESTÉK TRIAXIÁLIS VIZSGÁLATA (DREZDA)



4. ábra: Triaxiális vizsgálat 60 C° hőmérsékleten, a Drezdai Műszaki Egyetemen



5. ábra: Kőzetmechanikai triaxiális berendezés a BME-n

A paraméterek meghatározására a továbbiakban még kitérek. Megállapítható, hogy a kohézió a magas hőmérsékleten megszűnik, a belső súrlódás azonban nem, a hőmérséklettől az gyakorlatilag független. Arra, hogy magasabb hőmérsékleten miért mérünk magasabb belső súrlódást, a későbbiekben kapunk magyarázatot. A BME részére készített vizsgálatokat egy saját fejlesztésű, kőzetek vizsgálatára alkalmas készülékkel végeztem, melynek fényképe az 5. ábrán látható.

A berendezés csak statikus terhelés létrehozására alkalmas, cellanyomása meghaladhatja a 30 Mpa-t. Nem temperálható, ezért készültek a vizsgálatok szobahőmérsékleten.

A Drezdai Egyetem triaxiális cellája jelenleg Európa, de talán a világ egyik legkorszerűbb berendezése. A ciklikus (dinamikus) főfeszültségek egymástól függetlenül vezérelhetők a szervohidraulikus berendezésen.

### 3. A „Critical State Theory” egyik változatának vázlatos ismertetése

Az alábbi összefoglalás az [5] irodalmi forrás alapján készült. Az elméletet Cambridge-ben dolgozták ki talajmechanikusok a hatvanas években.

Igaznak tekinthetjük minden olyan szemcsés anyagra, melyről feltételezhetjük, hogy: a külső erők által végzett munka a belső súrlódás következtében teljes mértékben disszipálódik, a bekövetkező megnyúlások képlékeny jellegűek. Ez azt jelenti, hogy különleges anyagi tulajdonság, vagy viselkedés feltételezésére nincs szükség, érvényessége olyan általános mint a fenti energiatételé. Így joggal várható helyessége a magas hőmérsékletű aszfaltkeverékre is [4].

Egyszerűségként és az általánosság korlátozása nélkül feltételezhető a hengersizmetrikus feszültség és nyúlási állapot ahogyan az a hagyományos triaxiális cellákban van. Célszerű a következő mennyiségek definíciója:

- $\sigma_1'$  a tengelyirányú hatékony főfeszültség,
- $\sigma_2' = \sigma_3'$  a sugárirányú hatékony főfeszültségek (cellanyomás),
- $p = \frac{1}{3}(\sigma_1' + 2\sigma_3')$  az átlagos (hidrosztatikus) nyomás, és a
- $q = \sigma_1' - \sigma_3'$  deviátorfeszültség (nyíróigénybevétel).

Hasonlóan a nyúlásokra:

- $\epsilon_1, \epsilon_2 = \epsilon_3$  a főnyúlások,
- $\frac{\Delta v}{v} = \Delta \epsilon_1 + 2\Delta \epsilon_3$  a fajlagos térfogatváltozás, és a
- $\epsilon_{sh} = \frac{2}{3}(\epsilon_1 - \epsilon_3)$  a (nyíró) alakváltozás.

Képlékeny állapotban a fajlagos térfogat  $v$  (tömörség), az átlagos nyomás  $p$  és a nyíróellenállás  $q$  (deviátor) között a következő, háromváltozós összefüggés áll fenn:

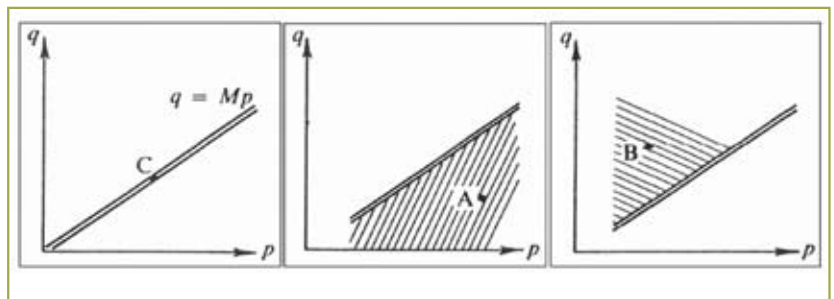
$$\frac{q}{Mp} + \ln p - \frac{\Gamma - v}{\lambda} = 1$$

Az egyenletben a feszültségállapot  $(p, q)$  és a fajlagos térfogat  $(v)$  az állapotjellemzők,  $M$ ,  $\Gamma$  és  $\lambda$  pedig az anyagállandók.

Jellemzően a 6. ábrán bemutatott három esetet különböztetnek meg:

- Kritikus állapot

Ekkor  $q = Mp$ , a nyíróellenállás arányos az átlagos nyomással. Az arányossági tényező  $M(\frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi})$  a belső súrlódási tényező. A fenti háromváltozós egyenletből ezért az következik, hogy:



„kritikus” állapot

„laza” (nedves) állapot

„tömör” (száraz) állapot

6. ábra: A képlékeny állapotok

$\ln p - \frac{\Gamma - \nu}{\lambda} = 0$ , vagyis  $\nu = \Gamma - \lambda \ln p$ , a fajlagos térfogat (tömörség) pedig éppen a „kritikus”, mely a nyíróellenállással együtt állandó marad, miközben a (nyíró) alakváltozás korlátlanul folytatódik (ideális képlékeny folyás).

- „Laza” (nedves) állapot

$$q < Mp, \text{ vagyis } \frac{q}{Mp} < 1, \text{ tehát: } 0 < 1 - \frac{q}{Mp}.$$

A képlékeny állapotok általános egyenletét átrendezve kapjuk:

$$\nu = \Gamma - \lambda \ln p + \lambda \left(1 - \frac{q}{Mp}\right) > \Gamma - \lambda \ln p.$$

A jobb oldal utolsó tagja pozitív, ezért a fajlagos térfogat nagyobb mint a „kritikus” állapotban, vagyis a minta lazább, ha nyíróellenállása kisebb mint a kritikus állapotban. A „nedves” megnevezés onnan ered, hogy ha növeljük a nyíróigénybevételt:  $\Delta q > 0$ , akkor az utolsó tag csökken, vagyis a fajlagos térfogat is csökken, tehát a minta tömörsége nő (akkor is ha  $\Delta p = 0$ ), ennek következtében, ha a pórusokban folyadék (víz, bitumen) volt, akkor az onnan kiáramlik, a minta „tapintása nedves”. A képlékeny alakváltozás mellett maradó tömörödés is létrejön (térfogati keményedés). Az eddigiekből következik, hogy ha a mintát nyíróigénybevétellel tömörítjük, akkor nagyobb tömörség érhető el, mint csak a hidrosztatikus nyomás alkalmazásával.

- „Tömör” (száraz) állapot

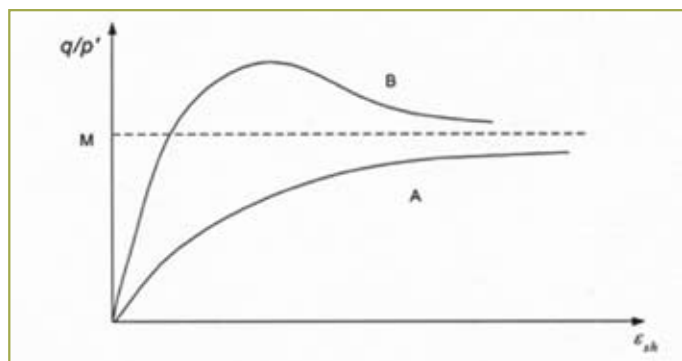
$$q > Mp, \text{ vagyis } \frac{q}{Mp} > 1, \text{ tehát: } 0 > 1 - \frac{q}{Mp}.$$

A képlékeny állapotok általános egyenletét átrendezve kapjuk:

$$\nu = \Gamma - \lambda \ln p + \lambda \left(1 - \frac{q}{Mp}\right) < \Gamma - \lambda \ln p'$$

A jobb oldal utolsó tagja most negatív, ezért a fajlagos térfogat kisebb mint a „kritikus” állapotban, vagyis a minta tömörebb, ha nyíróellenállása nagyobb mint a kritikus állapotban. A „száraz” megnevezés onnan ered, hogy ha további alakváltozást kényszerítünk a mintára, akkor a nyíróellenállásban csökkenést fogunk tapasztalni  $\Delta q < 0$ , az egyenlet jobb oldalán az utolsó tag most nő, vagyis a fajlagos térfogat is nő, tehát a minta tömörsége csökken, ennek következtében a kitáguló pórusok folyadékot szívnak fel, a minta tapintása száraz. A folyamatot instabil térfogati lágyulásnak hívják. A képlékeny alakváltozás mellett maradó lazulás is létrejön. Ha a mobilizált sűrűdési tényezőt  $\left(\frac{q}{p}\right)$  az alakváltozás ( $\epsilon_{sh}$ ) függvényében ábrázoljuk, akkor a 7. ábrát kapjuk, mely egyben összefoglalja a tárgyalt három esetet.

Az „A” minta jelöli az eredetileg laza állapotból induló és a tömörödés következtében stabilan felkeményedő esetet, a „B” minta pedig az instabilan lazuló, és egyben lágyuló mintát. A szemcsés



7. ábra: Mobilizált sűrűdés az alakváltozás függvényében

anyag minden esetben a „kritikus” állapot elérésére törekszik. Az elméletből következik, hogy ha a pórusfolyadék gátolja a szemcsés anyag tömörödését, akkor gátolja a sűrűdési ellenállás kifejlődését is. Ez a körülmény például előállhat akkor, ha a pórusok folyadékkal való telítettsége kellően magas, és ha az alakváltozás túl gyorsan zajlik le a folyadék viszkozitásához képest. Ennek következtében az nem képes kellő sebességgel a pórusokat elhagyni.

#### 4. Kísérleti program a „Critical State” elmélete érvényesítése igazolására, és a következmények a maradó alakváltozási ellenállást illetően

A nyomképződés folyamatával kapcsolatban feltételezem, hogy az útburkolatba beépített aszfalt a forgalom következtében mind az átlagos nyomás, mind a nyírás tekintetében terhelésnövekedésnek van kitéve, ezért állapota a fenti értelemben „laza”. A kísérleti igazolást egyenlőre csak egy AB-12/F típusú aszfaltra végeztem el. A kutatási program más típusú aszfaltok vizsgálatával folytatódik.

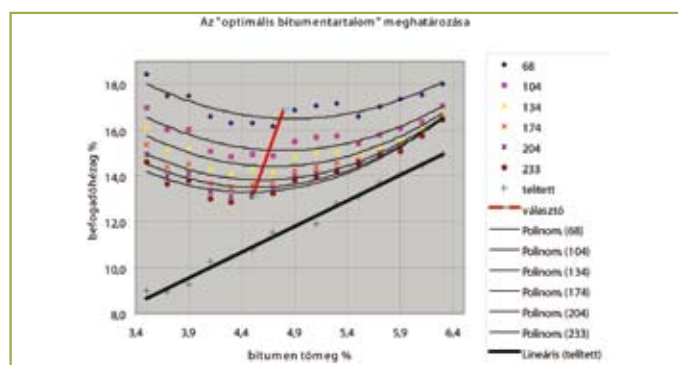
Ha a képlékeny viselkedés magyarázza a nyomképződés jelenségét, akkor a nyommélység annál nagyobb lesz, minél inkább gátolja a magas bitumentartalom az aszfalt tömörödési képességét. A jelenség akkor lesz jól megfigyelhető, ha a bitumentartalom túllépi a tömörödés szempontjából optimális értéket.

- Az optimális bitumentartalom meghatározását a Proctor tömörítés analógiájára zsirátoros tömörítéssel végzem.
- Korrelációt keresek a nyomképződés és a bitumentartalom között.
- Triaxiális kísérletben, 60°C-os hőmérsékleten megvizsgálom, hogy terhelés hatására az aszfaltkeverék a kritikus állapot elméletének megfelelően viselkedik-e, és kimutatható-e az optimálist meghaladó bitumentartalom negatív hatása az alakváltozási ellenállásra a laza állapotban.

##### 4.1. Tömörítés zsirátorral, az „optimális bitumentartalom” meghatározására

A tömöríthetőség szempontjából az „optimális bitumentartalom” egybeesik azzal az értékkel, ahol az ásványi adalék befogadó hézaga minimális. Az optimális érték alatt a bitumentartalom növelésével nő a tömörség, mert csökken a szilárd részek közötti sűrűdés. Az optimális bitumentartalom határt szab ennek a tendenciának, mert a további tömöríthetőséget már gátolja a bitumen térfogata.

Az „optimális bitumentartalom” a befogadó hézag minimumánál van (analógia a Proctor kísérlettel). A befogadó hézag és annak minimuma is függ a tömörítési munkától. A 8. ábrán látható másodfokú parabolák paramétere a zsirátor fordulatszáma. A parabolák minimumhelyeit a „választó” nevű egyenes köti össze,



8. ábra: Az optimális bitumentartalom meghatározása zsirátoros tömörítéssel

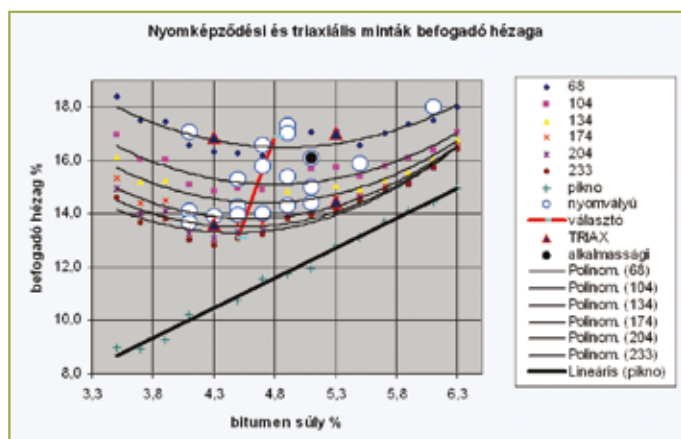


mely nem egészen függőleges, mert az „optimális bitumentartalom” kis mértékben változik: 4,5 % és 4,8% között.

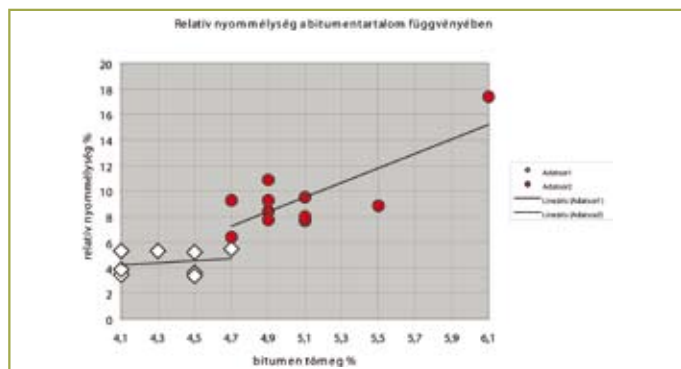
#### 4.2. Különböző kötőanyagtartalmú keverékek laboratóriumi nyomképződési vizsgálatai

A 9. ábrán a triaxiális minták mellett a vizsgált 19 darab aszfaltlap-pár befogadó hézagtartalma látható a bitumentartalom függvényében. A kísérleti eredmények a 10. ábrán láthatóak. Az eredmények egyértelműek: a nyommélységet a bitumentartalom határozza meg, a szabványban megengedett 6 % feletti értékek azokon a mintákon voltak mérhetőek, melyek bitumentartalma meghaladta az „optimális”.

Hagyományosan azt tartják, hogy a megfelelő nagyságú szabad hézag tartalom kellő védelmet nyújt a nyomvályú kialakulásával szemben. A kísérletek nem igazolják ezt a nézetet. A 11. ábrán látható, hogy a szabad hézag nagysága és a nyommélység között nem ismerhető fel korreláció.



9. ábra: A nyomképződési és a triaxiális vizsgálatok próbatestjei befogadó hézaga és bitumentartalma



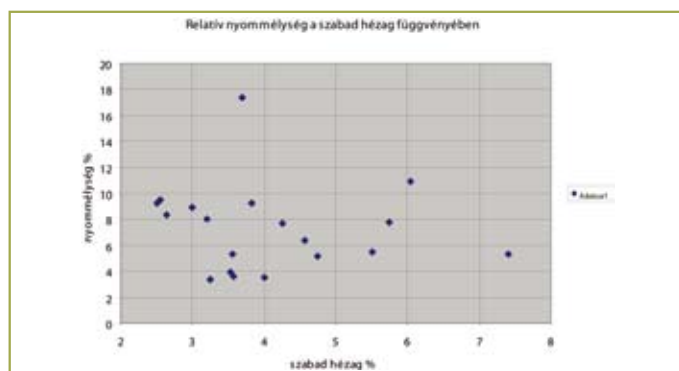
10. ábra: A kötőanyagtartalomtól függő nyommélység

#### 4.3. Triaxiális vizsgálatok a „Critical State” elméletnek megfelelő viselkedés igazolására és a kötőanyag-tartalom hatásának kimutatására

A Drezdai Műszaki Egyetem Útépítési Tanszéke triaxiális berendezésén két sorozatban, hat-hat (bitumentartalom 4,3 illetve 5,3 tömeg %), összesen tehát 12 kísérletet végeztünk. A próbatestek méretei:

- Átmérő: 150mm
- Magasság: 230-250mm

A térfogati összetételt, az összes kísérlettel együtt a 9. ábrán láthatjuk. Az első sorozat 3-3 mintájának befogadó hézaga: 13,5% és 14,5%. A második sorozaté, a bitumentartalomtól függetlenül, ~17%. Elsősorban a 17% kezdeti befogadó hézagú minták eredményeit mutatom be.



11. ábra: A nyommélység független a szabad hézag tartalomtól

A vizsgálati hőmérséklet 60C° volt. A kísérletet hagyományosan, állandó cellanyomásnál, a függőleges terhelés növelésével hajtottuk végre. A kiindulási feszültségállapot a radiális nyomással egyenlő izotróp nyomás. A dugattyú terhelését az „útvezérléses üzemmód”-ban növeltük, az előtolási sebesség 0,02 mm/s volt. A berendezés automatikusan regisztrálta mindkét főfeszültséget és a tengelyirányú rövidülést.

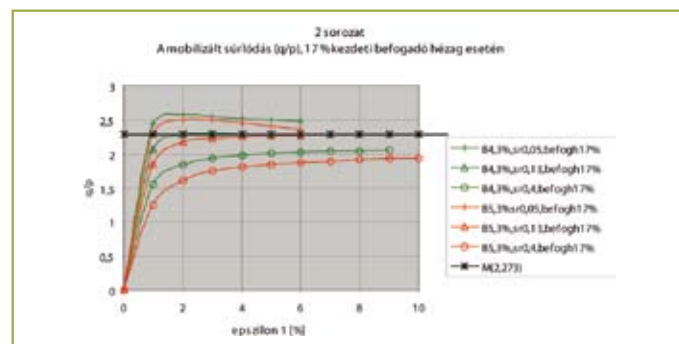
A „tömör”, a „kritikus” és a „laza” állapotok előállítása céljából a cellanyomások rendre a következők voltak:

- $\sigma_r = 0,05 \text{ MPa}$ ,
- $\sigma_r = 0,13 \text{ MPa}$ ,
- $\sigma_r = 0,4 \text{ MPa}$ .

A második sorozat eredménye a 12. ábrán látható.

Az eredmények egyértelműen igazolják a Critical State elmélet érvényességét a képlékeny állapotú aszfaltra:

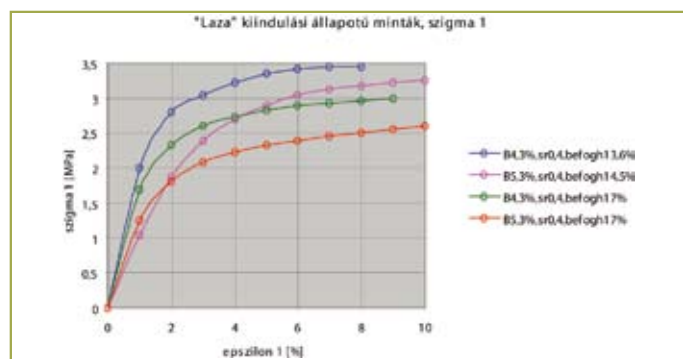
- 0,13 MPa cellanyomás mellett az aszfaltminta a „kritikus állapot”-ba került.
- A súrlódási tényező értéke:  $M = q / p = 2,273$ , ami 55,5°-os súrlódási szögnek felel meg.
- A „kritikus állapot”-ban a szilárdság független a bitumentartalomtól, kizárólag a befogadó hézag, vagyis a tömörségi állapot függvénye.
- A „kritikus” állapotban kis deformációk (1-2%) elegendőek a súrlódás mobilizálásához.
- 0,05 MPa cellanyomásnál a minta kiindulási állapota „tömör”, 1-2% deformáció mellett eléri a legnagyobb alakváltozási ellenállást, utána „lágylul”, tehát az adott feszültségi állapotnak megfelelő „kritikus állapot” irányába csökken a mobilizált súrlódás.
- 0,4 MPa cellanyomás mellett a minta kiindulási állapota „laza”. A kritikus és a tömör kiindulási állapotokkal szemben a nyíró-szilárdság mobilizálásához igen nagy deformációkra van szükség:  $\epsilon_1 > 10\%$ , mert a felkeményedéshez elsősorban tömörödéssel van szükség. A kísérletben egyetlen minta sem tudta teljes mértékben mobilizálni a potenciális, súrlódásból



12. ábra: A mobilizált súrlódás a tengelyirányú rövidülés függvényében

eredő ellenállását, ahhoz ugyanis el kellett volna érni a kritikus állapotot ( $M = q/p = 2,273$ ).

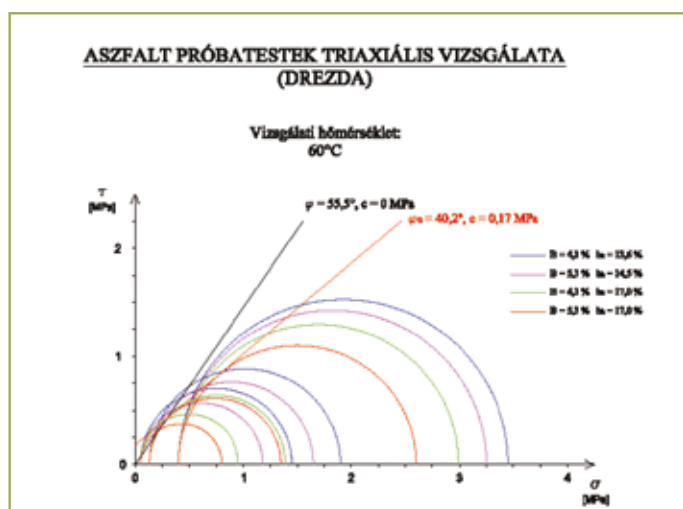
Az optimálist meghaladó bitumentartalom, a súrlódás mobilizálását -vagyis az alakváltozási ellenállás növekedését- gátló hatása figyelhető meg mindkét sorozat „laza” kiindulási állapotú (cellanyomás 0,4 MPa) mintáin (13. ábra).



13. ábra: A laza kiindulási állapotú aszfalt alakváltozási ellenállása különböző bitumentartalmak esetében

Függetlenül a kiindulási tömörségtől, az alakváltozással szembeni ellenállás kezdeti, deformációfüggő növekménye a nagyobb bitumentartalom (5,3%) esetén mindig kisebb, mint az optimálist nem meghaladó bitumentartalom (4,3%) esetében. Ez azt jelenti, hogy ugyanahhoz a nyíróellenálláshoz az optimálist meghaladó bitumentartalom mellett nagyobb maradó deformációk szükségesek. (Az 5,3% kötőanyagot tartalmazó, 14,5% befogadó hézagú, kezdetben nagyobb tömörségű minta, ellenállása csak 4 % alakváltozás után éri el a jóval lazább, 17% befogadó hézagú, de csak 4,3% bitument tartalmazó mintát). A magas bitumentartalomnak ezt a kedvezőtlen hatását erősíti a forgalom terhelésének fokozottabb dinamikája, mert az feltételezhetően még nagyobb sebességgel kívánná meg a térfogati felkeményedést, vagyis tömörödést. A várható következmény a még nagyobb maradó deformáció.

A 14. ábrán az látható, hogy a potenciálisan meglévő belső súrlódási szög (55,5o) hogyan csökken le 40,2o-ra, ha a törési feltétel megszerkesztéséhez a 2. sorozat (17% befogadó hézagú) 5,3% kötőanyagtartalmú két magasabb cellanyomású, tehát a „kritikus” és a „laza” állapotú mintái feszültségállapotát használjuk fel. Fontos, hogy ezt az alacsonyabb belső súrlódást csak 10 % deformáció után éri el a „laza” kiindulási állapotú minta, míg



14. ábra: A súrlódási szög csökkenése a lassú tömörödés miatt

a teljes súrlódás már 2 % deformáció után mobilizálódik a „kritikus” állapotban. Most megválaszolható a 2. fejezetben feltett kérdés. A nagyobb cellanyomáson, de alacsony hőmérsékleten végzett kísérletek alapján alacsonyabb súrlódási szög adódik, mert az alacsony hőmérsékleten a bitumen viszkozitása sokkal nagyobb, így a tömörödés még kevésbé lehetséges, mint magas hőfokon (15. ábra).



15. ábra: A félbevágott és deformált triaxiális minták

## Irodalomjegyzék

- [1] Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S45: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen. Bergisch Gladbach, Februar 2006
- [2] National information and technology platform for infrastructure, traffic, transport and public space (CROW) Literature survey on existing design methods for flexible pavements. Intermediate report of the CROW Working Group on Design Tool for Asphalt, 2006.
- [3] Gajári Gy. Az aszfalt reológiai jellemzőinek számítása dinamikus hajlítási kísérletből. Közúti és Mélyépítési Szemle, 54. évfolyam, 2004. augusztus, pp. 23-31.
- [4] H.L. ter Huerne: Compaction of Asphalt Road Pavements; Using Finite Elements and Critical State Theory (Doktori disszertáció) University of Twente, Enschede 2004
- [5] Schofield, A., Wroth, P.: Critical State Soil Mechanics. McGRAW – HILL. LONDON, 1968

## Summary

### Applying the Critical State Theory to the plastic deformation of asphalt mixes

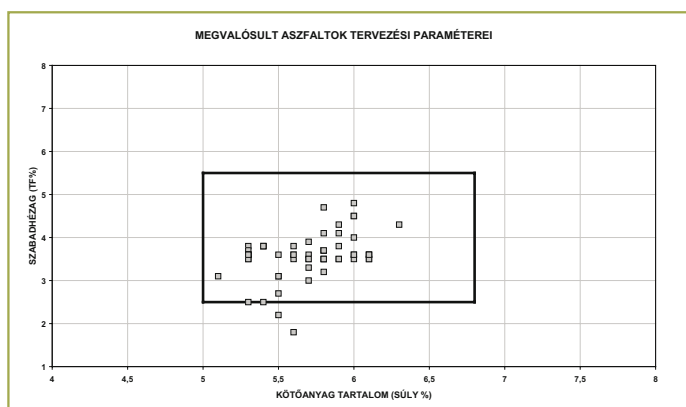
A possible cause of the permanent deformation is the inadequate utilization of the mineral aggregates strength. Bitumen gives cohesion to asphalt, and mineral aggregates (skeleton) give inner friction. At high temperature cohesion decreases rapidly. According to the plasticity theory of soil mechanics (Critical State Theory), inner friction is a function of the compactness. Results of a research programme prove the validity of the mentioned theory on asphalt. Compacting and wheel tracking laboratory tests demonstrate a close relationship between bitumen content and rut depth. The triaxial tests carried out at the Dresden Technical University prove that bitumen contents exceeding an “optimum value” affect inner friction

Aszfaltkeverékeink a pályaszerkezetben vizsgáznak, a keveréktervezési eljárások célja pedig az, hogy a keveréket erre a „vizsgára” tegyék alkalmassá, azaz tulajdonságaik feleljenek meg a valós terhelések által meghatározott igénybevételeknek. Cégünk évente több száz aszfaltkeverék alkalmassági vizsgálatát végzi el, megrendelőink joggal várják el tőlünk, hogy teljesítőképes és egyidejűleg gazdaságos aszfaltkeverékeket tervezzünk. Azért, hogy vevőink kívánsága teljesüljön összehangolt innovációt hajtunk végre, amelynek egyes részleteiről számolok be.

## 2. Jelenlegi keveréktervezési gyakorlatunk

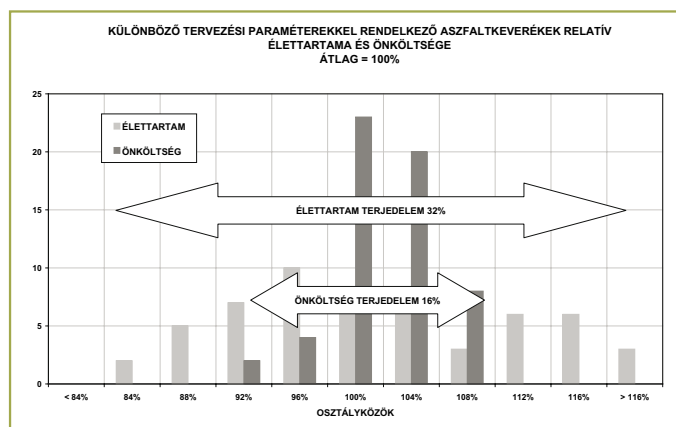
A hazai keveréktervezés az alkotóanyagok tulajdonságainak ellenőrzése után egy felvett szemeloszlású, különböző kötőanyagtartalmú keverékekből készülő Marshall próbatestek hézagviszonyának meghatározásából áll. Amennyiben ezek kielégítik az adott keverékre vonatkozó határértékek előírásait, a keveréktervezés lényegében befejeződött, esetenként szükségesek további vizsgálatok egyéb keverék tulajdonságok meghatározására (keréknyomvizsgálat, hidegviselkedés stb. a gyártott keverékek 20 – 40 % - a esetében). Vegyük észre, hogy ez egy próbálkozásos eljárás, amely számos esetben már a hézagviszonyok szempontjából sem sikeres, nem beszélve az egyéb keverék tulajdonságokról. Azt is észre kell venni, hogy a keverék tulajdonságok és a valós követelmények (repedési hajlam, deformációs hajlam stb.) között a kapcsolatot az előállított keverékek túlnyomó többségénél kizárólag a tervezési előírások biztosítják, nagyrészt kvalitatív, leíró módon, amiből a követelmények (a „vizsga” kérdéseire adott válaszok) nem vezethetők le.

Nézzünk egy példát, az 1. ábrán megvalósult aszfaltkeverékek tervezési paraméterei láthatók, egy, a megszokottól eltérő ábrázolásban. A diagramon látható aszfaltkeverékek megfelelnek az előírásnak (szabadhézaguk és a kötőanyagadagolás) az előírt tartományban van. Ugyanakkor ezen kívül mit tudunk róluk?



1. ábra – Aszfaltkeverékek tervezési paraméterei

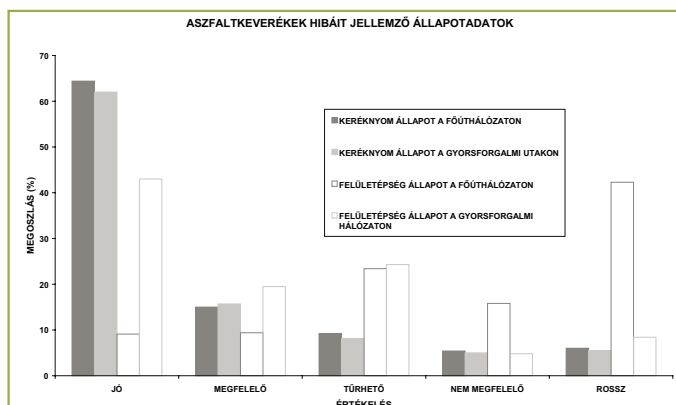
A korszerű anyagvizsgálati és pályaszerkezet – méretezési eljárások felhasználásával lehetséges a valós viselkedést jellemző képességek meghatározása. A 2. ábrán a fenti keverékekből készíthető pályaszerkezet – megerősítés relatív élettartamának és önköltségének gyakorisággörbéit láthatjuk. Jól látható, hogy



2. ábra – Aszfaltkeverékek relatív élettartama és önköltsége megszokott tervezési előírásaink betartásával nagyon széles élettartam és elég jelentős önköltségtartomány adódik. Aligha kell további érv ahhoz, hogy belássuk, jelenlegi gyakorlatunk sem a tényleges viselkedés, sem az önköltség oldaláról nem biztosítja kellő mértékben azt, hogy valóban teljesítőképes és gazdaságos keverékeket tervezzünk. Ezek alapján megfogalmaztunk egy célt, ami szerint adatbázisok és egyszerű, gyorsan végrehajtható vizsgálatok alapján olyan előtervezési rendszer kialakítása, amellyel a végleges összetétel kiválasztása előtt a lehetséges összetételek viselkedési és gazdasági tulajdonságait sok változatban becsüljük, ezután már „csak” ellenőrizzük a végrehajtott alkalmassági vizsgálattal.

## 3. Hibák a beépített aszfaltkeverékekben

Mindenekelőtt az a kérdés, hogy tapasztalataink szerint melyek azok a hibák, amelyek az úthálózaton előfordulnak. A kérdés azért fontos számunkra, mert ennek ismeretében lehet az előtervezési eljárás során a vizsgálandó – a hibát okozó tulajdonságokat meghatározó - paraméterek számát ésszerű mértékben csökkenteni. A 3. ábrán a magyar közúthálózat nagy terhelésű részén felvett állapotadatokat láthatjuk. Az állapotadatokból levonhatjuk azt a következtetést, hogy a nagy terhelésű hálózatrészen a legnagyobb mértékben az aszfaltok repedései okoznak problémát



3. ábra - Állapotadatokat

<sup>1</sup> okl. építőmérnök, ügyvezető, H-TPA Kft.



(a felületépség indikátor leginkább erre érzékeny), a keréknyom állapot – bár a forgalombiztonság miatt jelentősége vitathatatlán – közel sem mutat olyan rossz képet.

#### 4.A tervezett eljárás elvi alapjai

Az aszfaltkeverékek bármilyen tulajdonságát a következő elvi jellegű összefüggés alapján meg tudjuk határozni.

$$Y(\text{aszfalt tulajdonság}) = f(h\% + b\% + k\%) + f(\text{kötőanyag}) + f(\text{adalékanyag}) \quad (1)$$

Azaz a tulajdonság levezethető a keverék fázisos összetételéből, a kötő- és az adalékanyag tulajdonságaiból. Az aszfaltmechanikai vizsgálatok elterjedésével számos regressziós összefüggés jelent meg a szakirodalomban, amelyek alakja a leírt összefüggés „speciális” megoldásainak tekinthető. Így például a hazai pályaszerkezet – méretezési előírás a típus pályaszerkezetek aszfaltjai esetében a modulusnál a Francken – Verstraeten, a megengedett megnyúlás esetében a Bonnoure által kidolgozott Grande Couronne összefüggést használja.

Ennek megfelelően a tervezett eljárás elvi alapja olyan regressziók kidolgozása, amelyek az (1) alatti összefüggés szerinti paramétereken alapulnak, azaz az aszfalt tulajdonságra a fázisos összetétel, valamint az alkotók tulajdonságai alapján lehet következtetni.

#### 5. A tervezett eljáráshoz szükséges gyakorlati megfontolások

A program alapját képező gyakorlati jellegű megfontolásaink a következők voltak:

- Vizsgálandó keverékek

Társaságunk évente néhány százas gyakorisággal készít alkalmassági vizsgálatokat és évente kb. 30 keverőtelep üzemi gyártásközi vizsgálatait látja el. Ez - a fejlesztési feladathoz szinte automatikusan – biztosítja a gyakorlatban teljes hazai aszfaltfajta spektrum „előfordulását” és hagyományos vizsgálati adatait. Cégünk az Ultra Highway® szoftver használatával ezeket a vizsgálatokat adatbázis formában rögzíti és gyűjti, ezek tehát lényegében költségmentesen állnak rendelkezésre. A program előkészítése során ezen teljes halmazból a gyártási volumenek sorbarendeze alapján 13 keveréktípust választottunk ki, amelyeknek a különböző keverőtelepeken legalább 60 (azaz keveréktípusonként legalább 5) változatot kívánunk részletesen vizsgálni.

- Vizsgálandó aszfalttulajdonságok

A vizsgálandó aszfalttulajdonságokat alapvetően két csoportba soroljuk, az egyik a deformációs hajlam, a másik a keverék repedésérzékenysége. Az elsőhöz különösebb kommentár nem szükséges, a „repedésérzékenység” meghatározás némi magyarázatot igényel.

A fejlett országok anyagtani kutatásainak áttekintése során számunkra világossá vált, hogy a közepes és az alacsony hőmérséklettartományban bekövetkező aszfaltkárosodások meglehetősen jól visszavezethetők a keverékek fázisos összetételére és a keverék reológiai paramétereire. Ilyen összefüggéseket sorolunk fel példaképpen az alábbiakban.

$$N_{f,SPDM} = (0,856V_b + 1,08)^5 (S_m \cdot 10^6)^{-1,8(1/\epsilon)^5} \quad (2)$$

$$N_{f,Bonnoure} = (4,402 \Pi - 0,205 \Pi V_b - 2,707)^5 (S_m \cdot 106)^{-1,8(1/\epsilon)^5} \quad (3)$$

$$N_{f,SHRP} = 2,738 \cdot 10^5 \exp^{0,077VFB} \epsilon^{-3,624} (S_m \sin \delta)^{-2,72} \quad (4)$$

Ahol

$N_f$  = a tönkremenetelhez vezető terhelési ciklusok száma

$\epsilon$  = az alakváltozás nagysága

$V_b$  = a kötőanyag százalékos aránya a keverékben

$\Pi$  = penetrációs index

$S_m$  = merevségi modulus (MPa-ban)

$VFB$  = hézagok a bitumennel kitöltött ásványi adalékanyag vázban ( $=V_b/(V_b+V_a)$ )

$\delta$  = fázisszög

Az elsősorban a delfti egyetemen folytatott komplex kutatások alapján állítható, hogy az aszfaltok repedéseinek kialakulása bár sok, egymástól eléggé eltérő ok alapján történik, a repedésekkel szembeni ellenállóképesség viszont tartalmilag nagyon hasonló, a fenti összefüggésekben is szereplő tényezőktől, tehát a fázisos összetétel és a reológiai tulajdonságok által determinált.

Jacobs alapvető munkájában a fáradás Wöhler féle megközelítésén túl a törésmechanika törvényeit felhasználva egy komplex megoldást adott az aszfaltkeverékek repedési tulajdonságainak jellemzésére, ezen a bázison Medani és Molenaar gyakorlati célra is alkalmas rendszert fejlesztett ki. A módszer az aszfaltkeverék referenciahőmérsékleten meghatározott mestergörbe meghatározásán alapszik, eljárásunkban ezt kívánjuk alkalmazni.

- A szükséges próbatest

A szükséges próbatest kiválasztása – tehát, hogy milyen eljárással hajtsuk végre az aszfalt tömörítését – nagyon fontos kérdés. Mindekelőtt lényeges, hogy a tömörítővizsgálat precizitása a lehető legjobb legyen. Szükséges feltétel, hogy az aszfalton elvégzendő egyéb vizsgálatok lehetőleg ugyanezen próbatesten történjenek, részben precizitási, de nem kis mértékben a fejlesztés gazdaságossági okai miatt is. Végül – szintén gazdaságossági okok miatt – célszerű a kapcsolódó vizsgálatok minimalizálása is. Mindezen okok miatt a zsirátoros tömörítést választottuk. Ennek precizitását korábbi vizsgálataink már igazolták.

A próbatest készítése során a berendezés (a térfogati elven alapulva) folyamatosan rögzíti a próbatest hézagviszonyait, így ennek külön vizsgálata nem szükséges. Végül egy kifejezetten erre a célra végrehajtott fejlesztésünkkel megoldottuk, hogy a giratoros próbatestet tengelyirányban kettéfűréselve, azon hajlítóvizsgálatot tudjunk végrehajtani, ezáltal a legfontosabb viselkedési tulajdonságokat meghatározó fundamentumok megállapíthatók. A berendezés – vizsgálatra felkészítve – a 4. ábrán látható.



4. ábra

#### 6. Néhány eddigi eredmény

Az eljárás lényegében tesztelési fázisban van, azaz különböző vizsgálatok már folyamatban vannak, keressük a legmegfelelőbb adatbázis kialakításokat, illetve az eddigi eredmények alapján

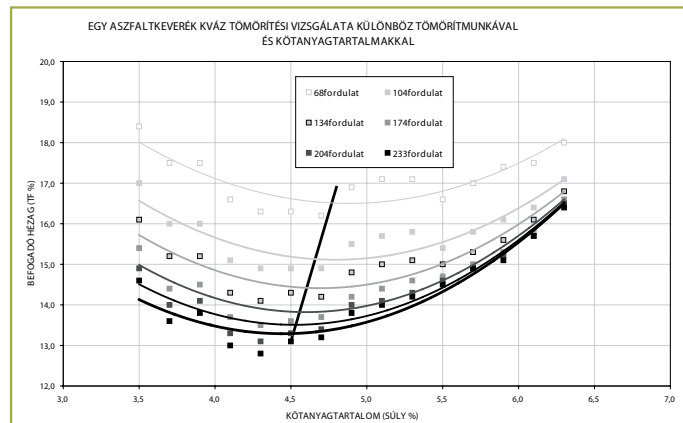


szükségesek bizonyos szervezési jellegű intézkedések, elsősorban a folyamat rendszerszemléletű felépítése.

Mindezzel együtt néhány – véleményünk szerint érdeklődésre alapot adó eredményt ismertetek.

- Deformációs hajlam vizsgálata

A deformációs hajlam vizsgálatát – Gajári György kollégám által kifejlesztett és általa részletesen ismertett módszerrel végeztük (ld. az előző cikkben). A vizsgálat alapja az ún. Critical State Theory, amely a szemcsés halmazok deformációját azok térfogati állapotától (sűrűségétől) a feszültségállapottól és az anyag belső



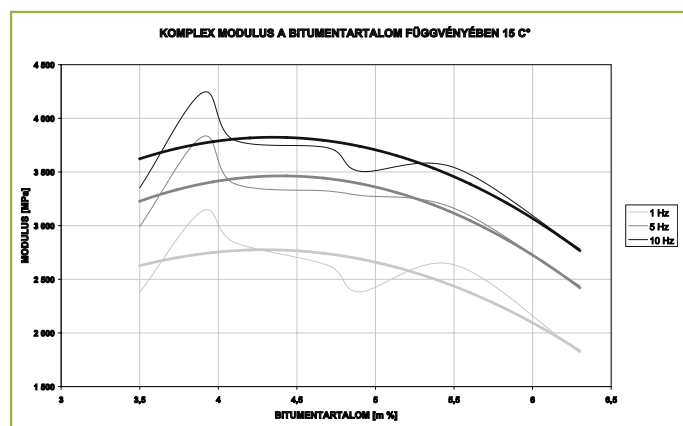
5. ábra – komplex modulus a bitumentartalom függvényében

sűrűdésétől meghatározottan kijelöl egy olyan állapotot, ahol az anyag nem deformálódik.

Az 5. ábrán a különböző tömörítési vonalak minimumpontját összekötő ferde vonal jelöli a keverék (különböző sűrűségi viszonyok, azaz tömörítés hatására kialakuló) „kritikus állapotát” amelyben (és attól „balra”) az aszfaltkeverék nem deformálódik. Ezáltal nagyon egyszerűen és gyorsan lehet ellenőrizni az adott keverék deformációs képességét.

- Aszfalt reológiai tulajdonságok eredményei

A különböző hőmérsékleteken és frekvencián elvégzett vizsgálatok jól mutatják a keverék kötőanyag-tartalmának hatását, fel kell hívni a figyelmet arra, hogy a modulus elég határozott optimu-



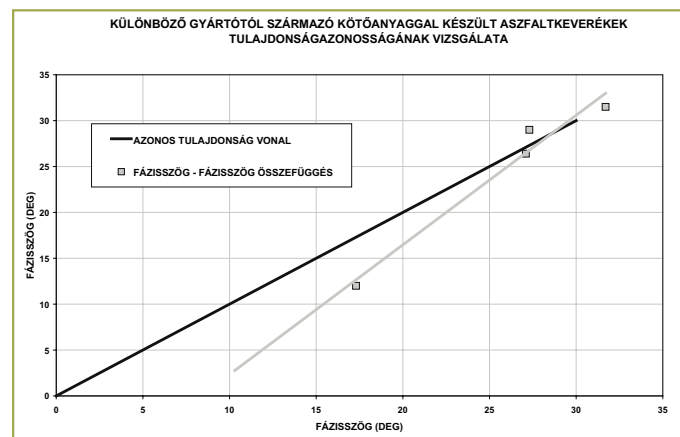
6. ábra – komplex modulus a bitumentartalom függvényében

mot mutat (6. ábra) a „kritikus állapotához” tartozó kötőanyag-tartalom mellett, ami lehet, hogy nem véletlen.

- Kötőanyag-tulajdonságok reológiai vizsgálata

Az (1) elvi egyenletben szereplő egyik fontos tényező az aszfalt-tulajdonságok szempontjából a kötőanyag. Ha az aszfaltkeverék a pályaszerkezetben vizsgázik, a kötőanyag az aszfaltkeverékben. Hogy a kötőanyag hatását az aszfaltkeverékre meg tudjuk állapítani, definiáltunk egy standard aszfaltkeveréket, amelyen azonos

kötőanyagadagolás mellett különböző kötőanyagokkal reológiai paramétereket vizsgálunk. Várakozásunk szerint egyrészt különbség mutatkozik a különböző fokozatú kötőanyagok között, másrészt az azonos fokozaton belül megkülönböztethetők lesznek a különböző származású kötőanyagok. Az eddigi vizsgálatok ezeket a várakozásokat alátámasztják. Különösen érdekes az, hogy az azonos fokozatú, különböző származású kötőanyagok között



7. ábra – aszfaltkeverékek tulajdonságai

meglepően nagy különbségek mutatkoznak (7. ábra).

## 7. Összefoglalás

Jelen írásban röviden beszámoltam a cégünkönél végrehajtott innovációkról, amelyek mind az elkészítendő szerkezetek viselkedését, mind azok gazdaságosságát kívánják javítani. Véleményem szerint a hazai közutas szakma fejlődését kizárólag az átgondolt fejlesztések tudják garantálni.

### Irodalomjegyzék

- (1) Medani, T. O., Molenaar, A. A. A.: A Simplified Practical Procedure for Estimation of Fatigue and Crack Growth Characteristics of Asphaltic Mixes. International Journal of Road Materials and Pavement Design, Volume X, No. X/2000.
- (2) Pohlmann, P.: Simulation von Temperaturverteilungen und thermisch induzierten Zugspannungen in Asphaltstraßen (Schriftenreihe TU Braunschweig, Heft 9. 1989)
- (3) Gajári Gy.: Reológiai jellemzők számítása dinamikus hajlítási kísérletről. Közúti és Mélyépítési szemle 54. évfolyam, 2004. augusztus.
- (4) Schofield, A. N., Wroth, C. P.: Critical State Soil Mechanics. McGRAW – HILL. LONDON, 1968

### Summary

#### Modelling asphalt properties

The mix design essentially is an attempt method which rarely results a mixture which meets all kind of different criteria. Our aim with the described development is to create a special pre-design system which is based on regressions in correlation with special, practical and rapid tests. This pre-design method makes possible the optimisation of the necessary behaviour properties and the cost, and the effective design has only a control function.

A cikk I. részében beszámoltunk a módszer leggyakoribb alkalmazási területeiről, a forgalomszimulációs modell építéséhez kapcsolódóan folytatott alapparaméter kutatásunkról. A II. részben a szimulációs modellek kalibrálásával, a szimulációs futtatásokkal szemben támasztott követelményekkel és az eredmények kiértékelésével foglalkozunk.

### A modell paramétereinek kalibrálása és a forgalmi igények validálása

A modell „beszabályozása” két fő lépésből áll:

- Az első a modell kalibrálása, azaz a paraméterezésének olyan irányú behangolása, hogy a valóságban megfigyelt/mért és a modellben megfigyelt/mért jellemzők közti különbségek minimálisak legyenek.
- A második rész a forgalmi igények, utazási idők validálása, azaz a kalibrált modellben azok ellenőrzése. A valóságban megfigyelt forgalomnagyságok és utazási idők – és ezekkel összefüggésben a sorképződési jellemzők – közötti eltérések minimalizálása.

### A modell kalibrálásának eszközei

1. A „saturation flow”, azaz egy forgalmi sáv, vagy útszakasz szabad forgalmi körülmények közötti átbocsátóképességének beállítása. Ennek közvetett eszköze lehet a minimális követési időköz beállítása, de a korszerű modellekben ez már a járműkövetési modell paraméterezésének beállítását teszi szükségessé, ami hatással van a minimális követési időközre, ezáltal a maximális kapacitásra. Torlódásos hálózat modellezésénél ezt a kalibrálást el kell végezni! (Gondoljunk csak arra, hogy autópályán mérhető akár 2300 j/ó forgalom sávonként egy-egy időszakban, míg a forgalomtechnikai elméleti kapacitáshatár 1800 j/ó, azaz a minimális követési időköz 2 másodperc. De egy jelzőlámpás szabályozásnál, körforgalom behaladó ágán torlódásos forgalmi szituációban szintén mérhető 2 másodpercnél rövidebb követési időköz.)
2. Egy sáv szabad kapacitását a sebesség is alapvetően befolyásolja. Ezért a sebesség-eloszlás jármű/járművezetői csoportonkénti helyes beállítása feltétlenül szükséges.
3. A járművek dinamikai képességeit (gyorsítás, lassítás, maximális sebesség) a valóságos helyzethez kell igazítani.
4. A hálózati geometriából adódó „csökkentett sebességű” részzszakaszok helyes beállítását el kell végezni.
5. Jelzőlámpás csomópontnál a sárga, ill. piros-sárga jelzésre történő reakciót a modellezett szituációhoz kell igazítani. (Gyakran megfigyelhető, hogy a valóságban a minimális zöldidőnél (5 mp.), ha folyamatos az igény, akkor 3-4 jármű is áthalad, azaz az átmeneti jelzések alatt is behaladnak a csomópontba.)
6. A becsatlakozási határidőközöket minden szituációban helyesen be kell állítani.
7. A sávváltási manővereket a valósághoz kell igazítani. Azaz be kell állítani, hogy a jármű egy szükséges irányváltási pont előtt milyen távolságban kezd el törekedni a sávváltásra, vagy mennyivel előtte szerez tudomást a járműveze-

tő a sávváltás szükségességéről (irányrendezői sávok, sávfelfogyás, fonódás, kiválás, stb.)

8. A forgalomnagyságok és áramlási irányok helyes beállítását el kell végezni.

### A modell kalibrálásának végrehajtása

A valóságban könnyen mérhető jellemzőkkel kell összevetni a modell jellemzőit. Erre a legalkalmasabbak a forgalomnagyság, sorhosszak, utazási idők. (A sebesség mérésére csak ritkán van mód, ezért arról külön említést nem teszünk.) Ezzel párhuzamosan a mikroszimulációs modellek kalibrálásánál a vizuális elemzés is nagyon hangsúlyos.

- A valóságtól eltérő sávváltások,
  - elsőbbségadási szituációk (gyakori és feltétlenül kiküszöbölendő hiba, amikor a járművek „keresztül hajtanak” egymáson!),
  - sebesség megválasztások,
  - sorfelépülés, -lebonmlás jellege, a sorok tartóssága
- döntően csak így küszöbölhető ki. Az összehasonlító elemzésekhez általában célszerű videofelvételt készíteni.

### A forgalomnagyságok validálása

A mért jellemzők közül a forgalomnagyságra minden esetben el kell végezni a validálást. Kisebb hálózat esetén (csomópontok száma kisebb, mint 10 és nincsenek alternatív útvonalak), az összes csomópont minden kanyarodó irányára, nagyobb hálózat esetén (csomópontok száma 10, vagy annál nagyobb, ill. vannak alternatív útvonalak) statisztikai mintavétellel – javasolt a hálózat minden meghatározó csomópontjának ágait kiválasztani – kijelölt kanyarodó irányokra el kell végezni a GEH index kiszámítását.

$$GEH_i = \sqrt{\frac{2 \cdot (f_{i,megfigyelt} - f_{i,szimulált})^2}{f_{i,megfigyelt} + f_{i,szimulált}}}$$

ahol:  $GEH_i$  az i-edik kijelölt forgalmi irány GEH indexe

$f_{i,szimulált}$  az i-edik kijelölt forgalmi irányban mért forgalomnagyság [j/ó] dimenzióban  
az i-edik kijelölt forgalmi irányban számított (szimulált) forgalomnagyság [j/ó] dimenzióban

Kisebb hálózaton akkor tekinthető kielégítőnek a validálás eredménye, ha:

- minden kijelölt i-edik forgalmi irányra átlagosan a GEH index kisebb, mint 2 és
- a kijelölt irányok 85 százalékában egyenként a GEH index kisebb, mint 3.

Nagyobb hálózaton akkor tekinthető kielégítőnek a validálás eredménye, ha:

- minden kijelölt i-edik forgalmi irányra átlagosan a GEH index kisebb, mint 4 és
- a kijelölt irányok 85 százalékában egyenként a GEH index kisebb, mint 5.

<sup>1</sup> A cikk első része előző, júniusi lapszámunkban jelent meg.

<sup>2</sup> Okl. közlekedésmérnök, irányító tervező FOMTERV Zrt. m.takacs@fomterv.hu

A validálás megfelelőségének kritériumait az 1. táblázat foglalja össze

1. táblázat: A validálás megfelelőségének kritériumai

	Az összes validált irányra átlagosan GEH index kisebb	A validált irányok 85%-ban GEH index kisebb
Kis hálózat (és nincs alternatív útvonal)	2	3
Nagy hálózat (vagy van alternatív útvonal)	4	5

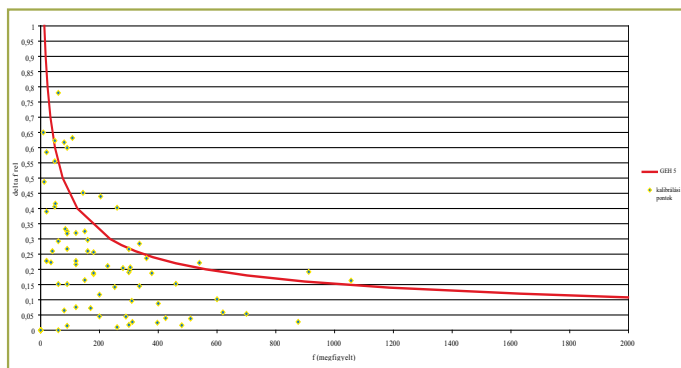
A GEH indexen alapuló validálást Nagy-Britanniában a 70-es évek óta használják széleskörűen. Az eljárás intuitív, mérnöki tapasztalatokon nyugszik. Az útmutató kidolgozásakor több mint húsz hazai modellen alkalmaztuk eredményesen.

A validálás eredményének ábrázolására két szemléletes grafikon készíthető. Javasolt kiszámítani minden i-edik kijelölt forgalmi irány esetében a relatív hibát is ( $\Delta f_{i,rel}$ ):

$$\Delta f_{i,rel} = \frac{\sqrt{(f_{i,megfigvelt} - f_{i,szimulált})^2}}{f_{i,megfigvelt}}$$

Ekkor a relatív hibákat a megfigyelt forgalomnagyság függvényében ábrázolva a megfelelőség GEH index által rögzített kritériumával együtt igen plastikus ábra jön létre (1. ábra). Ha a validálási irányokra számított relatív hibákat ábrázoló pontok 85 százaléka a GEH 5 vonal alá esik, akkor a modell validálása sikeres.

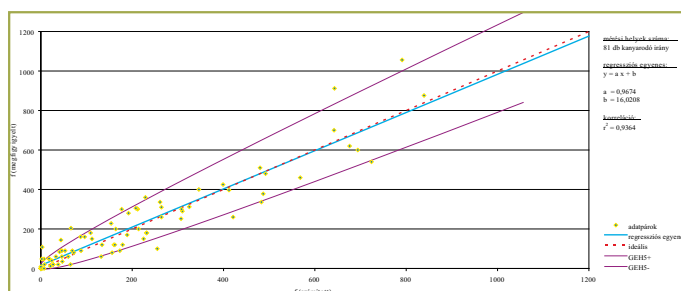
Másik esetben a pont párokon kívül a pontthalmaz regressziós egyenese és a pont párok korrelációja is megjeleníthető (2. ábra). Ha a validálási irányokra számított értékeket ábrázoló pontok 85 százaléka a GEH 5 burkoló görbék közé esnek, akkor a modell



1. ábra: A forgalomnagyság mért és számított eredményének relatív eltérése

validálása sikeres.

### A sorhosszak validálása



2. ábra: A forgalomnagyság mért és számított eredményének eltérése

Forgalomnagyságok validálása után el kell végezni a sorfelépülések mértékének és jellegének validálását is. Alapvetően, ha a modellben tapasztalható sorképződés, ugyanakkor a valóságban nem, vagy fordítva, akkor ennek okát fel kell tártani és a paraméterezés helyes megválasztásával kezelni.

Ahol a valóságban és a modellben is sorképződés alakul ki, ott az átlagosan várakozó járművek számát, a sorhosszat kell összevetni. Az összehasonlításba célszerű még bevonni az időszakosan kialakult maximális sorhosszat is. Az eltérés mértékét (relatív hibát) tekintve 25 százalék még elfogadható. Kevésbé objektív összehasonlítást tesz lehetővé a sorok tartósságának, felépülési-, lebomlási jellegének összehasonlítása, ám mint a vizuális kalibrálás része, elvégzése javasolt.

### Az utazási idők validálása

Az utazási időket a valóságban megmérni – kevés kivételtől eltekintve – bonyolult és költséges. Amennyiben ilyen adat rendelkezésre áll, akkor a validálást ezekre az értékekre is érdemes elvégezni.

Ha tömegközlekedési járművek vizsgálatára irányul az elemzés, akkor az utazási idők járművön utazva könnyen megmérhetők (akárcsak a megállóhelyi utascsera idők). Ekkor a validálást ezekre az értékekre el kell végezni.

A megfelelőséget, az időértékek másodperc alapú számításba vételével, a GEH index alkalmazásával kell minősíteni. (A forgalomnagyságok validálásával megegyező módon.)

### A modellek futtatása és az outputok előállítása

A modell futtatása azt jelenti, hogy a kalibrált modellhálazon a validált forgalmi igényeknek megfelelően szimulálásra kerül a forgalom lebonyolódása. Az outputok előállítása pedig a szimulációs folyamat közben gyűjtött információkat takarja.

Nem szabad megfeledkezni arról, hogy a forgalom-szimuláció egy valószínűségi folyamat, jellemző eloszlás-függvényekkel, várható értékekkel és szórásokkal. Egy modellezett periódus eredményeit egyértelműen meghatározza, hogy melyik induló véletlen számmal kezdődik a véletlen szám generálás, ami a teljes valószínűségi folyamat motorja. Tehát, ha az induló véletlen szám ugyanaz, akkor a változatlan modellt futtatva az outputok is változatlanok. (Megjegyzés: Eltérő processzorok esetében a véletlen szám generálás különbözhet, így az előbbi állítás minden esetben csak azonos számítógépen igaz.)

Ezért ahhoz, hogy megfelelő megbízhatósági szintű eredményeket kaphassunk, több futtatás eredményeinek statisztikai módszerekkel történő kiértékelésére van szükség.

Általában 10-20 futtatás legalább szükséges ahhoz, hogy az outputok átlagolásával megfelelő megbízhatósági szintű eredményeket kaphassunk. A 95%-os megbízhatósági szint elérését kell megcélozni, ez az esetek túlnyomó többségében megfelelő. Ennek kielégítéséhez az alábbi feltételeknek kell teljesülnie:

A futtások 95%-ban igaz, hogy

$$T_i \in [\bar{T} \pm 2 \cdot \sigma_T]$$

ahol:

- $T_i$  az i-edik futtatás során mért összes késedelmi idő
- $\bar{T}$  az összes futtatás során mért összes késedelmi idő átlaga
- $\sigma_T$  az összes futtatás során mért összes késedelmi idők szórása

Tehát minden egyes futtatás során mért összes idővesztésnek ( $T_i$ ) 95%-ban bele kell esnie az összes futtatás átlagos idővesztéséhez ( $\bar{T}_i$ ) képest pozitív és negatív irányban az összes idővesztések szórásának ( $\sigma_i$ ) kétszeresével eltolt tartományba. Ha számos futtatás során sem elégíthető ki a fenti kritérium, akkor vissza kell nyúlni a modell kalibráláshoz (leginkább vizuális) és különböző véletlen számról indítva a futtatásokat fel kell tárnai az eredmények instabilitásnak okát.

Külön meg kell említeni azokat az eseteket, ahol a modellhálózaton léteznek alternatív útvonalak és azok között a forgalmat valamilyen algoritmus szerint a szimulációs eljárás osztja meg. Amennyiben ez az útvonalválasztás dinamikus, azaz valamilyen információkkal rendelkezik a járművezető egy útvonal jelenlegi, ill. a múltban szokásos költségéről, akkor csak valamilyen iterációs eljárás után érhető el, hogy a modell futtatás eredménye stabil, azaz a hálózati szakaszok terhelése konvergál valamilyen értékhez. Ha ez a konvergencia nem teljesül, akkor nem igaz, hogy adott induló véletlen számmal kezdve a futtatást az outputok megegyeznek. Ennek hiányában pedig az eredmények, következtetések hibásak lehetnek, illetve megbízhatóságuk alacsony. A konvergencia egyszerűsített kritériuma az alábbiak szerint fogalmazható meg:

Azonos induló véletlen számról indítva két egymást követő futtatás outputjaként előálló utazási idők az összes szakasz 90%-ára vonatkozóan ne mutassanak 10%-nál nagyobb eltérést. Az outputok előállításához legalább 1 óra értékelhető (feltöltődési időn túl) futás időt kell biztosítani. Minden esetben figyelembe kell venni a hálózat feltöltődési idejét! Mivel a szimulációs futtatás üres hálózaton indul (azaz kezdetben nincsenek rajta járművek), ezért az adatgyűjtések megkezdéséhez meg kell várni azt az időpillanatot, amikor a hálózaton közlekedő összes járművek száma már stabil, értéke adott szám körül ingadozik. Ekkorra a hálózatot már ugyanannyi jármű hagyja el, mint amennyi arra érkezik. A szimulációs futtatás megkezdésétől eddig eltelt időt nevezzük a modell feltöltődési idejének. A feltöltődési idő nagysága nyilvánvalóan a hálózat méretétől függ. A gyakorlatban megfelelő, ha ezt az értéket a hálózaton leghosszabb szabad forgalmi körülmény mellett (idővesztés nélkül) mért utazási idő háromszorosára vesszük.

### A szimulációs futtatások eredményeinek értékelése

A modell futtatások eredményeinek kiértékelésével minősíthetők egyes szituációk, ill. lehetőséget ad változatok összehasonlító elemzésére. Kiértékeléshez csak a kellő számú futtatás után előállított adathalmazt lehet felhasználni!

### „A szimulációs modellben minden megmérhető.”

Arra, hogy milyen jellemzőket kell mérni adott vizsgálat során, nehéz általános érvényű előírást megfogalmazni, azt mindig az adott szituációban kell eldönteni. Az útmutató inkább javaslatot kívánt megfogalmazni, pontosabban azt a minimum szintet meghatározni, melyet minden vizsgálat általánosan megkövetel. Az értékelés szempontjából megkülönböztethető, hogy egy adott szituációt kell minősíteni vagy egy adott helyzet több változatát összehasonlítani. Utóbbi esetben az értékelés végeredménye a változatok bizonyos szempontrendszer szerinti sorbaállítása lehet, míg egy adott szituáció értékelése az egyes számított jellemzők önálló minősítését jelenti. Az útmutató bizonyos jellemzők tekintetében javaslatot tesz azok önálló értékelésére is.

A szimulációk típusa szerint négy esetet tárgyal az útmutató:

- autópálya csomópontok
- jelzőtáblás, ill. jelzőlámpás csomópontok
- nagyobb hálózatok (léteznek alternatív útvonalak)

- közösségi közlekedés

Ezek között több helyen is nyilvánvalóan átfedés tapasztalható, írásunkban a jelzőtáblás, ill. jelzőlámpás csomópontokra vonatkozó javaslatunkat mutatjuk be.

### Hálózati szakaszra vonatkozó mutatók

- Forgalomnagyság: Az adott szakasz órás forgalma jármű/óra dimenzióban kifejezve, járműkategóriánként, ill. egységjármű/órában. Ha a járműkategóriák megkülönböztetése a modellezés során nem volt indokolt, akkor a forgalomnagyság egységjárműben nem fejezhető ki.
- Sebesség: Az adott szakasz átlagos utazási sebessége km/óra dimenzióban.

A szolgáltatási szint (LOS) az átlagos sebesség és a szabad áramlási sebesség hányadosával jellemezhető (2. táblázat):

- Megállások száma: Az adott szakaszon vagy hálózaton egy óra alatt az összes járműre vonatkozó megállások száma [db].
- Megállási ráta: Egy adott szakaszon vagy hálózaton az egy járműre vonatkozó átlagos megállások száma [db/jármű]
- Sorhossz: Adott szakaszon a helyzetjelző vonaltól mért járműoszlop átlagos hossza méterben. Jellemző érték még a vizsgálat időtartamában kialakult maximális sorhossz is.

A sor modellezésének egy lehetséges definíciója: kialakulása:

- a járművek sebessége kisebb, mint 5 km/h és
- a legnagyobb követési távolság a sorban kisebb, mint 20 m felbomlása:
- egy jármű sebessége a sorban nagyobb, mint 10 km/h, vagy

2. táblázat a szolgáltatási szint meghatározása a sebességek hányadosa alapján

LOS	$\frac{\bar{v}}{v_0}$
A	1 – 0,9
B	0,9 – 0,7
C	0,7 – 0,5
D	0,5 – 0,4
E	0,4 – 0,33
F	< 0,33

- a követési távolság meghaladja a 20 métert.
- Torlódási index: Egy szakaszon a szabad áramlású utazási idő és az átlagos utazási idő hányadosa. Értéke 0 és 1 közötti.

### Relációra vonatkoztatott mutatók

- Átlagos utazási idő: Egy kiinduló és célpont közötti utazás átlagos időigénye [perc].
- Átlagos késedelmi idő: Egy kiinduló és célpont közötti utazás során elszenvedett átlagos idővesztés. Azaz az átlagos utazási idő és a szabad áramlású utazási idő különbsége.
- Késedelmi index: Egy kiinduló és célpont közötti utazás során elszenvedett idővesztés és a szabad áramlású utazási idő hányadosa (3. táblázat).
- Megbízhatóság index: Az utazási idő kiszámíthatóságát mutatja egy adott relációban az összes futtatás során mért utazási idők szórását viszonyítva az átlagos utazási időhöz.



$$\frac{1}{n} \sum_n \sqrt{(t_{i,j} - \bar{t}_{i,j})^2}$$

ahol:

n: az összes szimulált utazási idő darabszáma

$t_{i,j}$ : az i és j körzetek közötti utazási idő

$\bar{t}_{i,j}$ : az i és j körzetek közötti átlagos utazási idő

A megbízhatóság a 4. táblázat szerint minősíthető

- Átlagos utazási sebesség: Egy kiinduló és célpont közötti utazás átlagos sebessége [km/h]

Ezekon – a minimálisnak tekinthető – követelményen túl elvé-

3. táblázat a szolgáltatási szint meghatározása a késedelmi index alapján

LOS	késedelmi index
A	0 – 0,1
B	0,1 – 0,4
C	0,4 – 1,0
D	1,0 – 1,5
E	1,5 – 3,0
F	> 3,0

gezhető, ill. előállítható:

- Kapacitás vizsgálat: Megmutatja, hogy egy adott kialakítású csomópont vagy csomóponti ág mekkora kapacitástartalékkal rendelkezik.
- Összehangolási diagram: Összehangolt jelzőlámpás útvonal elemzésénél javasolt előállítani az útvonalon közlekedő járművek tér-idő (  $x(t)$  ) és sebesség-idő (  $v(t)$  ) diagramját. Ezek az ábrák azért rendkívül szemléletesek, mert az egyedi járművek mozgásának görbéit mutatják. Pontosan láttatva a „beragadó”, „megtorpanó” járművek számát is, a szimulációs futtatás párhuzamos vizuális követése pedig az okok feltárását is lehetővé teszi 3. és 4. ábrák. (Természetesen

4. táblázat szolgáltatási szint meghatározása a megbízhatósági index alapján

LOS	megbízhatósági index
A	0 – 0,1
B	0,1 – 0,2
C	0,2 – 0,3
D	0,3 – 0,5
E	> 0,5

ezek a grafikonok egy konkrét futtatásra vonatkoznak, „átlagos” grafikonok nem állíthatók elő!

### Kapacitás vizsgálat

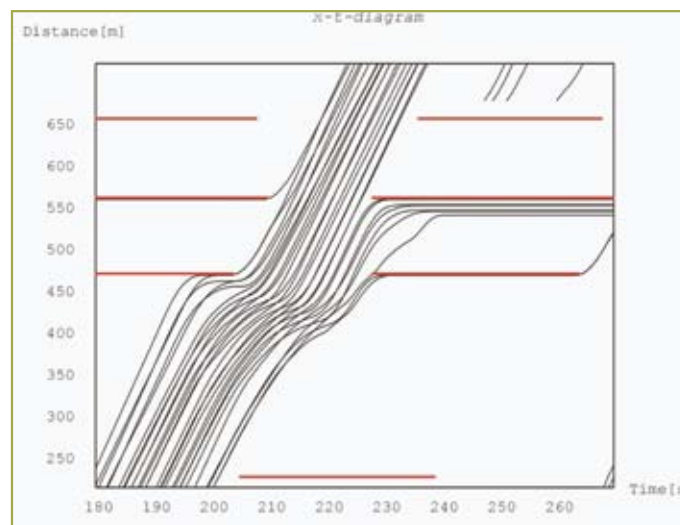
A szimulációs vizsgálattal szemben gyakran elvárás, hogy adjon választ arra, hogy mikor merül ki a csomópont ill. a hálózat kapacitása, azaz mekkora kapacitástartalékkal rendelkezik.

### A kapacitástartalék meghatározása

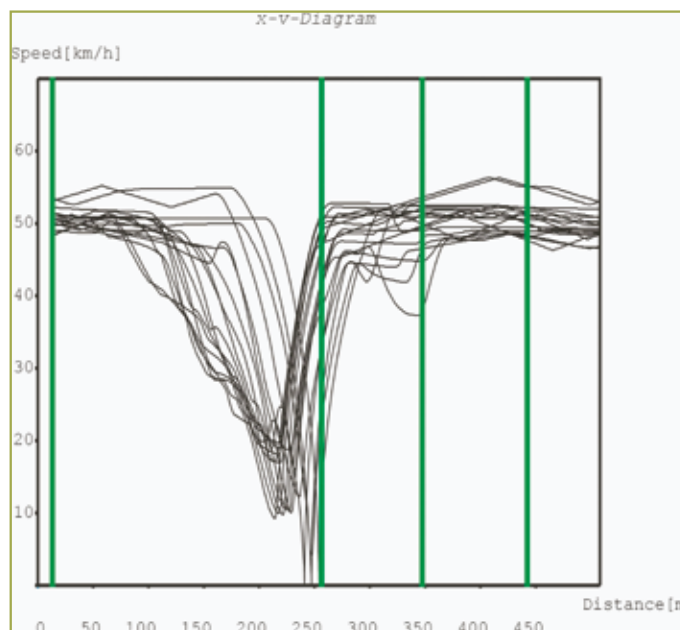
Kapacitástartalékkal csak csomópont rendelkezik. Hálózat esetén is a csomópontok kapacitástartaléka a meghatározó. A szimulációs vizsgálat eredményeként lehetséges van hálózatra vonatkozó

megállapítást is tenni. Ehhez a vizsgálathoz a forgalmi igény kis szeletekben történő folyamatos ráterhelése mellett mért átlagsebességek, forgalomnagyságok kiértékelésére van szükség az alábbiak szerint:

- Meg kell határozni azt a kiinduló forgalmi igényt, amikor



3. ábra: Egy összehangolt jelzőlámpás útvonal tér-idő diagramja (  $x(t)$  )

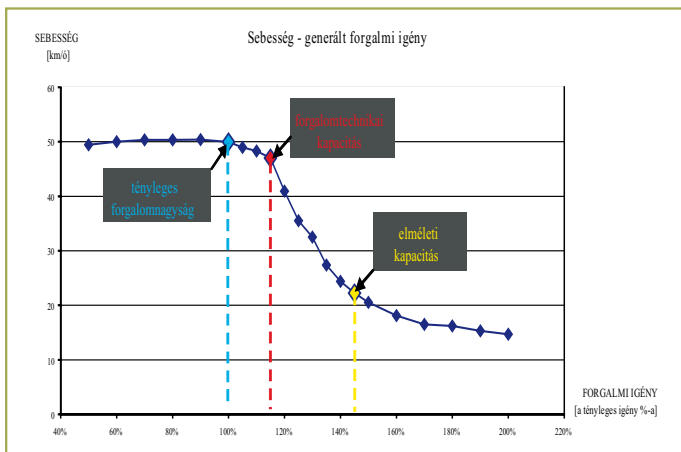


4. ábra: Egy összehangolt jelzőlámpás útvonal sebesség-idő diagramja (  $v(t)$  )

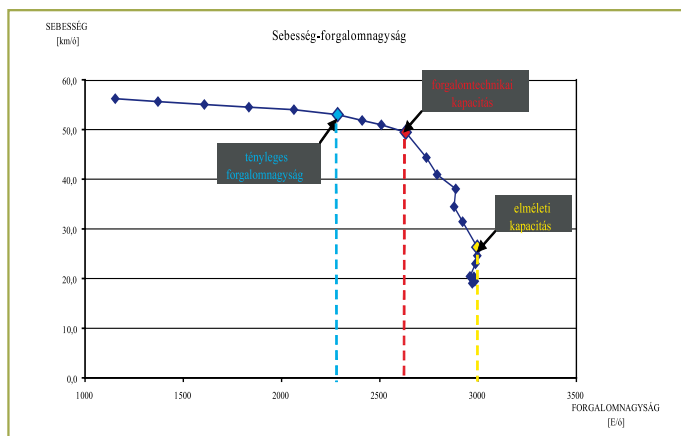
még minden szakaszon a torlódási index nagyobb, mint 0,9 és ezzel a forgalmi igényrel elvégezni a futtatást.

- Majd a tényleges forgalmi igény 5%-os mértékének megfelelő lépcsőben növelt forgalmi igényekkel is elvégezni a szimulációt.
- Mindeközben rögzíteni kell az átlagos utazási sebességeket és forgalomnagyságokat a teljes hálózatra vonatkozóan, ill. relációként (esetleg csomóponti áganként). Természetesen a szükséges számú futtatást ez esetben is el kell végezni.

Az eredmények grafikus feldolgozása után megállapítható a forgalomtechnikai (tervezhető) és az elméleti kapacitás. (5. és 6. ábra) A kapacitástartalék mértékét meghatározva közvetetten – a forgalom fejlődését figyelembe véve – válasz adható a mikor kérdésre is.



5. ábra: Egy körforgalmú csomópont sebesség-kapacitás ábrája



6. ábra: Egy körforgalmú csomópont sebesség-forgalomnagyság ábrája

### Összefoglalás

A kutatásunk célja az volt, hogy létrehozzunk egy olyan tervezési útmutatót, mely elősegíti a mai modern közlekedéstervezés e hatékony, hazánkban még kevésbé elterjedt eszközének használatát és széles szakmai körben való elfogadását. A modellépítéshez kapcsolódó alapparaméterek (sebességeloszlás függvények, gyorsulással kapcsolatos összefüggések, becsatlakozási ill. követési határidőközök) további kutatása és rendszeres felülvizsgálata szükséges. De reményeink szerint az elkészült útmutató alapját képezheti egy széles körben elfogadott (tervezői-hatósági-döntéshozói) mikro-szimulációs metodika gyakorlati alkalmazásainak. Így az akár különböző szellemi műhelyekben készülő forgalomszimulációs vizsgálatok is teljes egészében összehasonlíthatóvá válnak, a kapott eredmények könnyen és egyértelműen értelmezhetők lesznek, mind a szakemberek, mind a döntéshozók számára meggyőző erővel bírnak. Az eljárás elterjedésével megalapozottabb, magasabb minőségű tervek készíthetők és a szakma elfogadottsága, megbecsülése is növekedhet.

### Summary

#### Methodology of Traffic Simulation (Part 2)

The second part of the article (first part: see previous issue) is about the calibration of the models, the requirements against the simulation assignments, and about the evaluation of the results. It gives practical instruction to the process of calibration and validation. It makes a proposal to reach the proper confidence level connecting to the assignments. It collects, presents and interprets the most frequently used output indicators.

### Környezeti hatások a hajlékony pályaszerkezetek élettartamára

Environmental Effects on the Predicted Service Life of Flexible Pavements

Gang Zuo, M.ASCE; Eric C. Drumm, M.ASCE; and Roger W. Meier, M.ASCE

Journal of Transportation Engineering. January 2007  
Volume 133, Number 1, pp. 47-56

A pályaszerkezetek élettartamát a terhelésméltás, a hőmérséklet és a nedvességtartalom befolyásolja. A szerzők a hőmérséklet és a nedvességtartalom hatását vizsgálták az útpályaszerkezetbe telepített műszerekkel Tennessee államban a következő felépítésű pályaszerkezeteken: 1: 200 mm AC + 150 mm szemcsés alap; 2: 200 mm AC + 250 mm szemcsés alap; 3: 300 mm AC + 250 mm szemcsés alap.

A véges elemek módszerével számították az aszfaltréteg kritikus megnyúlását és a földműre ható nyomást, ezek alapján a becsült élettartamot különböző hőmérséklet és talajnedvesség esetére. Azt is vizsgálták, hogy milyen hatással van a számított élettartamra az, ha az óránkénti, a napi vagy a havi hőmérsékleti átlagokat veszik számításba. A talajnedvesség hatása márciusban, áprilisban és májusban úgy mutatkozott, hogy a számított élettartam az 1 típusú pályaszerkezethez képest csökkent a legjobban, a 3 típusúnál pedig a legkevésbé.

Az eredmények a következőkben foglalhatók össze:

- Az aszfaltréteg hőmérséklete lényeges hatást gyakorol a számított kritikus húzófeszültségre, különösen a vékony rétegek esetében, ha a hőmérséklet gradienst lineárisnak tételezik fel.
- A becsült élettartamot nagyban befolyásolja a számításba vett átlagos hőmérsékletek időintervalluma. Úgy találták, hogy a havi átlagos hőmérsékletek adják a megbízhatóbb eredményt, a rövid (pl. napi) időintervallumokban előforduló kiugró hőmérsékletek ezt torzíthatják.
- A szemcsés alaprég szezonális nedvességtartalom-változása nincs lényeges hatással az élettartamra, a földmű változó nedvességtartalma azonban ezt jelentősen befolyásolja.
- Egy hónapon át tartó elnedvesedett földmű a becsült élettartamot több, mint egyharmadára csökkenti, ha az óránkénti átlagos hőmérsékletekkel számolnak. Más eredményt kapunk viszont a havi átlagos hőmérsékletek esetében. A legkritikusabb helyzet akkor áll fenn, ha hosszán tartó magas talaj nedvességtartalom magas aszfalt hőmérséklettel társul. (A referáló megjegyzése: ezt a sommás véleményt óvatosan kell kezelni, mert a magas aszfalthőmérséklet alacsony merevségi modulust eredményez, a talaj teherbírási modulusa a magas nedvességtartalom miatt alacsony, tehát a keréknyomképződés veszélye áll fenn. Az alacsonyabb hőmérséklet viszont magasabb merevségi modulust jelent, tehát az aszfalt érzékenyebb az alakváltozásra, viszont a húzószilárdsága magasabb.)
- Az élettartam számításoknál az aszfalt hőmérsékletét és a talaj nedvességtartalmát egyidejűleg kell figyelembe venni.

B. T.

# GEOTECHNIKA AZ ÚTÉPÍTÉSBEN – MEGJELENT AZ ÚT 2-1.222 UTAK ÉS AUTÓPÁLYÁK LÉTESÍTÉSÉNEK ÁLTALÁNOS GEOTECHNIKAI SZABÁLYAI CÍMŰ ÚJ ELŐÍRÁS

DR. SZEPESHÁZI RÓBERT

2002-ben adták ki az „Utak geotechnikai tervezésének általános szabályai” című útügyi műszaki előírást. A dokumentum olyan kérdéskörökben adott követelményeket, jelölt meg alkalmazható eljárásokat, mint például a töltésalapozás, a támszerkezetek tervezése, a rézsűállékonyság biztosítása. Ennek külön jelentőséget az adott, hogy ezekre vonatkozóan addig Magyarországon semmilyen szabvány, szabályozás nem volt. Az előírásnak már ez az első változata is az akkor még csak előszabvány változatban élő európai geotechnikai szabványok, mindenek előtt az Eurocode 7 szellemében készült. Megállapítható, hogy az előírás jól segítette az akkor beinduló autópálya-program megvalósítását. Erre azért is volt nagy szükség, mert különösen az M7-es autópálya balatoni szakaszai a korábbiaknál sokkal nehezebb geotechnikai feladatok elé állították a szakmát.

Az előírást három év után felülvizsgálat alá vettük, amit azon túl, hogy ezt minden esetben meg kell tenni, több dolog is indokolt. Mindenek előtt az, hogy időközben megjelent az Eurocode 7 végleges változata, s elkészült hozzá a nemzeti melléklet is; ezeket feltétlenül érvényesíteni kellett az útügyi előírásban is. Jelentőségében talán kisebb, de a mindennapi gyakorlatot tekintve még erősebb parancsként követelte meg az átdolgozást a szintén az európai szabványok nyomán készült új magyar talajosztályozási szabványok 2005–2006. évi megjelenése. Illendő volt továbbá az autópályán nyert tapasztalatok hasznosítása, hiszen megjelentek az első kiadás idején még alig ismert szerkezetek és technológiák. Felmerültek továbbá új szempontok is, különös súllyal az, hogy az előírás a tulajdonosi, megrendelői oldal, a kiírók, a mérnökök és a projektvezetés irányában is fogalmazza meg a tervezéssel-terveztetéssel kapcsolatos követelményeket. Nyilvánvalóan megfontolást érdemlő felvetés volt az is, hogy – ahol lehet – tegyünk különbséget az autópályák és más utak között. Ki kell emelni még egy sajátos igényt: mivel az első változat hangsúlyosan tervezési előírás volt, ugyanakkor a szakma ezzel koherens kivitelezési szabályozást nem készített, megfogalmazódott, hogy a korszerűsítés során vállaljuk fel ez utóbbi pótlását is. Ez a javaslat egyébként összhangban van az európai szabályozás azon megközelítésmódjával, mely szerint a geotechnikai terveknek tartalmazniuk kell az eredményt (a művet) befolyásoló alapvető technológiai és minőségtervet, illetve a kivitelezést közvetlenül előkészítő technológiai utasítások (TU), illetve mintavételi és minőség-ellenőrzési tervek (MMT) valójában szintén tervdokumentációk. Hasonló módon kellett felvállalnia az új változatnak a geoműanyagok alkalmazásának bizonyos mértékű szabályozását is.

A korszerűsítési munka 2005 őszén indult, és egy olyan szakmai bizottság végezte, melyben az útépítés és a geotechnika szakterületének minden területe képviselést kapott. A munka során nagyszámú javaslatot tárgyaltunk meg, gyakran nagyon éles viták is voltak, de a végeredményben a közreműködők összességében egyetértettek, és a 2006 szeptemberében leadott szöveget a felkért lektorok is jónak találták. A munkát végző 12 szereplő közül hadd emeljük ki Fáy Miklós és Tárczy László gondolatgazdag közreműködését, valamint Vízi E. Zoltánné és Lazányi István bölcs lektori munkáját.

A 146 oldalas új változattal igyekeztünk mindazokra a kihívásokra választ adni, melyeket az előbbiekben megfogalmaztunk, s amit

legalább részben az új cím is kifejezni kíván. Soroljuk fel az előírás főbb értékeit, különösen a fontosabb újdonságokat:

- a kapcsolódó európai szabványok és hazai előírások teljes körű listáját adja, csatolva főként az előbbiek 31 alapfogalmának értelmezését és egy több száz szavas szöveget, mely az utak geotechnikai tervezésének követelményeit és alkalmazható módszereit fogalmazza meg a 2. fejezetben, levezetve és értelmezve őket az utakra vonatkozóan az Eurocode 7-ből,
- rögzíti a különböző fázisokban készülő geotechnikai dokumentumok célját és tartalmi követelményeit, amiből – mint újdonságot – a diszpozíciós terv bevezetését emeljük ki,
- a földanyagok minősítésére az új talajosztályozási szabvánnyal harmonizáló átfogó rendszert dolgoztunk ki, mellyel viszonylag könnyen összekapcsolható a tervezés, illetve a megvalósítás és a minőségtanúsítás,
- a földművek szerkezeti kialakítására, víztelenítési technológiájára és minőségbiztosítására részletes irányelveket adtunk, nagy szerepet szánva a próbabeépítéseknek, az összehasonlítható tapasztalatoknak és a statisztikai értékelésnek,
- a geoműanyagok alkalmazását illetően megköveteli a szöveg az elvárt funkciók megnevezését, az ezeket teljesítő terméktulajdonságok meghatározását, a vonatkozó szabványok betartását, hangsúllyal választva el azt a két lehetőséget, hogy a geoműanyag a végleges szerkezet tervező által előírt része, illetve hogy a geoműanyagot építési segéd-szerkezetként a tervező ajánlására a kivitelező ajánlata, döntése szerint alkalmazzák,
- a rézsűállékonyság témakörében kevesebb a változás, talán azt kell említeni, hogy a megszüntetett víztelenítési fejezet nagyobb része tartalmi okok miatt idekerült,
- a töltésalapozás fejezetében megjelentek azok az újabb megoldások, illetve ezek tervezési irányelvei, melyeket a balatoni tözegen sikerrel alkalmaztak, így például a dinamikus talajcserével előállított kötőmzások, a kavicscölöpök, a szalagdrének, a lépcsős építés, a többlettöltés,
- a támszerkezetek vonatkozásában is az autópályás tapasztalatok hasznosítását emelhetjük ki, például a cölöpfalas szerkezetek és az erősített talajszerkezetek konstrukciós elveinek és statikai méretezésük megfogalmazását.

Az előírás az európai szabványok szellemét követi: a figyelembe veendő szempontokat, a követelményeket, a tartalmi elvárásokat és a lebonyolítást illetően előírja, az alkalmazható eljárásokat, módszereket illetően ajánl, megengedő megfogalmazásokat tartalmaz. A széleskörűen értelmezett tervdokumentációk készítését kívánja segíteni, de nem vállalja át a tervező felelősségét, sőt hangsúlyozza a tervező szabadságát. A mindig egyedi geotechnikai adottságokra mindig egyedi válaszokat kell találni, amit – mint minden szabályozó anyag – ez is csak segíthet, a készítő reménye szerint persze nagy mértékben. Ám – mint minden szabályozó anyagot – majd ezt is újra korszerűsíteni kell, amihez minden gondolatot szívesen felhasználunk.

www.maut.hu

ÁRA | 400 FT

## REVUE OF ROADS AND CIVIL ENGINEERING

HUNGARIAN MONTHLY REVUE OF ROADS  
AND CIVIL ENGINEERING  
BUDAPEST

**A SZERKESZTÉSÉRT FELELŐS:** DR. KOREN CSABA

**SZERKESZTŐSÉG:** SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM,

KÖZLEKEDÉSEPÍTÉSI ÉS TELEPÜLÉSMÉRNÖKI TANSZÉK

UNIVERSITAS-GYŐR KHT.

9026 GYŐR, EGYETEM TÉR 1.; TEL.: 96 503 452; FAX: 96 503 451;

**E-MAIL:** KOREN@SZE.HU, TOTHZS@SZE.HU

**KIADJA:** MAGYAR KÖZÚT KHT. 1024 BUDAPEST, FÉNYES ELEK U. 7–13.

**DESIGN ÉS NYOMDAI MUNKA:** INSOMNIA REKLÁMÜGYNÖKSÉG KFT.

ELŐFIZETÉSBEN TERJESZTI A MAGYAR POSTA RT. HÍRLAP ÜZLETÁGA  
1008 BUDAPEST, ORCZY TÉR 1.

ELŐFIZETHETŐ VALAMENNYI POSTÁN, KÉZBESÍTŐKNÉL,

E-MAILEN: HIRLAPELOFIZETES@POSTA.HU, FAXON: 303 3440.

TOVÁBBI INFORMÁCIÓ: 06 80 444 444.

MEGJELENIK HAVONTA **600** PÉLDÁNYBAN.

KÜLFÖLDÖN TERJESZTI A „KULTÚRA” KÜLKERESKEDELMI VÁLLALAT  
(BUDAPEST 62, POSTAFIÓK 149).

INDEX 25 572 ISSN 1419 0702