



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Út és Vasútépítési tanszék**

1111. Budapest, Műegyetem rkp. 1-3. K.mf. 22.

Útépítési laboratórium: UV ép. és K.a. 52.

TEL.: **4 6 3** - 1536; - 3961; FAX.: 463 - 3800

BME Útlabor

Dr. Nemesdy Ervin

Dr. Ambrus Kálmán

Dr. Pallós Imre

Dr. Török Kálmán

AZ ASZFALTKEVERÉKEK MECHANIKAI, ÉS FIZIKAI TULAJDONSÁGAINAK LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATAI

(LABORATÓRIUMI ASZFALTMECHANIKAI VIZSGÁLATI RENDSZER)

1. Az aszfaltburkolatok igénybevételei és tönkremenési módjai
2. Az aszfaltkeverékek plasztikus melegalakváltozásának vizsgálatai
3. Az aszfaltkeverékek hidegviselkedésének vizsgálatai
4. Az aszfalt fáradási jellemzőinek laboratóriumi vizsgálatai
5. Egyéb különleges aszfaltvizsgálatok a BME Útlaborban
6. Az aszfaltkeverékek értékelése aszfaltmechanikai vizsgálati rendszerre alapozva

Készítette:

dr. Török Kálmán

Budapest, 2000. március

1. Az aszfaltburkolatok igénybevételei és tönkremenési módjai

Szükségesnek tartjuk az aszfaltmechanikai vizsgálatok ismertetése előtt bevezetesként áttekinteni az útpályaszerkezetekbe épített aszfaltrétegek igénybevételeit és tönkremeneteli módjait. Így remélhetjük, hogy felismerhető lesz mennyire fontosak a modern útpályaszerkezetekbe tervezett és épített aszfaltrétegek anyagának mechanikai tulajdonságai és azok megismerése milyen lényeges, az igénybevételeknek megfelelő, hosszú élettartamú aszfaltkeverékek előállításához.

Az utóbbi évtizedek forgalom fejlődése, mely főként a tehergépjármű forgalom mennyiségi, minőségi változásával járt együtt és az útpályaszerkezetek igénybevételének drasztikus megnövekedését okozta, lassan kikristályosította az útépítő szakmai körökben az aszfalt fő igénybevételi formáit és azok vizsgálati módozatait.

Mint ismeretes, az **aszfaltanyag**nak bitumen kötőanyaga miatt, - a mérsékelt égövi területen általános **-20°C és +40°C közötti** léghőmérséklet intervallumban, - **nagy mértékben változnak fizikai, mechanikai tulajdonságai.**

Nyáron, huzamosabb ideig tartó 30°C feletti nappali hőmérséklet (forró nap) esetén a fekete **aszfaltkopóréteg +60°C hőmérsékletre is tartósan felhevülhet**, tehát nálunk az aszfalt kopórétegek használati (üzemi) hőmérséklet tartománya, a téli -20°C-tól a nyári +60°C-ig terjed ki. Nyilvánvaló, hogy **az aszfaltok mechanikai tulajdonságainak laboratóriumi vizsgálati módszereinél azt a vizsgálati hőmérsékletet kell alkalmazni, melynél a kérdéses aszfalt tulajdonság a használat során a legkritikusabb állapotba, tehát statikus mérnöki megfogalmazásban mértékadó igénybevételi állapotba kerülhet.**

Ugyanakkor a **vizsgálati módszert** is úgy kell megválasztani, hogy az a **valóságos igénybevételeket** a lehető legjobban **közéltse**, a **vizsgált** tulajdonságot az eredményeiben a legjobban tükrözze, és azok alapján az adott **tulajdonság szempontjából, az aszfaltkeverékek jól megítélhetőek legyenek.**

1.1. Aszfaltburkolatok nyári igénybevételei és tönkremenetelei

Nyáron, mint már említettük, 8-10 egymás utáni nyári illetve kánikulai nap után, amikor az éjszakai minimális hőmérséklet is 20°C fölött marad, **az aszfalt burkolat felső 10 cm vastagságú részének átlagos hőmérséklete meghaladhatja az 50°C hőmérsékletet.** A felső néhány centiméter vastagságban pedig a 60°C hőmérsékleti átlag is létrejöhet az aszfalt felület feketeségi fokától függően.

A nyári gyors hőmérséklet változások következtében, - bármely irányúak is azok, - nem jöhetnek létre termikus húzó- vagy nyomó- feszültségek, mert ezeken a magas hőmérsékleteken már rendkívül gyors az aszfalt relaxációja és a túlnyomórészt viszkózus állapotú (alig rugalmas) aszfaltrétegekben ébredő feszültségek minden irányban eloszlanak.

A jármű forgalom kerékterhelése az aszfaltrétegben közel függőleges nyomó-feszültséget okoz, melynek következményeként

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

és a viszkózus, időtől is függő

$$\varepsilon_{permanens} = \sigma_{nyomó} \times \eta \times t \quad \text{fajl. maradó összenyomódás}$$

jön létre. Természetesen a rugalmas összenyomódás mértéke is, bár kisebb mértékben függ a terhelési időtől illetve sebességtől. *A két alakváltozás aránya és nagysága a hőmérséklettől, az alkalmazott bitumen kötőanyag viszkozitási jellemzőitől, az aszfalt ásványivázának belső súrlódásától, és a kerék terheléstől, illetve annak áthaladási sebességétől függ.*

Az aszfalt burkolatok nyári nyomvályú képződéséhez és egyéb deformációinak létrejöttéhez mindenképpen jármű forgalom és pedig nehéz teher vagy nagyon lassú és sűrű könnyű forgalom szükséges.

Nagyobb emelkedőkön (> 4 %), és **állandó fékezési helyeken**, ahol azonos burkolat felületen ismételt azonos irányú felülettel párhuzamos erők (húzó-, nyomó-, és csúszató-feszültségek) veszik igénybe az aszfaltburkolatot, az **úttengelyre** (a közlekedési irányra) **merőleges burkolat hullámok (bordásodás) jön létre** a nyári melegben. Ez főként a városi öntöttaszfalt burkolatokon jelzőlámpák előtt tapasztalható.

A melegdeformációra hajlamos aszfalt a legkritkább esetben repedezik, hiszen éppen ezen tulajdonságánál fogva alacsony hőmérsékleten is jól alakváltozik, relaxál, termikus feszültségek alig keletkeznek benne. Az ilyen aszfalt nyári hőmérsékleten tapasztalható plasztikus alakváltozásokat okozó kedvezőtlen tulajdonságai, ősszel, télen, és tavasszal számunkra kedvezőkké válnak.

Ha tehát a nyomvályú mélyén és peremén mozaikos vagy hosszirányú repedések is láthatók, akkor az már teherbírási hibával is kombinálódik, de lehet, hogy amit látunk teljesen teherbírási tönkremenetelből származó burkolatsüllyedés. Előfordulhat, hogy az aszfaltnak rendkívül nagy a plasztikus alakváltozási képessége és repedések nincsenek a nagy mélységű nyomvályúban. Ebben az esetben azt kell tudnunk, hogy normális körülmények között az aszfaltvastagságnak legfeljebb csak a 25 %-a lehet a nyommélység (az eredeti felülethez viszonyítva) és ehhez a számításhoz legfeljebb csak 15 cm vastagságot érdemes figyelembevenni a nagyobb vastagságú aszfaltburkolatból.

Még egyszer hangsúlyozzuk, hogy **nyomvályú-képződéshez, a bordásodások létrejöttéhez nem csak nyári forrónapok, hanem a megfelelő forgalmi igénybevétel is szükséges.** Az öntöttaszfalt déli fekvésű és nagyobb esésű (>6 %) lejtőn forgalom nélkül is bordásodhat, meggyűrődhet, sőt a réteg el is szakadhat.

1.2. Aszfaltburkolatok téli igénybevételei és tönkremeneteli módja

Télen, -20°C-on az aszfalt merevsége, húzószilárdsága eléri sőt meghaladja a jobb cementbeton azonos jellemzőit (25000 N/mm² merevség, $\sigma_{Hh}=4,0$ N/mm²). A lineáris hőtágulási együtthatója viszont csak a nagy hézagtartalmú aszfaltoknak (drén- vagy zajnyelőaszfalt) csökken le $\alpha=12 \cdot 10^{-6}$ értékig. Az aszfalt relaxációs képessége a hőmérséklettel együtt csökken, de a beton ezen képességét (mely a hőmérséklettel alig változik) alacsony hőmérsékleten is meghaladja.

Csökkenő hőmérsékleten az előbbiekből következően az aszfalt útpályaszerkezetek teherbírása növekszik. Így az együttműködő aszfaltrétegek esetén az alsó és felső réteg szélső felületein a kerékterhelés hatására keletkező ismétlődő hajlító-húzófeszültségek önmagukban nem okoznak repedéseket az aszfaltrétegekben.

Ugyanakkor az **5°C/óra lehülési sebességnél gyorsabb hőmérséklet csökkenések** esetén a felső aszfaltrétegekben (az alsó, még magasabb hőmérsékletű rétegek általi akadályoztatás miatt) ébredő **termikus húzófeszültségeknek** már csak csekély része épül le (az aszfalt relaxációs képességétől függően), **nagyobb része felhalmozódik és amikor a húzófeszültség eléri az aszfaltréteg azon a hőmérsékleten meglévő húzószilárdságát, létrejön a termikus repedés.** A termikus húzófeszültség a relaxáció figyelembevétele nélkül:

$$\sigma_t = \alpha \times E \times \Delta T \quad [\text{N} / \text{mm}^2];$$

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

E : aszfalt merevségi modulus, -5°C-on átlagosan 15000 N/mm²

ΔT : a hőmérséklet változás (különbség) °C

$\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ esetén az átlagértékekkel számolva:

$\sigma_t=25 \times 10^{-6} \times 15000 \times 10 = 3,75 \text{ N/mm}^2$, ami alig kisebb az átlagos aszfalt -5°C -on mérhető húzószilárdságánál.

Természetesen ha a kopórétegben felhalmozódott termikus húzófeszültségekhez hozzáadódik egy átgördülő kerék okozta hajlító-húzófeszültség és ha így lépi túl a húzószilárdságot, szintén létrejöhetnek a keréknyomban és peremén a burkolat repedések.

A termikus repedések létrejöttéhez azonban nem szükséges forgalom; ennek ékes bizonyítékeként az M1 autópálya 1975-ben megépített jobb oldali (soha nem üzemelő) holt útszakaszait említjük meg, melyeknek 1990-ben nagyobb mértékű volt a repedezettsége, mint a 15 éven keresztül nagy forgalmat lebonyolító bal pálya burkolatának, mely utóbbit nyilvánvalóan éppen a forgalom gyógyította meg egy kissé nyaranta.

A termikus repedések mindig a lehülés (a gyors lehülés) folyamán jönnek létre, főként 4-5 méterenként megjelenő keresztirányú repedések formájában. Gyakorlatilag az útbeton burkolatokhoz hasonló módon alakulnak a repedési táblák, tehát ha szélesebb az aszfaltburkolat 6 m-nél, vagy gyenge az aszfaltrétegek beépítési sávjainak középső csatlakozása, akkor középen is, rendszerint a sávcsatlakozásnál keletkezik hosszirányú repedés a burkolatban. Teljesen hajlékony útpályaszerkezet esetén csak a kifejezetten nagy hideg merevségű aszfaltburkolati rétegekben jöhetnek létre ilyen repedések.

Félmerev, útbetonra vagy cementstabilizációra épített aszfaltrétegeken a merev alaprétegek termikus alakváltozásából és repedésnyílásaiból származó feszültségek a felső aszfaltrétegekben szintén (reflexió) repedéseket hozhatnak létre, ha azok vastagsága kicsi, vagy merevsége nagy és húzószilárdsága kicsi.

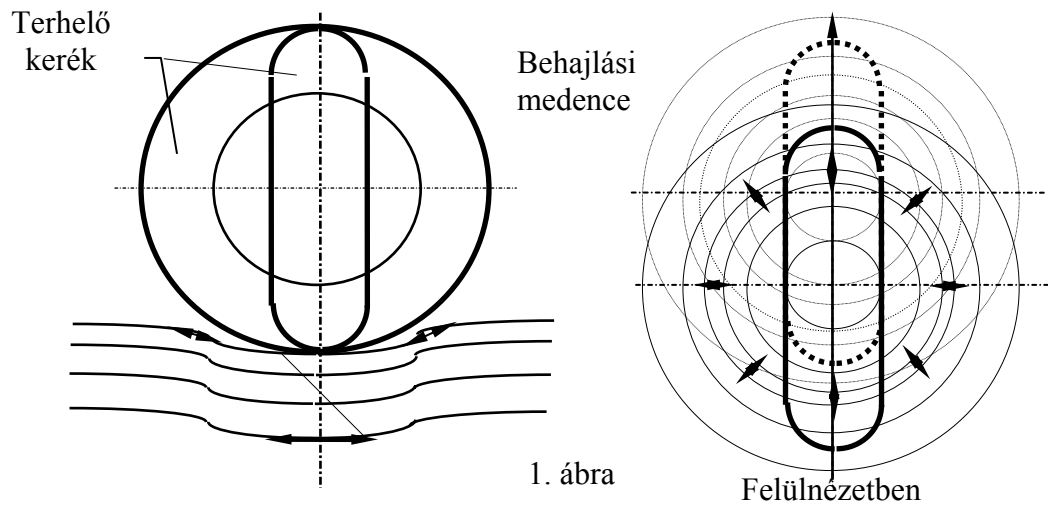
Természetesen a tél (inkább télelő és télutó) igénybevételeihez tartozik az olvadás és fagyás váltakozása, továbbá az olvadást elősegítő útpályafelület sózás is. Ezek az igénybevételek azonban az épp, zárt, együttműködő aszfaltrétegeken gyenge hatásúak, viszont a már repedezett aszfaltfelületen megsokszorozódik a hatékonyságuk és ilyenkor a járműforgalom tovább fokozza az aszfaltburkolat károsodását, főképpen a pumpahatással. Általában ezekben az időszakokban a leggyengébb az útpályaszerkezet aléptímenyének a teherbírása, ami a burkolati rétegek hajlítási igénybevételét növeli.

1.3. Aszfalt útpályaszerkezetek hajlító igénybevétele

Az aszfalt burkolatokon zajló forgalom természetesen mindenkor hajlításra is igénybeveszi az útpályaszerkezeteket. Hajlításra azonban csak azok az út-pályaszerkezeti rétegek vehetők igénybe, melyek némi kohézióval illetve húzószilárdsággal rendelkeznek. A szemcsés, kohézió és kötőanyag nélküli rétegek csak nyomó- és nyírófeszültségek felvételére és átadására képesek. Az útpályaszerkezeten a jármű kerékabroncs terhelésének hatására behajlási medence jön létre (1. ábra) a kerék alatt, mely a kerékkel együtt mozog és így a keréknyomban a kerék haladási síkjában az útpályaszerkezet minden pontjában egy kerék elhaladásakor kétszer változnak ellenkező előjelűre a hajlító feszültségek. Ugyanakkor a keréknyom szélső peremén csak a közel kör alakú behajlási medence változatlan hajlítófeszültségei terhelik a burkolatot, egy kerékáthaladásakor csak egyszer, felső felületén keresztirányú hajlító-húzófeszültséget okozva, melynek nagysága, a kerék alatti alsó hajlító-húzófeszültségnek kb. 25 %-a.

Nyáron a felső aszfaltrétegek rendkívül alacsony hajlítási merevsége ($S < 1000 \text{ N/mm}^2$) miatt, hajlító-feszültségek alig keletkeznek a felső rétegekben, inkább csak a nyomó-feszültségeket elosztva közvetítik az alsó teherviselő rétegekhez. Az aszfaltrétegek hajlító igénybevételét csökkenti az a mérésekkel igazolt tény is, hogy Európában nyáron a szárazabb időjárásban, az útpályaszerkezeteket alátámasztó földmű teherbírása tetemesen

megnő és az aszfaltrétegek hajlítási merevségének elvesztése ellenére, az útpálya behajlása a kerékterhelések alatt csökken.



Az aszfalt rétegek nyári dinamikus hajlító igénybevétele, tehát gyakorlatilag nem okoz hajlító fáradási károsodásokat az aszfaltanyagban.

Az aszfalt rétegek téli, 0°C alatti hajlító igénybevételénél a megnövekedett aszfalt merevség arányában megnőnek a hajlító-feszültségek is. Ezek a hajlító-húzófeszültségek azonban megfelelően kialakított és méretezett együttműködő útpályaszerkezetek esetén, - a hajlításra leginkább igénybevett alsó alaprétegben is, - a hőmérsékletnek megfelelő hajlító-húzószilárdsága 30 %-át sem éri el. Csökkenti az aszfalt rétegek téli hajlító igénybevételét, a földmű ilyenkor is tapasztalható nagyobb teherbírása.

Amennyiben a pályaszerkezeti rétegek nem együttműködők, a lehidegebb és így legnagyobb merevségű felső rétegekben olyan nagy hajlító-húzófeszültségek keletkezhetnek, melyek meghaladják az anyag azonos hőmérsékleten meglévő húzószilárdságát. Ilyenkor a termikus feszültségekkel összegeződő hajlító-húzófeszültség a keréknyom mentén hosszirányú és mozaik repedezettséget okoz először a kopórétegben, majd egyre mélyebben. A továbbiak minden úthasználó és útfenntartó előtt ismertek.

Európa középső éghajlati sávjában 0°C alatti hőmérséklet évente legfeljebb 70 napon fordul elő, zömében a téli hónapokban kisebb megszakításokkal. Ugyanez az időtartam jellemző a 25°C feletti maximum hőmérsékletű, úgynevezett nyári napokra vonatkozóan is. Végül is az aszfaltburkolatok évente legfeljebb 150 napot vannak szélsőséges hőmérsékleteken, egyébként, tehát **az egész év 60 %-ában az átlagos +10°C ±10°C hőmérsékleti tartományban üzemelnek a hazai aszfalt burkolatok.**

Hozzá kell tenni még, hogy az útpályaszerkezeteket alátámasztó földmű teherbírása, - a tél kezdeti és tél végi -1°C és +5°C közötti hőmérsékletű olvadási illetve csapadékos időszakban, - a leggyengébb. Az útpályaszerkezeteknek ezekben az időszakokban kell a legnagyobb hajlítási igénybevételeket elviselniük.

1.4. Az aszfaltanyagok mechanikai tulajdonságainak laboratóriumi vizsgálatai.

Az aszfalt rétegeknek tehát három fő igénybevételi oldalnak kell valamilyen szinten megfelelni. A követelmény szintek az aszfaltréteg feladatától, a pályaszerkezetben tervezett helyétől függenek. Két igénybevételi forma forgalom nélkül nem jön létre, ezek

közül az egyik a nyári meleg deformáció, a másik az ismétlődő kerékterhelések hajlító igénybevétele. A téli termikus repedések létrejöttéhez forgalom nem szükséges.

A BME Útlaborban dr. Nemesdy Ervin tanszékvezető egyetemi tanár irányításával 1977-ben kezdtük el az aszfaltmechanikai vizsgálatokat. Kiindulási gondolatunk volt, hogy az igénybevételeknek megfelelő aszfalt mechanikai tulajdonságokat valamilyen módon, az aszfaltkeverék tervezési fázisában, és a gyártás vagy beépítés során laboratóriumban vizsgálni, ellenőrizni szükséges. A kidolgozandó vizsgálati módszerek, tehát csak olyan bonyolultságúak, olyan költségűek és az elvégzendő vizsgálatok csak olyan időtartamúak illetve munkaigényesek lehetnek, melyek legalább a regionális minőségellenőrző, továbbá a vállalati központi útépítési laboratóriumokban a gyakorlatban könnyen megvalósíthatók.

A BME Útlaborban a laboratóriumi aszfaltmechanikai vizsgálatok kifejlesztői:

Ambrus Kálmán okl. építőmérnök, Fi István okl. építőmérnök,

Forrásy Csaba okl. villamosmérnök, Kalthenbach László okl. gépészmérnök,

Pallós Imre okl. vegyészmérnök, Török Kálmán okl. mérnök.

2. Az aszfaltok plasztikus melegalakváltozásának laboratóriumi vizsgálatai

A nehéz jármű forgalom által a nyári meleg és forró napokon az aszfaltburkolaton okozott igénybevételeknek megfelelő, ellenálló aszfalt tulajdonságokat röviden az aszfalt **melegviselkedés**-ének nevezzük.

Az aszfaltok melegviselkedési jellemzőit vizsgálják a legrégebben, hiszen a 60°C-on végzett Marshall stabilitás, a 40 °C-os kocka nyomószilárdság vizsgálat is ezt a tulajdonságát ellenőrzi az aszfaltoknak. A megnövekedett igénybevételeknek azonban, ezek a vizsgálati módszerek már két évtizeddel ezelőtt (a 70-es években) sem feleltek meg, mert az előírásoknak megfelelő vizsgálati eredményű német aszfalt burkolatokon mély nyomvályúk keletkeztek a hetvenes évek elején néhány forró nyáron.

Ekkor kezdődött Európában, - a forgalmi igénybevételt jobban szimuláló, - aszfalt **melegviselkedés vizsgálati módszerek** kialakítása.

2.1. Az aszfaltok melegalakváltozási tulajdonságainak régi vizsgálatai.

A régi adatokat Ferenczy Géza: "ASZFALTBURKOLATOK" című 1960-ban kiadott könyvéből idézzük, illetve abból és későbbi más kiadványokból válogattuk.

A ma is használt és ismert "**Marshall-féle eljárás**"-t Németországban 1958-ban szabványosították. "Hazánkban az eljárást 1959 óta - egyelőre adatgyűjtési céllal - az Útügyi Kutató Intézet alkalmazza". Az eljárás első hazai szabványa: MSZ 9611/9-75. A Marshall-féle eljárás ebben a szabványban már nem csak az aszfaltbeton **melegviselkedésének** (ezt a fogalmat akkor még nem használták) a megítélésére szolgáló **Marshall-stabilitás és -folyás vizsgálatot** jelentette. Először ebben a szabványban a hengerelt aszfaltok tervezése, technológiája, minőségének megítélése lényegében az u.n. *Marshall-döngölő* akkor 2x50 (ma 2x75) ütésével tömörített *Marshall-próbatestek* testsűrűségének, hézagviszonyainak meghatározására alapozódott. A 90-es évek elejétől, amikor a hazai utakon a jelentősebb nyomvályú képződések megindultak, először a már ismert és elterjedten elvégezhető Marshall-stabilitás vizsgálat, stabilitás (MS kN) és folyás (MF mm) eredményéből képzett **MS/MF** merevségi hányados vizsgálati eredménnyel kísérelték meg az aszfalt plasztikus melegalakváltozási tulajdonságait meghatározni és szabályozni. Nagyobb forgalmi igénybevételű utak aszfaltburkolatára a Marshall-merevség minimumát 3,5 kN/mm értékben határozta meg az előírás.

A korszerűbb azonos célú vizsgálatokat a BME Útlaborban már a 80-as évek elejétől kezdve végezték és később a sok nevű útügyi kutató intézetben is elkezdték.

Az "*aszfaltokból előállított próbakockák nyomószilárdságát* az MSZ 9611 - 59 szerint 22 °C-on és 40 °C-on kell megállapítani". Aszfaltbetonok esetén a próbakockák tizenkétszer ismételt fagyasztása után is el kellett végezni a vizsgálatot. Az utóbbi évtizedekben csak az öntöttaszfaltok minőségének megítélésére alkalmazták a vizsgálatot. Az 1995. évben kiadott és már hatályát veszített ÚTÉPÍTÉSI ASZFALTALAPOK ÉS - BURKOLATOK című útügyi műszaki előírás 2.3. *Az öntöttaszfaltkeverék tervezésének előírásai* fejezetében található utoljára ennek a vizsgálatnak az előírása. Itt a 40 °C vizsgálati hőmérsékleten előírt minimális nyomószilárdság előírt értéke: 1,4 N/mm² ; legutóbbi vizsgálataink szerint elérhető maximum kb.: 2,8 N/mm² . A 7,07 cm élhosszúságú próbakockák két részes (fenéklap és a keret) acélformája, és a mérete sem változott az idők folyamán.

"Penetráció mérése aszfaltrétegeken és próbakockákon (MSZ 9611-59). A mérés az aszfalt felületére helyezett 1 cm² nagyságú kör keresztmetszetű, 52,5 kg súllyal terhelt fémtüskének előírt hőfokon és időtartam alatt, az aszfaltba történt behatolási mélységének megállapítására irányul."

"Állandó nagyságú terhelősúlyt alkalmazó nyomóvizsgálatok" (kísérleti eljárások).

"A körpályás vizsgálat"-nál 30x30x5 cm méretű próbatesteken 5,6 kg/cm² felületi nyomású kerék fut körbe. "Az aszfalt minőségére a vizsgálat alatt bekövetkezett deformációból következtetnek."

"Kerékbenyomódás-vizsgálatnál az előbbi méretű próbatest egy mozgatható fémkeretben van." A próbatestet, az előbbi terhelést adó kerék alatt a gépi berendezés percnként 42-szer (vagyis 3 óra alatt 7560-szor) oda-vissza mozgatja.

"Pecsénnyomó próba, a burkolat penetrációjához hasonlít, csak itt 136 kg súlyú (6,6 kg/cm² nyomást adó) és 5 cm átmérőjű" vashengernek az előbbi méretű "próbatéstebe 45 perc alatt bekövetkező benyomódási mélységét állapítják meg."

Folytathatnánk még az 1960 -ban ismert aszfalt vizsgálatok idézését, de ezek voltak a lényegesek, mert rávilágítanak arra, hogy az aszfalt melegviselkedésének mai korszerű vizsgálatai már az évtizedekkel korábban kialakított vizsgálati módszerekből fejlődtek ki a technikai lehetőségekkel párhuzamosan, a mindenkori igényeknek megfelelően.

2.2. Statikus kúszás vizsgálat

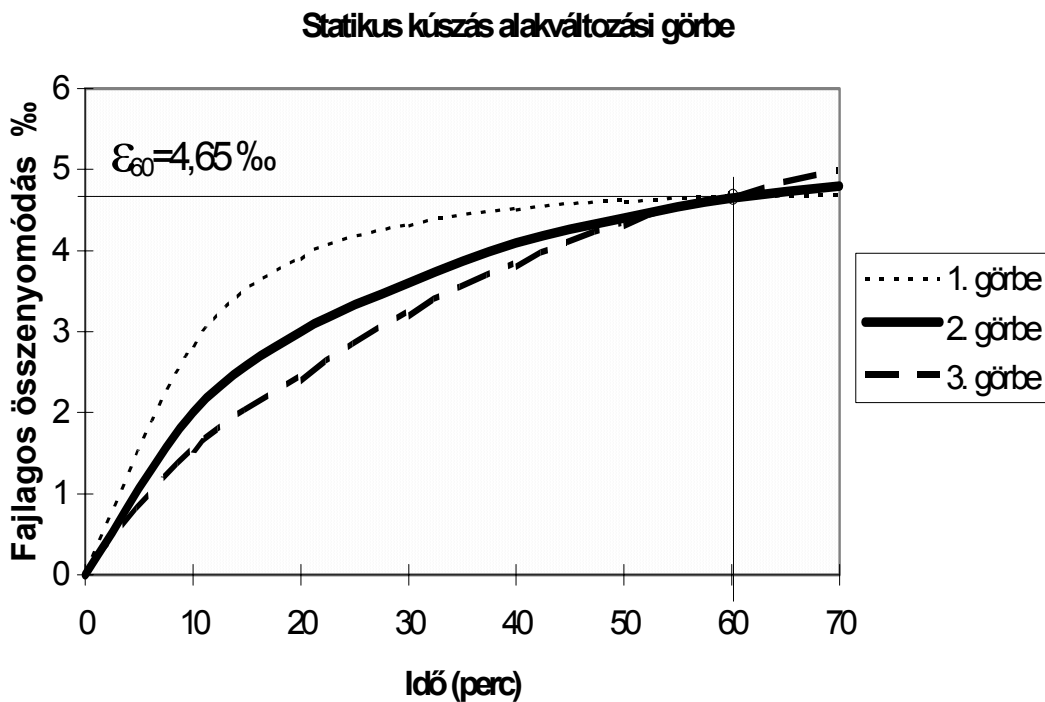
1975-ben a Marshall próbatesten végzett **statikus kúszás** vizsgálati módszerre a svájci ajánlás született meg, mely rögzítette a vizsgálati paramétereket, a vizsgálat módszerét.

E szerint a Marshall-próbatéste 1 óras 40 °C hőmérsékletű vízben való temperálás után, azonos hőmérsékletű vízben 1 órán keresztül tengely irányban teljes felületén (81 cm²) 1 kp/cm² (mai dimenzióban: 0,1 N/mm²) nyomással, vagyis F=81 kp (810 N) erővel terhelik (3/c. ábra a terhelő készülék). A terhelést lineárisan 1 perc alatt kell 0 ⇒ 810 N-ra növelni.

Vizsgálati eredmény az 1 óra alatt létrejött ϵ_{60} ‰ fajlagos összenyomódás:

$$\epsilon_{\text{perc}} = 1000 \times \frac{\Delta h}{h} \quad \text{‰}$$

Ha a fajlagos összenyomódást folyamatosan rögzítjük, az 2. ábrán látható idő - alakváltozás görbéket regisztrálhatjuk. Az ábrán is látható, hogy azonos ϵ_{60} eredményt több féle lefolyási görbe adhat, ezért másodlagos vizsgálati eredményként néha az ϵ_{60} pontban megszerkesztett görbe érintő iránytangensét (meredekségét) is megadták, mint az alakváltozás sebességére jellemző számot. A BME Útlaborban 1977-ben fejlesztettünk ki (Török K.) egy ilyen vizsgáló berendezést, mely a dinamikus kúszás vizsgálat bevezetéséig kissé tovább fejlesztve (Ambrus K.) működött.

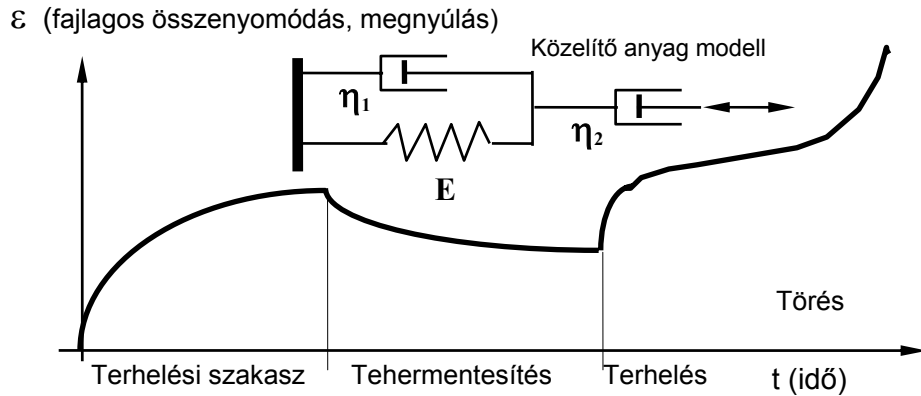


2. ábra

2.3 Statikus hajlító-kúszás vizsgálat

A BME Útlaborban 1982-ben *Fi István* által kialakított vizsgálat, melynél 270 mm távolságú támaszokon nyugvó 300x60x80 mm méretű aszfalthasábot középen ketté bontott koncentrált erővel (20-80 kg) terhelünk. A 40-45 °C hőmérsékletű klímaterben végzett vizsgálat során a hajlító nyomaték igénybevétele, egyre nagyobb maradó behajlást (alakváltozást) hoz létre a próbatestenen, mely a vizsgált aszfalttól és időtartamtól függően végül is az alsó szál megnyúlása következtében a próbatest törését okozza. A maradó alakváltozási görbe az első időszakában az *2. ábrán* látható módon alakul. A vizsgálatnál még a törés előtt beiktattak egy terhelés mentes időszakot és természetesen ekkor is mérték a behajlást, majd a terhelést ismét a próbatestre helyezve a törésig folytatták a vizsgálatot. Az alakváltozás teljes lefolyási görbéje a *3. ábrán* tanulmányozható.

A három görbe három különböző matematikai függvénnyel jól közelíthető. Ugyanakkor a melegaszfalt viselkedését jól leíró és követő anyagmodell is szerkeszthető. Erre a legegyszerűbbnek és így a legalkalmasabbnak egy három elemes modell, a Kelvin-Voigt féle modellel (párhuzamosan kapcsolt rugó és viszkózus dugattyú) sorba kapcsolt másik viszkózus dugattyú látszott a legalkalmasabbnak. A rendszerben ez utóbbi dugattyú elmozdulása maradandó, tehát ez jelenti a maradó alakváltozást. Hosszadalmas matematikai levezetés és számítógépi program eredményeként számítható minden próbatest vizsgálatnál a két viszkózus tényező (η_1 , η_2) és a rugalmassági modulus (E N/mm²).



3. ábra

2.4. Dinamikus kúszás vizsgálatok

A hetvenes évek végén a kutató laboratóriumok egyre inkább áttértek a statikus kúszás dinamikus változatára. A **dinamikus kúszás** (egytengelyű nyomás) vizsgálatot különböző magasságú, többségében 101,6 mm (Marshall) átmérőjű hengeres próbatesteken végezték. A terhelési maximumok, a statikus kúszásnál alkalmazott $\sigma_{ny}=0,1 \text{ N/mm}^2$ többszöröse voltak és az ismétlési frekvenciát 1- 10 Hz között választották a kutató laboratóriumokban. A későbbiekben igyekeztek még jobban közelíteni a gyakorlati forgalmi terhelés jellemzőit és bevezették több kutató laboratóriumban a terhelési szünetes dinamikus kúszás vizsgálatokat, vagyis a terhelési periódusban volt egy időszak (a periódus idő 75-87 %-a) amikor a próbatestre csak $0,01\text{-}0,02 \text{ N/mm}^2$ nyomóerő hatott. Például a terhelést a 3/b. ábra szerint vezérelték az 1,5 sec periódus időben.

Ez a vizsgálati módszer rendkívül időigényes volt, ezért a Karlsruhei Egyetem Útépítési Laboratóriumával együttműködve még a nyolcvanas évek közepén *összehasonlító vizsgálatot végeztünk a példának leírt szünetes és a szinusz függvény szerint 4 Hz frekvenciával vezérelt terhelési módszer (4/a. ábra) között.* Ez utóbbi módszernél a nyomófeszültségek szélsőértékei $\sigma_{max}=0,6 \text{ N/mm}^2$ és $\sigma_{min}=0,02 \text{ N/mm}^2$. Az összehasonlító vizsgálatok alapján megállapíthattuk, hogy a nagy többlet munkát igénylő terhelés szünetes vizsgálati módszer nem nyújt a gyakorlati felhasználónak többlet információt a vizsgált aszfaltanyag melegviselkedési tulajdonságairól. Így laboratóriumunkban az 1983-ban elkezdett módszerrel folytattuk a dinamikus kúszás vizsgálatokat: **a Marshall-próbatesten, 4 Hz szinusz szerint vezérelt $\sigma_{max}=0,6 \text{ N/mm}^2$ terheléssel, 40°C vizsgálati hőmérsékleten.** E vizsgálat (BME ÚTLAB 211/82) belső előírásban részletesen, szabványszerűen rögzített.

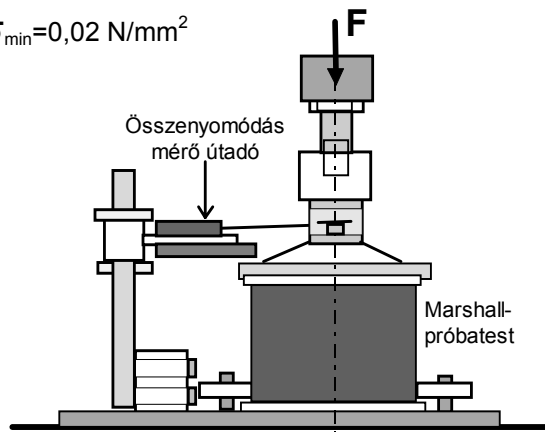
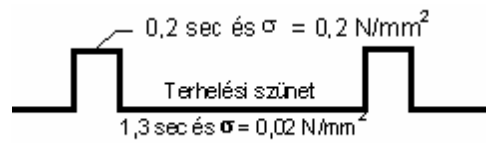
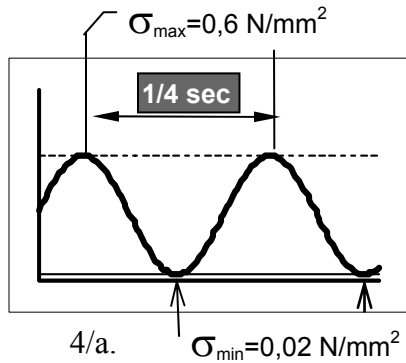
A dinamikus kúszás (egytengelyű nyomás) vizsgálatok során a hengeres aszfaltpróbatestek mint már említettük a cikluson belül rugalmas és maradó összenyomódást szenvednek el. Az összeadódó maradó alakváltozás (jelen esetben összenyomódás) görbéje a terhelés ismétlési szám függvényében, általában a (5. ábrán) látható módon alakul.

A görbére, - a hosszú közel egyenes szakasz miatt, - kissé nehezen illeszthető a harmadfokú polinom függvény, azonban így az inflexiós pont (melyet a próbatest tönkremenési pontjának tekintenek) matematikailag kényelmesen meghatározható. Újabban más jobban közelítő, de bonyolultabb függvényeket is alkalmaznak a kutató laboratóriumokban. Jó megoldásnak látszik folyamatos számítógépi mérésadat felvétel esetén, a görbe differenciáhányadosának figyelése (lásd 5. ábrán a vékony vonalú görbét).

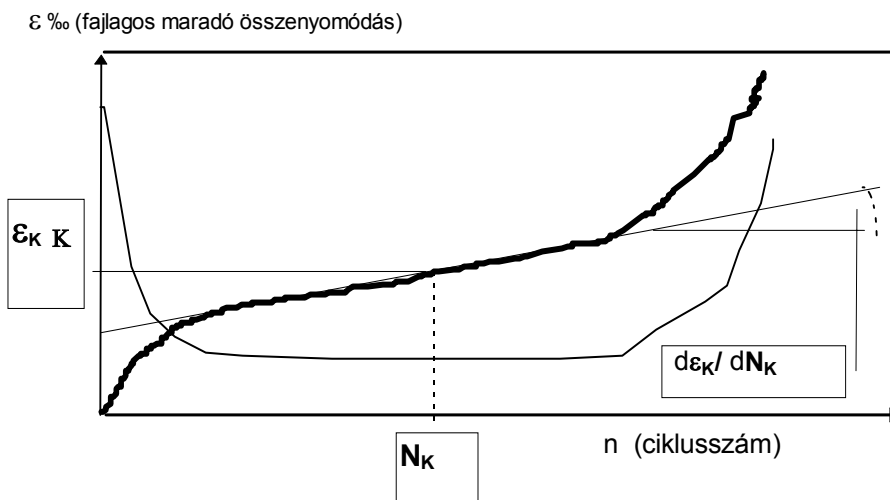
Ezen hányados görbe minimum egyenes szakaszának közepe vagy vége tekinthető a tönkremeneteli pontnak. *Akárhogyan határozzuk meg a görbén a tönkremenés pontját, annak fő jellemzői vagyis a vizsgálati eredmények mindenképpen a következők lesznek:*

- N_K : a tönkremenési ismétlésszám;
- ϵ_K [%]: a tönkremenési fajlagos alakváltozás;
- N_K/ϵ_K [%]: a melegviselkedési hányados;
- $d\epsilon_K/dN_K$: diff.hányados a tönkremenési pontban.

Ezen utóbbi hányados, a próbatest tönkremenetelének a sebességét jelzi. *A vizsgálat legjobb összefoglaló eredménye a melegviselkedési hányados, melynek növekvő értéke, - könnyen belátható okból, - a jó irány.*



4/c. ábra



5. ábra

2.5. Pecsétnyomás vizsgálatok.

Az öntöttaszfalt burkolatnak mindenkor az egyik legalapvetőbb minőségi jellemzője, a plasztikus meleg-alakváltozása volt. E tulajdonságának az ellenőrzésére az u. n. burkolatpenetrációs vizsgálatot is alkalmazták (2.1. fejezet). A 60-as években 52,5 kg súllyal terhelt 1 cm² keresztmetszetű acélhenger 30 perc alatti benyomódását mérték 22 °C szoba hőmérsékleten. A vizsgálatot \check{R} 150 mm kifűrt burkolatmintán vagy 7,07 cm élhosszúságú keretformába szorított próbakockán végezték.

Az újabb változat volt a "penetráció mérése" MSZ 9611/11-75, mely a terhelést (52,5 kg) megtartotta, de a terhelő acélhenger \check{R} 25,2 mm, vagyis 5 cm² keresztmetszetű volt, és a vizsgálat folyamán (előtte is 1 órán keresztül) a próbatestet 40 °C hőmérsékletű vízfürdőbe helyezték. A próbatest, mint előbb, laboratóriumi 7,07 cm élhosszúságú kocka formában, a felületeket gipszkásával kiegészítve. A félóra alatti benyomódást mérték 0,1 mm pontossággal. Ezek azonosak a jelenleg hatályos **ÚT 2-3.301:1997** mellékletében "Öntöttaszfalt pecsétnyomás-vizsgálata" cím alatt leírt vizsgálat fő paramétereivel.

A pecsétnyomás vizsgálatoknak is létrehozták a dinamikus változatát.

A **dinamikus pecsétnyomás-vizsgálat** egy bizonyos változatát 1993-ban alakítottuk ki (Török K.) a BME Útlaborban, a BVA (Bitumen Vizsgáló Aszfalt) vizsgálatok keretében, a +40 °C-on végzett Marshall-stabilitás vizsgálat felváltására. A vizsgálat fő paraméterei a következők:

- a 30 mm vastagságú 100x200 mm felületű próbatesteket, a vibrációs tömörítéssel előállított 200x305x30 mm méretű, Marshall testsűrűségű lapformából vágják ki (3 db-ot);
- a vizsgálati hőmérséklet 50 °C;
- a pecsétnyomó \check{R} 40 mm, felülete 1256 mm²;
- a terhelés 5 Hz szinusz vezérléssel, $F_{\min}=100$ N (0,08 N/mm²) és $F_{\max}=500$ N (0,4 N/mm²)
- az 5. ábra szerinti alakváltozási ábrát regisztrálják és a vizsgálati eredmények is azonosak a dinamikus kúszásnál ismertettekkel.

A *dinamikus pecsétnyomás vizsgálatoknak* is kialakították a **szüneteltetett terhelésű** változatait. Kurt Schellenberg által leírt szünetes pecsétnyomó vizsgálat paraméterei:

vizsgálati hőmérséklet: 45 °C
próbatest \check{R} 150 mm, magassága: 60 mm
a pecsétnyomó henger nyomófelülete: 2500 mm²
terhelési idő: 0,2 sec, terhelés max.: 0,7 N/mm²
terhelési szünet: 1,5 sec, terhelés min.: 0,08 N/mm²
terhelés vezérlés fél szinusz jellel.

Az *öntöttaszfaltok vizsgálatához* a BME Útlaborban kialakított **szünetes pecsétnyomás vizsgálat** paraméterei, (az öntöttaszfalt általános vastagságának megfelelő) 30 mm vastagságú kisebb próbatest méret miatt némiképpen eltérnek az előbbiektől:

vizsgálati hőmérséklet: 50 °C
próbatest 100x200 mm, vastagsága: 30 mm
a pecsétnyomó henger nyomófelülete: 1256 mm²; \check{R} 40 mm
terhelési idő: 0,2 sec, terhelés max.: 0,6 N/mm²
terhelési szünet: 1,5 sec, terhelés min.: 0,08 N/mm²
terhelés vezérlés fél szinusz jellel.

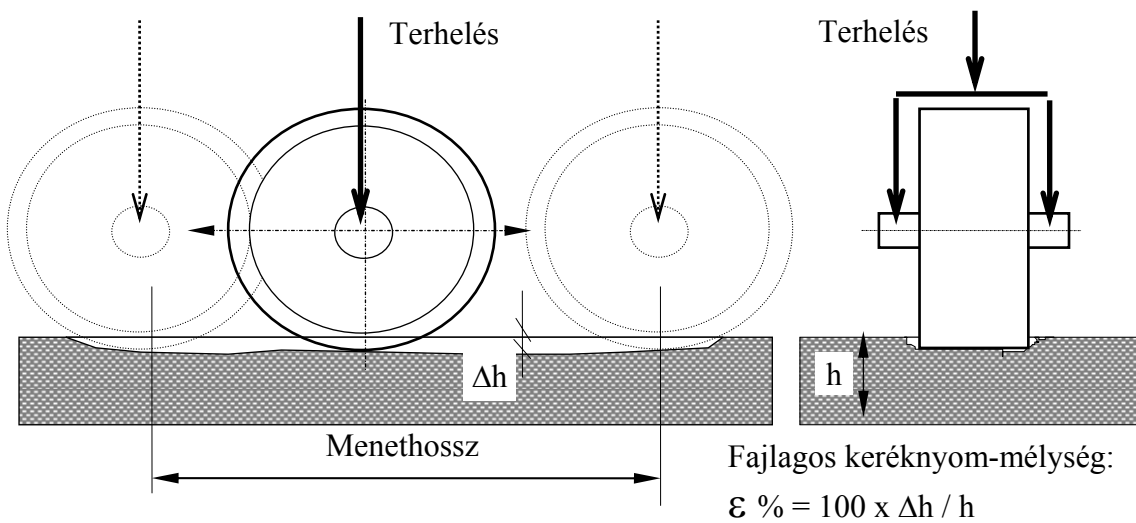
A szünetes dinamikus pecsétnyomásnál a benyomódás 5. ábra szerinti, és a vizsgálati eredményei is azonosak a dinamikus kúszás vizsgálatnál ismertettekkel.

2.6. Keréknyomképződés vizsgálatok

Angliában és Franciaországban a hetvenes években, egy a gyakorlati kerékterhelést és a terhelt aszfaltréteg valóságos kapcsolatát a környezetével (terhelésével) sokkal jobban szimuláló laboratóriumi vizsgálati módszert dolgoztak ki az útügyi laboratóriumokban. Mindkét országban kidolgozott módszer alapelve teljesen azonos; egy terhelt kerék (vagy a próbatest) mozog oda-vissza egy lap formátumú aszfaltpróbatesten. A paraméterek értékeiben és a vizsgáló berendezés kialakításában vannak a különbségek.

A BME Útépítési tanszék laboratóriumában 1982-ben az *angol berendezés* tervei illetve paraméterei alapján készült el (Fi I.) a **dinamikus keréknyom képződés vizsgáló berendezés**, mely ma már számítógépi mérésadat felvétellel működik (Ambrus K.) és eddig több mint ezer három órás (8360 kerékátmenetes) vizsgálatot végeztek el vele.

Egy francia keréknyom képződés vizsgáló komplett berendezést egyik hazai nagy útépítő vállalat vásárolt meg a nyolcvanas évek közepén. A berendezés, megváltozott szerkezeti keretekben ma is üzemel a budapesti laboratóriumban.



Az 1995. évben elkészült *új aszfaltkeverék tervezési előírásban* a fokozott igénybevételű beépítési helyre tervezett aszfaltkeverékek előírt laboratóriumi vizsgálatai között már a **keréknyom képződés és a dinamikus kúszás vizsgálat** is szerepel. Ugyanekkor folyamatban van, a BME Útépítési laboratórium üzemelő berendezése és vizsgálati tapasztalataira alapozott, sorozatgyártásra és elterjesztésre alkalmas **új keréknyom képződés vizsgáló berendezések** készítése.

A BME ÚTLAB 212:1989 *Keréknyomképződés vizsgálat* belső előírását túl nagy terjedelme miatt nem helyezzük a mellékletbe.

A vizsgálattal kapcsolatos lényegesebb **fogalmak**:

- **terhelési ciklus**: a terhelt kerék áthaladása a nyom egy keresztmetszetén kétszer (oda-vissza),
- **keréknyom**: a vizsgált minta felületén a terhelőkerékkel bejárt felületen látható és mérhető benyomódás,
- **keréknyom-mélység**: a vizsgált keresztmetszetben és kerékáthaladási számnál az eredeti felület és a keréknyomban létrejött új felület szintkülönbsége, az átlagos keréknyom-mélység az adott kerékáthaladási számnál a több keresztmetszetben mért keréknyom-mélységek átlaga,
- **fajlagos deformáció**: az átlagos keréknyom-mélység és a próbatest vastagságának hányadosa %-ban kifejezve.

Európában jelenleg három féle elfogadott nyomványképződés vizsgálatot végeznek: angol, francia, német módszer szerint. A német módszer paraméterei közel azonosak az általunk is alkalmazott angol módszerrel, azonban a próbatest készítési módja más, és a próbatest vizsgálati hőmérsékletének tartásához a vizsgálat folyamán termosztált vízben van a próbatest, továbbá acél abroncsú kerékkal végzik a vizsgálatot, egyébként mindkét módszer kisméretű próbatestet és ennek megfelelően kisebb méretű berendezést igényel.

Külföldi próbatest készítési módszerek:

- *gumikerekes tömörítővel* a 180x500x100 mm méretű nagy próbatesteket készítik kb 80 kg aszfaltkeverékből, a 0,7 MPa terhelésű Ø415 mm és 110 mm széles kerék kb. 20 percig járja a próbatestet,
- *lamellás tömörítő:* a 320 x 260 mm területű formába öntött és elterített tömörítési hőmérsékletű aszfaltra egy fémlemez helyeznek és erre kerül a 32 db fém lamella; a lamellák felső felületét egy 12 MPa terhelésű Ø320 mm fém kerék járja addig, míg a kívánt próbatest vastagságot el nem éri.

A vizsgálat végrehajtása (l.:6.ábra):

- *gumiabroncs kerekes* készülékekkel egyszerre két mintát vizsgálnak, a Ø400 mm és 8 mm széles, 6 bar nyomású, 4 kN terhelésű síma gumiabroncsos kerék a 410 mm menethosszon másodpercenként 1 terhelési ciklust hajt végre 60°C vizsgálati hőmérsékleten; a vizsgálat előtt a mintákat szoba hőmérsékleten, a későbbi nyomon 2000 áthaladással meg kell terhelni és ez a nyomfelület lesz a kiindulási null állapot; a 10 cm vastag próbatestnél kopóréteg esetén 60 000, egyébként 20 000 kerékáthaladás után mérik 5 keresztmetszetben 3 ponton a keréknyom-mélységet és számítják az átlagos fajlagos alakváltozást,
- *acélkerekes* készüléknél az Ø203,5 mm, 47 mm szélességű síma felületű kerék terhelése 700±10 N és menethossza 230 mm, vizsgálatot 60°C hőmérsékletű vízben végzik 20 000 kerékáthaladásig; a vizsgálat eredménye a közepső 100 mm hosszban meghatározott átlagos nyomvány-mélység.

2.7 Az aszfalt plasztikus melegalakváltozás vizsgálatának értékelése.

Az aszfalt melegviselkedés két leginkább elterjedt és meggyökeresedett vizsgálati módszere, a dinamikus kúszás vizsgálat és a keréknyomképződés vizsgálat fenntartására feltétlenül szükség van, az aszfaltkeverékek meleg deformációs tulajdonságainak maradéktalan feltárása érdekében. A két vizsgálati módszer kiegészíti egymást.

2.7.1. A függőleges nyomóterhelés és az oldalmegtámasztás.

Az oldalmegtámasztás nélküli Marshall-próbatést a **dinamikus kúszás vizsgálatnál**, csak a klasszikus aszfaltbeton jellegű, nagy kohéziójú aszfaltkeverékek esetén szolgáltató jó vizsgálati eredményt. Ha növekszik a szabadhézag tartalom, a szemeloszlás a drénaszfalt irányába tolódik el, vagy nő a gömbölyű szemcsék aránya, akkor erősen romlik a vizsgálati eredmény. A homokhasas szemeloszlás is, bár kisebb mértékben rontja az eredményeket.

Ugyanakkor a **keréknyom vizsgálatnál**, ahol az aszfaltréteg közelítőleg az útpályában lévő körülményeknek megfelelően helyezkedik el, éppen ellenkezőleg, az erősen zúzalékvasas, kis húzó- és hajlítószilárdságú aszfaltanyagok nyújtják a fokozottan jobb eredményeket; a kisebb keréknyom mélységeket, különösen a kúszás vizsgálat 40 °C hőmérsékletéhez közeli 45 °C vizsgálati hőmérsékleten.

Az évek során megszerzett előbbi tapasztalatokra támaszkodva a kilencvenes évek elején, a **keréknyomképződés vizsgálati hőmérsékletét** az Angliából eredendően átvett 45°C-ról **60°C-ra emeltük**, ugyanakkor a dinamikus kúszás vizsgálat (kezdetből alkalmazott) **40°C** hőmérsékletét változatlanul megtartottuk a BME Útlaborban. Ez utóbbi vizsgálati hőmérsékletet azzal indokoljuk, hogy az *aszfaltburkolatok nyári átlagos*

hőmérséklete nem haladja meg nálunk a 40°C-t, ezen a hőmérsékleten tehát minden aszfalttípusnak, - a nehezebb vizsgálati körülmények ellenére is, - valamilyen elfogadható eredményt fel kell mutatni. A *keréknyomképződés vizsgálat szélsőséges hőmérsékletén pedig drasztikusan szétválasztható* a fokozott melegviselkedési követelményeket kielégítő, elsősorban jó ásványivázú aszfalt, az e tekintetben gyengébb teljesítményű aszfaltkeveréktől.

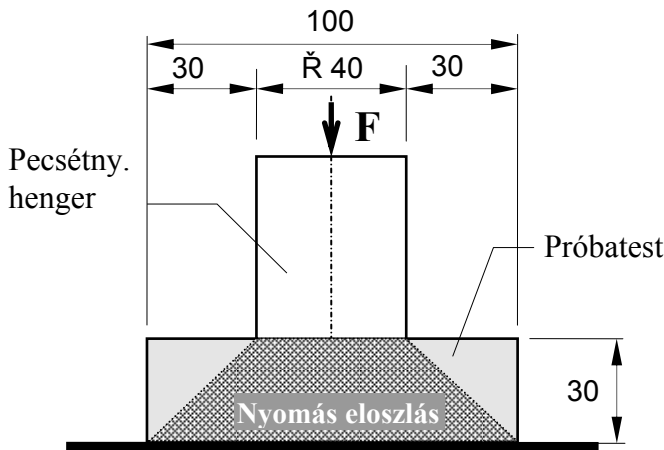
A **pecsétnyomás vizsgálatok** dinamikus változatai, a dinamikus kúszás vizsgálat és a keréknyom vizsgálat előnyeit kísérelték meg integrálni.

A *dinamikus kúszás vizsgálat előnye* a szokványos kis Marshall-próbatest és az ennek következtében kisebb klímater, továbbá a vizsgálati terhelés szinusz jel szerinti, mely minden vibrációs terhelő berendezésen megvalósítható.

A keréknyom vizsgálatok előnye a valósághoz közelítő próbatest (az aszfaltrétegnek egy kivágott része) és a kerékterhelés. A keréknyom vizsgálat minden aszfalttípus, még az érdesített homokaszfalt vizsgálatára is alkalmas.

A pecsétnyomás, a nyomófelület nagyságától függően legfeljebb $D_{max}=12$ mm szemcsészetű aszfaltbeton és öntöttaszfalt vizsgálatokra alkalmazható. A próbatest nem a teljes felületén terhelte és található olyan próbatest vastagság, próbatest átmérő és pecsét átmérő kombináció, melynél a tengelyben terhelő pecsét által keltett nyomófeszültségek a

$\varphi=45^\circ$ -os eloszlást feltételezve nem lépnek ki a próbatest palástján. Például: a pecsét $\check{R} 40$ mm, a próbatest $\check{R} 100$ mm, a próbatest vastagság 30 mm (l.: 7. ábra). Ezen a módon tehát a nyomóterheléssel szemben némi oldalmegettámasztása van az aszfaltrétegnek. A vizsgálat így kissé a keréknyomvizsgálat egyik előnyével is rendelkezik, ugyanakkor a dinamikus kúszás vizsgálatnak is minden előnye a vizsgálati módszerben van.



7. ábra

2.7.2. A vizsgálatok

időtartama, temperálási idő, egyéb körülmények.

A keréknyomképződés vizsgálat időtartama rögzített: 3 óra. A statikus pecsétnyomás időtartama szintén rögzített: 1 óra.

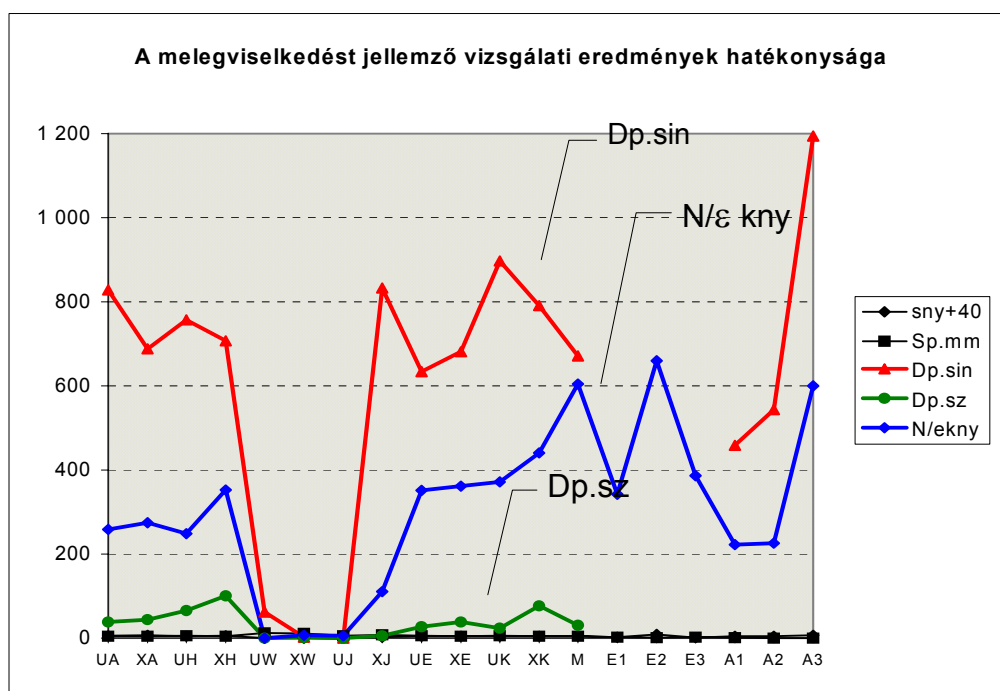
A dinamikus kúszás és pecsétnyomás vizsgálatokat az alakváltozási görbén látható inflexió (tönkremenetel) kialakulásáig illetve ha törés nincs legfeljebb 3 óra időtartam után lehet befejezni a vizsgálatot. Ez utóbbi esetben szinusz 4 Hz esetén $180 \times 240 = 43200$ ismétlésszámnál meghatározott fajlagos próbatest összenyomódás (pecsétnyomásnál benyomódás) $\epsilon_N \%$ a vizsgálati eredmény.

Alapvető tapasztalat, hogy a vizsgálati hőmérséklet és a próbatest méretének növekedésével együtt emelkedik az előtemperálási időtartam. Az általános keréknyomvizsgálathoz szükséges 5,5-6,0 kg (kb. 5 Marshall-próbatest) tömegű aszfalt próbatest 60 °C-ra temperálása légtérben, külön szárítószekrényben 12 órát vesz igénybe. Ez az idő vízben a harmadára fog csökkenni az új berendezések alkalmazása esetén. A Marshall-próbatesteket légtérben 4 óra alatt lehet szobahőmérsékletre a dinamikus kúszás 40 °C vizsgálati hőmérsékletére temperálni és ehhez nem szükséges külön klímaszekrény, hanem a vizsgáló tér is alkalmas erre a feladatra.

A dinamikus kúszás és pecsétnyomás vizsgálatnál minél gyengébb az aszfalt melegviselkedési szempontból, annál rövidebb időtartamú a vizsgálat. Előfordulhat, hogy 3 óra alatt 3 vizsgálat is elkészül, amelyek alapján már vizsgálati eredmény számítható és jegyzőkönyvezhető. Ugyanennek az anyagnak ekkor még csak a második keréknyomvizsgálatát végzik.

2.7.3. Összehasonlítás a vizsgálati eredmény szelektáló képessége szempontjából.

A vizsgálatok alapvető célja az aszfaltok plasztikus melegalakváltozási jellemzőjének meghatározásával, hogy a vizsgált anyagokat ebből a szempontból osztályozzuk, elkülönítsük a jobbat a rosszabbtól. Egy vizsgálat vizsgálati eredménye akkor kedvezőbb, ha minél jobban elválasztja a jót, a jobbtól és a legjobbtól illetve a legrosszabbtól, vagyis minél tágabban szelektál. Belátható, hogy minél nagyobb sok aszfalt fajta vizsgálati eredményeinek terjedelme, szórása illetve annak viszonya az átlaghoz, annál kedvezőbb a vizsgálati eredmény típus. A BME Útlaborban nem régen végeztünk az öntöttaszfalt tervezett melegviselkedés vizsgálateival kapcsolatosan egy ilyen analízist (8. ábra).



8. ábra

A 19 különböző összetételű és kötőanyagú öntöttaszfalt-keveréken (az abszcisszán) 5 féle melegviselkedési vizsgálatot végeztünk. Először a nem szabványos vizsgálati típusoknak kiválasztottuk azt a vizsgálati eredmény típusát, mely a legtöbbet foglalja magában a vizsgálat nyújtotta információkból, tehát a vizsgálatot legjobban reprezentáló vizsgálati eredményt. Az 5 vizsgálat és a reprezentáló vizsgálati eredménye a jelmagyarázat sorrendjében: **sny+40** : 40°C-os kocka-nyomószilárdság; **Sp mm** : statikus pecsétnyomás, 30 perces benyomódás; **Dp.sin** : dinamikus pecsétnyomás sinus 5 Hz vezérléssel, N/ε_N ; **Dp.sz** : dinamikus pecsétnyomás terhelés szünetes vezérléssel, N/ε_N ; **N/ε_{kny}** : keréknyomképződés vizsgálat, N/ε_{kny} (a kerékátmenetek száma és a fajlagos nyommélység hányadosa).

A vizsgálati eredmények számértékeit normalizáltuk (az átlagtól való eltérés és a szórás hányadosa), majd az abszolút értékben legnagyobb negatív értéket hozzáadtuk minden normalizált értékhez a negatív számok kiküszöbölése érdekében és hogy egésszámokkal dolgozhassunk, 100-al szoroztuk minden értéket. Az eredmény grafikusan feldolgozva az 8. ábrán látható (a függőleges tengelyen az előbbieket szerint feldolgozott vizsgálati eredmények, vízszintesen a vizsgált 19 öntöttaszfaltkeverék).

A 8. ábra alapján megállapítható, hogy mind az öt vizsgálat közel azonosan jelzi az egyes aszfaltkeverékek melegviselkedése közötti különbségeket, de a legszembevetőbben a dinamikus szinusz 5 Hz vezérlésű pecsétnyomás vizsgálat eredménye, majd a keréknyomképződés vizsgálat eredménye szelektálja ezeket az eltéréseket. Ezen vizsgálati eredmények hatékonysága mellett eltörpül és alig észrevehető a statikus pecsétnyomás és a 40°C-os kocka nyomószilárdság szelektáló képessége.

3. Az aszfaltkeverékek hidegviselkedésének vizsgálatai

Az előbbieken már említettük, hogy az aszfaltrétegek hidegviselkedési tulajdonságai alatt, elsősorban a téli gyors lehülések alkalmával, a rétegben felhalmozódó (a relaxáció révén el nem enyésző) termikus húzófeszültségek által okozott repedésekre való hajlamosságot értjük. Ennek a termikus repedési hajlamnak vagy téli repedés érzékenységnek a vizsgálata két féleképpen alakítható ki:

- a relaxáció figyelembevételével és a
- a relaxációtól a biztonság javára eltekintve.

Ez utóbbi eset természetesen az egyszerűbb, ugyanakkor az aszfalt egyik legpozitívabb tulajdonsága nem jelenik meg a vizsgálati eredményben és ezáltal az aszfaltkeverékek hidegviselkedési jellemzőjének skálája összeszűkül.

Az aszfaltburkolatok téli repedés érzékenységeivel, a termikus eredetű repedési hibákkal a Ferenczy Géza: "Aszfaltburkolatok" c. könyve szerint 40 évvel ezelőtt is tisztában voltak, gyakorlatilag az okokat is tudták (betonalapon reflexiós repedések, téli lehülésnél réteg összehúzódás miatti húzófeszültségek, repedés oka az aszfalt ridegsége, a kötőanyaga, vagy esetleg az öregedés miatt stb.), de e tekintetben nem vizsgálták az aszfaltkeverékeket. A 22 °C-os kockanyomószilárdság vizsgálat, melyet 12-szer ismételt fagyasztásnak kitett próbakockákon is elvégeztek némi információt nyújthatott volna ez irányban is, de nem használták fel az eredményeket ilyen következtetésekre. Ez voltaképpen akkor nem volt igazán tömeges hibajelenség a jó nagylengyeli bitumennel, általában magas kötőanyagtartalmú finomaszfaltbeton kopórétegekkel készülő aszfaltburkolatoknál. A hígítottbitumenes itatásokkal fedett makadámokon pedig nem lehetséges ez a hiba.

A fejlett államokban az aszfaltburkolatoknak ez a hiba jelensége a 70 -es években kezdte felhívni magára a figyelmet, amikor a megjelenő nyomvályuk hatására beindult aszfalttechnológiai elenakciók (nagyobb D_{max} , kisebb bitumentartalom, keményebb bitumen) következményeként 5-6 év múltán nagy aszfalt felületeken jelent meg a termikus repedezettség. Ezután a 70-es évek végén az addig már összegyűjtött aszfaltmechanikai ismereteket felhasználva megindult az aszfalt téli repedés-érzékenységének kutatása.

Alapjában véve a vizsgálati módszerek minden esetben az aszfalt u.n. repedési hőmérsékletét (lásd: 1.2. fejezet) igyekeznek meghatározni, vagyis azt a hőmérsékletet amikor az alakváltozási akadályoztatás miatt felhalmozódott termikus húzófeszültségek nagysága éppen eléri az adott hőmérsékleten meglévő aszfalt-húzószilárdságot.

3.1. Az aszfalt húzószilárdságának, termikus alakváltozásának, húzófeszültségének mérése

Hazánkban az aszfalt első húzószilárdság vizsgálatát 1969.-ben az Útügyi Kutató Intézetben dr. Boromissza Tibor végezte, tiszta húzással. Az első indirekt módszerű, hasításvizsgálattal végzett aszfalt húzószilárdság és modulus meghatározást a BME Útépitési laborban kifejlesztett berendezéssel 1977. őszén végeztük (Török K.). Az aszfaltpróbatetek hasításvizsgálatának ágazati szabványa 1982-ben készült el (most ÚT 2-3.308:1998).

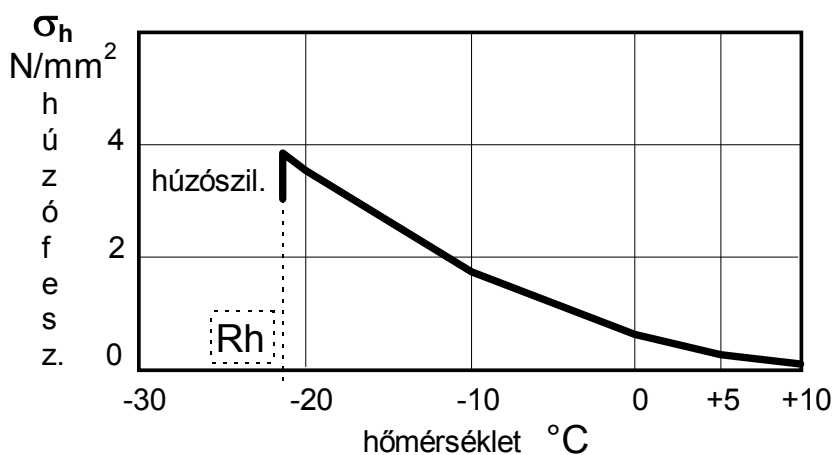
A repedési hőmérséklet illetve az ahhoz tartozó aszfalt húzószilárdság meghatározásához több vizsgálati lehetőség adódik.

3.1.1. Próbatetest hűtése megakadályozott alakváltozással.

A gyakorlati körülményeket legjobban szimuláló laboratóriumi vizsgálatot lehet megvalósítani, ha a hasáb alakú aszfalt-próbatestet a két véglapjánál fogva az *alakváltozását megakadályozva* (ellenőrizve és automatikusan korrigálva), a próbatetest hőmérsékletét valamilyen, a természetben szélsőséges esetben előforduló $-X$ °C/óra sebességgel lehűtik, közben folyamatosan mérve a keletkező termikus húzóerőt. A próbatetest elszakadásának pillanatában **mért húzófeszültség** az aszfalt húzószilárdsága, az akkor **mért próbatetest hőmérsékleten**, mely utóbbi pedig a tulajdonképpeni repedési hőmérséklet.

A feszültség görbe meredeksége azonos anyagnál a lehülési sebesség növelésével fokozható, ugyanis egyre kevesebb ideje marad az aszfaltrétegnek, a keletkező termikus feszültség *relaxálására*.

Ez a célratoró vizsgálati módszer rendkívül nehezen valósítható meg. Főként az aszfalt-próbatetest, *állandó lehülési sebességének* a biztosítása ütközik nehézségekbe; továbbá az alakváltozás megakadályozása körülményes. A hosszirányú alakváltozás mérő bázishoz rendkívül kis hőtágulású anyag szükséges, vagy a mérő bázisnak nem változhat a hőmérséklete. Néhány kutató laboratóriumban létrehozták ezt a bonyolult és drága berendezést, a BME Útlaborban jelenleg folyamatban van a fejlesztése.



9. ábra

3.1.2. Lassan húzott aszfaltpróbatetest

Másik megoldás, hogy egy bizonyos **lassú állandó sebességgel húzzák a változatlan hőmérsékletű próbatestet** egészen a szakadásig és közben folyamatosan mérik, ellenőrzik a próbatetest megnyúlását és a keletkező húzófeszültséget. Ha ezt több

hőmérsékleten megismételjük, megkapjuk az adott húzási sebességre vonatkozó szakítószilárdság, szakadónyúlás és a hőmérséklet összefüggését.

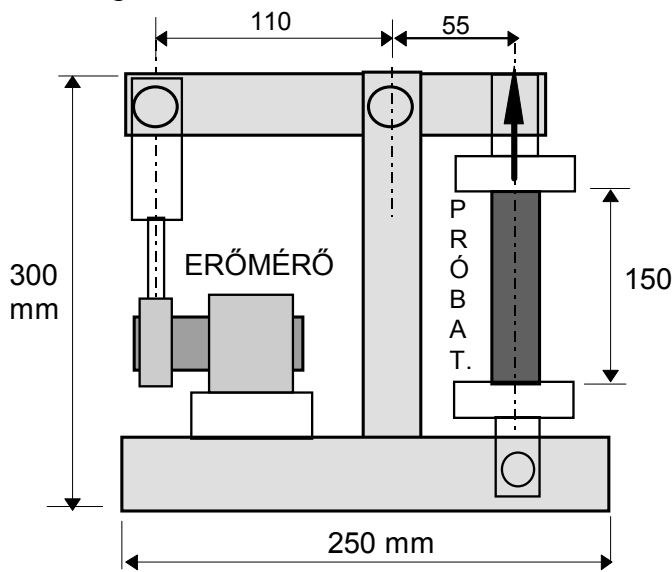
Ha ismerjük a vizsgálati hőmérsékleten az α (lineáris hőtágulási együttható) értékét akkor a választott lehülési sebességnek megfelelő húzási sebesség kiszámítható.

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

Például: $10^{\circ}\text{C}/\text{óra} * 25 * 10^{-6} = 250 * 10^{-6} / \text{óra}$ fajlagos megnyúlás, vagyis 100 mm próbatest hosszon $25 * 10^{-3} \text{ mm}/\text{óra}$ húzási sebességgel lehet az adott lehülési sebességet szimulálni.

Ez olyan kis sebesség, hogy egyrészt technikailag nehezen valósítható meg, másrészt magasabb (-5 és +5°C) hőmérsékleten a nagy relaxáció miatt egy napig is nyújtható a próbatest (ekkor a fajlagos megnyúlás $600 * 10^{-5}$).

A szakirodalomból (USA Asphalt Institute 1982. szeptemberi kiadványában Bernard F. Kallas: Low-Temperature Mechanical Properties of Asphalt Concrete) megismert amerikai kutatásnál alkalmazott húzási sebesség a 90 mm hosszú próbatesten az előbbi sebesség sokszorososa: $390 * 10^{-3} \text{ mm}/\text{óra}$. Ez az érték az előbbi lineáris hőtágulási együtthatóval számítva kb. $156^{\circ}\text{C}/\text{óra}$ lehülési sebességnek felel meg. Ezzel a sebességgel a magasabb hőmérsékleten is néhány órán belül megtörténik a szakadás. Természetesen tudomásul kell vennünk, hogy ez a nyújtás sokkal drasztikusabb a természetben előforduló legnagyobb ilyen igénybevételnél és így az aszfalt teljes relaxációs képessége sem jelenhet meg a vizsgálati módszerben. Mégis az ilyen húzási sebességű vizsgálati módszer gyakorlati megvalósítása látszik célszerűnek.



10. ábra

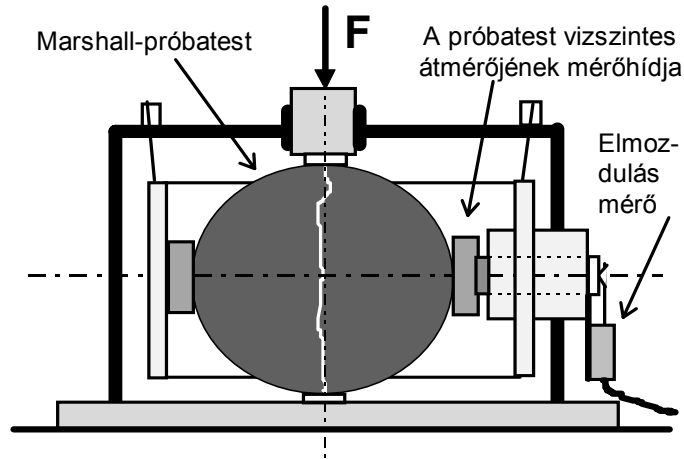
A BME Útlaborban elkészült (Török K.) a léptető motorral és csiga áttétellel kialakított, számítógéppel több féle húzási sebességgel vezérelhető készülék, mely méreténél fogva klímaszekrénybe helyezhető és a próbatestben fellépő húzóerő mérésére is alkalmas (10. ábra). A próbatest két oldalán 100 mm bázishosszon folyamatosan mért hosszváltozásból a számítógépi program végzi a húzási sebesség beállítását a kívánt értékre. Ennek a vezérlő és mérésadat felvevő, feldolgozó

programnak a próbaüzeme folyik, és a múlt évben kapott ilyen irányú kutatási megbízás keretében a módosított berendezéssel az állandó sebességű húzás módszert és az aszfalt relaxációs idejének mérését tervezzük megvalósítani.

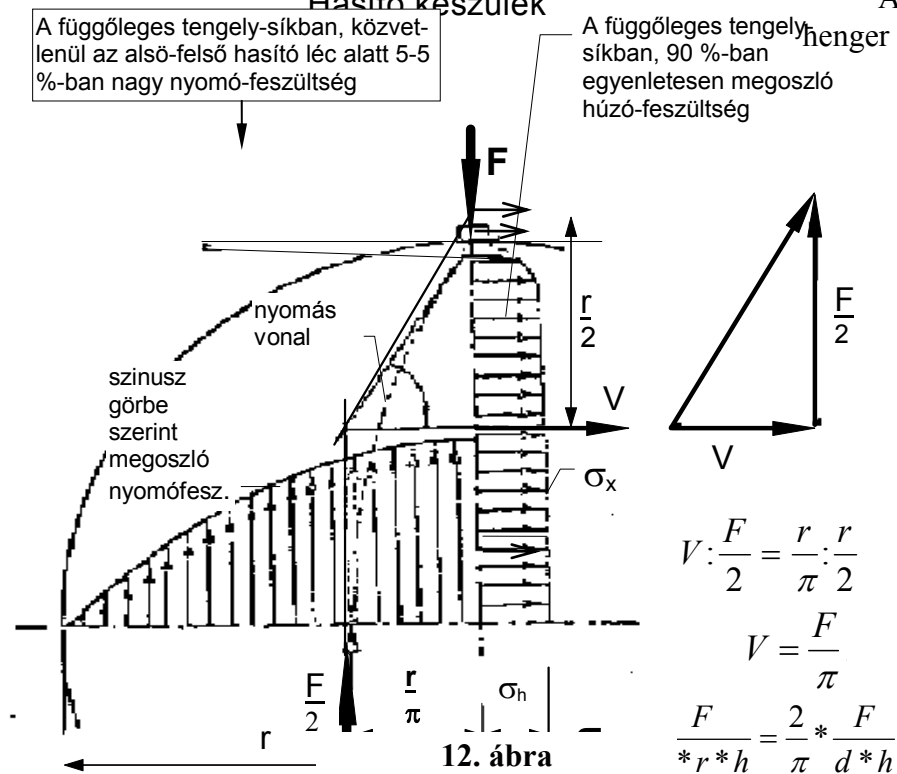
3.1.3. Aszfaltpróbatestek hasításvizsgálata

A hengeres testek hasító vizsgálatát az építőanyagok mechanikai jellemzőinek meghatározására, - főként a betonoknál, - már 1937-ben Japánban, 1941-ben pedig Braziliában is (innen a "brazil módszer" elnevezés) használták és bevezették a hasítóhúzószilárdságot. A betontechnológiában ma is használják ezt a módszert főként a kifűrt magminták vizsgálatára.

Magyarországon az első aszfalthasításvizsgálatokat alakváltozás mérés nélkül 1974-ben az Útügyi Kutató Intézetben dr. Boromisza T. végezte. A BME Útlaborban 1977/78 -ban külföldi tapasztalatokra támaszkodva kidolgozott hengeres aszfaltpróbatestek hasításvizsgálata (Török K.), az aszfaltpróbatestnek a húzófeszültség irányában létrejövő alakváltozásának a mérésével, az anyag E modulusának ("merevségének") meghatározását is lehetővé teszi. A 10. ábrán látható vizsgáló készülék és az egész vizsgálati módszer kialakításánál a Marshall-stabilitás vizsgálat lényegretörő egyszerűsége, könnyű ismételhetsége, és így jó laboratórium gyakorlati alkalmazhatósága volt a követendő példa, elfogadva az így kissé nagyobb pontatlanságot, ami egyébként a próbatestek nagyobb számával korrigálható.



11. ábra
Hasító készülék



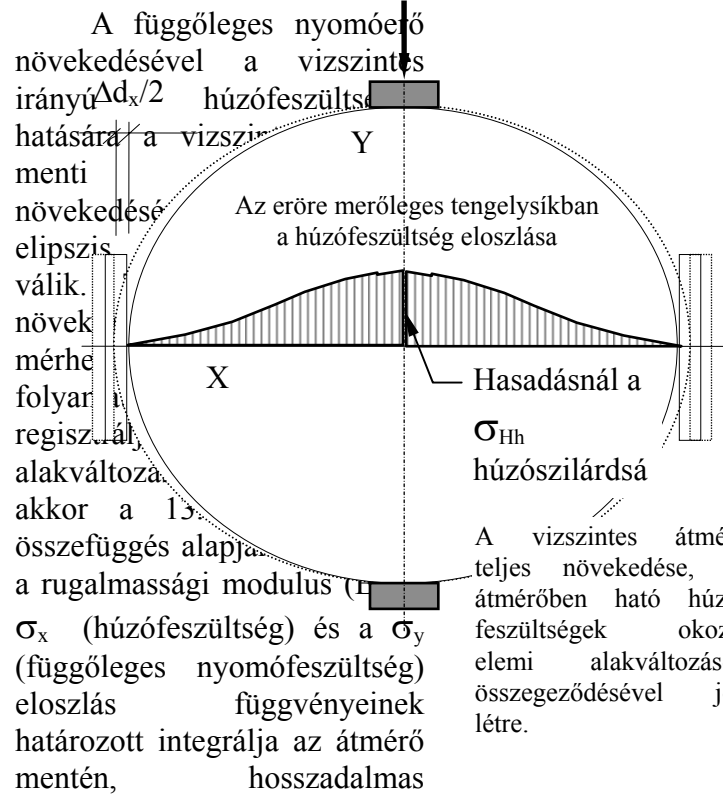
12. ábra

Ha egy hengeres testet, melynek anyaga tökéletesen rugalmas, tehát a Hooke-törvény szerint viselkedik, két egymással szemben lévő alkotója mentén nyomással terhelünk, a test bizonyos terhelésnél a két alkotó és tengelye síkjában szétválik, elhasad az ott keletkező nyomóerőre merőleges irányú egyenletes eloszlású húzó-feszültség következtében.

A 12. ábrán látható a henger keresztmetszetében a függőleges erőhatásra létrejövő feszültségeloszlás. A külső F erő és a belső nyomó-, illetve húzó-feszültség egyensúlyi feltétele alapján számítható a keletkező húzó-feszültség, ami a hasadás pillanatában az anyag húzószilárdságával egyenlő. Az eredmény a hasító erő F_H , a próbatest átmérő-je d , a próbatest hossza h függvénye.

Ha a hengeres próba-test Marshall-méretű, akkor $d=101,6$ mm és a hasító-húzószilárdság:

$$\sigma_{Hh} = 6,266 \frac{F_H}{h} \left[\text{N/mm}^2 \right] \quad \text{ahol } F_H \text{ [kN] és } h \text{ [mm]}$$



$$\frac{\Delta d_x}{2} = \frac{1}{E} \int_0^{\frac{d}{2}} (\sigma_x - \mu \sigma_y) dx$$

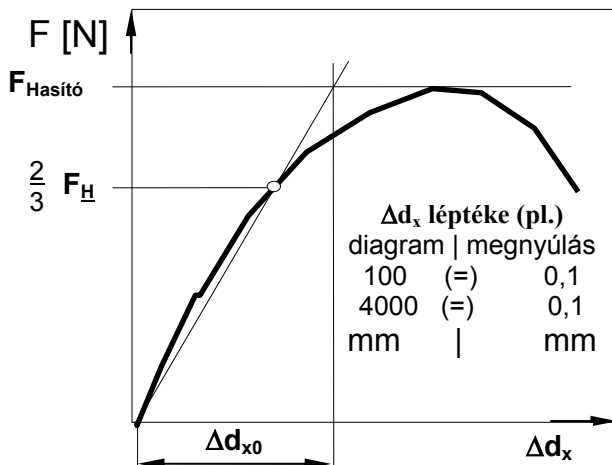
13. ábra

bonyolult levezetés, ezért itt csak az eredményt írjuk le, ismét hangsúlyozva a Hooke törvény szerinti rugalmas állapot feltételezését, ami aszfalt esetében csak +5°C alatti hőmérsékleten elfogadható közelítés.

$$E = \frac{F}{h * \Delta d_x} * \frac{4}{\pi} * \left(1 - \frac{\pi}{4} + \mu \frac{\pi}{4} \right) = \frac{F}{h * \Delta d_x} * (0,273 + \mu)$$

ha $\mu = 0,327$, akkor $E = \frac{0,6 * F}{h * \Delta d_x} \left[\text{N/mm}^2 \right]$

- ahol F : a függőleges nyomóerő [N]
- h : a próbatest hossza (magassága) [mm]
- Δd_x : az F erő hatására létrejött vízszintes átmérő növekmény [mm]



Hasítási diagram
(melyet az elektronikus alakváltozás-, és erőmérő által adott jel alapján rajzol az X-Y rajzoló műszer)

14. ábra

A gyakorlatban a hasító erőhöz F_H tartozó Δd_{x0} alakváltozást határozzák meg a 14. ábrán látható módon. Ha a hasítóerő kétharmadáig közel egyenes a görbe (-5 és -20°C), akkor az egyenes szakaszra kell a modulus iránytangens egyenesét fektetni.

$$E_{Hh} = \frac{(0,273 + \mu) * F_H}{h * \Delta d_{x0}} = \frac{0,6 * F_H}{h * \Delta d_{x0}} \left[N / mm^2 \right]$$

A keresztirányú nyúlás aránya, a Poisson-szám értéke a mérések szerint aszfaltoknál $\mu = 0,30 - 0,35$ között ingadozik az anyag, a hőmérséklet és terhelés függvényében; a 0,327 értékű behelyettesítése tehát megengedhető egyszerűsítés.

Az eredményül kapott σ_{Hh} és E_{Hh} eredményeket a próbatest magasságának függvényében korrigálni kell az alábbi képletekkel előállítható szorzókkal:

$$K_{\sigma_{Hh}} = \frac{1}{0,2835 + 0,2305 * h - 0,0185 * h^2} \quad MK_{E_{Hh}} = \frac{1}{1,0816 + 0,0834 * h - 0,0152 * h^2}$$

ahol h a próbatest hossza (magassága) **cm**-ben.

A korrekciós szorzás utáni értékek a σ_{Hh} hasító-húzószilárdság és E_{Hh} hasító-modulus eredmények, melyek hányadosa a fajlagos szakadó nyúlás.

Szakadó nyúlás: $\epsilon_{sz} = \frac{\sigma_{Hh}}{E_{Hh}}$ általában a $[10^5 * \epsilon_{sz}]$ értéket használják

$$\text{Hidegnyúlási képesség: } \epsilon_H = 10^{10} * \frac{\epsilon_{sz(+5^\circ C)} - \epsilon_{sz(-20^\circ C)}}{25} * \epsilon_{sz(-20^\circ C)}$$

Az aszfalt hidegviselkedésére jó megbízhatósággal lehet következtetni az $\epsilon_{sz(-20^\circ C)}$ a -20°C-on meghatározott szakadó nyúlás, továbbá a fentiek szerint számított "hidegnyúlási képesség" mérőszám értékéből.

A hazai előírás ÚT 2-3.308:1998 szerint +5°C a vizsgálati hőmérséklet, az alsó és felső hasítólécs szélessége 8 mm, a nyomófej előtolási sebessége 50 mm/perc, $\mu = 0,327$, és a korrekciós szorzók (K_σ és K_E) a fentebbiek szerint számítandók.

3.2. Az aszfalt lineáris hőtágulási együtthatójának (α) mérése

Az aszfalt hőtágulási együtthatójának méréséről az első hazai írásos nyomot az Útügyi Kutató Intézet (Bán Dezső és dr. Boromisza Tibor) által 1970-ben készített "Előtanulmányok a Ferihegyi Repülőtér betonpályáinak erősítéséhez" c. kutatási jelentés "I. Aszfaltburkolatok mechanikai vizsgálatai" c. fejezetében találtuk. A vizsgálati módszerről csak egy fénykép nyújt információt. Megállapították, hogy a *lehülő* próbatestek magasabb hőmérsékleten mért alakváltozása volt a nagyobb. A meghatározott együtthatók:

- öntöttaszfalt $\alpha = 40 \times 10^{-6}$
- aszfaltbeton $\alpha = 25 \times 10^{-6}$
- kötőréteg $\alpha = 20 \times 10^{-6}$

Ezek az értékeket a BME Útlaborban (Ambrus K. és Török K.) a 80-as évek második felében kifejlesztett vizsgálati módszerrel való mérések is igazolják.

A hőtágulási együttható mérése, az aszfalt repedési hőmérsékletének meghatározásához szükséges, ezért a mérést alacsony hőmérséklet tartományban, csökkenő hőmérséklettel végzik.

A vizsgálati hőmérséklet tartomány: +20°C-tól -25°C-ig.

A mérés két 40x40x320 mm méretű hasáb formájú, azonos anyagú aszfaltpróbatetest segítségével végzik. Az egyik próbatetest középebe ellenállás hőmérőt építenek be, ez az úgynevezett *hőmérő próbatetest*. A másik próbatestet egy olyan készülékbe kerül, mely a *próbatetest hossz-változásának mérésére* alkalmas (15. ábra). A két próbatestet legalább 2 órán keresztül egymás mellett szobahőmérsékleten kell temperálni.

A vizsgálótér (hűtőláda) hőmérséklete $-30\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ állandóan.

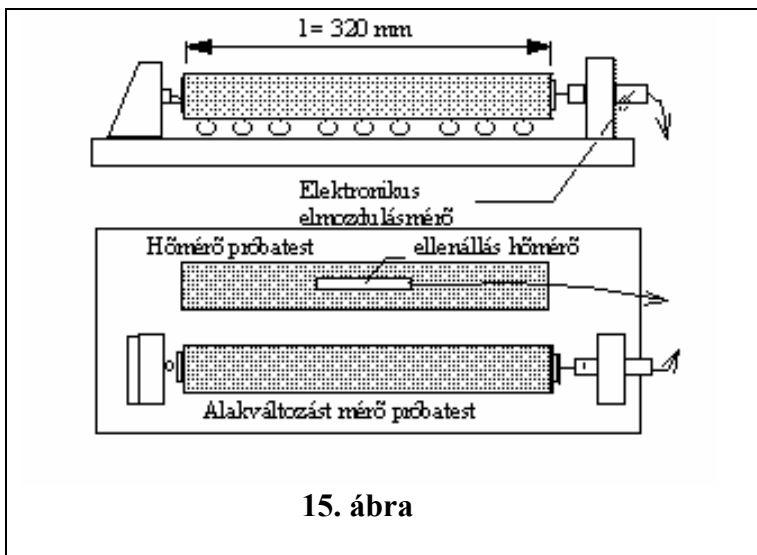
A hossz mérés próbatest véglapjaira $30 \times 30 \times 3$ mm méretű üveglapocskák felragasztása szükséges a mérőcsúcsok érintkező felületeként.

A -30 °C -os vizsgálótérbe, - a két közel azonos kialakítású készülékbe (15. ábra) egyidőben kell behelyezni, az együtt szobahőmérsékletre (22 °C) temperált hőmérséklet és hosszváltozás mérő próbatestet. A próbatest hosszváltozását (csökkenését) elektronikus elmozdulásmérő segítségével mérik, a hőmérséklet méréssel együtt folyamatosan. Természetesen az eltelt idő mérése is folyik.

A mérés adatok felvétele, feldolgozása ezideig C64 számítógépre írt programmal történt, jelenleg a legalább PC 486 szintű számítógépre elkészült programmal. Minden hőfok csökkenésnél számítja a program a $\alpha = \Delta l / l$ értéket, ahol Δl az 1 °C -os hőmérséklet csökkenés hatására bekövetkező próbatest hossz csökkenés. A vizsgálat végén az összetartozó "hőmérséklet - α " és "lehülési sebesség - α " értékpárokat harmadfokú regressziós polinom illesztését végzi el a program. Ugyanakkor az átlagos α érték számítása a teljes zsugorodás ΔL és teljes hőváltozás $\Delta T \approx 40\text{ °C}$ alapján.

Vizsgálati eredmények:

- a harmadfokú regressziós polinom négy együtthatója: $\alpha = f(t)$;
- $\alpha [1/\text{°C}]$: $+5, -5, -20\text{ °C}$ -on a lineáris hőtágulási együttható,
- $\alpha_0 [1/\text{°C}]$: átlagos lineáris hőtágulási együttható a $+20 - -25\text{ °C}$ tartományban.



15. ábra

3.3. Az aszfalt relaxációja

Az eddigiekben sokat emlegettük az aszfalt relaxációs képességét, vizsgáljuk meg hát közelebbről ezt a kérdést.

Ha egy rendszer valamely egyensúlyi állapotból egy új egyensúlyi állapotba való átmenete pillanatszerűen megy végbe, akkor a rendszer mindvégig egyensúlyi állapotban marad, és a folyamat reverzibilis. Ha

ez az átmenet időben lejátszódó, akkor a rendszer különböző nem egyensúlyi állapotokon halad keresztül, és ez már irreverzibilis folyamat. Az aszfalt ez utóbbi viskoelasztikus rendszerek közé tartozik. Az ilyen rendszer külső hatással szemben tanúsított reakciói a hatás időtartamának és a változás sebességének is függvényei.

A reológia a **nem egyensúlyi** állapotból, **egyensúlyi** állapotba való átmenet időbeni folyamatait nevezi **relaxációs jelenségeknek**.

A viskoelasztikus rendszerek viskozitásának növekedésével a molekulák közötti erők mind jobban érvényesülnek a molekulák hőmozgásával szemben. A külső erők hatására végbemenő molekulaátcsoportosulások egyre kisebb sebességgel képesek végbemenni, vagyis a relaxációs folyamatok sebessége csökken, a relaxációs idő nő.

Az aszfalt relaxáló (ernyedő) képességét a hőmérséklet és a kötőanyag minősége, fajtája, molekulaszervezete befolyásolja elsősorban.

Ha a terhelő feszültség egy bizonyos mértékűt, - az aszfalt esetében a gyakorlati rugalmassági modulusnak megfelelő rugalmassági határt, - eléri, akkor a tehermentesítés után mindíg fellép maradó alakváltozás. Hasonlóképpen a kényszerített változatlan

nagyságú alakváltozás következménye az anyagban lévő kezdeti feszültség időben bekövetkező csökkenése. A reológia az előbbi jelenséget *kúszásnak*, az utóbbit *ernyedésnek, relaxációnak* nevezi.

Az aszfaltok alacsonyabb hőmérsékletű viselkedését leíró Maxwell-modell a relaxáció folyamatának leírására is alkalmazható. Ez az anyagmodell két elemes, sorba kapcsolt rúgó-elem (E rug. modulus) és csillapító elem (η viszkozitás). A reológiai alapegyenlete:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta}, \text{ ha } \dot{\varepsilon} = 0, \text{ vagyis a deformáció nem változik: } \sigma = \sigma_0 \times e^{-\frac{E}{\eta} \times t}$$

ahol ε : a deformáció sebessége; σ : a feszültségsebesség; η : viszkozus ellenállás [Pas]

- ha $t=0$, akkor $\sigma = \sigma_0$, tehát σ_0 a **kezdeti feszültség**,

- ha $-\frac{E}{\eta} \times t = -1$, akkor az eredeti feszültség (σ_0); σ_0 / e értékűre csökken és ezt nevezzük relaxációs időnek; $t = \eta / E$ hányados idő dimenziójú **anyag** **állandó**, jele t_{rel} [s] és így a fenti alapegyenlet ismertebb formában írható fel:

$$\sigma = \sigma_0 \times e^{-\frac{t}{t_{rel}}}$$

Az aszfaltok relaxációs idejének jellemzésére GAUER azt az időt tekinti **relaxációs idő**-nek, amikor a **kezdeti feszültség 1/e értékre, azaz 0,368 -szoros értékűre csökken le**.

Gauer és **Arand** által végrehajtott vizsgálatok szerint néhány különböző kötőanyaggal készült AB 0/11 aszfalt különböző hőmérsékleten mért *relaxációs ideje*:

- 0°C-on B-80 bitumen : Relaxációs idő = 75 sec
- 0°C-on Bitumen 85/25 : Relaxációs idő = 325 sec
- -10°C-on B-80 5,6 m% : Relaxációs idő = 3700 sec
- +20°C-on B-80 5,6 m% : Relaxációs idő = 2 sec

Láthatóan a hőmérséklet a döntően (nagyságrendileg) befolyásoló tényező, a bitumen penetráció befolyása csak azonos hőmérséklet esetén felismerhető.

3.4 Az aszfalt repedési hőmérsékletének meghatározási módszerei.

A BME Útépitési laboratóriumában Pallós I. indítványára 1985-ben kidolgozott u.n. *fiktív repedési hőmérséklet (RH) meghatározásának módszerében* a rendkívül gyors lefolyású, - az aszfaltnak relaxációra lehetőséget nem nyújtó, - **hasítás vizsgálatot** (11. ábra) alkalmazzuk.

Az elmúlt másfél évtizedben a Marshall-próbatestek három hőmérsékleten (+5, -5, -20 °C) végzett **hasításvizsgálatára** (3.1.3. pont) és a **lineáris hőtágulási együttható** (3.2.) fentebbi hőmérséklet intervallumban való **mérésére alapozott**, (RH) módszerrel többszáz aszfaltkeveréknek meghatároztuk a repedési hőmérsékletét.

A **repedési hőmérséklet (RH) vizsgálati eredmény magába sűríti** 15 db Marshall-próbatest **hasításvizsgálatának húzószilárdság** (σ_{Hh}) és **"rugalmassági" modulus** (E_{Hh}) eredményét, továbbá 2 db (4*4*32 cm méretű) hasáb próbatesten mért **lineáris hőtágulási együttható** (α) mérési eredményeit. Az eredményekből létrehozható a három változó, **hőmérséklet függvénye: $\alpha(t)$; $\sigma_{Hh}(t)$; $E_{Hh}(t)$.**

Az előbbieket alapján számítható bármely +5°C alatti hőmérsékleten keletkező **termikus feszültség** (σ_T), ha **feltételezzük**

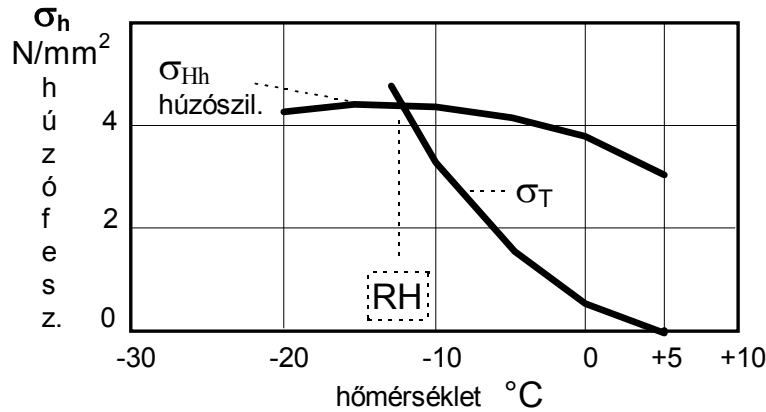
- az aszfaltréteg alakváltozásának teljes megakadályozását, és hogy
- +5°C-nál kezdődik a termikus feszültségek felhalmozódása, továbbá

- relaxáció egyáltalán nincs.

$$\sigma_T = \frac{1}{5 - (T)} \int_T^5 \alpha(t) dt \int_T^5 E_{Hh}(t) dt$$

ha $\rightarrow \Delta \sigma_T = \sigma_{HhT} - \sigma_T = 0$ akkor

T = RH = REPEDÉSI HŐMÉRSÉKLET



16. ábra

$$\alpha(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

$$E_H(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 \text{ ahol most } b_3 = 0$$

$$\sigma_{Hh}(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 \text{ - " - } c_3 = 0$$

A harmadfokú polinom határozott integrálja:

$$\int_T^{278} \alpha(t) dt = \left[a_0 t + a_1 \frac{t^2}{2} + a_2 \frac{t^3}{3} + a_3 \frac{t^4}{4} \right]$$

$$+ 5^\circ C = 278^\circ K \quad T \leq 278^\circ K$$

$$\int \alpha(278) = A \quad \int \alpha(T) = A_T$$

$$\int E_H(278) = B \quad \int E_H(T) = B_T$$

$$\sigma_T = \frac{1}{278 - (T)} \times (A - A_T) \times (B - B_T)$$

$$\sigma_{HhT} = \text{vagy} \square \sigma_T \text{ vizsgá lata}$$

A hőmérsékletek Kelvin fokban a negatív értékek elkerülésére. Számítógépi programmal fokozatos közelítéssel számítva:

Az aszfaltrétegek várható hideg-viselkedésének, téli repedés érzékenységének jellemzésére kiválóan megfelel a leírt RH vizsgálati módszer. A relaxációt is figyelembevevő módszer, - különösen ha a nagy szórású és ezért nagy próbatest szám igényű hasítás

vizsgálat helyettesíthető, - a természetes gyakorlati, aszfalt repedési hőmérsékleteket még jobban és nagyobb megbízhatósággal közelíti, de itt az utóbbi a lényegesebb.

Ha gyorsan és kis költség ráfordítással akarunk az aszfaltkeverék hidegviselkedésére vonatkozóan információt szerezni, akkor elég a **-20°C-ra** temperált Marshall-próbatesteken (legalább 6 db) elvégezni a hasításvizsgálatot. Ennek eredményeiből számítható a **fajlagos szakadónyúlás -20°C-on:**

$$\epsilon_{sz(-20)} = \frac{\sigma_{Hh} \left[\text{N} / \text{mm}^2 \right]}{E_{Hh} \left[\text{N} / \text{mm}^2 \right]}$$

A fajlagos szakadónyúlásnak a 10^5 szerez értékét használjuk és ha ez a szám >20 , akkor már az aszfaltkeverék hidegviselkedése jónak mondható.

Az aszfaltok téli várható hideg-viselkedésének megítéléséhez legalább a hasítás, vagy más húzó vizsgálat feltétlenül szükséges. Megbízhatóan, az e tekintetben leginkább nagy követelményű kopórétegeknél, azonban csak a repedési hőmérséklet meghatározásával lehet véleményt formálni.

Ha a rendkívül gyors lefolyású *hasításvizsgálatot*, egy *lassú húzó-vizsgálattal* (3.1.2. pont) *cseréljük ki*, akkor a modulus és húzószilárdság eredmények már az aszfalt relaxációs tulajdonságát is nagy mértékben magukban hordozzák és ennek megfelelően ezekkel az eredményekkel az előbbieket szerint számított repedési hőmérsékletet, már joggal nevezhetjük **relaxációs repedési hőmérsékletnek (RRH)**. Ha ugyanis kiszámítjuk a hasítás-vizsgálat gyorsaságának megfelelő lehülési sebességet (l.: 3.1. pont), akkor $30000 \text{ }^\circ\text{C} / \text{óra}$ abszurd értéket kapunk. A 3.1.2. pontban ismertetett készülékkel és módszerrel végrehajtott lassú húzóvizsgálatnak megfelelő $156 \text{ }^\circ\text{C}/\text{óra}$ lehülési sebességnek a 192-szerese a hasításvizsgálat sebessége. A hasításvizsgálat (3.1.3. pont) sebességét, a nyomóerő reakciót létrehozó előtolási sebességgel (előírt 50 mm/perc) csökkenthetjük legfeljebb a tizedrészére. Ennél kisebb sebességet a nyomógép nem tud megvalósítani, ugyanakkor a hosszú vizsgálati időtartam miatt már ilyen sebesség esetén is klímaszekrényben kellene a vizsgálatot végrehajtani.

Számított Relaxációs Repedési Hőmérséklet (SzRRH)

A 3.3. pontban leírt *relaxációs idő* és a *lassú tisztahúzás* vizsgálatokat legalább három alacsony hőmérsékleten ($-20, -10, 0 \text{ }^\circ\text{C}$) elvégzik, legalább 2-3 hasábpróbatesten (összesen 12-18 db próbatest) és az eredmények alapján számítják a hőmérséklet függvényeket: $t_{rel}(T)$; $\sigma_h(T)$; $E_{h0}(T)$. A számításhoz szükséges még a 3.2. szerint végrehajtott lineáris hőtágulási együttható vizsgálatának (2 hasáb-próbatest) eredménye: $\alpha(T)$ hőmérséklet függvénye is. A négy aszfalt jellemző hőmérsékletfüggvénye és az előírt lehülési sebesség alapján hőfok vagy perc lépésenként számítható az adott (T) hőmérsékleten létrejövő σ_T termikus feszültség az ARAND féle képlet és eljárás szerint:

$$\sigma_T = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{t}{t_{rel}(T)}} - E(T) \cdot \alpha(T) \cdot \dot{T} \cdot t_{rel}(T) \left\{ 1 - e^{-\frac{t}{t_{rel}(T)}} \right\} \text{ és ahol } \sigma_T = \sigma_h(T), \text{ azt a}$$

hőmérsékletet nevezhetjük a vizsgált aszfalt (SzRRH) *számított relaxációs repedési hőmérsékletének*.

Ezeket a vizsgálatokat a BME Útépítési Laboratóriumban 2001-ben kezdtük el az Állami Közúti Műszaki és Információs Közhasznú Társaság (ÁKMI Kht.) által finanszírozott kutatás keretében.

4. Az aszfalt fáradási jellemzőinek laboratóriumi vizsgálatai

Az útpályaszerkezetben lévő aszfaltréteget az elhelyezkedésének megfelelően főként nyomó- és hajlító-feszültségek veszik igénybe. A kerék alatti kopórétegben radiális hajlító-nyomófeszültségek, ugyanakkor a függőleges tengelyben alul az alaprétegben radiális hajlító-húzófeszültségek lépnek fel. A kerék alatti behajlási medence peremén is radiális hajlító-húzófeszültségek keletkeznek a kopórétegben, de a kerék alatti értékek legfeljebb csak 20-25 %-a (l.: 1. ábra). A keréknyomban lévő kopóréteg tehát váltakozva kap 100 % hajlító-nyomó- és 20 % hajlító-húzófeszültséget. Az alaprétegben pedig 100 % - 0 hajlító-húzófeszültségek váltakoznak. Természetesen az erőjáték a pályaszerkezetben, a függőleges nyíróerők és a réteggel párhuzamos fékezési vagy termikus normál és nyíróerők miatt sokkal bonyolultabb.

Ebben a fejezetben azonban *főként a hajlítási igénybevétellel* illetve annak laboratóriumban létrehozható közelítő szimulációival foglalkozunk, bár kétségtelen hogy a végtelen féltérnek tekinthető pályaszerkezeti rétegekben lejátszódó feszültségállapotok a *laboratóriumban legközelebbben dinamikus triaxiális vizsgálattal szimulálhatók*, azonban ez a vizsgálati típus rendkívül drága bonyolult vizsgáló berendezést igényel, túlságosan körülményes a vizsgálatok végrehajtása is, minek következtében reménytelen az aszfaltkeverék tervezési és minősítő vizsgálatokhoz való bevezetése. Természetesen az előbbi megállapításunkat a BME Útlaborban a 80-as években elvégzett triaxiális aszfaltvizsgálatokból nyert tapasztalatokra és a szakirodalomra alapozzuk. Az 5. fejezetben a különleges aszfaltvizsgálatok sorában a *triaxiális vizsgálattal is foglalkozunk*.

A *fárasztás ismétlődő nyomófeszültségekkel*, tulajdonképpen a *dinamikus egytengelyű nyomás*, vagy másképpen kúszás vizsgálat, amit a 2.4. és 2.5. pontban az aszfalt melegviselkedésének vizsgálatai körében tárgyaltunk.

Természetesen az útpályaszerkezet teherbírásának elégtelenségéből, kimerüléséből származó "burkolatdeformáció" következményeként a kopórétegen megjelenő "aligátorbőr" szerű (ma mozaik repedezettségnek nevezett) repedések, mint burkolathibák már fél évszázaddal ezelőtt is ismertek voltak. Ezeket a hibákat azonban kifejezetten a helyi burkolatalap, illetve az altalaj teherbírásának csökkenésére, elégtelenségére hárították. Ez akkor teljesen helyénvaló is volt, hiszen a mai forgalmi terheléshez viszonyítottnan, az akkori forgalmi terhelés (főként kerékterhelés tekintetében) számításba sem vehető, ennek ellenére idézhetem a következő mondatot Ferenczy G.: *Aszfaltburkolatok* című könyvéből *"Igen gyakoriak például azok az elágazó repedések, amelyek a burkolat kötőanyagának öregedése és a burkolatot érő ismétlődő fárasztás jellegű igénybevételek hatására keletkeznek."* Ez a mondat már jelzi, hogy felismerték az aszfaltanyag ismétlődő igénybevételből származó fáradási tönkremenetelét és annak egyik lehetséges okát is jelezték. Ilyen irányú aszfaltvizsgálatok azonban akkor még nem folytak.

Az első fárasztó aszfaltvizsgálatokat az USA-ban és Nyugat-Európában a 60-as évek végén kezdték el a kutató intézetekben. Egy évtizeddel később már Kelet-Európában is széles körben folytak az ilyen irányú kutatások. *1978-ban a BME Útlaborban*, a magdeburgi kutató intézetben **Guericke** által kifejlesztett *mechanikus kétirányú hajlító fárasztó géppel* kezdtük el a fárasztás vizsgálatokat (Fi I.).

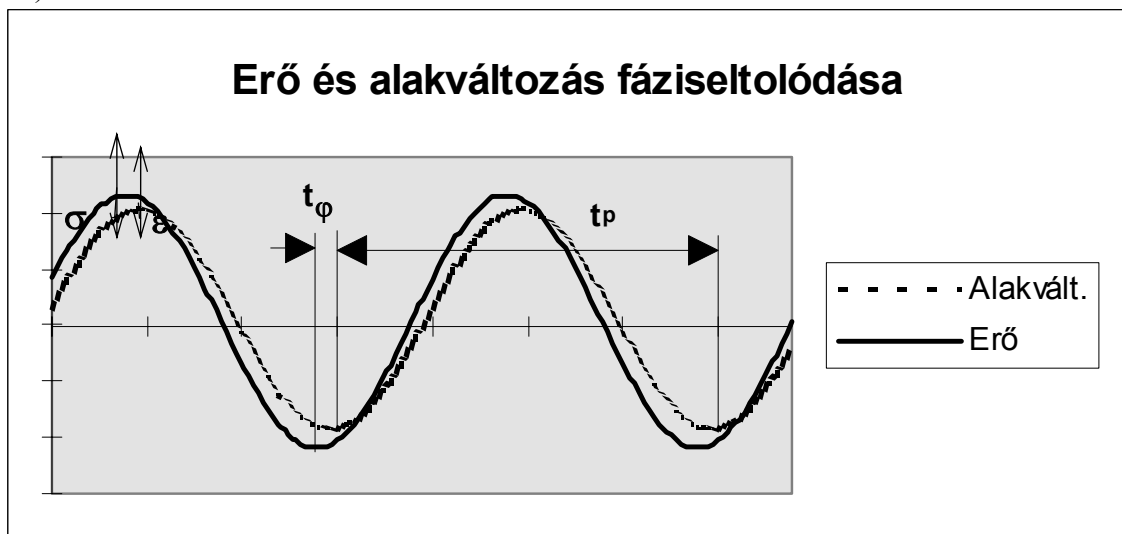
Az aszfalt tehát fárasztható ismétlődő nyomófeszültségekkel (pl.: dinamikus egytengelyű nyomás, 2.4. és 2.5. pont), húzófeszültségekkel (pl.: dinamikus hasításvizsgálat, 4.2.2. pont), hajlító húzó-nyomó-feszültségekkel (pl.: dinamikus egyirányú hajlítás, 4.2.1. pont), váltakozó hajlító húzó-nyomó-feszültségekkel (pl.: dinamikus kétirányú hajlítóvizsgálat, 4.1. pont).

4.1. Dinamikus kétirányú hajlító fárasztóvizsgálat

A kopóréteget érő váltakozó irányú hajlító igénybevétel készítette a kutató laboratóriumokat arra, hogy kialakítsák a **dinamikus kétirányú hajlító, fárasztó-vizsgálatot**. A vizsgálat statikai kialakítása rendszerint kéttámaszú tartó, két támadáspontú hajlítóerővel. A téglá vagy hasáb formájú próbatest megfogása kétoldali (alul-felül), hogy a váltakozó irányú hajlítás megvalósítható legyen. A két támadáspont azért szükséges és általában alkalmazott, hogy a maximális nyomaték a próbatest több keresztmetszetét (minél nagyobb részét) terhelje, csökkentve így a próbatest inhomogenitásából származható hibát.

Más megoldás, hogy a prizma próbatestet egyik végén befogva konzolosan, a próbatest másik végén támadó erővel hajlítják váltakozó irányban.

A dinamikus fárasztás vizsgálatoknak közös jellemzője, hogy a terhelést mindig fázis késéssel követi a következmény, vagy is például az erő terhelés hatására létrejövő megfelelő alakváltozás egy bizonyos t_φ idővel eltolva (fázis késéssel) következik be (17. ábra).



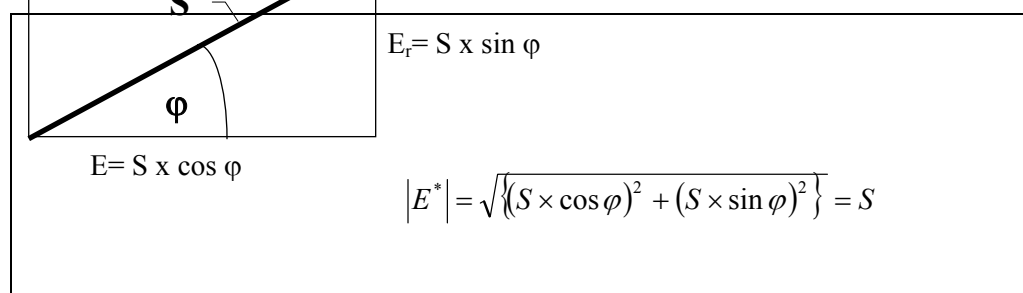
17. ábra

Ez a jelenség természetesen csak viszkoelasztikus, illetve képlékeny terhelési állapotban lévő anyagoknál mutatkozik. A levezetést itt mellőzve:

$$\varphi^\circ = 360^\circ \times \frac{t_\varphi}{t_p} \quad \text{M} \quad \varphi_{\text{rad}} = 2\pi \frac{t_\varphi}{t_p} \quad \text{M} \quad t_\varphi : \text{fáziskésési idő} \quad \text{M} \quad t_p : \text{periódusidő}$$

$$f = \frac{1}{t_p} \quad \text{frekvencia} \quad \text{M} \quad S = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} \quad \left[\text{N/mm}^2 \right] \quad \text{a merevségi modulus}$$

A komplex modulus abszolút értéke a merevségi modulus.



A hőmérséklettől függően változik az *aszfalt viszkozus / rugalmas aránya*, ezen arány kifejezője tulajdonképpen a *fázisszög* változatlan terhelési frekvencia mellett. A

terhelési sebességtől, - ami a terhelési frekvenciával fejezhető ki, - szintén nagymértékben függ a fázisszög nagysága, hiszen minél nagyobb a terhelési sebesség, az aszfalt viszkózus elemének egyre kevesebb ideje van érvényesülni, így a frekvencia növelésével a fázisszög csökkenthető. A fázisszög a fárasztás kezdetén kb. 15 %-al nagyobb, mint a középső szakaszban, és az anyag elfáradását az is jelzi, hogy akkor a fázisszög ismét elkezd növekedni. Például egy AB-12 típusú aszfalt sin 4 Hz frekvenciával, +5°C-on hajlítással fárasztva kezdetben $\varphi=30-35^\circ$, mely később $\varphi=25-30^\circ$ -ra csökken, és ezt a fázisszöget tartja közelítően a tönkremenetel kezdetéig, vagyis a kezdeti merevség S_0 rohamos csökkenéséig.

4.1.1. Guericke kétirányú hajlító fárasztóvizsgálat

Az 1978-ban NDK-ból beszerzett két berendezés klímazekrénybe volt elhelyezhető. A fárasztható aszfaltpróbatest hasáb formájú, **40 * 40 * 320** mm méretű. A próbatesteket vibrációs módszerrel tömörítettük az aszfaltkeverék előzőleg meghatározott Marshall testsűrűségére (s_{aM}). A változó irányú hajlítás 300 mm támaszközön, középen egymástól 80 mm távolságra lévő támadásponttal függőleges kényszer alakváltozással valósul meg. A hajlító szerkezet változtatható (eltolható) alátámasztású mérlegkar, melynek egyik vége villamos motorral hajtott excenterre fekszik (rugóerő feszíti rá), másik vége csuklókkal és fém rudazattal a kar alátámasztási helyével beállított behajlásra kényszeríti az aszfaltpróbatestet. A próbatestre előzetesen fém kengyeleket (4 x 2 = 8 db) ragasztanak és a próbatest a vizsgálat folyamán ezeken keresztül kapcsolódik a hajlító szerkezethez. Az állandó fordulatszámú motor 4 Hz frekvenciával ismétli a beállított behajlás terhelést.

A kívánt behajlás beállítását próbatest nélkül hajtják végre, amikor a próbatest fárasztása elkezdődik, a próbatest hajlítással szemben fellépő reakcióereje a legnagyobb, így a behajlás ilyenkor a beállított nagyságnak csak 20-30 %-a, a többi rész elnyelődik a mechanikus szerkezetben keletkező erők okozta alakváltozásban. A vizsgálat folyamán a próbatest hajlítással szembeni reakcióereje csökken és így a behajlás egyre növekszik. Gyakorlatilag akkor érheti el a beállított mértéket, mikor a próbatest eltörik, vagyis reakcióerő nincs. Mivel a vizsgálat folyamán mindkét paraméter (erő és behajlás) változik az aszfalt valódi fáradási (Wöhler) függvénye nem határozható meg ezzel a vizsgálattal.

A beállított behajlás az u.n. Bitumen Vizsgáló Aszfalt vizsgálatoknál $f_{max}=\pm 0,2$ mm, a vizsgálati hőmérséklet +5°C.

A vizsgálat folyamán időközönként (legalább hétszer) regisztrálják a behajlás amplitúdókat (f_{max}) és a maximális reakcióerőt (F_{max}). Ezek alapján a leolvasásnál rögzített periódusszámhoz (n ismétlésiszámhoz) számítható az aszfalt merevségi modulusa:

$$\sigma_{max} = 5,156 \times F_{max} \quad [\text{N} / \text{mm}^2]$$

$$\varepsilon_{max} = 0,002165 \times f_{max}$$

$$S_n = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_{max}} \quad [\text{N} / \text{mm}^2]$$

Az $n - S$ értékpárokra rajzolható görbe (l.: 19. ábra) alapján meghatározható, hogy a kezdeti aszfaltmerevség (S_0) milyen ismétlési számnál csökken a felére, $S_0/2$ értékre. Ezt az ismétlésiszámot ($N_{S0/2}$) nevezzük a *fáradási vagy tönkremeneteli ismétlésiszám*-nak.

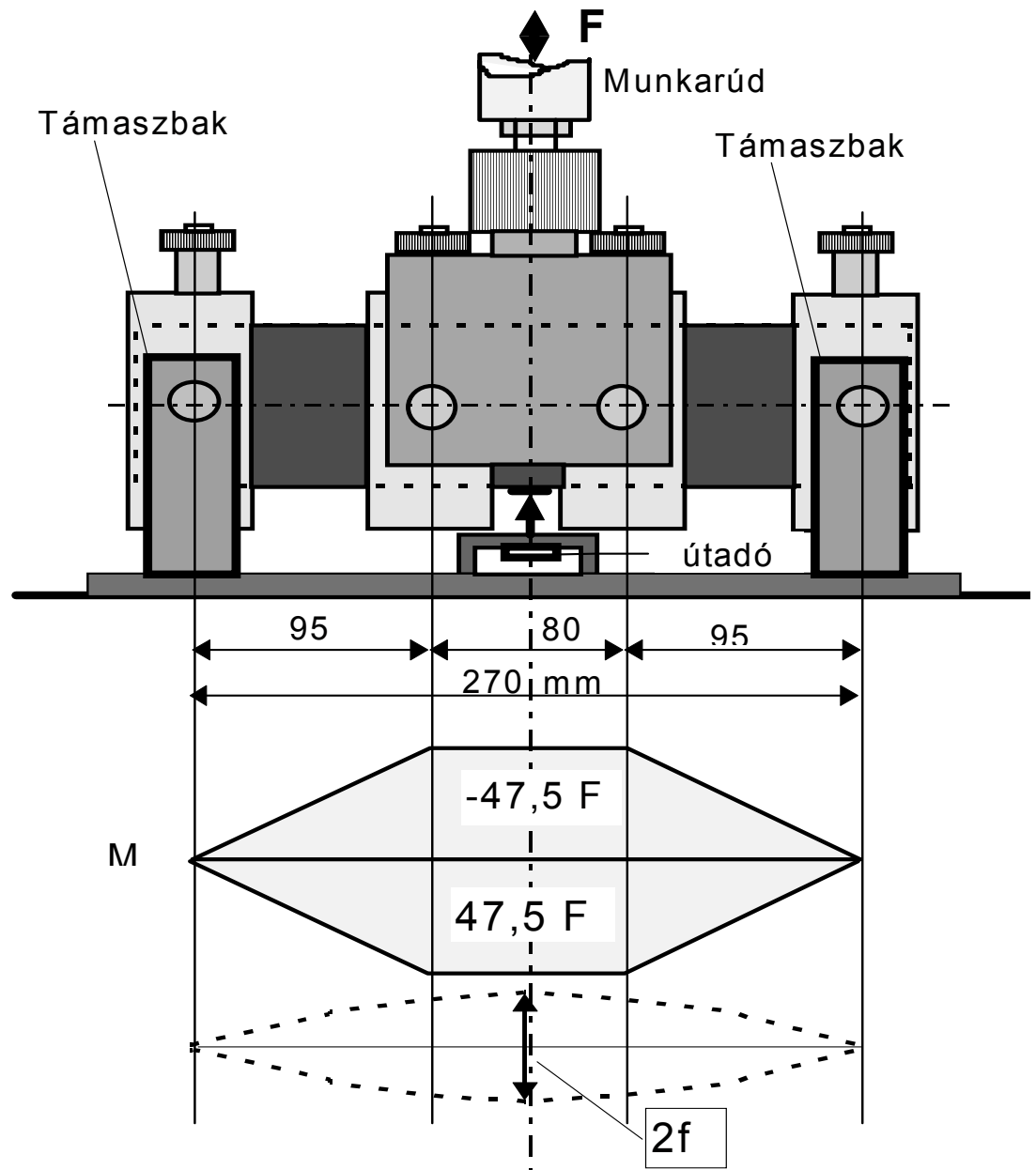
4.1.2. Dinamikus kétirányú hajlító fárasztó vizsgálat, erő vagy behajlás vezérléssel

A BME Útlaboratóriumban 1982-ben készült el az MTS-ÚT fárasztóberendezés és először 1983-ban alakítottunk ki (Török K.) egy kétirányú hajlítóberendezést és vizsgálati módszert, majd ennek korszerűsített változata 1991-ben készült el.

A vizsgálati módszerben alkalmazott téglá formájú **próbatest mérete: 80*50*300 mm**. A próbatestet a megfelelő méretű formában vibrációs tömörítéssel állítjuk

elő, oly módon hogy testsűrűsége közel azonos legyen az ugyanazon aszfaltanyagból készített Marshall-próbatest s_{aM} sűrűségével.

A vizsgáló készülék geometriája és a nyomatóéki ábra (a maximális nyomatóékkal) a 18. ábrán látható. A készülék bármilyen elektro-hidraulikus pulzátorhoz alkalmazható.



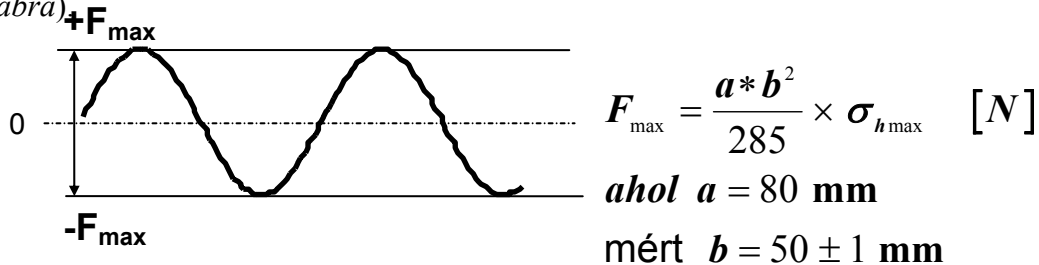
18. ábra

Természetesen a vizsgálati módszer egyéb körülményeit, a vizsgálati hőmérsékletet és a munkarúd függőleges irányú megvezetését, az erő vagy behajlás terhelés szinusz függvény szerinti vezérlését is biztosítani kell.

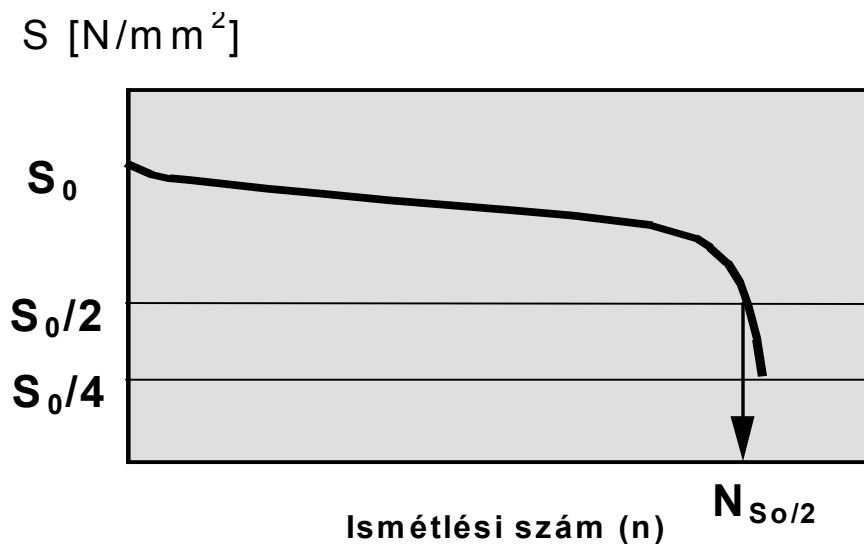
A BME Útlaborban bevezetett vizsgálat erővezérléses, az alkalmazott **10°C vizsgálati hőmérsékletet** az 1.3. fejezetben kellő részletességgel megindokoltuk. Az **ismétlési frekvencia 10 Hz** a RILEM körvizsgálat során megismert általánosan alkalmazott érték, mely a gyakorlatban a többtengelyű nehéz teherjárművek által okozott terhelési ritmusnak megfelel és kíméli a berendezést, ugyanakkor óránként 36000 terhelés ismétlés hozható létre.

A fárasztás vizsgálatnál vezérelhetünk állandó behajlást (ekkor a próbatest reakcióerő csökken), vagy állandó erő maximumot (ekkor a behajlás növekszik), tehát mindkét esetben a $S = \sigma / \varepsilon$ hányados, vagyis az aszfalt merevség csökken (lásd a 19. ábrát).

Laboratóriumunkban kialakított vizsgálati módszerben az erő vezérlést alkalmazzuk, mert az útpályaszerkezetet, a járműforgalom ismétlődő kerékterhelése is függőleges hajlító-erővel veszi igénybe. A maradó alakváltozást létre nem hozó **kétirányú hajlítófárasztásnál a fárasztott próbatest tönkremenési (fáradási) ismétlési számának azt tekintjük, amikor a kezdeti aszfalt hajlító merevség (S_0) a felére csökken (19. ábra).**



$\sigma_{h \max}$ [N/mm²]: választható és beállítható, a próbatest alsó-felső síkjában a feszültség maximum a vizsgálat folyamán



19. ábra

$$\sigma_{h \max} = 285 \frac{F_{\max}}{a \times b^2} \quad [N / mm^2]$$

$$\varepsilon_{h \max} = 0,065725 \times f_{\max} \times b \quad [\% o]$$

$$S = 1000 \times \frac{\sigma_{h \max}}{\varepsilon_{h \max}} \quad [N / mm^2] \quad \text{aszfalt merevség}$$

A *dinamikus kétirányú hajlítás vizsgálat*al meg határo zott S_0 aszfalt merevség, mint a réteg anyagának fő jellemzője, képezi alapját a különböző útpályaszerkezet méretezési eljárásoknak.

4.2. Dinamikus egyirányú fárasztóvizsgálatok

Az egyirányú terhelés ismétlésű vizsgálatoknak közös tulajdonsága, a próbatestben keletkező feszültségek irányában és értelmében létrejövő maradó alakváltozás, vagyis az ismétlődő húzófeszültségnek megfelel a maradó megnyúlás, az ismétlődő nyomófeszültségnek megfelel a maradó összenyomódás. Ebből következően az ismétlődő egyirányú hajlításkor a hajlítás irányában a próbatest alsó szálában maradó megnyúlás, a felső szálában maradó összenyomódás jön létre és ennek gyakorlati következménye a maradó behajlás. Ennek a maradó alakváltozásnak az ismétlésszámmal kapcsolatos függvényét (görbét) a 2.4. pont 5. ábrán a dinamikus kúszásvizsgálatnál már megismertük. Erre a görbére nagyon jó közelítő függvény a harmadfokú polinom, melynek inflexiós pontja tekinthető a próbatest tönkremeneteli pontjának.

A rendelkezésre álló legalább 15 db $X = n$ és $Y = \varepsilon$ értékpárra harmadfokú regressziós polinomot illesztnek:

$$Y_R = \varepsilon \% = a_0 + a_1 n + a_2 n^2 + a_3 n^3$$

ha **egy előírt** (általában 3 óra időtartamnak megfelelő) ismétlési számig nincs inflexió, akkor

$$Y_R = \varepsilon \% = a \cdot N^b$$

regressziós hatványfüggvényt illesztik,

úgy, hogy minden n_i értékre a függő változó hiba négyzetének

összegeztett a $\sum \Delta Y_i^2$ minimum legyen, ahol $\Delta Y_i = Y_i - Y_{Ri}$.

A harmadfokú regressziós polinomból meghatározható:

ε_i és N_i : a görbe számított inflexiós pontja, amelynél a próbatest tönkremenetele kezdődött; meghatározása:

a polinomból:

$$N_i = a_2 / 3a_3$$

a hatványfüggvény esetén: $N_i =$ az előírt ismétlési szám

$\varepsilon_i = f(N_i)$: a polinom függvény értéke N_i behelyettesítéssel

$d\varepsilon_i / dN_i$: a görbe érintőjének meredeksége az inflexiós pontban, a tönkremenetel sebességének jellemzője; meghatározása:

polinomból: $d\varepsilon_i / dN_i = a_1 + 2a_2 N_i + 3a_3 N_i^2$

hatványfüggvényből: $d\varepsilon_i / dN_i = a \cdot b \cdot N_i^{(b-1)}$

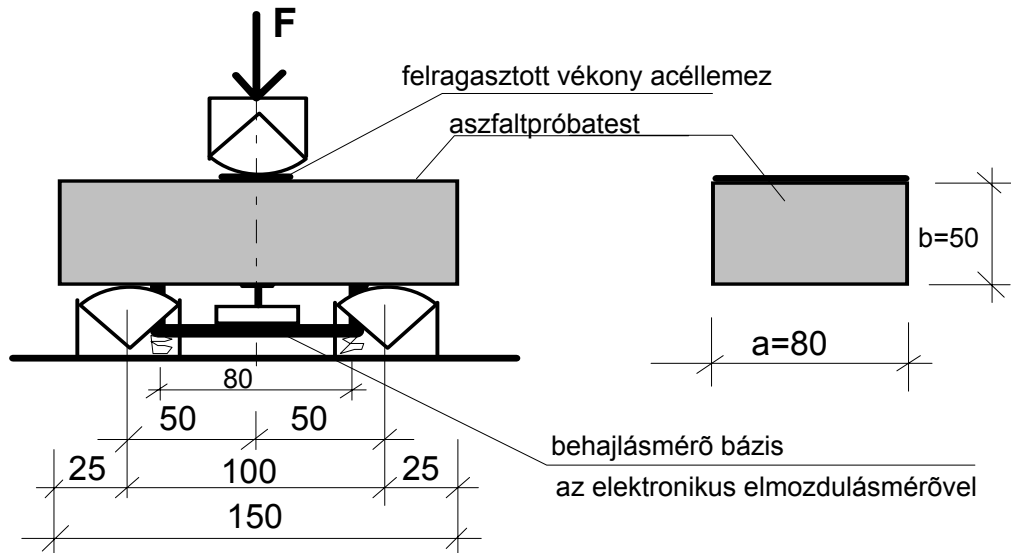
Ha a rugalmas (egy perióduson belüli) alakváltozást is rögzítik legalább a vizsgálat kezdetén, akkor annak számítható a fajlagos értéke: ε_{r0} és az azt létrehozó feszültség ismeretében σ_{max} számítható a kezdeti rugalmas modulus: $E_{r0} = \sigma_{max} / \varepsilon_{r0}$ [N/mm²].

4.2.1. Dinamikus egyirányú hajlítás vizsgálat

A 150 mm átmérőjű fűrt magmintákból készített próbatestek hajlító fárasztó vizsgálatára több laboratóriumban (pl.: Paulman prof. Darmstadt-ban) kialakították a **dinamikus egyirányú hajlító fárasztó vizsgálatot**. A vizsgálat egyik előnye a kisebb próbatest (nálunk a kétirányú hajlító-vizsgálatnál alkalmazott 30 cm hosszúságú próbatestet ketté vágva, abból két darab 15 cm hosszú próbatest kerülhet ilyen vizsgálatra), másik előny a hajlító készülék egyszerűbb kivitele és a próbatest könnyű behelyezése. A vizsgálat előnyösen alkalmazható a burkolatból kivett minták és az aszfalt alsó alaprétegek hajlító-fárasztási jellemzőinek összehasonlító meghatározására. Itt is lehetséges az állandó behajlás és az állandó hajlítóerő vezérlés is, továbbá a többféle terheléssel fárasztott azonos anyagú próbatestek törési eredményeire szintén fáradási Wöhler-függvény illeszthető.

A BME Útlaborban 1991-ben kialakított (Török K.) dinamikus egyirányú hajlításvizsgálat próbatestjének mérete és hajlítási geometriája a 20. ábrán látható. A behajlás mérését, egy a próbatestre alulról rugóval feltámasztott 80 mm fesztávú mérőbázisról végzik, a támaszokon létrejövő benyomódás kiküszöbölése érdekében.

A vizsgálat előkészítéseként a középső erőátadási keresztmetszetben a próbatest felsőlapjára, az aszfaltra 15x80x1,5 mm méretű acélemezt, az alsó lap közepére egy 10x10x1 mm üveglapkát kell ragasztani, ez egyrészt a koncentrált nyomóerő átadásához, másrészt a behajlásmérő korrekt érintkezéséhez szükséges. Az aszfaltréteg átlagos vastagságát (b), átlagos szélességét (a) meg kell határozni.



20. ábra

A vizsgálathoz az F_{max} értéke a beálljtandó maximális hajlító-húzó-nyomó feszültség és a próbatest, illetve a hajlítás geometriai adatai alapján számítható:

$$F_{max} = \sigma_{max} \times \frac{a \times b^2}{150} \text{ [N]}, \quad \epsilon_{hny} = 0,8523 \times b \times f_{80} \text{ [‰]}$$

$$E_{rhny} = 176000 \times \frac{F_{max}}{a \times b^3 \times f_{80}} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

σ_{max} [N/mm²]: a változatlan maximális húzó-nyomó feszültség

a [mm]: a próbatest átlagos szélessége; b [mm]: a próbatest átlagos vastagsága

ϵ_{hny} [‰]: fajlagos maradó alakváltozás a szélső szálakban,

f_{80} [mm]: a 80 mm fesztávú bázison mért maradó behajlás, f_{r80} [mm]: a rugalmas beh.,

E_{rhny} [N/mm²]: a rugalmas modulus; E_{rhny0} [N/mm²]: a kezdeti rugalmas modulus

$F_{max} = \sigma_{max} \times b^2 / 1875$ [kN]; ha $a = 80$ mm,

$F_{min} = 100$ N mindíg.

$\sigma_{max} = 2 - 10$ [N/mm²], a vizsgálati hőmérséklettől függően, amelyet legfeljebb +20°C értékűre ajánlott választani.

A vizsgálat végrehajtásakor az erő **szinusz** szerint vezérelve, **4 Hz** frekvenciával. A hajlító fárasztás során a középső behajlást, az elektronikus elmozdulás-mérővel folyamatosan mérik és regisztrálják. A mért behajlás f_{80} alapján számítva az alsó-felső szélsőszál fajlagos megnyúlását-összenyomódását felrajzolható az egyirányú fárasztó vizsgálatokra általánosan jellemző $n - \epsilon_{hny}$ [‰] görbe és a felvett értékpárokra számítható

a harmadfokú regressziós polinom és annak alapján a fárasztás vizsgálati eredményei (4.2. pont szerint) meghatározhatók.

4.2.2. Dinamikus hasító fárasztóvizsgálat

Az aszfaltpróbatestek hasításvizsgálatára 1978-ban kialakított készülék alkalmas volt a hasító fárasztó vizsgálatok végrehajtására is, így az elkészült MTS-ÚT fárasztó berendezésen az első fárasztás vizsgálatok 1982-ben hasító fárasztások voltak. Valószínűleg az első dinamikus aszfalt hasító-fárasztásvizsgálatokat a 70-es évek közepén az amerikai *T.W.Kennedy* végezte és az *Asphalt Paving Technology 1977.* évi kiadványában ismertette.

A dinamikus hasításvizsgálatokat a vizsgált aszfaltkeverék azonos vizsgálati hőmérsékleten meghatározott hasító-húzószilárdsága 20-30 %-ának megfelelő hasító-húzófeszültséggel végzik, vagyis az alkalmazott maximális húzófeszültség pl.: $\sigma_{Hmax} = 0,2 \times \sigma_{Hh} \text{ [N/mm}^2\text{]} + 5^\circ\text{C-on}$. A dinamikus hasításvizsgálatoknál tehát ismétlődő valamilyen függvény szerint változó húzófeszültséggel fárasztják a hengeres aszfaltpróbatestet. A 3.1.2. pontban a hasításvizsgálatnál ismertettük a vizsgálati kapcsolatos elméleti feszültségeloszlást, az alakváltozást. A választott σ_{Hmax} fárasztó húzófeszültségnek megfelelő maximális nyomóerő $F_{Hmax} = \frac{\pi}{2} \times d \times h \times \sigma_{Hmax} \text{ [N]}$

d [mm]: próbatest átmérő; h [mm]: a próbatest hossza.

Nyilvánvalóan a húzófeszültségek irányában, a próbatest vízszintes tengelyének alakváltozását (növekedését) mérjük és regisztráljuk folyamatosan most is, és a fajlagos ezrelékes értékét számoljuk: $\epsilon_{Hmaradó} = 1000 \times \Delta d_x / d_x \text{ [\%]}$.

Az egyirányú vizsgálatoknál szokásos $n - \epsilon_{Hmaradó}$ görbét regisztráljuk, és annak alapján meghatározhatók 4.2. pontban leírt vizsgálati eredmények.

4.3. Az aszfaltkeverék fáradási (Wöhler) függvényének meghatározása

Minden sokszor ismétlődő terheléssel végzett vizsgálati megfigyeléssel meghatározható az aszfaltkeverék terhelésnek megfelelő fáradási függvénye. Az ismétlődő terhelés, mint láttuk lehet nyomó-, húzó-, hajlítófeszültség, és összenyomódás, megnyúlás kényszer alakváltozás.

A Wöhler-féle fáradási függvény (logaritmizálva egyenes):

$$\text{Terhelés} = a \times N^b \quad \log(\text{Terhelés}) = \log a + b \times \log N$$

N : az adott **Terhelés**-nél a tönkremeneteli ismétlési szám; a és b együtthatók.

Az a és b együtthatók több terhelési fokozattal, több próbatest vizsgálatával végrehajtott vizsgálati sorozat eredményeként kapott **Terhelés** - N értékpárok alapján meghatározhatók.

Vizsgálataink szerint, egy aszfaltkeverék fáradási (Wöhler) függvényének meghatározásához legalább 7 próbatest sikeres (törésig vitt) fárasztás vizsgálata szükséges oly módon megválasztva a terheléseket, hogy legalább 2, de ha lehet 3 vizsgálat nagy terheléssel 20 - 40 perc fárasztási idővel és ugyanennyi vizsgálat kis terheléssel 3 - 5 óra fárasztási idővel kerüljön végrehajtásra. Ebben az esetben a 7 db **Terhelés** - N értékpárra *elfogadható megbízhatósággal meghatározható a regressziós fáradási függvény (20. ábra).*

A BME Útlaborban végzett (és leírt) fárasztásvizsgálatoknál a terhelés mindig valamilyen feszültség, ezért a továbbiakban a **Terhelés** helyett a σ feszültség jelet használjuk.

AZ ASZFALT FÁRADÁSI (WÖHLER) FÜGGVÉNY MEGHATÁROZÁSA

$$\sigma = a \times N^b \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

$$\log \sigma = \log a + b \times \log N$$

$$\log a = M_{\log \sigma} - b \times M_{\log N}$$

$$b = \frac{\sum (\log \sigma \times \log N) - n \times M_{\log \sigma} \times M_{\log N}}{\sum (\log N)^2 - n \times M_{\log N}^2}$$

ahol **log a** és **b** a regressziós egyenes együtthatói,

n : értékpárok (**σ - N**), értékelhető vizsgálatok száma,

M_{log σ} : **a log σ** értékek átlaga

M_{log N} : **a log N** értékek átlaga

$$\log \sigma_{Ri} = \log a + b \times \log N_i$$

$$\log z_i = \log \sigma_i - \log \sigma_{Ri} \quad \text{rezidium}$$

$$\bar{S}_{\log \sigma, \log N} = \sqrt{\frac{\sum_i (\log z_i)^2}{n - 2}} \quad \text{a log } \sigma_i \text{ értékek szórása a regressziós egyenes körül}$$

Korrelációs együttható:

$$r_{\log \sigma, \log N} = \frac{S_{\log \sigma_R}}{S_{\log \sigma}} \quad S_y = \sqrt{\left(\frac{\sum_i y_i^2}{n} - M_y^2 \right)}$$

$$S_{\log \sigma_R} \Rightarrow S_{\log \sigma} \Rightarrow S_{\log N} \quad \text{a } S_y \text{ szórások}$$

A regressziós együtthatók szórása:

$$s_b = \frac{\overline{S}_{\log \sigma, \log N}}{s_{\log N} \times \sqrt{n}} \quad \mathbf{b \ szórása}$$

$$s_{\log a} = \frac{\overline{S}_{\log \sigma, \log N}}{\sqrt{n}}$$

$$a = 10^{\log a} \quad s_a = 10^{s_{\log a}} \quad \mathbf{\log a \ szórása}$$

Az *egymilliószor ismételtető terhelőfeszültség* és hibakorlátjának számítása az aszfalt fáradási függvénye és az együtthatók szórása alapján:

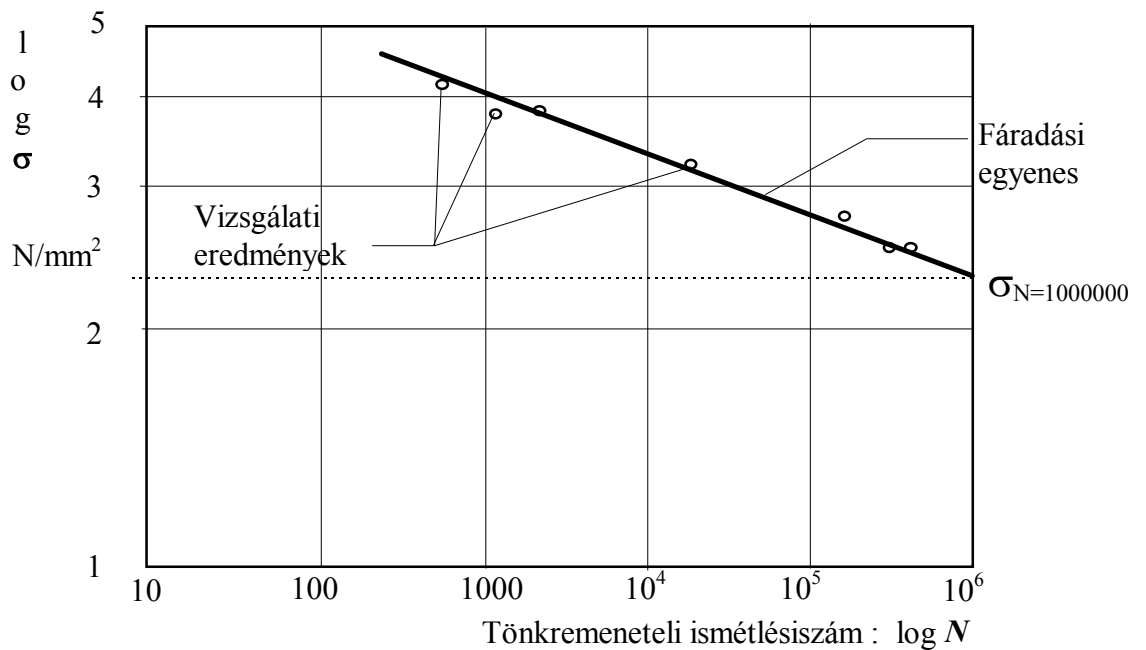
$$\sigma_{N=10^6} = a * 10^{6*b} :$$

$$\sigma_{N=10^6} \min = \left(a - St \ 95 \%_{n-1} \frac{s_a}{\sqrt{n}} \right) \times 10^{6*b_{\min}}$$

$$\sigma_{N=10^6} \max = \left(a + St \ 95 \%_{n-1} \frac{s_a}{\sqrt{n}} \right) \times 10^{6*b_{\max}}$$

$$b_{\min}^{\max} = b \pm St \ 95 \%_{n-1} \frac{s_b}{\sqrt{n}}$$

$St95\%_{n-1}$: Student t_0 kétoldali 95 %-os megbízhatósági szintre, $n - 1$ szabadság fokkal (pl.: $n=7$; $t_0 = 2,447$).



21. ábra

5. Egyéb különleges aszfaltvizsgálatok a BME Útlaborban

Ezen laboratóriumi vizsgálatok nem sorolhatók az aszfaltkeverékek mechanikai tulajdonságait feltáró vizsgálatok közé, ugyanakkor a legutóbbi másfél évtizedben, - rendszerint az útépítésben alkalmazott új építőanyagok megjelenése által született igény miatt, - szükségessé vált a kialakításuk. Nem sorolható ide az aszfaltkeverék **Arand-féle tömöríthetőségi állandó vizsgálat**a, de az u.n. **BVA vizsgálati rendszer** kialakítását a 80-as évek első felében főként a modifikált bitumenek megjelenése indukálta. Ugyanezen időszakban végeztünk kutatást, diploma munkákat az **aszfalt triaxiális vizsgálat**aival, de ezt a vizsgálatot a gyakorlati aszfaltmechanikai vizsgálatok közé nem lehetett beilleszteni.

A 70-es évek végén kezdődött, a bitumenes lemezt felváltó új hídszigetelési (hazai és külföldi) rendszerek alkalmazása, melyek néhány balul sikerült példája inspirálta a betonpályalemezű hidak szigetelési előírásának a létrehozását a 80-as évek első felében és egy évtizeddel később a **rétegek közötti elcsúszás laboratóriumi vizsgálat**, továbbá az acél pályalemezre fektetett **szigetelési rendszer fűrésztás vizsgálat**ának kialakítását. A 90-es évek közepén megjelentek a modifikált bitumen emulziós kevert felületi bevonatok (KFB), ezek élettartamának, leginkább a felülethez való letapadásuk a meghatározója ezért kialakítottuk 1998-ban a burkolatból fűrt magminták **réteg felszakító laboratóriumi vizsgálat**át.

5.1. Az aszfaltkeverékek tömöríthetőségének vizsgálata

Az aszfaltkeverékek tömöríthetőségének ismerete a beépítésnél szükséges tömörítési munkára és a keverék belső sűrűdésére, kohéziójára vonatkozóan nyújt információt. A vizsgálatok eredményeinek több felhasználási lehetősége és módszere van, de ezek ismertetése nem tartozik ebbe a témakörbe.

5.1.1. Az aszfaltkeverék ARAND-féle tömöríthetőségi állandójának meghatározása

Az aszfaltkeverék tömöríthetőségének jellemzésére 1974-ben Arand dolgozott ki laboratóriumi eljárást és ennek számítógépes modernizált változatára később az NSZK-ban egységesített irányelvet adtak ki. Az eredeti eljárás szerint 6 féle tömörítő munkával (ütésszámmal) készítettek 3-3 db (összesen tehát =18 db) próbatestet Marshall formában. Az $A_{\text{ütésszám}} - s_A$ összetartozó értékpárok (pontok) az aszfaltkeverék tömörödési jelleggörbéjét szolgáltatják. A tömörítési görbe függvénye levezetés nélkül:

$$s_A = s_{\max} - (s_{\max} - s_0) \times \exp\left(-\frac{A}{C}\right) \quad \text{M} s_A = a - b \times \exp\left(-\frac{A}{C}\right) \quad [\text{g/cm}^3]$$

A : az ütésszámmal (2x30 esetén $A=60$) jellemzett Marshall-tömörítő munka,

s_A : az A tömörítéssel létrehozott próbatestek geometriai testsűrűsége $[\text{g/cm}^3]$,

s_0 : a próbatestek kezdeti geometriai testsűrűsége (elméleti érték),

s_{\max} : a próbatestek maximális testsűrűsége, nem azonos az s_{a0} sűrűséggel (elméleti),

$a = s_{\max}$ és $b = s_{\max} - s_0$ $[\text{g/cm}^3]$,

C : **tömörítési ellenállás**, mely igen jól jellemzi az aszfaltkeverék tömöríthetőségi tulajdonságait, melynek felhasználásával az aszfaltréteg beépítési tömörítését tervezhetik.

Nagyon könnyen tömörödő keveréknél: $C = 7 - 10$

Jól tömörödő keveréknél: $C = 11 - 20$

Nehezen tömörödő keveréknél: $C = 21 - 30$

Nagyon nehezen tömöríthető keveréknél: $C = 31 - 40$

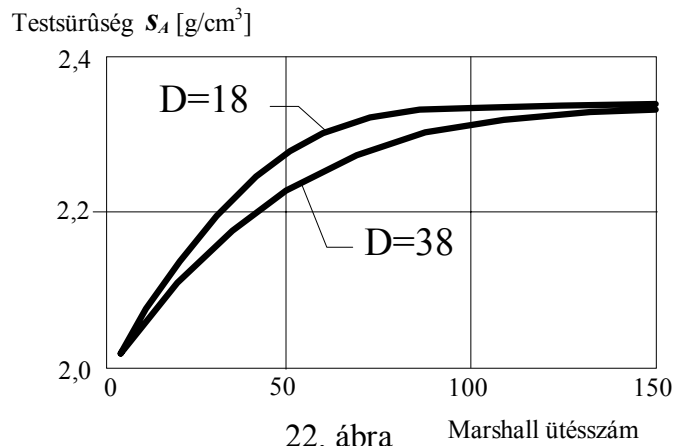
Ennek az eljárásnak a hátránya, a sok laboratóriumi munka és az egyéb vizsgálatokra a tömörítetlensége miatt alkalmatlan sok próbatest volt. Rövidesen 1987-ben kialakult erre alapozva az új eljárás, melyre a németek irányelvet is adtak ki. Az új módszert kis

elektronikai hozzájárulással, minimális laboratóriumi munkával, és egyetlen kárbavesztett próbatest nélkül alakították ki. Megkülönböztetésül az új eljárásnál a tömörítési ellenállást **D** betűvel jelölik.

A BME Útlaborban 1988-ban már ez újabb módszerrel valósítottuk meg az eljárást. Nem szükséges az aszfaltkeverék tömöríthetőségének meghatározásához külön készíteni Marshall-próbatesteket, hanem az *aszfaltkeverék alkalmassági vizsgálatához* elkészítendő 3 keverék x 3 db próbatest tömörítése folyamán regisztráljuk egy elektronikus elmozdulásmérő, mérőerősítő és X-Y rajzoló műszer segítségével a próbatest magasságának változását a döngölés folyamán.

Ha a szabványos testsűrűségmérés után a próbatest végső ($2 \times 75 = 150$ ütessel tömörített) tömegét (M) és magasságát (h) már ismerjük, akkor a regisztrátumról meghatározható bármely ütésszámnak megfelelő $h + \Delta h_A = h_A$ próbatest magasság, melynek alapján számítható a próbatest V_A geometriai térfogata és ezzel az A ütésszámnak megfelelő $s_A = M / V_A$ [g/cm³] testsűrűsége is. Az s_A testsűrűségek kiszámítására azonban nincs szükség az állandók meghatározásához, mivel az csak a h_A értéknek egy állandóval való szorzását jelenti.

$$s_A = \frac{4 * M}{d^2 * \pi} * \frac{1}{h_A} \quad [\text{g / cm}^3], \text{ ahol } M \text{ és } d \text{ változatlan a próbatest vizsgálatánál}$$



22. ábra Marshall ütésszám

A ma alkalmazott számítási módszernél tehát nem számítják a mért próbatest magasságokból a geometriai testsűrűségeket. Jelenleg tehát a képlet:

$$\frac{1}{h(M\ddot{u})} = \frac{1}{h_\infty} - \left(\frac{1}{h_\infty} - \frac{1}{h_0} \right) \times e^{\left(-\frac{M\ddot{u}}{D} \right)} \quad \left[\frac{1}{\text{mm}} \right]$$

ahol $h(M\ddot{u})$: a Marshall-próbatest magassága az ütésszám függvényében,
 $M\ddot{u}$: a Marshall tömörítő munka [21 Nm] ütésszámnak megfelelően,
 h_∞ : a számított minimális próbatest magasság,
 h_0 : a számított kezdeti próbatest magasság,
 D : a tömörítési ellenállás [21 Nm], a tömöríthetőség jellemzője.

Egy tömörítési görbéről legalább 10 db $h_{(M\ddot{u})} - M\ddot{u}$ értékpár, tehát a 3 próbatest $3 \times 10 = 30$ pontja alapján számítógépi itterációval, az eltérések négyzete összegének

$\sum \left(\frac{1}{h_{R(M\ddot{u})}} - \frac{1}{h_{(M\ddot{u})}} \right)^2$ minimuma szerint fokozatos közelítéssel számítógépi program

segítségével meghatározható a regressziós függvény a , b , és D együtthatója. A regressziós függvény alapján megrajzolható az aszfaltkeverék tömörödési jelleggörbéje is (1. ábra). A

tömöríthetőségi állandót ennél az eljárásnál C helyett D betűvel jelöljük, az eredeti Arand-féle eljárástól való megkülönböztetés végett.

A vizsgálat régebbi gyakorlati menete:

- a próbatestek döngölésekor a próbatest magasságának folyamatos mérése a döngölőre szerelt elektronikus útdóval, az útdó jelének regisztrálása az X-Y rajzolóra helyezett A/3 papírlapon az Y irányban, ugyanakkor az X irányban kb. 100 mm/perc sebességgel mozog a rajzoló, (nem szabad elfelejteni a lépték felírását, a rajzoló nagyít, tehát általában $L=8:1$ vagy $L=4:1$)

- ezután a regisztrátumon meghatározzuk (lemérjük) mm pontossággal az adott (a számítógépi bevitel egyszerűsítése érdekében állandó 30) ütésszámhoz tartozó magasság változásokat (növekvő különbség értékek = csökkenő magasságok),

- a próbatest szabványos testsűrűség és magasság mérése után az adatokat az Excel alapú számítógépi programot elindítva be kell gépelni és az Excel munkafüzet megfelelő lapjai az eredményekkel azonnal ki is nyomtathatók.

Ma már a vizsgálati adatok és mérésadatok felvétele számítógéppel történik és az Excel Visual Basic program a számítógépi merevlemezre rögzített adatokat dolgozza fel.

5.1.2. Aszfaltkeverékek tömörített mintáinak készítése, SHRP girátoros tömörítő segítségével, a tömörítési folyamat adatainak felhasználásával.

Európában, hazánkban és a BME Útlaborban is újabban megjelent az ú. n.

girátoros tömörítő berendezés.

A girátoros tömörítő ömlesztett aszfaltkeverékből $\varnothing 100$ vagy $\varnothing 150$ mm henger alakú próbatesteket állít elő, egymással párhuzamosan működő nyomás és girátoros nyíró hatás kombinációjával.

A keveréknek megfelelő tömörítési hőmérsékletű aszfaltot a formába, a formát a tömörítő berendezésbe teszik, és a függőleges dugattyúval 600 kPa nyomást hoznak létre. A formát, a függőlegeshez viszonyítva $1,25^\circ$ -os girátor szögbe állítják, és a mintát 30 ford/perc sebességgel, a felhasználási helyen lévő útszakasz forgalmának megfelelő, előre meghatározott girátorszámmal tömörítik.

A próbatest magasságát minden fordulat után a minta térfogatának meghatározásához rögzítik, és ennek révén a keverék tömegének ismeretében minden fordulatszámmal, vagyis a hozzátartozó tömörítési munkához számítható a próbatest geometriai testsűrűsége.

A próbatest magassága ($h(n_g)$) és a hozzátartozó girátor fordulatszám (n_g) értékpárokra az előbbi 5.1.1. pontban leírt tömörítési függvény alkalmazható.

A próbatestek magasságát tehát a fordulatszám függvényében a mérésadat felvevő és rögzítő Excel program lemezen rögzíti, ahonnan a tömörítési ellenállást (D) számító Excel programba átvihető. Ebben az esetben a módosított program az ütésszámokat a fordulatszámokkal helyettesíti. Mivel egy girátor fordulat nem egyenlő egy Marshall ütés 21 Nm tömörítő munkájával, ezért az így meghatározott tömörítési ellenállás jele: D_g .

5.2. A BVA vizsgálati rendszer

A 80-as évek elején már megjelentek a hazai és külföldi különféle anyagok adalékolásával, különböző leparlási, és fuvatási módszerekkel készített útépítési bitumenek. A hagyományos bitumenek esetében is kevésnek bizonyultak a bitumen szabvány korlátozásai, hiszen a szabványnak megfelelő bitumenekkel készültek változatlan ásványivázzal, jó beépítéssel változó minőségű aszfaltburkolatok. Az útépítési bitumenekkel aszfaltkeverékek készülnek útépítési céllal, tehát útépítési, útfenntartási szempontoknak kell megfelelni az aszfaltkeverékeknek és természetesen fő alkotórészüknél a kötőanyagoknak is.

Ennek a logikus következtetésnek az eredményeképpen a BME Útlaborban a 80-as évek első felében kialakítottunk egy stabil ásványivázú és kötőanyagtartalmú aszfalttípust: **BVA-5**, ahol a BVA rövidítése a Bitumen Vizsgáló Aszfalt megnevezésnek, az ásványivázban a maximális szemnagyság: $D_{max} = 5$ mm és a mindenkori kötőanyagtartalom: **B = 6,5 m%**. Az ásványivázban 50 m% gyenge tapadású keszegi mészkőzuzalék, 5 m% váci mészköliszt, és 45 m% természetes finom öntőhomok (K/2 Kisörs) van. A szemeloszlásban hiányzik a 0,63 - 2,0 mm közötti rész. A szemeloszlás:

0,09 mm-ig	4,3	áthulló m%
0,20 "	19,3	"
0,63 "	50,0	"
2,00 "	50,0	"
3,15 "	60,0	"
5,00 "	100,0	"

A BVA-ban csak a kötőanyag változik és a kötőanyag az aszfaltkeverék vizsgálatainak eredményei alapján minősíthető útépitési szempontból.

Az **öt értékelő vizsgálat** közül az egyik ismert közvetlen bitumenvizsgálat, a **Fraustöréspont vizsgálat**, ennek hőmérséklet eredménye jó korrelációt mutatott az aszfalt hidegviselkedési jellemzőivel.

A további négy értékelő BVA vizsgálat:

1. **MS +40°C** [kN] (módosított Marshall-stabilitás vizsgálat)
2. **ϵ_H** (hidegnyúlási képesség, a 3.1.2. pont szerint hasításvizsgálat alapján)
3. **$N_{S0/2}$** (a Guericke kétirányú hajlító-fárasztás vizsgálatával, 4.1.1. pont)
4. **100D_{7/h}** (duzzadási hányados, a kötőanyag tapadásának, kúszásának v.)

A vizsgálati eredmények szabályozott (0 - 5) pontozásával értékelhető a vizsgált kötőanyag melegviselkedése, hidegviselkedése, fáradási jellemzője és tapadási, kúszási tulajdonsága. A pontok összegezése a kötőanyag általános értékeléséhez nyújt jó adatot. Maximálisan 25 pont lehetséges. A PmB-A modifikált bitumeneknek legalább 19 pontot, a normál bitumeneknek legalább 12 pontot szükséges elérni.

5.3. Rétegek közötti elcsúszás (nyírás) vizsgálat

E vizsgálati módszer feladata, főként a hídszigetelési rendszerek rétegei közötti legkisebb csúsztató- (nyíró-) szilárdság meghatározása, 30° esésű lejtőre helyezett, - a rendszer rétegeiből felépített próbatesten, - a lejtővel párhuzamos csúsztató és a felületre merőleges normál erővel.

A vizsgálati módszer az osztrák RVS 15.361 hídszigetelés építéskivitelezési irányelveket követi.

Fogalommeghatározások és a vizsgálat lényeges elemei:

- A *rétegek közötti elcsúszás vizsgálat* többrétegű rendszer, **200x150** mm alpméretű és legfeljebb **110** mm összvastagságú próbatestjén, **+50°C-on, 30°-os lejtőn, 50 mm/perc** előtolású függőleges erővel létrehozott, a lejtővel (a réteg felületekkel) párhuzamos erő által okozott elcsúszás valamelyik, - a leggyengébb, - réteghatáron.
- A *rendszer rétegek közötti nyírószilárdsága* az elvégzett vizsgálat eredményeként mért maximális csúsztatóerő és az elcsúsztatott felület hányadosa: τ [N/mm²].
- Az *elcsúszási modulus* a maximális csúsztató erő és annak létrejöttéig mért erő (lejtő) irányú réteg elcsúszás alapján számítva.
- *Többrétegű rendszer próbatestje* laboratóriumban is elkészíthető a kivitelezésre előírt technológia szerint, formában egymásra építve a rétegeket, - az

aszfaltrétegeket vibrációval tömörítve, ugyanakkor a már kivitelezett többrétegű rendszerből kivágással is előállítható.

- A (külön védőréteget), az aszfalt védőréteget (30-40 mm) 305x200 mm alapterületű 80-110 mm mélységű formákba helyezett a szigeteléssel ellátott alaplapokra vibrációs tömörítéssel építik be. Hengerelt aszfalt esetén a Marshall-testsűrűség, megfelelő térfogatra (vastagságra) való tömörítéssel állítandó be.
- A többrétegű 305x200 mm méretű próbatestet kettévágva, két **150x200** mm méretű a vizsgálatra alkalmas próbatest jön létre. Az előbbieket szerint előkészített próbatesteket a vizsgálat előtt legalább **20** órán keresztül **+50±1°C** hőmérsékleten kell kondicionálni.
- Az +50 °C hőmérsékletű próbatestet az ugyanilyen hőmérsékletű klímateremben lévő nyírókészülékbe úgy kell elhelyezni, hogy a 200 mm hosszúságú oldal a lejtő irányban, és a függőleges erő tengelyében legyen a próbatest középpontja a várható elcsúszási síkban (23. ábra).

A leggyengébb kapcsolatú rétegek közötti elcsúszást, a **50 mm/perc** előtolási sebességű nyomófej közvetítésével átadott függőleges erő által létrehozott lejtőirányú (**0,5 x F**) csúszató erő okozza, (0,866 x F) a felületre merőleges normálerő mellett. A felső elcsúszó rétegek vízszintes elmozdulása a *függőleges elmozdulásnak* 1,73 szorososa, a *lejtő irányú elmozdulás a a függőleges kétszerese*. A vízszintes elmozdulás lehetőségét a nyomófej biztosítja. A függőleges erőt (F) és a lejtőirányú elmozdulást (csúszást) a vizsgálat folyamán folyamatosan rögzítik (24. ábra).

Rétegek közötti legkisebb nyírószilárdság:

$$\tau = \frac{0.5 \times F_{\max}}{a \times b} \quad [N / mm^2]$$

ahol F_{\max} : a maximális nyomóerő [N]

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

- *Elcsúszási modulus:*

$$G_e = \frac{0,5 \times F_{\max}}{a \times \ell_{e\max}} \quad [N / mm^2]$$

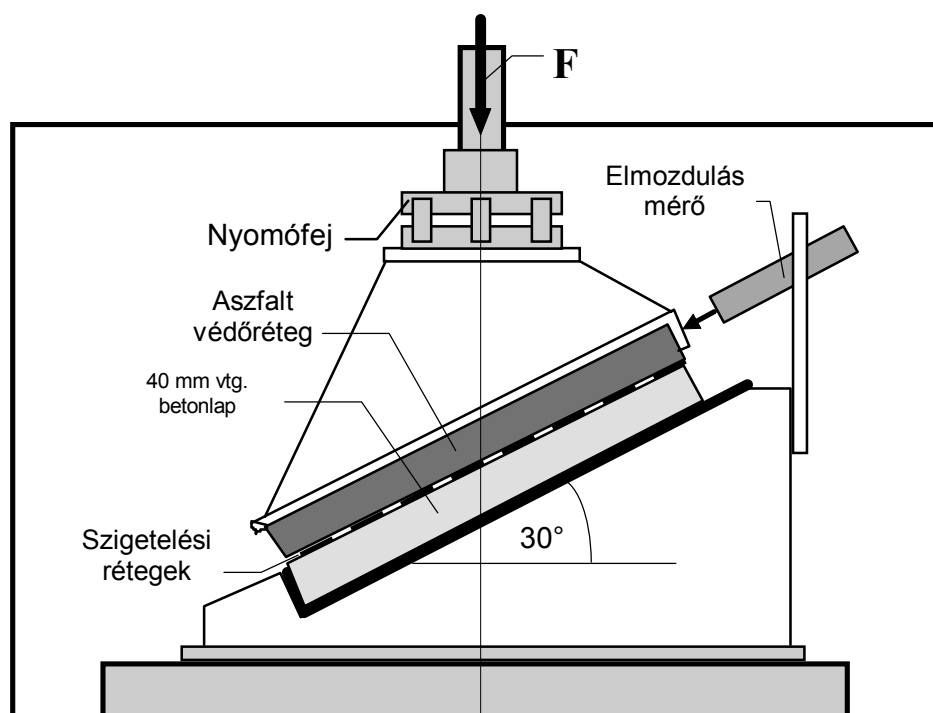
ahol a : a próbatest lejtőirányra merőleges oldalhossza
150±5 mm

$\ell_{e\max}$: a függőleges nyomóerő és a lejtővel párhuzamos elcsúszás egyidejű mérési görbéjéből a maximális erőhöz tartozó elcsúszás.

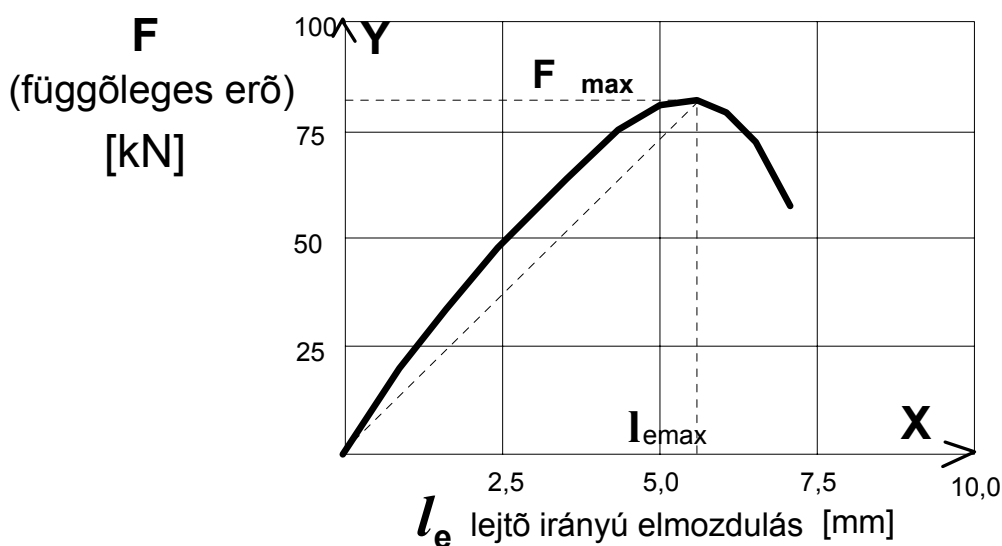
A rétegek közötti elcsúszás vizsgálat eredményét legalább két párhuzamos vizsgálat számtani átlagában kell megadni, ha a két érték eltérése nem haladja meg a következő értékeket:

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

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



23. ábra



24. ábra

5.4. Dinamikus hajlítással szembeni tartósság vizsgálata

(híd acélpályalemez szigetelési rendszerénél)

Ez a vizsgálat kifejezetten az **acélpályalemezre épülő szigetelésirendszerek tartósságát** vizsgálja az ismétlődő hajlító igénybevételekkel szemben.

A vizsgálati módszert, főként a német TP-BEL-ST (1992) acélhíd-pályalemez szigetelési rendszerek vizsgálati előírásainak 3. pontja (Dauerschwellbiegeprüfung) figyelembevételével alakítottuk ki.

Próbatestek készítése: 700 x 200 x 12 mm méretű acéllemezre alulra keresztirányban (a rajzon jelzett helyekre) két erősítő bordát (220x40x10 mm) kell felhegeszteni. A lemez kiegyengetése után a felső felületét a híd-pályalemezre előírt

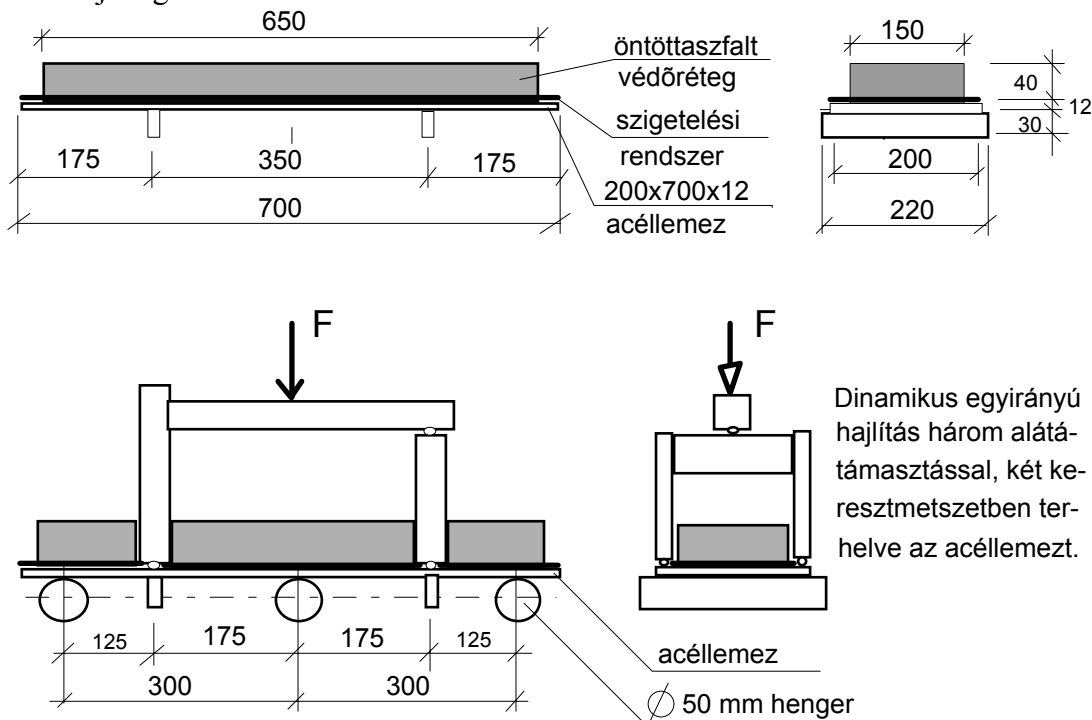
követelményeknek megfelelően kell előkészíteni és utána a szigetelést a vonatkozó technológia szerint hordják fel a lemezre teljes szélességben. A szigetelést védő öntött aszfalt réteget egy 650x150x35 mm belső méretű acélkeretbe terítik el. A keretet a lemezen úgy kell elhelyezni, hogy keresztirányban két oldalt 25-25 mm csak szigetelt lemez maradjon, ugyanígy hosszirányban is. A laboratóriumban a hajlító erő négy támaszpontjának helyére $\phi 12$ mm fúróval középen 4 mm mély fészket fúrnak (25. ábra).

A vizsgálati hőmérséklet: 20 ± 3 °C

A vizsgálat előkészítéseként egyik erőátadási kereszt-metszetben 0,5 mm behajlást hozunk létre, a szükséges nyomóerő lesz a vizsgálat során az F_{max} értéke és ennek 15%-a az alaperő, vagyis $F_{min} = 0,15 \cdot F_{max}$.

A vizsgálat végrehajtásakor az erő szinuszos szerint vezérelve, 2 Hz frekvenciával. A hajlító fárasztás során a közvetlen terhelés az acéllemezen van, de a rétegek közötti együttműködéstől függően átveszik a rétegek a hajlító feszültségeket. A vizsgálatot be lehet fejezni ha valamelyik réteg elválik a másiktól, vagy szemmel látható egyéb károsodások jelentkeznek.

A vizsgálati eredmény: a károsodások létrejöttéhez tartozó ismétlészámok és a károsodások jellege.



25. ábra

5.5. Laboratóriumi feltépő vizsgálat

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

A próbatest előállítása:

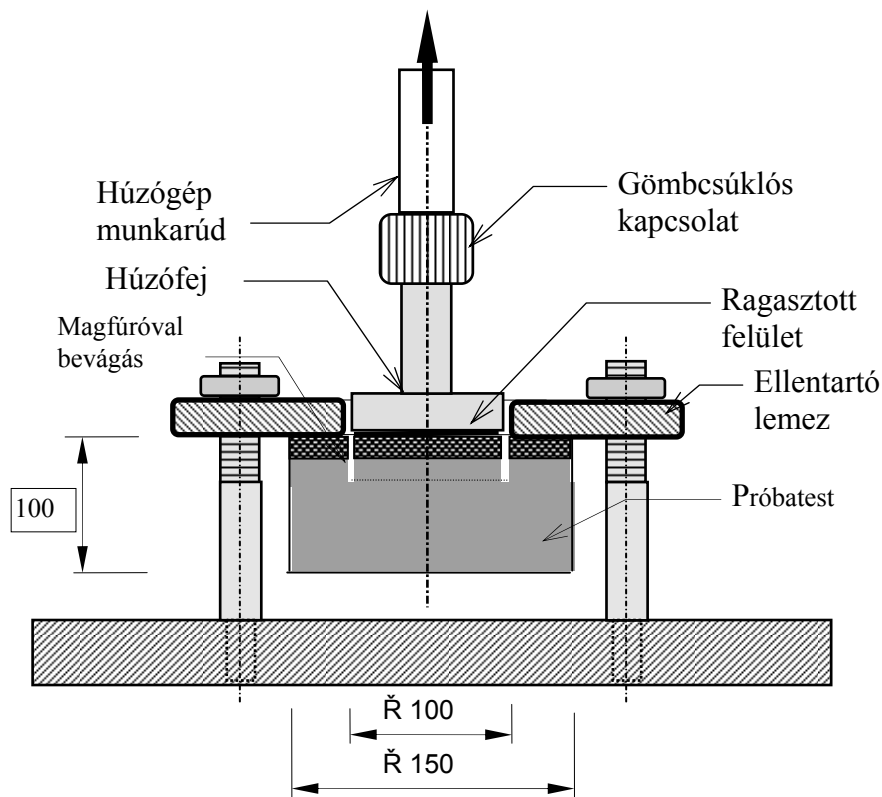
A vizsgálatot az útburkolatból kifűrt, legalább 80 mm vastagságú $\phi 150$ mm fűrt magmintán lehet elvégezni, melynek közepén (koncentrikusan) egy $\phi 100$ mm magfúróval a bevonat (a vizsgált réteg) vastagságát 5-10 mm-el meghaladó mélységű fűrást kell

készíteni. Amennyiben a magminta vastagsága nagyobb, mint 100 mm, erre a méretre szükséges levágni, a vizsgáló eszköz méretei miatt.

A próbatest további előkészítése a vizsgálatra: a magminta forgalom által járt felületét a $\phi 100$ mm magon belül csiszolással meg kell tisztítani a ragasztó felkenése előtt. A ragasztó felkenése után a teljes magmintát, annak belső $\phi 100$ mm megfűrt magrészét a feltépőfejre helyezik. A ragasztó nem kerülhet a vágatba és a húzófej külső palástjára.

A próbatestet, a ragasztó előírt szilárdulási ideje után a feltépőfejjel együtt **temperálják a $+10\pm 0,5$ °C** vizsgálati hőmérsékletre légtérben, ha előzőleg laboratóriumi hőmérsékleten volt, legalább **3 óra** időtartamig.

Ezután a próbatestet a feltépőfejjel a feltépő készülékbe helyezve (26. ábra) **200 N/sec** állandó terhelési sebességgel (ami ebben az esetben megfelel $0,025 \text{ N/mm}^2/\text{s}$ feszültség növekedési sebességnek) növelik a húzóerőt a felszakadásig. A vizsgálat az MTS-ÚT berendezésen kerül végrehajtásra, ahol ez a terhelési sebesség beállítható.



26. . ábra

A vizsgálati eredmény és értékelése

σ_{\uparrow} [N/mm²] felületre merőleges tapadószilárdság, mely a mért F_{\max} szakítóerő és az A vizsgálati felület hányadosa:

$$\sigma_D = \frac{F_{\max}}{A} \quad [N / mm^2]$$

A felületre merőleges tapadószilárdságot **0,01 N/mm²** -re kerekítve kell megadni. Normális esetben az A szakadó felület **7854 mm²** .

A következő törési képek valósulhatnak meg:

- A) Szakadás a vékonyaszfaltbevonaton belül.
- B) Szakadás részben a határfelületen, részben a vékonyaszfaltbevonaton belül.
- C) Szakadás csak a határfelületen.
- D) Szakadás részben a határfelületen, részben a régi aszfaltrétegben.
- E) Szakadás a régi aszfaltrétegben.

Ha a ragasztórétegben illetve a ragasztott felületen a szakadási felület nagyobb, mint a teljes felület 25 %-a (**1963** mm²), ez a vizsgálati eredmény az értékelésbe nem vonható be.

5.6. Aszfalt triaxiális vizsgálatok

Az 1960-ban kiadott és már többször hivatkozott *Ferenczy G.: Aszfaltburkolatok* című könyvében a Marshall-stabilitás vizsgálat mellett leír még három más stabilitásvizsgálatot, melyek közül kettő; a Hveem-féle és a Smith-féle stabilitásvizsgálat voltaképpen *zárt rendszerű triaxiális aszfaltvizsgálat*, részletes leírásuk megtalálható az idézett könyvben. A geotechnika területén nagyon régen alkalmazott *törő jellegű triaxiális vizsgálatot*, tehát már fél évszázaddal ezelőtt felhasználták az aszfaltok vizsgálatára is.

A triaxiális vizsgálatoknak négy változata lehetséges (l.: 27. ábra).

A vizsgálatoknál az általában célszerűen **hengeres próbatestet tengelyirányban** (függőlegesen) mechanikus, vagy hidraulikával működtetett **mechanikus erővel terhelik**. A folyadékot át nem eresztő műanyag harisnyában lévő próbatest egy zárt, folyadékkal töltött cellában van és **a radiális irányú oldalnyomást** (megtámasztást) **a folyadék közvetíti**.

- **Zárt rendszerű vizsgálatnál** a cella folyadék nyomását nem szabályozzák, az a függőleges nyomóterhelés növelésével a próbatest alakváltozása (hordósodás) következtében növekszik. A mindenkori folyadéknyomás egy manométeren leolvasható. Természetesen ez az egyszerűbb vizsgálat minden tekintetben.
- **Nyílt rendszerű vizsgálatnál** a cella folyadék nyomása szabályozhatóan beállítható. Ez természetesen már bonyolultabb berendezést igényel, mert a függőleges nyomóerő növekedésével a növekedő oldalnyomást vissza kell szabályozni a beállított értékre.

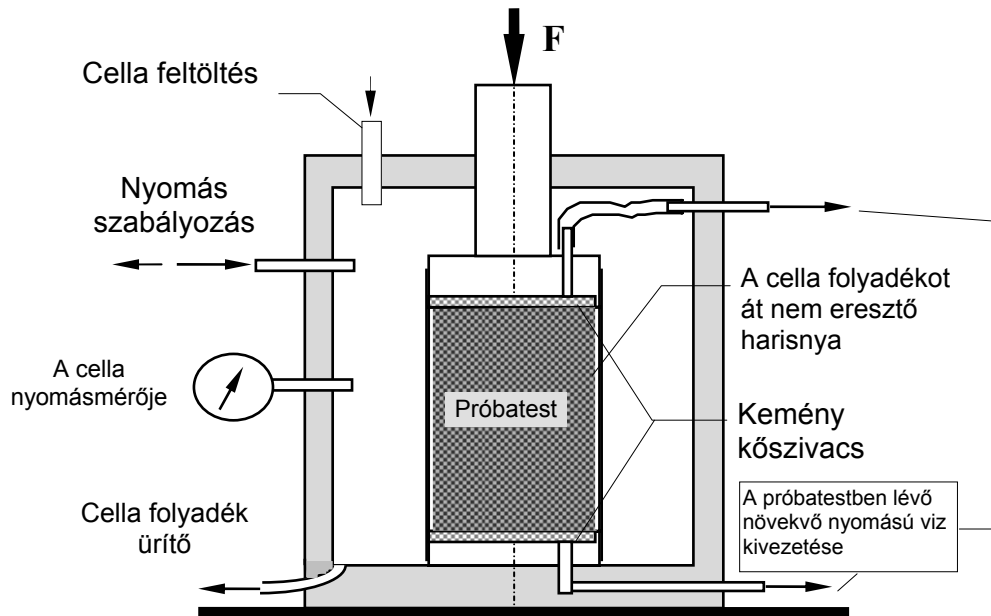
A **függőleges nyomóerő** lehet:

- **statikus** illetve valamilyen sebességgel a törésig növelt,
- **dinamikus**, valamilyen vezérléssel szabályozott ismételt terhelés.

Természetesen a **zárt és nyílt** rendszerű vizsgáló berendezéssel egyaránt végezhető **statikus és dinamikus** terhelő vizsgálat is.

A BME Útlaborban az aszfaltmechanikai vizsgálatok keretében 1979-ben kezdtünk el foglalkozni az *aszfaltok triaxiális vizsgálatával*. Dr. Nemesdy E.: "Aszfaltok statikus triaxiális vizsgálatának elméleti alapjai" című dolgozata 1980. január keltezésű és ezidőtájt már beszerzésre került az SBEL amerikai gyártmányú berendezés, mellyel több garanciális javítás és az aszfaltvizsgálatokhoz szükséges átalakításaink után 1981- 1984 között folytattunk statikus-törő aszfalt triaxiális vizsgálatokat.

Az aszfalt triaxiális vizsgálatok célja az aszfaltkeverékek szilárdsági jellemzőinek meghatározása; e jellemzők a következők:



27. ábra

- C [N/mm^2] kohézió,
- φ° belső súrlódási szög,
- E [N/mm^2] rugalmassági (deformációs) modulus.

Természetesen a főcéljaink ennél a vizsgálatnál is változatlanok: ezen mechanikai jellemzők és az aszfaltkeverékeket jellemző faktorok összefüggése és ezek felhasználása az útpályaszerkezet méretezésében, a keverék tervezésében.

A vizsgálat folyamán az aszfalt,

- rugalmas állapotában, a *rugalmassági* (alakváltozási) *modulus* E értékét,
- a különböző törési határállapotok létrehozásával a C kohézió és φ° belső súrlódási szög értékét határozhatjuk meg (l.: 28. ábra).

A Coulomb-Mohr törési elmélet alapján : $\tau_t \geq C + \sigma_t * \text{tg } \varphi$ a törési határállapot feltétele. A σ_1 függőleges főfeszültség a próbatest törésnél azonos az $F_{\text{törő}}$ erőből számított nyomófeszültséggel. A $\sigma_2 = \sigma_3$ főfeszültségek azonosak, mivel a próbatest vízszintes irányú oldalnyomása körszimmetrikus (radiális) terhelést ad és ez nyílt rendszerű vizsgálatnál a beállított értékű állandó nyomófeszültség. Egy bizonyos ilyen beállított σ_3 oldalnyomással legalább három próbatest megvizsgálva, - a törésig növelve a σ_1 feszültséget ($F_{\text{törő}}$), - az átlagos értékkel megrajzolható a $\sigma_1 - \sigma_3 = r'$ sugarú Mohr-kör. Egy másik beállított σ_3 oldalnyomással is elvégezve újabb 3 próbatesten a vizsgálatot, megszerkeszthető a másik $\sigma_1 - \sigma_3 = r''$ sugarú Mohr-kör is, és a két feszültséggörre fektetett érintő egyenes is, mely a függőleges τ ordinátán kimetszi a C kohéziót és iránytangensének szöge a φ° belső súrlódási szög. Általában 3 különböző oldalnyomással végzik el a vizsgálatokat (legalább 9 próbatest vizsgálata) és így a 3 Mohr-körre közelítően szerkeszthető, számítható regressziós érintő egyenes adja az aszfaltkeverék megbízhatóbb C [N/mm^2] és φ° vizsgálati eredményét.

Ha a próbatest függőleges σ_1 irányú alakváltozását Δh (összenyomódását) a függőleges nyomóerővel együtt X-Y koordináta rendszerben regisztráljuk, akkor a görbe kezdeti egyenesebb szakaszára (amíg a $\sigma_1 = \sigma_3$ lesz; vagyis a függőleges nyomófeszültség el nem éri a radiális nyomófeszültség nagyságát) fektetett érintő egyenes iránytangense alapján számítható egy közelítő kezdeti E_0 [N/mm²] rugalmassági modulus is. A C kohézió valójában az anyag tiszta nyírószilárdsága normálfeszültségek és surlódás nélkül.

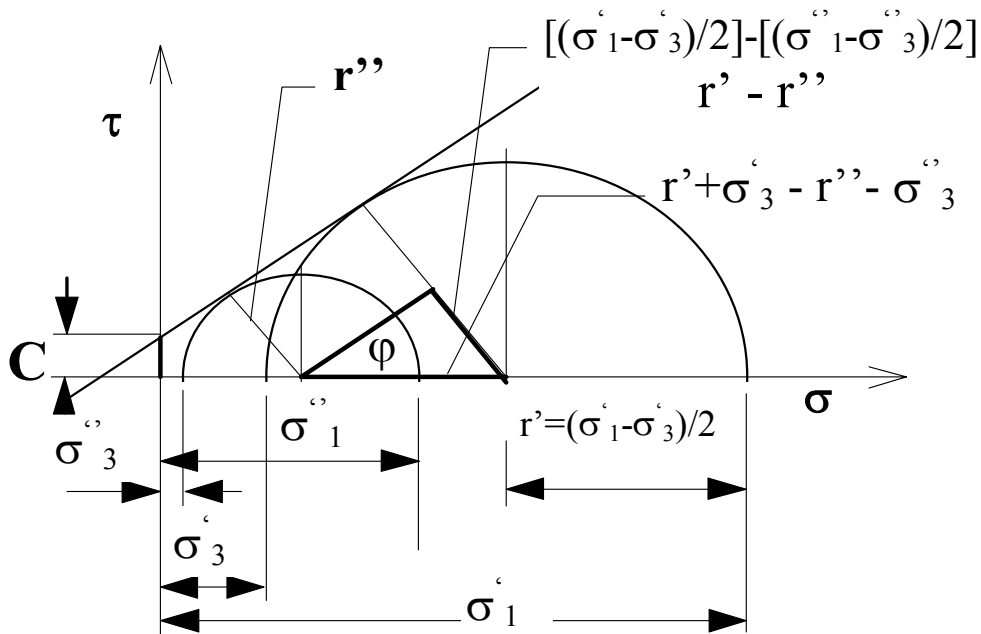
A vizsgálati eredmények (C és φ) számítása a 28. ábra szerinti két vizsgálat Mohr-köre alapján levezetések nélkül:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad \checkmark_s \quad r = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$$\sin \varphi = \frac{r' - r''}{\sigma_0' - \sigma_0''} = \frac{(\sigma_1' - \sigma_3') - (\sigma_1'' - \sigma_3'')}{(\sigma_1' + \sigma_3') - (\sigma_1'' + \sigma_3'')}$$

$$C = r \times (\cos \varphi - \sin \varphi * \operatorname{tg} \varphi) - \sigma_0 \times \operatorname{tg} \varphi$$

Ez utóbbi képletbe valamelyik Mohr-kör r és σ_0 értékét kell behelyettesíteni. Több



28. ábra

oldalnyomásos (több Mohr-körös) vizsgálat esetén a regressziós "érintő" egyenes egyenlete számítógépi iterációval jól meghatározható.

A vizsgálati eredményeket a vizsgálat paraméterei a következőképpen befolyásolják:

- a **függőleges nyomóerő növekedési sebességének** (a nyomófej előtolási sebességének) *fokozása, növeli* az E_0 és C értékét,
- a **vizsgálati hőmérséklet csökkentése** szintén *növeli* az E_0 , a C , de a φ értékét is,
- a próbatest méretei, illetve inkább a *henger hosszának és átmérőjének aránya* (h/d) legalább $\frac{h}{d} \geq \operatorname{tg} \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)$ értéket érje el, mert egyébként a csúszólap nem tud a próbatestben zavartalanul kialakulni és így a nyomólapokon felülettel

párhuzamos radiális irányú súrlódás alakul ki, ami hamisan növeli leginkább a kohézió értékét.

A Marshall-próbatest teljesen alkalmatlan a vizsgálatra, de ha az átmérőjét megtartjuk és figyelembe vesszük az aszfaltkeverékeknél 20°C-on átlagos $\varphi = 30^\circ$ értéket, akkor a szükséges próbatest magasság: $h_M = 101,6 \times \tan 60^\circ = 176 \text{ mm}$.

A BME Útlaborban 1981-ben elvégzett 0 - 1,5 N/mm² beállított oldalnyomású, léptető motorral vezérelt állandó növekedési sebességű függőleges nyomóerővel, 40, 20°C vizsgálati hőmérsékleteken, Ø101,6 x 200 mm méretű hengeres próbatesteken végzett vizsgálat sorozat egy kiragadott eredménye.

AB-12/B-90 aszfaltkeverék

F_z növ. sebessége=430,8 N/sec; vizsgálati hőmérséklet: 40°C

C = 1,36 N/mm² ; $\varphi = 12,95^\circ$

6. Az aszfaltkeverék értékelése, aszfaltmechanikai vizsgálati rendszerre alapozva

A BME Útlaborban a 90-es évek elejére kialakultak azok az aszfaltmechanikai vizsgálatok, melyek alapján az aszfaltkeverék a három útépitési és útfenntartási főszempont (plasztikus meleg alakváltozás, hideg repedés érzékenység, ismétlődő hajlító igénybevétellel szembeni tartósság) szerint értékelhető.

Az aszfalt **melegviselkedése** (plasztikus meleg alakváltozási tulajdonságai) megítélhető

- a 60°C-os **keréknyomképződés** vizsgálat (2.6. pont),
- a 40°C-os **dinamikus kúszás** (egy tengelyű nyomás) vizsgálat (2.4. pont).

Megbízhatóan értékelhető ez az aszfalttulajdonság a három órás **keréknyomvizsgálat** átlagos fajlagos nyommélység (ε %) eredménye alapján. A megítélés biztonsága fokozható a **dinamikus kúszás** vizsgálat u.n. melegviselkedési hányados vizsgálati eredményével. Ez utóbbi vizsgálati eredmény normál aszfaltbetonok esetében elegendő az értékeléshez.

Az aszfaltkeverék **hidegviselkedése** (hideg repedés érzékenysége) legmegbízhatóbban az u.n. fiktív **repedési hőmérséklet** (l.: 3.4. pont) meghatározásával értékelhető, ehhez azonban 15 db Marshall-próbatest három hőmérsékletű hasításvizsgálata (3.1.3. pont) és a lineáris hőtágulási együttható hőmérséklet függvényének meghatározása (3.2. pont) szükséges.

Kisebb költségű, de ennek megfelelően kissé kevésbé megbízható a 6 Marshall-próbatest **-20°C-on** végzett hasításvizsgálatával nyert vizsgálati eredmény ($\varepsilon_{H-20} \times 10^5$), a **fajlagos szakadó nyúlás** 10^5 -el felszorozott értéke (3.1.3. pont).

Az aszfalt **hajlító fáradási tulajdonságait** jó megbízhatósággal, legalább 7 hasábpróbatest különböző terhelésű **dinamikus kétirányú hajlító-fárasztóvizsgálatának** elvégzésével (4.1.2. pont) meghatározható: $\sigma_{N=1000000}$ [N/mm²], a törésig egymilliószor ismételtetű **hajlítófeszültséggel** (4.3. pont) értékelhetjük. Ugyanezen 10°C-on végrehajtott fárasztóvizsgálatok során meghatározott kezdeti merevségek (S_0 N/mm²) átlagértéke is felhasználható a pályaszerkezeti réteg ismétlődő hajlítási igénybevételre való méretezéséhez.

A felsorolt értékelő vizsgálati eredményekre a BME Útlabor sokévi vizsgálatainak összegyűjtött és ez irányba feldolgozott eredményei alapján, az érték intervallumokra pontokat határoztunk meg. Ezen **értékelő ponttáblázat** alapján mind az öt vizsgálati eredmény besorolható és értékelő pontszáma (1 - 10) meghatározható. Az értékelő

ponttáblázatot tájékoztatóként mellékeljük, hogy ezeknek a lényeges aszfaltmechanikai vizsgálati eredményeknek a jobb megítélését elősegítsük.

ASZFALT ÉRTÉKELŐ PONT TÁBLÁZAT										
Értékelő pont	MELEGVISELKEDÉS				HIDEGVISELKEDÉS				FÁRADÁS	
	Keréknyom képződés vizsg. átlagos relatív nyommélység 60°C-on ϵ [%]		Din.kúszás $\sigma_{ny}=0,6 \text{ N/mm}^2$ sin 4 Hz, 40°C N/ϵ [1/‰]		HASÍTÁS vizsgálattal szakadó nyúlás -20°C-on $\epsilon_{-20} * 10^5$		Repedési hőmérséklet °C		Din. kétirányú hajlító fárasztás, 10^6 -szor ismételt $\sigma_{N=1\ 000\ 000}$ [N/mm ²]	
	"-tól"	"-ig"	"-tól"	"-ig"	"-tól"	"-ig"	"-tól"	"-ig"	"-tól"	"-ig"
10	0,25	2,50	4 001	9 000	30,1	90,0	-15,1	-30,0	1,81	3,00
9	2,51	3,75	2 501	4 000	25,1	30,0	-13,1	-15,0	1,51	1,80
8	3,76	5,50	1 501	2 500	22,1	25,0	-11,1	-13,0	1,31	1,50
7	5,51	8,00	1 001	1 500	19,1	22,0	-9,6	-11,0	1,21	1,30
6	8,01	11,25	501	1 000	16,1	19,0	-8,1	-9,5	1,11	1,20
5	11,26	15,00	301	500	13,1	16,0	-6,6	-8,0	1,01	1,10
4	15,01	20,00	151	300	10,1	13,0	-5,1	-6,5	0,91	1,00
3	20,01	25,00	76	150	7,1	10,0	-3,6	-5,0	0,71	0,90
2	25,01	37,50	41	75	4,1	7,0	-2,1	-3,5	0,41	0,70
1	37,51	50,00	11	40	1,1	4,0	-0,1	-2,0	0,10	0,40

Az aszfalt tulajdonság szintjeinek ponthatárai							
Tulajdonság szint		Melegviselkedés		Hidegviselkedés		Fáradás	
KIVÁLÓ	K	17	20	17	20	9	10
JÓ	J	13	16	13	16	7	8
ÁTLAGOS	Á	9	12	9	12	4	6
ELEGENDŐ átlagalatti	E	5	8	5	8	2	3