

---

**Kerpely Antal Anyagtudományok és technológiák Doktori Iskola**

Doktori Iskola vezetője:

Dr. Roósz András

egyetemi tanár, az MTA rendes tagja



**Mészköliszt és dolomit töltőanyagok hatása  
aszfalthabarcok reológiai tulajdonságaira**

Doktori (Ph. D.) értekezés

**Géber Róbert**

okleveles anyagmérnök

Tudományos vezető:

Prof. Dr. Gömze A. László

Miskolc

2012

---

## Tartalomjegyzék

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Az értekezésben használt jelölések és rövidítések .....                                    | 3  |
| Bevezetés, célkitűzések .....                                                              | 5  |
| 1. Irodalmi áttekintés .....                                                               | 7  |
| 1.1. Az aszfalt, mint szerkezeti építőanyag .....                                          | 7  |
| 1.1.1. Az ásványi váz .....                                                                | 8  |
| 1.1.2. Az aszfalt kötőanyaga: a bitumen .....                                              | 10 |
| 1.1.3. A töltőanyagok szerepe és jelentősége az aszfaltban .....                           | 12 |
| 1.1.4. A töltőanyagok hasznosíthatósága .....                                              | 15 |
| 1.1.5. Aszfalthabarcok .....                                                               | 15 |
| 1.1.6. Aszfalthabarcok és aszfaltkeverékek modellezése .....                               | 18 |
| 1.2. Általános reológiai fogalmak .....                                                    | 21 |
| 1.2.1. Mechanikai alapmodellek .....                                                       | 21 |
| 1.2.2. Viszkoelasztikus anyagmodellek .....                                                | 22 |
| 1.2.3. Lineáris viszkoelasztikusság .....                                                  | 23 |
| 1.2.4. LVE paraméterek statikus meghatározása .....                                        | 24 |
| 1.2.5. LVE paraméterek dinamikus meghatározása .....                                       | 25 |
| 1.2.6. Folyási tulajdonságok modellezése .....                                             | 27 |
| 1.3. Az aszfalt reológiai jellemzése .....                                                 | 29 |
| 1.3.1. Az aszfalt, mint viszkoelasztikus anyagrendszer .....                               | 29 |
| 1.3.2. Az aszfalt dinamikus terhelése és hőmérsékletfüggése.....                           | 30 |
| 1.3.3. Bitumenek és aszfaltok lineárisan viszkoelasztikus modellezése .....                | 33 |
| Az értekezés feladatai.....                                                                | 36 |
| 2. Az ásványi töltőanyagok és a bitumen vizsgálata .....                                   | 37 |
| 2.1. A vizsgált ásványi anyagok bemutatása .....                                           | 37 |
| 2.2. Mintaelőkészítés .....                                                                | 38 |
| 2.3. A töltőanyagok szemcseméret-eloszlásának vizsgálata .....                             | 38 |
| 2.4. A töltőanyagok ásványi összetételének vizsgálata .....                                | 40 |
| 2.5. A töltőanyagok termoanalitikai vizsgálata .....                                       | 42 |
| 2.6. A töltőanyagok pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata .....                         | 44 |
| 2.7. A töltőanyagok fajlagos felületének vizsgálata .....                                  | 49 |
| 2.8. A töltőanyagok hidrofíl/hidrofób tulajdonságainak vizsgálata .....                    | 51 |
| 2.9. Útépitési bitumen Fourier transzformációs infravörös spektroszkópiás vizsgálata ..... | 52 |
| 2.10. Útépitési bitumen differenciális pásztázó kalorimetriás vizsgálata .....             | 53 |
| 3. Aszfalthabarcok reológiai vizsgálata .....                                              | 56 |
| 3.1. Keverékkészítés .....                                                                 | 56 |
| 3.2. Reológiai mérési módszerek.....                                                       | 57 |

|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3. Aszfalthabarcok kúszás-visszaalakulásának vizsgálata .....                       | 58  |
| 3.4. Aszfalthabarcok folyási tulajdonságainak vizsgálata .....                        | 64  |
| 3.4.1. Deformáció-sebesség tartományok meghatározása.....                             | 64  |
| 3.4.2. Korrekció alkalmazása a mérési adatokon .....                                  | 65  |
| 3.4.3. A folyáshatár meghatározása .....                                              | 66  |
| 3.4.4. Aszfalthabarcok folyás- és viszkozitás-görbéinek meghatározása.....            | 68  |
| 3.5. Aszfalthabarcok dinamikus vizsgálata.....                                        | 72  |
| 3.5.1. Aszfalthabarcok LVE tartományának meghatározása.....                           | 73  |
| 3.5.2. Aszfalthabarcok frekvenciafüggő vizsgálata .....                               | 75  |
| Összegzés .....                                                                       | 82  |
| Az értekezés tézisei, új tudományos eredmények .....                                  | 84  |
| Summary .....                                                                         | 86  |
| Az eredmények hasznosíthatósága.....                                                  | 88  |
| A témában megjelent legfontosabb publikációk .....                                    | 88  |
| Köszönetnyilvánítás .....                                                             | 89  |
| Mellékletek.....                                                                      | 90  |
| 1. Melléklet: A töltőanyagok szemcseméret-eloszlásának vizsgálata: hisztogramok ..... | 90  |
| 2. Melléklet: A töltőanyagok termoanalitikai vizsgálata: derivatogramok .....         | 91  |
| 3. Melléklet: Aszfalthabarcok kúszás-visszaalakulásának vizsgálata .....              | 92  |
| 4. Melléklet: Aszfalthabarcok folyás- és viszkozitásgörbéinek meghatározása .....     | 95  |
| 5. Melléklet: Aszfalthabarcok összesített valódi folyásgörbéi .....                   | 108 |
| 6. Melléklet: Aszfalthabarcok összesített viszkozitásgörbéi.....                      | 111 |
| 7. Melléklet: Aszfalthabarcok LVE tartományának meghatározása.....                    | 114 |
| 8. Melléklet: Aszfalthabarcok nullviszkozitásának meghatározása.....                  | 116 |
| 9. Melléklet: Az aktiválási energia meghatározása .....                               | 117 |
| 10. Melléklet: A WLF konstansok meghatározása.....                                    | 119 |
| 11. Melléklet: Aszfalthabarcok összesített mestergörbéi.....                          | 123 |
| Irodalomjegyzék.....                                                                  | 127 |

## Az értekezésben használt jelölések és rövidítések

### Jelölések

|                |                                         |                                                                               |
|----------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| $a_T$          | [–]                                     | eltolási tényező                                                              |
| $^1A$          | [mm <sup>2</sup> ]                      | felület                                                                       |
| $^2A$          | [au]                                    | abszorbancia                                                                  |
| $C_1$          | [–]                                     | WLF-egyenlet anyagra jellemző állandója                                       |
| $C_2$          | [°C]                                    | WLF-egyenlet anyagra jellemző állandója                                       |
| $d$            | [mm]                                    | átlagos szemcseátmérő                                                         |
| $E$            | [Pa]                                    | rugalmassági ( <i>Young</i> ) modulusz                                        |
| $E_a$          | [J·mol <sup>-1</sup> ]                  | aktiválási energia                                                            |
| $ E^* $        | [Pa]                                    | merevség                                                                      |
| $f$            | [Hz]                                    | frekvencia                                                                    |
| $f_f$          | [–]                                     | töltőanyag térfogataránya                                                     |
| $f_r$          | [Hz]                                    | redukált frekvencia                                                           |
| $F$            | [N]                                     | erő                                                                           |
| $G$            | [Pa]                                    | nyírási modulusz                                                              |
| $G'$           | [Pa]                                    | tárolási modulusz                                                             |
| $G''$          | [Pa]                                    | veszteségi modulusz                                                           |
| $G^*$          | [Pa]                                    | komplex nyírási modulusz                                                      |
| $G_0$          | [Pa]                                    | komplex modulusz alsó határértéke ( $\omega \cdot \tau \rightarrow 0$ )       |
| $G_1$          | [Pa]                                    | a Maxwell-modell rugalmassági modulusza                                       |
| $G_2$          | [Pa]                                    | a Voigt-Kelvin-modell rugalmassági modulusza                                  |
| $G_\infty$     | [Pa]                                    | komplex modulusz felső határértéke ( $\omega \cdot \tau \rightarrow \infty$ ) |
| $G_g$          | [Pa]                                    | üveges modulusz                                                               |
| $^1h$          | [m]                                     | aszfalt kopóréteg vastagsága                                                  |
| $^2h$          | [m]                                     | dinamikus nyíróreométer résmérete                                             |
| $i$            | [–]                                     | képzetes egység ( $\sqrt{-1}$ )                                               |
| $J'$           | [Pa <sup>-1</sup> ]                     | tárolási érzékenység                                                          |
| $J''$          | [Pa <sup>-1</sup> ]                     | veszteségi érzékenység                                                        |
| $J_c(\tau, t)$ | [Pa <sup>-1</sup> ]                     | nyíró kúszási érzékenység                                                     |
| $^1k$          | [–]                                     | Einstein-egyenlet állandója ( <i>értéke 2,5</i> )                             |
| $^2k$          | [–]                                     | parabolikus elem hatványkitevője ( $0 < k < 1$ )                              |
| $K$            | [Pa·s <sup>n</sup> ]                    | konzisztencia                                                                 |
| $M$            | [Nm]                                    | forgatónyomaték                                                               |
| $^1n$          | [–]                                     | sebesség-érzékenységi kitevő                                                  |
| $^2n$          | [s <sup>-1</sup> ]                      | úthenger fordulatszáma                                                        |
| $o$            | [–]                                     | Huet-Sayegh-modell állandója                                                  |
| $Q$            | [W·g <sup>-1</sup> ]                    | hőáram                                                                        |
| $r$            | [m]                                     | úthenger sugara                                                               |
| $^1R$          | [J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] | egyetemes gázállandó                                                          |
| $^2R$          | [m]                                     | a mérőfej maximális sugara ( <i>a peremnél mérve</i> )                        |
| $^1S$          | [Pa]                                    | merevségi modulusz                                                            |
| $^2S$          | [m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> ]      | fajlagos felület                                                              |
| $t$            | [s]                                     | terhelési idő                                                                 |
| $t_0$          | [s]                                     | a terhelés kezdete a kúszási szakaszban                                       |
| $t_1$          | [s]                                     | a terhelés vége a kúszási szakaszban                                          |
| $t_2$          | [s]                                     | a visszaalakulási szakasz végéhez tartozó idő                                 |
| $t_r$          | [s]                                     | redukált terhelési idő                                                        |
| $\tan\delta$   | [–]                                     | veszteségi tangens                                                            |
| $T$            | [°C]                                    | hőmérséklet                                                                   |
| $T_0$          | [°C]                                    | önkéntesen választott referencia hőmérséklet                                  |
| $T_g$          | [°C]                                    | üvegesedési hőmérséklet                                                       |
| $V_b$          | [m <sup>3</sup> ]                       | bitumen térfogata                                                             |
| $V_f$          | [m <sup>3</sup> ]                       | töltőanyag térfogata                                                          |
| $\alpha$       | [–]                                     | szigmoid modell konstans paramétere                                           |
| $^1\beta$      | [–]                                     | szigmoid modell konstans paramétere                                           |
| $^2\beta$      | [–]                                     | 2S2P1D modell konstans paramétere                                             |
| $^1\gamma$     | [–]                                     | szigmoid modell konstans paramétere                                           |
| $^2\gamma$     | [–]                                     | deformáció                                                                    |

|                  |                        |                                                                                   |
|------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| ${}^1\gamma_0$   | [–]                    | deformáció-amplitúdó                                                              |
| ${}^2\gamma_0$   | [–]                    | pillanatnyi deformáció a visszaalakulási szakaszban                               |
| $\gamma_1$       | [–]                    | késleltetett deformáció a visszaalakulási szakaszban                              |
| $\gamma_{e0}$    | [–]                    | egyensúlyi deformáció                                                             |
| $\gamma_r$       | [–]                    | a Burgers-modell ( <i>pillanatnyi</i> ) rugalmas deformációja                     |
| $\gamma_k$       | [–]                    | a Burgers-modell késleltetett deformációja                                        |
| $\gamma_m$       | [–]                    | a Burgers-modell maradó deformációja                                              |
| $\gamma_{\max}$  | [–]                    | maximális deformáció                                                              |
| $\dot{\gamma}$   | [s <sup>-1</sup> ]     | deformáció-sebesség                                                               |
| $\dot{\gamma}_R$ | [s <sup>-1</sup> ]     | deformáció-sebesség a mérőfej peremén                                             |
| ${}^1\delta$     | [°]                    | fázisszög                                                                         |
| ${}^2\delta$     | [–]                    | szigmoid modell konstans paramétere                                               |
| $\lambda_1$      | [s]                    | retardációs idő a kúszási szakaszban                                              |
| $\lambda_2$      | [s]                    | retardációs idő a visszaalakulási szakaszban                                      |
| $\Phi$           | [–]                    | szilárd szemcsék térfogata                                                        |
| $\Phi_m$         | [–]                    | maximális térkitöltés                                                             |
| $\Phi/\Phi_m$    | [–]                    | térfogatarány                                                                     |
| $\sigma$         | [Pa]                   | húzófeszültség                                                                    |
| $\sigma_0$       | [Pa]                   | feszültség amplitúdó                                                              |
| ${}^1\tau$       | [Pa]                   | nyírófeszültség                                                                   |
| ${}^2\tau$       | [s]                    | retardációs idő                                                                   |
| ${}^3\tau$       | [s]                    | Huet–Sayegh-modell időtényezője                                                   |
| ${}^1\tau_0$     | [Pa]                   | folyáshatár                                                                       |
| ${}^2\tau_0$     | [Pa]                   | kúszásvizsgálat során alkalmazott konstans nyírófeszültség                        |
| ${}^1\eta$       | [Pa·s]                 | dinamikai viszkozitás                                                             |
| ${}^2\eta$       | [Pa·s]                 | diszperzió viszkozitása az Einstein-egyenletben                                   |
| ${}^1\eta_0$     | [Pa·s]                 | 0 deformáció-sebességhez tartozó dinamikai viszkozitás ( <i>nullviszkozitás</i> ) |
| ${}^2\eta_0$     | [Pa·s]                 | közeg viszkozitása az Einstein-egyenletben                                        |
| $\eta_1$         | [Pa·s]                 | a Maxwell-modell viszkozitása                                                     |
| $\eta_2$         | [Pa·s]                 | a Voigt-Kelvin-modell viszkozitása                                                |
| $\eta_B$         | [Pa·s]                 | Bingham viszkozitás                                                               |
| $\eta_r$         | [–]                    | relatív viszkozitás                                                               |
| $\eta_{ss}$      | [Pa·s]                 | egyensúlyi viszkozitás                                                            |
| $[\eta]$         | [–]                    | határviszkozitás                                                                  |
| $\eta^*$         | [Pa·s]                 | komplex viszkozitás                                                               |
| $\omega$         | [rad·s <sup>-1</sup> ] | körfrekvencia                                                                     |
| $\omega_c$       | [rad·s <sup>-1</sup> ] | keresztelési frekvencia                                                           |
| $\Omega$         | [rad·s <sup>-1</sup> ] | szögsebesség                                                                      |
| $\tilde{\nu}$    | [cm <sup>-1</sup> ]    | hullámszám                                                                        |

#### Rövidítések

|      |                                                   |
|------|---------------------------------------------------|
| BET  | Brunauer-Emmett-Teller-féle fajlagos felület      |
| BBR  | hasábhajlító reométer                             |
| DSC  | differenciális pásztázó kalorimetria              |
| DSR  | dinamikus nyíróreométer                           |
| DTA  | differenciális termoanalitika                     |
| DTG  | differenciális termogravimetria                   |
| EDS  | energia diszperzív röntgen spektroszkópia         |
| FTIR | Fourier transzformációs Infravörös spektroszkópia |
| LVE  | lineáris viszkoelasztikuság                       |
| SEM  | pásztázó elektronmikroszkóp                       |
| SHRP | Strategic Highway Research Program                |
| TG   | termogravimetria                                  |
| WLF  | Williams-Landell-Ferry egyenlet                   |
| XRD  | röntgen pordiffrakció                             |

**Bevezetés, célkitűzések**

Az első ismert úthálózatot időszámításunk előtt 3000 évvel Kínában, természetes aszfalt felhasználásával előállított utakat pedig, i.e. 600 körül építettek Mezopotámiában [1]. A hazai aszfalt utak építése a XIX. század második feléig nyúlik vissza. A Magyar Aszfalt Rt. útépítő vállalat megalapítását követően 1864-ben indult meg a döngölt aszfalt, valamint az öntött aszfalt kopórétegek gyártása és beépítése [2]. A kor technikai adottságaihoz mérten a következő évtizedekben lassú ütemben terjedtek el az aszfaltút hálózatok. A motorizáció fejlődésének, valamint az életszínvonal növekedésének köszönhetően a korábbiakhoz képest komolyabb előrelépés csak az 1960-as években történt [3]. Az első autópályát – az M1-es és M7-es közös szakaszát – 1964-ben építették. 2002-ig csak lassan haladt a hazai gyorsforgalmi úthálózat fejlődése: a közel 40 év alatt mintegy 500 km hosszúságú autópálya épült. Ugyanakkor 2008-ra az autópálya-építési programnak köszönhetően az autópályák hossza majdnem megduplázódott, 911 km hosszúságú gyorsforgalmi úthálózat készült el, az autótúthálózat pedig jelentősen, közel négyszeresére bővült [3, 4].

Az aszfaltanyagok készítéséhez a bitumen kötőanyag mellett pontos receptúra szerint adagolt, különböző szemcse nagyság szerint osztályozott (*zúzalék, homok, töltőanyag*) ásványi anyagokra van szükség. Magyarország földrajzi adottságainak köszönhetően jó minőségű, bőséges ásványkincsekkel rendelkezik [5], melyek kiválóan alkalmazhatóak az építőipar számos területén. Aszfalttechnológiai szempontból az ásványi anyagok szemmegoszlása kiemelt fontosságú, különösképpen nagy hangsúlyt kell fektetni a legfinomabb frakcióra, a töltőanyagra. Ez a 0,063 mm-es szemcseméretnél finomabb anyagalmaz fontos alkotórésze a burkolatnak, mivel bitumennel keverve (*aszfalthabarc*) stabilizáló szerepet tölt be, és egyfajta aktív komponensként növeli az útpályaszerkezet merevségét [6, 7, 8, 9, 10]. A töltőanyag ásványi összetétele, morfológiája, felületi tulajdonságai, granulometrikus összetétele, valamint mennyisége egyaránt befolyásolják a burkolat tulajdonságait, így az élettartamát. A különböző típusú ásványi anyagok alkalmazása a földrajzi adottságoknak köszönhetően országonként eltérő. Jelenleg is zajlanak kutatások a természetes állapotukban előforduló töltőanyagok egyéb alternatív adalékanyagok általi kiváltására [11, 12, 13, 14, 15]. Az aszfaltburkolatok egyik tipikus tönkremeneteli jelensége a keréknyomvályú. Ennek oka a nyári üzemi hőmérsékleten forgalom hatására keletkező húzó- és nyomófeszültségekben keresendő. A mechanikai feszültségek hatására bekövetkező alakváltozás nagysága függ a hőmérséklettől, a bitumen reológiai/folyási tulajdonságaitól, az aszfalt ásványi vázának belső súrlódásától, a kerékterhelés nagyságától és sebességétől, valamint az aszfaltrétegek alatt elhelyezkedő talajréteg szerkezetétől [16]. Az előzőekben említettek alapján belátható, hogy

az aszfalttechnológiai kutatások irányai széleskörűek, az egyre jobb minőségű burkolatanyagok fejlesztése úgy anyagtudományi, mind gazdasági jelentőségű. Ezeket szem előtt tartva kutatómunkám során az alábbi célokat tűztem ki:

- A hazai aszfaltútépítésben elterjedten használt ásványi töltőanyag (*BAUMIT mészkőliszt, Alsózsolcai üzem; származási hely: Mexikóvölgy*), valamint ennek esetleges kiváltására, a jelenlegi mennyiségének csökkentésére szánt – de tulajdonságait tekintve a mészkőliszthez hasonlító – ásványi anyag (*Saint-Gobain Weber-Terranova dolomit<sup>1</sup>; származási hely: Pilisvörösvár*) hasznosíthatósági lehetőségeit kívánom feltárni.
- Mivel a bitumen és az ásványi töltőanyag közötti kölcsönhatás erőssége az alkotórészek anyagtulajdonságaitól függenek, ezért szükségesnek tartom az alapanyagok átfogó vizsgálatát. A töltőanyagok ásványtani, fizikai, termikus, morfológiai és felületi tulajdonságainak feltérképezése mellett a bitumen összetételének és termikus tulajdonságainak vizsgálatát kívánom elvégezni, melyek hozzájárulnak ezen töltőanyagok aszfaltkeverékekben betöltött szerepének, hatásmechanizmusának megértéséhez.
- A két töltőanyag, valamint egy széleskörűen alkalmazott útépítési bitumen (*B 50/70 Százhalombatta, MOL*) felhasználásával aszfalthabarc-keverékeket kívánok elkészíteni, melyek komplex reológiai (*statikus és dinamikus*) vizsgálatai hozzájárulnak a nyomvályúsodás, mint jellemző tönkremeneteli jelenség okának megértéséhez.
- Fel kívánom tárni az aszfalthabarcok reológiai viselkedését leíró anyagmodelleket és meghatározni azok modellparamétereit, valamint viszkoelasztikus tulajdonságait.
- A reológiai vizsgálatok nagymértékben hozzájárulnak a hazai aszfaltburkolatok forgalom hatására végbemenő viselkedésének tanulmányozásában. Az eredményekkel jól modellezhetőek mind a nyári üzemi hőmérsékleten, forgalom hatására bekövetkező tönkremeneteli jelenségek, mind pedig az aszfaltkeverékek bedolgozása során fellépő folyamatok is.

---

<sup>1</sup>Kutatási tevékenységem során egy korábban publikált cikkem felkeltette az érdeklődését a Saint-Gobain Weber-Terranova Kft.-nek, amely vakolatanyagok előállítására céljából használ fel nagy mennyiségű dolomitot. A megkeresés célja a cég által felhasznált dolomitörlemény aszfalt töltőanyagként történő alkalmazhatóságának vizsgálata volt. A kutatási projekt eredményei arra ösztönöztek, hogy további vizsgálatokkal feltárjam a dolomit bitumennel kialakított kapcsolatát és az aszfalthabarcban betöltött szerepét.

## 1. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

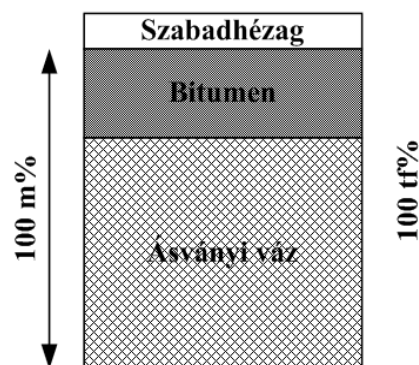
### 1.1. Az aszfalt, mint szerkezeti építőanyag

Aszfaltnak nevezzük azokat a természetes, vagy ipari úton előállított anyagokat, melyekben szilárd szemcsés ásványi adalékanyagot bitumen kötőanyag von be [6, 7]. Ásványi anyagok lehetnek természetes úton aprózódott kőzetek; illetve eruptív (*vulkáni eredetű*), vagy üledékes kőzetekből aprítással előállított különböző szemcseméretű (*zúzottkövek, homokok, töltőanyagok*) köanyag halmazok [17]. A bitument a kőolajgyártási technológia során állítják elő, mint mellékterméket. Útépítésre használt bitumeneket gudron (*lepárlási maradék*) [18, 19] fűtésével, majd a keletkező termék ismételt gudronnal történő keverésével készítik.

Az aszfalttrétegek gyártási technológiájukat tekintve különböző módszerek alapján oszthatóak fel [1]. Bedolgozási hőmérsékletük alapján megkülönböztetünk forró-, meleg-, félmeleg- és hidegaszfaltozási technológiát. A kötőanyag ásványi adalékanyagba juttatása szerint pedig további három csoport írható fel:

- Permetezési eljárással készült aszfaltok: a bitument magas hőmérsékleten permetezik a kívánt felületre.
- Főzéssel–keveréssel készült aszfaltok: a kötőanyagot nagy mennyiségű finom ásványi anyagokkal keverik, főzik (*masztikálás*), amivel egy légbuborékmentes, homogén állapotot érnek el. Ezzel az eljárással készítik a kétfázisú öntött aszfaltot, melyet elterítve hengerlés nélkül is tömör állapotú burkolat készíthető.
- Kevert háromfázisú aszfaltok (*aszfaltbeton típusú anyagok*): Az ásványi anyag meghatározott szemeloszlásával, optimális mennyiségű kötőanyag felhasználásával, adott szabadhézag tartalommal tervezik és készítik. A beépítést, tömörítést követően a burkolat megfelelő szilárdságúvá, teherbíróvá válik.

Ahogy az 1. ábra is mutatja, az aszfaltbeton típusú anyagok tömegviszonyaikat tekintve kétfázisú anyagként, térfogatviszonyai alapján pedig háromfázisú rendszerként jellemezhetők. Kétfázisúak, mert fizikálisan csupán az adalék szemcséi és az azokat összeragasztó kötőanyag rendelkezik tömeggel. Ugyanakkor háromfázisú anyagrendszerként is felfoghatóak, mivel a szemcsék érintkezési felületei között – a véletlenszerű térkitöltés következtében is – marad levegő, amelynek tömege elhanyagolható.



1. ábra. Aszfaltbeton szerkezete – tömeg-, és térfogatviszonyok [1]



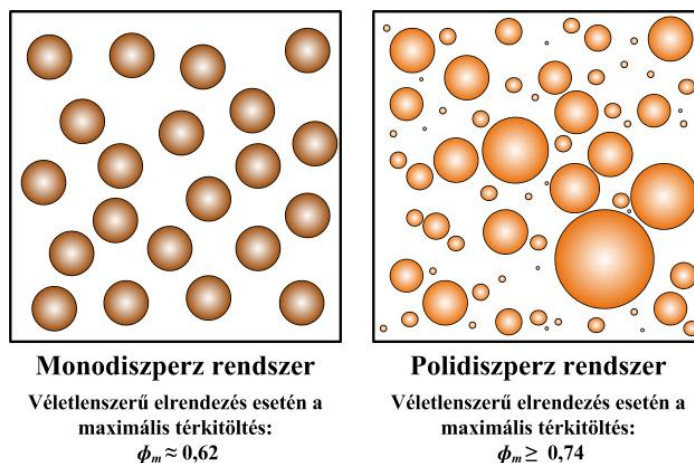
### 1.1.1. Az ásványi váz

Az ÚT 2-3.301-1:2010 Útügyi Műszaki Előírás alapján [17] az „*ásványi alapanyagok a különféle természetes állapotban felhasznált ásványi anyagok, az ásványi anyagok osztályozásával, az ásványi anyagok törésével, zúzásával és osztályozásával előállított anyagok, vagy termékek. Ásványi alapanyagok fogalmkörébe tartoznak továbbá az Útügyi Műszaki Előírás szerint felhasználható kohósalak-zúzalékok, és aszfaltgranulátumok is.*” Eredetük szerint lehetnek természetes bányászott alapanyagok, vagy aprítógépekkel összetört zúzalékok. Szemcseméretük alapján a következő osztályokba sorolhatóak:

- Kőanyag ( $d > 2,0 \text{ mm}$ )
- Homok ( $2,0 \text{ mm} > d > 0,063 \text{ mm}$ )
- Töltőanyag /filler/ ( $d < 0,063 \text{ mm}$ )

Az aszfalt gyártásához olyan kőanyagokat (zúzottkövet, kavicsot) alkalmaznak, amelyet nagyszilárdságú közet, vagy nagyszemcsés kavics zúzásából állítanak elő. A burkolat mechanikai szilárdságát adó, a terhelést nagyrészt elviselő kőanyagok ásványi, fizikai és felületi tulajdonságai kedvezőek kell legyenek, melyekhez a kötőanyag jól képes tapadni. A burkolat szilárdságát biztosítja a köváz megfelelő granulometrikus összetétele is. Az ásványi anyagok szemcseeloszlása az aszfaltkeveréken belül a durva szemcséktől a finom szemcsékig változik, tehát a köváz tulajdonképpen egy polidiszperz rendszerként fogható fel, amely a teret optimális esetben, véletlenszerű elrendeződés esetén 74%-ban tudja kitölteni (2. ábra)

[20]. Köszönhető ez annak, hogy a nagyobb szemcsék közötti térbe a kisebb méretű szemcsék beékelődnek, csökkentve így az anyaghalmazban jelen lévő üres tér mennyiségét (*hézagtérfogat*). Ennek alapján elmondható tehát, hogy véletlenszerű elrendezés esetén akár 74 térfogatszázaléknyi ásványi anyag mellett mintegy 26



2. ábra. Mono- és polidiszperz rendszerek és maximális térkitöltési tényezőjük [20]

térfogatszázaléknyi szabad hézagtartalom lehet jelen. Monodiszperz rendszereknél a homogén szemcseméret miatt megnő a hézagtérfogat, a maximális térkitöltés pedig lecsökken. Ilyen szemcsék bitumenbe keverése esetén már kevesebb mennyiség is növeli a folyékony kötőanyag viszkozitását. Polidiszperz anyagok felhasználásakor azonban nagyobb

mennyiségre van szükség a viszkozitás és a merevség növeléséhez. Minél nagyobb a finom részek mennyisége, annál nagyobb az ásványi anyag fajlagos felülete, és ennek következtében megnő annak stabilizáló, adszorbeáló képessége is. Az aszfaltkeverékben tömörítés után a bitumennel megfelelő mértékben bevont ásványi váz mellett a teret még az anyagrendszerben lévő hézag tölti ki.

A hazai utak gyártásához jellemzően andezit és bazalt zúzalékokat használnak fel. Aszfalttechnológiai szempontból fontos a zúzottkő és kavics egynemű szilárdsága [6, 7], emellett további követelmény, hogy a kőváz szennyeződésektől is mentes legyen, ugyanis a nemkívánatos anyagok csökkentik a bitumennel történő bevonás mértékét. Amennyiben a kőanyag agyagásványokban dúsult, úgy mechanikai szilárdsága is kisebb lesz, forgalom hatására pedig könnyebben aprózódhat, előidézve így a burkolat idő előtti tönkremenetelét.

Homok esetén törekedni kell arra, hogy annak összetétele ne változzon meg; megfelelően tiszta legyen, szemeloszlásának pedig biztosítania kell az aszfaltkeverék optimális tömörségét. Bányászott és folyami homok egyaránt felhasználható, a belső súrlódás növelése érdekében azonban előnyös az aprítás miatt érdesebb felületű bányászott homokokat kiválasztani [21].

Az ásványi kőváz legfinomabb frakciói a töltőanyagok, melyként azok az anyagok használhatóak fel, amelyek az ÚT 2-3.602:2008 Útügyi Műszaki Előírás követelményeinek eleget tesznek [22]:

- légszáraz állapotban csomómentesek legyenek,
- tömörítés utáni szabad hézagterfogatuk 25 – 40 tf % lehet,
- a töltőanyagból készített habarcsok 160 °C-on egyenletesen keverhetők és önthetők legyenek.

A töltőanyagok jelentős szerepet töltenek be az ásványi keverékben. Mennyiségüktől és tulajdonságaiktól nagymértékben függenek az aszfaltbeton következő tulajdonságai [6, 9, 21, 23, 24]:

- a bitumen kővázhoz történő tapadása,
- az aszfalt bedolgozhatósága (*tömöríthetősége*),
- a vízérzékenység,
- az aszfalt öregedése,
- az aszfaltburkolat nyomvályúsodással szembeni ellenállása.

Töltőanyagként elsősorban karbonátos kőzeteket célszerű felhasználni, mint például a bázikus tulajdonságú, a bitumenhez igen jól tapadó örölt mészkőlisztet [25].

### 1.1.2. Az aszfalt kötőanyaga: a bitumen

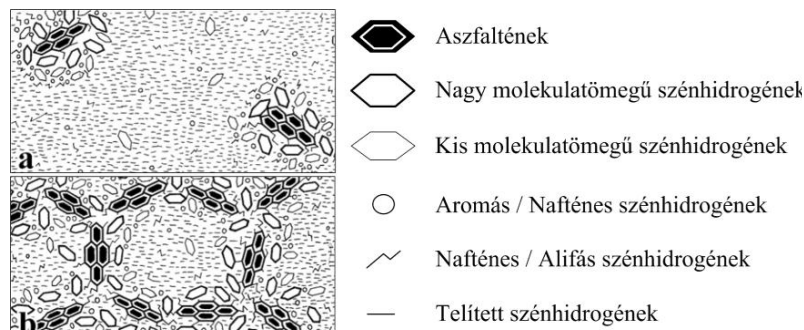
A bitumen az aszfalt szerves kötőanyaga. Meghatározását már sokan próbálták leírni, többé-kevésbé pontosan, a jelenleg elfogadott definíció szerint azonban a bitumen *„gyakorlatilag nem illékony, adhezív, vízálló anyag, amely természetes formájában fellelhető, vagy nyersolaj lepárlással előállítható. Nagy részben, vagy egészében toluolban oldható, szobahőmérsékleten pedig nagyon viszkózus, vagy szinte szilárd halmazállapotú”* [26, 27, 28]. Ipari méretekben a nyersolaj atmoszférikus lepárlásával, majd vákuum-desztillációval és fúvatással állítják elő [29]. Gyártásához a nyersolaj lepárlási maradékát, a gudront használják fel, melyet fúvatási technológiával gyártanak. Az így keletkezett termékből újbóli gudron hozzákeverésével különböző típusú bitumeneket készítenek [30].

Összetételét tekintve a bitumen számos szénhidrogén vegyületből áll. Általános elemi összetétele alapján 80–85 tömegszázaléknyi szén, 9–10 % hidrogén, illetve egyéb alkotóelem (oxigén, kén, nitrogén, egyéb fémek) építi fel. A kötőanyag nagy molekulájú, paraffinos, nafténes és aromás jellegű csoportok kombinációjából épül fel, melyek tulajdonságai (kémiai jelleg, molekulaméret) között folytonos az átmenet. Mivel az egyedi vegyületek elkülönítése és megkülönböztetése rendkívül nehéz, ezért a bitumeneket kémiai és fizikai tulajdonságú anyagsorozatjaik szerint szokás jellemezni [1, 6]:

- aszfaltén: a leginkább felületaktív komponensként nagy molekulatömegű, nagy molekulákból álló rész, melyben a C:H arány 4:1. Szerepe a bitumen kötőképeségének biztosítása. Átlagos mennyisége 8–30%. Az aszfaltén tartalom növelésével nő a bitumen viszkozitása, szilárdsága, hőállósága és lágyuláspontja. Benzinnel történő szétválasztása után a bitumenben az ún. maltén fázis marad, mely olajos részből, és gyantás részből áll.
- gyantás rész: közepes molekulatömegű és nagyságú anyagrész, amely a bitumen rugalmasságáért felelős. A bitumenben átlagosan 15–30%-nyi gyantatartalom fordul elő.
- olajos rész: kis molekulatömegű, kisebb molekulákból álló szerves anyagrész, melyben a C:H arány 1:4. Emiatt ez a rendszer könnyű, kis viszkozitású, így a bitumen nyúlékonyságát és folyékonyságát befolyásolja. A bitumenek átlagos olajtartalma 45% és 60 % közötti.
- aszfaltogén savak: olyan gyantyszerű vegyületek, melyek a bitumen és az ásványi anyag közötti tapadást befolyásolják, a bitumenben pedig minimális (<1 %) mennyiségben fordulnak elő.

A bitumen kolloid diszperz rendszerként is jellemezhető. Szerkezetére vonatkozó feltételezéseit először Rosinger [31] 1914-ben írta le, azonban az első igazán megbízható definíció Nellensteyn nevéhez fűződik [32]. Meglátása szerint az aszfaltén részecskék szerkezetükben nagyon hasonlítanak a szabad szénre, a maltén fázison belül pedig kolloid szuszpenziót képeznek.

A bitumenben az aszfaltén részecskék a diszpergált fázist, az olaj pedig a folytonos fázist képezi. A gyantás részek az aszfalténeken adszorbeálódnak, így egyfajta védő szerepet töltenek be. Az



3. ábra. A bitumenek kolloid modellje: szol (a) és gél (b) típusú bitumenek [35]

adszorbeált gyanták és az aszfaltének micellák formájában agglomerálódnak. A kötőanyagok gyanta- és aszfalténtartalmának függvényében kétféle típus különböztethető meg; 1. szol típusú bitumenek: ezekre a nagy gyantatartalom, és kis aszfaltén-tartalom jellemző; 2. gél típusú bitumenek: nagy aszfalténtartalom, kis gyantatartalom esetén alakulnak ki. Szerkezeti értelemben véve a szol típus akkor jön létre, amikor az aszfaltén micellák teljesen diszpergálódnak és egymással nem érintkeznek (3. ábra-a)). Pfeiffer és munkatársai [33] a kolloid modell továbbfejlesztése során a szol és gél típusú bitumenek reológiai tulajdonságai közötti különbségeket igyekeztek feltárni. Eredményeik alapján a szol típusú bitumenek jellemzően newtoni anyagként, míg a gél típusúak erősen nem-newtoni anyagként viselkedtek. A nem-newtoni viselkedés eredetét a gél szerkezetnek tulajdonították (3. ábra-b)), amiben az aszfaltén micellák teljes mértékben érintkeznek egymással [27, 34, 35]. Hőmérséklet és oxidáció hatására a bitumenben lévő vegyületcsoportok átalakulhatnak, így az olajokból gyanták, a gyantákból pedig aszfaltének keletkezhetnek. A bitumenek tehát bonyolult összetételükből és jellegükből adódóan a szilárd és folyékony halmazállapotú anyagok közötti átmeneti helyet foglalják el, fizikai tulajdonságukat pedig a hőmérséklet függvényében erősen változtatják. Alacsony hőmérsékleten szilárd – reológiai szempontból rugalmas (*elasztikus*) – anyagként, magas hőmérsékleten pedig folyékony (*viszkózus*) anyagként viselkednek [36, 37]. Mivel a köztes hőmérséklet-tartományban a bitumen a két halmazállapot átmeneti, *viszkoelasztikus* anyagrendszereként jellemezhető, így az aszfaltkeverékek készítéséhez is ezen előnyös tulajdonságát használják fel. A magas hőmérsékleten kis viszkozitással rendelkező kötőanyag az ásványi szemcsékkel nagyon jól keverhető, a beépítést követő lehűlés után pedig nagy viszkozitású, kellően szilárd, kompozit

anyagrendszert alkotnak. A bitumenek fizikai és kémiai összetétele egyaránt meghatározza a burkolatban betöltött szerepüket. Utak tervezésekor az alábbi szempontokat figyelembe véve kell a megfelelő kötőanyagot megválasztani:

- a közetszemcséket megfelelően vonja be, azokhoz jól tapadjon;
- felhasználhatósági hőmérséklet-tartománya széles legyen. Ez azt jelenti, hogy alacsony hőmérsékleten ne legyen rideg, repedésre hajlamos, magas hőmérsékleten pedig kellően magas lágyulásponttal rendelkezzen;
- legyen hőálló, a melegaszfaltok előállítási hőmérsékletén ne szenvedjen szerkezeti változásokat;
- csekély mértékben öregedjen.

### 1.1.3. A töltőanyagok szerepe és jelentősége az aszfaltban

Számos kutatás eredménye megerősíti, hogy a meleg aszfaltkeverékek ásványi anyagának legfontosabb szerepét a töltőanyagok játsszák [6, 9, 10, 24, 38, 39, 40]. P. V. Sakharov szerint a finomszemcsés ásványi töltőanyagok hatása azon alapszik, hogy finomságukkal, felületi karakterisztikájukkal egy interaktív szerepet töltenek be. A bitumennel együtt egyfajta aktív komponenssé válnak (*aszfalthatarcs*), amelyek az ásványi váz szemcséit egymáshoz „ragasztják” [41]. Az alábbi tulajdonságok erősen befolyásolják az aszfaltbeton tulajdonságait:

- ásványi összetétel,
- felületi tulajdonságok,
- makroszerkezet,
- mikroszerkezet,
- szemcsék mennyisége, térfogataránya.

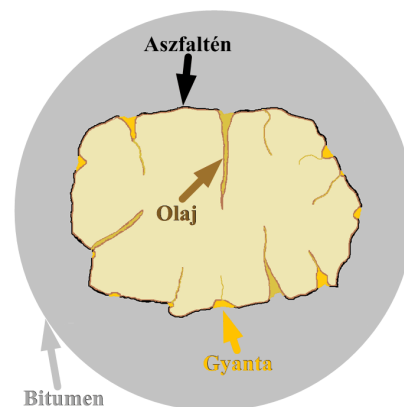
Az aszfaltkeverék ásványi kövázában lévő finomszemcsés töltőanyagok fajlagos felülete a többi szemcséhez képest igen nagy, emiatt a keverékben lévő bitumen nagy részét képesek adszorbeálni. Töltőanyagként – akárcsak a nagyobb frakciójú kőzetek esetében már ismertetésre került – a bázikus, karbonátos kőzetek aprításából származó anyagokat célszerű alkalmazni. Ezek a kőzetek hidrofób tulajdonságúak, amely a kötőanyag adszorpciója szempontjából kedvező. A töltőanyagok megválasztása esetén fontos szempont, hogy az ásványi anyag kellően tiszta legyen. Az agyagásványok jelenléte például kedvezőtlen, mivel csökkenti a mechanikai szilárdságot, az aprózódással szembeni ellenálló-képességet, végső soron a burkolat tervezettnél korábbi tönkremeneteléhez vezethet [6, 25, 42].

A töltőanyagok ásványi összetétele a felületükön lezajló jelenségeket is befolyásolja. A bitumennel történő kapcsolat kialakítása fizikai és kémiai adszorpcióval történhet. Fizikai adszorpció esetén a bitumen/töltőanyag szemcse határfelületén – a Van der Waals-kötésnek köszönhetően – vékony bitumenhártya (*bitumenfilm*) alakul ki néhány molekulavastagságú rétegben, és a töltőanyag a bitumen egy részét leköti a felületén. Amikor a kötőanyag és a szemcse között kémiai vegyületek képződnek, a kémiai adszorpció (*kemoszorpció*) játszik szerepet. Ennél a jelenségnél egy monomolekuláris réteg alakul ki, amely az ásványi anyag és a kötőanyag közötti legerősebb kapcsolatot képes kialakítani. A folyamat erősen hőmérsékletfüggő, mivel a hőmérséklet emelkedésével egyre intenzívebb, míg annak csökkentésével hosszabbá válik.

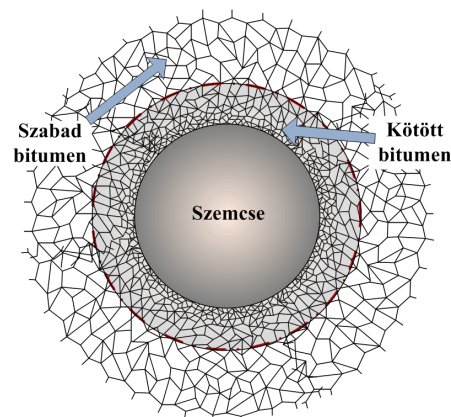
Amikor a bitumen és az ásványi anyag egy jellemző hőmérsékleten<sup>2</sup> kapcsolatba lép egymással, a bitumen folyékony komponensei adszorbeálódnak az ásványi anyag felületén. Ez a jelenség a bitumen, mint diszperziós közeg mennyiségét csökkenti, növelve így a rendszer merevségét.

Lisihina [43] karbonátos és bázikus kőzeteken végzett kísérleteket a bitumen adszorpciójával kapcsolatban. Arra a következtetésre jutott, hogy a savas kőzetekkel szemben ezek az anyagok egységnyi felületükön sokkal több kötőanyagot képesek megkötni.

Az adszorpció azonban alkotórészekről függően különböző módokon mehet végbe. Azok az ásványi anyagok, amelyek nagy porozitással rendelkeznek, a bitumen komponenseit szelektív diffúzióval képesek megkötni a felületükön (4. ábra). Az ásványi anyagok felületi jellege, ásványi összetétele, a pórusok mérete és elhelyezkedése, valamint a bitumen tulajdonságai egyaránt hatással vannak a jelenségre. Az aszfaltén, mint a legnagyobb felületaktív komponens a szemcse felületén adszorbeálódik. A felületen előforduló kisebb pórusokat a bitumen gyantás része tölti ki, míg a legkisebb aktivitású olajok a szemcsék kapillárisaiba hatolnak be [6]. Elmondható tehát, hogy a töltőanyagok



4. ábra. A bitumen alkotórészeinek adszorpciója porózus ásványi szemcse felületén

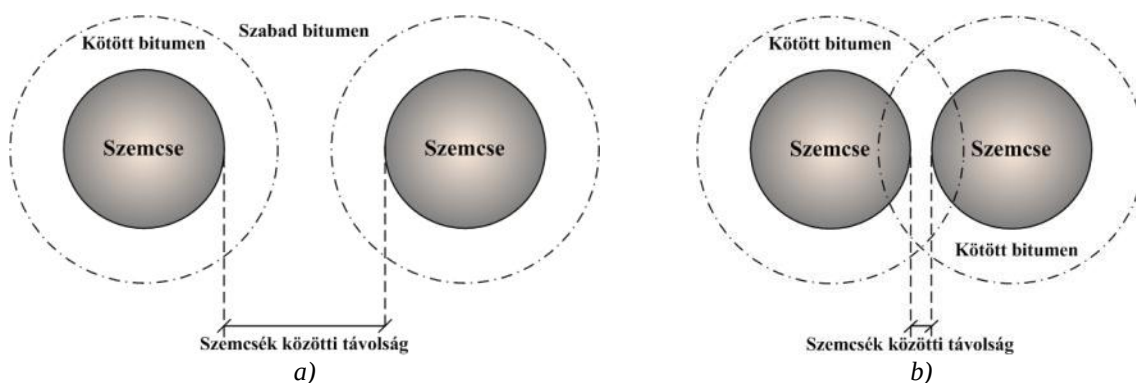


5. ábra. Diffúziós bitumenhártya kialakulása a töltőanyag szemcse felületén [6]

<sup>2</sup>Keveréskor a bitumen hőmérséklete: 150 °C a kövázé pedig 200–230 °C körüli. A kész aszfaltkeverék hőmérsékletének pedig 140–180 °C között kell lennie.

felületi jellege, porozitása a bitumennel való kötést erősen befolyásolja. Az alkotórészek szelektív diffúziója miatt ugyanis a bitumenfilmben megnő az aszfaltén mennyisége, ami a felületi réteg viszkozitásának növekedését eredményezi. Végiggondolva a folyamatot tehát, a szemcse határfelületén kialakuló diffúziós bitumenhártya viszkozitása a szemcséhez közel nagyobb, míg távolodva kisebb viszkozitásúvá válik. A szemcsékhez közel adszorbeált, kötött bitumen, míg távolabb a gyengébben kötött szabad bitumen zónája alakul ki (5. ábra).

Ha a finom szemcsék mennyisége növekszik, akkor egységnyi térfogatban csökken a bitumenfilm vastagsága, az egymással érintkező szemcsék pedig kétféle módon kapcsolódhatnak. Egyik esetben a szemcsék a szabad bitumen zónájában érintkezhetnek egymással. Ekkor a szemcsék közötti távolság nagy, és a kötés erősségét a kisebb viszkozitású és szilárdságú szabad bitumen határozza meg (6. ábra-a)). Amennyiben a szemcsék közelebb kerülnek egymáshoz (*a finomrész mennyiségének növelése, vagy tömörítés hatására*) és a diffúziós hártya kötött bitumenén keresztül kapcsolódnak, akkor a zóna nagy viszkozitása miatt erősebb kölcsönhatás alakul ki. (6. ábra-b)).



**6. ábra.** A töltőanyag szemcsék egymásra hatásának szemléltetése különböző érintkezési felületek mellett

Maidanova és Rozental [44] szerint a bitumen adszorpcióját az alábbi tényezők határozzák meg: az ásványi anyag fajlagos felülete és aktivitása, valamint a bitumen egyes alkotórészeinek mennyisége. Véleményük szerint a bitumen-töltőanyag anyagrendszerben létezik egy adszorpciós határ, amelynek mértékét a töltőanyag fajlagos felülete határozza meg. A szerzők szerint az ásványi anyagok felületén végbemenő adszorpcióért a bitument alkotó aromás olajok a felelősek.

A töltőanyagok geometriája, mérete és felületi aktivitása egyaránt befolyásolja a bitumennel kialakított kapcsolatot. A felületen kialakuló fizikai-kémiai mechanizmusok vizsgálatával Craus és munkatársai (1978) foglalkoztak [45]. Megállapították, hogy az ásványi anyagok nagyobb felületi aktivitása elősegíti a töltőanyag-bitumen határfelületén kialakuló kötés erősségét, és növeli a kötött bitumen mennyiségét. Lesueur [27] összefoglaló munkájában a mészkövet egyfajta „aktív töltőanyagként” jellemezte. Véleménye szerint a bitument alkotó

aszfaltének valószínűleg egy adszorpciós rétegen keresztül veszik körül a mészkőszemcséket. Azt is feltételezte, hogy ezek az adszorpciós rétegek nem csupán a mészkő esetén alakulnak ki, hanem a töltőanyag típusától függetlenül mindig létrejönnek.

#### 1.1.4. A töltőanyagok hasznosíthatósága

A töltőanyagok aszfaltkeverékekben történő hasznosítási lehetőségeinek tanulmányozása már az 1970-es években elkezdődött. Első ízben *Anderson* és *Goetz* [46] foglalkozott a finomszemcsés ásványi anyagok, mint aszfalterősítő összetevők mechanikai hatásaival. Megállapították, hogy mind a töltőanyagok szemcsemérete, mind pedig a bitumen kötőanyag összetétele szignifikánsan befolyásolja az aszfaltburkolatok merevségét. A '90-es években *Harris* és *Stuart* [47], *Kavussi* és *Hicks* [48], valamint *Cooley* és munkatársai [49] végeztek kísérleteket különböző típusú töltőanyagok felhasználásával készített aszfaltkeverékeken. *Hu*, *Zhang* és *Wang* [50] kutatásaik során olyan ásványi anyagokat vizsgáltak, amelyek kiválthatják a hagyományos töltőanyagokat, és emellett fokozzák a burkolat tűzállóságát. A szerzők szerint az aszfalt szerkezetét nagymértékben befolyásolja a töltőanyag és a bitumen kapcsolata. Minél nagyobb a bitumen és a szemcsék közötti kötés erőssége, annál nagyobb lesz az aszfalt szilárdsága is. Ugyanakkor a kötés erőssége a bitumenfilm vastagságától is függ. *Hu* és társai szerint ez a vastagság kifejezhető a bitumen mennyiségének és az ásványi váz fajlagos felületének hányadosával. A szilárdság szempontjából a legoptimálisabb, ha a megkötött bitumen mennyiségén kívül a rendszerben nincs bitumenfelesleg, azaz nincs szabad bitumen. *Lesueur* [51] összefoglaló munkájában a töltőanyagok és a bitumen kölcsönhatását is vizsgálta. Mechanikai és fizikai-kémiai módszerek segítségével igyekezett feltárni a töltőanyag – bitumen kölcsönhatás szorosságát. Kiemelt tulajdonságoknak tekintette a töltőanyagok sűrűségét, szemcseméretét, és szemcseeloszlását, valamint szárazon tömörített hézagterfogatukat. Véleménye szerint a burkolat merevsége szempontjából meghatározó szerepet játszanak az aszfalthabarcok reológiai tulajdonságai. Vizsgálta továbbá a mészhidrát, mint speciális töltőanyag aszfaltkeverékekben betöltött szerepét is [52]. A szakirodalom a mészhidrátot, mint egy ún. aktív töltőanyagot jellemzi [53]. Sajátos kölcsönhatás alakulhat ki a szemcsék és a bitumen aszfaltén-részecskéi között, melynek oka valószínűleg az ásványi szemcséket körülvevő aszfaltén adszorpciós rétegének kombinált hatása, valamint a mészhidrát nagy porozitása lehet.

#### 1.1.5. Aszfalthabarcok

Jelenlegi ismereteink szerint a hosszan fenntartható burkolat-alapanyag megtervezése szempontjából az aszfalthabarc tulajdonságai sokkal lényegesebbek, mint a bitumen



tulajdonságai [23, 54]. 1939-ben *Mitchell* és *Lee* eredményeik alapján azt a következtetést vonták le [55], hogy az aszfalthabarcok szuszpenzióknak tekinthetők. Ezt a nézőpontot *Rigden* [56] is megerősítette, aki rávilágított arra, hogy egy lényeges paraméter – az adalékanyag térfogataránya – nagymértékben befolyásolja a bitumenes kötőanyagokba kevert ásványi töltőanyagok erősítő szerepét. *Heukelom* és *Wijga* [57] átfogóan tanulmányozták az aszfalthabarcok viselkedését, és a következő viszkozitási törvény (1) megalkotásával leírták a töltőanyag térfogatarányában növekvő viszkozitás mértékét:

$$\eta = \eta_0 \cdot \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2} \quad (1)$$

Az aszfalthabarc tehát olyan szuszpenziós anyagrendszerként is felfogható, amely a szilárd szemcsék bitumen kötőanyagban történő diszpergálását jelenti. Ezeknek az anyagrendszereknek a viszkozitása matematikailag leírható, mellyel először *Einstein* [58, 59, 60] foglalkozott.

$$\eta = \eta_0(1 + k \cdot \phi) \quad (2)$$

Kutatásai során meghatározta a gömb alakú szemcséket tartalmazó anyagrendszerek relatív viszkozitását ( $\eta_r = \eta/\eta_0$ ). *Einstein* rámutatott arra, hogy a szuszpenzió viszkozitása – a feltételezhetően deformálhatatlan, gömbszerű részecskék körüli helyeken létrejövő feszültségkoncentráció hatása miatt – nagyobb, mint a közeg viszkozitása. A szuszpenzióban lévő összes feszültség kifejezhető a szuszpenzióból hiányzó és abban jelenlévő részecskék többletfeszültségeinek összegével. Így a szuszpenzió  $\eta$  viszkozitása egyszerűen adódik a (2) összefüggéssel. Megállapította, hogy ezen anyagok relatív viszkozitásai 0,05 térfogatarányig ( $\Phi$ ) függetlenek a közeg, valamint a szemcsék anyagi minőségétől. Az *Einstein-féle* egyenletben szereplő  $k$  tényezőt egyes esetekben határviszkozitásnak  $[\eta]$  is nevezik. Értéke kemény, gömbszerű anyagok esetén 2,5. Ez az egyenlet ebben a formájában azonban csak híg rendszerek (*néhány százaléknyi diszpergált fázis*) esetén érvényes, amikor is a szomszédos szemcsék közötti kölcsönhatás elenyésző. A nem gömbszerű, kemény részecskék esetében a szemcsealak határviszkozitást befolyásoló hatását is többen tanulmányozták (1. táblázat). Az ellipszoid részecskéket  $a/b$  – azaz a hosszú és rövid átmérők – arányával jellemezték. Nyilvánvaló, hogy a nyújtott szemcséknek nagyobb a határviszkozitása és még jellegzetesebb a dúsító hatása, mint a gömbszerű szemcséknek.

**1. táblázat.** A szemcsealak hatása a szuszpenzió határviszkozítására ellipszoid szemcsék különböző tengelyarányai esetén [61]

| $a/b$    | 0,1  | 0,2  | 0,5  | 1   | 2    | 5    | 10   |
|----------|------|------|------|-----|------|------|------|
| $[\eta]$ | 8,04 | 4,71 | 2,85 | 2,5 | 2,91 | 5,81 | 13,6 |

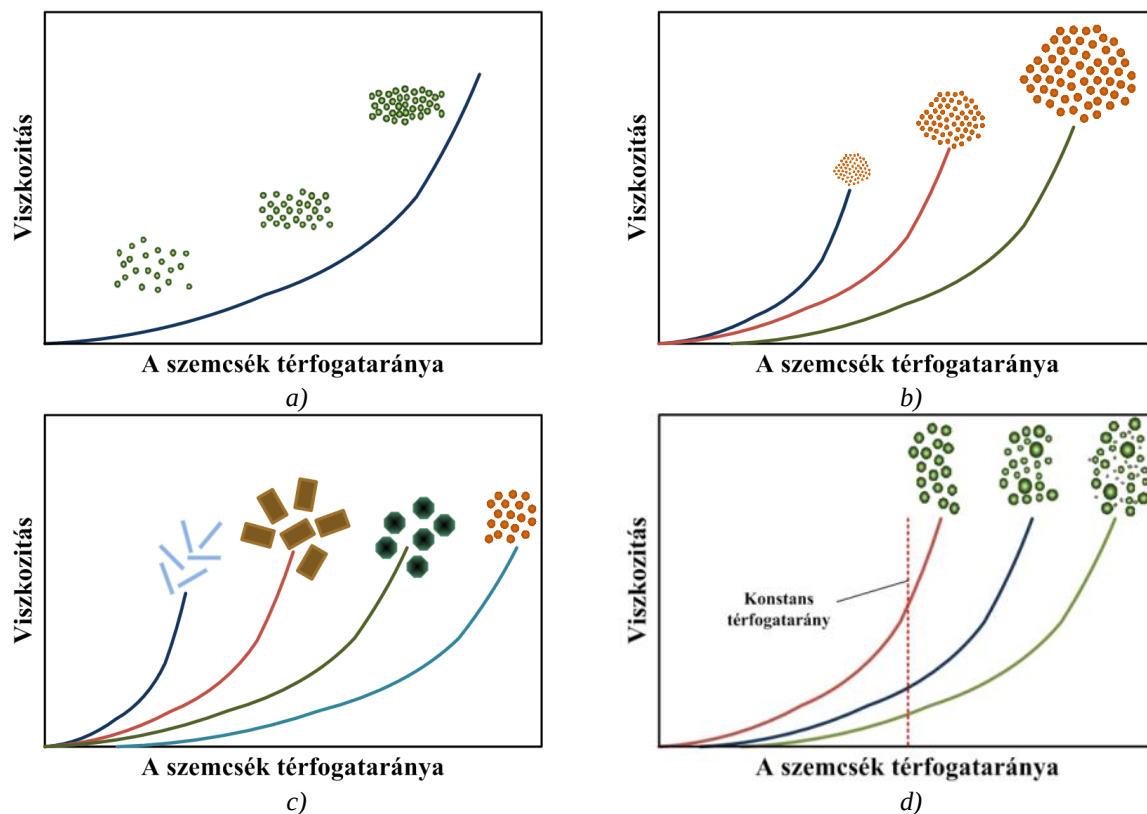
Einstein egyenletét Krieger és Dougherty fejlesztette tovább [62], akik már konkrétumként jelölték meg a határviszkozitást egyenletükben (3), amely nagyban hasonlít az (1) kifejezésre:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m} \quad (3)$$

Azt feltételezték, hogy a szemcsék mennyiségének hatása a szuszpenzió viszkozitása szempontjából a maximális térkitöltési tényezővel jól kifejezhető. Ha a szemcséket folyamatosan adagoljuk a folyékony fázisba, egy adott mennyiségnél a szemcsék feltorlódnak, ezáltal egy olyan folytonos kapcsolat alakul ki a szemcsék között, amely a folyást lehetetlenné teszi, azaz a viszkozitás végtelenné válik. Amikor a szemcsék térfogataránya miatt ez az állapot kialakul, a jelenséget maximális térkitöltési tényezővel ( $\Phi_m$ ) jellemezhetjük, melynek értéke a szemcsék elhelyezkedésétől, rendeződésétől függ. Reológiai szempontból három állapot írható le a térfogatarány értéke alapján:

- $\Phi/\Phi_m < 0,1$ : newtoni viselkedés;
- $0,1 < \Phi/\Phi_m < 0,5$ : nyírásra vékonyodó viselkedés;
- $\Phi/\Phi_m > 0,5$ : nyírásra vastagodó viselkedés [20]

Rendkívül érzékenyen változhat a szuszpenzió viszkozitása a szemcseméret-eloszlástól, valamint a szemcsék alakjától [60, 63, 64, 65, 67].



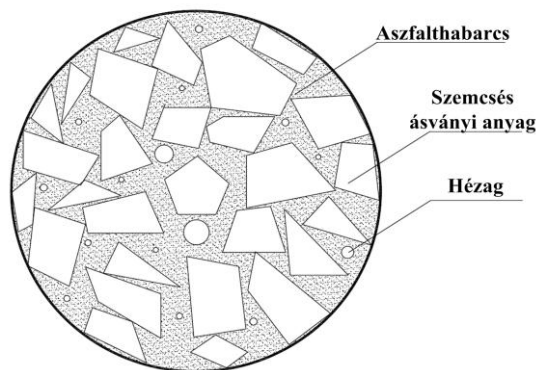
7. ábra. A szemcsék mennyiségének (a), méretének (b), alakjának (c), és polidiszperzitásának (d) hatása az aszfalthabarc viszkozitására [20]

Széles szemcseméret-eloszlás nagyobb  $\Phi_m$  értéket eredményez, mivel a finom szemcsék beékelődnek a nagyobbak közé. Másik esetben azonban a nem gömbszerű szemcsékkel gyengébb térkitöltés érhető el, ami kisebb  $\Phi_m$  értéket ad [66, 67, 67, 68]. Ha a szemcséket bitumenbe keverjük, akkor viszonylag kevés töltőanyag mennyisége esetén [20] a keverékben nagy lesz a szabad bitumen mennyisége, ami a szemcsék közötti gyenge kapcsolatot, végső soron kis szilárdságot biztosít. A túlzott töltőanyag alkalmazása is negatív hatású, ugyanis a túl sok szemcse gyengíti az egymáshoz történő kapcsolódást (7. ábra–a)). A finom szemcsék jelenléte a habarcsban nagy fajlagos felületük és adszorbeáló képességük miatt – már kis mennyiség esetén is – viszkozitásnövelő hatású. Durvább szemcsék esetén azok mennyiségének növelésével érhető el hasonló tulajdonság (7. ábra–b)). A töltőanyagok morfológiájának is meghatározó szerepe van az aszfalthabarcs folyási tulajdonságaiban. Számos tanulmány feltárta [67, 68, 69, 70, 71], hogy a szemcsék nyújtottsága (*hosszúság/szélesség*) szignifikánsan hat a viszkozításra. Nagy nyújtottság esetén (*például tűs, pálcikaszerű szemcséknél*) a viszkozitás már kis térfogataránynál is nagy lesz, kismértékű nyújtottság azonban (*gömböszerű szemcsealak*) kis viszkozitást eredményez (7. ábra–c)). Monodiszperz rendszerű szemcsék mennyiségének növelésével a kötőanyag viszkozítása már relatíve kis térfogatarány esetén is növekszik (7. ábra–d)). Ha a monodiszperz szemcséket azonban fokozatosan polidiszperz rendszerre cseréljük, akkor ebben az esetben nagyobb térfogatarány beállításával érhető el nagy habarcsviszkozítás. Mivel az aszfaltkeverékek megfelelően megtervezett szemeloszlású, polidiszperz kompozit rendszerek, ezért a felhasznált szemcsék polidiszperzitása teszi lehetővé a lehető legjobb szilárdság biztosítását. A burkolat merevsége és szilárdsága szempontjából tehát mind a szemcsék mérete, mennyisége, morfológiája, és polidiszperzitása nagy befolyással bír.

#### 1.1.6. Aszfalthabarcsok és aszfaltkeverékek modellezése

Yadykina [72] szerint a „bitumen–töltőanyag” olyan kompozit rendszer, mely az aszfaltkeverék legfőbb szerkezeti egysége. Egyfajta kötőanyagként viselkedik, és nagymértékben befolyásolja az aszfalt számos jellemzőjét (*a keverék sűrűsége, szilárdsága, alakváltozása, víz- és fagyállósága, stb.*), melyek a szerves kötőanyag és az ásványi anyag tulajdonságaitól, valamint ezek arányaitól függenek. Yadykina munkájában számos kutatási eredményt és ipari tapasztalatot összegzett, melyek alapján megállapította, hogy az aszfaltkeverékek legfontosabb alkotórészei a finomra őrölt mészkő és dolomit, melyek a bitumennel kiváló kapcsolatot képesek kialakítani.

Az aszfaltkeverékek modellezésére többféle elméleti módszer ismert. Az egyik típus, amely mikromechanikai szempontok szerint jellemzi az anyagrendszert [73, 74, 75, 76]. Az eljárás azon a feltételezésen alapul, hogy az aszfaltok tulajdonképpen háromfázisú kompozit rendszerek, melyeket szemcsés ásványi anyagok, aszfalthabarc és szabad hézagtartalom (8. ábra) épít fel.



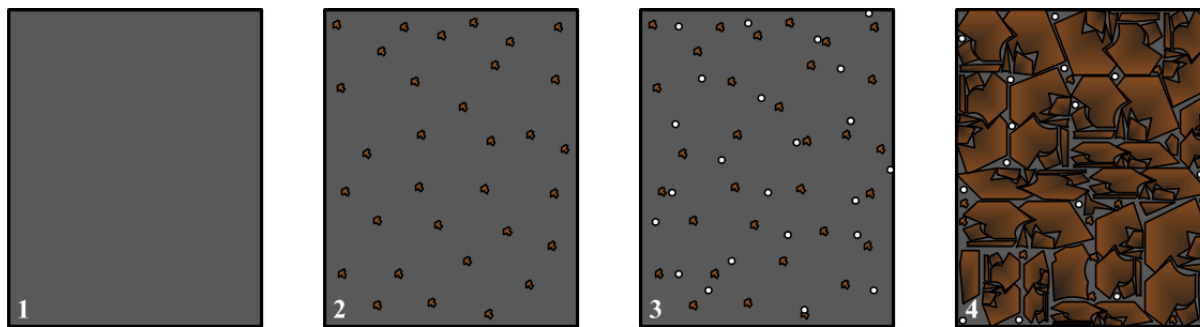
8. ábra. Aszfaltkeverékek mikroszerkezeti sémája [74] szerint

A mikromechanikai módszerek segítségével az aszfaltok anyagjellemzői becsülhetők. *Li* és *Metcalfe* [77] kétfázisú mikromechanikai modell alapján kétlépéses eljárást dolgozott

ki az aszfaltbetonok moduluszainak becsléséhez. Elképzelésük szerint az aszfaltbetonok mikroszerkezetét olyan kétfázisú modellel lehet leírni, amiben olyan nagyméretű gömbszerű ásványi részecskék vannak jelen, melyeket aszfalthabarc keveréke vesz körbe egyfajta burokként. Az ásványi köváz-töltőanyag-bitumen keverék jellemezhető továbbá egy olyan kétfázisú modellel, amely az ásványi kövázat gömbszerű beékelődésként kezeli az aszfalthabarc mátrixban. A kétlépéses eljárást alkalmazva az aszfaltbeton moduluszainak becslését az ásványi anyagok térfogatarányának, a Poisson-tényezőknek, a köváz, valamint az aszfalthabarc moduluszainak felhasználásával végezték el. Eredményeikkel igazolták, hogy a módszerük alapján elvégzett becslés meglehetősen jól közelíti meg a mért értékeket. Tapasztalták továbbá azt is, hogy a finom szemcsék a bitumennel együtt erősebb kötést tudnak kialakítani, mint a nagyméretű szemcsék a bitumennel. A módszer hátránya azonban az, hogy nem veszi figyelembe az ásványi anyagok szemcseméretének, valamint a hézagok méreteinek eloszlását. *Shashidhar* és *Romero* [78] rámutatott arra, hogy az aszfaltbetont alkotó három komponens (ásványi köváz, hézagterfogat és aszfalthabarc) szemmel látható, és a bitumen nem csupán önállóan fordul elő, hanem a töltőanyaggal együttesen aszfalthabarcot alkot. Meglátásuk szerint nem a bitumennek önmagában, hanem az aszfalthabarcnak van nagyobb szerepe a nagy ásványi szemcsék „összeragasztásában”.

*Chen* [79] szerint az aszfaltkeverékek 4 fázisként jellemezhetők (9. ábra):

1. A tiszta bitumen fázisa;
2. Bitumen – töltőanyag keveréke (aszfalthabarc);
3. Aszfalthabarc hézagterfogattal;
4. Változó szemeloszlású ásványi kövázal készített aszfaltkeverék.

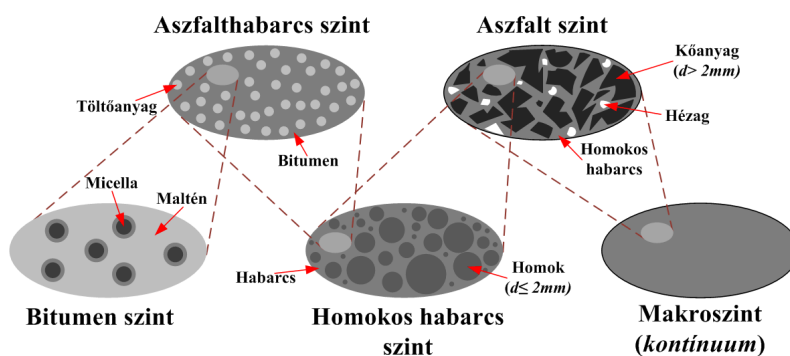


9. ábra. Az aszfaltkeverékek különböző fázisai Chen [79] szerint

1. bitumen; 2. aszfalthabarc; 3. aszfalthabarc szabadhézaggal; 4. aszfaltkeverék

A különböző típusú aszfaltok mechanikai viselkedésének leírására Lackner és munkatársai [80] egy többszintű modellt fejlesztettek ki. A modellt öt szintre osztották (10. ábra):

1. makroszint;
2. aszfalt szint;
3. homokos habarc szint;
4. aszfalthabarc szint;
5. bitumen szint.



10. ábra. Aszfaltok többszintű modellje [80]

Elméletük szerint a modellhez használt input adatokkal jól leírható az aszfaltok alacsony hőmérsékletű viselkedése. A bemeneti adatokhoz mechanikai tulajdonságokat, a térfogatarányt, valamint az alkotórészek alakját és azok egymással létesített interakcióját vették alapul.

Bandyopadhyaya és mások [81] numerikus modellt fejlesztettek ki az aszfaltkeverékek mechanikai viselkedésének leírására. Modelljük szerint a bitumen, a hézagterfogat és a kis szemcseméretű ásványi anyagok együtt feltételezhetően viszkoelasztikus anyagként viselkednek. Az aszfaltkeverékek alacsony hőmérsékleten és kis igénybevétel esetén lineáris viszkoelaszticitást mutatnak, ugyanakkor magas hőmérsékleten és nagy igénybevétel esetén nemlineáris viselkedésűek, így nem modellezhetőek adekvátan lineárisan viszkorugalmas modellel. Az aszfalthabarc minősége, a töltőanyag és a bitumen kombinációja nemcsak az aszfaltkeverék helyszíni bedolgozhatóságát, hanem annak teherbíró-képességét és élettartamát is befolyásolja.

## 1.2. Általános reológiai fogalmak

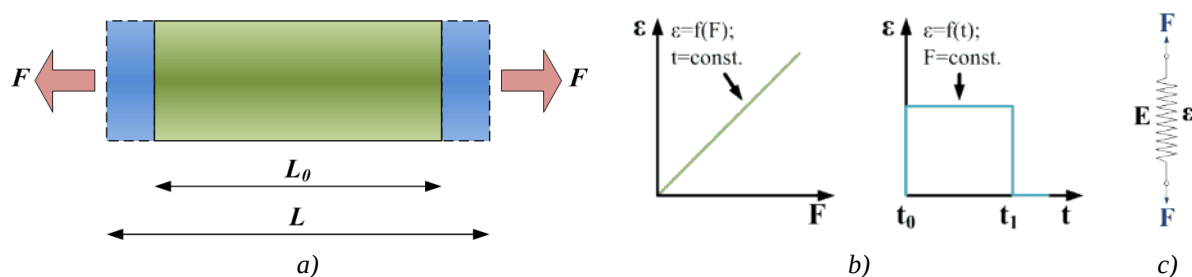
### 1.2.1. Mechanikai alapmodellek

A reológia pontos definíciója szerint „a deformációkkal, a deformációk és az őket előidéző erők közötti törvényszerűségekkel, a deformációk és az erők időfüggvényeivel, továbbá a törvényszerűségek és függvények külső hőmérséklettől és nyomástól való függésével foglalkozik” [82]. A reológiai, mint tudományág napjainkra a tudományos élet mellett az ipar számos területén is nélkülözhetetlen szerepet tölt be. A 2. táblázat a jellemző reológiai jelenségeket és azok ipari alkalmazásait mutatja be.

**2. táblázat.** Reológiai jelenségek, alkalmazási területük és azok deformációs-sebességtartományai [60]

| Folyamat                                             | Tipikus deformációs-sebesség tartomány, (s <sup>-1</sup> ) | Alkalmazási terület                                       |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Finom porok ülepedése szuszpenzióban                 | 10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-4</sup>                        | Gyógyszerek, festékek                                     |
| Kiegyenlítődés a felületi feszültségnek köszönhetően | 10 <sup>-2</sup> – 10 <sup>-1</sup>                        | Festékek, nyomtatófestékek                                |
| Folyadék lecsorgása gravitáció hatására              | 10 <sup>-1</sup> – 10 <sup>1</sup>                         | WC fertőtlenítő szerek                                    |
| Extrudálás                                           | 10 <sup>0</sup> – 10 <sup>2</sup>                          | Polimerek                                                 |
| Rágás, nyelés                                        | 10 <sup>1</sup> – 10 <sup>2</sup>                          | Ételek                                                    |
| Mártó bevonás                                        | 10 <sup>1</sup> – 10 <sup>2</sup>                          | Festékek, cukrászati felhasználás                         |
| Keverés                                              | 10 <sup>1</sup> – 10 <sup>3</sup>                          | Folyékony anyagok előállítása                             |
| Áramlás csőben                                       | 10 <sup>0</sup> – 10 <sup>3</sup>                          | Pumpálás, a vér áramlása az erekben                       |
| Permetezés, szórás,                                  | 10 <sup>3</sup> – 10 <sup>4</sup>                          | Porlasztásos szárítás, festékszórás, üzemanyag-porlasztás |
| Dörzsölés                                            | 10 <sup>4</sup> – 10 <sup>5</sup>                          | Kézkrémek és testápoló szerek bedörzsölése a bőrbe        |
| Nagy sebességű bevonatolás                           | 10 <sup>5</sup> – 10 <sup>6</sup>                          | Papírok bevonatolása                                      |
| Kenés                                                | 10 <sup>3</sup> – 10 <sup>7</sup>                          | Benzinmotorok                                             |

A külső erő hatására az anyag deformálódik, azaz alakja megváltozik. Ennek az alakváltozásnak két ideális esete ismert: a rugalmas, illetve viszkózus deformáció, mely állapotok reológiai állapotegyenletekkel (*konstitutív egyenletekkel*) matematikailag jól leírhatóak [60, 83, 84]. Ideálisan rugalmas esetben, ha húzó igénybevétellel terheljük az anyagot (11. ábra–a)), a terhelt rúd  $L_0$  kezdeti hossza  $L$  hosszra nyúlik meg. A külső erő megszűnése után az anyag azonnal, maradéktalanul visszanyeri eredeti hosszát (11. ábra–b)). Ez a rugalmas anyagrendszer egyszerű mechanikai rugómodellel is szemléltethető (11. ábra–c)).



**11. ábra.** Ideálisan rugalmas anyagok modellezése

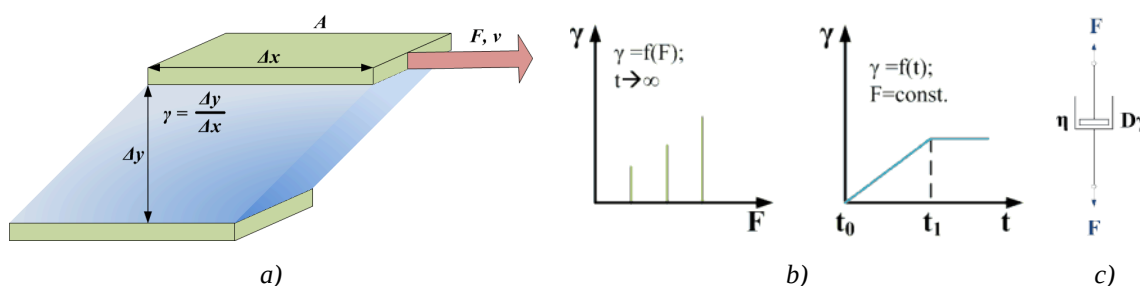
A *Hooke-törvény* (4) szerint a feszültség hatására kialakuló deformáció a rugalmassági moduluszon keresztül egyenesen arányos. Húzás esetén:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

nyírás esetén pedig:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (5)$$

A viszkozitás a 12. ábra–a) része szerint az alábbi módon értelmezhető. Egy rögzített alsó, és egy külső erő hatására elmozduló felső – egymással párhuzamos – lap között lévő folyadék rétegei elmozdulnak (*nyíródnak*) egymáson, melyek sebessége  $\Delta y$  távolságon belül  $v/\Delta y$  gradienssel változik. A nyírási igénybevétel közben adott  $A$  felületre ható  $F$  erő által létrehozott nyírófeszültség és a nyírás közben kialakuló deformációsebesség-gradiens a viszkozitáson keresztül arányos.



12. ábra. A viszkozitás értelmezése és az ideálisan viszkózus anyagok modellezése

A folyamat konstitutív egyenlete a *Newton-törvényként* (6) is ismert összefüggés:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (6)$$

Az ideálisan viszkózus folyadékokra jellemző, hogy külső terhelés megszüntetése után a deformáció megmarad (12. ábra–b)). Mechanikai modellje dugattyúval ábrázolható (12. ábra–c)). Mindkét esetben az arányossági tényezők (*a rugalmassági modulusz és viszkozitás*) olyan anyagi állandók, melyek függetlenek a vizsgált anyag méretétől és alakjától, emiatt „*rugalmas szilárd*”, illetve „*viszkózus folyadékoknak*” is szokás nevezni ezeket az anyagokat.

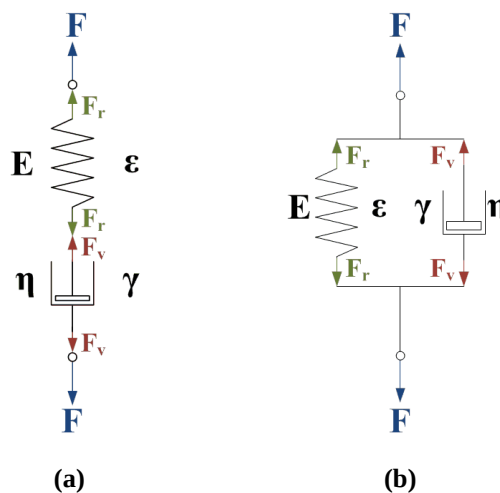
Az anyagban kialakuló folyások két típusa ismert: viszkózus folyás és plasztikus folyás. A viszkózus folyásra jellemző, hogy a viszkozitás állandó maradhat (*newtoni folyás*), illetőleg változhat (*nem-newtoni folyás*). A plasztikus folyás esetén a deformáció csak egy kritikus feszültségértéknél, a folyáshatárnál ( $\tau_0$ ) kezdődik, majd lineárisan, vagy nemlineárisan változik.

### 1.2.2. Viszkoelasztikus anyagmodellek

Az előzőekben ideális esetek bemutatására került sor, a valós életben azonban reális anyagok fordulnak elő. Ebből adódóan a legtöbb anyagban a rugalmas és viszkózus jellegek

egyidejűleg vannak jelen. Modellezésük a két alapmodell felhasználásával – azok soros, illetve párhuzamos kapcsolásával – lehetséges. A legegyszerűbb viszkoelasztikus anyagmodellek a következőek [60, 82, 84]: egy rugó és egy dugattyú sorba kapcsolásával az ún. *Maxwell-modell* állítható elő (13. ábra–a)). A ható erők ( $F_r$  és  $F_v$ ) által létrehozott feszültségek a rugón és a dugattyún egyaránt megegyeznek, az anyagrendszer deformációja azonban a két alapelem deformációjának összegéből adódik.

A két alapelem párhuzamos összekapcsolása a *Voigt–Kelvin-modell* (13. ábra–b)) kialakítását jelenti. Ebben az esetben a rendszerre ható erők által létrehozott eredő feszültség a rugóra és a dugattyúra ható feszültségek összegével fejezhető ki. Az anyag deformációja pedig az alapelemek deformációjával egyezik meg.



13. ábra. Viszkoelasztikus anyagmodellek

A jobb modellezhetőség érdekében lehetőség van a *Maxwell*–, és *Voigt–Kelvin-modellek*  $n$ -számú elemeinek összekapcsolására. Az így kialakított ún. általánosított modellek lényegesen jobban közelítik a reális anyagok viselkedéseit.

### 1.2.3. Lineáris viszkoelasztikusság

A reális anyagok lineáris viszkoelasztikus tulajdonságai többféle tekintetben, különböző módszerekkel is vizsgálhatóak. Az előző fejezetekben a viszkoelaszticitás fogalma már tisztázásra került. A linearitás pedig ebben az esetben azt jelenti, hogy a feszültség és az általa létrehozott deformáció között lineáris kapcsolat van, ezeket a jellemzőket csupán a hőmérséklet és a terhelési idő, nem pedig a feszültség, vagy deformáció nagysága befolyásolja. A lineáris viszkoelasztikusság teljesüléséhez két fontos feltétel szükséges [82, 83, 85, 86, 87]:

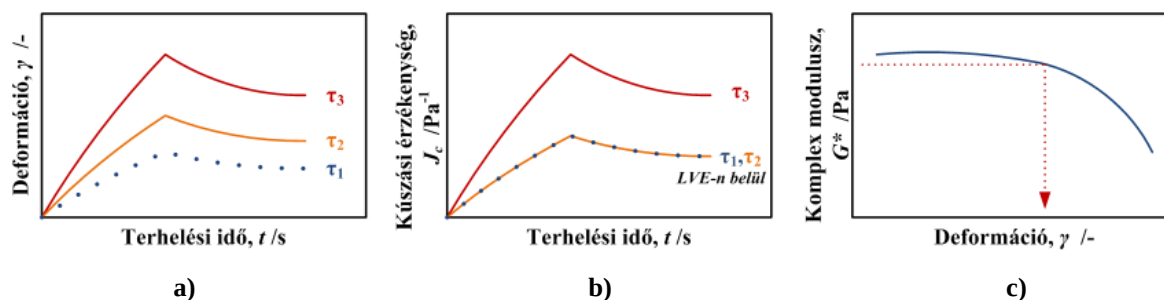
1. A vizsgálat bármely időpillanatában fellépő feszültség arányos a kialakuló deformációval.
2. Két egymástól különböző időpillanatban ható feszültség által okozott együttes deformáció egyenlő az egyes feszültségek által okozott deformációk összegével (*Boltzmann-féle superpozíciós elv*).

A legtöbb anyag tehát kellően kis deformációk mellett – bizonyos körülmények (*feszültség, deformáció, idő, hőmérséklet*) között – lineáris, vagy közel lineáris viselkedésű. A lineáris viszkoelasztikus tartomány (*LVE*) határának meghatározása kísérleti úton lehetséges [88, 89,



90]. Statikus módszerként kúszásvizsgálatok, dinamikus vizsgálatként pedig amplitúdó függő vizsgálatok alkalmazhatóak [91, 92, 93]. A statikus vizsgálatok során az idő függvényében egységugrásnyi terhelést alkalmazunk, míg a dinamikus vizsgálatoknál – a frekvencia függvényében – harmonikus rezgőmozgás segítségével terheljük az anyagot.

A 14. ábra–a) része a statikus kúszásvizsgálatok általi LVE tartomány meghatározási módját szemlélteti. A különböző mértékű, konstans feszültséggel terhelt viszkoelasztikus anyag kúszás-visszaalakulás (*creep-recovery*) görbéi alapján elmondható, hogy minél nagyobb feszültséggel terheljük az anyagot, akkor az anyag ennek hatására egyre nagyobb mértékű



14. ábra. A lineáris viszkoelasztikus tartomány (LVE) kísérleti meghatározási módjai

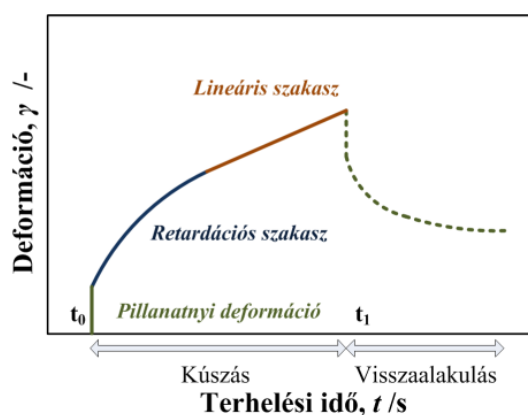
deformációt szenved. Az eredményeket a kúszási érzékenység ( $J_c$ , a *deformáció és feszültség aránya; a rugalmassági modulusz reciproka*) függvényében ábrázolva (14. ábra–b)) megfigyelhető, hogy kisebb feszültségek ( $\tau_1$  és  $\tau_2$ ) kúszási érzékenységi görbéi fedésbe kerülnek. Ha a kúszási érzékenységi görbe az alkalmazott feszültség hatására kiesik a fedésből, akkor túllépjük az LVE tartományt.

Dinamikus oszcillációs módszerrel szintén determinálható a lineáris viszkoelasztikus tartomány. Ebben az esetben konstans frekvencia mellett a terhelés amplitúdójának változtatásával a komplex nyírási modulusz-deformáció kapcsolatát vizsgáljuk (14. ábra–c)). A komplex modulusz kezdeti értékének adott százaléknyi (5–10%-os) [89, 93] csökkenése jelöli ki az LVE határát. A százalékos érték megválasztása azonban tudományterületenként változhat.

#### 1.2.4. LVE paraméterek statikus meghatározása

A lineáris viszkoelasztikus tulajdonságokat, azok paramétereit – az előzőekben említettek alapján – tehát lehetőség van kísérleti úton meghatározni. A statikus kúszás során adott ideig tartó konstans terhelő feszültség hatására történő alakváltozás mértékét vizsgáljuk. A kúszási fázis három szakaszra bontható (15. ábra).

A  $t_0$  időpillanatban ható konstans feszültség hatására az anyag deformálódni kezd. Első ízben a terhelés hatására pillanatnyi deformáció lép fel, ami a viszkoelasztikus anyagrendszer rugalmas tagjának köszönhető. Ezt követi az ún. retardációs (késleltetett) deformációs szakasz, ami tulajdonképpen az állandó feszültség hatására kialakuló deformáció változásának egyik jellemzője. A kúszás utolsó



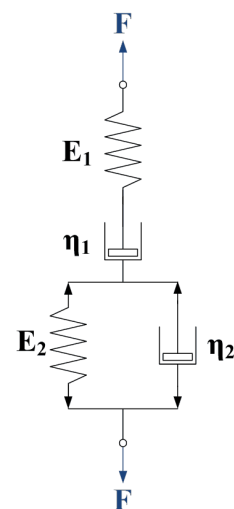
15. ábra. Statikus kúszásvizsgálat elvi alapja

fázisában a konstans feszültség hatására kialakuló deformáció lineárisrá válik, egyensúlyi, viszkózus folyás áll be. Ha  $t_1$  időpillanatban a terhelő feszültség megszűnik, az anyag igyekszik a kezdeti állapotába visszaalakulni. A rugalmas tagnak köszönhetően a deformáció egy része azonnal, a viszkózus és rugalmas részek egyidejű hatása miatt az anyag egy másik része pedig csak késleltetve képes visszaalakulni. A viszkózus rész miatt minden esetben tapasztalható maradó alakváltozás.

A kúszásgörbék pontos vizsgálatához a már korábban említett egyszerű anyagmodellek (Maxwell-, és Voigt–Kelvin-modell) és azok általánosított modelljei mellett más anyagmodellekkkel is szokás jellemezni az anyagot. A legismertebb ilyen típusú modell a Burgers–modell (16. ábra), amely tulajdonképpen egy Maxwell-, és egy Voigt–Kelvin-modell összekapcsolásával állítható elő (7):

$$\varepsilon_{\text{összes}}(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} \cdot t + \frac{\sigma_0}{E_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}\right) \quad (7)$$

A (7) Burgers-féle anyagegyenlet tehát a viszkoelasztikus anyagrendszerben konstans feszültség hatására fellépő összes deformáció leírására alkalmas. [84].



16. ábra. Burgers-modell

### 1.2.5. LVE paraméterek dinamikus meghatározása

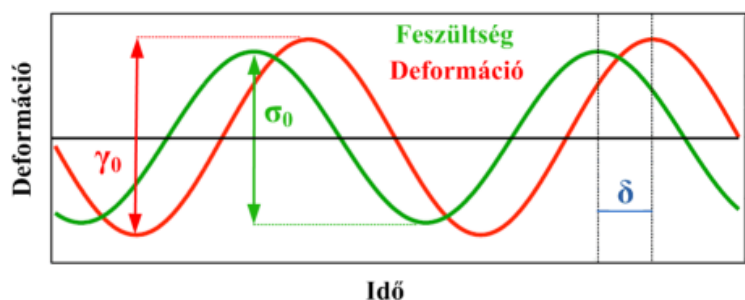
A viszkoelasztikus tulajdonságok dinamikus mérési módja a frekvenciafüggő, oszcillációs vizsgálat [86, 94, 95]. Kis amplitúdójú, oszcillációs nyírás során az LVE tartományon belül maradva kísérleti úton könnyen meghatározhatóak az anyagrendszer viszkoelasztikus paraméterei.

Ma már léteznek

1. feszültségvezérelt (*stress controlled*), illetve  
2. deformációvezérelt (*strain controlled*) műszerek, amelyekkel igény szerint előállítható szinuszos feszültség, illetve deformációs terhelés is:

- 1) Szinuszos feszültség előállításakor az anyagrendszer válasza deformáció formájában jelentkezik, az így mérhető legfontosabb paraméter pedig az érzékenység.
- 2) Deformációs terhelés esetén az anyagban fellépő feszültség mérhető, amelyből modulusz, illetve viszkozitás értékek határozhatóak meg.

Működési elvtől függetlenül a viszkoelasztikus anyagrendszer periodikus terhelésre adott válasza minden esetben bizonyos fáziskéséssel jelentkezik [94]. Ez a késés a  $\delta$  fázisszöggel jellemezhető.



17. ábra. A dinamikus vizsgálat értelmezése [94]

Mivel a terhelést egy ideálisan rugalmas anyag fáziskésés nélkül ( $\delta=0^\circ$ ), egy ideálisan viszkózus anyag pedig  $\delta=90^\circ$ -os fáziskéséssel követi, ezért a viszkoelasztikus anyagrendszer fázisszöge  $0^\circ$ – $90^\circ$  között változhat. A terhelés nagyságát a feszültség-amplitúdóval ( $\sigma_0$ ), míg a deformáció nagyságát annak amplitúdójával ( $\gamma_0$ ) jelöljük. Mivel a dinamikus módszer alapja a harmonikus rezgőmozgás alkalmazása, ezért a frekvencia is ismert fizikai jellemző. A dinamikus paraméterek ismeretében már számíthatóak a viszkoelasztikus jellemzők (17. ábra). Az anyag viselkedéséről elsősorban a modulusz értékek adnak információt [82, 96, 97]. A viszkoelasztikus anyagrendszer – jellegéből adódóan – egy „rugalmas” moduluszal ( $G'$ ; *tárolási modulusz*), valamint egy „viszkózus” moduluszal ( $G''$ ; *veszteségi modulusz*) jellemezhető. Az anyagrendszer rugalmassága, a rugalmas energiatároló képessége a tárolási moduluszal fejezhető ki:

$$G' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cdot \cos \delta \quad (8)$$

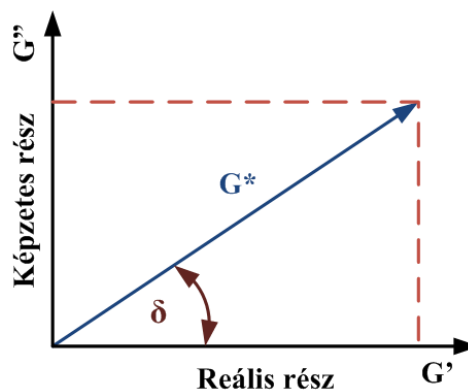
A tárolási modulusz a mért nyírási modulusz valós része, amely a deformációnak a terhelő feszültséggel fázisban lévő komponensét jellemzi, a deformációval azonos fázisban lévő feszültség-komponens és az amplitúdó hányadosaként számítható.

Az anyag energia-disszipációs képessége, valamint hő- és energiavesztesége a veszteségi moduluszal írható le. Ez a fizikai paraméter tulajdonképpen a rendszer viszkózus

tulajdonságairól nyújt információt. A deformációval  $\pi/2$  szöggel eltolódott feszültség-komponens és az amplitúdó hányadosaként – a tárolási moduluszhoz hasonló analógia alapján – írható le:

$$G'' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cdot \sin \delta \quad (9)$$

A trigonometrikus kifejezések alkalmazása mellett az *Euler-formula* bevezetésével lehetőség van – a számítások megkönnyítése érdekében – a komplex számsíkon is értelmezni a modulusz értékeket. Ilyen esetben már definiálható az ún. komplex nyírási modulusz is (18. ábra), amely aszfaltkeverékek esetén azok merevségét jellemzi. A komplex nyírási modulusz tehát a komplex számsíkon értelmezett tárolási és veszteségi moduluszok összegeként fejezhető ki:



18. ábra. A komplex nyírási modulusz összetevőinek vektoriális ábrázolása

$$G^* = G' + i \cdot G'', \text{ vagy } |G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (10)$$

A moduluszok és a 18. ábra alapján a viszkoelasztikus anyagrendszer veszteségi tangense ( $\tan \delta$ ) és fázisszöge is származtatható:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (11)$$

A veszteségi tangens a disszipált és a tárolt energia arányával fejezhető ki. Minél kisebb a veszteségi tangens értéke, annál jobban érvényesülnek a bitumen rugalmas tulajdonságai.

A komplex nyírási modulusz mellett értelmezhető még számos további viszkoelasztikus anyagparaméter is, mint például a moduluszok reciprokaként kifejezhető érzékenységek ( $J'$ , illetve  $J''$ ; tárolási és veszteségi érzékenység), vagy a komplex viszkozitás ( $\eta^*$ ).

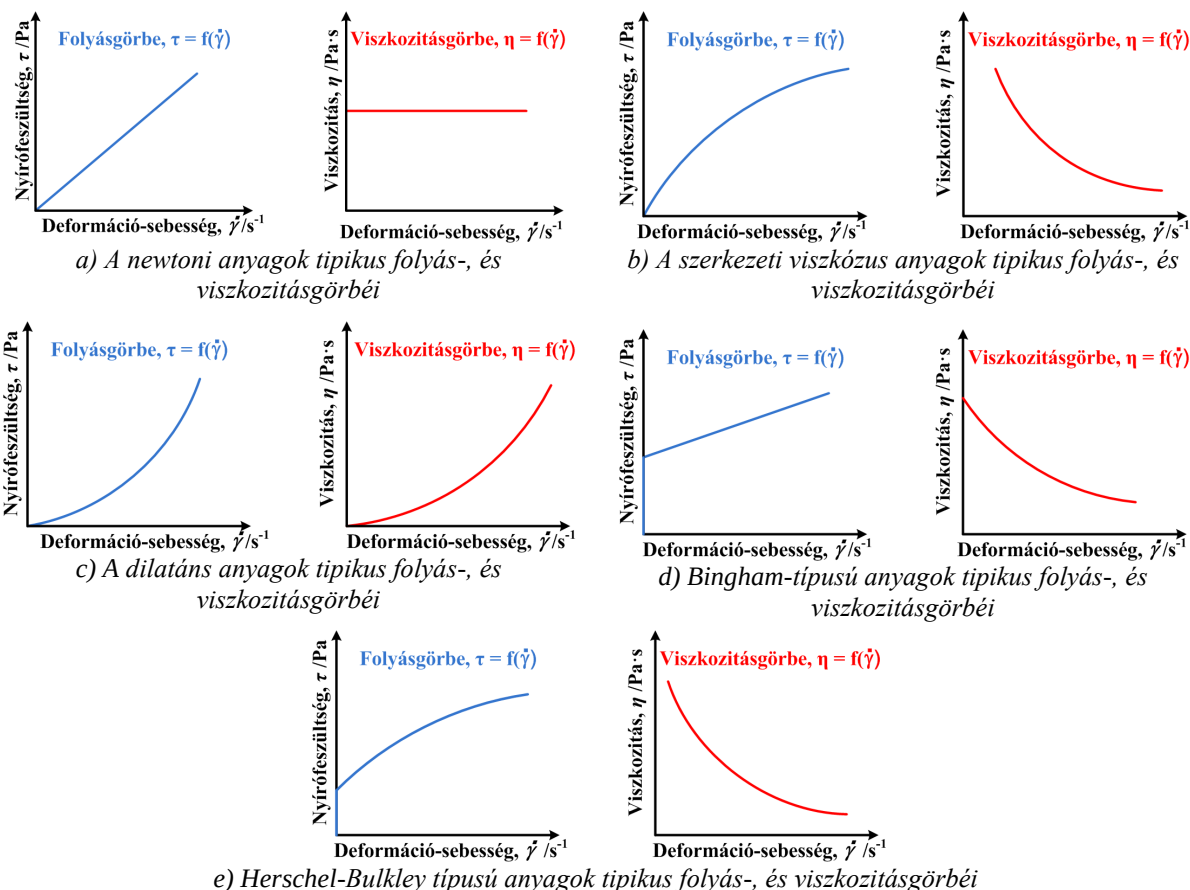
### 1.2.6. Folyási tulajdonságok modellezése

Az anyagok további reológiai jellemzéséhez – a feszültség és deformáció-sebesség viszonyaik ismeretében – hasznos segítséget nyújthatnak a folyás-, és viszkozitás görbék, amelyek az anyagok alakítás hatására bekövetkező viselkedésének leírását teszik lehetővé. Az alábbiakban a legjellemzőbb folyás- és viszkozitás görbék bemutatására kerül sor.

A 3. táblázat összefoglalja a legjellemzőbb – és a későbbi vizsgálatok szempontjából is releváns – matematikai modelleket [82, 83, 84, 98, 99, 100], a 19. ábra pedig grafikusan is bemutatja azokat.

**3. táblázat.** Különböző anyagok nyírási folyás- és viszkozitás görbéinek matematikai modelljei [60, 100]

| Modell neve                             | Nyírófeszültség<br>(folyásgörbe, $\tau=f(\dot{\gamma})$ ) | Viszkozitás<br>(viszkozitásgörbe,<br>$\eta=f(\dot{\gamma})$ )     | Tipikus anyagok                                          |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Newton                                  | $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$                          | $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$                                | víz, tej, méz                                            |
| Szerkezeti viszkózus                    | $\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$<br>( $n < 1$ )            | $\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$                               | almalé, banánpüré, narancslé<br>koncentrátum             |
| Dilatáns                                | $\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$<br>( $n > 1$ )            | $\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$                               | néhány mézfajta, 40%-os<br>nyers kukoricakeményítő oldat |
| Bingham                                 | $\tau = \tau_0 + \eta_B \cdot \dot{\gamma}$               | $\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \eta_B$                     | agyag, paradicsompüré,<br>fogkrém                        |
| Herschel-Bulkley<br>(pszeudoplasztikus) | $\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$                  | $\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$ | darált halpástétom, mazsola-<br>pástétom                 |

**19. ábra.** Jellemző folyás- és viszkozitás görbék

A newtoni anyagokra jellemző, hogy nyírás közben a deformáció-sebesség hatására kialakuló nyírófeszültség a viszkozitáson keresztül arányos, a viszkozitás értéke pedig független a deformáció-sebességtől (19. ábra–a)).

A nem-newtoni anyagok esetén a nyírófeszültség és a deformáció-sebesség kapcsolatát nagyon jól leírja az *Ostwald-de Waele-féle* hatványtörvény (12):

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (12)$$

Alkalmazásakor 3 eset lehetséges:

1. ha a sebesség-érzékenységi kitevő ( $n$ ) értéke 1, és ismert a konzisztencia<sup>3</sup> ( $K$ ), akkor a (12) kifejezés a *Newton-törvény*é alakul.
2. a szerkezeti (*struktur*) viszkózus anyagok (19. ábra–b)) esetében  $n$  értéke kisebb 1-nél. Mivel a viszkozitás így negatív lesz, ezért a deformáció-sebesség növekedésével a viszkozitás csökkenő tendenciát mutat. Az ilyen típusú anyagokat nyírásra vékonyodó (*shear-thinning*) anyagoknak is nevezik.
3. a *dilatáns* anyagok (19. ábra–c)) sebesség-érzékenységi kitevője:  $n > 1$ . Mivel a kitevő értéke a viszkozitás számításakor 1-nél nagyobb, ezért a deformáció-sebesség növekedésével a viszkozitás is növekszik. Ezeket az anyagokat nyírásra vastagodó (*shear-thickening*) anyagoknak nevezik.

A korábban már említett plasztikus folyás esetén a deformáció csak egy kritikus feszültségértéknél, a folyáshatárnál ( $\tau_0$ ) kezdődik, majd lineárisan, vagy nemlineárisan változhat. Folyáshatár alatt a rendszer nyugalomban marad.

A 19. ábra–d) része az ún. *Bingham-típusú* anyagokat mutatja be. Ezeknél az anyagoknál,  $\tau_0$  folyáshatárnál nagyobb nyírófeszültségek esetén newtoni viselkedés figyelhető meg.

A plasztikus folyás másik típusú jellemző anyagai az ún. pszeudoplasztikus anyagok, amelyek a *Herschel-Bulkley-modellel* (19. ábra–e)) jól leírhatóak. Ekkor a folyáshatárnál nagyobb feszültségek esetén a rendszer szerkezeti viszkozitása. Mind a *Bingham*-, mind pedig a *Herschel-Bulkley* típusú anyagok viszkozitása a deformáció-sebesség növekedésének hatására csökken.

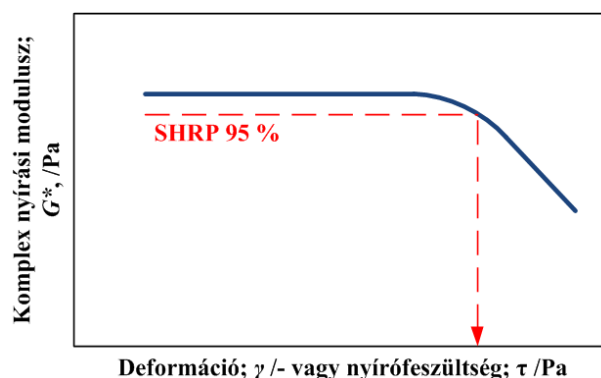
### 1.3. Az aszfalt reológiai jellemzése

#### 1.3.1. Az aszfalt, mint viszkoelasztikus anyagrendszer

Az aszfaltburkolatok viselkedése terhelésük jellegétől, valamint a hőmérséklettől függ. Ennek köszönhetően a burkolatok élettartamuk szinte teljes részében viszkoelasztikus anyagnak tekinthetők, azaz a viszkózus és rugalmas tulajdonságok egyidejűleg vannak jelen az anyagrendszerben [101, 102, 103]. Az aszfaltkeverékek kötőanyagát viszkoelasztikus jellege miatt olyan feszültség- és deformáció-szinteken szükséges vizsgálni, amelyek alkalmazásakor az anyag lineárisan viselkedik. A linearitás ebben az esetben azt jelenti, hogy a feszültség és az általa létrehozott deformáció között lineáris kapcsolat van, azaz ezeket a jellemzőket

<sup>3</sup> A konzisztencia tulajdonképpen a viszkozitással egyenértékű kifejezés a hatványtörvényben.

csupán a hőmérséklet és a terhelési idő, nem pedig a feszültség, vagy deformáció nagysága befolyásolja [104]. Lineárisan viszkoelasztikus körülmények között lehetőség nyílik a kötőanyagok és aszfaltkeverék-tulajdonságok közötti összefüggések feltárására. Jól modellezhetőek a bitumenes kötőanyagok forgalommal és hőmérséklettel szembeni viselkedése (*nyomvályúsodási- és repedéshajlam*). A bitumenek és aszfaltkeverékek LVE jellemzőinek ismerete a burkolatok tervezésében és a megfelelő ásványi alapanyagok kiválasztásában nyújt nagy segítséget [90, 91, 105, 106]. A lineárisan viszkoelasztikus tartomány pontos meghatározását bitumenes kötőanyagok esetében az SHRP (*Strategic Highway Research Program*) követelményrendszer írja elő [89]. Ennek alapján a komplex nyírási modulusz értékeit a feszültség, vagy az általa létrehozott deformáció



20. ábra. A lineárisan viszkoelasztikus tartomány meghatározása SHRP követelményrendszer alapján [89]

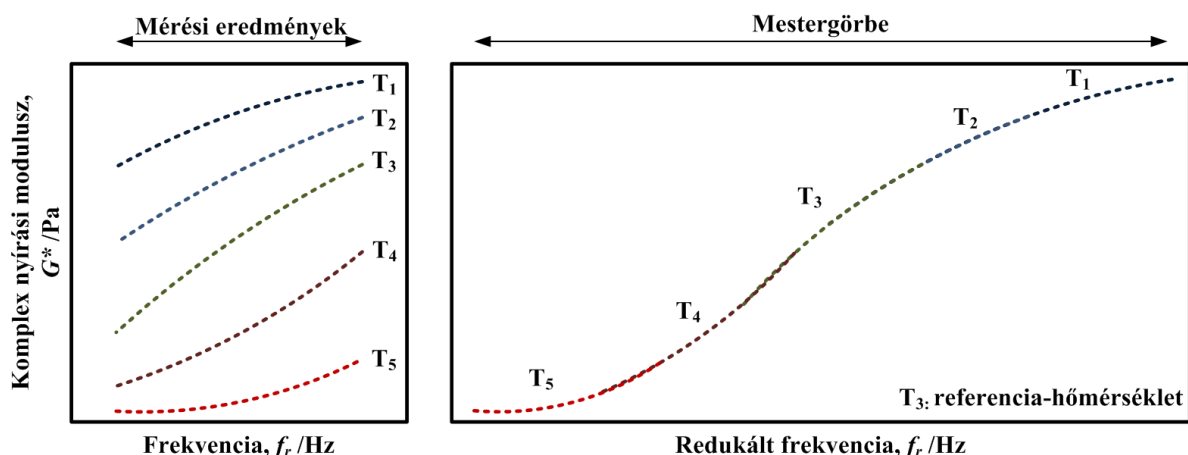
függvényében szükséges ábrázolni. A komplex modulusz kezdeti értékéhez képest bekövetkező 5 %-os csökkenéshez tartozó feszültség (vagy *deformáció*) értéke jelöli ki az LVE tartomány felső határát (20. ábra). Az ennél kisebb feszültség-, vagy deformáció értékek alkalmazásával biztosítható a lineáris tulajdonságok vizsgálata, és az eredmények összehasonlítása.

### 1.3.2. Az aszfalt dinamikus terhelése és hőmérsékletfüggése

A különböző hőmérsékleteken, adott frekvenciatartományban elvégzett (*frekvenciafüggő*) vizsgálatok mérési eredményei a gyakorlatban mindenképpen érdekesek, azonban a szűk méréshatár miatt nem adnak átfogó képet pl. a moduluszok frekvenciafüggéséről. Zhao és Kim szerint a meleg aszfaltkeverékek a lineáris viszkoelasztikus tartományban termo-reológiai szempontból egyszerű anyagként viselkednek [107], azaz jellemezhetőek egy olyan hőmérséklet- és terhelési idő paraméterrel, melyet redukált frekvenciának ( $f_r$ ) neveznek [108, 109].

Megfigyelték, hogy a viszkoelasztikus tulajdonságok frekvenciafüggősége különböző hőmérsékleteken alakjukban hasonló görbéket eredményez, azonban ezek a görbék az abszcisszán a frekvencia függvényében vannak eltolódva [87]. Minden egyes mért görbe kiszélesíthető a valójában mért méréstartományán kívül, azaz szuperponálható egy önkényesen kiválasztott alapgörbéhez. A termo-reológiai egyszerű anyagokra alkalmazható ez az ún. *idő-hőmérséklet szuperpozíciós elv*, amellyel vízszintes irányú

eltolások segítségével különböző hőmérsékleteken és adott frekvenciatartományban elvégzett mérési eredmények görbéi egy kompozit görbévé, *mestergörbévé* illeszthetők össze (21. ábra).



21. ábra. Az idő-hőmérséklet szuperpozíciós elv szemléltetése

Az idő-hőmérséklet szuperpozíciós elv során alkalmazott eltolási tényező ( $a_T$ ) meghatározása – amelyek aszfaltkeverékek esetén is jól használhatóak – több módszerrel is lehetséges [110]. A két legismertebb módszer a következő:

A viszkozitás hőmérsékletfüggése leírható az ún. *Arrhenius-Andrade* egyenlettel (13) [111]

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (13)$$

Az eltolási tényező az aktuális hőmérséklet ( $T$ ) és az önkényesen választott referenciahőmérséklet ( $T_0$ ) függvénye. A viszkozitás definícióját (13) felhasználva,  $a_T$  meghatározható  $T$  és  $T_0$  hőmérsékleteken mért nullviszkozitások arányából [109]

$$a_T = \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_0)} \quad (14)$$

A (13) kifejezést átalakítva az eltolási tényező meghatározható:

$$a_T = \exp \left[ \frac{E_a}{R} \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (15)$$

A (15) kifejezés általában az üvegesedési hőmérséklet<sup>4</sup> ( $T_g$ ) alatti tartományokban alkalmazható [112].

<sup>4</sup>Üvegesedési hőmérsékletnek ( $T_g$ ) nevezzük azt a hőmérsékletet, amely alatt az anyagot felépítő makromolekulák mozgékonyasága kicsi (ekkor az anyag kemény és rideg, "üvegszerű").  $T_g$  felett azonban a molekulák mozgékonyasága fokozatosan növekszik mindaddig, amíg a rendszer folyékonná válik [87].

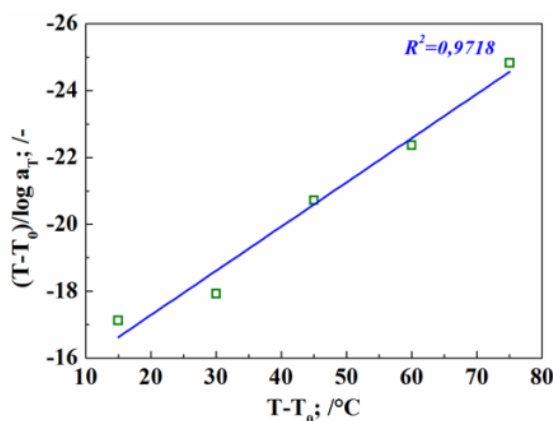


Másik módszer az ún. *Williams–Landel–Ferry* (WLF) egyenlet (16) a szabad térfogat koncepción alapuló módszer, mely egy másik lehetséges módja az eltolási tényező meghatározásának. A folyadékok molekulái a hőmérséklet függvényében különböző mértékben, nagy frekvenciával rezegnek, megnövelve így térfogatukat. Ez a rezgés a  $T_g$  körüli hőmérsékleten minimalizálódik és állandóvá válik, a szabad térfogat pedig minimálisra csökken. Mivel azonban a molekulák magas hőmérsékleten saját térfogatuknál nagyobb helyet foglalnak el, így szabad térfogatuk is megnő. Kiemelt szerepe van tehát az üvegesedési hőmérsékletnek.

A *WLF-egyenlet* alkalmazása a legtöbb esetben az üvegesedési hőmérséklet fölötti tartományban ( $T_g+100\text{ °C}$ ) lehetséges [87, 112, 113, 114]:

$$\log a_T = \frac{-C_1 \cdot (T - T_0)}{C_2 + T - T_0} \quad (16)$$

A *WLF-egyenlet* anyagra jellemző állandói ( $C_1$  és  $C_2$ ) matematikai és grafikus úton számíthatók ki. A megfelelő átalakítások után egy lineáris illesztéssel, az egyenes egyenletéből a két anyagállandó meghatározható (22. ábra).



22. ábra. A WLF-egyenlet anyagállandóinak grafikus meghatározása

A *WLF-egyenlet* alkalmazásakor lehetőség van – a legtöbb polimer esetén is jó eredményt biztosító – ún. univerzális konstansok használatára is. A szakirodalomban azonban fellelhető néhány – kifejezetten aszfaltkeverékekre vonatkozó – anyagállandó is [115, 116].

A hőmérséklet-idő szuperpozíciós elv akkor érvényes, ha bármely viszkoelasztikus paraméteren az eltolást követően egy összefüggő, egymásra simuló görbe hozható létre. Ebben az esetben mindegyik viszkoelasztikus paraméterre érvényesülni fog az eltolás [117]. *Chailleux* és munkatársai [118] szerint a mestergörbék előállításának egyik feltétele, hogy a bitumenben a hőmérséklet és a terhelés (frekvencia) hatására ne menjenek végbe nagy szerkezeti átrendeződések (pl. *fázisátalakulások*). A szerzők második feltételként szabták

meg, hogy a frekvenciafüggő vizsgálatokat minden esetben az LVE tartományban kell elvégezni. Meglátásuk szerint a módszer alkalmazható minden olyan anyagra, amelyekben valamilyen szerkezeti átalakulás (*pl. üveges átalakulás*) végbemegy. Heterogén anyagok esetén azonban csak abban az esetben érvényes a szuperpozíció, ha a diszpergált fázis az átmeneti zónában szerkezeti változást nem mutat.

### 1.3.3. Bitumenek és aszfaltok lineárisan viszkoelasztikus modellezése

Az elmúlt bő 60 évben a bitumenek és aszfaltok viselkedését számos módszerrel próbálták már modellezni, matematikai módszerekkel leírni [117]. Ezek a modellek jellemzően az útibitumenek lineárisan viszkoelasztikus tartományán belül értelmezhető reológiai paramétereinek becslésére alkalmasak, amelyeken érvényesül az idő-hőmérséklet szuperpozíciós elv is. A modellek három típusra oszthatóak fel (*a legismertebbek bemutatásával*):

1. Az 1950-es és '60-as években alkalmazták először a nemlineáris sokváltozós módszert, melynek során a bitumen legfontosabb LVE paramétereit nomogramok segítségével foglalták össze. A legismertebb modell a *Van der Poel-féle nomogram* [117, 119]. A módszer lényege, hogy a Young-féle rugalmassági modulusz meghatározásához hasonlóan a viszkoelasztikus anyagrendszerek esetében az ún. merevségi modulusz is kifejezhető, amely a terhelés módjától, valamint a hőmérséklettől függ:

$$(S)_{t,T} = \left( \frac{\sigma}{\varepsilon} \right)_{t,T} \quad (17)$$

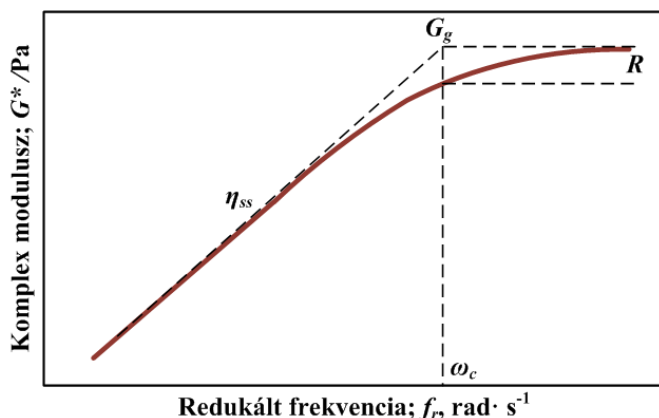
A merevségi modulusz tulajdonképpen ekvivalens az  $E(t)$  rugalmassági moduluszsal. A modell hiányossága azonban, hogy polimerekkel modifikált kötőanyagokra nem, kizárólag hagyományos bitumenek leírására alkalmazható.

2. Az empirikus algebrai egyenletek legismertebb modellje az 1992-ben a *Strategic Highway Research Program* keretében kifejlesztett, az *SHRP* követelmény-rendszerben alkalmazott bitumenek viszkoelasztikus viselkedését leíró *Christensen–Anderson modell* (CA–modell) [117, 120].

A módszer alapján a bitumenek viszkoelasztikus viselkedése négy paraméterrel leírható: az üveges moduluszsal ( $G_g$ ), az egyensúlyi viszkozitással ( $\eta_{ss}$ ), a keresztezési frekvenciával ( $\omega_c$ ), valamint a reológiai indexszel ( $R$ ) (23. ábra):

$$|G^*| = G_g \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\omega_c}{\omega} \right)^{\frac{(\log 2)}{R}} \right]^{-\frac{R}{\log 2}} \quad (18)$$

Christensen és Anderson szerint azonban modelljük alkalmazása nem célszerű olyan hőmérsékleteken és frekvenciákon, ahol a fázisszög értéke megközelíti a  $90^\circ$ -ot.



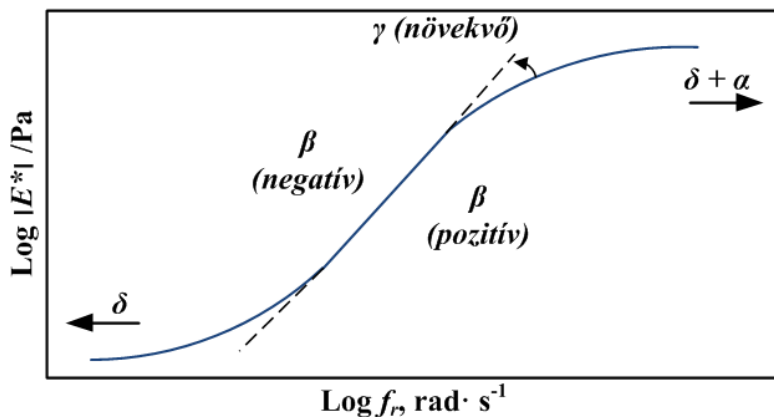
23. ábra. A CA modell paraméterei

Pontos eredmény eléréséhez a  $10^\circ < \delta < 70^\circ$  tartományt jelölték ki. A CA-modell módosítását később többen elvégezték (Christensen-Andersen-Marasteanu /CAM/-modell, illetve módosított CAM-modell [117, 121, 122]) annak érdekében, hogy a modell pontosabb illesztését elérhessék.

Egy másik elterjedt empirikus algebrai modell az ún. szigmoid-modell (19) [117, 123, 124].

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \log f_r}} \quad (19)$$

A kifejezetten aszfaltkeverékekre kialakított módszer szerint a keverékek mestergörbéje egy alul-felül korlátos, folytonosan növekvő függvénnyel leírható (24. ábra):



24. ábra. A szigmoid modell paramétereinek meghatározása

3. A bitumenek és aszfaltkeverékek reológiai modellezésének harmadik módja mechanikai elemekkel lehetséges. A kifejezetten aszfalt-keverékekre kidolgozott modellek két legismertebb típusa a Huet-Sayegh-modell [101, 117, 125, 126], illetve a 2S2P1D modell [117, 127, 128] (25. ábra).

Mindkét módszer az alapvető mechanikai alapelemek mellett tartalmaz ún. parabolikus elemet is [129]. Ez lényegében egy nemlineáris dugattyú, melynek célja a bitumen

hatásmechanizmusának pontosabb leírása. Mivel ebben az esetben az alakváltozás nem lineáris, ezért a terhelési időt hatványtörvénynek megfelelő alakban írja le (20):

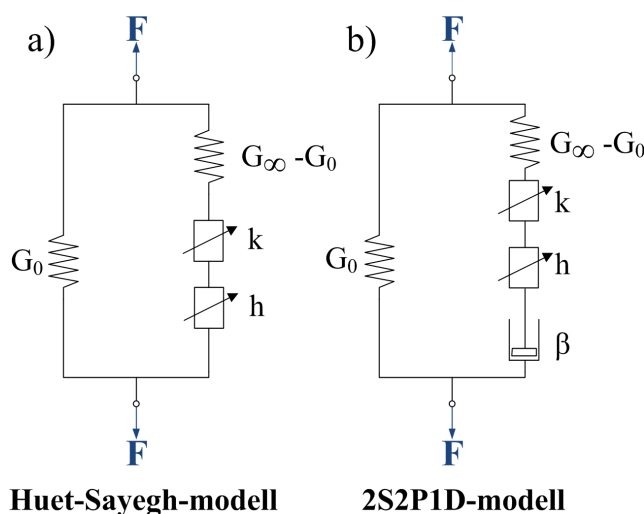
$$2. \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{\eta} \cdot t^k \quad (20)$$

1967-ben egy korábbi modell [129] módosításával fejlesztették ki a *Huet–Sayegh-modellt* (25. ábra–a)) [125].

A két rugalmas ( $G_0$  és  $G_\infty - G_0$ ), valamint két parabolikus elem ( $h$ ,  $k$ ) összekapcsolásával a komplex modulusz felírható (21):

$$G^* = G_0 + \frac{G_\infty - G_0}{1 + o \cdot (i \cdot \omega \cdot \tau)^{-k} + (i \cdot \omega \cdot \tau)^{-h}} \quad (21)$$

A *Huet–Sayegh-modell* a bitumen kiemelt szerepe mellett figyelembe veszi a teherbírást elviselő ásványi váz fontosságát is [101]. A módszer hátránya azonban az, hogy alacsony frekvencián nem ad pontos eredményt.



25. ábra. Aszfaltkeverékek mechanikai elem-modelljei

*Olard és Di Benedetto* [127] által 2003-ban kifejlesztett *2S2P1D modell* (25. ábra–b)) neve az alkotóelemek rövidítéséből adódik (2 Springs, 2 Parabolic elements, 1 Dashpot), mely tulajdonképpen a *Huet–Sayegh-modell* dugattyúval kiegészített változata (22):

$$G^* = G_0 + \frac{G_\infty - G_0}{1 + o \cdot (i \cdot \omega \cdot \tau)^{-k} + (i \cdot \omega \cdot \tau)^{-h} + (i \cdot \omega \cdot \tau \cdot \beta)^{-1}} \quad (22)$$

A modell hátránya, hogy a kísérleti adatokra történő illesztése az  $50^\circ < \delta < 70^\circ$  tartományban nem pontos, modifikált bitumenek esetén pedig – különösen a magas hőmérséklet-tartományban – nem ad megbízható eredményt.

## Az értekezés feladatai

Az irodalmi összefoglalás alapján belátható, hogy az aszfaltkeverékek legfontosabb alkotóelemei a töltőanyagok és a felhasználásukkal előállított aszfalthabarcok, melyek együttes tulajdonságai alapvetően meghatározzák az aszfaltburkolatok tulajdonságait és élettartamát. Emiatt különösen fontos nagy hangsúlyt fektetni ezen anyagok átfogó vizsgálatára.

- A töltőanyagok ásványi összetételének, szemcseméret eloszlásának, alaktani sajátosságainak, fajlagos felületének és felületi tulajdonságainak vizsgálatával fel kívánom tárni a töltőanyagok bitumennel kialakított kapcsolatát, hatásmechanizmusát. A vizsgálatok célja emellett a hazai útépítésben széleskörűen alkalmazott mészköliszt esetleges kiváltására szánt dolomit hasznosíthatósági lehetőségeinek tanulmányozása is.
- A különböző frakciójú, különböző térfogatarányban adagolt töltőanyagok felhasználásával készített aszfalthabarcokon reológiai vizsgálatokat kívánok elvégezni. A töltőanyagok aszfalthabarcban történő felhasználásának célja a keverék tulajdonságainak javítása, elsősorban a merevség növelése. A reológiai tulajdonságok meghatározásához az alábbi méréstechnikai módszereket kívánom alkalmazni:
- Statikus kúszás-, és visszaalakulási vizsgálatok, amelyek során a mérési adatokra olyan viszkoelasztikus modell illeszthető, amely matematikailag jól leírja az aszfalthabarcokban konstans terhelés hatására lejátszódó folyamatokat. A módszerrel számszerűen meghatározhatóak a habarcok reológiai anyagmodelljei és azok modellparaméterei.
- A folyási tulajdonságok vizsgálatával, a folyás-, és viszkozitásgörbék meghatározásával leírhatóak az aszfaltkeverékek bedolgozási, illetve nyári üzemi hőmérsékletein lejátszódó folyamatok. Reológiai anyagmodell és paramétereinek meghatározása.
- Dinamikus nyíróvizsgálatok, melyek az aszfalthabarcok dinamikus terhelésre adott válaszreakcióit hivatottak leírni. A frekvenciafüggő vizsgálatok eredményei alapján meghatározhatóak a mestergörbék, amelyekkel feltárhatóak az anyagrendszer hőmérséklet-terhelési idő-töltőanyag típusa, szemcsemérete és térfogataránya közötti összefüggések.
- A habarcok reológiai jellemzőinek feltárása hozzájárulhat az aszfaltburkolatok nyári tönkremeneteli jelenségeinek (*nyomvályúképződés*) pontosabb megértéséhez.

## 2. AZ ÁSVÁNYI TÖLTŐANYAGOK ÉS A BITUMEN VIZSGÁLATA

### 2.1. A vizsgált ásványi anyagok bemutatása

Kutatásaim során két – Magyarországon nagy mennyiségben előforduló – kőzet (mészkő és dolomit) porrá őrölt változatát alkalmaztam. A továbbiakban elvégzésre kerülő vizsgálatok és az eredmények alapján történő megfelelő következtetések



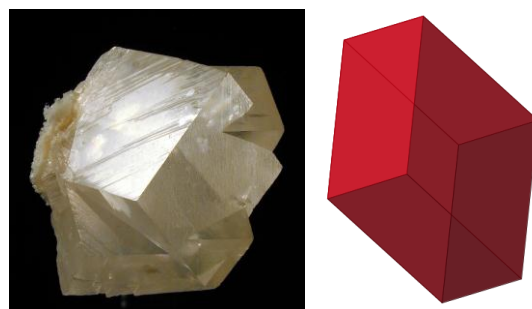
26. ábra. Kalcit ásvány [131, 132]

levonása megköveteli a kőzetek ásványtani és fizikai tulajdonságainak kellő mértékű ismeretét. A mészkő [130] (kalcium-karbonát) monomineralikus üledékes kőzet, amelyet jellemzően egy ásvány, a kalcit ( $\text{CaCO}_3$ ) épít fel (26. ábra) [131, 132]. Egyes esetekben a  $\text{CaCO}_3$  rombos módosulatából, az aragonitból is képződhet. A karbonátok ásványosztályába tartozó kőzet trigonális (háromszöges) kristályrendszerben kristályosodik. A kalcit a Mohs-féle keménységi skála [133] egyik referenciaásványa, mely sorrendjében a 3. helyen szerepel. Igen jól hasítható [134], gyenge kalapácsütésre is apró kristályokra hasad szét az  $(10\bar{1}1)$  indexű romboéder lapjai mentén [135]. A hasadás sima lapja kevésbé tükröző felületet hoz létre. Egyenetlenül törik, törési felülete teljesen szabálytalan [136]. Vízben rosszul, híg savakban azonban szén-dioxid fejlődése mellett oldódik [137]. A 4. táblázat a mészkövet alkotó kalcit összetételéről [132] nyújt információt.

4. táblázat. A kalcit elemi és oxidos összetétele, valamint molekulatömege [132]

| Elem                  | Elemi összetétel | Oxidos összetétel                |
|-----------------------|------------------|----------------------------------|
| Kalcium               | 40,04%           | $\text{CaO}$ 56,03%              |
| Szén                  | 12,00%           | $\text{CO}_2$ 43,97%             |
| Oxigén                | 47,96%           |                                  |
| <b>Összesen:</b>      | <b>100,00%</b>   | <b>100,00%</b>                   |
| <b>Moláris tömeg:</b> |                  | <b>100,09 g·mol<sup>-1</sup></b> |

A dolomit üledékes kőzet, melyet azonos nevű ásványa (kalcium-magnézium-karbonát,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) épít fel (27. ábra) [138, 139]. A kalcitához hasonlóan a karbonátok ásványosztályába sorolható, trigonális romboéderes kristályrendszerben kristályosodik. Romboéder lapjai  $(10\bar{1}1)$  mentén kitűnően hasítható, melynek következtében a hasadási



27. ábra. Dolomit ásvány [138, 139]

rovátkák jól megfigyelhetők. A mészkőnél ellenállóbb és ridegebb, ezért felülete is sokkal repedezettebb [134, 136, 137]. A dolomit elemi és oxidos összetételét az 5. táblázat tartalmazza [139].

**5. táblázat.** A dolomit elemi és oxidos összetétele, valamint molekulatömege [139]

| Elem                  | Elemi összetétel | Oxidos összetétel     |                                 |
|-----------------------|------------------|-----------------------|---------------------------------|
| <i>Kalcium</i>        | 21,73%           | <i>CaO</i>            | 30,41%                          |
| <i>Magnézium</i>      | 13,18%           | <i>MgO</i>            | 21,86%                          |
| <i>Szén</i>           | 13,03%           | <i>CO<sub>2</sub></i> | 47,73%                          |
| <i>Oxigén</i>         | 52,06%           |                       |                                 |
| <b>Összesen:</b>      | <b>100,00%</b>   |                       | <b>100,00%</b>                  |
| <b>Moláris tömeg:</b> |                  |                       | <b>184,4 g·mol<sup>-1</sup></b> |

## 2.2. Mintaelőkészítés

Az előzőekben részletezett feladatok alapján első lépésként a két töltőanyag átfogó vizsgálataira volt szükség, melyek során ásványtani, szemcseszerkezeti, felületi, termoanalitikai és anyagszerkezeti vizsgálatokat végeztem el. A módszerek mindegyike megfelelő és pontos mintaelőkészítést igényel. Mivel a töltőanyagokat a későbbiek során az aszfalthabarc-skeverékek elkészítéséhez is felhasználom majd – tanulmányozva ezzel a töltőanyag típusának, szemcseméretének és térfogatarányának hatását –, ezért körültekintően kellett kiválasztanom a megfelelő frakciókat. Figyelembe kellett vennem természetesen az ipari követelményeket is, ugyanakkor fontosnak tartottam azt is, hogy a szemcseméret hatása kellőképpen megfigyelhető legyen. A zsákolt formában, ömlesztett állapotában rendelkezésemre álló *mészkőlisztet* és *dolomitot*<sup>5</sup> szabványos szitasor alkalmazásával 4 frakcióra osztályoztam ( $d < 0,071 \text{ mm}$ ,  $d < 0,063 \text{ mm}$ ,  $d < 0,05 \text{ mm}$  és  $d < 0,045 \text{ mm}$ ). A frakcionálást követően az egyes halmazokat 105 °C hőmérsékletre beállított laboratóriumi szárítószekrényben tömegállandóságig szárítottam. Ennek célja a töltőanyagok nedvességtartalmának eltávolítása volt, ugyanis a későbbi mérések eredményeit a víz jelenléte károsan befolyásolta volna. Ezt követően a kiszárított és lehűlt mintákat légmentesen lezártam, elkerülve így a környezet páratartalmának felvételét.

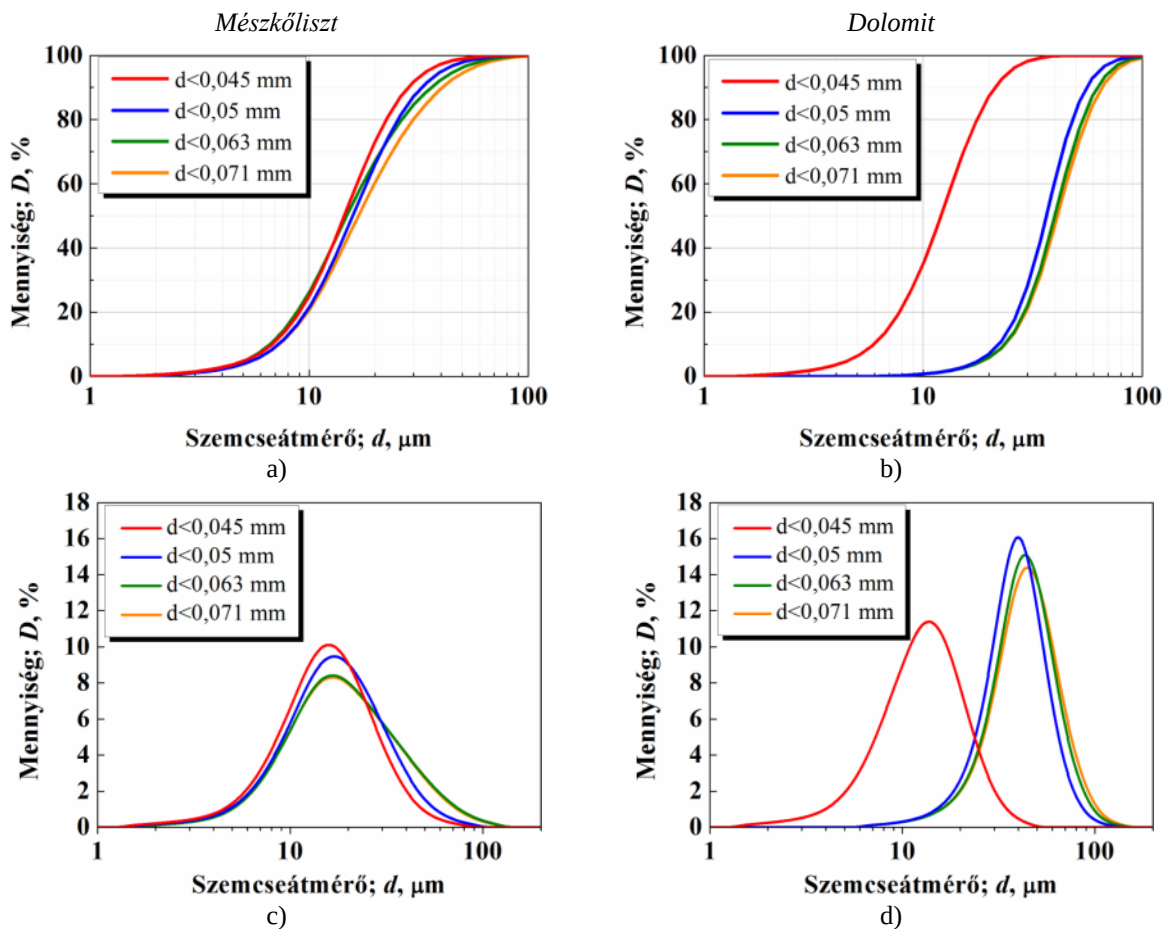
## 2.3. A töltőanyagok szemcseméret-eloszlásának vizsgálata

A töltőanyagok szemcseméret-eloszlása aszfalttechnológiai szempontból kiemelt jelentőséggel bír. Ahogyan az az 1.1.5 fejezetben is részletesen bemutatásra került (7. ábra), az aszfaltkeverékekben felhasznált finomszemcsés ásványi anyagok szemcsemérete és polidiszperzitása a bitumen viszkozitását, ezáltal a burkolat merevségét nagymértékben befolyásolja. A finomrész jelenléte pedig a kötőanyag adszorpciós képességére is hatással

<sup>5</sup>Mivel a dolomitot a gyártó két különböző szemcseméretű, előzetesen már frakcionált kiszérelésben ( $d < 0,3 \text{ mm}$ , illetve  $d < 0,045 \text{ mm}$ ) forgalmazza, így a vizsgálatok során számomra is ebben a formában állt rendelkezésre.

van. Éppen ezért tartottam fontosnak az egyes frakciók szemcseméret-eloszlásának pontos meghatározását. Az eredmények az aszfalthabarcok reológiai tulajdonságainak tanulmányozását is elősegítik.

A frakcionált anyagok szemcseeloszlás-vizsgálata Horiba LA-950V2 típusú lézer-granulométeren történt. A berendezés nedves eljárású módszerrel működik, ezért sajátos mintaelőkészítést igényel. A szemcsék jobb szétoszlatása érdekében 0,5 ml nátrium-pirofoszfát diszpergálószer hozzáadása és 1 perces ultrahangos kezelés szükségeltetett. A mérés során egy vizes közegű zárt rendszerben a vizsgálati anyag folyamatos keringetésben van. A mintakamrán átfolyó vizsgálati anyagot monokromatikus fény (*lézersugár*) világít meg, amely a részecskéken többféle szögben szóródik; ezt detektor érzékeli és dolgozza fel. A berendezés a mintán több száz mérést végez el, amelynek átlageredménye alapján a vizsgált térfogat részeit különböző méretosztályokba sorolja, ezáltal térfogati részecskeméret-eloszlás határozható meg. A vizsgálatok során meghatározott áthullási görbék és a mintában előforduló szemcsék előfordulásának gyakoriságát bemutató összesített görbék a 28. ábrán kerülnek bemutatásra, további mérési eredmények pedig az 1. Mellékletben láthatóak.



28. ábra. A töltőanyagok egyes frakcióinak áthullási görbéi (a és b) és gyakorisági görbéi (c és d)



**6. táblázat.** A töltőanyagok egyes frakciónak áthullási görbéihez tartozó legfontosabb értékek

| Mért<br>mennyiség;<br>% | Mészköliszt                   |                              |                               |                               | Dolomit                       |                              |                               |                               |
|-------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                         | d<0,045 mm<br>d<... , $\mu$ m | d<0,05 mm<br>d<... , $\mu$ m | d<0,063 mm<br>d<... , $\mu$ m | d<0,071 mm<br>d<... , $\mu$ m | d<0,045 mm<br>d<... , $\mu$ m | d<0,05 mm<br>d<... , $\mu$ m | d<0,063 mm<br>d<... , $\mu$ m | d<0,071 mm<br>d<... , $\mu$ m |
| 10                      | 6,75                          | 7,23                         | 7,29                          | 7,59                          | 5,94                          | 22,03                        | 23,45                         | 23,6                          |
| 20                      | 8,94                          | 9,67                         | 9,84                          | 10,1                          | 7,74                          | 26,92                        | 28,96                         | 29,43                         |
| 30                      | 10,87                         | 11,7                         | 12                            | 12,27                         | 9,24                          | 30,49                        | 32,89                         | 33,58                         |
| 40                      | 12,65                         | 13,68                        | 14,26                         | 14,48                         | 10,63                         | 33,51                        | 36,37                         | 37,28                         |
| 50                      | 14,47                         | 15,82                        | 16,82                         | 16,97                         | 12,03                         | 36,46                        | 39,84                         | 40,96                         |
| 60                      | 16,52                         | 18,25                        | 19,83                         | 20,16                         | 13,54                         | 39,58                        | 43,51                         | 44,9                          |
| 70                      | 18,99                         | 21,31                        | 23,94                         | 24,32                         | 15,29                         | 43,29                        | 47,89                         | 49,64                         |
| 80                      | 22,49                         | 25,54                        | 29,93                         | 30,42                         | 17,57                         | 48,15                        | 53,46                         | 55,84                         |
| 90                      | 28,49                         | 32,84                        | 40,75                         | 41,62                         | 21,33                         | 55,9                         | 62,62                         | 65,67                         |

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a vizsgált frakciók polidiszperz rendszerek, melyekben a szemcsék mérete mintegy két nagyságrendet ölel át. A gyakorisági görbék jól szemléltetik a töltőanyagok szemeloszlásának jellegét, így azok szemcseméret-eloszlásában jelentős különbségek fedezhetők fel. Megállapítható, hogy amíg a mészköliszt valamennyi, illetve a dolomit 45  $\mu$ m-nél kisebb frakciója széles eloszlással rendelkezik, addig a dolomit további 3 frakciója lényegesen szűkebb eloszlású. Mennyiségét tekintve a dolomit egyes méretosztályai a mészköliszthez képest nagyobb mennyiségű szemcsét tartalmaznak. A mészköliszt frakciói finomrészben (*jellemzően a 10  $\mu$ m-nél kisebb szemcsék*) gazdagabbak, és az egyes frakciók szemcseméret-tartományának növelésével is meghatározó marad a finom szemek jelenléte. A dolomit esetében jól megfigyelhető, hogy csupán a d<0,045 mm-es frakció rendelkezik jelentős mennyiségű finomrésszel, a szűk eloszlásnak köszönhetően pedig a nagyobb frakciókat jellemzően a nagyobb méretű szemcsék alkotják. A d<0,045 mm-es szemcseméretű dolomitnál megfigyelhető nagy eltérés a már korábban említett gyártó általi frakcionálásnak tulajdonítható.

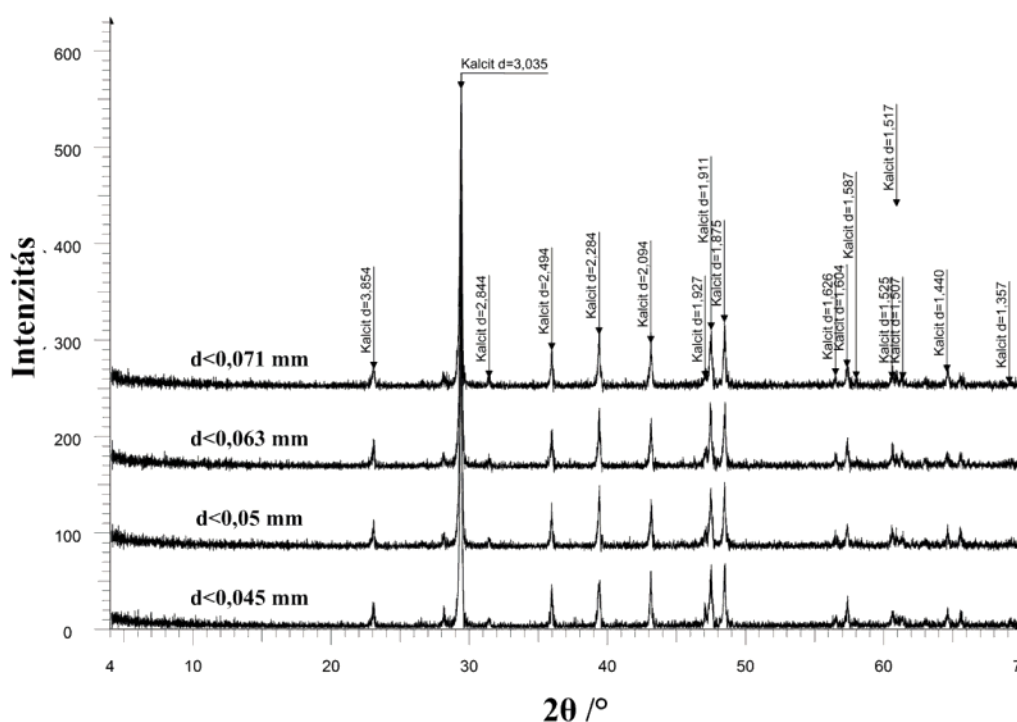
#### 2.4. A töltőanyagok ásványi összetételének vizsgálata

Az aszfalttechnológiában kiemelt szerepe van a teherbírást nagymértékben elviselő közetek ásványtani tulajdonságainak. A burkolatok tervezése során jelentős szerepe van a kőváz mechanikai szilárdságának és aprózódással szembeni ellenálló-képességének. Mindezeket ásványi összetételük is befolyásolja. Amennyiben a kőváz agyagásványokban dúsult, úgy mechanikai szilárdsága is kisebb lesz, a forgalom hatására pedig könnyebben aprózódhat, előidézve így a burkolat tervezettnél korábbi tönkremenetelét [140, 141]. Mivel a töltőanyagokat a nagyobb szemcseméretű közetek aprításával, őrlésével állítják elő a kívánt szemcseméretűre, így a fenti megállapításokat a legfinomabb frakciók esetében is szem előtt kell tartani. A töltőanyagok ásványi összetételének meghatározása röntgen pordiffrakciós módszerrel (*XRD vizsgálat*), egy Bruker D8 ADVANCE [142] típusú röntgen diffraktométer

alkalmazásával történt, mellyel mind minőségi, mind pedig mennyiségi fázisanalízis elvégezhető. A méréshez szükséges röntgensugárzás forrása egy réz anóddal felszerelt röntgencső, mely 40kV-os gyorsító feszültséggel és 40 mA-es csőárammal állítja elő a röntgensugárzást. A mérés során a berendezés *Göbel-tükör* feltétellel előállított párhuzamos nyaláb geometriában üzemelt, a divergens nyalábok korlátozása hosszú *Soller-rések* alkalmazásával történt. A diffrakciós jelek rögzítésére egy szekunder grafit monokromátor szolgált, a detektor résmérete pedig 0,2 mm volt. A vizsgálatok során a  $2\theta$  szög értéke  $4^\circ$ – $70^\circ$  között változott, a detektor lépésmagysága  $0,01^\circ$ , míg a mérési idő (*a detektor egy adott pozícióban eltöltött ideje*) 0,2 szekundum volt. Az XRD vizsgálatok eredményeinek kiértékelése az ún. *Rietveld-féle* profilillesztéses módszerrel történt, melynek előnye, hogy a röntgensugárzás diffrakciójával kapott intenzitáscsúcsok térbeli helyzetéből és relatív erősségéből meghatározhatóak az ismeretlen anyagok kristályszerkezetei [143]. Az aszfalt töltőanyagok pordiffrakciós vizsgálatához a mintákat a 2.2 fejezetben ismertetett módon készítettem elő. A mészkőliszt és a dolomit 4–4 különböző frakciójának ásványtani vizsgálati eredményeit a 7. táblázatban foglaltam össze, melyben a töltőanyagokat alkotó ásványok összetétele mellett azok mennyisége is bemutatásra kerül.

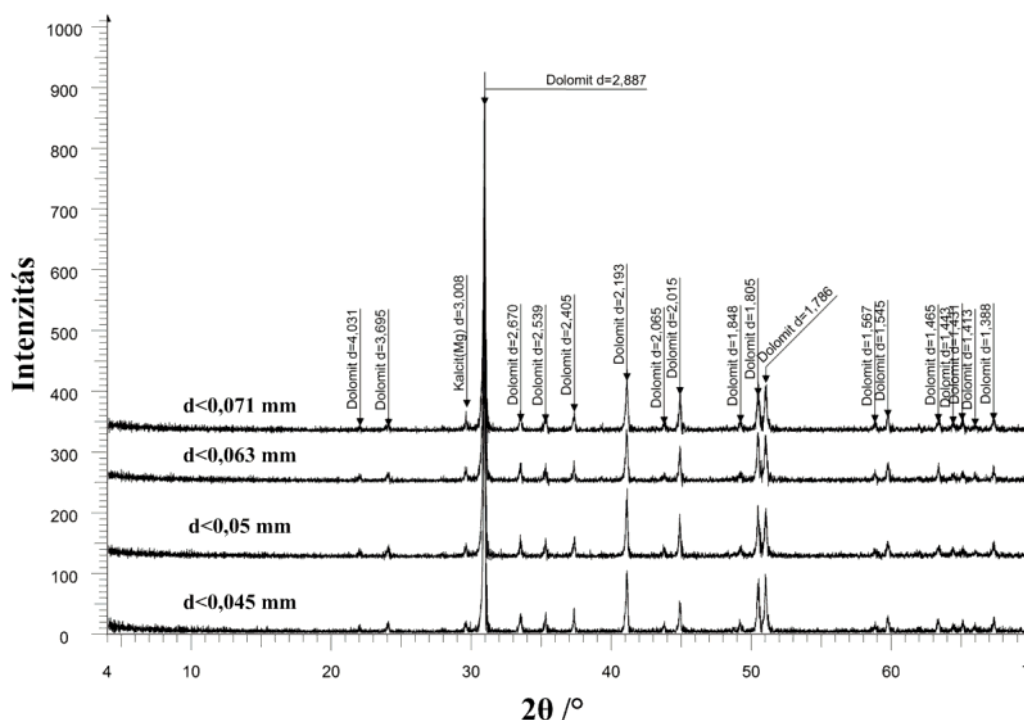
7. táblázat. A vizsgált töltőanyagok ásványi összetétele

| Töltőanyag  | Ásvány  | Képlet                       | Mennyiség |
|-------------|---------|------------------------------|-----------|
| Mészkőliszt | kalcit  | $\text{CaCO}_3$              | 100 %     |
| Dolomit     | dolomit | $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ | 100 %     |



29. ábra. A mészkőliszt egyes frakcióinak profil-illesztéssel (*Rietveld-analízis*) készült röntgenspektruma

A mészkőliszt vizsgálati eredményei (29. ábra) egyéb szennyeződésektől mentes, tiszta kalcit jelenlétét mutatják. Ahogyan azt a röntgenspektrum is jól mutatja, a vizsgált tartományban az egyes intenzitáscsúcsokra kizárólag kalcit volt illeszthető. A különböző szemcseméretetek között ásványtani szempontból eltérést nem tapasztaltam, összetételére nézve mind a 4 frakció homogén. Mivel a kőzetben egyéb ásványok nem találhatók, így a mészkőliszt ásványtani szempontból aszfalt töltőanyagként jól alkalmazható.



30. ábra. A dolomit egyes frakcióinak profil-illesztéssel (Rietveld-analízis) készült röntgenspektruma

A dolomit spektrumából is hasonló következtetések vonhatóak le. Ahogyan azt a 7. táblázat is mutatja, a vizsgált töltőanyagot 100 %-ban dolomit ásvány alkotja, egyéb alkotórész, illetve szennyezőanyag nem mutatható ki. A csúcsokra – a 29° körül megjelenő kis intenzitású kalcit csúcson kívül – a dolomit ásvány volt illeszthető. Az egyes frakciókban egyéb ásványtani különbségek ebben az esetben sem fedezhetőek fel. A vizsgált töltőanyag ásványtani szempontból a mészkőliszthez hasonlóan aszfalt töltőanyagként jól alkalmazható.

## 2.5. A töltőanyagok termoanalitikai vizsgálata

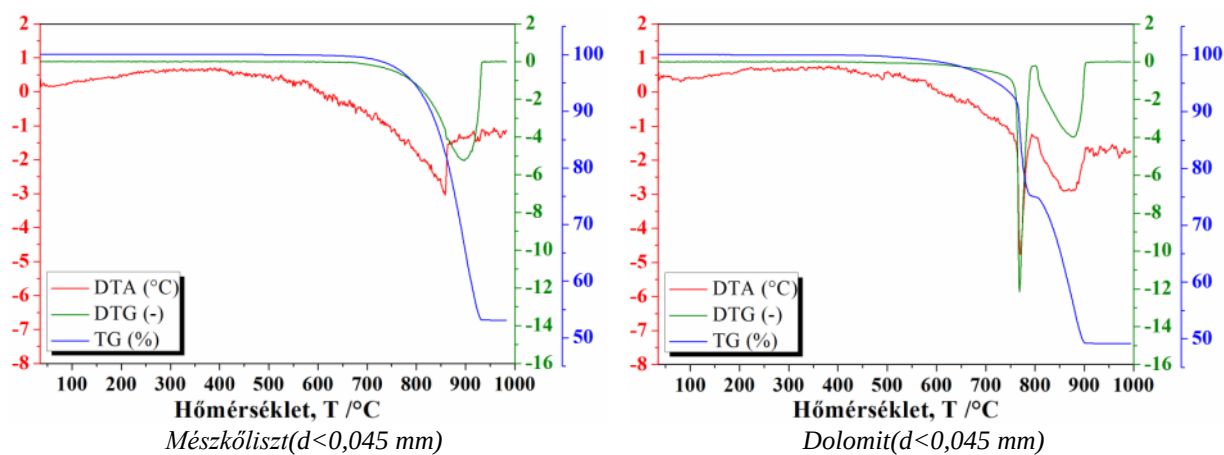
A mészkőliszt és dolomit töltőanyagok alkalmazhatóságának egy másik fontos szempontja az ásványi anyagok hevítés hatására bekövetkező változásainak nyomon követése. Az aszfaltgyártási technológia során a frakcionált ásványi anyagokat előzetesen a keverési hőmérséklet felé hevítik, melynek célja a nedvességtartalom eltávolítása, valamint az ásványi anyag keveréshez szükséges felhevítése. Fontos szempont, hogy ebben a technológiai folyamatban az ásványi anyagok tulajdonságai ne változzanak meg.

A töltőanyagok endoterm/exoterm reakcióinak, valamint a tömegcsökkenési folyamatainak tanulmányozását MOM gyártmányú *Derivatograph-C* [144] típusú berendezés segítségével végeztem el. A termoanalitikai vizsgálatok célja:

- a töltőanyagokban végbemenő változások feltárása,
- alátámasztani, hogy a technológiailag fontos hőmérsékleteken a töltőanyagok tulajdonságai nem változnak meg, tehát aszfalt-technológiai szempontból „inert anyagként” viselkednek,
- a minták összetételében esetlegesen jelen lévő szennyeződések kimutatása.

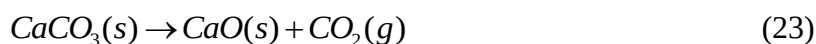
A termoanalitikai vizsgálatokhoz az előzetesen frakcionált és tömegállandóságig szárított mintákból minden esetben 200 mg anyagot mértem be a derivatográf kerámia tégelyébe. Referenciaanyagként szintén kerámatégelyben elhelyezett, izzított  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -ot használtam. A vizsgálatot 5 °C/perc felfűtési sebesség alkalmazásával végeztem el, az eredmények kiértékelését pedig a MOM által kifejlesztett *WINDER*C segítségével értékeltem ki.

A termoanalitikai tesztek során egyidejűleg három tulajdonság vizsgálata történik. A termogravimetria (TG) során a töltőanyagok tömegváltozása, differenciális termogravimetriával (DTG) ennek a tömegváltozásnak a sebessége, differenciális termoanalitikával (DTA) pedig az endoterm/exoterm reakciók tanulmányozhatóak. A 31. ábra a termoanalitikai vizsgálatok során rögzített jellemző derivatogramokat mutatja be ( $d < 0,045$  mm-es frakciók), további eredmények pedig a 2. Mellékletben találhatóak.



31. ábra. A töltőanyagok jellemző derivatogramjai

A vizsgálati eredmények alapján a következő megállapítások tehetőek. A mész-kőliszt hevítésekor a (23) egyenlet szerinti reakció (*mészégetés*) játszódik le. Az egylépcsős folyamat során hevítés hatására karbonátos bomlás megy végbe 790 °C körüli kezdő hőmérsékleten. Az endoterm reakció során  $\text{CO}_2$  gáz fejlődése mellett  $\text{CaO}$  (*égetett mész*) keletkezik.



A dolomit töltőanyag hevítésekor normál atmoszférán két endoterm reakció figyelhető meg. A kétlépcsős folyamat során mindkét esetben tömegveszteség lép fel, ugyanis a dolomitból mindkét esetben  $\text{CO}_2$  gáz szabadul fel. Először a  $\text{MgCO}_3$   $\text{CO}_2$  tartalma (24), majd a  $\text{CaCO}_3$  gáztartalma (25) távozik a rendszerből. A termikus reakció végtermékeként *égetett mész* és *égetett magnézia* keletkezik.



A vizsgálati eredmények további elemzése során az is megállapítható, hogy a töltőanyagok szemcsemérete is befolyásolja a reakciók végbemenetelét. Amennyiben a vizsgált frakcióban nagy mennyiségű finom szemcse van jelen, akkor a reakciók alacsonyabb hőmérsékleten mennek végbe. Ennek oka az, hogy a finomszemcsés anyaghalmozban hevítés hatására a keletkező  $\text{CO}_2$  gáz könnyebben fel tud szabadulni, míg nagyobb szemcsék belsejéből a  $\text{CO}_2$  diffúziója lassabban megy végbe. A nagyobb szemcsék jelenléte tehát a magasabb hőmérsékletek felé tolja el a reakciót.

A vizsgálatokkal alátámasztható, hogy az aszfalt-technológiai szempontból fontos hőmérsékleteken (*mintegy 230 °C-ig*) a töltőanyagok tulajdonságai hevítés hatására nem változnak meg. A termoanalízissel alátámaszthatóak a röntgen pordiffrakciós vizsgálatok során tett megállapítások, miszerint a vizsgált töltőanyagok összetételében egyéb ásványok, vagy szennyeződések nem találhatók.

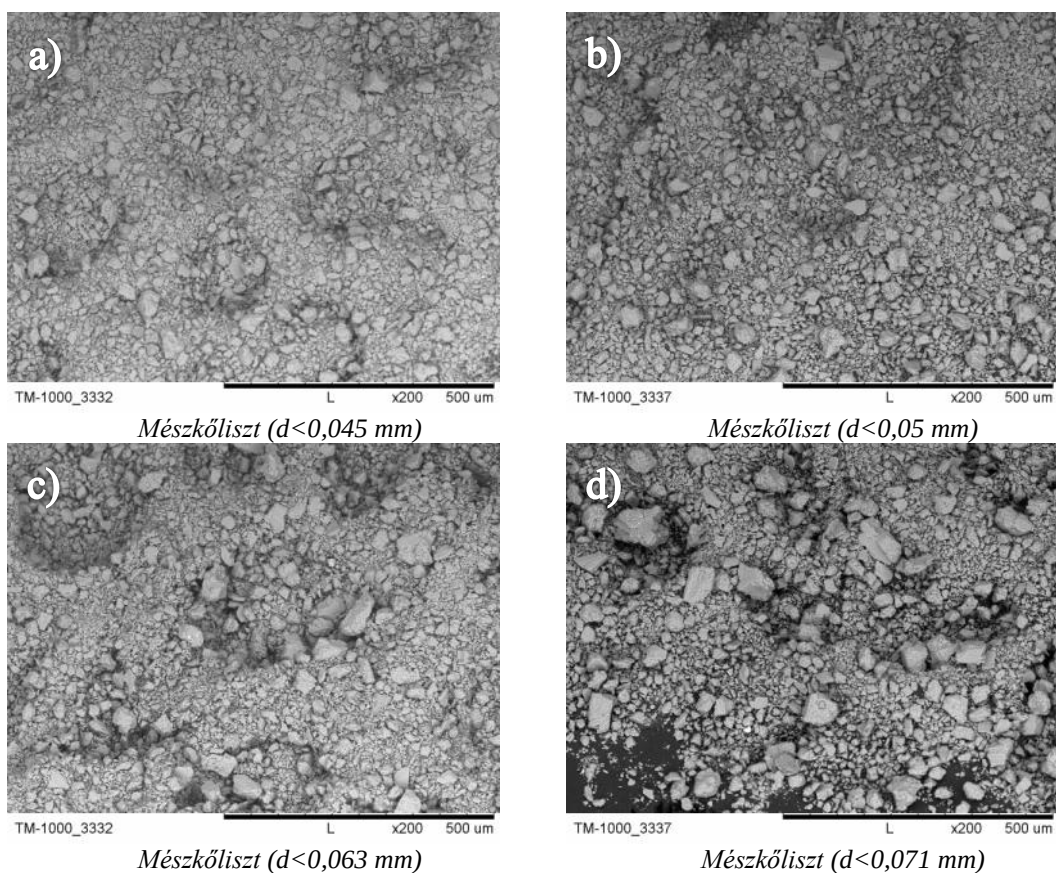
## 2.6. A töltőanyagok pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata

A finomszemcsés töltőanyagok alkalmazásának egyik célja az aszfaltburkolatok mechanikai szilárdságának és merevségének növelése. A szilárdság az ásványi anyagok és a kötőanyag közötti kohézió, valamint az ásványi köváz belső sűrűlódásának növelésével javítható [145].

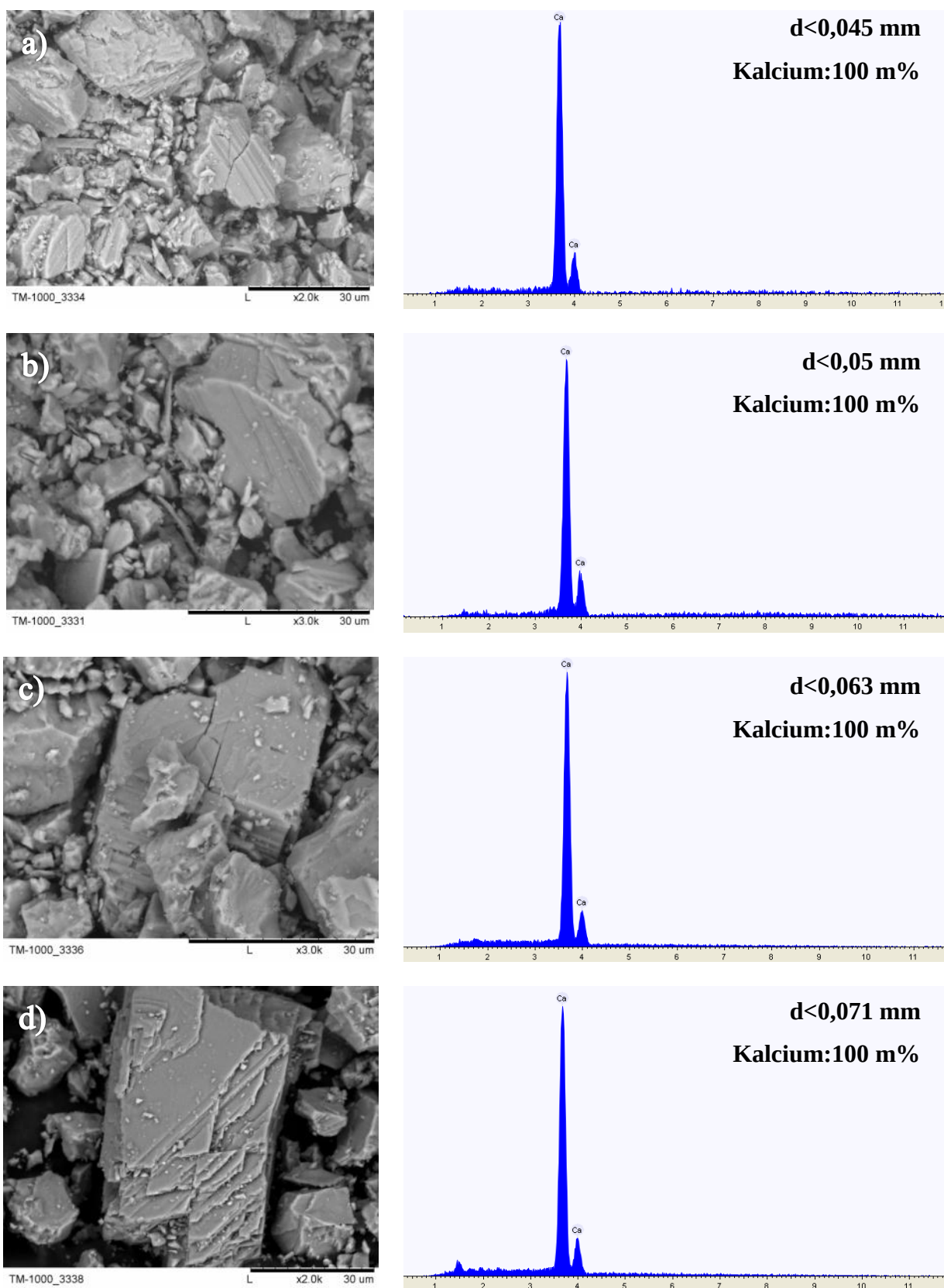
Az ásványi töltőanyagok morfológiai vizsgálata *Hitachi TM-1000* [146] típusú pásztázó elektronmikroszkóppal (*SEM*) történt. A berendezés lehetővé teszi tömbi és szemcsés anyagok anyagszerkezeti vizsgálatát, valamint azok energia diszperzív röntgen spektroszkópiáját (*EDS*). A vizsgálathoz szükséges közepes vákuum egy turbómolekuláris vákuumszivattyú és egy diafragma szivattyú segítségével állítható elő, mely vákuumban az elektronsugár előállítása 15 kV konstans gyorsító feszültség segítségével történhet. A műszer konstrukciós kialakításából adódóan a vizsgálathoz speciális mintaelőkészítés nem szükséges, a visszavert elektronsugarak (*BSE*) segítségével a képalkotás során pedig 60 – 10 000-szeres nagyítás érhető el. Kémiai elemanalízis is lehetséges a rendelkezésre álló energia diszperzív

mikroszonda segítségével, melyben egy berillium-ablakos detektorral a *Na* és az annál nagyobb atomtömegű kémiai elemek kvantitatív meghatározása lehetséges.

A korábbi fejezetekben bemutatott módon előkészített töltőanyagok mikroszerkezeti vizsgálata során a frakcionált halmazokon morfológiai elemzést és kémiai elemanalízist végeztem el. A 32. ábra a mészkőlisztről azonos felbontásban készített, kis nagyítású ( $N=200\times$ ) felvételek láthatóak, melyek jól tükrözik az ásványi anyag egyes frakcióinak szemcseeloszlását, polidiszperzitását. A finom szemcsék aránya mindegyik frakcióban közel hasonló mennyiségben egyaránt megfigyelhető. A szemcseméret növekedésével – a szemeloszlásnak megfelelő mértékben – a nagyobb szemcsék is jól elkülöníthetőek. A mészkőliszt kémiai elemanalízise során minden esetben – amikor terület-, vagy pontelemzés történt – azt tapasztaltam, hogy az EDS spektrumon csak a *Ca*-hoz tartozó csúcsok jelentek meg. Annak tudatában, hogy a mikroszonda detektora a *Na*-nál kisebb atomtömegű elemeket nem képes detektálni, így a *C* és az *O* jelenlétét sem mutatja ki, arra lehet következtetni, hogy a vizsgált mészkőlisztet valóban kalcit kristályok ( $\text{CaCO}_3$ ) építik fel, egyéb szennyezőanyag pedig nem fordul elő az anyaghalmazban.



**32. ábra.** A mészkőliszt frakcióinak mikroszerkezete

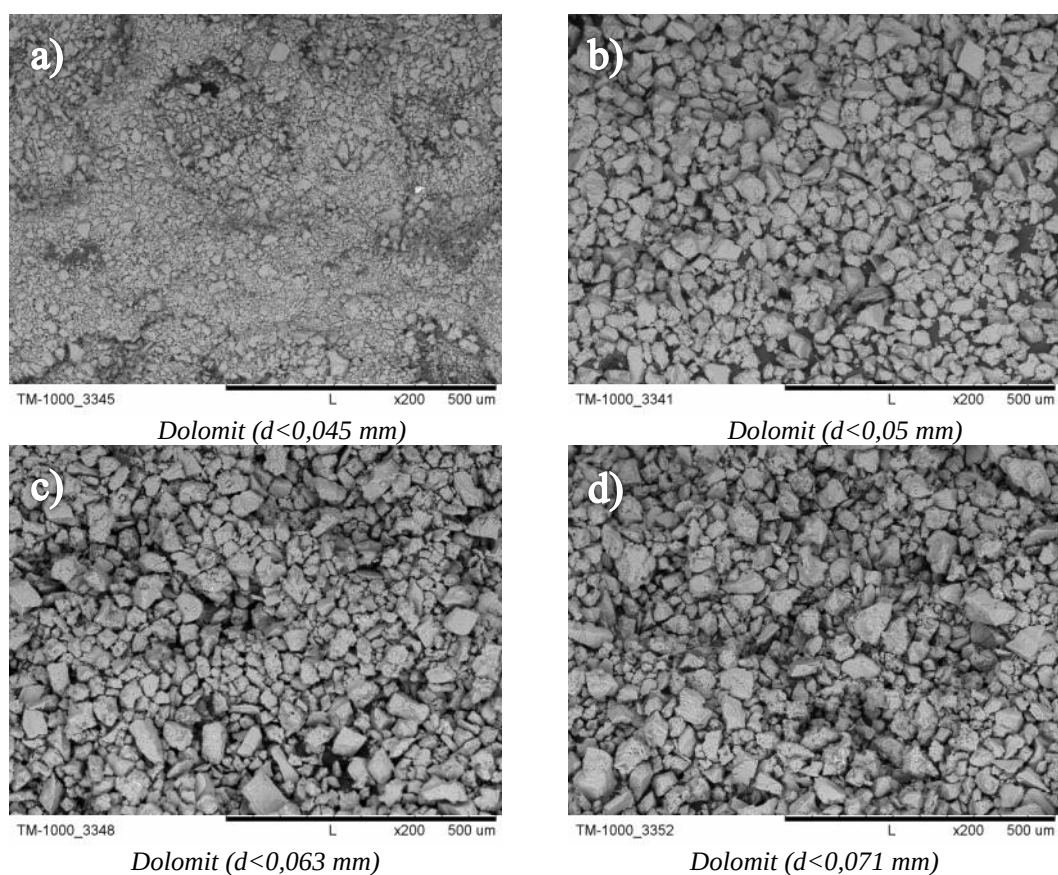


**33. ábra.** A mészkőliszt frakcióinak SEM felvételei és EDS elemanalízise

A 33. ábra a mészkőliszt egyes frakcióiról készített jellemző mikroszerkezeteket, valamint a hozzájuk tartozó EDS spektrumokat tartalmazza. A SEM felvételek alapján a vizsgált



töltőanyag polidiszperz rendszerként jellemezhető; a nagy mennyiségben előforduló finomrész a nagyobb szemcsékkel együtt jó térkitöltést, ezáltal nagyobb tömörséget, szilárdságot biztosíthat az aszfaltkeverékekben. Egymástól jól elkülöníthetők a különböző formájú kalcitszemcsék. Megfigyelhetők egészen lapos szemcsék (33. ábra–b)) is, amelyek nagy valószínűséggel őrlés, aprítás során a nagyobb szemcsék hasadási síkjairól pattantak le. A nagyobb szemcséken jól kivehetőek a hasadási síkok, ezek felülete viszonylag sima, melyekre mikronos, és szubmikronos kristályok tapadtak fel. A szemcsék töretfelületei változatosak, éles határokkal tagoltak, melyek a köváz és burkolat belső súrlódását növelik. A nagyobb szemcsék hasadási síkjaira merőlegesen több helyen repedések fedezhetőek fel, amelyek a mészkő aprításakor, őrlésekor keletkezettek. A szemcséről elmondható, hogy tömörek, a felületükön pórusok nem láthatóak. Ennek alapján relatíve kis fajlagos felületre lehet következtetni, mely a bitumen adszorpciója szempontjából előnyös. A szemcsékben pórusok nem voltak megfigyelhetők. A továbbiakban a dolomit frakcióinak bemutatása következik, melyek a mészkőliszthez hasonlóan azonos nagyításban ( $N=200\times$ ) készültek (34. ábra).



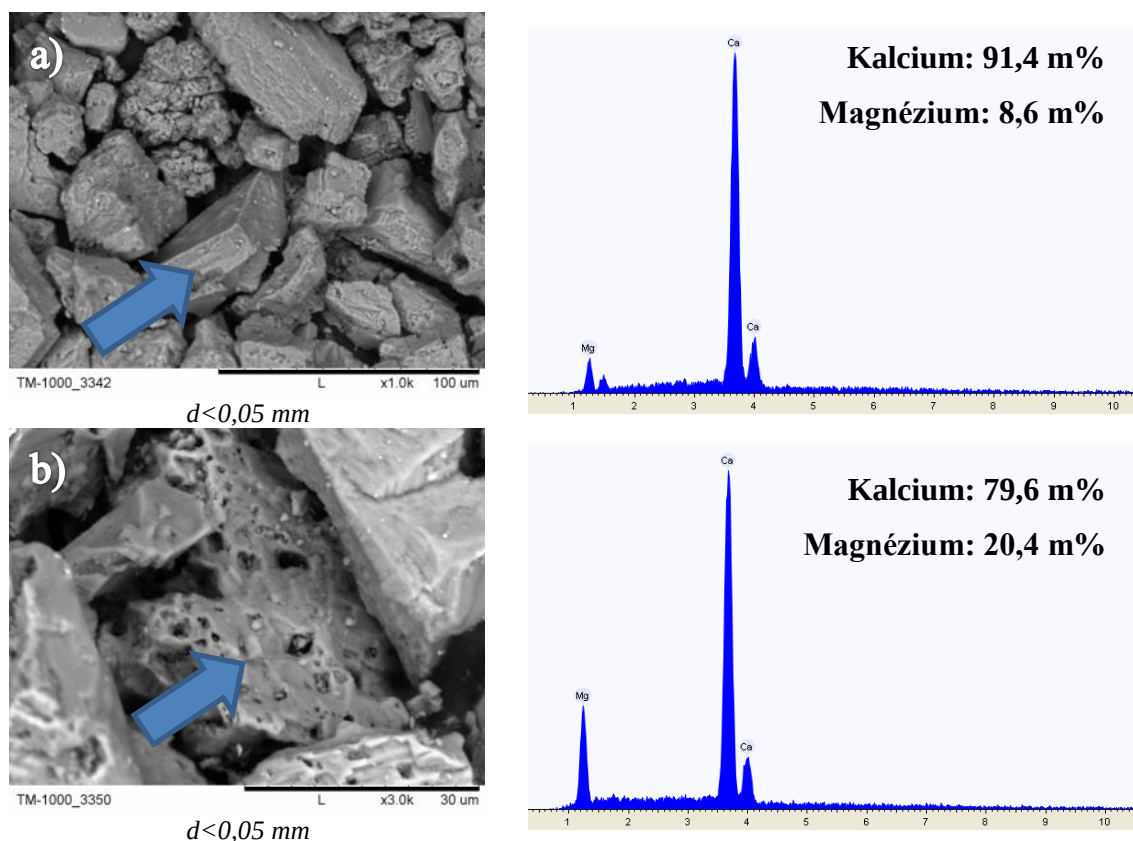
**34. ábra.** A dolomit frakcióinak mikroszerkezete

Mivel a dolomit őrlemény 2 különböző csomagolásban állt rendelkezésemre, amelyeknek szemeloszlása (*a finomrész tekintetében*) is eltérő volt, ezért ezek a különbségek a



mikroszerkezeti vizsgálatoknál is jelentkeztek. A 34. ábra a) felvételén jól látható, hogy a  $d < 0,045$  mm-es frakció lényegesen több finomrészt tartalmaz, mint az ennél nagyobb frakciók. Az EDS analízis minden esetben kalcium és magnézium együttes jelenlétét mutatta ki, egyéb alkotóelemet azonban nem tartalmaztak az egyes frakciók. Ez megerősíti azt a tényt, hogy a vizsgált anyagalmazokat dolomit kristályok ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) alkotják. A kalcium megközelítően 77–81 m%, míg a magnézium megoszlása ~19–23 m% között változott a területelemzés eredményei alapján. Nagyobb nagyítások esetén a szemcsék alaktani sajátosságai között eltéréseket figyeltem meg. Ennek bizonyítására az egymástól lényegesen eltérő szemcséken pontelemzést végeztem, melyek eredményeit a 35. ábra mutatja be.

A 35. ábra–a) SEM felvételén egy tömör, szögletes szemcsét emeltem ki, amelyen sem repedések, sem hasadási síkok nem láthatóak. Néhány mikronos kristályok tapadtak fel a nagyrészt sima felületekre, amelyek felületén nagymértékű porozításra utaló jelek nem figyelhetők meg. Az EDS spektrum 91 tömegszázaléknál nagyobb mennyiségű kalcium jelenlétét mutatta ki. A több látótérben megvizsgált, hasonló jellegű szemcse pontelemzése megerősíti a kalcit jelenlétét.



**35. ábra.** A dolomit jellegzetes szemcséi és azok EDS elemanalízise

A 35. ábra–b) felvételén egy lényegesen porózusabb, sokkal bonyolultabb felületű szemcse látható, melyeken hasadási síkok nem figyelhetők meg. A felületi képet a feltapadt apró szemcsék teszik még változatosabbá. Az első esettel ellentétben nagyobb belső porozitás is

megfigyelhető. Az EDS pontelemzés 80 m% alatti kalcium, és 20 m% feletti magnézium jelenlétét mutatta ki.

A mészkőliszt és a dolomit mikroszerkezeti és elemi összetétel vizsgálata során az alábbi megállapítások tehetők:

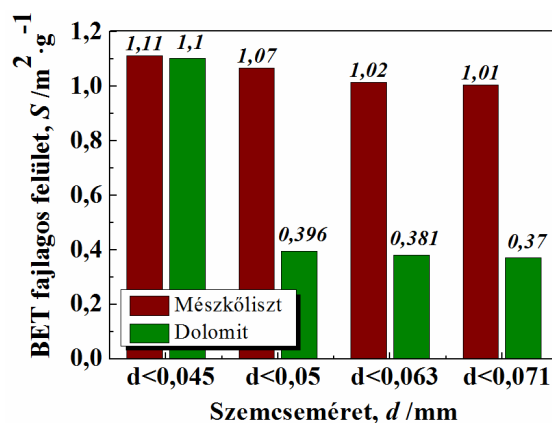
- A mészkőliszt finomrészekben gazdag polidiszperz rendszerként jellemezhető, melyben a nagyobb szemcsék felületére finom, mikronos és szubmikronos kalcitkristályok tapadtak fel. Polidiszperz rendszer lévén a mészkőliszt alkalmazásakor jó térkitöltés érhető el.
- Az egyéb szennyezőanyagot nem tartalmazó anyagrendszerben a kalcit szemcsék tömörök, felületükön nagy porozitásra utaló jelek nem láthatóak. Ennek következtében a szemcsék kis fajlagos felülettel rendelkeznek, amely a bitumen adszorpciója miatt előnyössé teszi ezen közetliszt felhasználását. Az éles határokkal tagolt szemcsék növelik mind az ásványi kőváz, mind pedig az optimális mennyiségű bitumennel kevert aszfalt belső súrlódását, növelve annak szilárdságát.
- A dolomit dolomitkristályokban gazdag polidiszperz rendszerként jellemezhető, melyben a kalcium és magnézium jelenléte változatos. A magas kalciumtartalmú szemcsék a mészkőlisztben is jelenlévő kalcit tulajdonságait hordozzák magukban. Ezek tömörök, sima töretfelülettel rendelkeznek és éles határokkal tagoltak. A magnéziumban dúsult szemcsékre ezzel szemben a változatos alakzat és lényegesen nagyobb porozitás jellemző.

## **2.7. A töltőanyagok fajlagos felületének vizsgálata**

A bitumen és a kőváz közötti kölcsönhatás a határfelületükön végbemenő adszorpciós folyamatoktól függenek, a fizikai adszorpciót pedig a töltőanyagok porozitása jelentősen befolyásolja. A szemcsék pórustartalma, a felületükön lévő repedések, a feltapadt mikronos és szubmikronos szemcsék növelik a töltőanyag fajlagos felületét, ezáltal hatással vannak a felületen megköthető bitumen mennyiségére is. A nagy fajlagos felület azonban túlzott bitumenigényt eredményezhet, ami egy optimális mennyiségen túl már csökkenti a burkolat szilárdságát. Az aszfaltkeverékek tervezésekor tehát mindig célszerű az optimális összetételt meghatározni.

A töltőanyagok fajlagos felületének meghatározása *Micromeritics* gyártmányú *TRISTAR 3000* típusú gázadszorpciós elven működő készülékkel, az egyes frakciók előkészítése pedig *SMARTPREP* berendezéssel történt. A fajlagos felület meghatározása volumetrikus módszer szerint zajlott, mely során a műszer a gázalanított mintákat alacsony hőmérsékletre hűtötte,

majd növekvő nyomásértékek mellett gázzal telítette. A nyomás növekedésével a töltőanyagok felületén nő a megkötött gázmolekulák száma, ezáltal az adszorbeálódott réteg vastagsága. A folyamat mindaddig tart, ameddig a mintán adszorbeálatlan felület található. Ezt követően a nyomás csökkentésével a felületen megkötött gázmolekulák felszabadulnak (*deszorpció*). A nyomásértékek és a megkötött gáz mennyisége alapján meghatározható a BET (*Brunauer-Emmett-Teller*)-féle fajlagos felület. A mérési eredményeket összefoglaló diagram (36. ábra) alapján az alábbi következtetések vonhatóak le. A mészkőliszt fajlagos felülete – mind a 4 vizsgált frakció esetén –  $1 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  körüli értékeket mutat, melyek között jelentős mértékű különbség ugyan nem látható, azonban egy trend jól megfigyelhető. Az egyes frakciók szemcseméretének csökkenése, a finom szemcsék mennyiségének növekedése a fajlagos felület növekedését eredményezi. A jelenség visszavezethető a töltőanyagok szemcseméret-eloszlás vizsgálatának eredményeire. A nagyméretű szemcsék felülete fajlagosan kicsi, a finom szemek nagyszámú jelenléte pedig a felületet növeli. Ha a vizsgált frakció nagyszámú, kisméretű szemcsét tartalmaz, az a fajlagos felület értékének növekedésében nyilvánul meg.



36. ábra. A töltőanyagok BET-féle fajlagos felülete

A dolomit fajlagos felülete az mészkőliszthez hasonlítva alacsonyabb. Ennek oka a dolomit szemcseeloszlásával jól magyarázható. A  $d < 0,045 \text{ mm}$  frakció BET-féle fajlagos felülete közel azonos a mészkőliszt hasonló frakciójának fajlagos felületével, mivel ez a frakció nagy mennyiségben tartalmaz kisméretű szemcséket. Ez a jelenség a korábbi SEM felvételekkel is jól alátámasztható (34. ábra). Ezzel szemben a nagyobb szemcseméretű frakciók esetében ( $d < 0,05 \text{ mm}$  –  $d < 0,07 \text{ mm}$ ) a finom szemek jelenléte minimális, a szűk szemcseeloszlású frakciók pedig relatíve nagy mennyiségű durvább szemcséket tartalmaznak, melyek a fajlagos felület csökkenését okozzák. Korábbi kutatási eredményeim, illetve más szakirodalmi források alapján [147, 148, 149, 150] – más típusú ásványi töltőanyagok fajlagos felületéhez

képest – a mészkőliszt és a dolomit kis fajlagos felülettel rendelkezik, ezért az aszfaltkeverékekben történő felhasználás szempontjából alkalmazásuk célszerű.

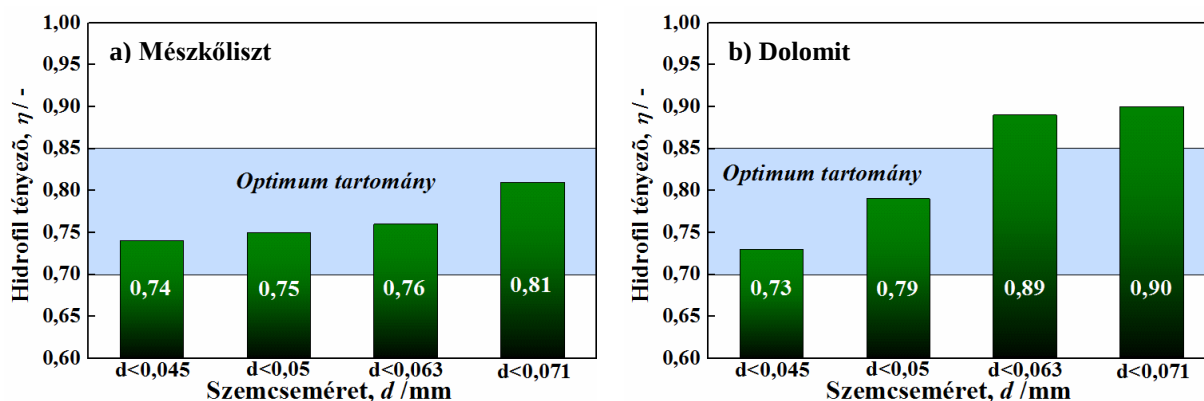
## **2.8. A töltőanyagok hidrofil/hidrofób tulajdonságainak vizsgálata**

Ahogy az már az 1.1.3. fejezetben is bemutatásra került, töltőanyagként a bázikus, karbonátos kőzetek aprításából származó anyagokat célszerű alkalmazni. Ezek az anyagok hidrofób tulajdonságúak, amely a kötőanyag felületükön történő megkötése szempontjából kedvező [6]. Mivel a különböző töltőanyagok szemcseeloszlása, tapadó-, és nedvszívóképessége különböző, anyagtypustól függő, ezért stabilizáló hatásuk is ennek megfelelően eltérő [7]. A hidrofil tényező megállapítása a töltőanyag víz és olaj adszorbeáló képességének összehasonlításán alapszik. Az olaj, akárcsak a bitumen apoláros folyadék. Vizsgálataim során azonban olaj helyett petróleumot használtam, ugyanis ez a folyadék a kísérlet szempontjából az olajjal azonos tulajdonságokkal rendelkezik, azonban kisebb sűrűsége miatt a szemcsék ülepedése gyorsabban végbemegy. Ez azért fontos, mert a hidrofil tényező ( $\eta$ ) [6, 151] értéke tulajdonképpen az ülepedési térfogatok arányából határozható meg:

$$\eta = \frac{V_{\text{víz}}}{V_{\text{petróleum}}} \quad (26)$$

Ha az arány értéke 1-nél nagyobb, akkor a töltőanyag hidrofil, ha 1-nél kisebb, akkor pedig hidrofób tulajdonságú. Szakirodalmi adatok [6] alapján a jó töltőanyag hidrofil tényezője 0,7 – 0,85 közötti.

A vizsgálatok során analitikai mérleg segítségével 5 gramm tömegű ásványi anyagot mértem be skálázott, talpas kémcsövekbe, melyeket aztán 10 ml-re töltöttem fel vízzel, illetve petróleummal. A folyadékok és a töltőanyagok megfelelő mértékű osszerázása, keverése után véglegesen 15 ml-re töltöttem a kémcsöveket, melyeket az esetleges párolgás elkerülése érdekében ledugóztam. Ezt követően a kémcsöveket nyugodt, rázkódásmentes helyiségbe tettem, majd 72 óra elteltével szemrevételezéssel meghatároztam a töltőanyagok ülepedési térfogatait. Párhuzamosan 5 vízzel töltött, illetve 5 petróleummal töltött kémcsőben végeztem el a méréseket, kiszámítottam az egyes mérések ülepedési arányait, majd a mérések számtani átlagértékei alapján meghatároztam a töltőanyagok hidrofil tényezőinek pontos értékeit [152]. A relatív szórás értéke minden esetben 7% alatti volt. A vizsgálati eredményeket a 37. ábra mutatja be.



37. ábra. A töltőanyagok hidrofilitási tényezői

Mivel az ülepedési térfogatok aránya minden esetben 1 alatti, ezért megállapítható, hogy mindkét ásványi töltőanyag hidrofób tulajdonságú. Jó alkalmazhatóságukat jelzi, hogy az egyes frakciók hidrofilitási tényezőinek értékei – két kivételtől eltekintve – az optimum tartományba esnek.

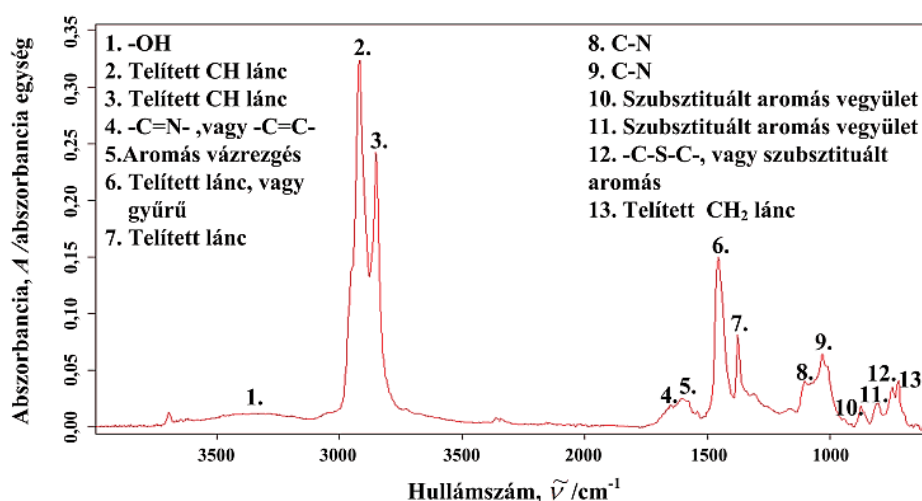
Visszavezetve a gondolatmenetet a szemeloszlás görbékre, megfigyelhető, hogy a finom szemcsék jelenléte a hidrofilitási tényező értékét csökkenti, míg a nagyobb szemcsék előfordulása nagyobb hidrofilitást eredményez. A töltőanyagok szemcseméretének hatását a finom rész aránya tehát erősen befolyásolja. A karbonátos kőzetek aprításával előállított töltőanyagok apró szemcséinek fajlagos felülete – a durvább szemcsékhez viszonyítottnak – nagy, melyeket az apoláros folyadék (*petróleum*) egyfajta burokként képes körbevenni, ennek következtében tehát egységnyi térfogatban nagyobb lesz azok ülepedési térfogata is. Minél nagyobb a szemcséket körbevevő burok vastagsága, annál jobb kapcsolatot képes az apoláros folyadék kialakítani az ásványi anyaggal. Így tehát minél nagyobb a szemcsék ülepedési térfogata a petróleumban, annál kisebb lesz azok hidrofilitási tényező értéke.

## 2.9. Útépítési bitumen Fourier transzformációs infravörös spektroszkópiás vizsgálata

A bitumenek összetételüket tekintve számos szénhidrogén vegyületből épülnek fel. Az 1.1.2. fejezetben ismertetettek alapján elmondható, hogy a bitumenek egy jelentős részét szén, kisebb részét pedig hidrogén alkotja, nyomokban pedig egyéb alkotóelemek is előfordulhatnak. Jellemző csoportjaik között említésre méltóak a különböző funkciós (*paraffinos, nafténes, alifás és aromás*) csoportok. A kötőanyagok összetételét alapvetően befolyásolja az adott nyersolaj összetétele. Példaként megemlíthető, hogy a bitumenben lévő paraffin csoport mennyisége a nyersolaj összetételétől függ, amely (*jelentős mennyiségben*) pedig a magas hőmérsékleteken (*pl. keverési hőmérséklet*) kialakuló bitumen/ásványi anyag kölcsönhatását károsan befolyásolhatja. Emiatt tartottam fontosnak, hogy a reológiai vizsgálataim során felhasznált bitumen összetételét meghatározzam. Ehhez Fourier

transzformációs infravörös spektroszkópiát (FTIR) alkalmaztam, mellyel lehetséges a bitumenben jelen lévő vegyületek és funkciós csoportok minőségi azonosítása. A módszer [153, 154] elve, hogy a vizsgált mintában az egyes molekulákat felépítő atomok a molekulán belül elmozdulhatnak, rezeghetnek. Ezek az elmozdulások, változások az egyes részecskék közötti kötőerőktől, a kémiai kötések típusától és a mozgó részecske atomtömegétől függenek. Mivel a rezgési szintek az infravörös tartományba esnek, emiatt lehetséges a molekulák azonosítása. Méréstechnikai szempontból a vizsgálati mintát infravörös sugárral világítjuk meg, amit egy *Michelson-interferométer* bont két sugárra, melyek egy álló és egy mozgó tükörről verődnek vissza. A berendezés által regisztrált jel tulajdonképpen a két tükör közötti útkülönbség, melynek Fourier transzformációjával meghatározható a spektrum, melyen az abszorbanciát a hullámszám<sup>6</sup> [155] függvényében szokás ábrázolni.

A B50/70 típusú százhalmobattai bitumen vizsgálatai egy *Bruker Tensor 27* típusú FTIR spektrométerrel történtek. A vizsgálat során rögzített spektrum a 38. ábra látható.



38. ábra. A B50/70 típusú bitumen FTIR spektruma

A 38. ábra alapján arra lehet következtetni, hogy a vizsgált bitument jellemzően telített szénhidrogén csoportok, valamint aromás vegyületek alkotják. Oxidációs termékként a bitumenben kis mennyiségben hidroxivegyületek is előfordulnak.

## 2.10. Útépítési bitumen differenciális pásztázó kalorimetriás vizsgálata

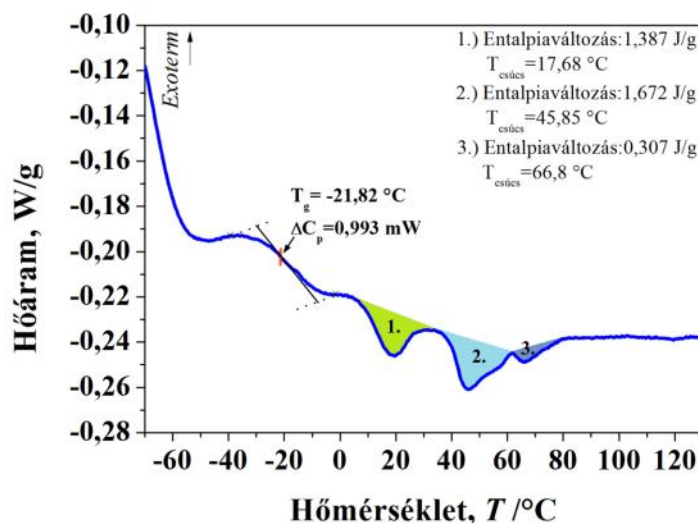
A bitumen, mint a polimerekre jellemző viselkedést mutató anyag viszkoelasztikus tulajdonságokkal bír. Alacsony hőmérsékleten rideg és törékeny, szobahőmérsékleten rugalmas, míg magas hőmérsékleten folyékony halmazállapotú. Ezt a sajátosságát az ipar számos területén kihasználják (*útépítési bitumenek, építőipari bitumenek, ipari és speciális bitumenek* [156]). Alkalmazásuk során kiemelt jelentősége van a felhasználási

<sup>6</sup> A hullámszám ( $\tilde{\nu}$ ) a hullámhossz reciprokával azonos hullámtulajdonság [155].

hőmérsékletnek. Éppen emiatt fontos ismerni ezeknek a kötőanyagoknak a hőmérséklet hatására bekövetkező tulajdonságváltozásait.

Differenciális pásztázó kalorimetria (DSC) segítségével meghatározhatóak a szilárd anyagok átalakulási hőjének (fázisátalakulás, szilárd anyagok bomlása, stb.) számszerű értékei. A vizsgálat során egy előre meghatározott hőmérsékleti görbe (fűtés, vagy hűtés is lehetséges) alkalmazásával mérhető a mintában végbemenő folyamatok hője. A DSC görbén megjelenő csúcsok az anyagban végbemenő változásra utalnak, integrálással pedig az átalakulás entalpiaváltozásának (a vizsgált anyag által felvett, vagy leadott energiamennyiség) pontos értéke is meghatározható [157]. A DSC göréből az előbbi folyamatok mellett egy másik jellemző, az üvegesedési hőmérséklet<sup>7</sup> ( $T_g$ ) is meghatározható az energia–hőmérséklet görbe (hőkapacitás) meredeksége alapján.

A későbbi reológiai vizsgálataim során felhasznált bitumenen differenciális pásztázó kalorimetriás mérést végeztem el, melyhez Setaram DSC 131 Evo típusú berendezést használtam. A B50/70 típusú bitumenből 29,2 mg-nyi mennyiséget mértem be a DSC készülék 30 ml maximális űrtartalmú, zárható alumínium tégelyébe. A vizsgálatot  $-70\text{ °C}$ – $130\text{ °C}$  közötti hőmérséklet-tartományban végeztem el,  $10\text{ °C/perces}$  lineáris felfűtési sebesség mellett, a kezdeti alacsony hőmérsékletet pedig cseppfolyós nitrogén felhasználásával értem el. A mérési adatokat a DSC berendezés Calisto Processing nevű szoftverének segítségével értékeltem ki.



39. ábra. A B50/70 típusú bitumen DSC görbéje

<sup>7</sup> Üvegesedési hőmérsékletnek ( $T_g$ ) nevezzük azt a hőmérsékletet, amely alatt az anyag felépítő makromolekulák mozgékonyága kicsi (ekkor az anyag kemény és rideg, "üvegszerű").  $T_g$  felett azonban a molekulák mozgékonyága fokozatosan növekszik mindaddig, amíg a rendszer folyékonyá válik [157].

A DSC görbe (39. ábra) egyes szakaszait elemezve az alábbi megállapítások tehetők. A vizsgálat kezdeti hőmérsékletétől ( $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a görbe egy erőteljesen csökkenő szakasszal kezdődik, melynek oka a mérés közbeni hőegyensúly beállása; ebben a hőmérséklet-tartományban fázisátalakulás nem történik.  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -tól kezdődően a  $-5^{\circ}\text{C}$ -ig terjedő szakaszban megfigyelhető, hogy a görbe alapvonala eltolódik, csúcs azonban nem jelenik meg. Ez a folyamat az ún. *üveges átalakulás* fázisa. A  $T_g$  értéke meghatározható az átalakulás előtti és utáni alapvonalak extrapolálásából, melynek számszerű értéke a vizsgált bitumen esetén:  $T_g = -21,82\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A hőmérséklet további növelésének hatására három endoterm csúcs jelenik meg, melyek egyértelműen olvadási folyamatra utalnak. Mindhárom átalakulás a bitument alkotó telített szénhidrogének olvadására utal [158, 159], csúcshőmérsékletük pedig  $T_{1csúcs} = 17,68\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{2csúcs} = 45,85\text{ }^{\circ}\text{C}$  és  $T_{3csúcs} = 66,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



### 3. ASZFALTHABARCSOK REOLÓGIAI VIZSGÁLATA

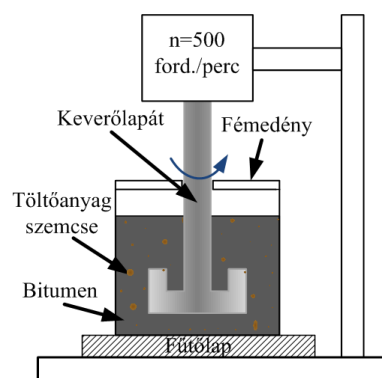
#### 3.1. Keverékkészítés

A reológiai vizsgálatokhoz szükséges aszfalthabarc-keverékeket az alábbiakban bemutatott módszer alapján készítettem el, figyelembe véve a [40, 78] forrásokban leírtakat is. A vizsgálatokhoz szükséges mennyiségű útépítési alapbitument (B50/70, Százhalombatta) egy erre a célra kialakított fémedényben, elektromos ellenállás-fűtésű szárítószekrény segítségével 160 °C hőmérsékletűre melegítettem fel. Ezáltal a kötőanyag megfelelően kis viszkozitásúvá vált, megkönnyítve a későbbi keverési műveletet. A töltőanyag felmelegítése elősegíti a könnyebb keverést: csökken a hőmérséklet-különbség a bitumen és az ásványi anyag között, csökken a csomósodás esélye, valamint az ásványi anyag esetleges nedvességtartalma is eltávolítható. A fémedénybe bemért bitumen tömegének ismeretében meghatároztam, és két tizedes jegy pontosságú digitális mérlegen kimértem a kívánt töltőanyag/habarc (a továbbiakban: T/H) térfogatarányhoz [79] szükséges ásványi töltőanyag mennyiségét (27).

$$f_f = \frac{V_f}{V_b + V_f} \quad (27)$$

A töltőanyag/habarc térfogatarányának számításához szükségem volt még a bitumen és a töltőanyagok sűrűségének pontos ismeretére is, melynek meghatározása piknométeres módszerrel történt [160, 161]. Ezek alapján a mészköliszt hézagmentes testsűrűsége  $\rho=2,717 \text{ g/cm}^3$ , a dolomit sűrűsége  $\rho=2,842 \text{ g/cm}^3$ , a százhalombattai B50/70 típusú bitumen sűrűsége pedig  $\rho=1,016 \text{ g/cm}^3$  értékre adódott.

A megfelelően átmelegedett bitument külön erre a célra összeállított keverő berendezésbe helyeztem. A konstrukció tulajdonképpen egy szabályozható fordulatszámú lapátos keverő, valamint egy szabályozott fűtéssel ellátott – kellően zárt – fémedény kombinációja (40. ábra). Amikor a töltőanyag is felmelegedett, azt óvatosan a bitumenbe adagoltam, mialatt 500 fordulat/perces keverést alkalmaztam. Miután a töltőanyagot maradéktalanul a bitumenbe kevertem, 30 percig folytattam a keverést, melynek eredményeként egy homogén, légbuborékoktól is mentes aszfalthabarc masszát kaptam<sup>8</sup>, melyeket a későbbi reológiai mérésekhez használhattam.



40. ábra. Keverő berendezés

<sup>8</sup> A későbbi reológiai mérések előtt a már korábban bekevert aszfalthabarcot is minden esetben 30 percig kevertem.

A T/H térfogatarányának meghatározásához korábbi irodalmi forrásokat vettem alapul [40, 79], melyek az T/H térfogatarányt 28%-ban maximalizálják. Előzetes keverési próbák során azt tapasztaltam, hogy 20 %-os töltőanyag/habarc térfogatarány esetén a habarc még megfelelően keverhető volt, további ásványi anyag adagolása viszont már lényegesen megnehezítette a keverést<sup>9</sup>. Ennek figyelembevételével készítettem el a keveréktervet, amely – a későbbi azonosítás megkönnyítése érdekében – jelöléseivel együtt a 8. táblázatban került összefoglalásra.

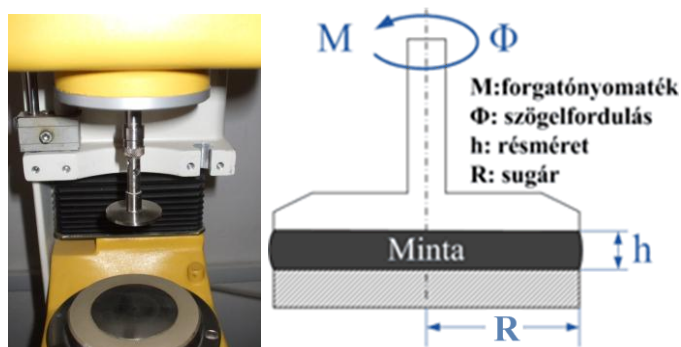
**8. táblázat.** A reológiai vizsgálatokhoz használt aszfalthabarc keverékek jelölése és összetétele

| Keverék jele   | Kötőanyag        | Töltőanyag típusa | Töltőanyag szemcsemérete | Töltőanyag/habarc térfogataránya |
|----------------|------------------|-------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 1. Bitumen     |                  | -                 | -                        | -                                |
| 2. ML_45μm_005 |                  |                   | d<0,045 mm               | 0,05                             |
| 3. ML_45μm_013 |                  |                   |                          | 0,13                             |
| 4. ML_45μm_020 |                  | Mészkőliszt       |                          | 0,20                             |
| 5. ML_63μm_005 |                  | (Mexikóvölgy)     |                          | 0,05                             |
| 6. ML_63μm_013 |                  |                   | d<0,063 mm               | 0,13                             |
| 7. ML_63μm_020 | B50/70 bitumen   |                   |                          | 0,20                             |
| 8. D_45μm_005  | (Százhalombatta) |                   |                          | 0,05                             |
| 9. D_45μm_013  |                  |                   | d<0,045 mm               | 0,13                             |
| 10. D_45μm_020 |                  | Dolomit           |                          | 0,20                             |
| 11. D_63μm_005 |                  | (Pilisvörösvár)   |                          | 0,05                             |
| 12. D_63μm_013 |                  |                   | d<0,063 mm               | 0,13                             |
| 13. D_63μm_020 |                  |                   |                          | 0,20                             |

Végeredményében tehát olyan keverékeket alakítottam ki, melyekben mind a töltőanyag típusának, szemcseméretének és a töltőanyag/habarc térfogatarányának kapcsolatai is vizsgálhatóak, illetve referenciaanyaggal (B 50/70 típusú bitumen) is összehasonlíthatóak.

### 3.2. Reológiai mérési módszerek

A B 50/70 típusú bitumen és az elkészített aszfalthabarcok reológiai vizsgálatait HAAKE RS 80 típusú dinamikus nyíróreométer (Dynamic Shear Rheometer, DSR) [162] (41. ábra) segítségével végeztem el. A műszer tulajdonképpen két párhuzamos síklap



**41. ábra.** HAAKE RS 80 dinamikus nyíróreométer és működési elve

<sup>9</sup> Megjegyzendő, hogy a valós aszfaltkeverékekben nem ezek az arányok fordulnak elő, hanem a bitumen (B):töltőanyag (T) aránya=1:1,4 (2). A dinamikus nyíróreométer adottságai azonban ennek az aránynak a vizsgálatát nem tették lehetővé.

között elhelyezkedő minta rotációs és oszcillációs vizsgálataira alkalmas. A vizsgálati anyag egy rögzített, *Peltier-elemekkel* fűthető alsó lap, valamint egy mozgatható, felső, 25 mm átmérőjű forgó mérőfej között helyezkedik el. A két lap közötti résméret precízen beállítható. A mérőfej légsapályázású forgástengelyhez csatlakoztatható, ezáltal kiküszöbölhető a súrlódás, a mérés során pedig a forgatónyomaték és a szögelfordulás (*elmozdulás*) értékeiből – optikai enkóder alkalmazásával – átalakíthatóak és származtathatóak a reológiai paraméterek. A készülék 3 mérési módban működtethető [162]:

- CS (*Controlled Stress*)-mód: szabályozható feszültségű mérést tesz lehetővé; a vizsgált minta növekvő feszültség (*egységugrás-gerjesztés, vagy sebességugrás-gerjesztés*) hatására adott deformációs válaszreakciója vizsgálható; jellemzően az alacsony nyírási sebességeknél alkalmazható (*pl. folyáshatár meghatározása*).
- CR (*Controlled Rate*)-mód: szabályozható deformáció-sebességű mérésekre alkalmas módszer; a vizsgált minta növekvő deformáció-sebesség (*egységugrás-gerjesztés, vagy sebességugrás-gerjesztés*) hatására adott feszültségbeli válaszreakciója vizsgálható (*pl. feszültség-relaxáció mérése, folyásgörbe meghatározása*);
- CD (*Controlled Deformation*)-mód: a mérési mód lehetővé teszi a rendkívül érzékeny lépésekben szabályozható deformáció előállítását (*pl. LVE tartomány meghatározása*)

A dinamikus nyíróreométer résméretét – figyelembe véve az aszfalthabarc keverékekben jelen lévő ásványi szemcsék méretét – a reológiai vizsgálatok során minden esetben 1,5 mm-ben határoztam meg. Miután a mintát a 60 °C-ra beállított alsó lapra öntöttem, a résméretet 1,525 mm-re állítottam, majd a kinyomódó anyagfelesleget eltávolítottam. Ezután a résméretet az 1,5 mm-es végső helyzetbe állítottam, majd a szükséges vizsgálati hőmérsékleten 30 perces temperálást végeztem el a minta teljes átmelegedése érdekében.

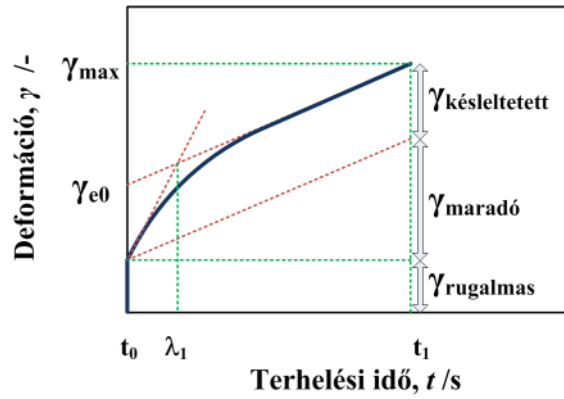
A mérések során a bitumen és aszfalthabarc keverékek lineárisan viszkoelasztikus tartományának, statikus terhelésre adott válaszreakciójának, folyási tulajdonságainak, valamint hőmérséklet-, és frekvenciafüggésének meghatározására került sor. A teszhőmérsékletek a nyári üzemi burkolathőmérsékletek, illetve az aszfaltkeverékek bedolgozási hőmérsékletei alapján kerültek megválasztásra.

### 3.3. Aszfalthabarcok kúszás-visszaalakulásának vizsgálata

Az elkészített mintákon kúszás-visszaalakulás vizsgálatot végeztem el, mellyel tanulmányozhatóak az aszfalthabarcok viszkoelasztikus tulajdonságai. A teszt során a dinamikus nyíróreométer konstans nyírófeszültséget állít elő, mellyel meghatározott ideig terheli a mintát. Ebben a terhelési (*kúszási*) szakaszban a viszkoelasztikus anyagban

deformáció lép fel, mely 3 típusra osztható.

A  $t_0$  időpillanatban  $\tau_0$  konstans nyírófeszültség hatására pillanatnyi rugalmas deformáció alakul ki. Ezt követően további terhelésre az anyagban egyfajta késleltetett deformáció jön létre, mely kellően hosszú idő elteltével elér egy egyensúlyi állapotot (*newtoni folyás*). Erre a lineáris szakaszra egy egyenest illesztve, és



42. ábra. A Burgers-modell paramétereinek meghatározása a kúszásgörbéből

azt  $t_0$  időpillanatra extrapolálva megadható az ún. *egyensúlyi deformáció* ( $\gamma_{e0}$ ) értéke. Ezt az egyenest a kúszásgörbe retardációs szakaszának kezdőpontjából illesztett egyenessel metszve, és az így kapott metszéspontot az abszcisszára vetítve meghatározható a retardációs idő ( $\lambda_1$ ). A kúszási folyamat a már korábban bemutatott négyparaméteres *Burgers-modellel* jó leírható. Az anyagegyenlet paramétereinek meghatározása a 42. ábra, valamint az ismert összefüggések alapján a 9. táblázatban bemutatott módon lehetséges [163].

9. táblázat. Modellparaméterek meghatározása a kúszási szakaszban

| Modellparaméterek                         |                                                  |                                                               |                                          |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| $G_1 = \frac{\tau_0}{\gamma_r} \quad (1)$ | $G_2 = \frac{\tau_0}{\gamma_k(t=t_1)} \quad (2)$ | $\eta_1 = \frac{\tau_0}{\gamma_m(t=t_1)} \cdot t_1 \quad (3)$ | $\eta_2 = G_2 \cdot \lambda_1 \quad (4)$ |

A terhelés megszüntetését követően a viszkoelasztikus anyagrendszer – rugalmas tulajdonságai miatt – a deformáció csökkentésére törekszik. A *Maxwell-modell* rugalmas tagjának köszönhetően ( $G_1$ ) a tehermentesítés után pillanatnyi rugalmas visszaalakulás megy végbe, amit egy késleltetett szakasz követ. Ebben a szakaszban a deformáció exponenciális függvénnyel közelíthető, mechanikai modellje pedig a *Voigt-Kelvin-modellel* írható le. Kellően hosszú idő elteltével a *Maxwell-modell* viszkózus tagjának köszönhetően az anyagban vissza nem alakuló, ún. *maradó deformáció* keletkezik. A visszaalakulási szakasz leírható az (28) egyenlettel:

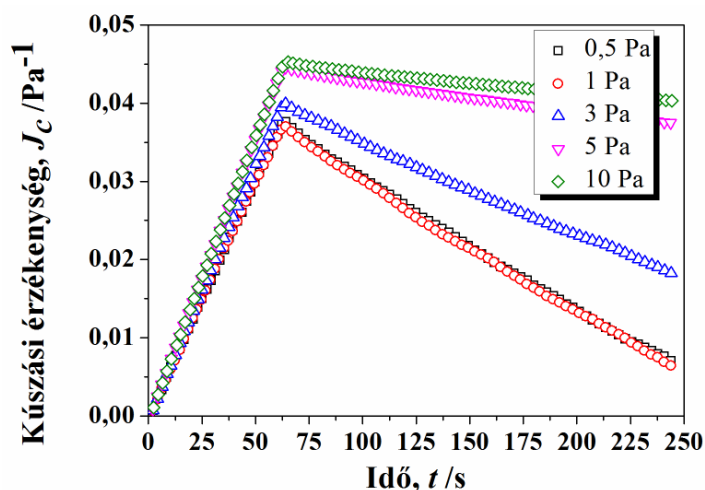
$$\gamma = \gamma_0 + \dot{\gamma} \cdot t_2 + \gamma_1 \cdot (1 - e^{-\frac{t_2}{\lambda_2}}) \quad (28)$$

A (28) egyenletben szereplő anyagparaméterek meghatározási módjait a 10. táblázat tartalmazza.

10. táblázat. Modellparaméterek meghatározása a visszaalakulási szakaszban

| Modellparaméterek                       |                                           |                                                  |                                            |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| $\gamma_0 = \frac{\tau}{G_0} \quad (1)$ | $\gamma_1 = \frac{\tau_0}{G_1} \quad (2)$ | $\dot{\gamma} = \frac{\tau_0}{\eta_0} \quad (3)$ | $\lambda_2 = \frac{\eta_2}{G_2} \quad (4)$ |

Az aszfalthabarc keverékek kúszás-visszaalakulás vizsgálata során első lépésben meg kellett határoznom a nyírófeszültség értékét. Ehhez egy már korábban bemutatott módszert alkalmaztam, melynek során különböző konstans nyírófeszültségekkel terheltem a mintát. A cél az LVE tartományon belüli maximális nyírófeszültség meghatározása volt. A kapott eredményeket a nyíró kúszási érzékenység ( $J_c$ ) függvényében ábrázoltam (43. ábra).



43. ábra. A kúszásvizsgálatokhoz szükséges nyírófeszültség meghatározása

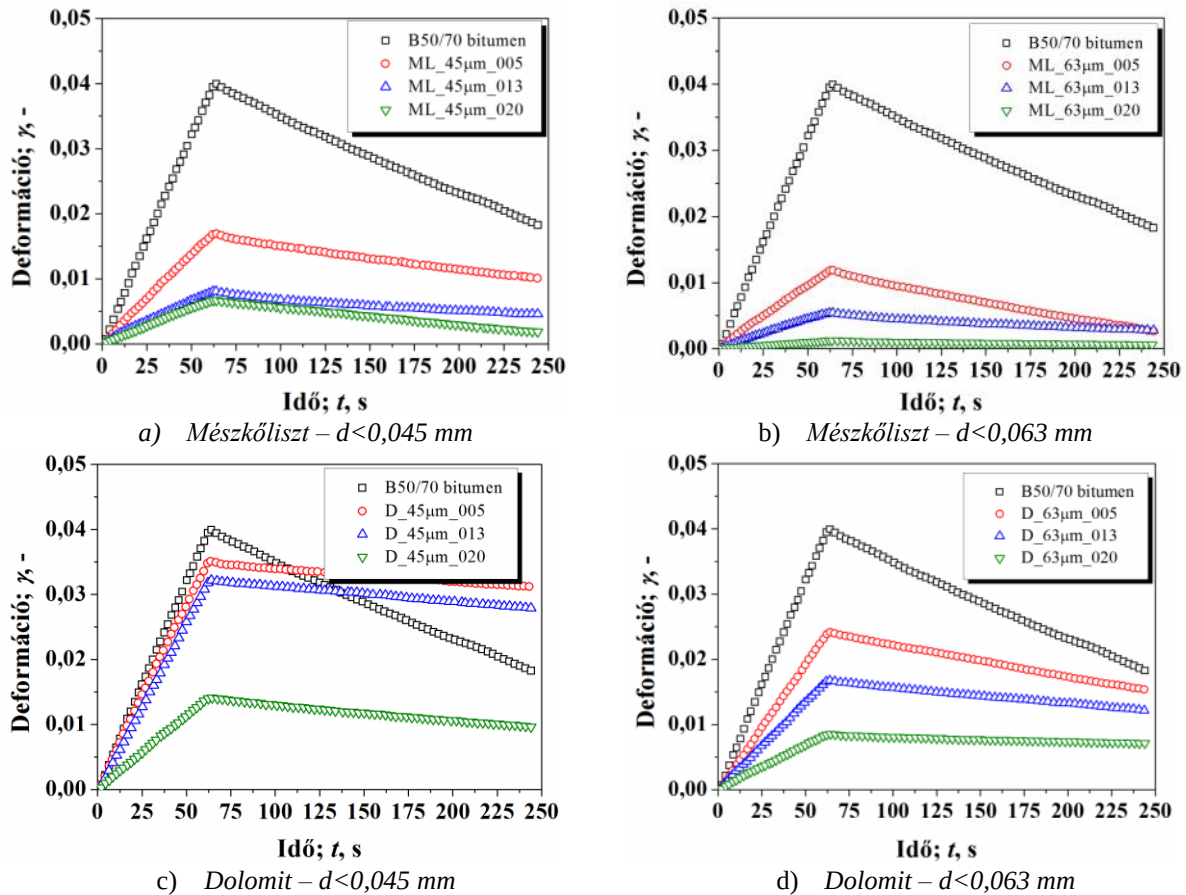
Azokat a feszültségértéket kerestem, amelyek hatására az anyagrendszer kúszási érzékenység görbéi átfedésbe kerülnek. A növekvő feszültség-értékek hatására a nyírási érzékenység görbék a 0,5 Pa és az 1 Pa terhelés esetében fedték egymást. Nagyobb feszültségek mellett az érzékenység is növekedett. Az eredmények ismeretében tehát a kúszás-visszaalakulás vizsgálatokhoz szükséges nyírófeszültséget  $\tau_0=1$  Pa-ban határoztam meg<sup>10</sup>, amely szakirodalmi adatok alapján [164] kis forgalmú útpályaszerkezet terhelését jelképezi. A teszteket minden esetben 60 °C-on végeztem el, amelyet a legmelegebb nyári üzemi hőmérséklet alapján választottam meg.

A terhelési és tehermentesítési időket – korábbi szakirodalmi vizsgálati módszereket is figyelembe véve [79, 164, 165, 166, 167] – 60 sec (*kúszás*) és 180 sec (*visszaalakulás*) értékekben határoztam meg. Ezek a beállítások tulajdonképpen modellezik egy jármű piros lámpánál való tartózkodását (*konstans terhelés, kúszás*), majd az elindulását követő folyamatokat (*a terhelés megszűnése, a burkolatban bekövetkezett alakváltozás visszaalakulása*).

Minden keveréken 3 mérést végeztem el, amelyek átlagértékeiből határoztam meg a kúszási és visszaalakulási szakaszok anyagjellemzőit. Ezek ismeretében nemlineáris regresszió segítségével hasonlítottam össze a mért és számított eredményeket. Az egyes keverékek

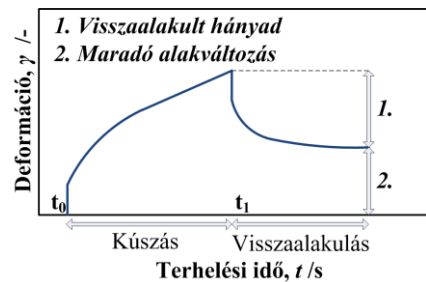
<sup>10</sup> A kúszásvizsgálatok esetében alkalmazott feszültségértékek a gyakorlatban jellemzően alacsonyak, éppen azért, hogy az LVE tartományon belüli mérés biztosítható legyen [99]

kúszás-visszaalakulás görbéire illesztett modellek, a kapcsolódó determinációs együtthatók, valamint a számszerűleg meghatározott modellparaméterek értékei a 3. Mellékletben kerülnek bemutatásra. Az aszfalthabarc keverékek vizsgálati eredményeinek összefoglaló diagramjain (44. ábra) a töltőanyag típusának, szemcseméretének és a töltőanyag/habarcstérfogatarányának hatása is jól megfigyelhető.



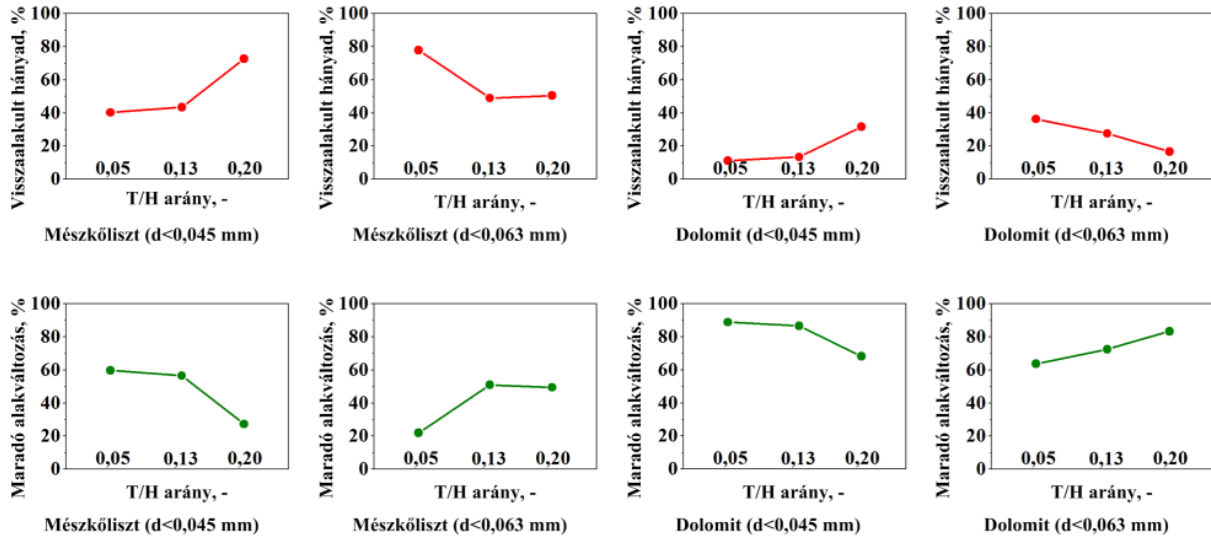
44. ábra. Összesített kúszás-visszaalakulás diagramok ( $T=60\text{ °C}$ )

A visszaalakulási szakaszban lejátszódó folyamatok könnyebb értelmezhetőségét két anyagjellemző könnyíti meg. A visszaalakult hányad kifejezhető a kúszási szakasz végén elért teljes deformáció és a visszaalakulási szakasz végén kialakult deformáció különbségének teljes deformációra vetített százalékos arányaként. Ennek analógiáján pedig a maradó alakváltozás a teljes deformáció és a visszaalakult hányad különbségeként fejezhető ki (45. ábra). Az egyes aszfalthabarc-keverékek visszaalakult hányadának és maradó alakváltozásának összefoglalt diagramjait a 46. ábra mutatja be.



45. ábra. A visszaalakult hányad és a maradó alakváltozás értelmezése





46. ábra. Aszfalthabarcok keverékek visszaalakult hányadai és maradó alakváltozásai

A vizsgálatok összesített diagramjait (44. ábra és 46. ábra) tanulmányozva megállapítható, hogy konstans terhelés hatására a referenciaanyagként használt B50/70 típusú bitumen szenvedte el a legnagyobb deformációt. Az ábrákon jól megfigyelhető a bitumenre jellemző viszkoelasztikus jelleg is, ugyanis a terhelés megszűnését követően a rugalmas tulajdonságoknak köszönhetően nagymértékű visszaalakulás történik.

Aszfalthabarcok esetén azonban már figyelembe kell venni a bitumenben jelenlévő ásványi anyagok szemcseméretét, mennyiségét (*térfogatarányát*), valamint alaktani sajátosságait is. A 2.6. fejezetben bemutatott pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok eredményei alapján már ismert, hogy a vizsgált töltőanyag szemcsék szögletesek, hasítottak, éllel határoltak, ugyanakkor az anyaghalmazban előfordulnak nyújtott, lapos és gömbszerű szemcsék is.

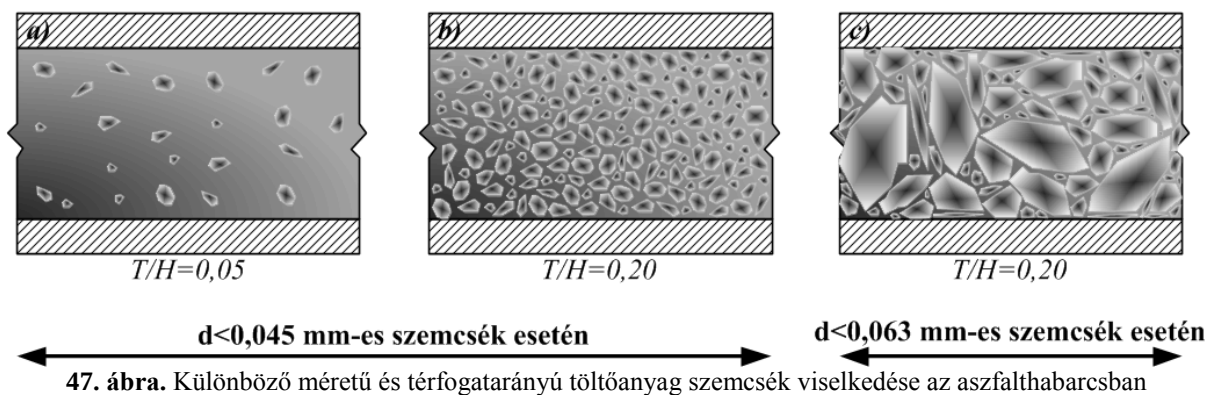
Érdekes jelenség figyelhető a visszaalakult hányad kapcsán a finomabb és durvább szemcsék adagolása esetén. Amíg a finom szemcsék mennyiségének növelésével a visszaalakult hányad is növekszik (46. ábra), addig a durva szemek esetében ez éppen ellenkezőleg. Mivel a durva szemcsék fajlagos felülete kisebb, emiatt az azokat bevonó bitumenréteg mennyisége is kevesebb lesz. Ezáltal csökken a viszkoelasztikus jelleg, a nagy szilárd szemcsék miatt pedig az anyagrendszer sem képes nagymértékű visszaalakulásra.

A 47. ábra a konstans terhelésnek kitett, egységnyi térfogatú, különböző szemcseméretű, növekvő mennyiségű töltőanyaggal készített aszfalthabarcok viselkedéseit mutatja be, mellyel jól magyarázhatóak a kúszás-visszaalakulás vizsgálatok során bekövetkező jelenségek.

A finom frakció ( $d < 0,045 \text{ mm}$ ) térfogatarányának növelése egységnyi térfogatban csökkenti a szabad bitumen mennyiségét, melynek következtében egy olyan erősebb kölcsönhatás alakul

ki a szemcsék és a bitumen között, amely erősíti az aszfalthabarcok rugalmas tulajdonságát, ezáltal megnövelve az aszfalthabarcok visszaalakult hányadát.

Ha a finom szemcsék a legkisebb térfogatarányban vannak jelen a bitumenben (47. ábra–a)) növekszik, akkor egységnyi térfogatban a bitumen mennyisége még meglehetősen nagy. Ekkor a szemcsék a szabad bitumen zónájában érintkezhetnek egymással. A szemcsék közötti távolság nagy, ezért a kötés erősségét a kisebb viszkozitású és szilárdságú szabad bitumen fogja befolyásolni. Nagyobb T/H aránynál (47. ábra–b)) a finom szemcsék közelebb kerülnek egymáshoz, csökken a szabad bitumen mennyisége és a szemcsék a megkötött bitumenen keresztül kapcsolódnak. Ebben az esetben a kötött bitumen nagyobb viszkozitása miatt erősebb kölcsönhatás alakul ki.



47. ábra. Különböző méretű és térfogatarányú töltőanyag szemcsék viselkedése az aszfalthabarcban

A durvább frakciók esetén ( $d < 0,063 \text{ mm}$ ) a nagyobb szemcsék miatt egységnyi térfogatban lecsökken a bitumen mennyisége (47. ábra–c)), melynek következtében nagymértékben visszaszorul annak rugalmas jellege is. Emiatt a habarcok visszaalakulását már nem a bitumen rugalmas jellege, hanem a szemcsék egymással kialakított kölcsönhatása fogja befolyásolni, amelynek következtében csökken a visszaalakulás mértéke.

Egy másik jelentős különbség figyelhető meg a vizsgálatok eredményeiben. A görbéken jól látszik, hogy a mészköliszt felhasználásával készített keverékek terhelés hatására minden esetben lényegesen kisebb deformációt szenvednek, mint a dolomittal készült keverékek. A jelenség oka – ahogyan az már az irodalmi összefoglalásból is ismert –, hogy a mészköliszt alapvetően sokkal erősebb kapcsolatot képes kialakítani a bitumennel, ezáltal jobban stabilizálja, megköti a bitument, amellyel jobb merevítő hatást képes előidézni. Ezzel szemben a dolomittal készült keverékekben a kötés erőssége gyengébb, emiatt a viszkózus tulajdonság dominál, ami nagyobb deformációt, kisebb visszaalakulást és nagy maradó alakváltozást eredményez.

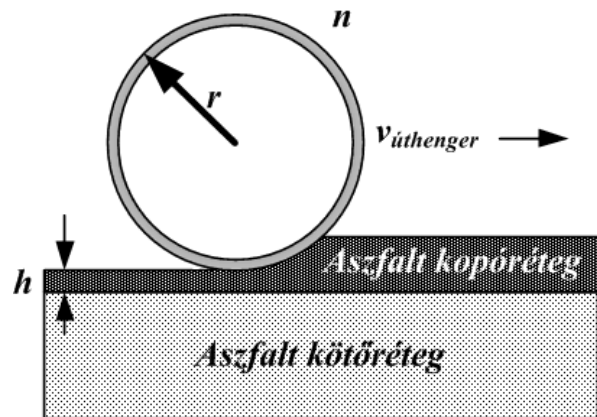


### 3.4. Aszfalthabarcok folyási tulajdonságainak vizsgálata

A különféle anyagok reológiai vizsgálatain során fontos megismerni és feltárni azok folyási tulajdonságait. A viszkoelasztikus anyagként viselkedő bitumen, illetve a felhasználásukkal előállított aszfaltkeverékek esetében is így van ez. Mind a kötőanyag adagolása, permetezése, a szerves és szervetlen alapanyagok összekeverése, és bedolgozása során nagy jelentősége van a folyási tulajdonságoknak. Mint ismeretes, a bitumen viszkozitása a hőmérséklet növekedésével az *Arrhenius-Andrade egyenlet* (13) szerint változik. Az aszfaltkeverékek egyes technológiai folyamatait ennek függvényében kell megválasztanunk. Ebből a szempontból kiemelt hőmérsékletnek tekinthető a 135 °C-ot is, amely egy – kötőanyag-típustól függően – általános bedolgozási hőmérsékletet jelöl. A fentieket figyelembe véve tehát az útépitési bitumen és az aszfalthabarc-keverékek folyási viselkedésének meghatározásához is ennek megfelelően választottam meg a reológiai vizsgálatok hőmérsékleteit.

#### 3.4.1. Deformáció-sebesség tartományok meghatározása

Az 1.2.6. fejezetben már bemutatásra került, hogy a különböző anyagok folyásgörbéi meghatározhatók a deformáció-sebesség hatására kialakuló nyírófeszültségek függvényeként. A vizsgálataimhoz szükséges deformáció-sebesség tartományok megválasztásának háttérét egy életszerű példán keresztül mutatom be. Az aszfalt kopórétegek tömörítése, hengerlése során egy tipikus aszfalt úthenger (*BOMAG BW*



48. ábra. Az úthengerlés elvi rajza

141 AD-4 [168]) műszaki adatait felhasználva a deformáció-sebesség értékét az következő módszerrel határoztam meg. Ha az úthenger geometriai paraméterei (*úthenger sugara, sebessége, fordulatszáma*), valamint a hengerléskor kialakuló aszfalt rétegvastagsága ismertek (48. ábra), akkor a deformáció-sebesség a (29) egyenlet alapján határozható meg [82]:

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \cdot r \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot h}; s^{-1} \quad (29)$$

A [168] irodalomban fellelhető műszaki adatok alapján  $r=0,61$  m, valamint az úthenger sebessége  $v=2,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Az aszfalt kopóréteg vastagsága a 11. táblázatban feltüntetett értékek alapján választható.

**11. táblázat.** Vastagsági határértékek [169] (*F és mF: különböző aszfaltbeton típusok*)

| Az aszfalt típusa                                  | Tervezhető legkisebb vastagság, mm | Egy rétegben építhető legnagyobb vastagság, mm |
|----------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|
| AC 4 kopó ( <i>csak kerékpár-és gyalogútra</i> )   | 15                                 | 30                                             |
| AC 8 kopó                                          | 25                                 | 40 (45)                                        |
| AC 8 kopó ( <i>kiegyenlítő-réteggént építve</i> )  | 15                                 | 40                                             |
| AC 11 kopó                                         | 35                                 | 50 (55)                                        |
| AC 11 kopó ( <i>kiegyenlítő-réteggént építve</i> ) | 20                                 | 60                                             |
| AC 11 kopó(F), AC 11 kopó(mF)                      | 35                                 | 50 (65)                                        |
| AC 16 kopó(F), AC 16 kopó(mF)                      | 50                                 | 60 (80)                                        |

Figyelembe véve a legkisebb és legnagyobb rétegvastagságot, a kialakuló deformáció-sebesség értéke  $36,5 \text{ s}^{-1}$  ( $80 \text{ mm}$  rétegvastagság) és  $194,4 \text{ s}^{-1}$  ( $15 \text{ mm}$  rétegvastagság) értékek között változhat. Ennek ismeretében a vizsgálataim során törekedtem az ezen deformáció-sebesség tartományokon belüli mérésekre. Előzetes kísérleteim során azt tapasztaltam, hogy a vizsgálati hőmérsékletek alacsonyabb tartományaiban ( $60\text{--}90^\circ\text{C}$ ) a bitumen és aszfalthabarc-keverékek nagy viszkozitása, illetve a reométer műszaki adottságai csak a  $0\text{--}20 \text{ s}^{-1}$  deformáció-sebesség tartományban tette lehetővé a mérést. Mivel a hőmérséklet emelkedésével a minták viszkozitása is csökkent, így a méréstartományt sikerült kiszélesítenem  $100 \text{ s}^{-1}$ , majd  $200 \text{ s}^{-1}$  értékekig. A folyásgörbe meghatározás mérés technikai lépései az alábbiakban foglalható össze:

- DSR: rotációs üzemmód
- Vizsgálati hőmérsékletek:  $T= 60^\circ\text{C}, 75^\circ\text{C}, 90^\circ\text{C}, 105^\circ\text{C}, 120^\circ\text{C}$  és  $135^\circ\text{C}$ .
- CS-mód (*folyáshatár meghatározása*):  $\tau=0,8 \text{ Pa}\text{--}32 \text{ Pa}$ ,
- CR-mód (*folyásgörbe felvétele*):  $\dot{\gamma}=0,1 \text{ s}^{-1}\text{--}20 \text{ s}^{-1}$  ( $60\text{--}90^\circ\text{C}$ ),  
 $\dot{\gamma}=0,1 \text{ s}^{-1}\text{--}100 \text{ s}^{-1}$  ( $105^\circ\text{C}$ ),  
 $\dot{\gamma}=0,1 \text{ s}^{-1}\text{--}200 \text{ s}^{-1}$  ( $120^\circ\text{C}\text{--}135^\circ\text{C}$ ).

### 3.4.2. Korrekció alkalmazása a mérési adatokon

A folyásgörbék felvételekor rögzített mérési adatok további feldolgozásához korrekciókat kellett alkalmaznom. Erre azért volt szükség, mivel lap-lap mérőgeometria esetén a nyírófeszültség és a deformáció-sebesség is a mérőfej sugarától függ [99], emiatt a mérés során csupán a látszólagos folyásgörbe felvétele lehetséges. Korrekció alkalmazásával azonban a

valódi folyásgörbe is meghatározható, amely a vizsgálat körülményeire vonatkozóan már reálisan jellemzi az anyagrendszer folyási viselkedését.

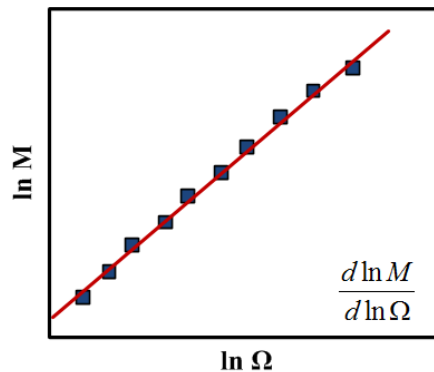
Mivel lap-lap geometria esetén a mérőfej sugarában a deformáció-sebesség nem egyenletesen alakul ki, ezért azt a mérőfej peremén szükséges meghatározni (30) a szögsebesség, a mérőfej rádiusza, valamint a résméret függvényében:

$$\dot{\gamma}_R = \frac{\Omega \cdot R}{h}; s^{-1} \quad (30)$$

A nyírófeszültség a reométer által kifejtett nyomaték és a mérőfej geometriájának ismeretében számítható:

$$\tau_R = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot R^3} \cdot \left[ 3 + \frac{d \ln M}{d \ln \Omega} \right]; Pa \quad (31)$$

A (31) egyenletben, szögletes zárójelben szereplő kifejezés egy korrekciós tényező, amelynek pontos értéke lineáris regresszióval állapítható meg (49. ábra).



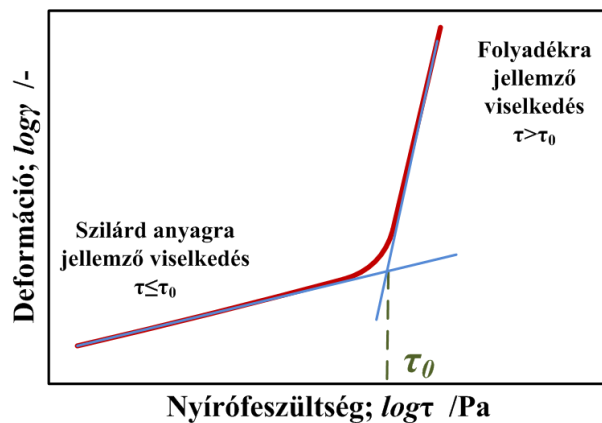
49. ábra. A korrekciós tényező meghatározása lineáris regresszióval

A tényező kiszámítható a vizsgálat során rögzített nyomaték és szögsebesség értékek természetes logaritmusát véve, a kapott pontokra egy egyenest illesztve, az egyenes meredekségéből. Az eredményt behelyettesítve a (31) egyenletbe már adódik a mérőfej peremén kialakuló nyírófeszültség. Az így korrigált adatok felhasználásával már az anyag valódi folyásgörbéje is származtatható.

### 3.4.3. A folyáshatár meghatározása

Szakirodalmi források és előzetes vizsgálataim arra utaltak, hogy a bitumen, illetve az aszfalthabarc-keverékek folyáshatárral rendelkező *(tehát bizonyos mértékű plaszticitást is mutató)* viszkoelasztikus anyagrendszereknek tekinthetők. A folyáshatár gyakorlati meghatározása nehézkes feladat, anyagtypustól függően különböző mérés technikai módszerek ismertek [99, 99, 162].

Vizsgálataim során CS mérési mód alkalmazásával határoztam meg a bitumen és aszfalthabarc-keverékek folyáshatárait a vizsgálati hőmérsékleteken. A módszer lehetőséget ad nagyon kis nyírófeszültségek előállítására, melyek segítségével az anyag valódi folyáshatára sokkal pontosabban meghatározható. A mérés azon a feltételezésen alapszik, hogy a vizsgált viszkoelasztikus anyagrendszer szilárd anyagokra és folyadékokra jellemző viselkedést is mutat.



50. ábra. A folyáshatár meghatározási módja CS-módban

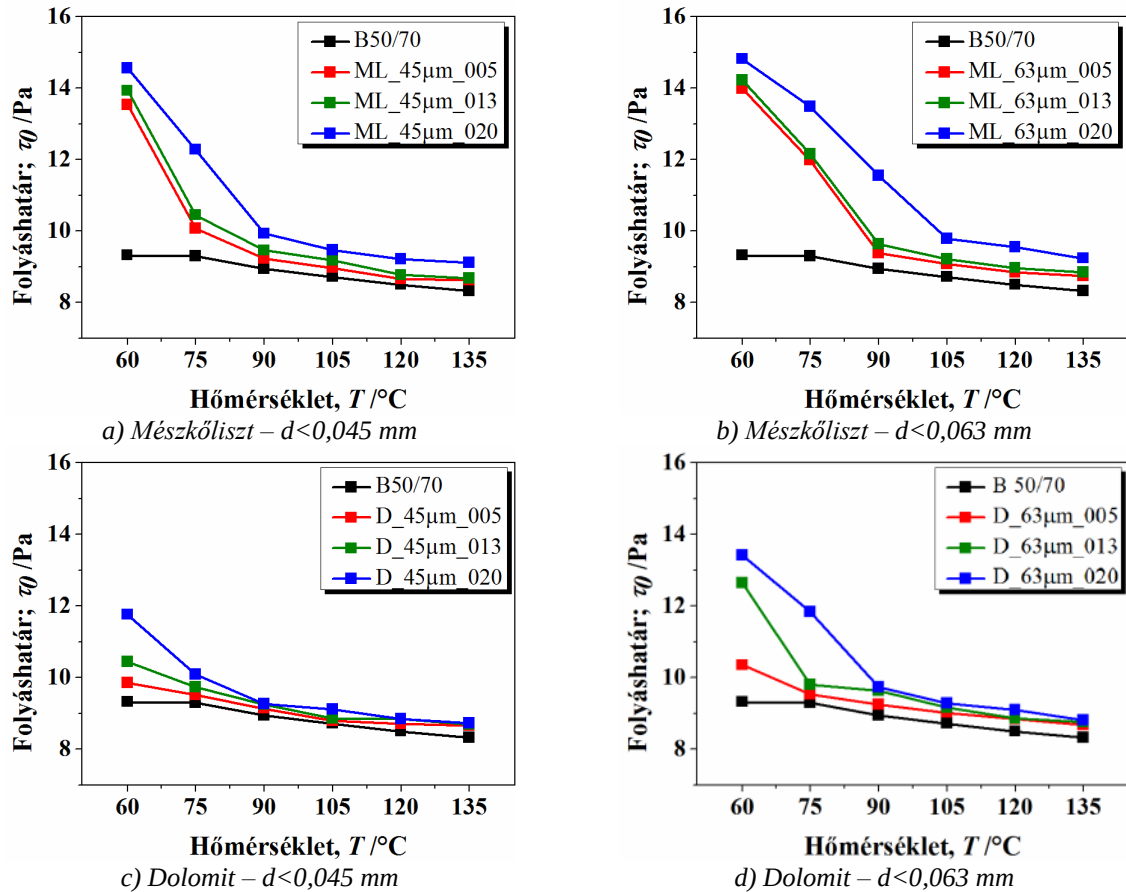
Szilárd (*rugalmas*) anyagok esetén a feszültség és az általa létrehozott deformáció között lineáris kapcsolat áll fenn (50. ábra). A mérési adatokat (*nyírófeszültség, deformáció*) logaritmikus léptékben ábrázolva a nyírófeszültséggel növekvő görbét kapunk. Amennyiben a folyáshatárnál nagyobb feszültséggel terheljük az anyagot, akkor a deformáció mértéke – és így a görbe jellege is – drasztikusan megváltozik. A görbe két szakaszára egyeneseket illesztve azok metszéspontja fogja meghatározni az anyagrendszer folyáshatárát [162].

A folyási tulajdonságok vizsgálata során meghatározott folyáshatárok eredményeit összefoglaló diagramokat az 51. ábra tartalmazza.

A diagramokon jól megfigyelhető az aszfalthabarcok folyáshatárainak alakulása. A hőmérséklet növekedésével a bitumen, illetve a belőle készített habarcok folyáshatárai csökkenő tendenciájúak. Ennek oka az, hogy a bitumen viszkozitása a hőmérséklet függvényében erősen változik.

Másik jelentős különbség, hogy a nagyobb szemcséket is tartalmazó frakciók ( $d < 0,063 \text{ mm}$ ) – a szemcsék közötti érintkezés nagyobb valószínűsége miatt – nagyobb folyáshatárt eredményeznek, mint a kisebb szemcseméretű frakciók.

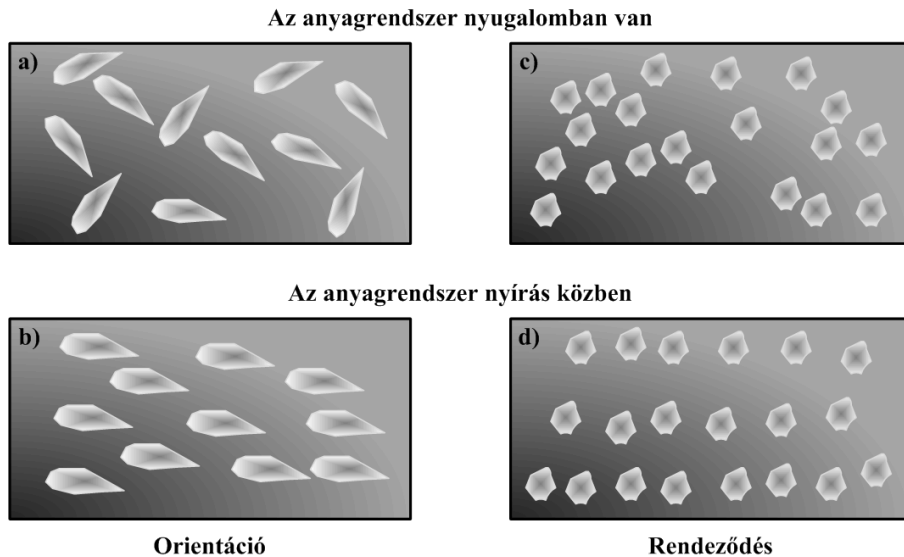
Az is megfigyelhető, hogy a mészkölisztet tartalmazó habarcok nagyobb folyáshatárral rendelkeznek, mint a dolomittal készült keverékek. Ez az eredmény is erősíti azt a feltételezést, hogy a bitumen a mészköliszttel jobb kölcsönhatást tud kialakítani.



51. ábra. Aszfalthabarcok-keverékek folyáshatárainak változása a hőmérséklet függvényében

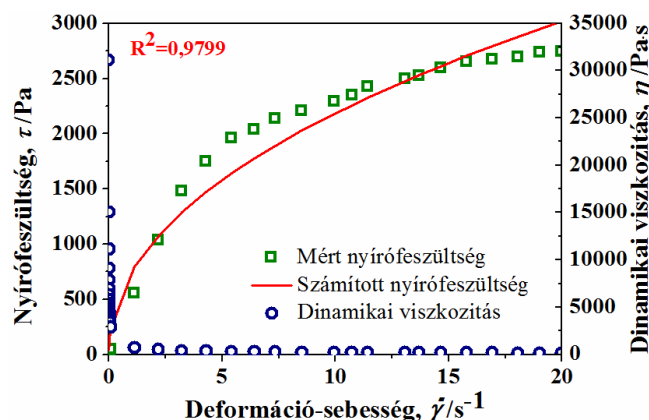
### 3.4.4. Aszfalthabarcok folyás- és viszkozitás-görbéinek meghatározása

Az aszfalthabarcok folyási tulajdonságainak vizsgálatokor, az anyagrendszerben lejátszódó folyamatok megértéséhez az 52. ábra nyújt segítséget. Ahogyan az már a korábbi fejezetekben is bemutatásra került, az aszfalthabarcokba kevert töltőanyag szemcsék változatos geometriájúak, szögletesek, hasítottak, éllel határoltak, ugyanakkor az anyaghalmazban előfordulnak nyújtott, lapos és gömbszerű szemcsék is. Amikor az anyagrendszer nyugalomban van, akkor ezek a szemcsék az aszfalthabarcban a tér minden irányában véletlenszerűen helyezkednek el (52. ábra–a)). Ez az állapot az anyagrendszer nagy viszkozitását eredményezi. Nyírás (*a deformáció-sebesség növelésének*), és a viszkoelasztikus közeg áramlásának hatására a szemcsék a nyírás irányába képesek orientálódni (52. ábra–b)), ami a viszkozitás csökkenéséhez vezet (*nyírásra vékonyodó viselkedés*). Kisebb méretű, gömbszerű szemcsék jelenlétekor 0 deformáció-sebesség esetén a – szemcsék közötti interakciónak köszönhetően – ugyancsak nagy viszkozitású az anyag (52. ábra–c)). Ha az anyagrendszer nyíródik, akkor a kis, gömbszerű szemcsék az áramlás (*folyás*) irányába rendeződnek (52. ábra–d)), csökkentve így a szemcsék érintkezésének esélyét; a jelenségnek köszönhetően pedig a viszkozitás csökkenése fog bekövetkezni.



52. ábra. A szemcsék viselkedése nyírás hatására [20] alapján

A grafikusan meghatározott folyáshatárok, valamint a mérési nyersadatok korrekciója után már lehetővé vált az útépitési bitumen és aszfalthabarcok valódi folyásgörbéinek felvétele (*a görbék 3 mérés számtani átlagaiból adódtak*). Ezt követően az anyag viselkedését jól leíró reológiai modellt kellett megállapítanom. Annak tudatában, hogy a vizsgált keverékek folyáshatárral rendelkeznek, a vizsgált deformáció-sebesség tartományban két – korábban (1.2.6. fejezet) már ismertetett – anyagmodell illeszthetősége (*Herschel-Bulkley-modell, illetve Bingham-modell*) volt valószínűsíthető. Grafikus módszerrel meghatároztam az adott modellek paramétereit, majd nemlineáris regresszió alkalmazásával a számított nyírófeszültség-értékeket illesztettem a mérési pontokra. A modell pontosságát a determinációs együtthatókkal ( $R^2$ ) jellemeztem. A modell típusának ismeretében az anyagrendszer dinamikai viszkozitását is kiszámítottam, majd az eredményeket keverékenként diagramok formájában foglaltam össze (53. ábra).



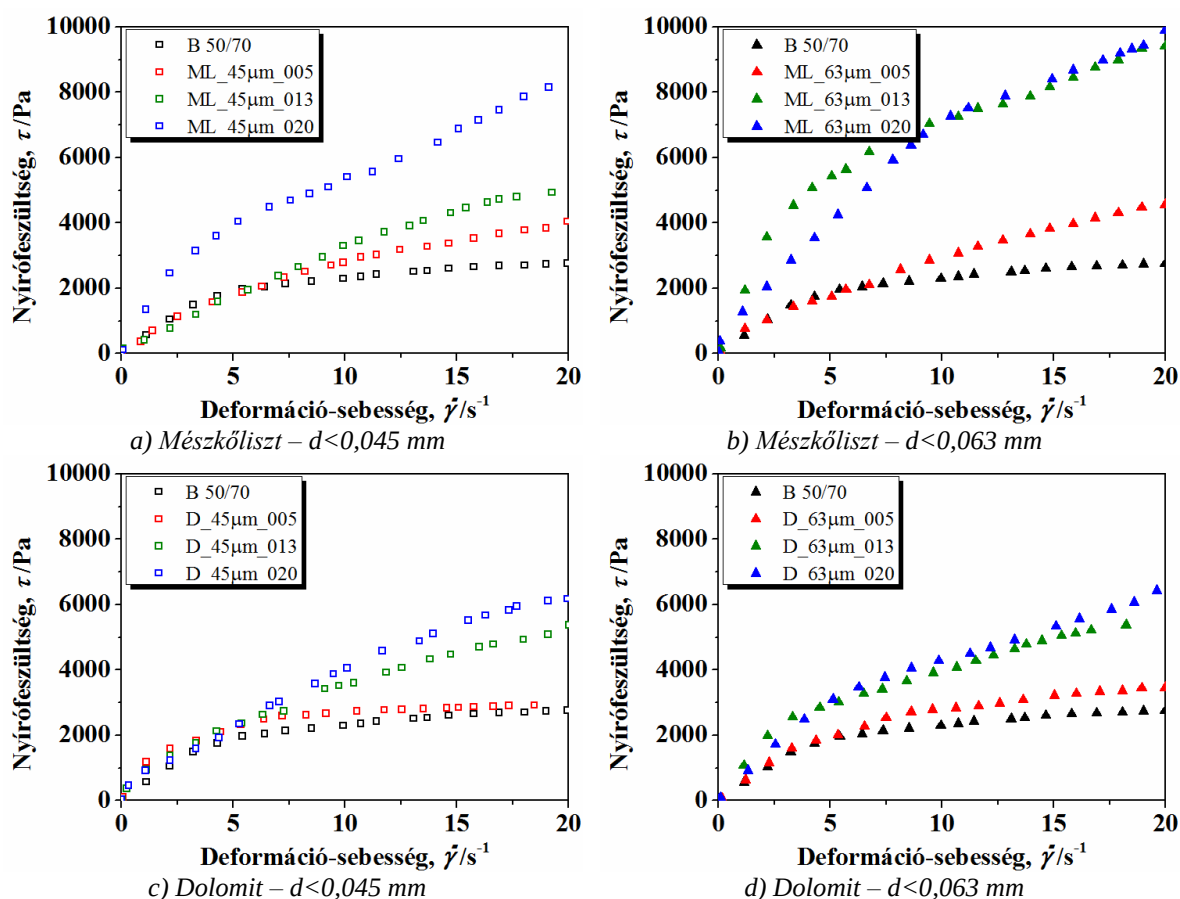
53. ábra. A B50/70 típusú bitumen valódi folyásgörbéje és számított viszkozitásgörbéje  $T=60\text{ °C}$ -on

A diagramok egyidejűleg tartalmazzák a valódi folyás-, és viszkozitásgörbéket, a számított reológiai anyagmodell, valamint a kapcsolódó determinációs együtthatókat (4. *Melléklet*).

Példaként a 60 °C hőmérsékleten meghatározott valódi folyásgörbék és viszkozitásgörbék<sup>11</sup> összesített diagramjait az 54. ábra és 55. ábra mutatja be, további eredmények pedig az 5. és 6. Mellékletekben találhatóak. A diagramokon egyaránt megfigyelhető a bitumenbe kevert töltőanyagok típusának, szemcseméretének és a szemcsék mennyiségének hatása.

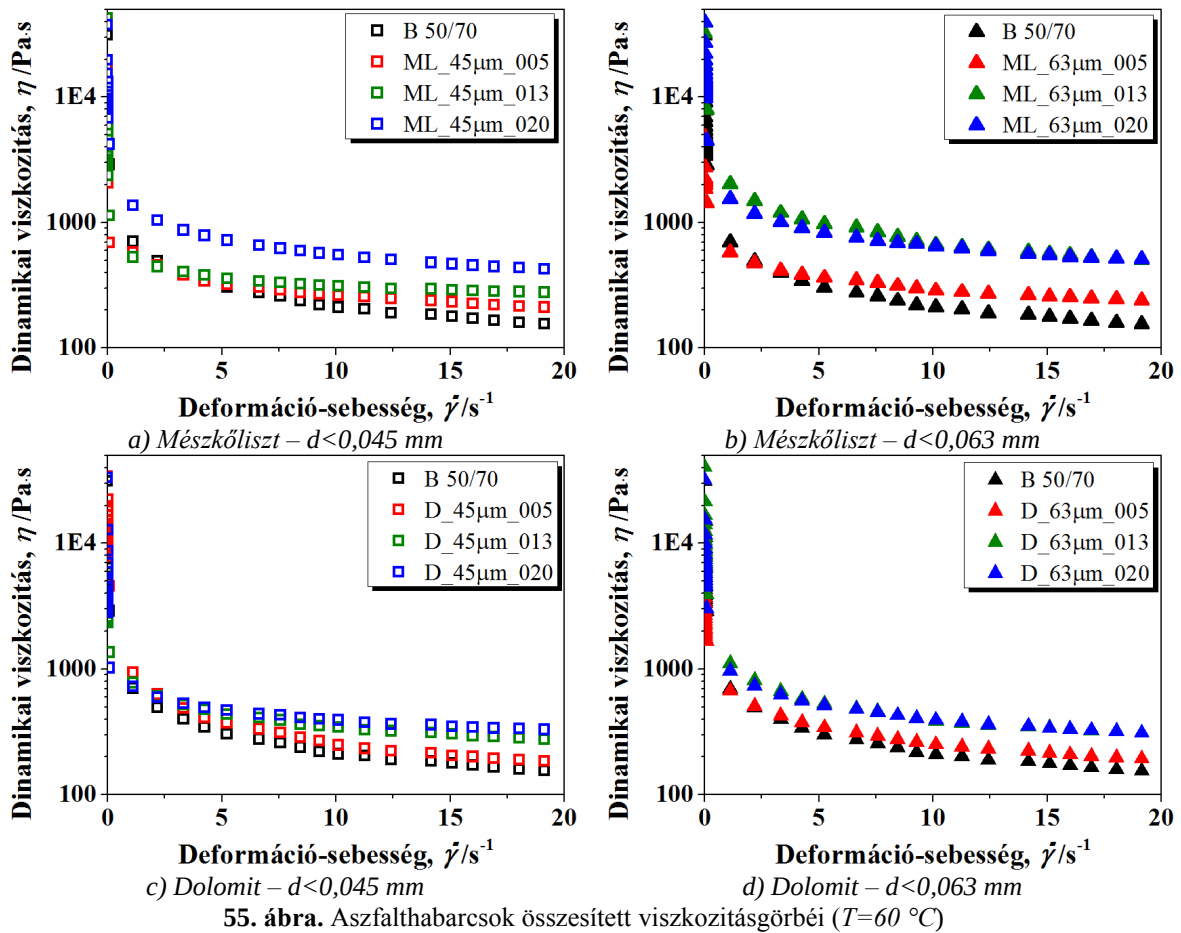
A töltőanyag mennyiségének ( $T/H$  arány) és a deformáció-sebesség növelésének hatására kialakuló nyírófeszültség-értékek minden esetben megnövekednek, ami miatt az anyagrendszer viszkozitása is megnő. Kis  $T/H$  arány (0,05) mellett és alacsony vizsgálati hőmérsékleteken ( $T=60$  °C és 75 °C) a habarcok pszeudoplasztikus viselkedésűek és a *Herschel-Bulkley* modellel jellemezhetőek.

A vizsgálati hőmérséklet emelése a deformáció-sebesség tartomány kiszélesedését eredményezi, amelyekben a habarcok jellemzően *Bingham-anyag*ként viselkednek. A töltőanyag/habarc arány növelése az anyagrendszer belső súrlódásának és viszkozitásának növekedését eredményezi, amely a pszeudoplasztikus jelleget erősíti.



54. ábra. Aszfalthabarcok összesített valódi folyásgörbéi ( $T=60$  °C)

<sup>11</sup> A 6. Mellékletben szereplő viszkozitásgörbéket – a könnyebb áttekinthetőség érdekében – szemilogaritmikus léptékben ábrázoltam.



A habarcok folyási tulajdonságait a töltőanyagok szemcsemérete is befolyásolja. A diagramokon jól megfigyelhető, hogy a durvább szemcsék felhasználásával készített keverékek nyírófeszültségei magasabbak, mint a finomabb szemcsékkel készítették. Ennek oka az, hogy a durvább szemcsék nagyobb mértékben, nagyobb valószínűséggel érintkeznek egymással, emiatt a habarcok belső súrlódása és viszkozitása is megnövekszik. A durvább szemcsék és azok mennyiségének növelése a habarcok pseudoplasztikus jellegét erősíti.

Fontos megállapítás még, hogy a legmagasabb vizsgálati hőmérsékleten – ami az aszfaltburkolatok általános beépítési hőmérséklete is egyben – a habarcok kivétel nélkül *Bingham-anyagként* jellemezhetők.

Szakirodalmi adatok alapján [91] az aszfaltkeverékek kompaktálási hőmérsékletén (*jellemzően 135 °C*) a kötőanyag viszkozitásának  $\eta=2\text{--}11$  Pa·s között kell lennie. Az ezen a hőmérsékleten meghatározott viszkozitásgörbéken jól látható, hogy nemcsak a bitumen, hanem az aszfalthabarcok viszkozitása is beleesik ebbe a tartományba. Ennek tudatában a vizsgált töltőanyagok felhasználása nem nehezíti meg a belőlük készített aszfaltkeverékek beépítését.



### 3.5. Aszfalthabarcok dinamikus vizsgálata

A korábbi fejezetekben az útépitési bitumen és a felhasználásával készített aszfalthabarcok statikus (*kúszás–visszaalakulás*), illetve rotációs (*folyási tulajdonságainak*) vizsgálatának eredményei kerültek bemutatásra. Léteznek azonban olyan mérés technikai módszerek is, amelyekkel az aszfalthabarcok dinamikus terhelésre adott válaszreakciói is jól jellemezhetőek. Lehetőséget adnak arra, hogy az aszfaltburkolat anyagait úgy modellezzük, mintha azok a forgalom hatásának lennének kitéve. Az ilyen típusú vizsgálatok során olyan dinamikus terheléseket (*szinuszos gerjesztést*) (17. ábra) alkalmazunk, melyek jól utánozzák az utakon elhaladó járművek által kifejtett terhelést. A tesztek során a harmonikus rezgőmozgás frekvenciájának változásával a forgalom nagysága, és a terhelés ideje szimulálható. Az anyagrendszer válaszreakciójaként az 1.2.5. fejezetben bemutatott viszkoelasztikus anyagparaméterek határozhatóak meg.

Az aszfaltkeverékek dinamikus vizsgálata során rögzített legfontosabb anyagjellemző a komplex modulusz, amely az aszfalt merevségéről ad információt. Egyfajta indikátor, amely különböző hőmérsékleteken, változó terhelések esetén jellemzi az anyagrendszer alakváltozással szembeni ellenállását. Az ásványi töltőanyagok aszfaltban betöltött szerepének feltárását nagyban elősegíti a komplex modulusz ismerete. Ahogyan az az irodalmi összefoglalásban is bemutatásra került, a töltőanyagok viselkedése rendkívül bonyolult, a bitumennel kialakított kapcsolata ez idáig sem teljesen megmagyarázott. Az aszfaltkeverék, mint viszkoelasztikus anyagrendszer anyagjellemzői a hőmérséklet függvényében – a bitumen fizikai tulajdonságainak köszönhetően – erősen változnak. Ugyanezen állítás az aszfalthabarcokra is kijelenthető. A témával foglalkozó szakirodalmi források alapján elmondható, hogy a töltőanyagok merevítő hatása a magasabb hőmérsékleti tartományokban (50°C–100°C) erőteljesebb, mint alacsonyabb üzemi hőmérsékleteken [8, 40, 80]. Az aszfalthabarcok reológiai tulajdonságai, viszkoelasztikus anyagjellemzői ún. mestergörbék megszerkesztésével (*az idő–hőmérséklet szuperpozíciós elv alkalmazásával*) jól jellemezhetőek. A görbék előállításához az anyagot adott frekvencia-tartományban<sup>12</sup>, különböző hőmérsékleteken szükséges vizsgálni<sup>13</sup>. Az így összegyűjtött adatok egy referenciahőmérsékletre szuperponálva egy görbévé illeszthetők össze (*mestergörbe*).

Az útépitési bitumen és az aszfalthabarc-keverékek mestergörbéinek megszerkesztéséhez egy jól megtervezett mérési módszerre volt szükségem. Először az egyes minták LVE

<sup>12</sup> Dinamikus nyíróvizsgálatok (DSR) esetén frekvenciával, hasábhajlító (BBR) vizsgálatok esetén pedig terhelési idővel kell számolni.

<sup>13</sup> Fontos feltétel, hogy a vizsgálatot minden esetben a lineárisan viszkoelasztikus tartományban kell elvégezni.

tartományát, majd ezek ismeretében frekvenciafüggő mérésekkel (adott frekvenciatartományban, különböző hőmérsékleteken) a minták viszkoelasztikus anyagjellemzőit kellett meghatároznom (tárolási-, veszteségi-, komplex modulusz, fázisszög és veszteségi tangens). Az 1.3.2. fejezetben bemutatottak alapján a mestergörbe előállításához egy ún. eltolási tényezőt kell megállapítani, melynek egyik módja a (14) egyenlet alapján a nullviszkozitások (a vizsgálati hőmérséklet és a referenciahőmérséklet) arányaként lehetséges. Az egyes hőmérsékletekre determinált eltolási tényezők felhasználásával létrehozható az ún. redukált frekvencia, amelyre az anyagjellemzőket vetítve előállítható az adott viszkoelasztikus anyagjellemző mestergörbéje.

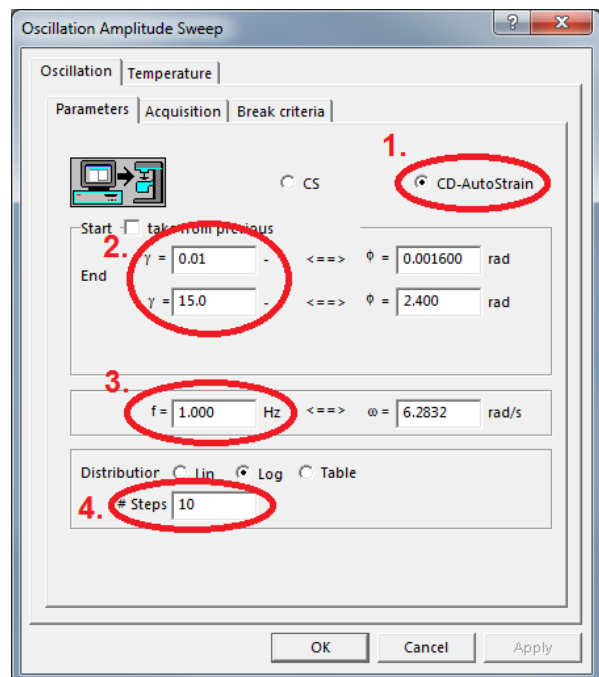
### 3.5.1. Aszfalthabarcok LVE tartományának meghatározása

Ahogy az már az 1.3.1 fejezetben is bemutatásra került, a viszkoelasztikus anyagrendszerek dinamikus vizsgálatait a lineárisan viszkoelasztikus tartományon belül szükséges elvégezni. A bitumenes kötőanyagok LVE tartományának határa az SHRP követelményrendszer szerint a 20. ábra alapján határozható meg. A vizsgálat tulajdonképpen oszcillációs módban, állandó frekvencián, változó amplitúdó (a harmonikus rezgőmozgást végző mérőfej kitérése) alkalmazásával végezhető el.

Vizsgálataim során a bitumen és az aszfalthabarc-keverékek amplitúdófüggő vizsgálatait a következő mérés technikai módszerrel végeztem el:

- DSR: oszcillációs üzemmód
- Vizsgálati hőmérsékletek:  $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  és  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$
- CD-mód:  $\gamma = 0,01\text{--}15$  és  $f = 0,1\text{ Hz}$  és  $10\text{ Hz}$ .

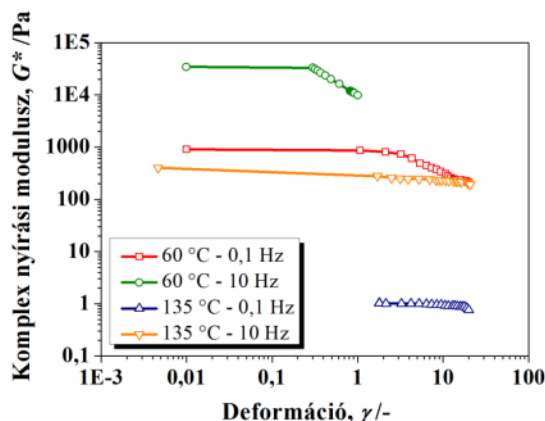
Az 56. ábra a vizsgálatokhoz használt dinamikus nyíróreométer vezérlő szoftverének (RheoWin 3) beállításait mutatja, az amplitúdófüggő (oscillation amplitude sweep) vizsgálatokra vonatkozóan. A számokkal jelzett opciók pontos beállítása tette lehetővé az LVE tartomány megállapítását. A vizsgálatot CD-módban (56. ábra–1)), adott deformáció-tartományban (56. ábra–2)), konstans frekvencián (56. ábra–3)) végeztem



56. ábra. Az amplitúdófüggő vizsgálatok beállítási paraméterei

el, minden esetben logaritmikus eloszlással rögzített 10 adatpont felvételével (56. ábra–4)). A tesztek 60 °C és 135 °C-on, 0,1 Hz és 10 Hz beállításával hajtottam végre, amely értékek a későbbi frekvenciafüggő vizsgálatok alsó és felső határait jelentették.

Az 57. ábra az LVE tartomány meghatározására szolgáló amplitúdó függő vizsgálatok eredményeiből készített tipikus diagramját tartalmazza (B 50/70 bitumen), további eredmények pedig a 7. Mellékletben kerültek összefoglalásra.



57. ábra. B50/70 típusú bitumen amplitúdó függő vizsgálatának eredménye – az LVE tartomány meghatározása

A vizsgálati eredmények ismeretében meghatároztam a komplex modulusok kezdeti értékeihez viszonyított 5 %-os csökkenéshez tartozó deformációkat. Ezek az értékek jelölik ki az LVE tartomány határát. Az amplitúdófüggő vizsgálatok eredményeit, az LVE tartomány határához tartozó komplex nyírási modulus és deformáció értékeket a 12. táblázatban összesítettem.

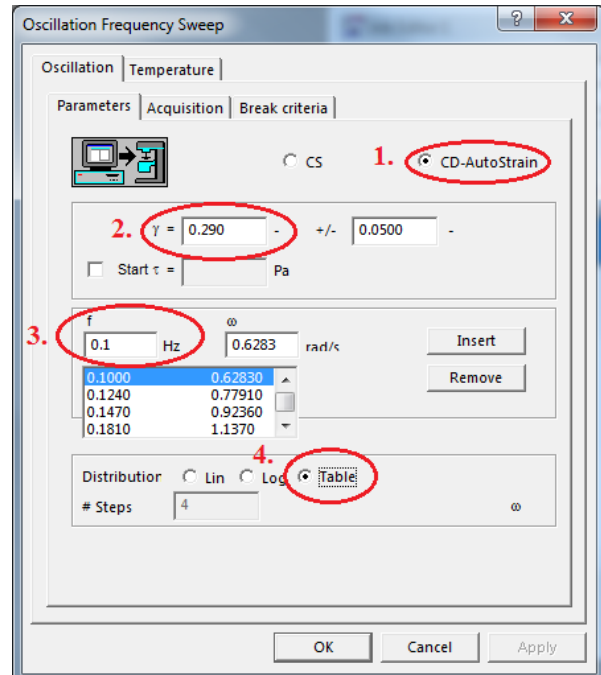
12. táblázat. Útépítési bitumen és aszfalthabarc-keverékek lineárisan viszkoelasztikus tartományának határai

| Keveréktípus      | 60 °C   |              |          |              | 135 °C |              |         |              |
|-------------------|---------|--------------|----------|--------------|--------|--------------|---------|--------------|
|                   | 0,1 HZ  |              | 10 HZ    |              | 0,1 HZ |              | 10 HZ   |              |
|                   | G*, Pa  | $\gamma$ , - | G*, Pa   | $\gamma$ , - | G*, Pa | $\gamma$ , - | G*, Pa  | $\gamma$ , - |
| B50/70            | 857,85  | 1,11         | 32585,00 | 0,3          | 0,99   | 5,59         | 379,05  | 0,01         |
| ML_45 $\mu$ m_005 | 3135,00 | 0,06         | 52820,00 | 0,02         | 1,87   | 1,02         | 1415,50 | 0,002        |
| ML_45 $\mu$ m_013 | 3866,50 | 0,06         | 94145,00 | 0,22         | 2,03   | 10,4         | 2147,00 | 0,003        |
| ML_45 $\mu$ m_020 | 1615,00 | 0,11         | 49400,00 | 0,04         | 1,77   | 9,94         | 2394,00 | 0,002        |
| ML_63 $\mu$ m_005 | 2017,72 | 0,07         | 32832,13 | 0,02         | 1,86   | 10,76        | 394,69  | 0,01         |
| ML_63 $\mu$ m_013 | 4303,50 | 0,04         | 33654,71 | 0,02         | 1,95   | 11,08        | 410,10  | 0,02         |
| ML_63 $\mu$ m_020 | 2166,00 | 0,11         | 35245,00 | 0,03         | 2,00   | 12,45        | 423,70  | 0,02         |
| D_45 $\mu$ m_005  | 2156,50 | 0,34         | 46170,00 | 0,08         | 1,47   | 5,2          | 1045,00 | 0,008        |
| D_45 $\mu$ m_013  | 2907,00 | 0,06         | 49875,00 | 0,04         | 1,89   | 1,07         | 873,05  | 0,007        |
| D_45 $\mu$ m_020  | 1092,50 | 1,18         | 55005,00 | 0,22         | 1,48   | 3,46         | 1140,00 | 0,006        |
| D_63 $\mu$ m_005  | 1320,50 | 0,76         | 41705,00 | 0,11         | 1,29   | 4,33         | 554,80  | 0,1          |
| D_63 $\mu$ m_013  | 1900,00 | 1,19         | 38000,00 | 0,06         | 1,38   | 10,37        | 453,15  | 0,04         |
| D_63 $\mu$ m_020  | 3667,00 | 0,04         | 71725,00 | 0,06         | 2,76   | 2,44         | 783,75  | 0,006        |

### 3.5.2. Aszfalthabarcok frekvenciafüggő vizsgálata

Miután az amplitúdó függő vizsgálatokkal meghatároztam a vizsgált anyagok LVE tartományának határait, lehetőségem nyílt arra, hogy feltárjam az egyes keverékek frekvenciafüggését.

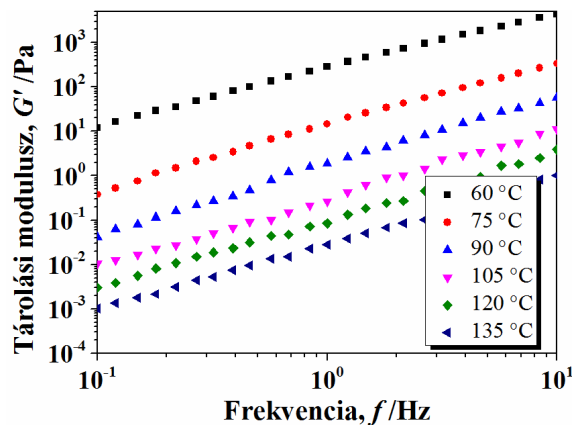
Ehhez a következő beállításokat kellett beprogramoznom a reométer vezérlő szoftverében (58. ábra). Mivel az LVE tartomány határait az anyagrendszer deformációjának függvényében határoztam meg, emiatt a frekvenciafüggő tesztek CD-módban kellett futtatnom (58. ábra–1)). Az adott keverékhez tartozó deformáció-értékek megadásával (58. ábra–2)) biztosítottam az



58. ábra. A frekvenciafüggő vizsgálat paramétereinek beállítása

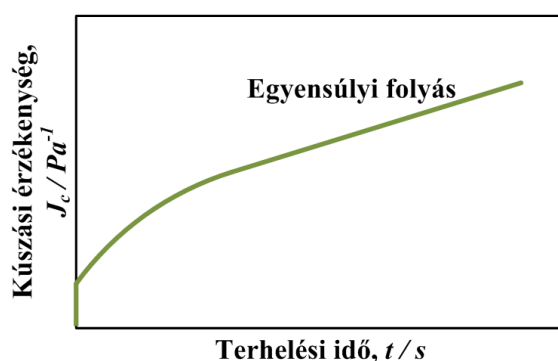
LVE tartományon belüli mérést. Ahhoz, hogy a későbbiek folyamán a méréseket értékelni lehessen, és a redukált frekvenciát pontosan meg tudjam adni minden keverék esetében, a frekvenciatartományt előre definiált módon adtam meg (58. ábra–3) és –4)). Minden hőmérsékleten 3 mérést végeztem el, melyek átlageredményeit használtam fel a mestergörbék előállításához.

Egy keverék frekvenciafüggő vizsgálatának eredménye példaként a következő ábrán (59. ábra) látható (*B 50/70 bitumen*). A diagramon jól megfigyelhető, hogy a különböző hőmérsékleteken felvett tárolási modulusz görbék jellege nagyon hasonló, emiatt egy vízszintes irányú eltolással egy görbévé alakíthatóak.



59. ábra. Frekvenciafüggő vizsgálat eredménye (*B 50/70 bitumen*)

A vízszintes eltolás végrehajtásához eltolási tényezők szükségesek, melyek értékeinek számítása a nulla deformáció-sebességhez tartozó viszkozitásokkal (*nullviszkozitás*) lehetséges. Meghatározásuk mérés technikai szempontból több módszerrel is lehetséges: statikus kúszásvizsgálat (*creep*); a deformáció visszaalakulásának vizsgálata (*recovery*); valamint dinamikus oszcillációs mérés, majd extrapolációval, felhasználva az ún. 4 paraméteres *Cross-modellt* [170, 171]. Az általam alkalmazott eljárás a statikus kúszás módszere volt. A vizsgálat során konstans terhelőfeszültség mellett, elegendően hosszú terhelési idő mellett meghatároztam a kúszásgörbét (60. ábra).

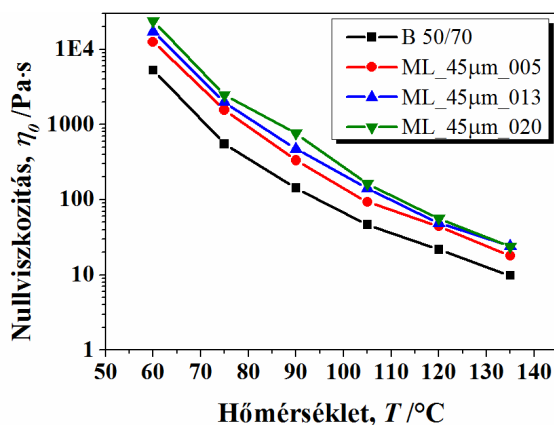


60. ábra. A nullviszkozitás meghatározásához rögzített kúszási érzékenység-görbe

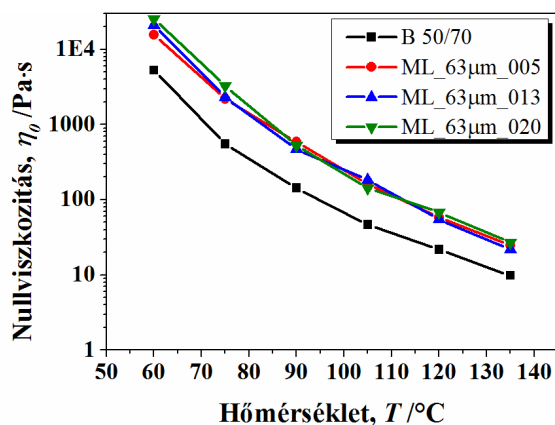
A hosszú terhelési idő alkalmazása az egyensúlyi (*newtoni*) folyás (*steady state flow*) elérése érdekében volt szükséges. Mivel a vizsgálat során rögzített ún. nyíró kúszási érzékenység ( $J_c$ ) görbe meredeksége fordítottan arányos a nullviszkozitással, így az meghatározható a (32) kifejezéssel:

$$\eta_0 = \left( \frac{dJ_c}{dt} \right)^{-1} \quad t \rightarrow \infty \text{ esetén} \quad (32)$$

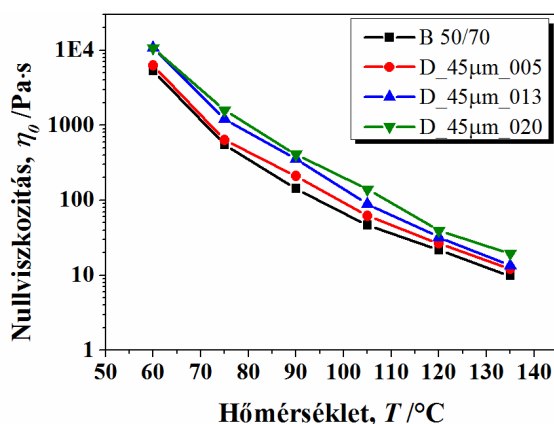
Minden esetben 3 mérés számtani átlagai alapján határoztam meg a nullviszkozitás értékeket. Az eredmények diagram formájában (61. ábra), számszerű értékei pedig a 8. Mellékletben kerülnek összefoglalásra, feltüntetve a mérések pontosságát mutató relatív szórás értékeivel.



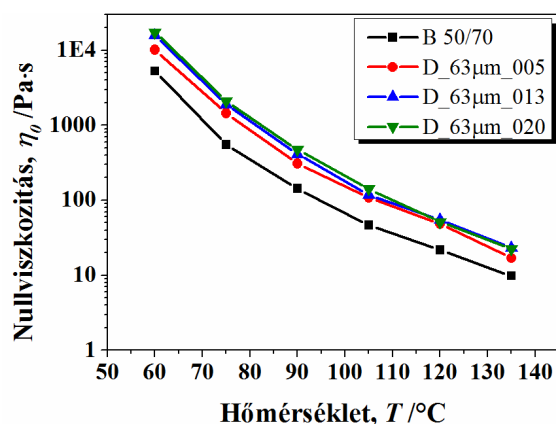
a) Mészköliszt –  $d < 0,045 \text{ mm}$



b) Mészköliszt –  $d < 0,063 \text{ mm}$



c) Dolomit –  $d < 0,045$  mm



d) Dolomit –  $d < 0,063$  mm

61. ábra. Aszfalthabarcok keverékek nullviszkózitásának változása a hőmérséklet függvényében

Az aszfalthabarcok nullviszkózitásainak hőmérséklet- és  $T/H$  arányának függése jól megfigyelhető a fenti diagramokon. Két megállapítás tehető: a hőmérséklet növekedése magától értetődően csökkenti, a  $T/H$  arány növelése pedig növeli a nullviszkózitást.

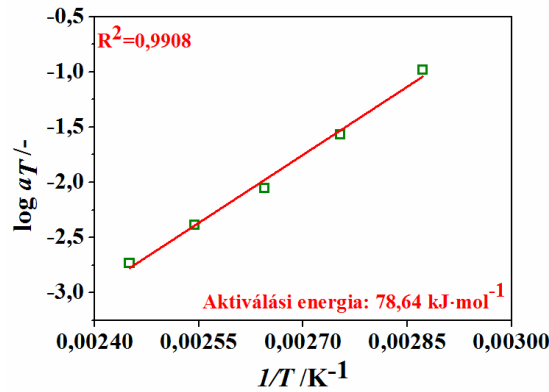
Az egyes vizsgálati hőmérsékleteken meghatározott nullviszkózitás értékekből az (14) kifejezés alapján már kiszámíthatóak az eltolási tényezők, melyeket a 13. táblázat tartalmazza.

13. táblázat. Útépítési bitumen és aszfalthabarcok keverékek eltolási tényezői

| Keveréktípus | Eltolási tényező, $a_T$ /- |        |        |        |        |        |
|--------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|              | 60 °C                      | 75 °C  | 90 °C  | 105 °C | 120 °C | 135 °C |
| B 50/70      | -                          | 0,1043 | 0,0271 | 0,0088 | 0,0041 | 0,0019 |
| ML_45μm_005  | -                          | 0,1253 | 0,0264 | 0,0074 | 0,0035 | 0,0014 |
| ML_45μm_013  | -                          | 0,1159 | 0,0276 | 0,0082 | 0,0028 | 0,0014 |
| ML_45μm_020  | -                          | 0,1039 | 0,0319 | 0,0069 | 0,0024 | 0,0010 |
| ML_63μm_005  | -                          | 0,1408 | 0,0376 | 0,0103 | 0,0037 | 0,0016 |
| ML_63μm_013  | -                          | 0,1103 | 0,0225 | 0,0088 | 0,0026 | 0,0010 |
| ML_63μm_020  | -                          | 0,1292 | 0,0207 | 0,0056 | 0,0027 | 0,0011 |
| D_45μm_005   | -                          | 0,1025 | 0,0337 | 0,0099 | 0,0043 | 0,0020 |
| D_45μm_013   | -                          | 0,1119 | 0,0332 | 0,0083 | 0,0030 | 0,0013 |
| D_45μm_020   | -                          | 0,1503 | 0,0386 | 0,0132 | 0,0037 | 0,0018 |
| D_63μm_005   | -                          | 0,1424 | 0,0307 | 0,0107 | 0,0048 | 0,0017 |
| D_63μm_013   | -                          | 0,1202 | 0,0261 | 0,0075 | 0,0035 | 0,0015 |
| D_63μm_020   | -                          | 0,1214 | 0,0275 | 0,0081 | 0,0030 | 0,0013 |

A fenti táblázatban jól látható, hogy a  $T=60$  °C hőmérsékletre nem tartozik eltolási tényező. Ennek oka az, hogy a mestergörbék szerkesztése során ezt a hőmérsékletet referencia-hőmérsékletként kívánom alkalmazni, ezért ezen a hőfokon nem kell eltolást végezni.

Az eltolási tényező ismeretében, az Arrhenius–Andrade egyenlet alapján (13) az egyes keverékek aktiválási energiái is grafikusán meghatározhatóak (62. ábra), melyek diagramok formájában a 9. Mellékletben, számszerűleg meghatározott értékei pedig a 14. táblázatban láthatóak.



62. ábra. Az aktiválás energia meghatározása  
(B50/70 bitumen)

14. táblázat. Aszfalthabarcok aktiválási energiái

| Aktiválási energia, $E_a$ /kJ·mol <sup>-1</sup> |             |             |             |             |             |             |
|-------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| B 50/70                                         | ML_45μm_005 | ML_45μm_013 | ML_45μm_020 | ML_63μm_005 | ML_63μm_013 | ML_63μm_020 |
| 78,64                                           | 86,83       | 87,71       | 94,03       | 89,18       | 90,55       | 92,36       |
|                                                 | D_45μm_005  | D_45μm_013  | D_45μm_020  | D_63μm_005  | D_63μm_013  | D_63μm_020  |
|                                                 | 78,83       | 89,87       | 88,04       | 84,83       | 85,62       | 89,47       |

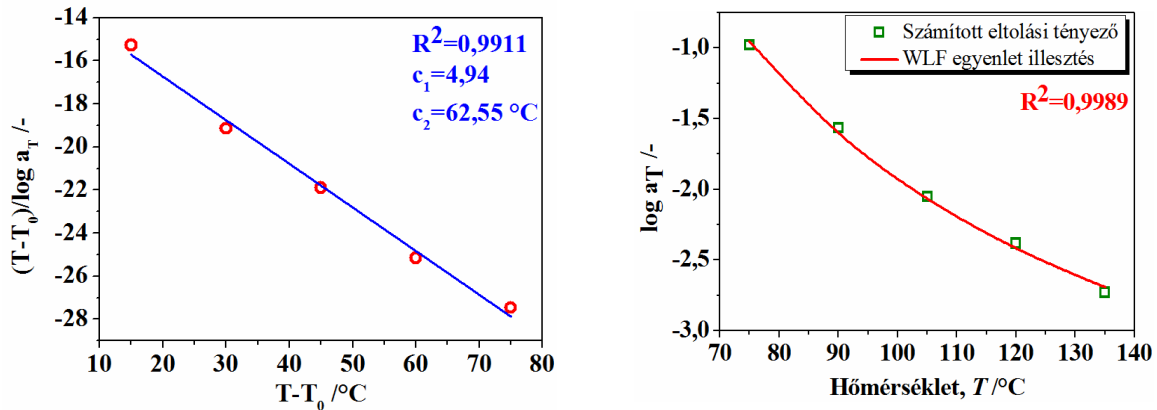
A T/H arány növelése az aszfalthabarcok aktiválási energiájának növekedését okozza, mivel a töltőanyagok mennyiségének hatására a habarcok viszkozitása is megnövekszik, emiatt nagyobb energiára is van szükség az anyagrendszerben végbemenő kémiai reakció lejátszódásához.

Az irodalmi részben ismertett *WLF-egyenlet* (16) segítségével az eltolási tényezők pontossága is ellenőrizhető. Ismert, hogy a *Williams–Landel–Ferry* egyenlet a  $T_g+100$  °C hőmérséklet-tartományban érvényes, emiatt az üvegesedési hőmérsékletnek tehát kiemelt szerepe van.

A B50/70 típusú bitumenen elvégzett DSC vizsgálat (2.10. fejezet) eredménye alapján  $T_g=-21,82$  °C-ra adódott. Mivel a mestergörbék referencia-hőmérsékletét  $T=60$  °C-ban határoztam meg, ezért a két érték közötti különbség megfelel a *WLF-egyenlet* kritériumának.

A kísérleti úton meghatározott eltolási tényezők megfelelősége és pontossága tehát az előzőekben említett módszerrel ellenőrizhető, illetve a *WLF-egyenlet* anyagra jellemző állandói ( $C_1$  és  $C_2$ ) grafikus úton meghatározhatóak [114]. Példaként a 63. ábra a) részén látható az anyagállandó grafikus meghatározásának módja, a 63. ábra b) része pedig a *WLF-egyenletbe* visszahelyettesített konstansok eltolási tényezőre történő illesztését mutatja be. További eredmények a 10. Mellékletben találhatóak.

A vizsgált hőmérséklet-tartományban meghatározott eltolási tényezők a *WLF-egyenlettel* jól közelíthetőek. Ennek megfelelően már minden rendelkezésre állt az bitumen és aszfalthabarcok mestergörbéinek megszerkesztésére.



a) A WLF-egyenlet anyagállandóinak grafikus meghatározása

b) A WLF-egyenlet illesztése a számított eltolási tényezőkre

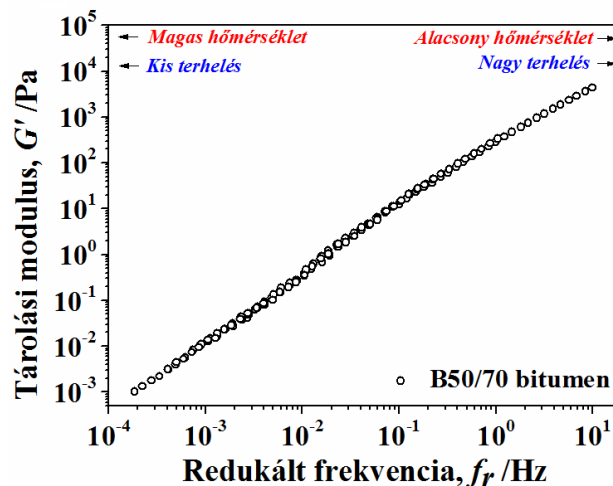
B50/70 bitumen

63. ábra. A WLF-egyenlet anyagállandóinak meghatározása és az egyenlet illesztése a számított eltolási tényezőkre

Az adott frekvenciatartományban meghatározott viszkoelasztikus anyagparaméterek horizontális eltolása a frekvencia-hőmérséklet ekvivalencia alapján, a redukált frekvencia (33) meghatározásával lehetséges [87, 114]:

$$f_r = f \cdot a_T \quad (33)$$

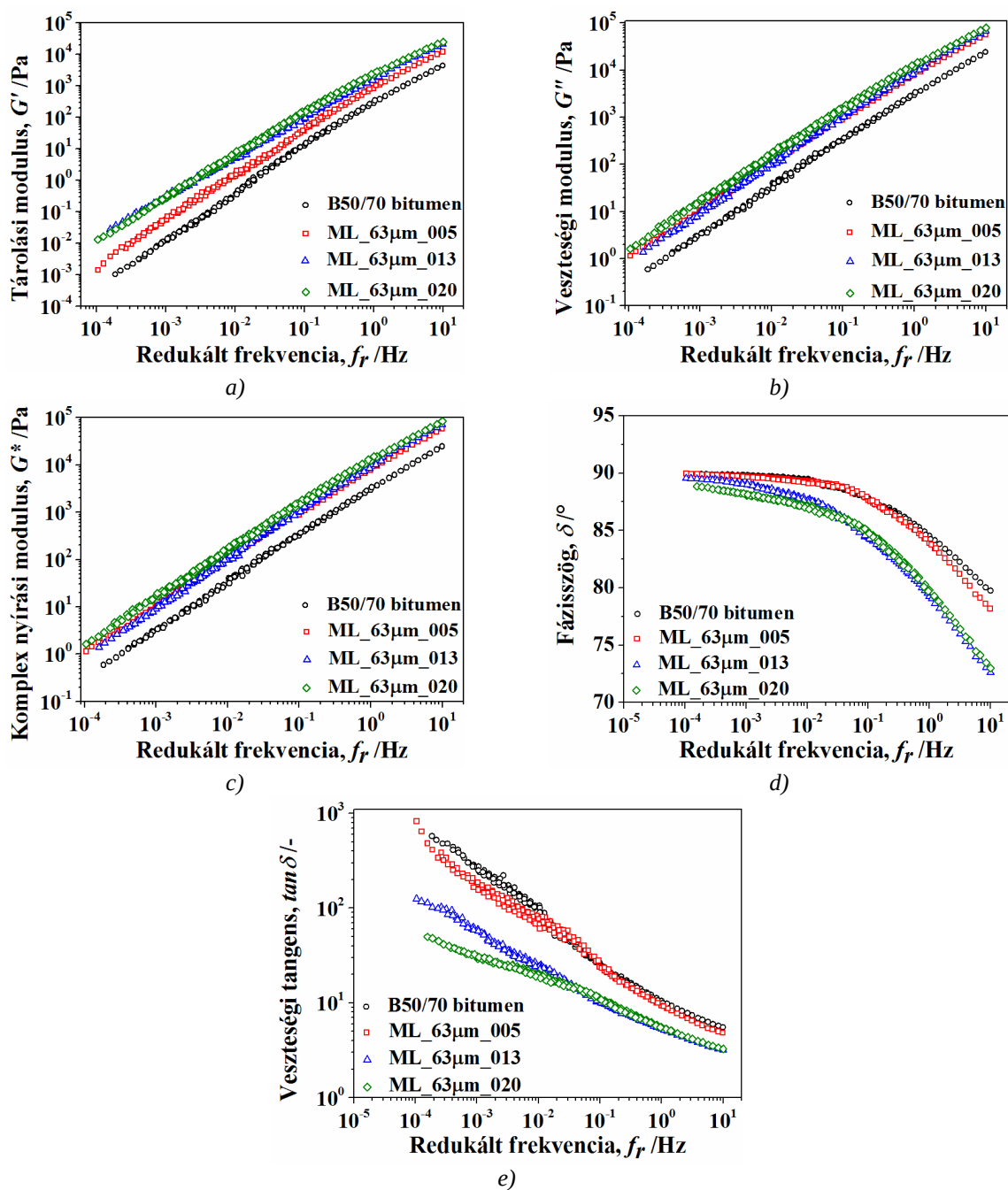
Az egyes hőmérsékleteken meghatározott redukált frekvenciák ismeretében már minden adat rendelkezésemre állt a viszkoelasztikus anyagjellemzők mestergörbéinek megszerkesztéséhez. Példaként a B50/70 típusú bitumen  $T_0=60$  °C hőmérsékletre meghatározott tárolási modulusának mestergörbét mutatom be (64. ábra). A diagramon egyidejűleg megfigyelhető mind a terhelés, mind pedig a hőmérséklet hatása.



64. ábra. Tárolási modulusz mestergörbe  $T_0=60$  °C referencia-hőmérsékleten (B50/70 bitumen)

Az útépitési bitumen és aszfalthabarc-keverékek viszkoelasztikus anyagjellemzőinek összesített mestergörbéit a 11. Melléklet tartalmazza, a mészköliszt  $d<0,063$  mm-es frakciójával készített aszfalthabarc mestergörbéi pedig a következő ábrán láthatóak (65. ábra).





65. ábra. Összesített mestergörbék  
(mészkőliszt,  $d < 0,063$  mm)

Az elvégzett dinamikus, frekvenciafüggő nyíróvizsgálatok célja a töltőanyagok merevítő hatásának vizsgálata volt. A merevség növelésével javítható a burkolatok nyári melegviselkedése, csökkenthető nyomvályúsodási hajlamuk. A merevség két viszkoelasztikus anyagi jellemzővel, a komplex nyírási modulusszal és a fázisszöggel jól leírható.

A B50/70 típusú útépítési bitument referenciaanyagként használtam fel, melyhez viszonyítva a töltőanyagok típusának, szemcseméretének és mennyiségének hatása a habarcokban jól megfigyelhető. Mivel a mérési adatok kivétel nélkül egy sima, egymást fedő görbévé voltak összeilleszthetőek, ezért megállapítható, hogy az idő-hőmérséklet szuperpozíciós elv mind a

bitumen, mind pedig az aszfalthabarcok esetén érvényesült, így ezek az anyagrendszerek termo-reológiai szempontból egyszerű anyagokként jellemezhetőek.

Alapvetően a bitumen modulusz görbéi a frekvencia (*terhelés*) növelésével folytonosan növekvő jelleget mutatnak. A T/H arány növelése a görbék jellegét ugyan nem változtatja meg, azonban egy felfelé történő eltolódás minden esetben jól megfigyelhető. Ez azt jelenti, hogy a töltőanyagok mennyiségének hatására a moduluszok értéke megnő, dominánsabbak lesznek a rugalmas tulajdonságok, végső soron nő a merevítő hatás.

A jelenséget a fázisszögek változása is jól magyarázza. Minél nagyobb mennyiségű töltőanyagot tartalmaz az aszfalthabarc, annál alacsonyabb a fázisszög értéke. Ahogyan az az irodalmi összefoglalásban is bemutatásra került, a viszkoelasztikus anyagok annál inkább viselkednek rugalmasabb anyagként, minél kisebb a fázisszögük.

A fázisszög tangensével, az ún. veszteségi tangenssel ( $\tan\delta$ ) a rugalmas jelleg még jobban érzékeltethető. Minél kisebb a  $\tan\delta$  értéke, annál rugalmasabb az anyagrendszer. Jelentősebb eltérés a magas hőmérsékleti tartományokban (*vagy kis terhelés esetén*) figyelhető meg, amely alátámasztja az irodalomban fellelhető eredményeket, miszerint a töltőanyagok magasabb hőmérsékleteken jobban kifejtik merevítő hatásukat.

A töltőanyagok szemcseméretének befolyása is jól megfigyelhető a mestergörbéken. A nagyobb szemcsék felhasználása során a moduluszok növekedése, valamint a fázisszögek csökkenése figyelhető meg, amely kisebb  $\tan\delta$  értékeket eredményez. Mindezek természetesen a rugalmas jelleg erősödését okozzák.

Szemcsemérettől és mennyiségtől függetlenül a két töltőanyag között is szignifikáns különbségek vehetőek észre. A töltőanyag típusától függetlenül a habarcok merevsége minden esetben növekszik, ugyanakkor a dolomit alkalmazása során a merevítő hatás minden esetben kisebb mértékű, mint mészköliszt esetén. Ez is megerősíti azt a tényt, hogy a mészköliszt erős kapcsolatot képes kialakítani a bitumennel.

## ÖSSZEGZÉS

Doktori értekezésemben ásványi töltőanyagok felhasználásával készített aszfalthabarcok reológiai tulajdonságainak, a finomszemcsés töltőanyagok bitumennel kialakított kapcsolatának feltárásával foglalkoztam. Az aszfalthabarc (*bitumen és töltőanyag keveréke*) az aszfaltbetonok legfontosabb alkotórésze, mely a teherbírást nagymértékben elviselő durva szemcsék közötti kapcsolat kialakítását, valamint a burkolat szilárdságát és merevségét befolyásolja. A bitumennel kialakított kapcsolat egyik sarkalatos pontja a töltőanyag ásványi eredete. A legelterjedtebben használt töltőanyag a mészkőliszt, melyből Magyarország is jó minőségű, bőséges ásványkincsekkel rendelkezik. Kutatási munkámat megerősítette és további lendületet adott az az ipari megkeresés, amely egy másik típusú ásványi anyag (*dolomit*) útépítésben történő alkalmazását szorgalmazta. A dolomit hasznosítása csökkentheti a jelenlegi mészkőliszt felhasználását.

Mivel a bitumen és az ásványi töltőanyag közötti kölcsönhatás erőssége az alkotórészek anyagtulajdonságaitól függenek, ezért vizsgálataimat két részre bontottam, az alapanyagok (*töltőanyag, bitumen*) és aszfalthabarcok elemzésére.

Kimutattam, hogy töltőanyagok ásványi összetételüket tekintve szennyeződéstől mentes, tiszta anyagok. A rendelkezésemre álló ásványi anyagokból különböző szemcseméretű frakciókat képeztem, szemcseeloszlásukat meghatározva pedig megállapítottam, hogy ezek az anyagalmazok polidiszperz rendszerként jellemezhetőek, frakciónként eltérő mennyiségben tartalmaznak finom és durva szemcséket is.

Anyagszerkezeti vizsgálatokkal feltártam a töltőanyagok alaktani sajátosságait. Megállapítottam, hogy a szemcsék alakja változatos, az ipari aprítási folyamatok következtében a töretfelületei éles határokkal tagoltak, melyek a kőváz és burkolat belső súrlódását növelik. Az ásványi anyagok polidiszperzitása jó térkitöltést, ezáltal nagyobb tömörséget és szilárdságot biztosít az aszfaltkeverékek számára. Az anyagszerkezet feltérképezése során minimális porozitásra, és kis fajlagos felületre utaló jeleket figyeltem meg.

Kimutattam, hogy az egyes frakciók szemcseeloszlása, a finom és a durva szemcsék mennyisége minden esetben befolyásolja az egyes anyagtulajdonságokat. A finomrész jelenléte a fajlagos felület növekedését okozza, ugyanakkor a hidrofíln tényező értékét pedig csökkenti, javítva így az ásványi anyagok bitument stabilizáló képességét.

A töltőanyagok felhasználásával olyan aszfalthabarc-keverékeket készítettem, amelyekben egyidejűleg tanulmányozható a töltőanyagok típusának, szemcseméretének és mennyiségének (*töltőanyag/habarc térfogatarányának*) hatásmechanizmusa. A habarcson reológiai vizsgálatokat végeztem el, amelyekkel jellemezhetőek az aszfaltburkolatok nyári viselkedése.

Az alkalmazott mérés technikai módszerekkel célom a nyomvályúsodás, mint jellegzetes burkolati hibajelenség okainak feltárása volt.

A statikus kúszás–visszaalakulási tulajdonságok elemzése során a négyparaméteres *Burgers-modellel* sikerült leírnom a habarcsok viselkedését, a modell paramétereit pedig számszerűleg is meghatároztam. Az eredmények tekintetében azt is megállapítottam, hogy a habarcsokban jelen lévő durva szemcsék minden esetben növelik a keverékek rugalmasságát, csökkentve így a terhelés hatására kialakuló deformáció, illetve a visszaalakulás során maradó deformáció mértékét. Feltártam azt is, hogy mészköliszt felhasználása során az anyagrendszerben minden esetben kisebb deformációk alakultak ki, amely arra utal, hogy a mészköliszt erősebb kapcsolatot képes létrehozni a kötőanyaggal.

Az aszfaltkeverékek beépítése és a burkolatok nyári üzemszerű használata során fellépő folyási jelenségek tanulmányozása érdekében meghatároztam a habarcsok valódi folyás-, és viszkozitás görbéit. Mivel a keverékek folyáshatárral is rendelkeznek, ezért megállapítottam, hogy a keverékek viszkoelasztikus jellege mellett bizonyos mértékű plaszticitás is jelen van az anyagrendszerben. Ennek figyelembe vételével a vizsgált hőmérsékleti tartományokban két reológiai modellel jellemeztem a keverékeket. Bizonyítottam, hogy az alacsonyabb vizsgálati hőmérsékleteken a habarcsok pszeudoplasztikus anyagként viselkedtek, és a *Herschel-Bulkley-féle* modellel voltak leírhatóak. Azt is megállapítottam, hogy a magasabb vizsgálati hőmérsékleteken az anyagok *Bingham-féle* anyagként viselkedtek. A mérési eredményekkel alátámasztottam, hogy a töltőanyagok mennyiségének és szemcseméretének növelése a pszeudoplasztikus jelleget erősíti, ugyanakkor a legmagasabb vizsgálati hőmérsékleten – ami az aszfaltburkolatok beépítési hőmérséklete is egyben – a habarcsok kivétel nélkül *Bingham-anyagként* jellemezhetők.

Dinamikai vizsgálatok segítségével feltártam az aszfalthabarcsok hőmérséklettől és terheléstől való függését, majd a vizsgálati eredmények ismeretében megszerkesztettem azok mestergörbéit. A modulusz-, fázisszög- és veszteségi tangens mestergörbék ismeretében az aszfalthabarcsokban felhasznált töltőanyagok merevítő hatását tanulmányoztam. Arra a következtetésre jutottam, hogy a töltőanyagok szemcseméretének és mennyiségének növelése esetén dominánsabbak lesznek a rugalmas tulajdonságok, amelynek következtében nő a merevítő hatás. Megállapítottam, hogy a mészköliszt-bitumen közötti erős kölcsönhatás következtében a merevség minden esetben nagyobb mértékű, mint a dolomit alkalmazásakor. Összességében elmondható, hogy a megvizsgált ásványi anyagok – főként a mészköliszt – aszfalt töltőanyagként történő felhasználása mindenképpen előnyös, ugyanis kedvező tulajdonságaik következtében magas üzemi hőmérsékleten a burkolatok merevsége nagymértékben javítható, a deformációval szembeni ellenállásuk növelhető, végső soron csökkenthető a nyomvályúsodás kialakulásának lehetősége.

## AZ ÉRTEKEZÉS TÉZISEI, ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Megállapítottam, hogy a légszáraz állapotú mészkőliszt (*Mexikóvölgy*) és dolomit (*Pilisvörösvár*) ásványi töltőanyagok hidrofilítása a töltőanyag szemcsék méretétől és azok mennyiségétől függő anyagtulajdonság. Kimutattam, hogy minél nagyobb a finom szemcsék mennyisége az anyaghalmazban, annál kisebb a töltőanyagok hidrofilitás tényezője, azaz annál inkább hidrofób tulajdonságúak.
2. Kimutattam, hogy a B50/70 típusú bitumen és a különböző szemcseméretű és térfogatarányú (*töltőanyag/habarc*s arány, a továbbiakban *T/H arány*) mészkőliszt és dolomit felhasználásával készített aszfalthabarcok  $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on,  $\tau=1\text{ Pa}$  konstans nyírófeszültség hatására  $t_1=60\text{ sec}$  terhelési idő és  $t_2=180\text{ sec}$  visszaalakulási idő alkalmazása esetén viszkoelasztikus anyagrendszerként viselkednek, és a terhelés hatására kialakuló deformációik jól leírhatóak a négyparaméteres *Burgers-modellel*. Számszerűleg meghatároztam az aszfalthabarc-keverékek kúszási és visszaalakulási szakaszaira illeszthető reológiai anyagmodell paramétereit.
3. Az B50/70 típusú bitumen, a mészkőliszt és a dolomit felhasználásával készített aszfalthabarcok kúszás–visszaalakulás vizsgálatával kimutattam, hogy a  $d<0,045\text{ mm}$ -es frakció (a továbbiakban: *finom frakció*) térfogatarányának növelése javítja az aszfalthabarcok rugalmas tulajdonságait, a visszaalakult hányad mértékét növeli, a maradó alakváltozás mértékét pedig csökkenti, amelyek együttesen csökkenti a nyomvályúsodás kialakulásának lehetőségét.
4. A  $T=60^{\circ}\text{C}$  és  $T=135^{\circ}\text{C}$  között,  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os lépcsőkben (a továbbiakban: *vizsgálati hőmérsékletek*) és különböző deformáció-sebesség tartományokban ( $\dot{\gamma}=0\text{--}200\text{s}^{-1}$ ) elvégzett rotációs nyíróvizsgálatokkal kísérleti úton bizonyítottam, hogy a vizsgált aszfalthabarcok plasztikus folyáshatárral rendelkező viszkoelasztikus anyagrendszerek. Meghatároztam a habarcok valódi folyásgörbéit, valamint kiszámítottam azok viszkozitásgörbéit, melyek alátámasztják, hogy reológiai szempontból az aszfalthabarcok a hőmérséklet és deformáció-sebesség függvényében a *Herschel–Bulkley*-, valamint a *Bingham*–anyagmodellel írhatóak le.
  - a. Mérésekkel igazoltam, hogy az aszfalthabarcok  $\tau_0$  folyáshatára adott hőmérsékleten a T/H arány növelésével tendenciózusan növekszik, a hőmérséklet emelkedésének hatására pedig csökken. A mészkőliszttel készített aszfalthabarcok folyáshatárai minden esetben magasabbak, mint a dolomit felhasználása esetén.

- b.  $T/H = 0,05$  arány esetén és alacsony vizsgálati hőmérsékleten ( $T=60^{\circ}\text{C}$  és  $T=75^{\circ}\text{C}$ ) szemcsemérettől függetlenül az aszfalthabarcok pszeudoplasztikus viselkedésűek, és a *Herschel–Bulkley-modellel* írhatóak le. A hőmérséklet és a deformáció-sebesség növelése esetén a habarcok *Bingham-anyagként* jellemezhetőek.
  - c. A töltőanyagok szemcseméretének, valamint a  $T/H$  arány növelése a habarcok pszeudoplasztikus jellegét erősíti.  $T=135^{\circ}\text{C}$ -on a habarcok minden esetben *Bingham-anyagként* viselkednek.
  - d. A viszkozitásgörbék meghatározásával bizonyítottam, hogy a mészkőliszt és a dolomit felhasználása minden esetben növeli az aszfalthabarcok dinamikai viszkozitását, azonban nem akkora mértékben, hogy az nehezítené a felhasználásukkal készített aszfaltkeverékek beépítését.
5. Dinamikus frekvenciafüggő vizsgálatok segítségével a vizsgálati hőmérsékleteken feltártam az aszfalthabarcok viszkoelasztikus anyagjellemzőit, melyek ismeretében  $T_0=60^{\circ}\text{C}$ -on megszerkesztettem azok paramétereinek mestergörbéit.
- a. A vizsgálati hőmérsékleteken statikus kúszásvizsgálattal megállapítottam az aszfalthabarcok nullviszkozitását, melyek alapján meghatároztam azok  $a_T$  eltolási tényezőit. Az eltolási tényezők segítségével kiszámítottam a WLF-egyenlet aszfalthabarcokra jellemző  $C_1$  és  $C_2$  anyagállandóit.
  - b. Kísérleti úton feltártam az aszfalthabarcok lineárisan viszkoelasztikus tartományát (*LVE*), majd ezen a tartományon belül maradva a vizsgálati hőmérsékleteken,  $f=0,1$  Hz és  $10$  Hz közötti frekvenciatartományban meghatároztam a habarcok viszkoelasztikus anyagjellemzőit ( $G'$ , *tárolási modulusz*;  $G''$ , *veszteségi modulusz*;  $G^*$ , *komplex nyírési modulusz*,  $\delta$ , *fázisszög és  $\tan\delta$ , veszteségi tangens*).
  - c. A viszkoelasztikus paraméterek és az eltolási tényezők ismeretében  $T_0=60^{\circ}\text{C}$ -on megszerkesztettem a mészkőliszt és a dolomit felhasználásával készített aszfalthabarcok mestergörbéit.
  - d. A modulusz-, fázisszög- és veszteségi tangens mestergörbékkel bebizonyítottam, hogy a töltőanyagok szemcseméretének és mennyiségének növelése esetén a habarcok rugalmas tulajdonságai lesznek dominánsabbak, amelynek következtében nő azok merevítő hatása is. Az eredményekkel alátámasztottam, hogy a mészkőliszt–bitumen közötti erős kölcsönhatás következtében a merevség minden esetben nagyobb mértékű, mint a dolomit felhasználásakor.

**SUMMARY**

In my dissertation I have dealt with the rheological properties of asphalt mastics made with mineral fillers, as well as the relation of fine grain fillers and bitumen. Asphalt mastic which is the mixture of bitumen and filler is the most important component of asphalt concretes. It affects both the cohesion between coarse grains, which carry capacity to a great extent, and the strength and stiffness of pavement. A fundamental point of the relation formed with bitumen is the mineral origin of the filler. The most widespread used filler is limestone and Hungary has rich and good quality mineral resources of it. The industrial request which urged on the use of another type of mineral – dolomite – in road construction reinforced my research work and gave me further impulse. The utilization of dolomite can decrease the current use of limestone.

As the strength of interaction between bitumen and filler depends on the properties of components, I have divided my examinations into two parts; analysis of raw materials (filler, bitumen) and analysis of asphalt mastics.

I have proved that as regards to their mineral composition, fillers are pure materials, free of contamination. From the minerals available for me, I have formed fractions of different grain sizes. Having defined their grain size distribution I have found that these mineral materials can be characterized as polydisperse systems and they contain fine and coarse grains in different quantity by fraction.

By material structure test I have proved the morphological features of fillers. I have stated that the form of grains is diversified, their surface is broken up by sharp borders due to comminution processes, which increase the internal friction of the mineral skeleton and pavement. Polydispersity of mineral materials ensures good space filling and through this greater compactness and strength for asphalt mixtures. During the examination of the material structure I have observed signs of minimal porosity and small specific surface area. I have proved that the grain size distribution of the fractions as well as the quantity of fine and coarse grains affect the material features in each case. Presence of fines result in the increase of specific surface area but at the same time decrease the value of the hydrophilic coefficient, improving the bitumen stabilizing ability of mineral materials.

By the use of fillers I have created asphalt mastic mixtures in which effect mechanism of type, grain size and quantity of fillers (volume fraction) can be observed at the same time. I have made rheological tests on the mastics with which the behaviour of asphalt pavements in summer can be described. With the measuring methods used, my purpose was to observe rutting, the typical defect of pavements.

During the analysis of creep-recovery features I have described the behaviour of mastics with the four-parameter Burgers model in which I have defined the parameters of the model numerically. In view of the results I have also stated that the coarse grains in mastics increase the elasticity of mixtures in each case and thus decrease deformation that is developed to the effect of load and also the amount of deformation remaining from recovery. I have also proved that during the use of limestone minor deformations developed which relates to the fact that limestone is able to create stronger relation with the binder.

To examine the flow phenomena occurring during the operational use of pavements in summer and the compacting of asphalt mixtures I have determined the real flow curves and viscosity curves of mastics. As mixtures have yield stress, I have stated that besides the viscoelastic nature of mixtures, there is also plasticity to certain extent in the material system. Having this in mind I have characterized the mixtures with two rheological models in the testing temperature ranges. I have proved that at lower testing temperatures mastics behave as pseudoplastic materials and they could be described with Herschel-Bulkley model. I have also stated that at higher testing temperature the materials behave as Bingham materials. With measuring results it was reinforced that with the increase of the amount and grain size of fillers pseudoplastic nature is strengthened, while at the highest testing temperature – which is in fact the compacting temperature of asphalt pavements – mastics can be characterized as Bingham materials one and all.

With dynamic tests I have revealed the dependence of asphalt mastics from temperature and loading, then in the knowledge of test results I have drawn their master curves. In the knowledge of modulus-, phase angle- and loss tangent master curves I have observed the stiffening effect of fillers used in asphalt mastics. I have come to the conclusion that in case of the increase of grain size and quantity of fillers the elastic properties will dominate and as a consequence stiffening effect will increase. I have stated that due to the strong interaction between limestone and bitumen stiffness will be greater than during the use of dolomite. All in all, we can say that the use of the observed mineral materials – especially limestone – as asphalt fillers is advantageous in any case as due to their favourable features the stiffness of pavements at high traffic temperature can be improved to a great extent, their resistance to deformation can be increased and finally the possibility of rutting formation can be decreased.



## AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTHATÓSÁGA

Kutatási eredményeim egyaránt hasznosíthatóak mind oktatási, kutatási, mind pedig ipari felhasználás céljából. A disszertációban részletesen bemutatott mérés-technikai módszerek és kiértékelési metódusok a szilikástechnológus képzés gyakorlati segédleteinek alapjaitul szolgálhatnak, elősegítve a hallgatók elméleti és gyakorlati képzését. Az alkalmazott reológiai vizsgálati módszerek jelenleg is mind a B.Sc., mind pedig az M.Sc. képzésben részt vevő hallgatók gyakorlati oktatását szolgálja.

Az aszfalthabarcson, mint „polimer-kerámia” kompozit anyagrendszereken elvégzett vizsgálatok eredményei alapján szerzett ismeretek hozzájárulnak a Miskolci Egyetem Kerámia- és Polimermérnöki Intézete által oktatott szakirányos hallgatók képzéséhez is.

A hazai ásványkincsek megfelelő arányú felhasználásával olyan burkolatok tervezhetőek, amelyeknek magas üzemi hőmérsékleteken csökkenthető nyomvályúsodási hajlama, növelhető merevsége, a jobb bitumen-töltőanyag kölcsönhatás miatt pedig nagyobb szilárdság és élettartam érhető el.

## A TÉMÁBAN MEGJELENT LEGFONTOSABB PUBLIKÁCIÓK

1. **R. Géber**, L. A. Gömze: *Characterization of mineral materials as asphalt fillers*; Materials Science, Testing and Informatics V., Trans Tech Publication, pp. 471–476. (2010)
2. **R. Géber**, L. A. Gömze: *Investigation of hydrophilic and hydrophobic properties of different mineral fillers for asphalt mixtures*; Proceedings of the 11<sup>th</sup> ECERS Conference, Kraków, p. 945–950. (2009)
3. L. A. Gömze, **R. Géber**, L. N. Gömze: *Investigation of rheo-mechanical properties of asphalt mixtures as function of temperatures and pressures*; Proceedings of the 11<sup>th</sup> ECERS Conference, Kraków, p. 1122–1126. (2009)
4. **R. Géber**, L. A. Gömze: *Examination of the "Pilisvörösvár" dolomite filler as aggregate material for asphalts*; MicroCAD International Scientific Conference, Kiadvány, p. 25–30. (2009)
5. L. A. Gömze, **R. Géber**, J. Csányi Tamásné: *The effect of temperature and composition to the rheological properties of asphalt mixtures*; Materials Science Forum, Vol. 589. pp 85–91. (2008)
6. **R. Géber**, L. A. Gömze: *Utilization of mineral asphalt fillers in the hungarian road construction*; 2<sup>nd</sup> International Congress on Ceramics (CD Proceedings), Verona (2008)
7. **Géber R.**: *Ásványbányában keletkező sajátfiller újrahasonosítási lehetőségeinek vizsgálata útpítési alapanyagként*; Építőanyag, 60. évfolyam, 1. szám, p. 19-23. (2008)
8. **R. Géber**, L. A. Gömze: *Comparison examination of andesite fillers used in road construction*; MicroCAD International Scientific Conference, Kiadvány, p. 29–34. (2008)
9. **Géber R.**: *Aszfalt töltőanyagok kiválasztása hidrofíli tulajdonságaik alapján*; Építőanyag, 59. évfolyam 3. szám, p.73-77. (2007)

## **KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS**

Ezúton szeretném megköszönni mindazok segítségét és támogatását, akik hozzájárultak doktori értekezésem elkészítéséhez.

Köszönöm témavezetőmnek, Prof. Dr. Gömze A. Lászlónak, hogy disszertációm elkészítését mindvégig támogatta. Köszönet illeti tanszéki munkatársaimat is, akik mindig szívesen segítettek.

Nagy köszönettel tartozom Skovrankó Ernő laboratóriumvezető főmérnöknek, aki egyetemi éveim alatt felkeltette érdeklődésem e tudományterület iránt, és szakmai észrevételeivel, tanácsaival mindig készségesen segített.

Köszönettel tartozom Dr. Mucsi Gábornak és Rácz Ádámnak a lézergranulometriás mérésekben, Kristály Ferencnek a röntgendiffrakciós vizsgálatok elvégzésében, Ferenczi Tibornak a fajlagos felületi vizsgálatokban, Dr. Szabó Tamásnak és Zsoldos Gabriellának pedig a DSC és FTIR vizsgálatokban nyújtott segítségükért.

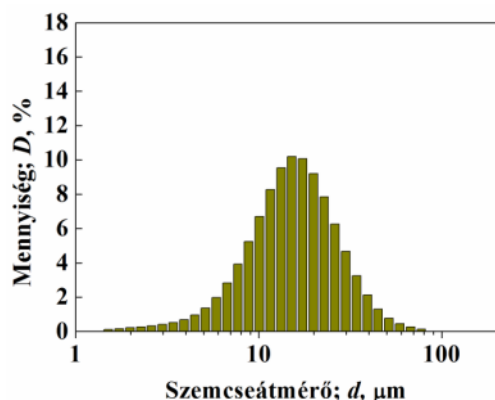
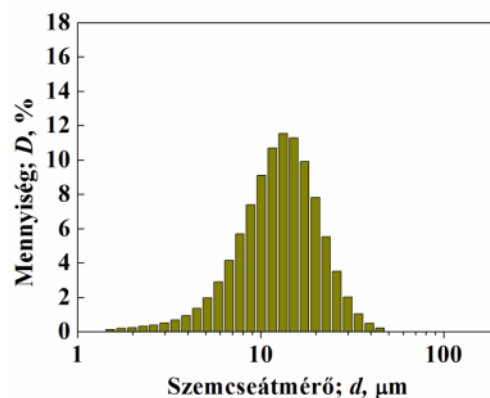
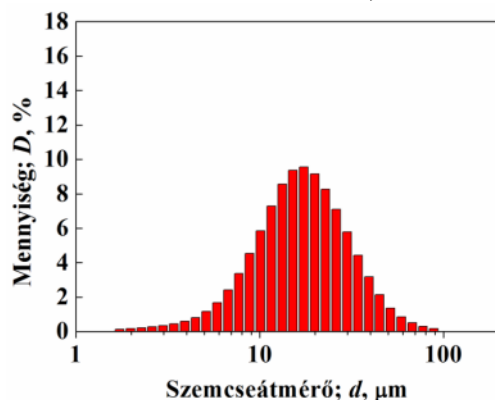
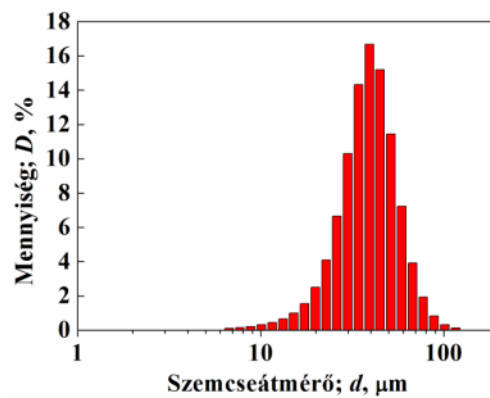
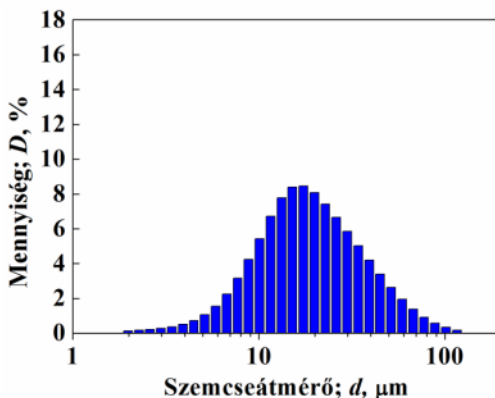
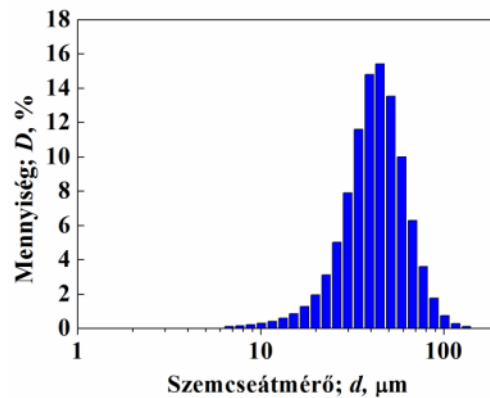
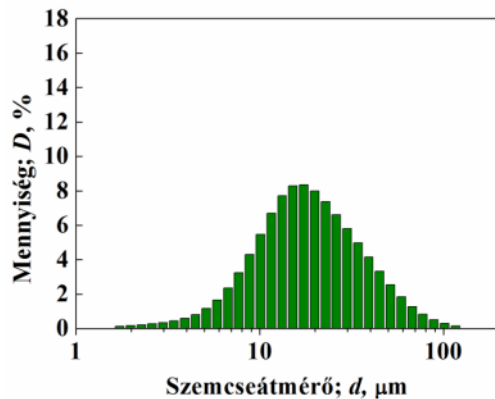
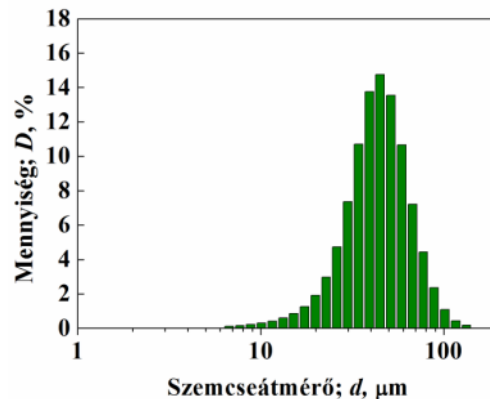
Köszönet illeti Szabó Miklós laboratórium vezető mérnököt, valamint a H-TPA Innovációs és Minőségvizsgáló Kft. munkatársait az alapanyagok vizsgálatában nyújtott segítségükért.

**A kutató munka a TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0008 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.**

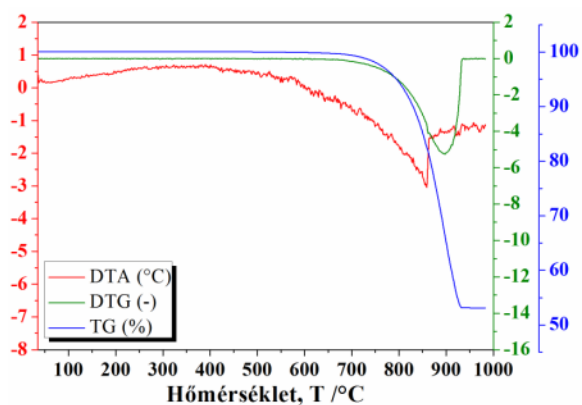
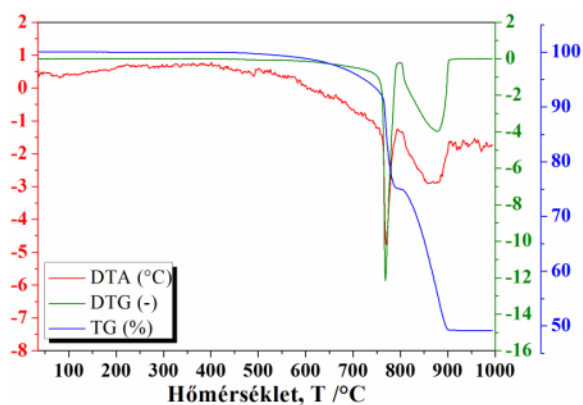
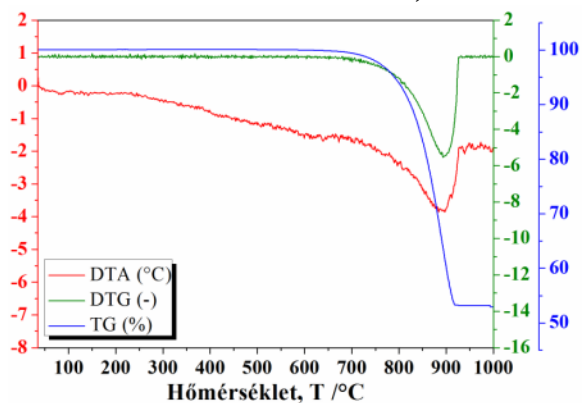
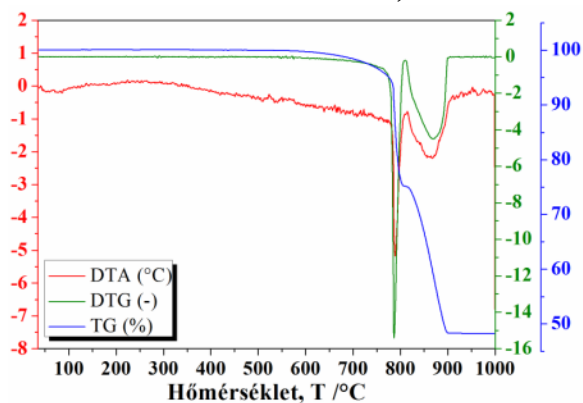
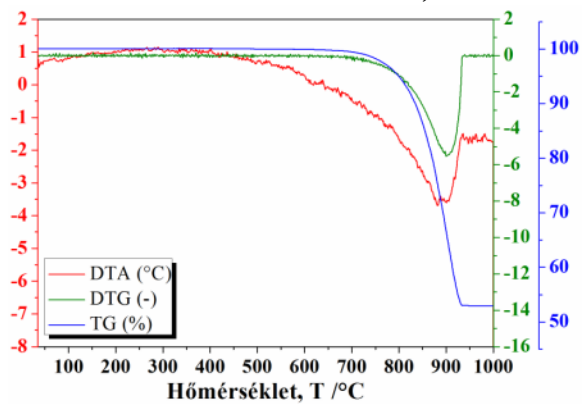
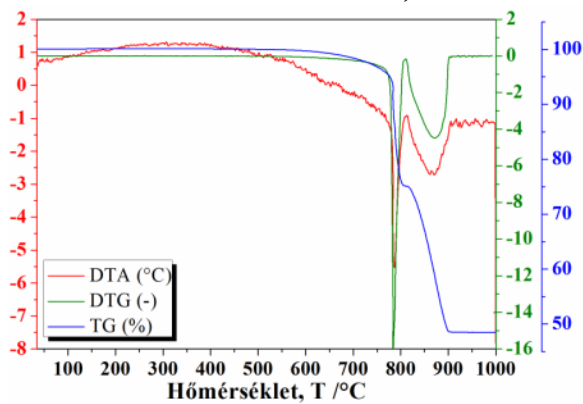
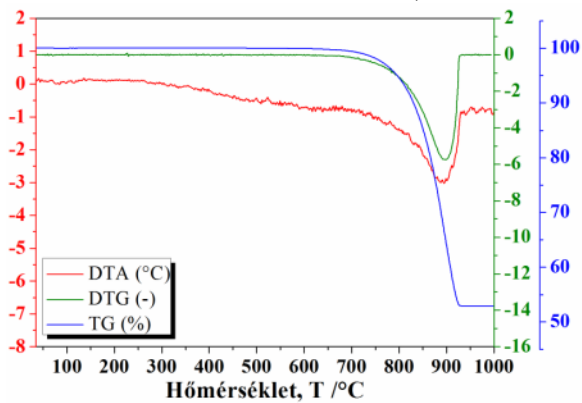
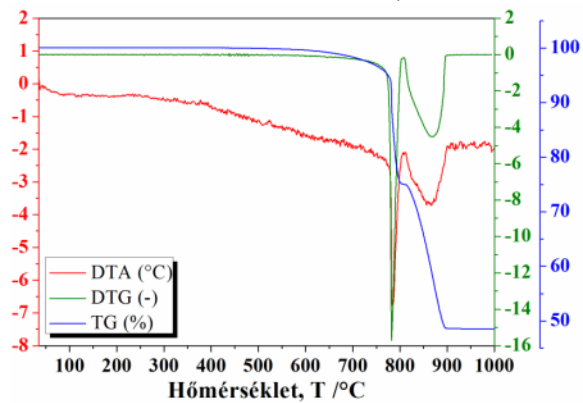
Legnagyobb köszönettel Családomnak és Kedvesemnek tartozom, akik mindvégig biztattak és munkámat – a nehéz időszakokban is – végtelen türelemmel támogatták.

## MELLÉKLETEK

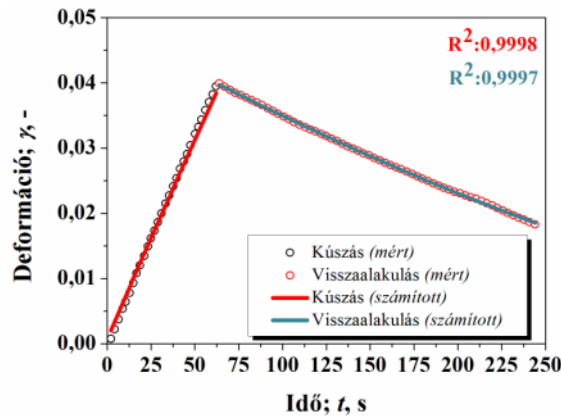
## 1. Melléklet: A töltőanyagok szemcseméret-eloszlásának vizsgálata: hisztogramok

M1.1. ábra. Mész-köliszt –  $d < 0,045$  mmM1.2. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mmM1.3. ábra. Mész-köliszt –  $d < 0,050$  mmM1.4. ábra. Dolomit –  $d < 0,050$  mmM1.5. ábra. Mész-köliszt –  $d < 0,063$  mmM1.6. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mmM1.7. ábra. Mész-köliszt –  $d < 0,071$  mmM1.8. ábra. Dolomit –  $d < 0,071$  mm

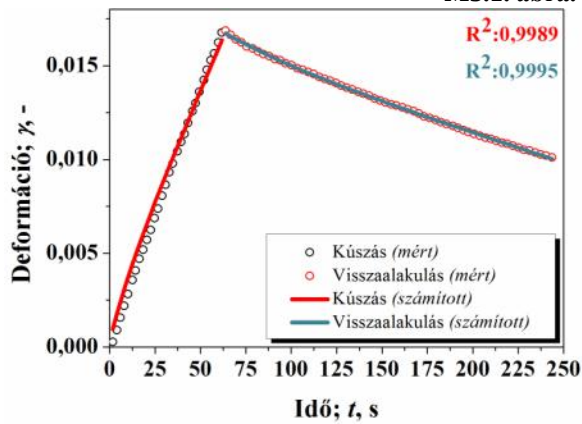
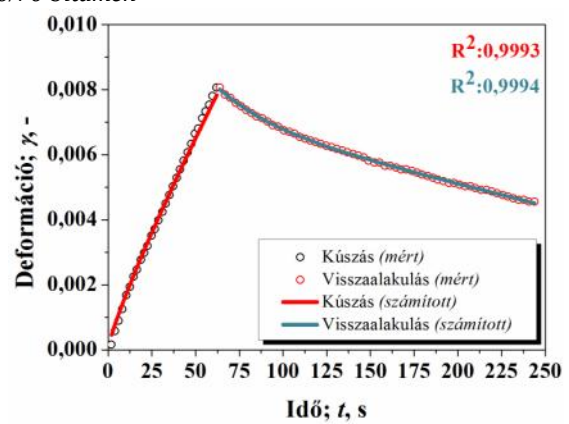
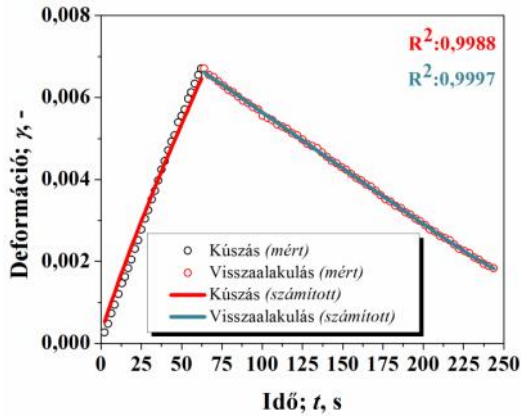
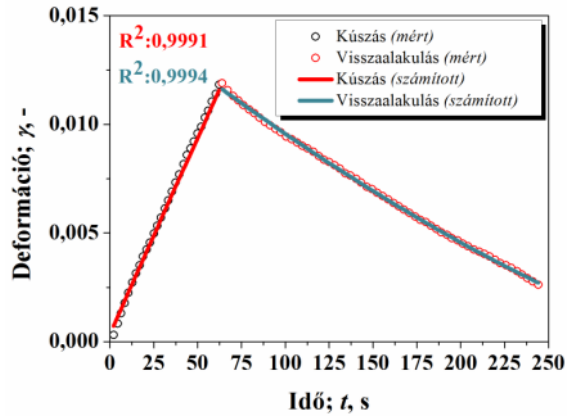
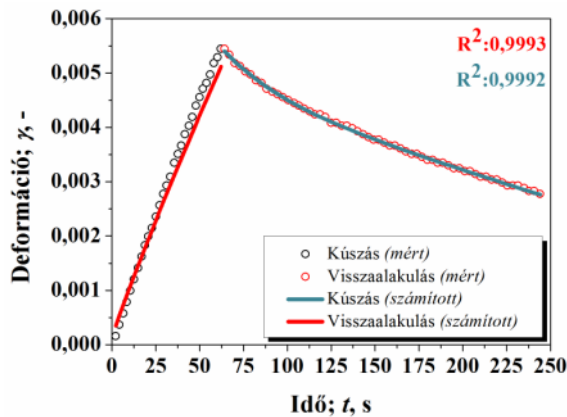
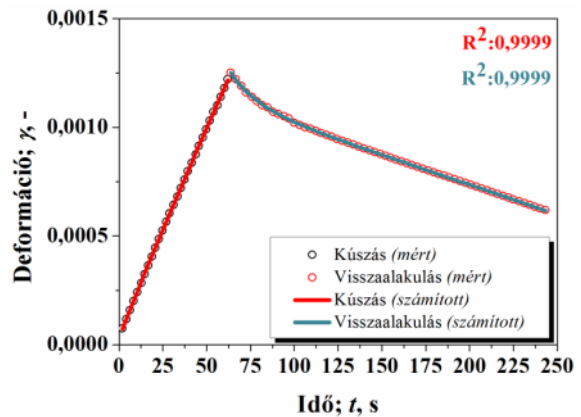
## 2. Melléklet: A töltőanyagok termoanalitikai vizsgálata: derivatogramok

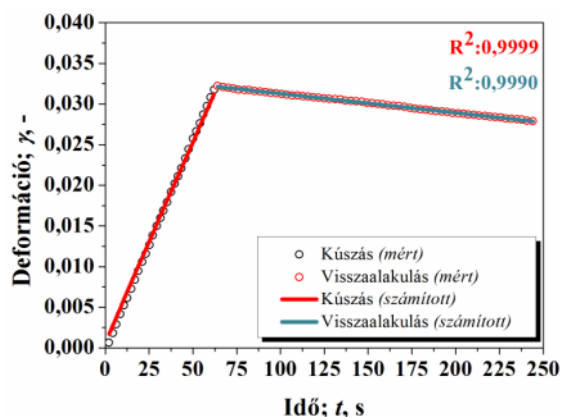
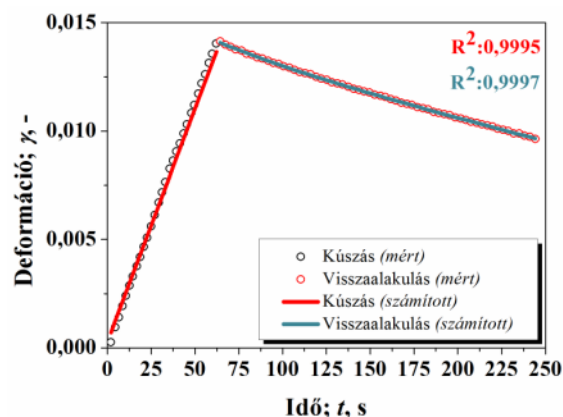
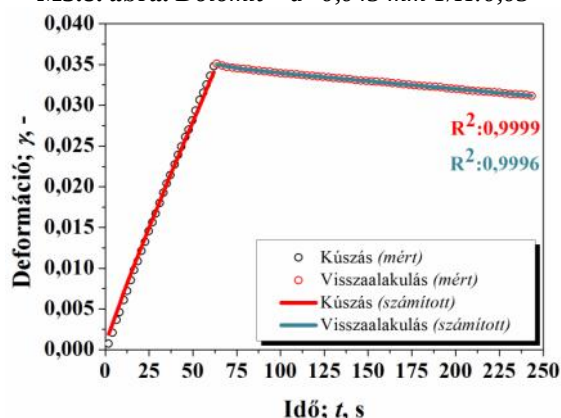
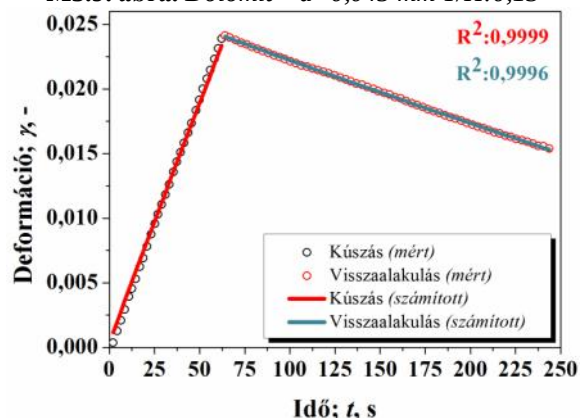
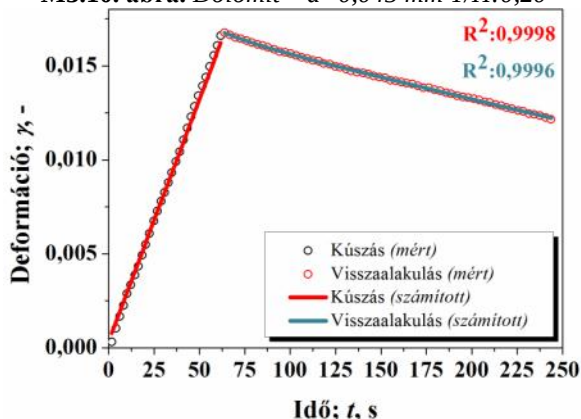
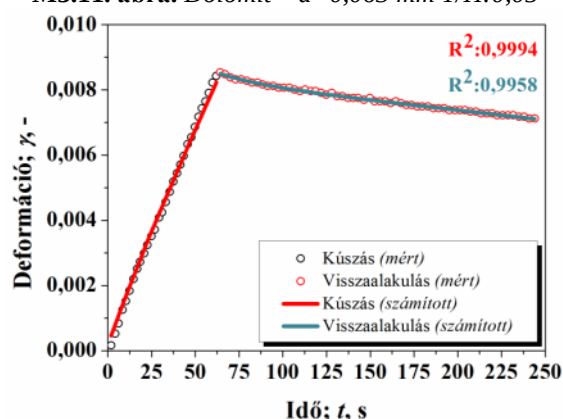
M2.1. ábra. Mész-köliszt –  $d < 0,045$  mmM2.2. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mmM2.3. ábra. Mész-köliszt –  $d < 0,05$  mmM2.4. ábra. Dolomit –  $d < 0,05$  mmM2.5. ábra. Mész-köliszt –  $d < 0,063$  mmM2.6. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mmM2.7. ábra. Mész-köliszt –  $d < 0,071$  mmM2.8. ábra. Dolomit –  $d < 0,071$  mm

### 3. Melléklet: Aszfalthabarcok kúszás-visszaalakulásának vizsgálata



M3.1. ábra. B 50/70 bitumen

M3.2. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,045$  mm T/H:0,05M3.3. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,045$  mm T/H:0,13M3.4. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,045$  mm T/H:0,20M3.5. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,063$  mm T/H:0,05M3.6. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,063$  mm T/H:0,13M3.7. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,063$  mm T/H:0,20

M3.8. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mm  $T/H: 0,05$ M3.9. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mm  $T/H: 0,13$ M3.10. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mm  $T/H: 0,20$ M3.11. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm  $T/H: 0,05$ M3.12. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm  $T/H: 0,13$ M3.13. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm  $T/H: 0,20$ 

M3. 1. táblázat. Aszfalthabarcos keverékek kúszás szakaszainak modellparaméterei

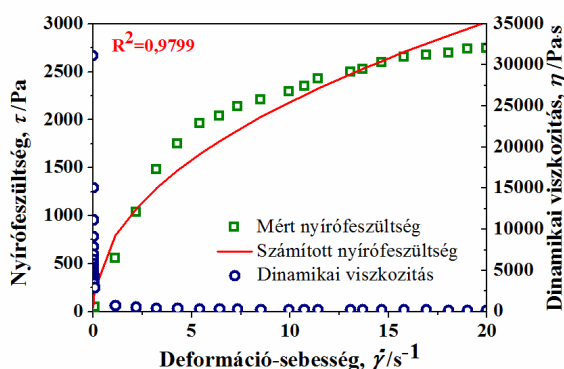
| KEVERÉK           | $\tau_0$<br>Pa | $\gamma_r$<br>- | $\gamma_m$<br>- | $\gamma_k$<br>- | $\gamma_{e0}$<br>- | $\gamma_{max}$<br>- | $t_1$<br>s | $G_1$<br>Pa | $G_2$<br>Pa | $\eta_1$<br>Pa·s | $\eta_2$<br>Pa·s | $\lambda_1$<br>s | $R^2$<br>- |
|-------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|---------------------|------------|-------------|-------------|------------------|------------------|------------------|------------|
| B50/70 bitumen    | 1              | 7,33E-04        | 3,75E-02        | 1,73E-03        | 2,47E-03           | 4,00E-02            | 63,99      | 1360,48     | 576,67      | 1707,17          | 22368,95         | 38,79            | 0,9998     |
| ML_45 $\mu$ m_005 | 1              | 2,62E-04        | 1,57E-02        | 9,23E-04        | 1,19E-03           | 1,69E-02            | 63,83      | 3821,17     | 1083,07     | 4072,09          | 20199,29         | 18,65            | 0,9989     |
| ML_45 $\mu$ m_013 | 1              | 2,61E-04        | 6,83E-03        | 9,77E-04        | 1,24E-03           | 8,06E-03            | 64,03      | 3827,02     | 1023,86     | 9381,68          | 27244,80         | 26,61            | 0,9993     |
| ML_45 $\mu$ m_020 | 1              | 1,57E-04        | 4,47E-03        | 2,08E-03        | 2,23E-03           | 6,70E-03            | 63,96      | 6369,43     | 481,46      | 14315,13         | 5685,60          | 11,81            | 0,9988     |
| ML_63 $\mu$ m_005 | 1              | 3,14E-04        | 1,14E-02        | 8,08E-05        | 1,13E-04           | 1,19E-02            | 63,69      | 3184,71     | 12370,11    | 5604,59          | 344742,70        | 27,87            | 0,9991     |
| ML_63 $\mu$ m_013 | 1              | 1,57E-04        | 4,38E-03        | 2,12E-04        | 1,07E-03           | 5,45E-03            | 64,09      | 6369,43     | 4714,76     | 14649,14         | 190240,45        | 40,35            | 0,9993     |
| ML_63 $\mu$ m_020 | 1              | 3,26E-05        | 1,14E-03        | 9,13E-04        | 5,26E-04           | 1,26E-03            | 64,09      | 30712,53    | 1095,29     | 56042,32         | 23099,67         | 21,09            | 0,9999     |
| D_45 $\mu$ m_005  | 1              | 7,33E-04        | 3,41E-02        | 2,65E-04        | 2,65E-04           | 3,51E-02            | 64,42      | 1364,44     | 3776,44     | 1863,79          | 71824,02         | 19,02            | 0,9999     |
| D_45 $\mu$ m_013  | 1              | 6,28E-04        | 2,85E-02        | 9,35E-04        | 3,73E-03           | 3,22E-02            | 63,64      | 1591,85     | 1069,98     | 2249,46          | 25444,04         | 23,78            | 0,9995     |
| D_45 $\mu$ m_020  | 1              | 2,62E-04        | 1,39E-02        | 3,73E-03        | 9,35E-04           | 1,41E-02            | 64,04      | 3821,17     | 268,02      | 4642,82          | 4289,92          | 16,01            | 0,9999     |
| D_63 $\mu$ m_005  | 1              | 3,66E-04        | 2,30E-02        | 7,68E-05        | 1,10E-03           | 2,41E-02            | 64,08      | 2729,26     | 13020,83    | 2781,49          | 422395,83        | 32,44            | 0,9999     |
| D_63 $\mu$ m_013  | 1              | 3,14E-04        | 1,64E-02        | 7,10E-04        | 3,91E-04           | 1,68E-02            | 63,87      | 3184,71     | 1409,24     | 3901,84          | 25916,01         | 18,39            | 0,9998     |
| D_63 $\mu$ m_020  | 1              | 1,57E-04        | 7,67E-03        | 7,36E-04        | 8,67E-04           | 8,54E-03            | 64,26      | 6369,43     | 1359,43     | 8379,84          | 27270,26         | 20,06            | 0,9994     |

**M3. 2. táblázat.** Aszfalthabarc keverékek visszaalakulási szakaszainak modellparaméterei

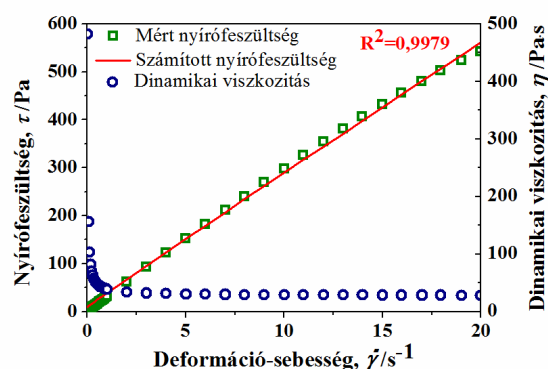
| KEVERÉK                           | $\gamma_0$<br>- | $\dot{\gamma}$<br>$s^{-1}$ | $\gamma_1$<br>- | $\lambda_2$<br>s | $R^2$<br>- |
|-----------------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|------------------|------------|
| <b>B50/70 bitumen</b>             | 0,048760        | -0,000254                  | -0,071420       | 664,10           | 0,9997     |
| <b>ML_45<math>\mu</math>m_005</b> | 0,015790        | -0,000013                  | -0,008028       | 32,17            | 0,9995     |
| <b>ML_45<math>\mu</math>m_013</b> | 0,008367        | -0,000027                  | 0,000000        | 15,59            | 0,9994     |
| <b>ML_45<math>\mu</math>m_020</b> | 0,022070        | -0,000031                  | -0,004395       | 44,94            | 0,9997     |
| <b>ML_63<math>\mu</math>m_005</b> | 0,009069        | -0,000003                  | -0,007785       | 15,89            | 0,9994     |
| <b>ML_63<math>\mu</math>m_013</b> | 0,010520        | -0,000010                  | -0,005295       | 34,55            | 0,9992     |
| <b>ML_63<math>\mu</math>m_020</b> | 0,015530        | -0,000105                  | -0,021680       | 524,60           | 0,9999     |
| <b>D_45<math>\mu</math>m_005</b>  | 0,016920        | -0,000021                  | -0,002231       | 57,72            | 0,9990     |
| <b>D_45<math>\mu</math>m_013</b>  | 0,093680        | -0,000019                  | -0,057810       | 12,60            | 0,9997     |
| <b>D_45<math>\mu</math>m_020</b>  | 0,033640        | -0,000023                  | -0,009132       | 20680,00         | 0,9996     |
| <b>D_63<math>\mu</math>m_005</b>  | 0,027430        | -0,000031                  | -0,013340       | 586,00           | 0,9996     |
| <b>D_63<math>\mu</math>m_013</b>  | 0,023610        | -0,000023                  | -0,005752       | 23,52            | 0,9996     |
| <b>D_63<math>\mu</math>m_020</b>  | 0,011760        | -0,000006                  | -0,003174       | 27,28            | 0,9958     |

## 4. Melléklet: Aszfalthabarcok folyás- és viszkozitásgörbéinek meghatározása

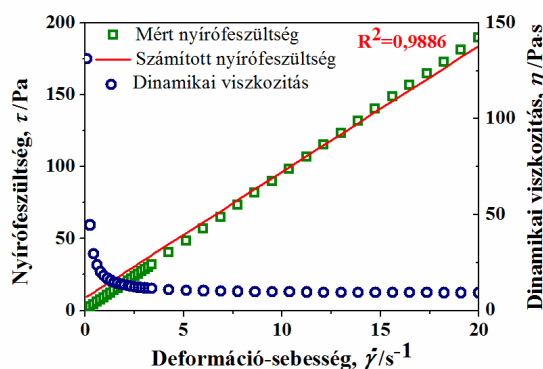
## B50/70 bitumen



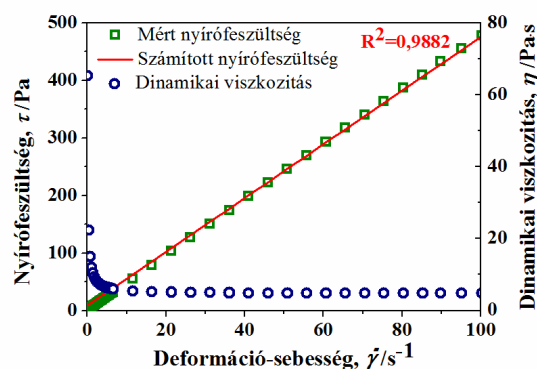
M4.1. ábra. T=60 °C



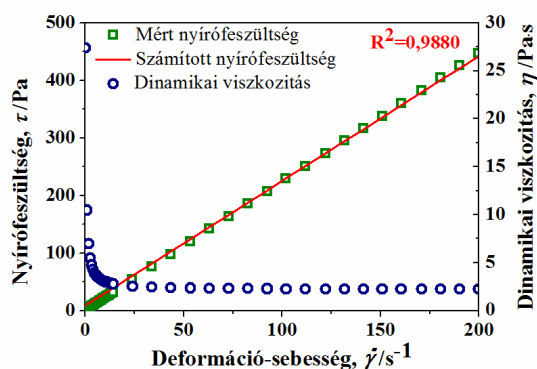
M4.2. ábra. T=75 °C



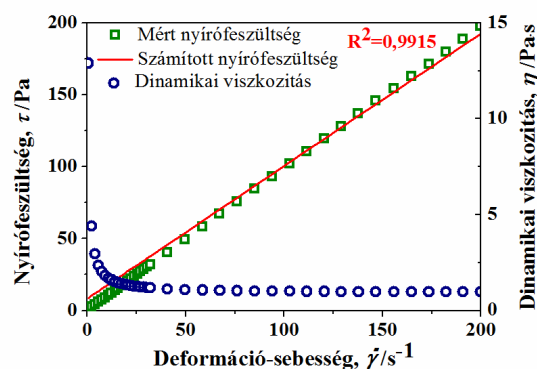
M4.3. ábra. T=90 °C



M4.4. ábra. T=105 °C



M4.5. ábra. T=120 °C

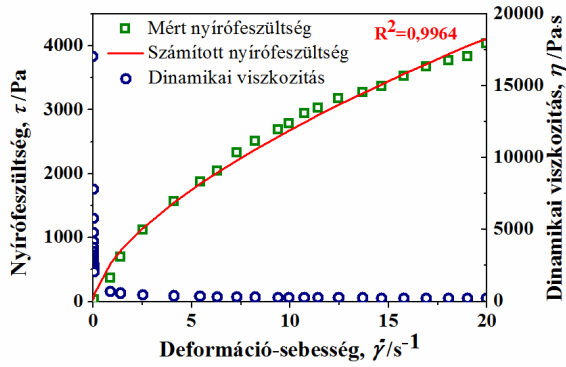
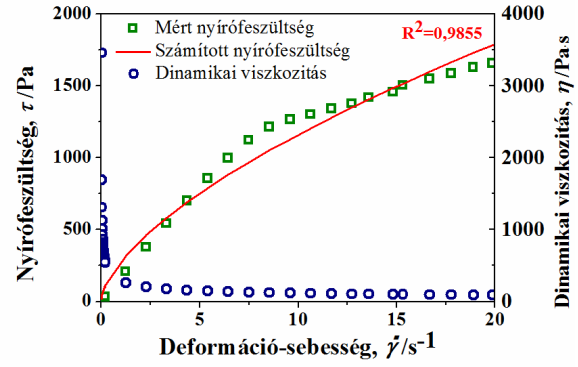
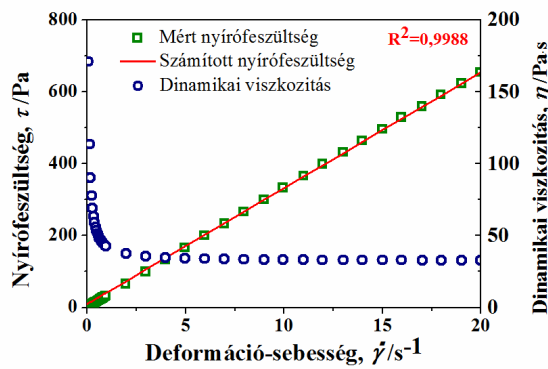
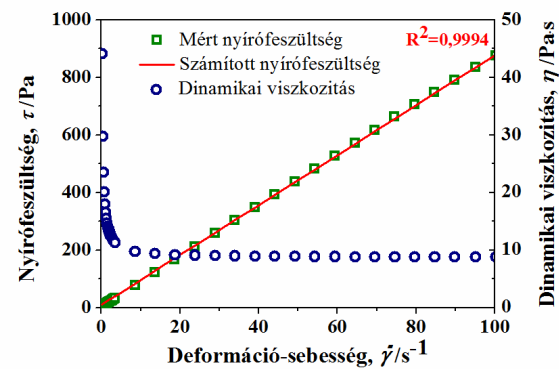
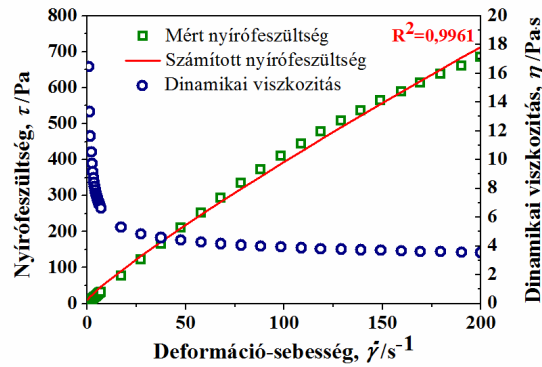
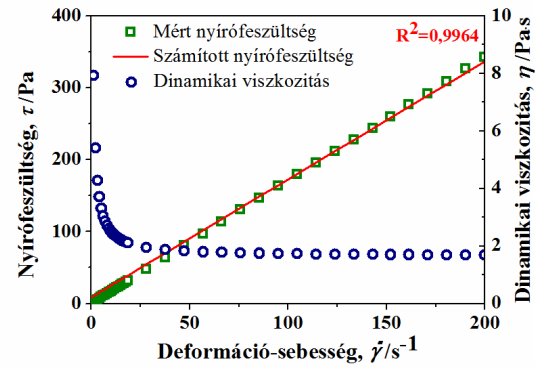


M4.6. ábra. T=135 °C

M4. 1. táblázat. Modellparaméterek meghatározása

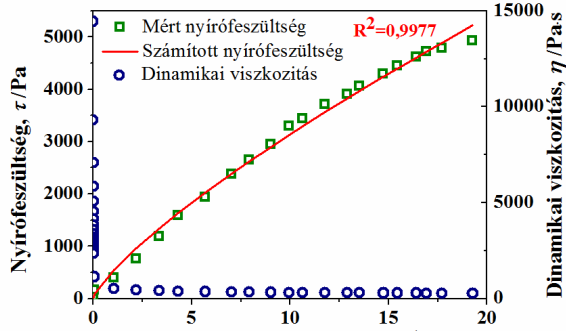
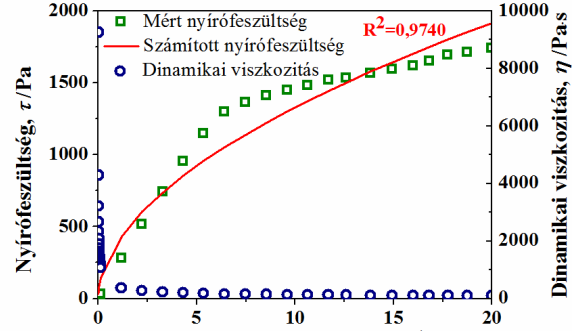
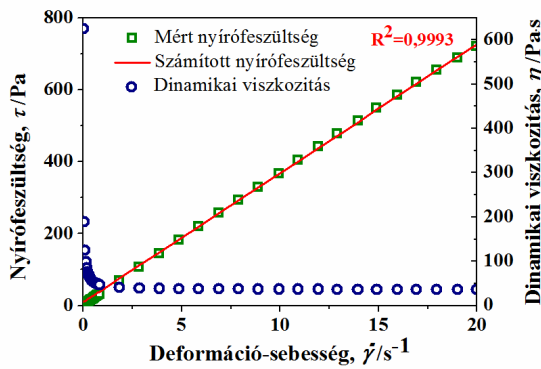
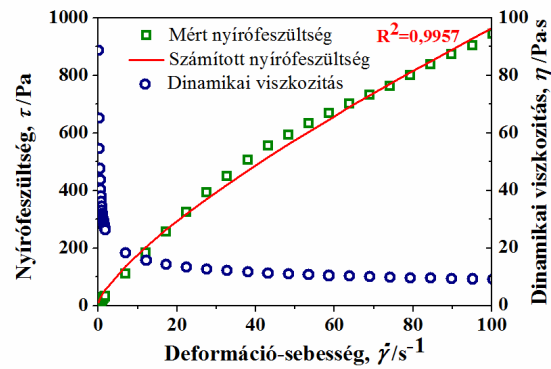
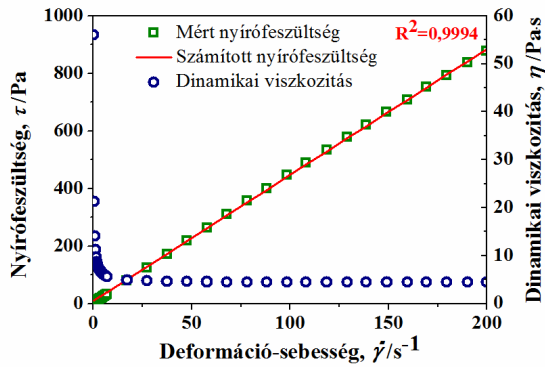
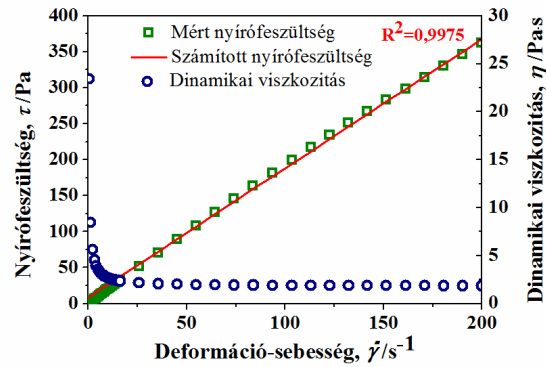
| Hőmérséklet;<br>T / °C | Folyáshatár;<br>τ <sub>0</sub> / Pa | Konzisztencia;<br>K / Pa·s <sup>n</sup> | Sebesség-<br>érzékenységi<br>kitevő; n / - | Bingham<br>viszkozitás;<br>η <sub>B</sub> / Pa·s | Reológiai<br>anyagmodell | Determinációs<br>együttható;<br>R² / - | Relatív<br>szórás;<br>V / % |
|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|
| 60                     | 9,33                                | 737,60                                  | 0,47                                       | -                                                | Herschel-Bulkley         | 0,9799                                 | 5,82                        |
| 75                     | 9,30                                | 29,32                                   | 0,98                                       | -                                                |                          | 0,9979                                 | 0,29                        |
| 90                     | 8,95                                | -                                       | -                                          | 8,75                                             |                          | 0,9886                                 | 0,79                        |
| 105                    | 8,72                                | -                                       | -                                          | 4,67                                             | Bingham                  | 0,9982                                 | 0,35                        |
| 120                    | 8,50                                | -                                       | -                                          | 2,17                                             |                          | 0,9980                                 | 0,36                        |
| 135                    | 8,32                                | -                                       | -                                          | 0,92                                             |                          | 0,9915                                 | 0,63                        |



Mészkölszt –  $d < 0,045 \text{ mm}$  (T/H:0,05)M4.7. ábra.  $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ M4.8. ábra. b)  $T=75\text{ }^{\circ}\text{C}$ M4.9. ábra.  $T=90\text{ }^{\circ}\text{C}$ M4.10. ábra.  $T=105\text{ }^{\circ}\text{C}$ M4.11. ábra.  $T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$ M4.12. ábra.  $T=135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

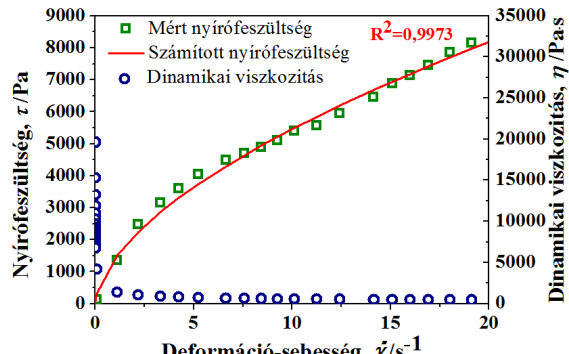
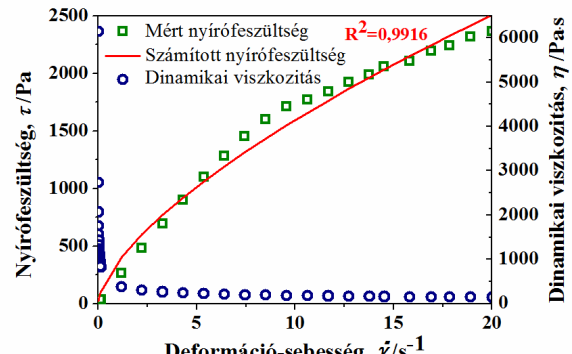
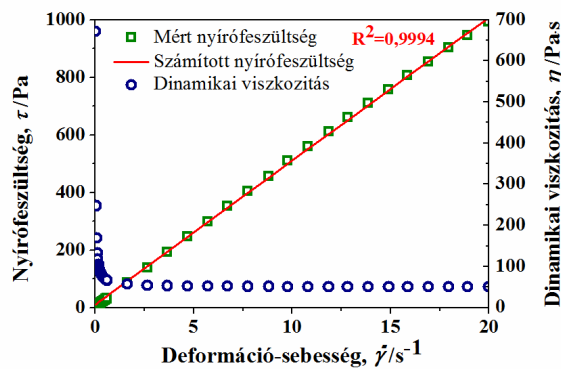
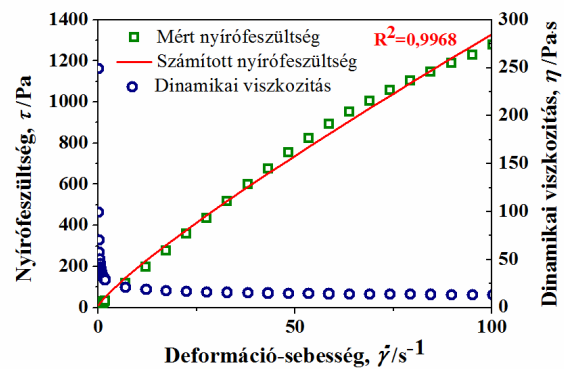
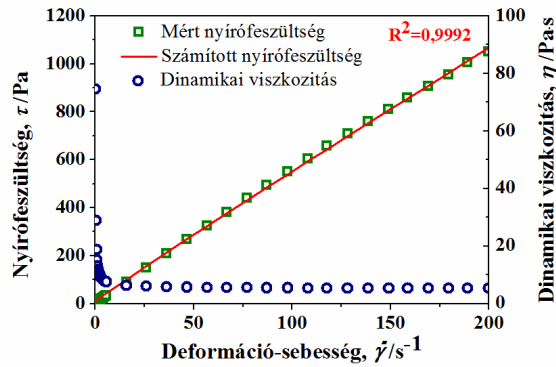
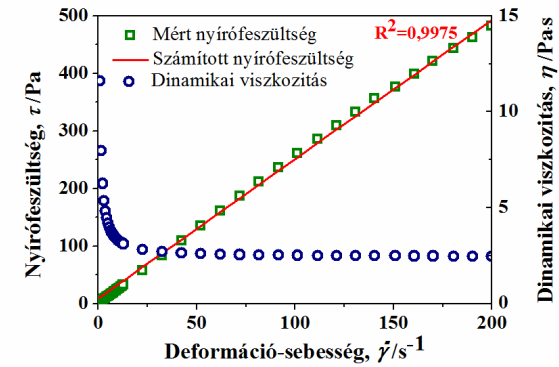
M4. 2. táblázat. Modellparaméterek meghatározása

| Hőmérséklet;<br>$T/^{\circ}\text{C}$ | Folyáshatár;<br>$\tau_0/\text{Pa}$ | Konzisztencia;<br>$K/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ | Sebesség-<br>érzékenységi<br>kitevő; $n/-$ | Bingham<br>viszkozitás;<br>$\eta_B/\text{Pa}\cdot\text{s}$ | Reológiai<br>anyagmodell | Determinációs<br>együttható;<br>$R^2/-$ | Relatív<br>szórás;<br>$V/\%$ |
|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|
| 60                                   | 13,54                              | 640,80                                         | 0,62                                       | -                                                          | Herschel-Bulkley         | 0,9964                                  | 6,80                         |
| 75                                   | 10,07                              | 267,00                                         | 0,63                                       | -                                                          |                          | 0,9855                                  | 4,31                         |
| 90                                   | 9,23                               | -                                              | -                                          | 32,24                                                      | Bingham                  | 0,9988                                  | 0,54                         |
| 105                                  | 8,97                               | -                                              | -                                          | 8,67                                                       |                          | 0,9994                                  | 1,06                         |
| 120                                  | 8,66                               | 6,95                                           | 0,87                                       | -                                                          | Herschel-Bulkley         | 0,9961                                  | 1,69                         |
| 135                                  | 8,63                               | -                                              | -                                          | 1,64                                                       | Bingham                  | 0,9964                                  | 1,16                         |

Mészkölszt –  $d < 0,045 \text{ mm}$  (T/H:0,13)M4.13. ábra.  $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ M4.14. ábra.  $T=75\text{ }^{\circ}\text{C}$ M4.15. ábra.  $T=90\text{ }^{\circ}\text{C}$ M4.16. ábra.  $T=105\text{ }^{\circ}\text{C}$ M4.17. ábra.  $T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$ M4.18. ábra.  $T=135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

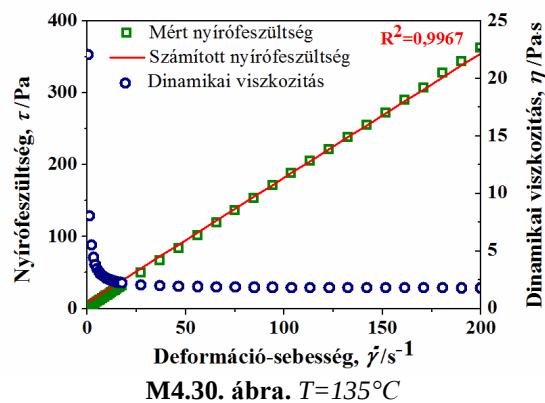
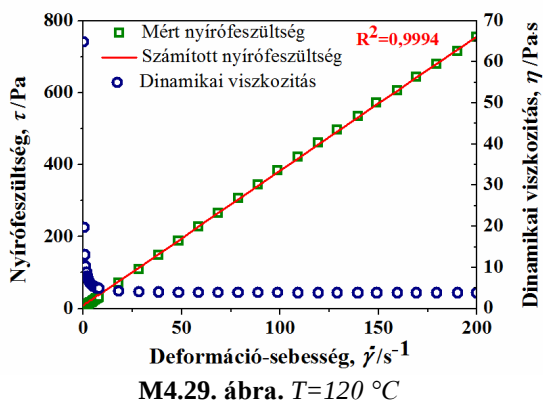
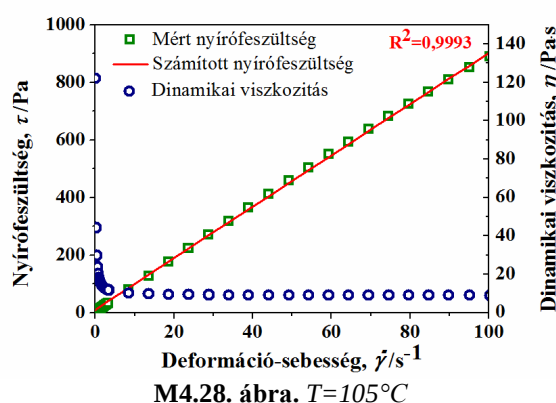
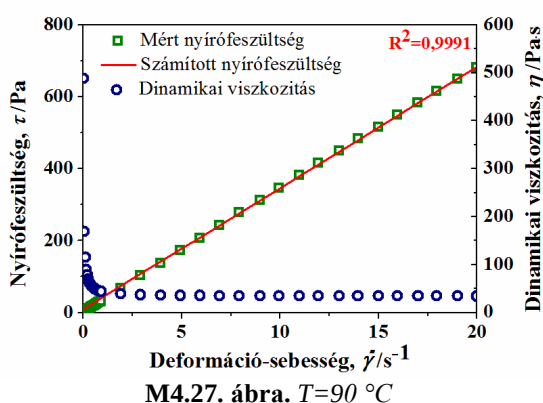
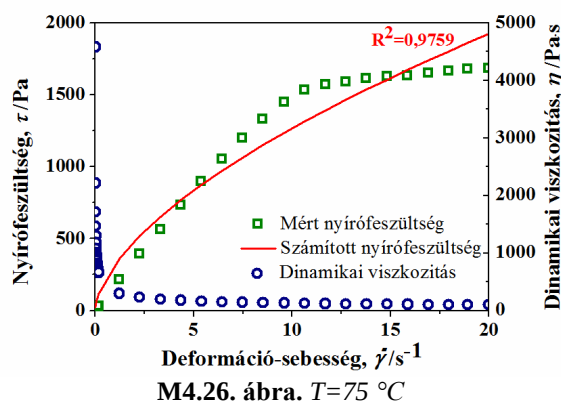
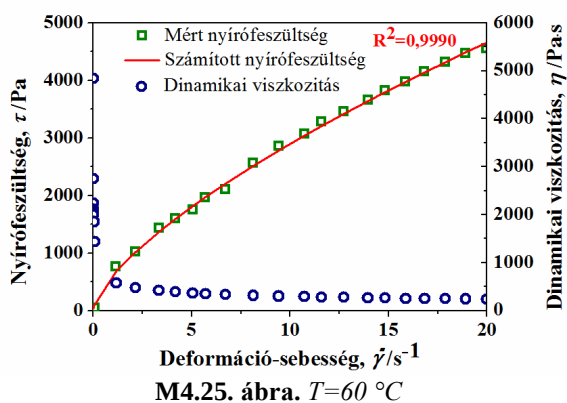
M4. 3. táblázat. Modellparaméterek meghatározása

| Hőmérséklet;<br>$T/^{\circ}\text{C}$ | Folyáshatár;<br>$\tau_0/\text{Pa}$ | Konzisztencia;<br>$K/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ | Sebesség-<br>érzékenységi<br>kitevő; $n/-$ | Bingham<br>viszkozitás;<br>$\eta_B/\text{Pa}\cdot\text{s}$ | Reológiai<br>anyagmodell | Determinációs<br>együttható;<br>$R^2/-$ | Relatív<br>szórás;<br>$V/\%$ |
|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|
| 60                                   | 13,93                              | 518,10                                         | 0,78                                       | -                                                          | Herschel-Bulkley         | 0,9977                                  | 2,36                         |
| 75                                   | 10,45                              | 386,10                                         | 0,53                                       | -                                                          |                          | 0,9740                                  | 3,24                         |
| 90                                   | 9,46                               | -                                              | -                                          | 35,89                                                      | Bingham                  | 0,9993                                  | 0,28                         |
| 105                                  | 9,18                               | 29,76                                          | 0,75                                       | -                                                          | Herschel-Bulkley         | 0,9957                                  | 0,73                         |
| 120                                  | 8,77                               | -                                              | -                                          | 4,38                                                       | Bingham                  | 0,9994                                  | 0,26                         |
| 135                                  | 8,68                               | -                                              | -                                          | 1,80                                                       | Bingham                  | 0,9975                                  | 3,24                         |

Mészköliszt –  $d < 0,045 \text{ mm}$  (T/H:0,20)M4.19. ábra.  $T = 60^\circ \text{C}$ M4.20. ábra.  $T = 75^\circ \text{C}$ M4.21. ábra.  $T = 90^\circ \text{C}$ M4.22. ábra.  $T = 105^\circ \text{C}$ M4.23. ábra.  $T = 120^\circ \text{C}$ M4.24. ábra.  $T = 135^\circ \text{C}$ 

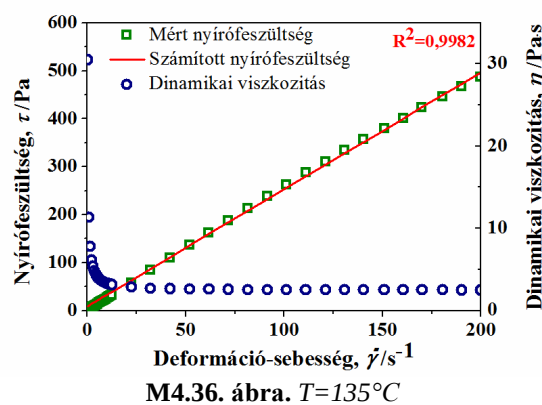
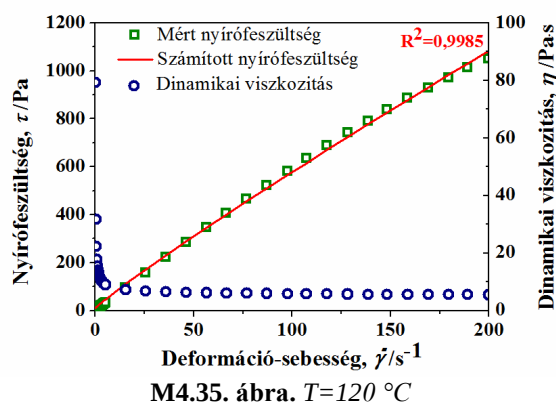
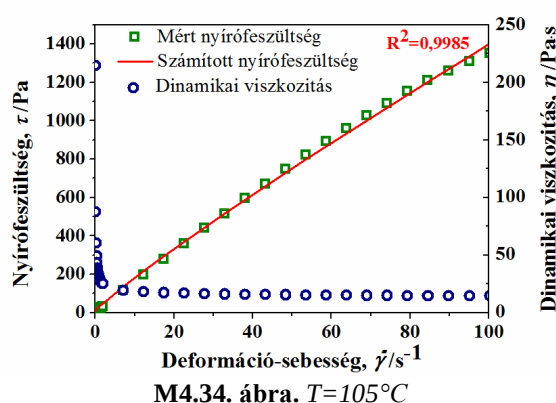
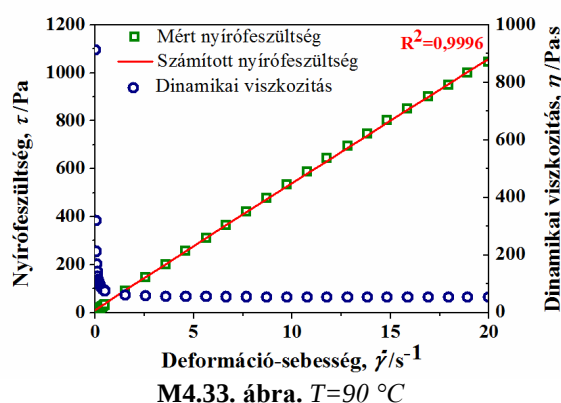
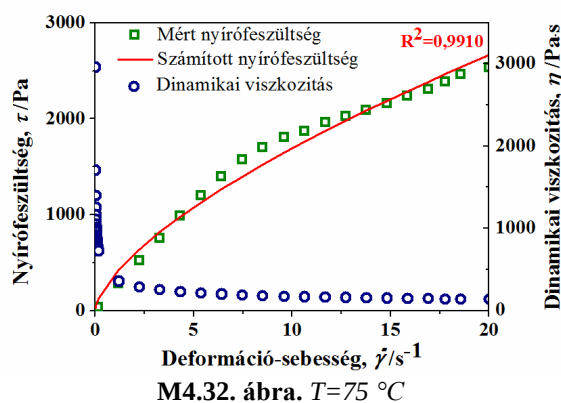
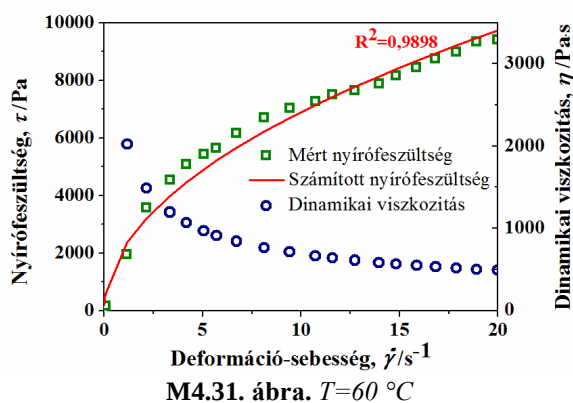
M4. 4. táblázat. Modellparaméterek meghatározása

| Hőmérséklet;<br>$T / ^\circ \text{C}$ | Folyáshatár;<br>$\tau_0 / \text{Pa}$ | Konzisztencia;<br>$K / \text{Pa} \cdot \text{s}^{-n}$ | Sebesség-<br>érzékenységi<br>kitevő; $n$ / - | Bingham<br>viszkozitás;<br>$\eta_B / \text{Pa} \cdot \text{s}$ | Reológiai<br>anyagmodell | Determinációs<br>együttható;<br>$R^2$ / - | Relatív<br>szórás;<br>$V$ / % |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|
| 60                                    | 14,56                                | 1411,00                                               | 0,59                                         | -                                                              | Herschel-Bulkley         | 0,9973                                    | 2,51                          |
| 75                                    | 12,28                                | 384,40                                                | 0,66                                         | -                                                              |                          | 0,9916                                    | 2,39                          |
| 90                                    | 9,93                                 | 51,15                                                 | 0,99                                         | -                                                              |                          | 0,9994                                    | 1,85                          |
| 105                                   | 9,47                                 | 25,90                                                 | 0,85                                         | -                                                              |                          | 0,9968                                    | 0,29                          |
| 120                                   | 9,21                                 | 6,40                                                  | 0,96                                         | -                                                              |                          | 0,9992                                    | 0,13                          |
| 135                                   | 9,11                                 | -                                                     | -                                            | 2,42                                                           | Bingham                  | 0,9980                                    | 1,62                          |

Mészköliszt –  $d < 0,063\text{mm}$  (T/H:0,05)

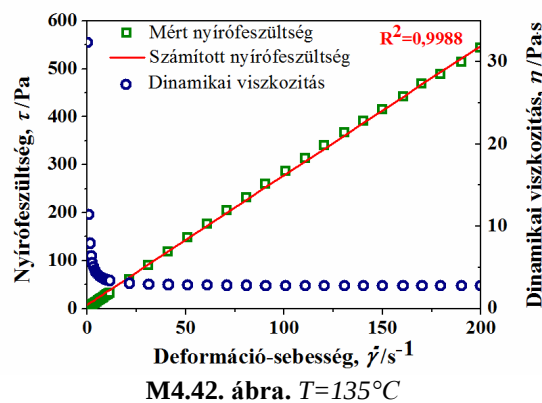
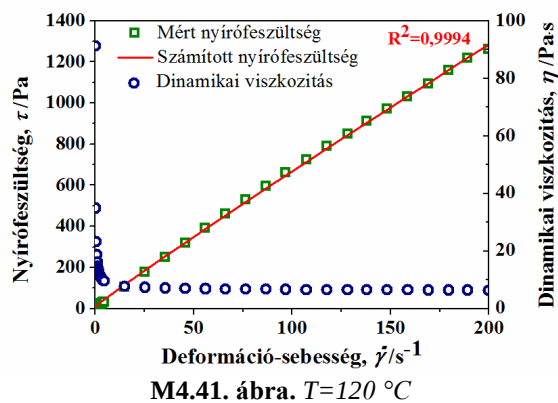
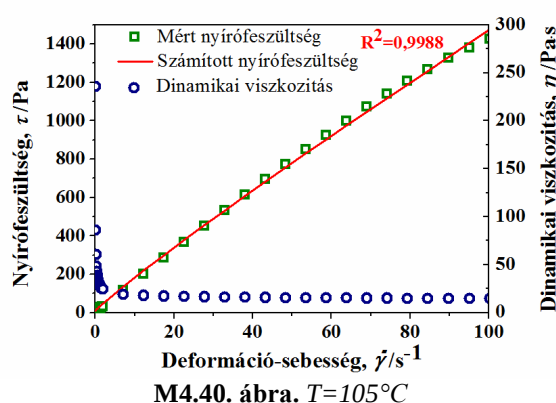
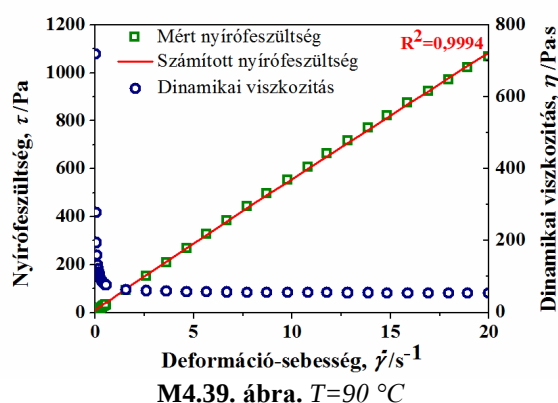
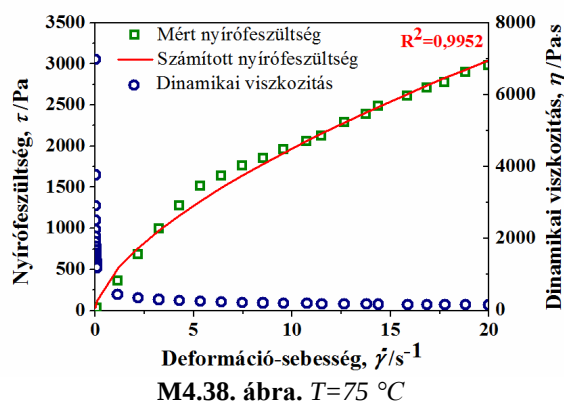
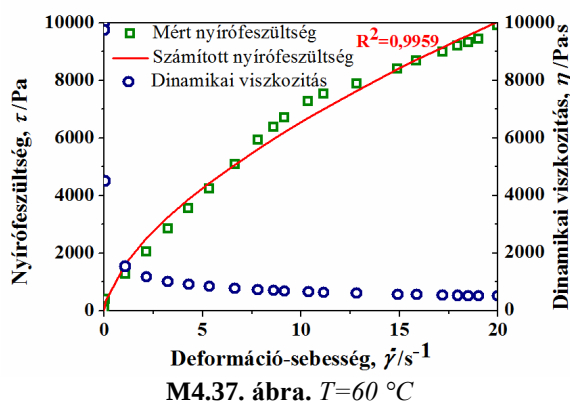
M4. 5. táblázat. Modellparaméterek meghatározása

| Hőmérséklet;<br>$T\text{ / °C}$ | Folyáshatár;<br>$\tau_0\text{ / Pa}$ | Konzisztencia;<br>$K\text{ / Pa}\cdot\text{s}^n$ | Sebesség-<br>érzékenységi<br>kitevő; $n\text{ / -}$ | Bingham<br>viszkozitás;<br>$\eta_B\text{ / Pa}\cdot\text{s}$ | Reológiai<br>anyagmodell | Determinációs<br>együttható;<br>$R^2\text{ / -}$ | Relatív<br>szórás;<br>$V\text{ / \%}$ |
|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 60                              | 13,99                                | 595,30                                           | 0,69                                                | -                                                            | Herschel-Bulkley         | 0,9990                                           | 2,49                                  |
| 75                              | 11,98                                | 310,60                                           | 0,61                                                | -                                                            |                          | 0,9759                                           | 0,56                                  |
| 90                              | 9,38                                 | -                                                | -                                                   | 33,68                                                        | Bingham                  | 0,9991                                           | 0,54                                  |
| 105                             | 9,08                                 | 9,21                                             | 0,99                                                | -                                                            | Herschel-Bulkley         | 0,9993                                           | 0,24                                  |
| 120                             | 8,85                                 | -                                                | -                                                   | 3,74                                                         | Bingham                  | 0,9994                                           | 0,96                                  |
| 135                             | 8,74                                 | -                                                | -                                                   | 1,73                                                         |                          | 0,9967                                           | 1,16                                  |

Mészkőliszt –  $d < 0,063\text{mm}$  (T/H:0,13)

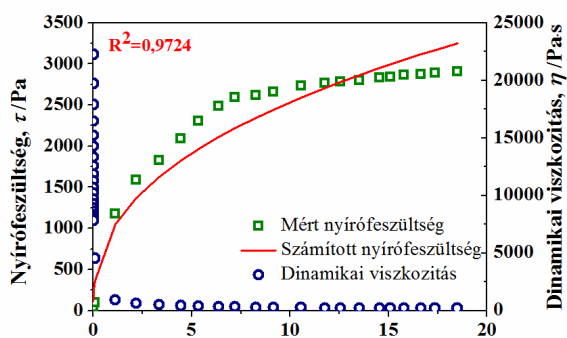
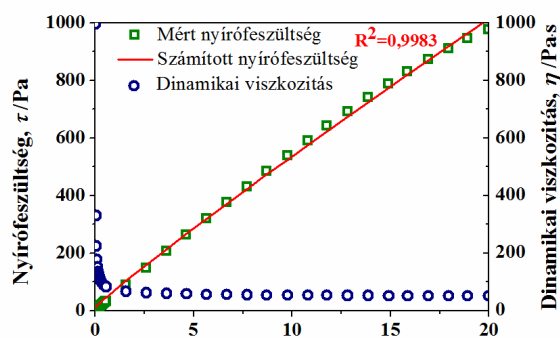
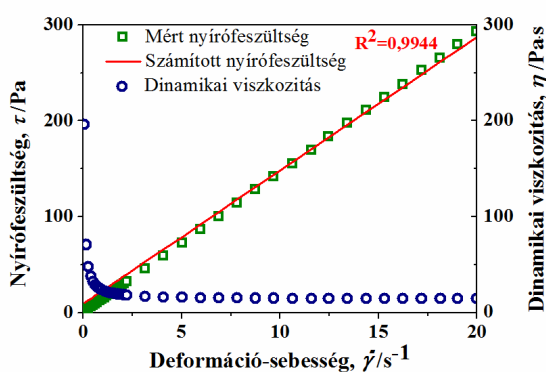
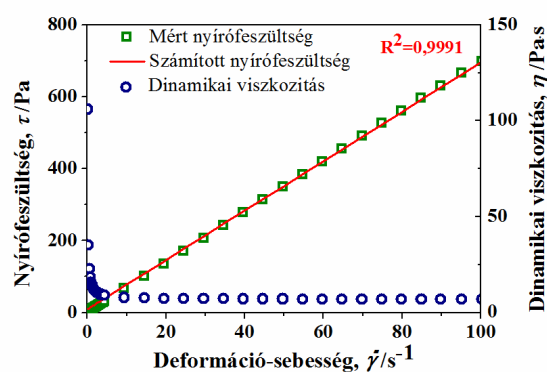
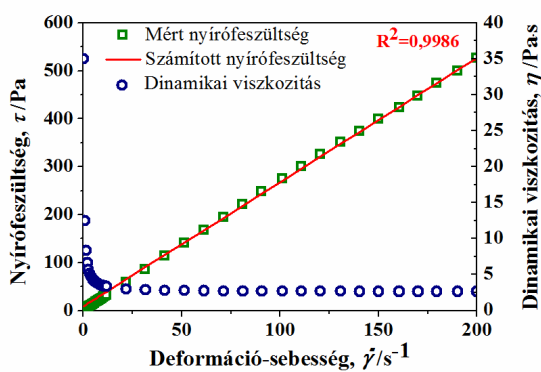
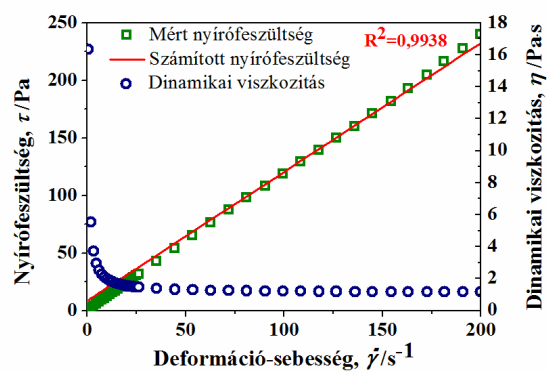
M4. 6. táblázat. Modellparaméterek meghatározása

| Hőmérséklet;<br>$T/^{\circ}\text{C}$ | Folyáshatár;<br>$\tau_0/\text{Pa}$ | Konzisztencia;<br>$K/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ | Sebesség-<br>érzékenységi<br>kitevő; $n/-$ | Bingham<br>viszkozitás;<br>$\eta_B/\text{Pa}\cdot\text{s}$ | Reológiai<br>anyagmodell | Determinációs<br>együttható;<br>$R^2/-$ | Relatív<br>szórás;<br>$V/\%$ |
|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|
| 60                                   | 14,22                              | 2177,00                                        | 0,50                                       | -                                                          | Herschel-Bulkley         | 0,9898                                  | 2,18                         |
| 75                                   | 12,16                              | 369,50                                         | 0,66                                       | -                                                          |                          | 0,9910                                  | 1,31                         |
| 90                                   | 9,64                               | 54,97                                          | 0,98                                       | -                                                          |                          | 0,9996                                  | 3,29                         |
| 105                                  | 9,22                               | 21,48                                          | 0,91                                       | -                                                          |                          | 0,9985                                  | 0,32                         |
| 120                                  | 8,97                               | 8,25                                           | 0,92                                       | -                                                          | Bingham                  | 0,9985                                  | 0,99                         |
| 135                                  | 8,84                               | -                                              | -                                          | 2,44                                                       |                          | 0,9982                                  | 2,56                         |

Mészköliszt –  $d < 0,045 \text{ mm}$  (T/H:0,20)

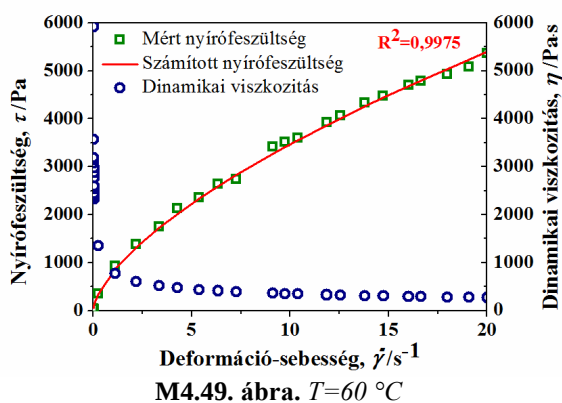
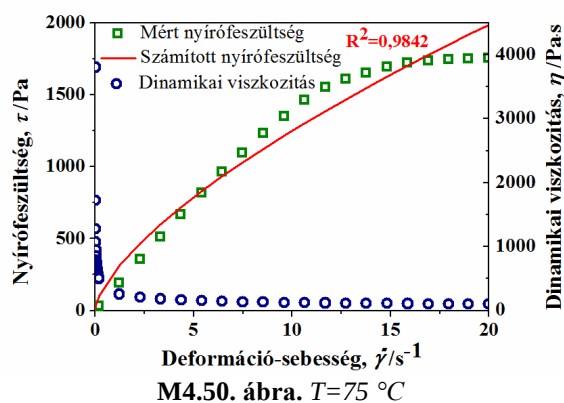
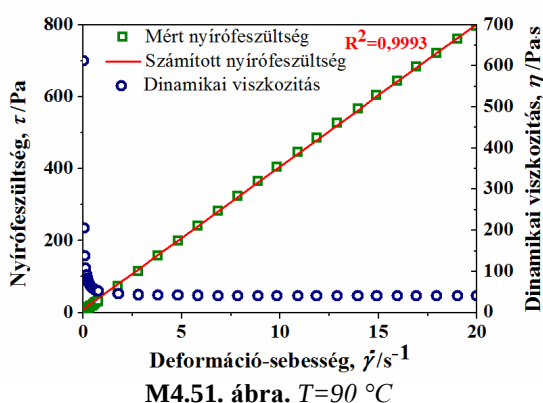
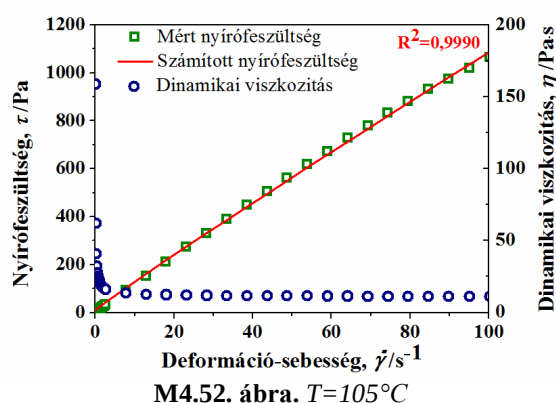
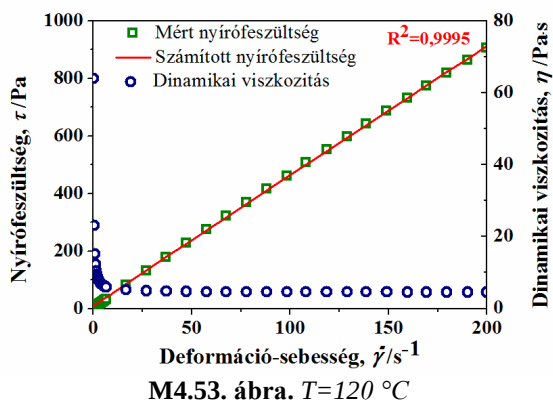
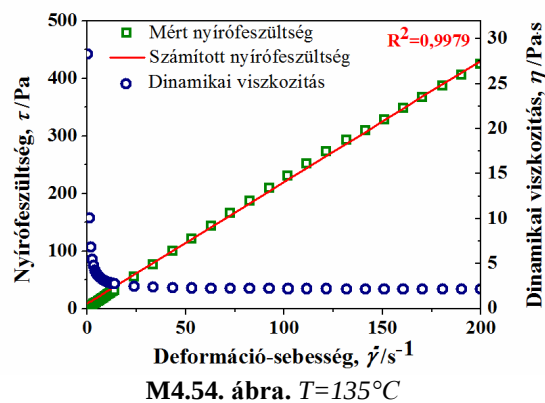
M4. 7. táblázat. Modellparaméterek meghatározása

| Hőmérséklet;<br>$T\text{ / }^{\circ}\text{C}$ | Folyáshatár;<br>$\tau_0\text{ / Pa}$ | Konzisztencia;<br>$K\text{ / Pa}\cdot\text{s}^n$ | Sebesség-<br>érzékenységi<br>kitevő; $n\text{ / -}$ | Bingham<br>viszkozitás;<br>$\eta_B\text{ / Pa}\cdot\text{s}$ | Reológiai<br>anyagmodell | Determinációs<br>együttható;<br>$R^2\text{ / -}$ | Relatív<br>szórás;<br>$V\text{ / \%}$ |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 60                                            | 14,82                                | 1561,00                                          | 0,62                                                | -                                                            | Herschel-Bulkley         | 0,9959                                           | 1,65                                  |
| 75                                            | 13,48                                | 459,50                                           | 0,63                                                | -                                                            |                          | 0,9952                                           | 3,32                                  |
| 90                                            | 11,55                                | 58,39                                            | 0,97                                                | -                                                            |                          | 0,9994                                           | 1,24                                  |
| 105                                           | 9,79                                 | 20,70                                            | 0,92                                                | -                                                            |                          | 0,9988                                           | 0,45                                  |
| 120                                           | 9,55                                 | 8,18                                             | 0,95                                                | -                                                            | Bingham                  | 0,9994                                           | 1,09                                  |
| 135                                           | 9,24                                 | -                                                | -                                                   | 2,70                                                         |                          | 0,9988                                           | 0,79                                  |

Dolomit –  $d < 0,045 \text{ mm}$  (T/H:0,05)M4.43. ábra.  $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ M4.44. ábra.  $T=75\text{ }^{\circ}\text{C}$ M4.45. ábra.  $T=90\text{ }^{\circ}\text{C}$ M4.46. ábra.  $T=105\text{ }^{\circ}\text{C}$ M4.47. ábra.  $T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$ M4.48. ábra.  $T=135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

M4. 8. táblázat. Modellparaméterek meghatározása

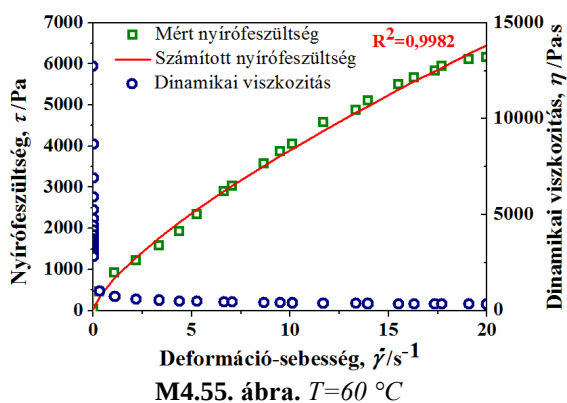
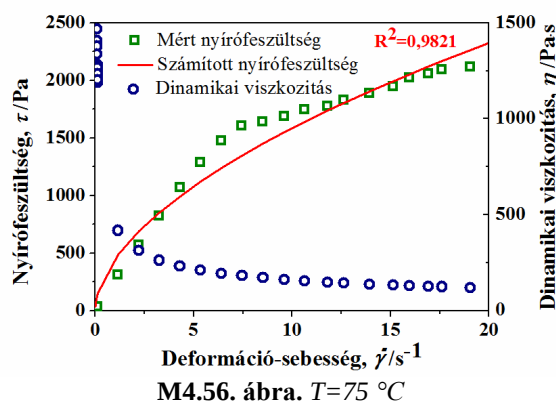
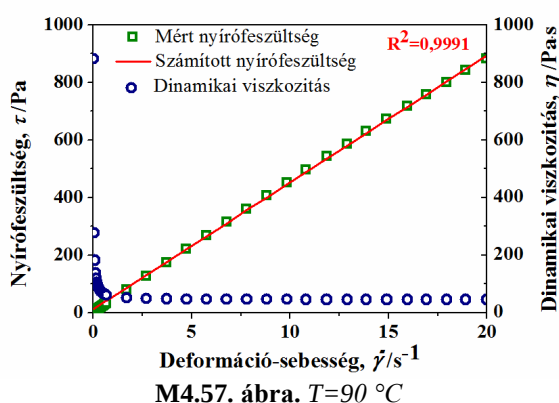
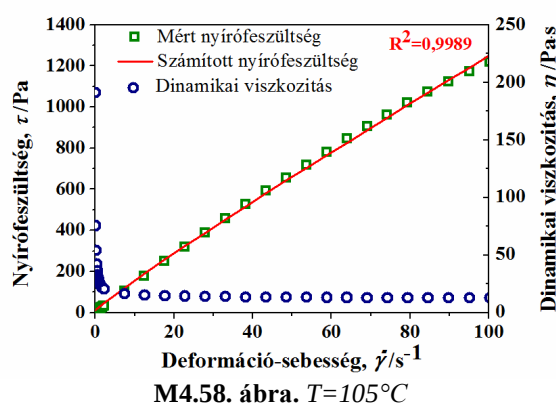
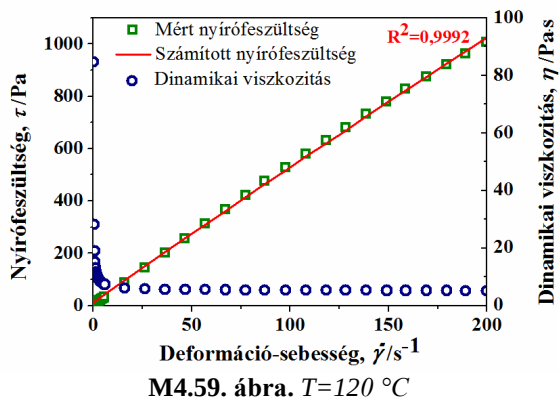
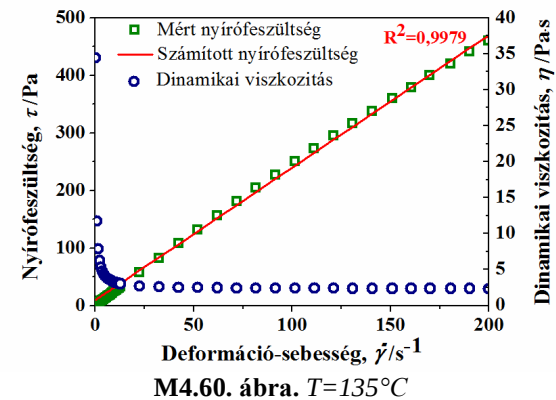
| Hőmérséklet;<br>$T/^{\circ}\text{C}$ | Folyáshatár;<br>$\tau_0/\text{Pa}$ | Konzisztencia;<br>$K/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ | Sebesség-<br>érzékenységi<br>kitevő; $n/-$ | Bingham<br>viszkozitás;<br>$\eta_B/\text{Pa}\cdot\text{s}$ | Reológiai<br>anyagmodell | Determinációs<br>együttható;<br>$R^2/-$ | Relatív<br>szórás;<br>$V/\%$ |
|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|
| 60                                   | 9,86                               | 985,30                                         | 0,41                                       | -                                                          | Herschel-Bulkley         | 0,9724                                  | 0,43                         |
| 75                                   | 9,51                               | 61,29                                          | 0,93                                       | -                                                          |                          | 0,9983                                  | 1,60                         |
| 90                                   | 9,14                               | -                                              | -                                          | 13,90                                                      | Bingham                  | 0,9944                                  | 0,32                         |
| 105                                  | 8,80                               | -                                              | -                                          | 6,87                                                       |                          | 0,9991                                  | 2,61                         |
| 120                                  | 8,71                               | -                                              | -                                          | 2,59                                                       |                          | 0,9986                                  | 0,28                         |
| 135                                  | 8,66                               | -                                              | -                                          | 1,12                                                       |                          | 0,9938                                  | 0,94                         |

Dolomit –  $d < 0,045 \text{ mm}$  (T/H:0,13)M4.49. ábra.  $T = 60^\circ\text{C}$ M4.50. ábra.  $T = 75^\circ\text{C}$ M4.51. ábra.  $T = 90^\circ\text{C}$ M4.52. ábra.  $T = 105^\circ\text{C}$ M4.53. ábra.  $T = 120^\circ\text{C}$ M4.54. ábra.  $T = 135^\circ\text{C}$ 

M4. 9. táblázat. Modellparaméterek meghatározása

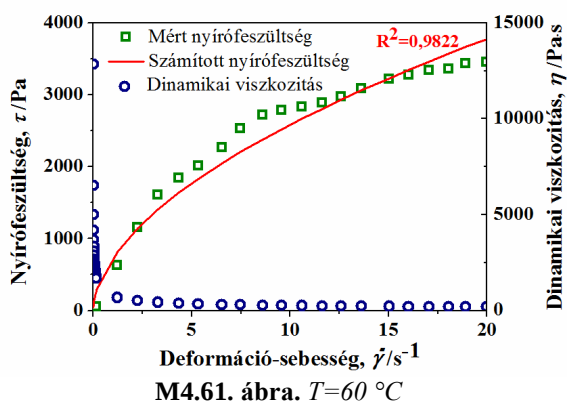
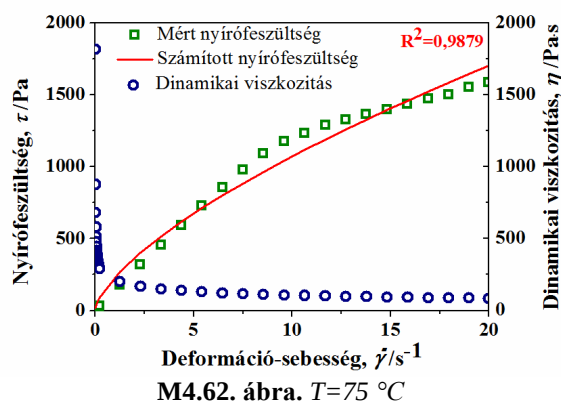
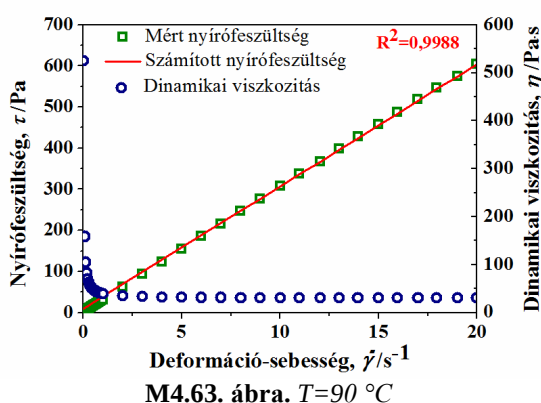
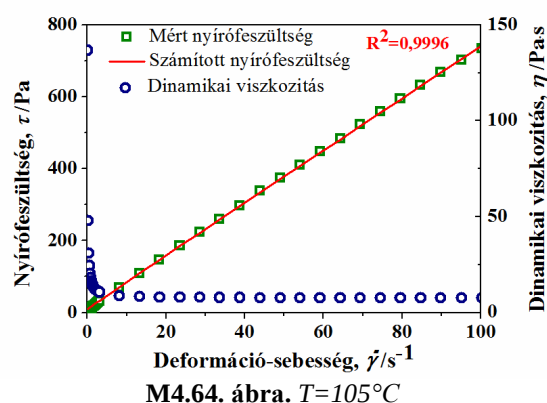
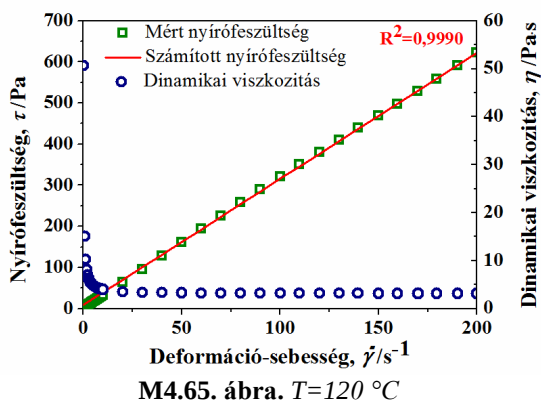
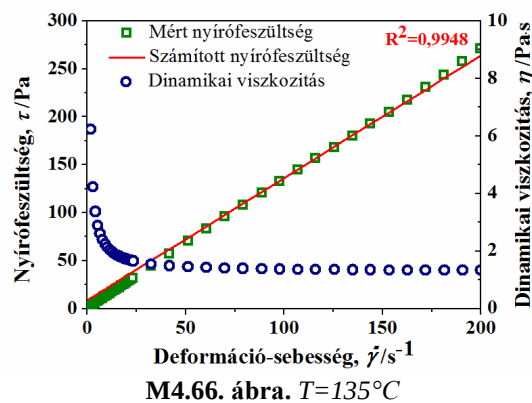
| Hőmérséklet;<br>$T/^\circ\text{C}$ | Folyáshatár;<br>$\tau_0/\text{Pa}$ | Konzisztencia;<br>$K/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ | Sebesség-<br>érzékenységi<br>kitevő; $n/-$ | Bingham<br>viszkozitás;<br>$\eta_B/\text{Pa}\cdot\text{s}$ | Reológiai<br>anyagmodell | Determinációs<br>együttható;<br>$R^2/-$ | Relatív<br>szórás;<br>$V/\%$ |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|
| 60                                 | 10,44                              | 792,40                                         | 0,64                                       | -                                                          | Herschel-Bulkley         | 0,9975                                  | 3,94                         |
| 75                                 | 9,73                               | 263,20                                         | 0,67                                       | -                                                          |                          | 0,9842                                  | 0,33                         |
| 90                                 | 9,25                               | -                                              | -                                          | 39,6                                                       | Bingham                  | 0,9993                                  | 0,16                         |
| 105                                | 8,87                               | 13,16                                          | 0,96                                       | -                                                          | Herschel-Bulkley         | 0,9990                                  | 0,52                         |
| 120                                | 8,84                               | 4,73                                           | 0,99                                       | -                                                          |                          | 0,9995                                  | 0,37                         |
| 135                                | 8,69                               | -                                              | -                                          | 2,11                                                       | Bingham                  | 0,9979                                  | 1,25                         |



Dolomit –  $d < 0,045 \text{ mm}$  (T/H:0,20)M4.55. ábra.  $T = 60^\circ \text{C}$ M4.56. ábra.  $T = 75^\circ \text{C}$ M4.57. ábra.  $T = 90^\circ \text{C}$ M4.58. ábra.  $T = 105^\circ \text{C}$ M4.59. ábra.  $T = 120^\circ \text{C}$ M4.60. ábra.  $T = 135^\circ \text{C}$ 

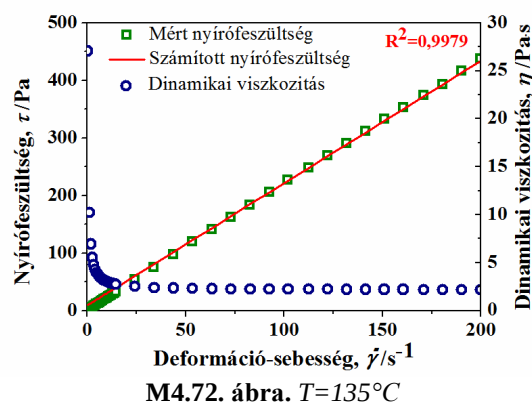
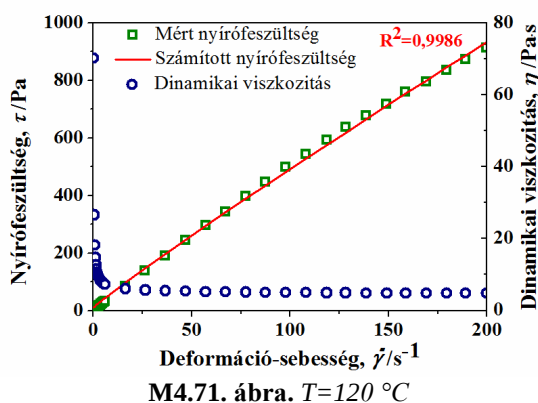
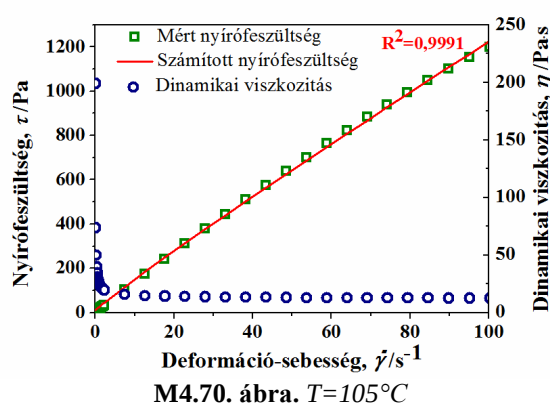
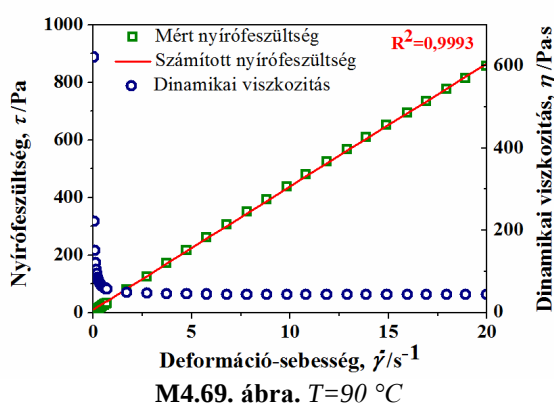
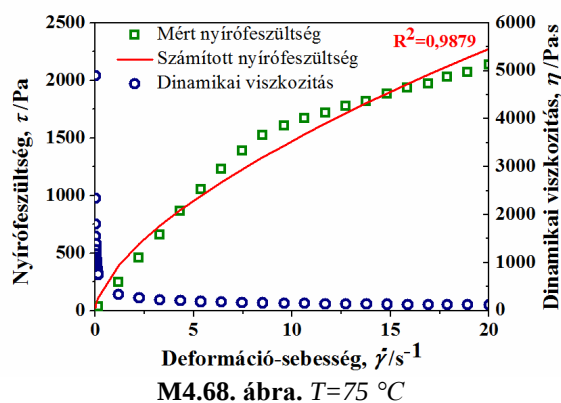
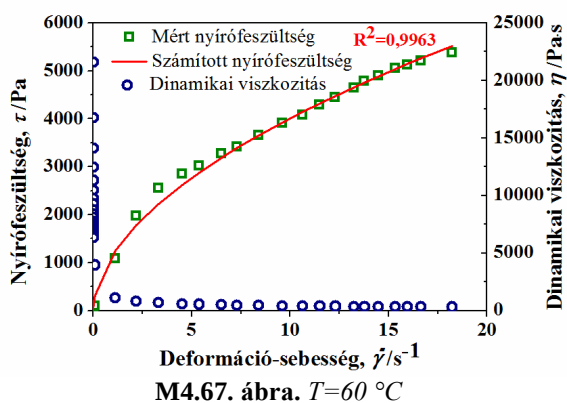
M4. 10. táblázat. Modellparaméterek meghatározása

| Hőmérséklet;<br>$T / ^\circ \text{C}$ | Folyáshatár;<br>$\tau_0 / \text{Pa}$ | Konzisztencia;<br>$K / \text{Pa} \cdot \text{s}^n$ | Sebesség-<br>érzékenységi<br>kitevő; $n / -$ | Bingham<br>viszkozitás;<br>$\eta_B / \text{Pa} \cdot \text{s}$ | Reológiai<br>anyagmodell | Determinációs<br>együttható;<br>$R^2 / -$ | Relatív<br>szórás;<br>$V / \%$ |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|
| 60                                    | 11,76                                | 726,10                                             | 0,73                                         | -                                                              | Herschel-Bulkley         | 0,9982                                    | 2,46                           |
| 75                                    | 10,09                                | 433,40                                             | 0,56                                         | -                                                              |                          | 0,9821                                    | 2,28                           |
| 90                                    | 9,26                                 | -                                                  | -                                            | 44,07                                                          | Bingham                  | 0,9991                                    | 0,69                           |
| 105                                   | 9,12                                 | 17,08                                              | 0,93                                         | -                                                              | Herschel-Bulkley         | 0,9989                                    | 1,79                           |
| 120                                   | 8,85                                 | 5,98                                               | 0,97                                         | -                                                              |                          | 0,9992                                    | 0,91                           |
| 135                                   | 8,73                                 | -                                                  | -                                            | 2,30                                                           | Bingham                  | 0,9979                                    | 3,17                           |

Dolomit –  $d < 0,063\text{mm}$  (T/H:0,05)M4.61. ábra.  $T = 60^\circ\text{C}$ M4.62. ábra.  $T = 75^\circ\text{C}$ M4.63. ábra.  $T = 90^\circ\text{C}$ M4.64. ábra.  $T = 105^\circ\text{C}$ M4.65. ábra.  $T = 120^\circ\text{C}$ M4.66. ábra.  $T = 135^\circ\text{C}$ 

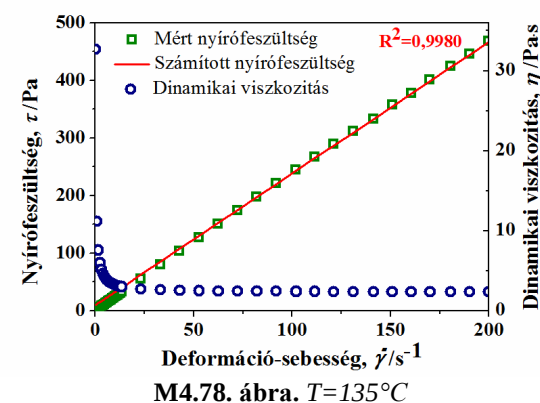
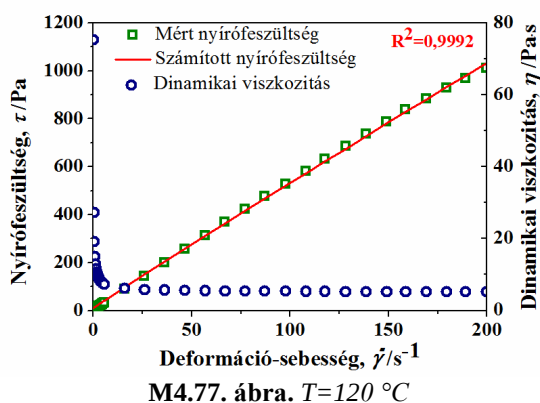
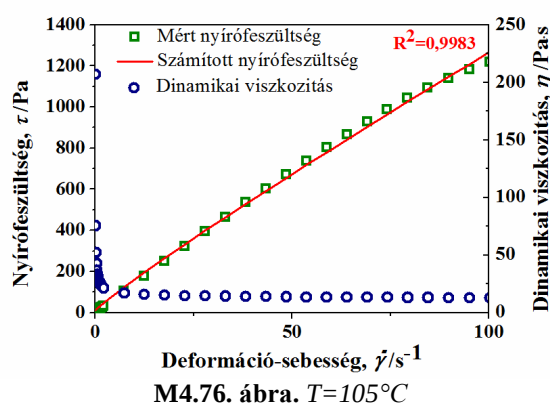
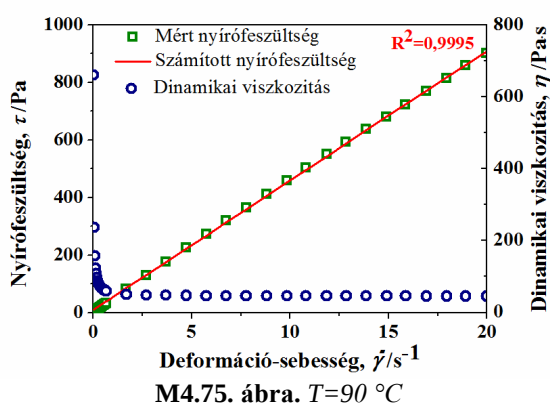
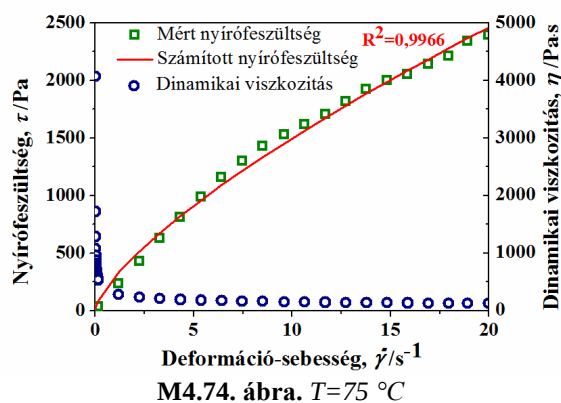
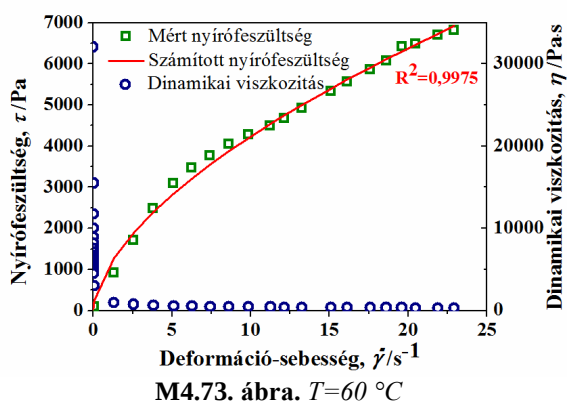
M4. 11. táblázat. Modellparaméterek meghatározása

| Hőmérséklet;<br>$T/^\circ\text{C}$ | Folyáshatár;<br>$\tau_0/\text{Pa}$ | Konzisztencia;<br>$K/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ | Sebesség-<br>érzékenységi<br>kitevő; $n/-$ | Bingham<br>viszkozitás;<br>$\eta_B/\text{Pa}\cdot\text{s}$ | Reológiai<br>anyagmodell | Determinációs<br>együttható;<br>$R^2/-$ | Relatív<br>szórás;<br>$V/\%$ |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|
| 60                                 | 10,35                              | 724,90                                         | 0,55                                       | -                                                          | Herschel-Bulkley         | 0,9822                                  | 1,74                         |
| 75                                 | 9,53                               | 225,10                                         | 0,67                                       | -                                                          |                          | 0,9879                                  | 1,60                         |
| 90                                 | 9,25                               | -                                              | -                                          | 29,73                                                      | Bingham                  | 0,9988                                  | 0,77                         |
| 105                                | 9,02                               | 7,81                                           | 0,99                                       | -                                                          | Herschel-Bulkley         | 0,9996                                  | 1,36                         |
| 120                                | 8,85                               | -                                              | -                                          | 3,07                                                       | Bingham                  | 0,9990                                  | 0,57                         |
| 135                                | 8,68                               | -                                              | -                                          | 1,28                                                       |                          | 0,9948                                  | 0,75                         |

Dolomit –  $d < 0,063\text{mm}$  (T/H:0,13)

M4. 12. táblázat. Modellparaméterek meghatározása

| Hőmérséklet;<br>$T\text{ /}^{\circ}\text{C}$ | Folyáshatár;<br>$\tau_0\text{ /Pa}$ | Konzisztencia;<br>$K\text{ /Pa}\cdot\text{s}^n$ | Sebesség-<br>érzékenységi<br>kitevő; $n\text{ /-}$ | Bingham<br>viszkozitás;<br>$\eta_B\text{ /Pa}\cdot\text{s}$ | Reológiai<br>anyagmodell | Determinációs<br>együttható;<br>$R^2\text{ /-}$ | Relatív<br>szórás;<br>$V\text{ /}\%$ |
|----------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 60                                           | 12,65                               | 1168,00                                         | 0,53                                               | -                                                           | Herschel-Bulkley         | 0,9963                                          | 0,27                                 |
| 75                                           | 9,80                                | 343,20                                          | 0,63                                               | -                                                           |                          | 0,9879                                          | 3,01                                 |
| 90                                           | 9,64                                | 43,12                                           | 0,997                                              | -                                                           |                          | 0,9993                                          | 0,42                                 |
| 105                                          | 9,16                                | 16,16                                           | 0,94                                               | -                                                           |                          | 0,9991                                          | 0,29                                 |
| 120                                          | 8,86                                | 6,46                                            | 0,94                                               | -                                                           | Bingham                  | 0,9986                                          | 0,60                                 |
| 135                                          | 8,76                                | -                                               | -                                                  | 2,13                                                        |                          | 0,9979                                          | 0,68                                 |

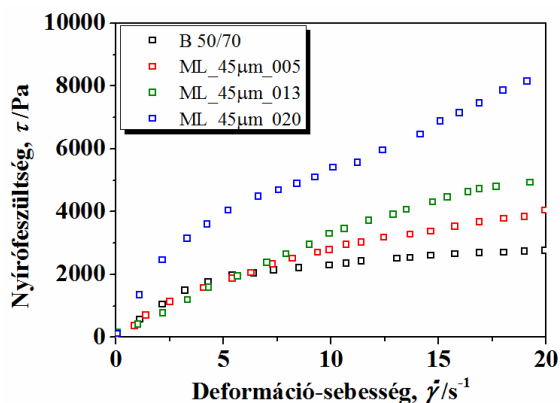
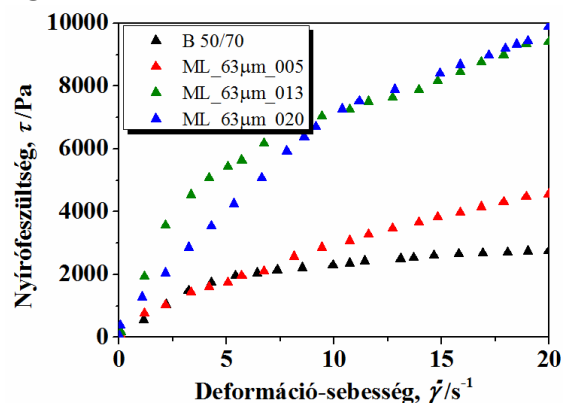
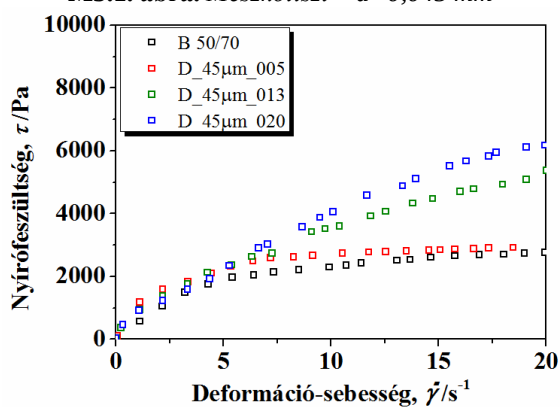
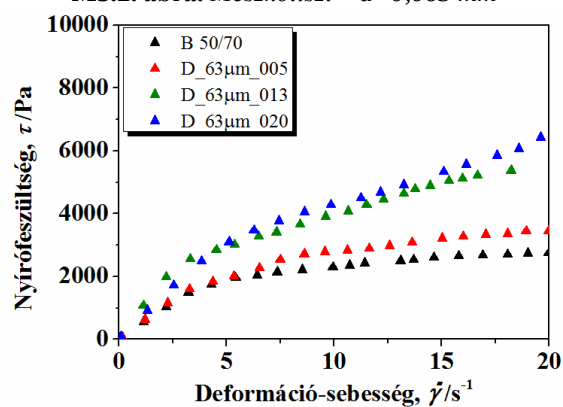
Dolomit –  $d < 0,063\text{mm}$  (T/H:0,20)

M4. 13. táblázat. Modellparaméterek meghatározása

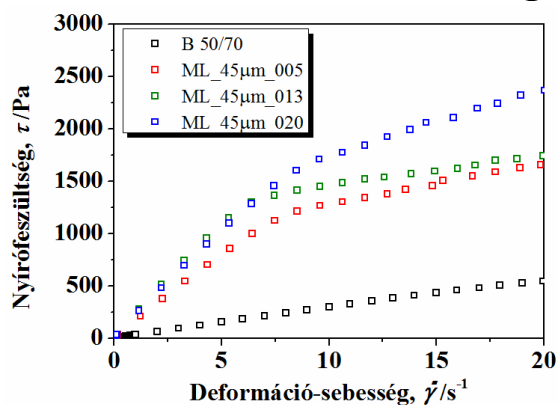
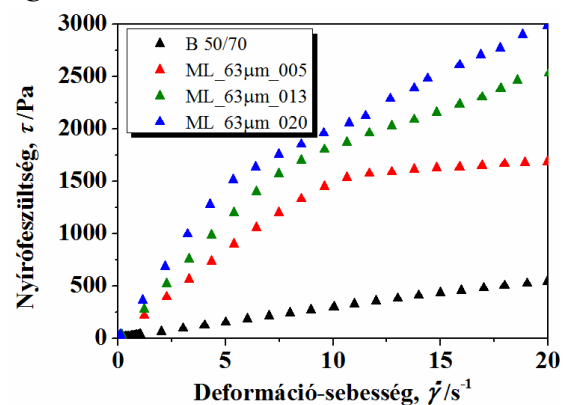
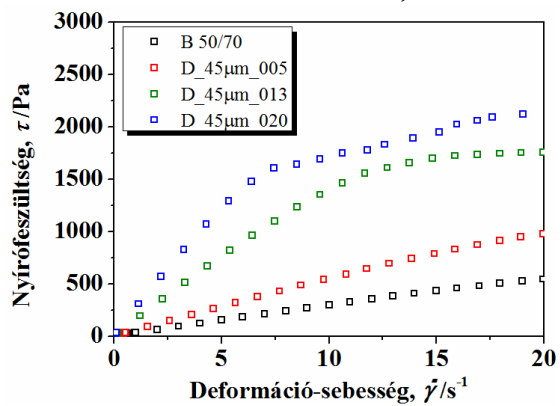
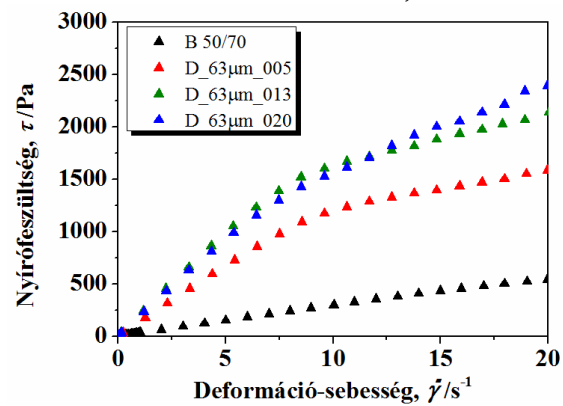
| Hőmérséklet;<br>$T/^\circ\text{C}$ | Folyáshatár;<br>$\tau_0/\text{Pa}$ | Konzisztencia;<br>$K/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ | Sebesség-<br>érzékenységi<br>kitevő; $n/-$ | Bingham<br>viszkozitás;<br>$\eta_B/\text{Pa}\cdot\text{s}$ | Reológiai<br>anyagmodell | Determinációs<br>együttható;<br>$R^2/-$ | Relatív<br>szórás;<br>$V/\%$ |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|
| 60                                 | 13,41                              | 1070,00                                        | 0,60                                       | -                                                          | Herschel-Bulkley         | 0,9975                                  | 1,56                         |
| 75                                 | 11,84                              | 281,70                                         | 0,72                                       | -                                                          |                          | 0,9966                                  | 0,88                         |
| 90                                 | 9,73                               | -                                              | -                                          | 44,97                                                      | Bingham                  | 0,9995                                  | 0,25                         |
| 105                                | 9,28                               | 18,31                                          | 0,92                                       | -                                                          | Herschel-Bulkley         | 0,9983                                  | 0,97                         |
| 120                                | 9,10                               | 6,00                                           | 0,97                                       | -                                                          |                          | 0,9992                                  | 0,90                         |
| 135                                | 8,81                               | -                                              | -                                          | 2,29                                                       | Bingham                  | 0,9980                                  | 0,42                         |

## 5. Melléklet: Aszfalthabarcok összesített valódi folyásgörbéi

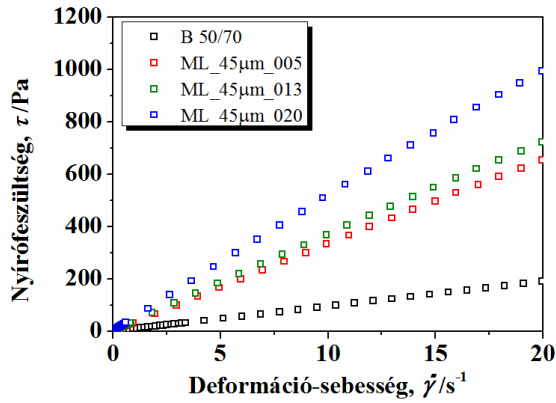
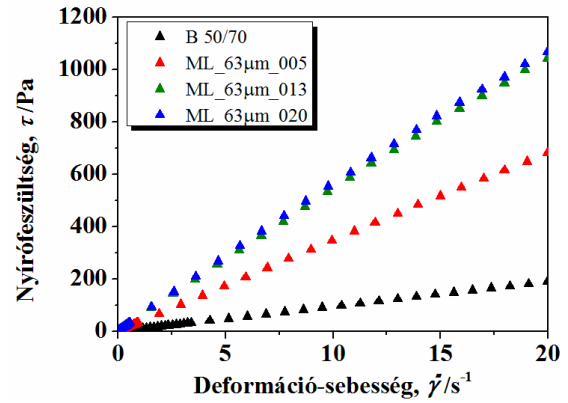
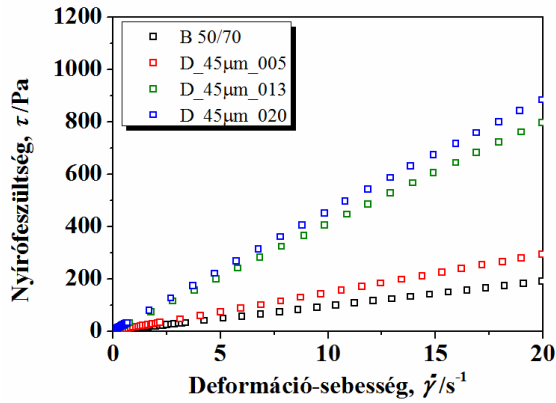
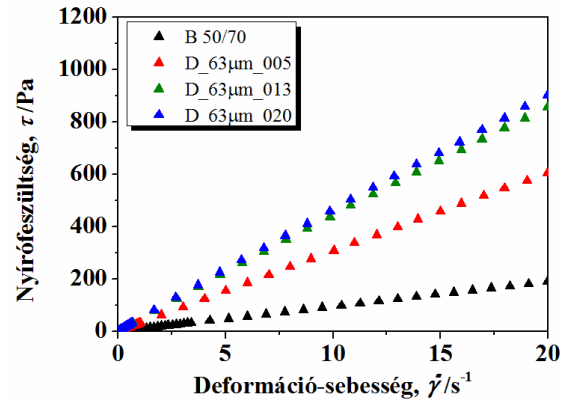
T=60 °C

M5.1. ábra. Mész-kőliszt –  $d < 0,045$  mmM5.2. ábra. Mész-kőliszt –  $d < 0,063$  mmM5.3. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mmM5.4. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm

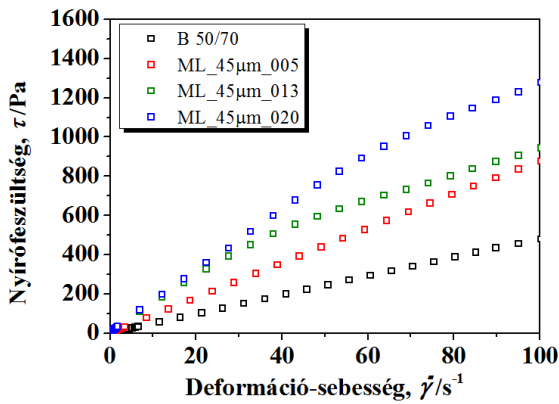
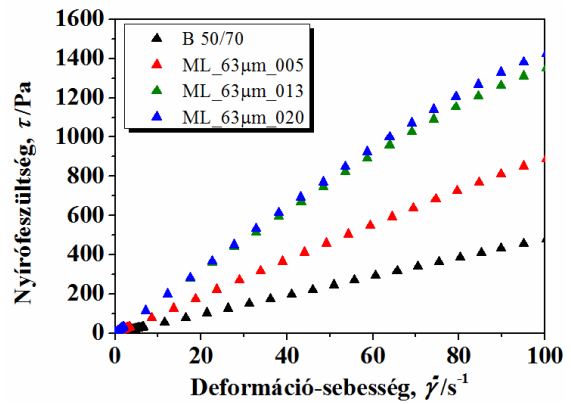
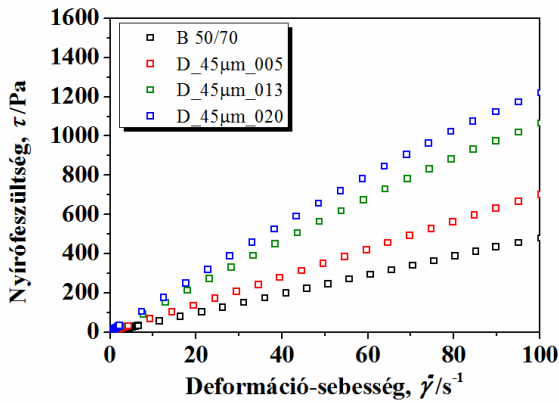
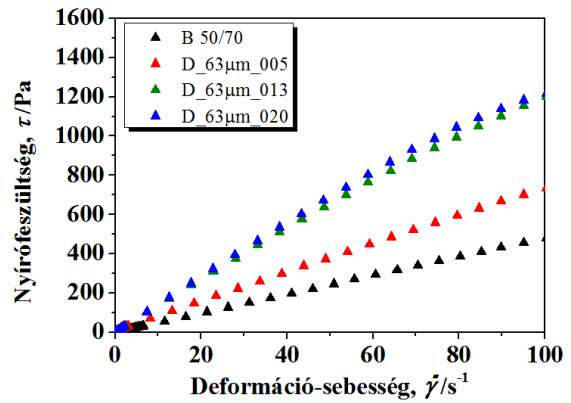
T=75 °C

M5.5. ábra. Mész-kőliszt –  $d < 0,045$  mmM5.6. ábra. Mész-kőliszt –  $d < 0,063$  mmM5.7. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mmM5.8. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm

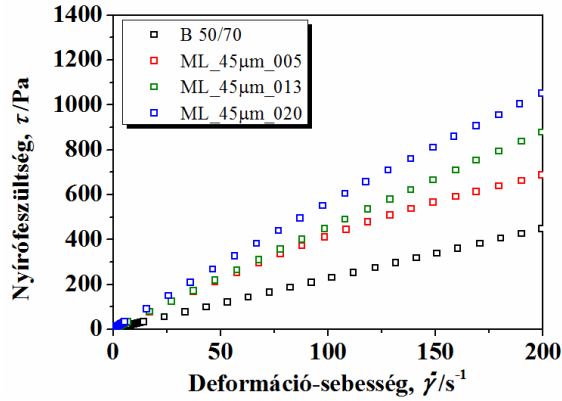
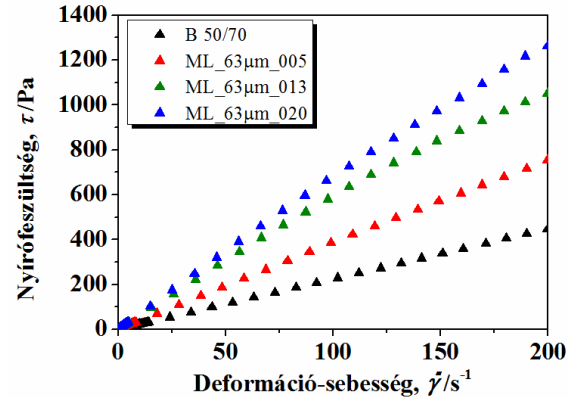
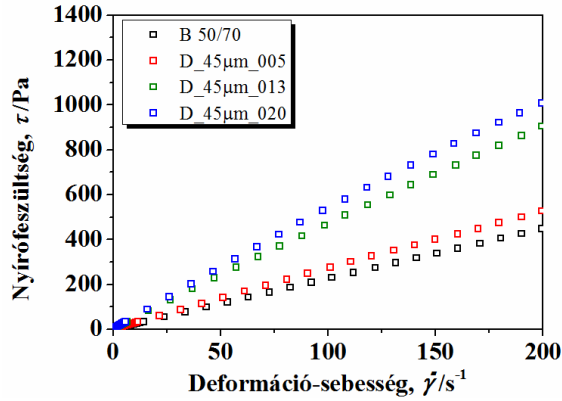
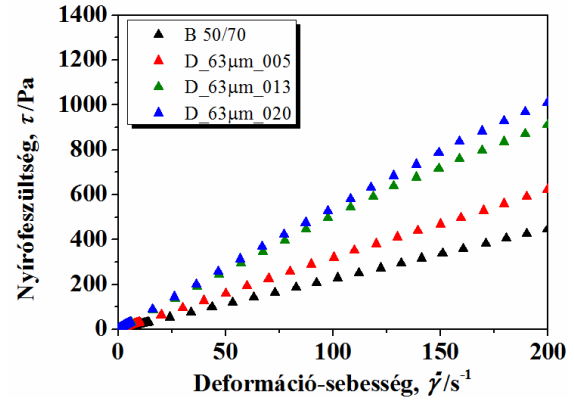
T=90 °C

M5.9. ábra. Mészköliszt –  $d < 0,045$  mmM5.10. ábra. Mészköliszt –  $d < 0,063$  mmM5.11. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mmM5.12. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm

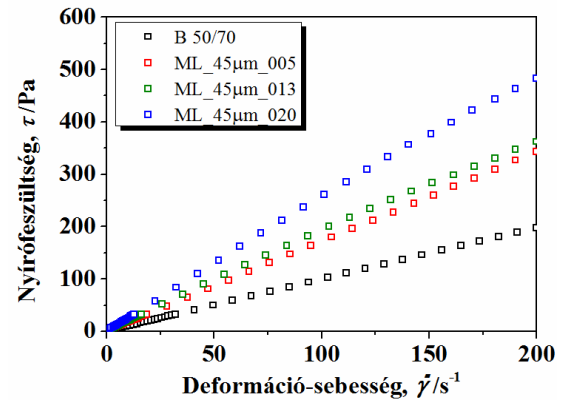
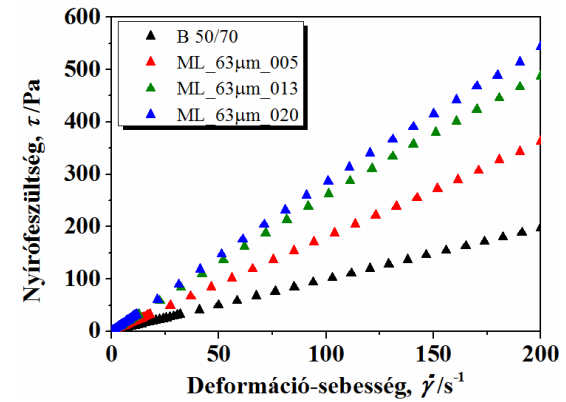
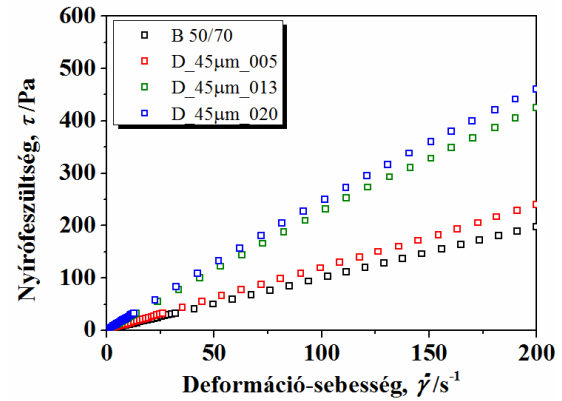
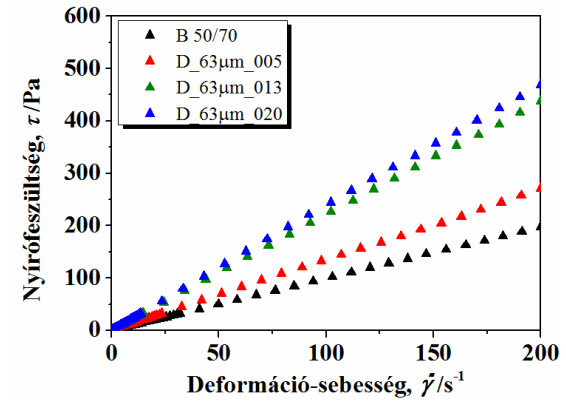
T=105 °C

M5.13. ábra. Mészköliszt –  $d < 0,045$  mmM5.14. ábra. Mészköliszt –  $d < 0,063$  mmM5.15. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mmM5.16. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm

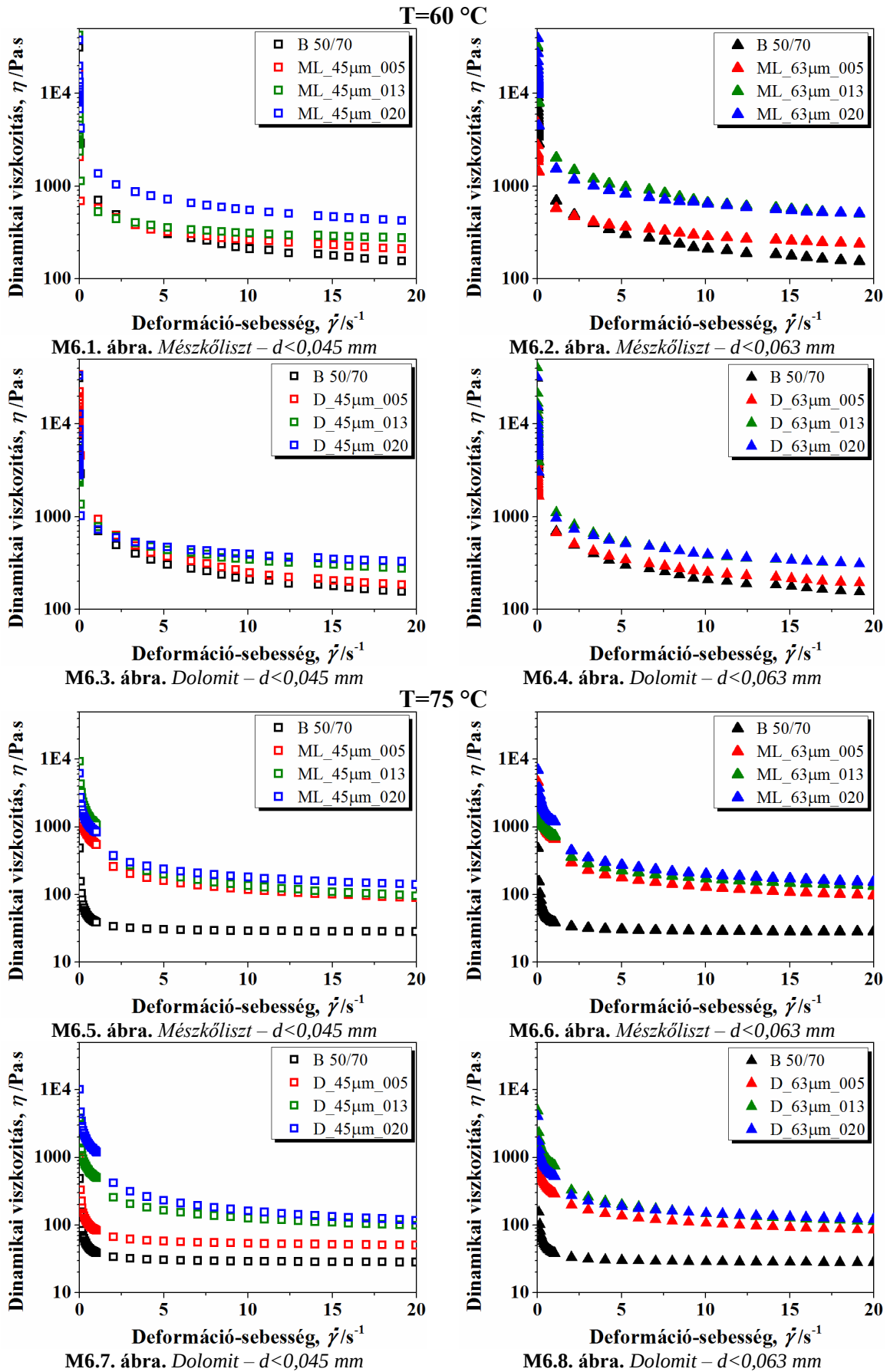
T=120 °C

M5.17. ábra. Mészköliszt –  $d < 0,045$  mmM5.18. ábra. Mészköliszt –  $d < 0,063$  mmM5.19. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mmM5.20. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm

T=135 °C

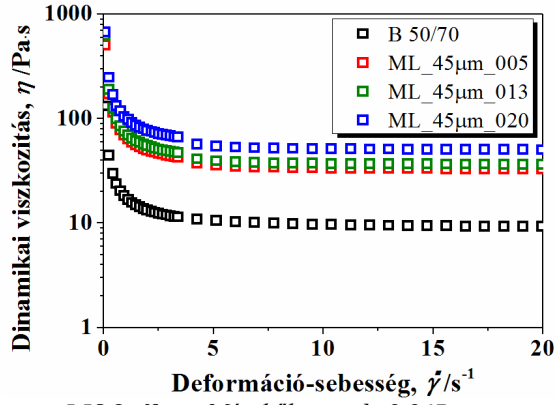
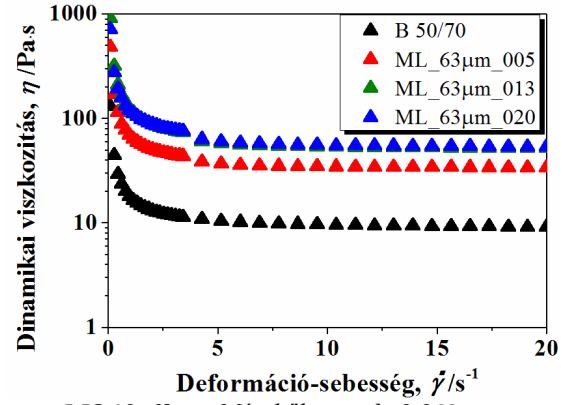
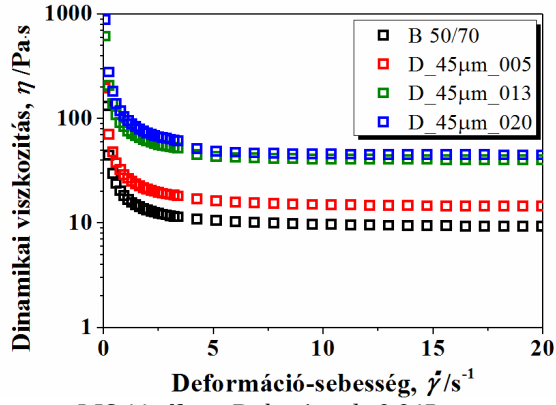
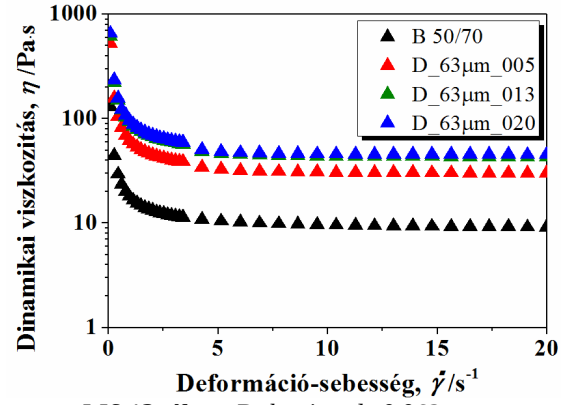
M5.21. ábra. Mészköliszt –  $d < 0,045$  mmM5.22. ábra. Mészköliszt –  $d < 0,063$  mmM5.23. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mmM5.24. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm

## 6. Melléklet: Aszfalthabarcok összesített viszkozitásgörbéi

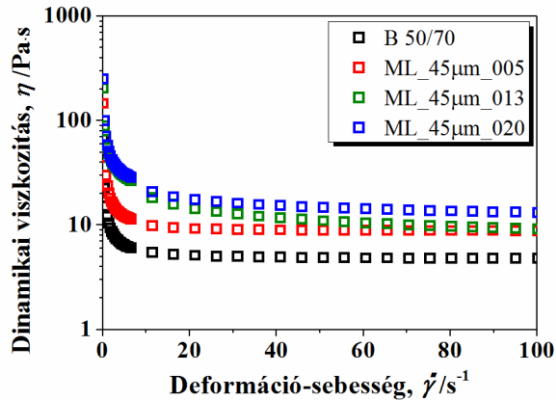
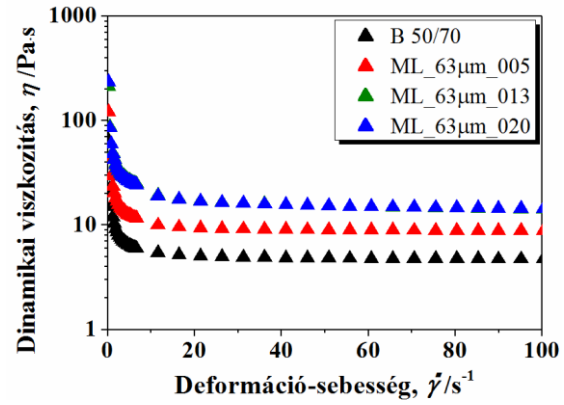
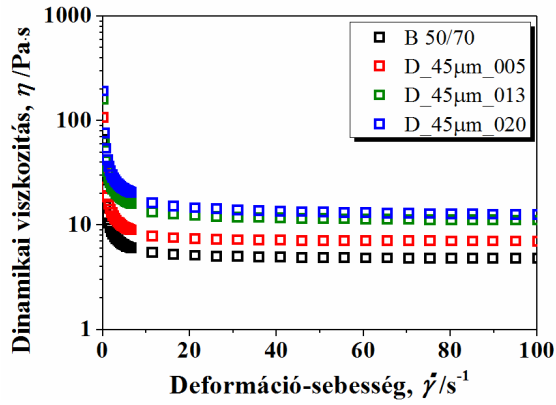
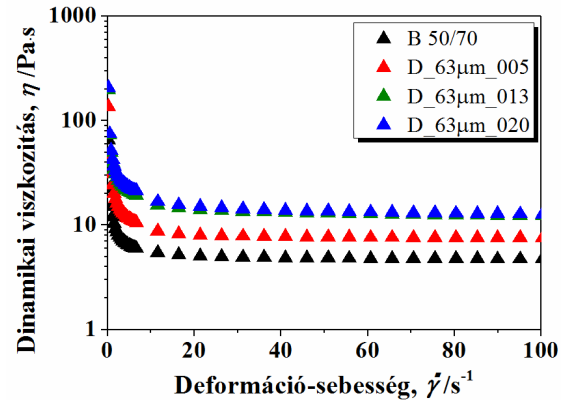




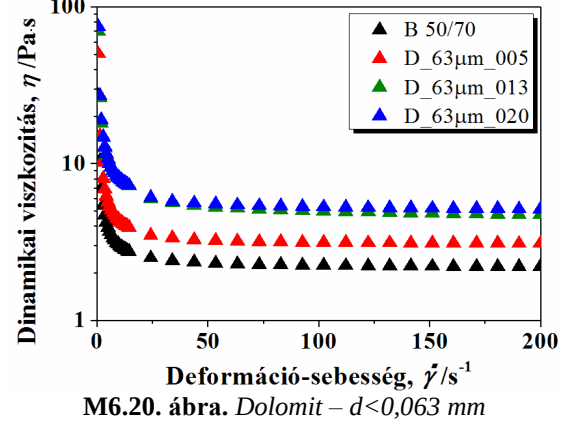
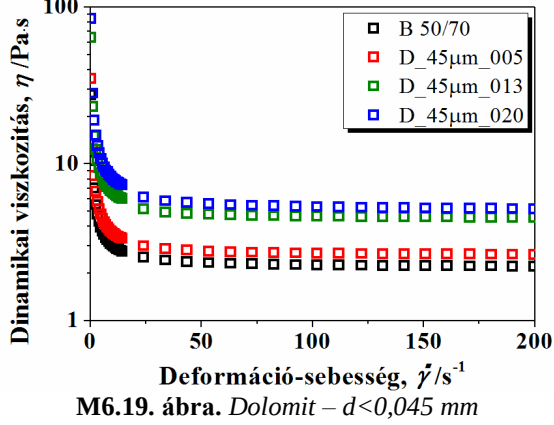
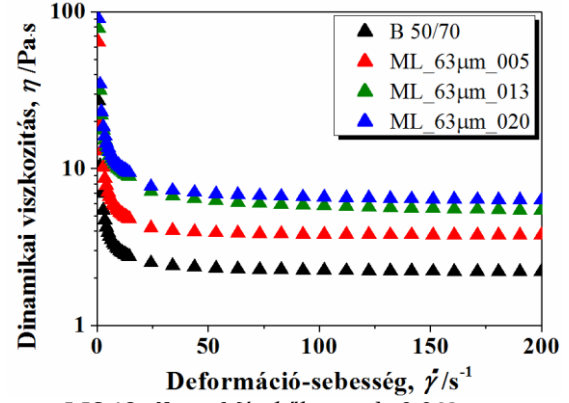
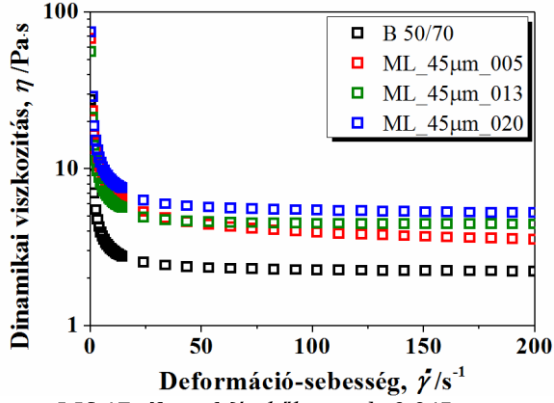
T=90 °C

M6.9. ábra. Mész-kőliszt –  $d < 0,045$  mmM6.10. ábra. Mész-kőliszt –  $d < 0,063$  mmM6.11. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mmM6.12. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm

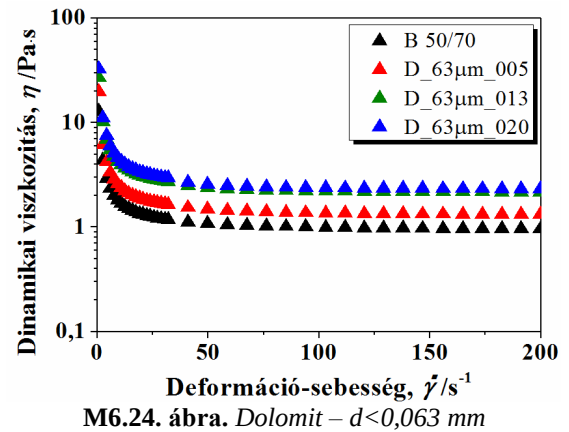
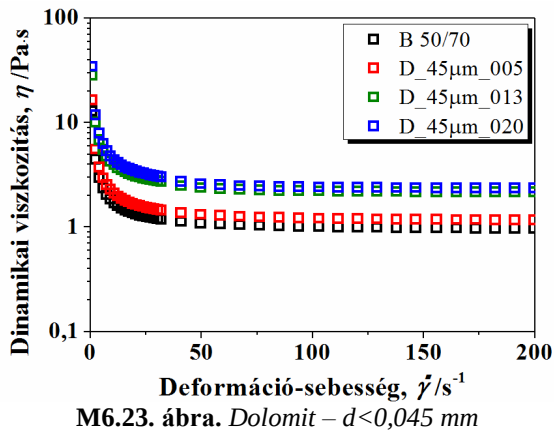
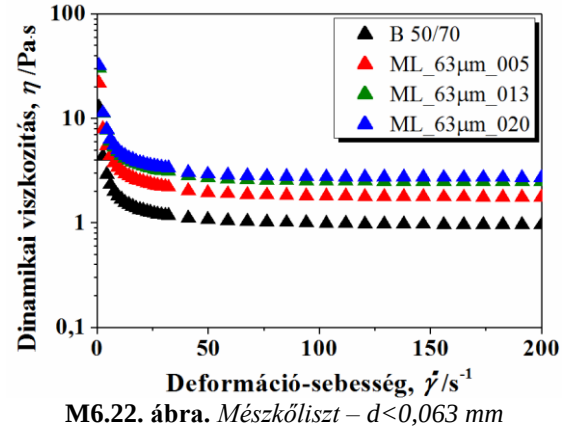
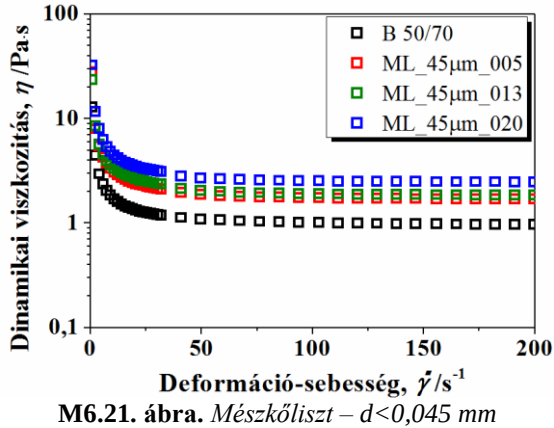
T=105 °C

M6.13. ábra. Mész-kőliszt –  $d < 0,045$  mmM6.14. ábra. Mész-kőliszt –  $d < 0,063$  mmM6.15. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mmM6.16. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm

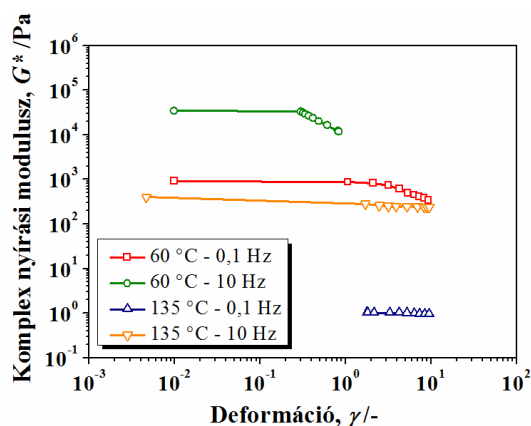
T=120 °C



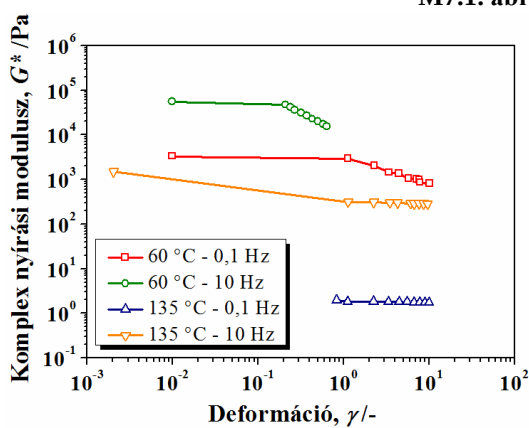
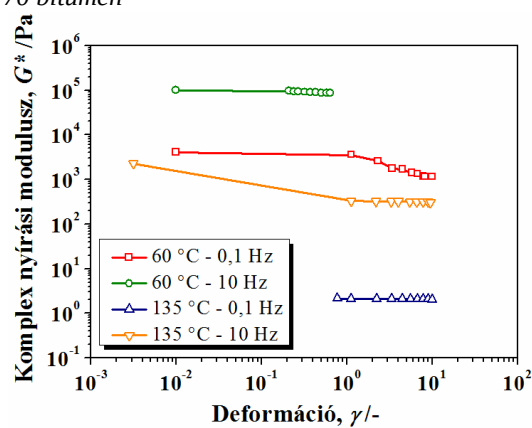
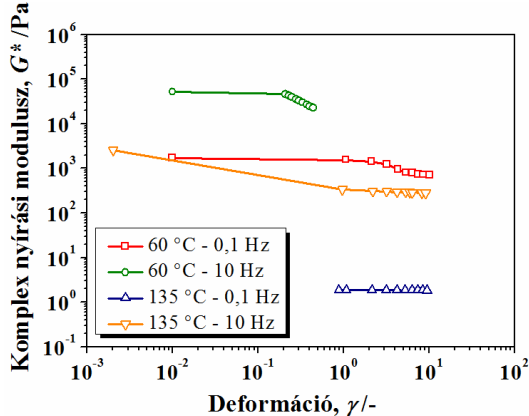
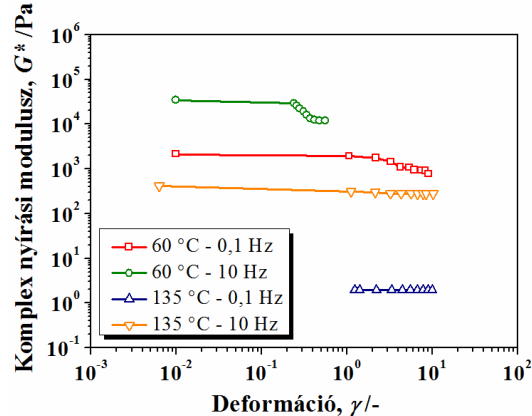
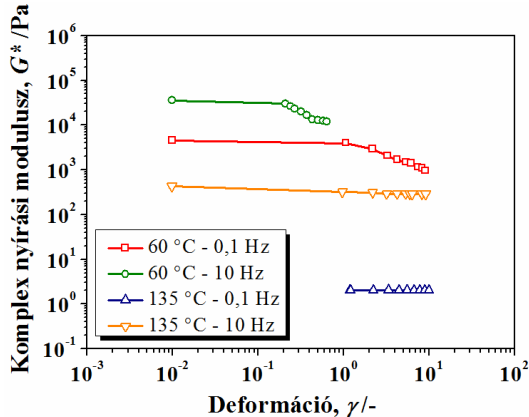
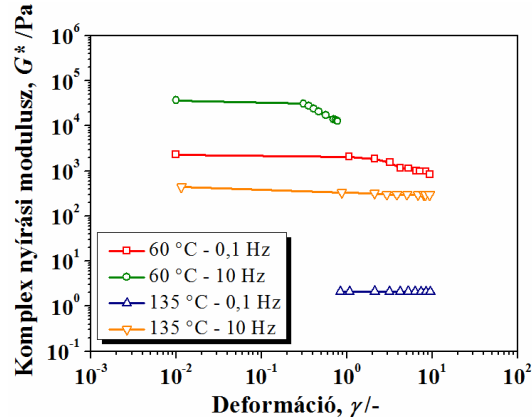
T=135 °C

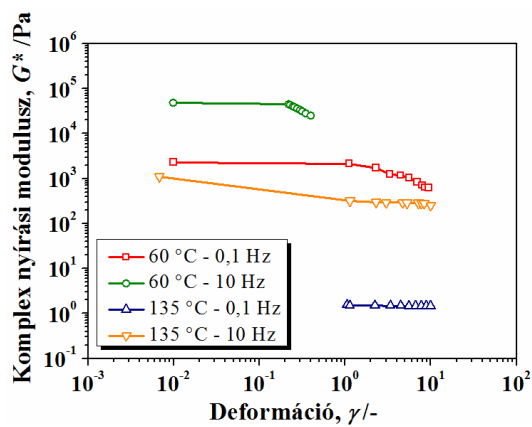
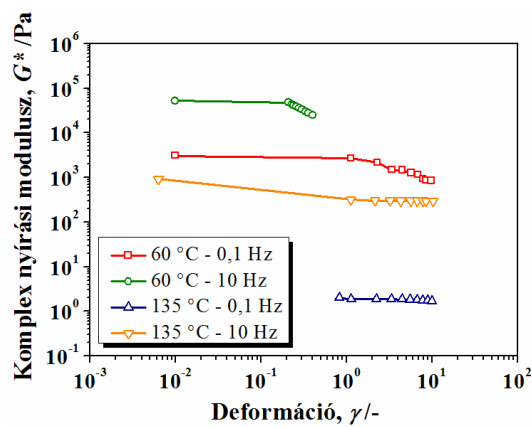
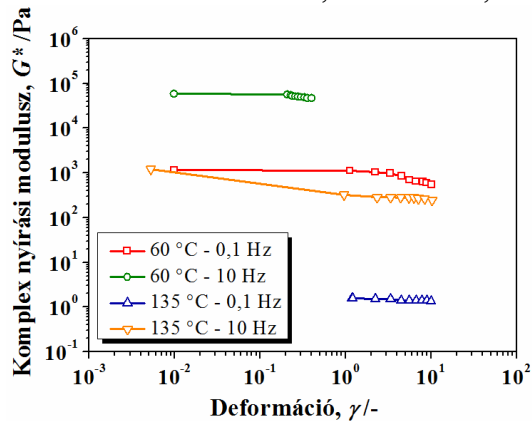
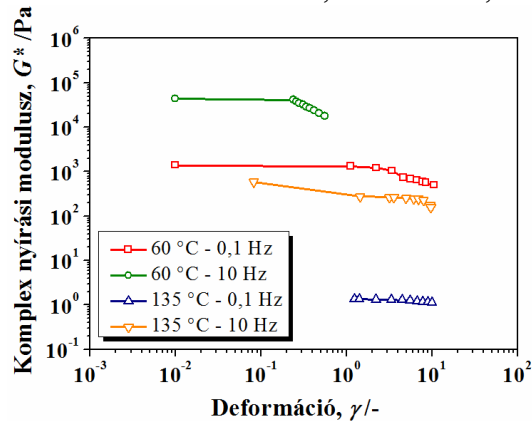
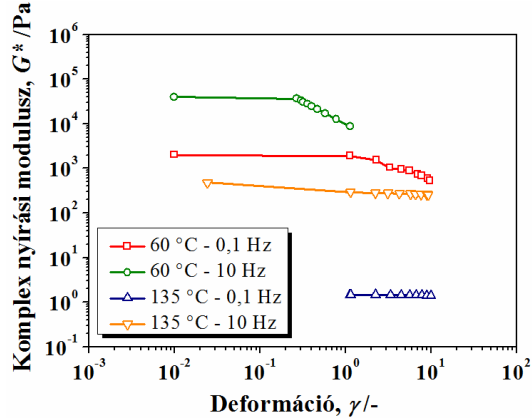
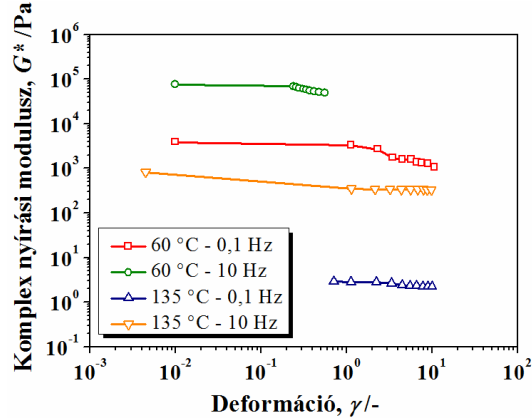


## 7. Melléklet: Aszfalthabarcok LVE tartományának meghatározása



M7.1. ábra. B 50/70 bitumen

M7.2. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,045$  mm T/H:0,05M7.3. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,045$  mm T/H:0,13M7.4. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,045$  mm T/H:0,20M7.5. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,063$  mm T/H:0,05M7.6. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,063$  mm T/H:0,13M7.7. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,063$  mm T/H:0,20

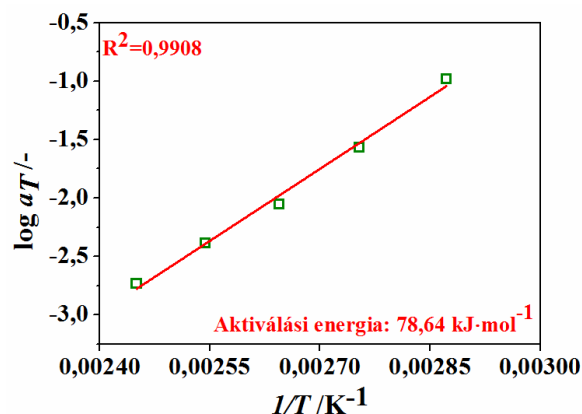
M7.8. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mm  $T/H: 0,05$ M7.9. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mm  $T/H: 0,13$ M7.10. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mm  $T/H: 0,20$ M7.11. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm  $T/H: 0,05$ M7.12. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm  $T/H: 0,13$ M7.13. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm  $T/H: 0,20$

## 8. Melléklet: Aszfalthabarcok nullviszkózitásának meghatározása

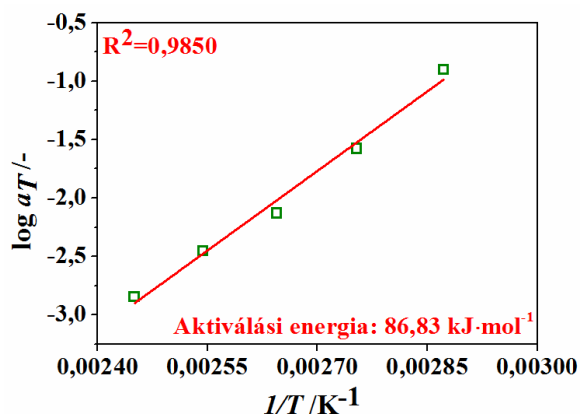
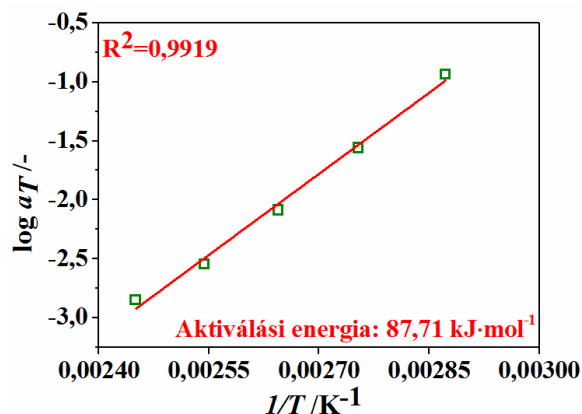
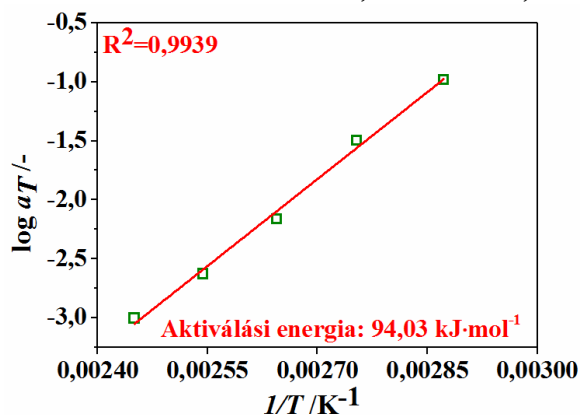
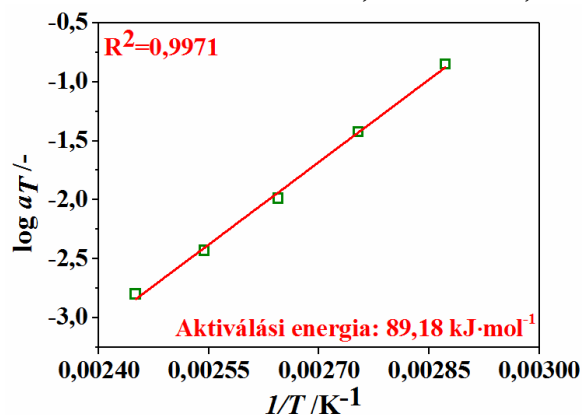
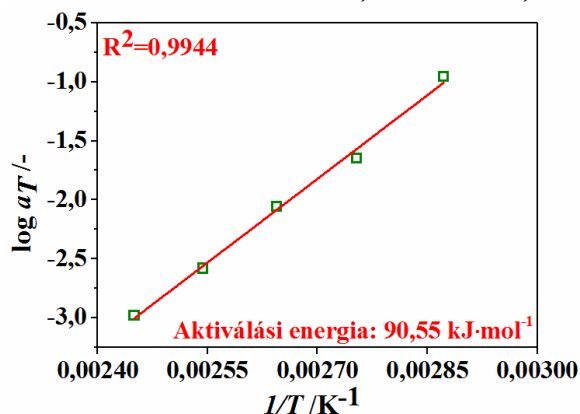
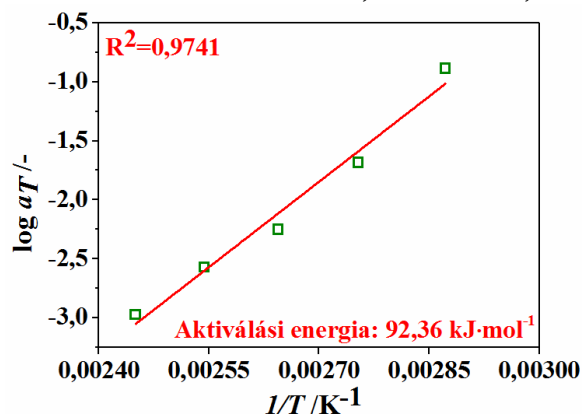
M8. 1. táblázat. Modellparaméterek meghatározása

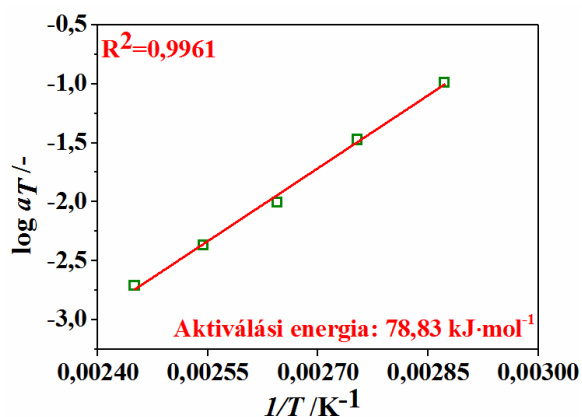
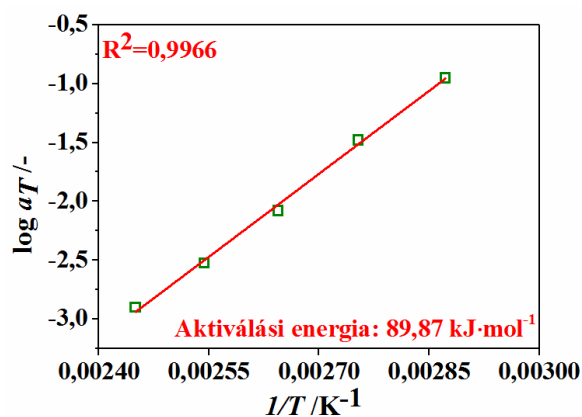
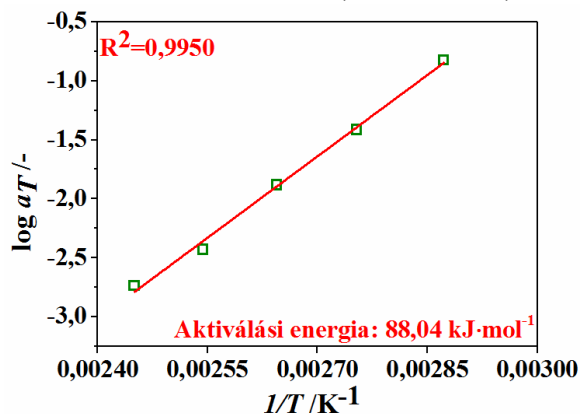
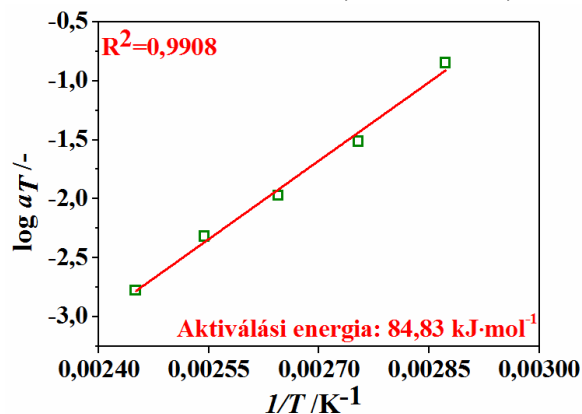
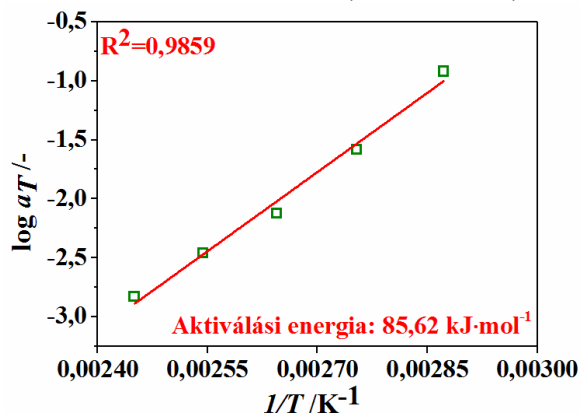
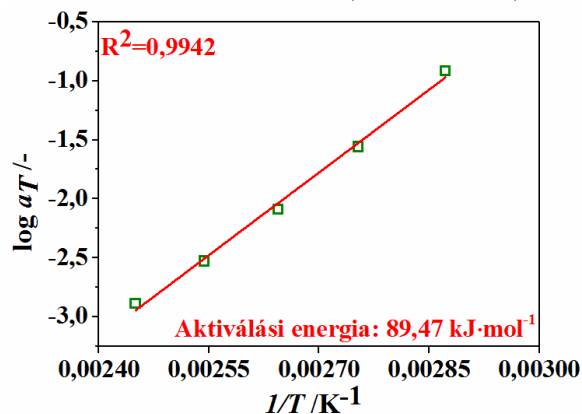
| Keveréktípus                      | Nullviszkózítás, $\eta_0$ /Pa·s |         |        |        |        |        |
|-----------------------------------|---------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
|                                   | 60 °C                           | 75 °C   | 90 °C  | 105 °C | 120 °C | 135 °C |
| <b>B 50/70</b>                    | 5276,00                         | 550,50  | 142,80 | 46,54  | 21,76  | 9,81   |
| Relatív szórás, $V/\%$            | 1,01                            | 2,88    | 0,67   | 0,37   | 0,27   | 0,14   |
| <b>ML_45<math>\mu</math>m_005</b> | 12556,67                        | 1573,33 | 331,90 | 92,81  | 44,37  | 17,92  |
| Relatív szórás, $V/\%$            | 0,44                            | 2,93    | 0,36   | 0,28   | 0,20   | 0,61   |
| <b>ML_45<math>\mu</math>m_013</b> | 17136,67                        | 1986,33 | 472,63 | 140,30 | 48,82  | 24,21  |
| Relatív szórás, $V/\%$            | 1,90                            | 1,89    | 0,78   | 0,43   | 0,05   | 0,79   |
| <b>ML_45<math>\mu</math>m_020</b> | 23840,00                        | 2476,67 | 761,10 | 163,60 | 56,07  | 23,66  |
| Relatív szórás, $V/\%$            | 0,33                            | 4,42    | 0,50   | 0,16   | 0,37   | 0,15   |
| <b>ML_63<math>\mu</math>m_005</b> | 15576,67                        | 2193,67 | 585,97 | 160,90 | 58,07  | 24,67  |
| Relatív szórás, $V/\%$            | 0,13                            | 2,71    | 0,91   | 0,54   | 0,75   | 0,12   |
| <b>ML_63<math>\mu</math>m_013</b> | 20850,00                        | 2300,67 | 468,63 | 182,73 | 54,68  | 21,80  |
| Relatív szórás, $V/\%$            | 3,40                            | 4,56    | 0,29   | 0,22   | 0,52   | 0,23   |
| <b>ML_63<math>\mu</math>m_020</b> | 25486,67                        | 3293,67 | 528,20 | 142,53 | 68,21  | 27,15  |
| Relatív szórás, $V/\%$            | 3,99                            | 1,13    | 1,28   | 0,83   | 0,35   | 0,31   |
| <b>D_45<math>\mu</math>m_005</b>  | 6219,33                         | 637,23  | 209,38 | 61,68  | 26,70  | 12,15  |
| Relatív szórás, $V/\%$            | 2,19                            | 0,17    | 0,42   | 0,76   | 0,49   | 0,50   |
| <b>D_45<math>\mu</math>m_013</b>  | 10756,67                        | 1203,80 | 356,90 | 89,38  | 32,13  | 13,55  |
| Relatív szórás, $V/\%$            | 1,49                            | 0,22    | 0,91   | 0,38   | 0,28   | 1,00   |
| <b>D_45<math>\mu</math>m_020</b>  | 10596,67                        | 1592,67 | 408,97 | 139,38 | 39,46  | 19,47  |
| Relatív szórás, $V/\%$            | 3,61                            | 0,45    | 0,06   | 0,24   | 0,18   | 0,36   |
| <b>D_63<math>\mu</math>m_005</b>  | 10083,33                        | 1436,00 | 309,07 | 108,03 | 48,61  | 16,91  |
| Relatív szórás, $V/\%$            | 0,60                            | 2,42    | 0,93   | 0,57   | 1,25   | 0,44   |
| <b>D_63<math>\mu</math>m_013</b>  | 15730,00                        | 1890,33 | 411,10 | 118,13 | 54,67  | 23,29  |
| Relatív szórás, $V/\%$            | 0,28                            | 2,34    | 1,75   | 0,48   | 0,48   | 1,05   |
| <b>D_63<math>\mu</math>m_020</b>  | 17353,33                        | 2106,67 | 476,93 | 141,30 | 51,43  | 22,43  |
| Relatív szórás, $V/\%$            | 1,10                            | 3,38    | 0,51   | 0,35   | 0,53   | 1,01   |

## 9. Melléklet: Az aktiválási energia meghatározása



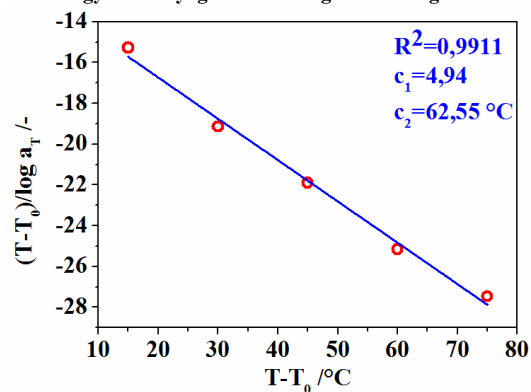
M9.1. ábra. B 50/70 bitumen

M9.2. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,045 \text{ mm}$  T/H: 0,05M9.3. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,045 \text{ mm}$  T/H: 0,13M9.4. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,045 \text{ mm}$  T/H: 0,20M9.5. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,063 \text{ mm}$  T/H: 0,05M9.6. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,063 \text{ mm}$  T/H: 0,13M9.7. ábra. Mészkeőliszt –  $d < 0,063 \text{ mm}$  T/H: 0,20

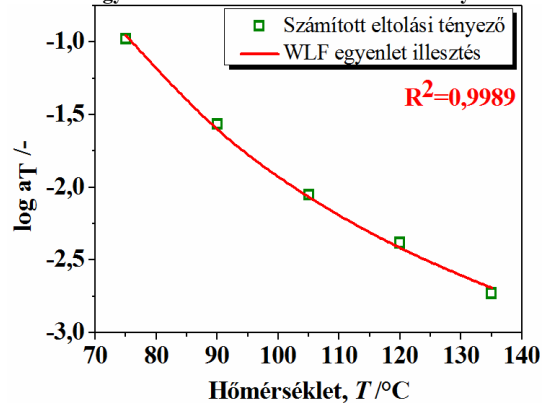
M9.8. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mm T/H: 0,05M9.9. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mm T/H: 0,13M9.10. ábra. Dolomit –  $d < 0,045$  mm T/H: 0,20M9.11. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm T/H: 0,05M9.12. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm T/H: 0,13M9.13. ábra. Dolomit –  $d < 0,063$  mm T/H: 0,20

## 10. Melléklet: A WLF konstansok meghatározása

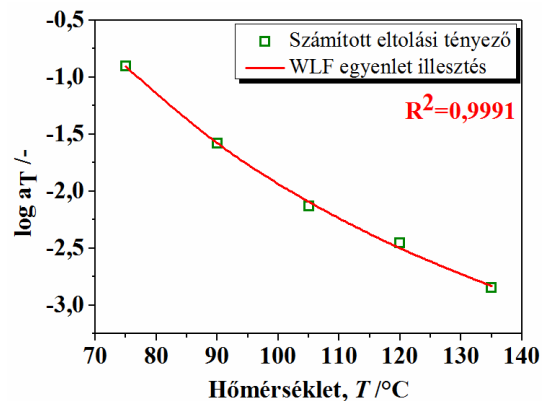
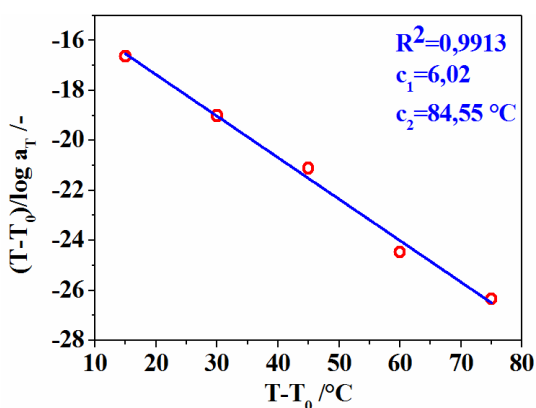
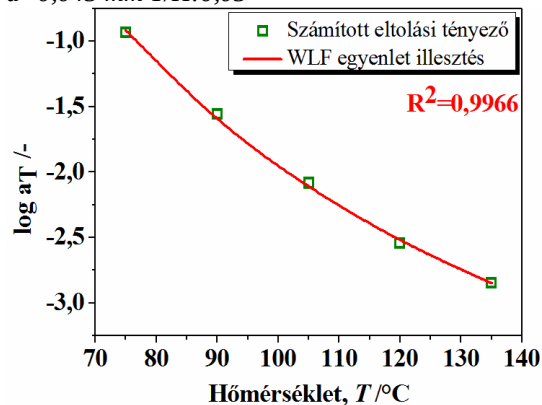
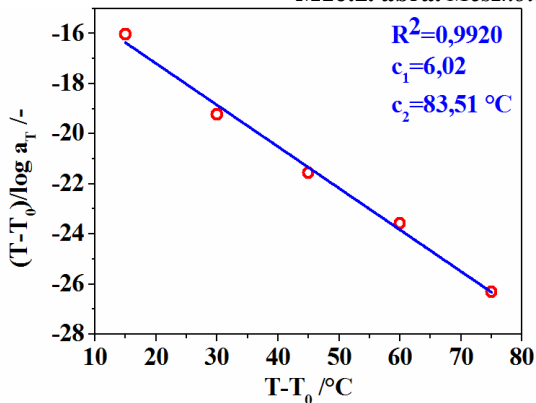
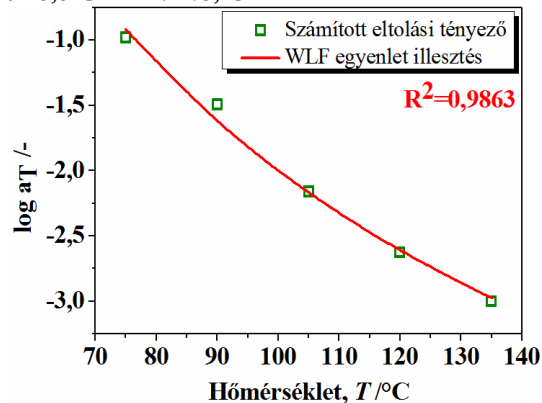
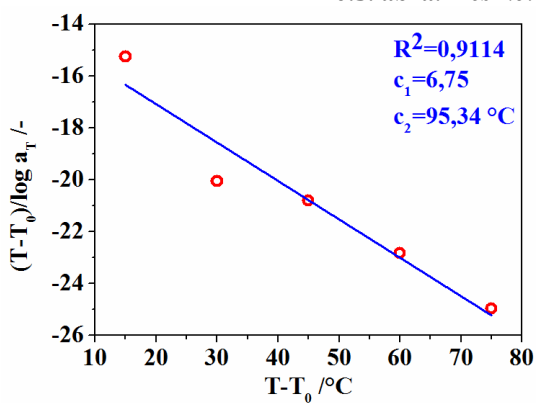
A WLF-egyenlet anyagállandóinak grafikus meghatározása



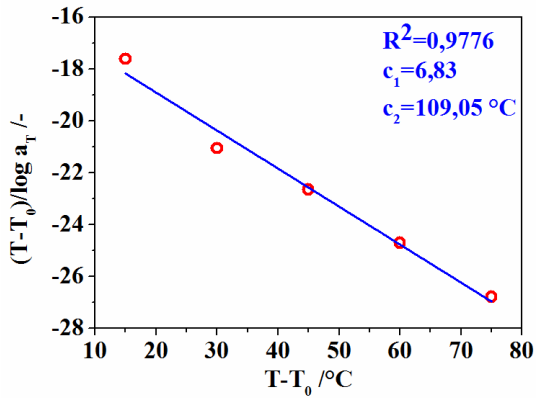
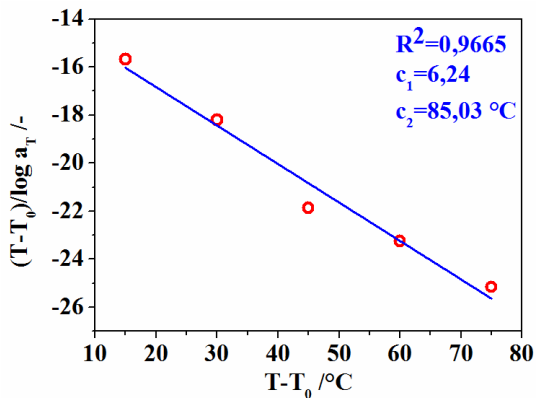
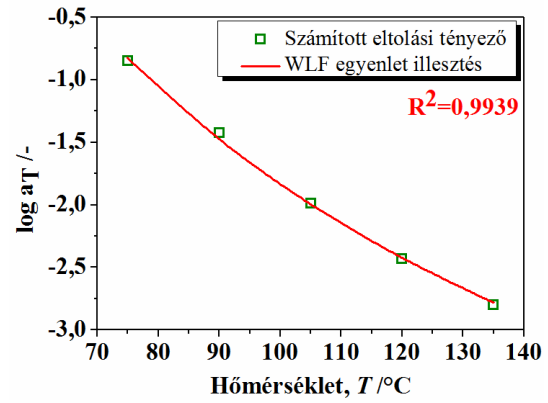
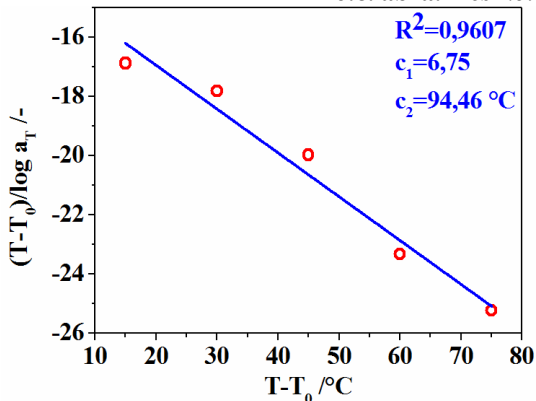
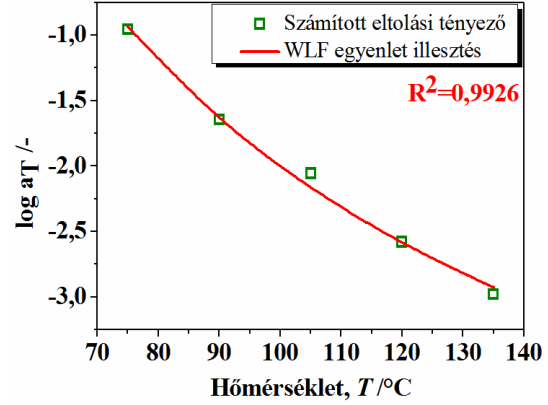
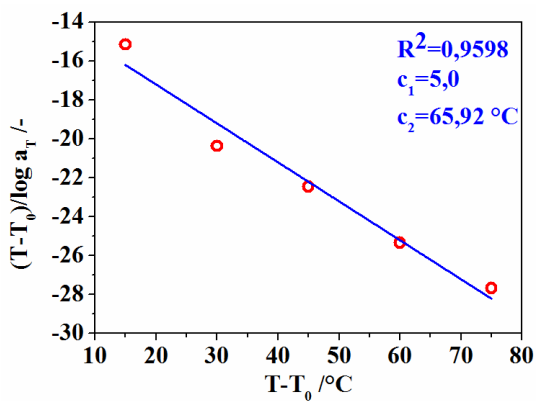
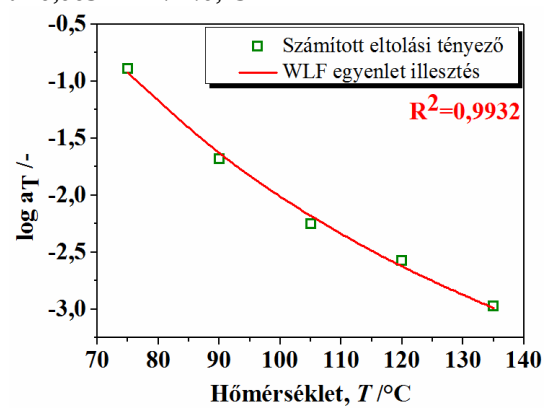
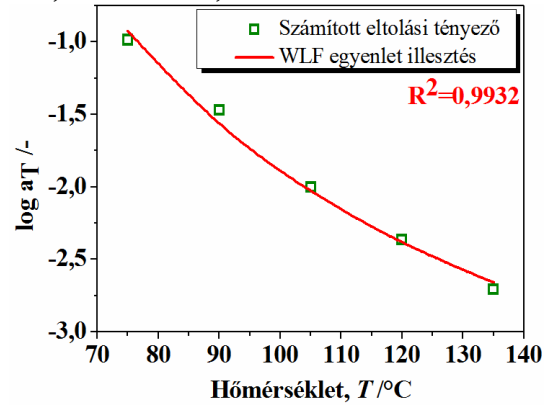
A WLF-egyenlet illesztése a számított eltolási tényezőkre

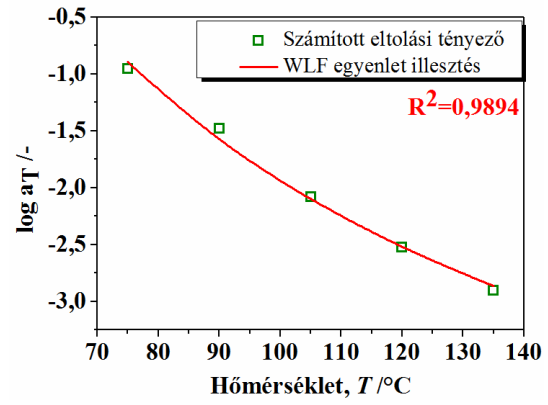
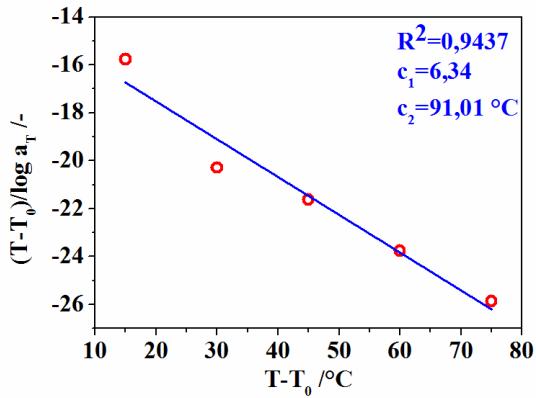
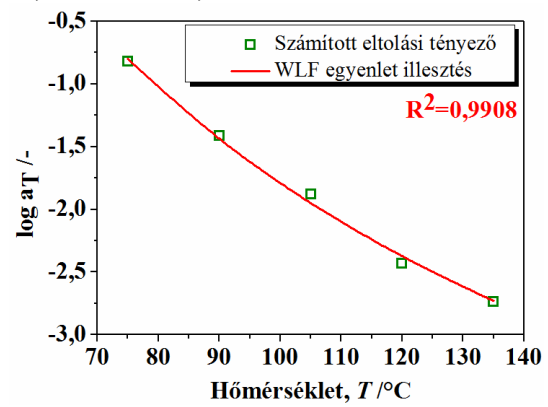
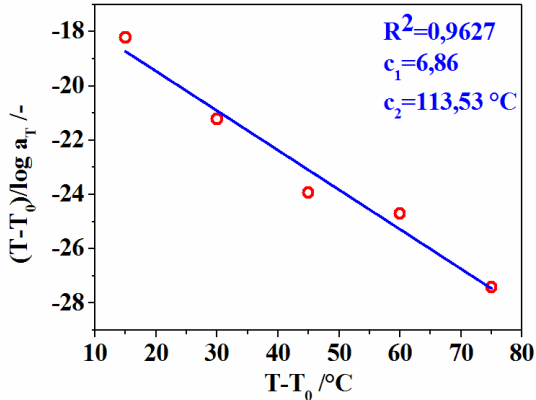
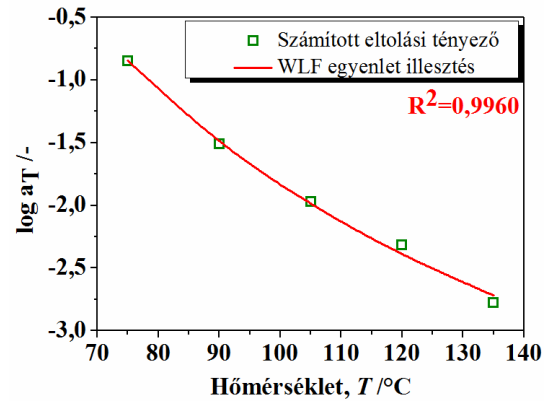
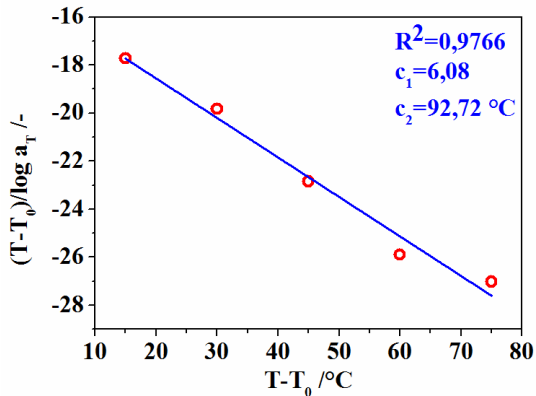
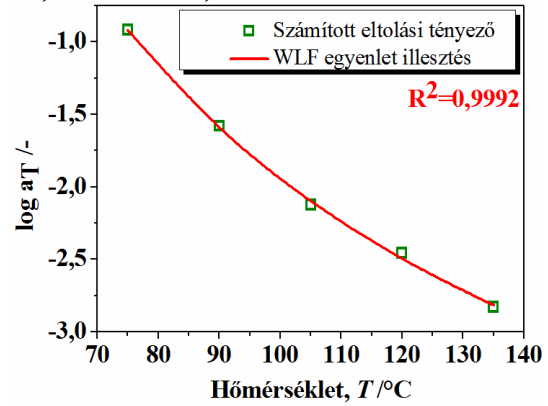
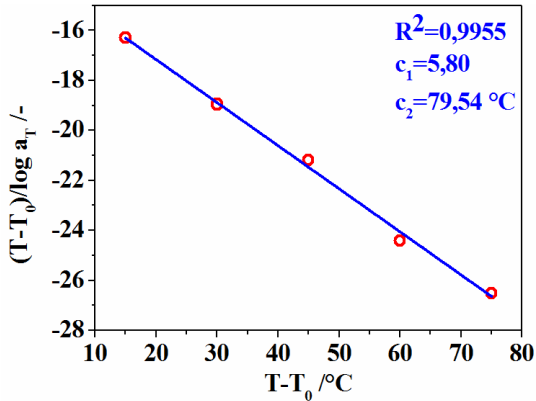


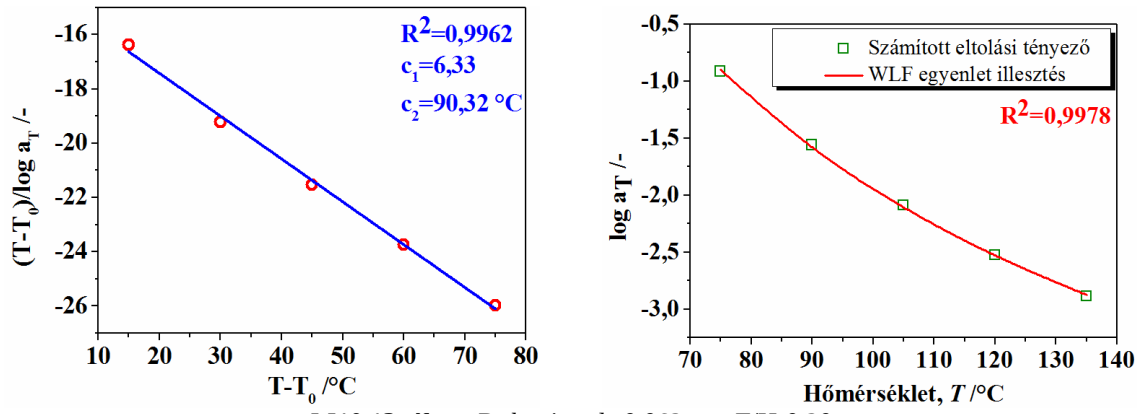
M10.1. ábra. B50/70 bitumen

M10.2. ábra. Mészköliszt –  $d<0,045$  mm  $T/H:0,05$ M10.3. ábra. Mészköliszt –  $d<0,045$  mm  $T/H:0,13$ M10.4. ábra. Mészköliszt –  $d<0,045$  mm  $T/H:0,20$



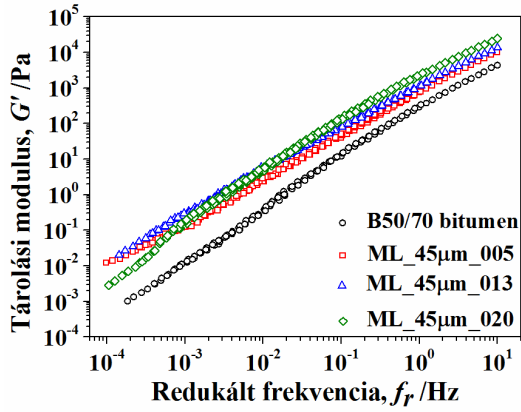
M10.5. ábra. Mészköliszt –  $d < 0,063\text{ mm}$   $T/H:0,05$ M10.6. ábra. Mészköliszt –  $d < 0,063\text{ mm}$   $T/H:0,13$ M10.7. ábra. Mészköliszt –  $d < 0,063\text{ mm}$   $T/H:0,20$ M10.8. ábra. Dolomit –  $d < 0,045\text{ mm}$   $T/H:0,05$ 

M10.9. ábra. Dolomit –  $d < 0,045\text{ mm}$   $T/H:0,13$ M10.10. ábra. Dolomit –  $d < 0,045\text{ mm}$   $T/H:0,20$ M10.11. ábra. Dolomit –  $d < 0,063\text{ mm}$   $T/H:0,05$ M10.12. ábra. Dolomit –  $d < 0,063\text{ mm}$   $T/H:0,13$

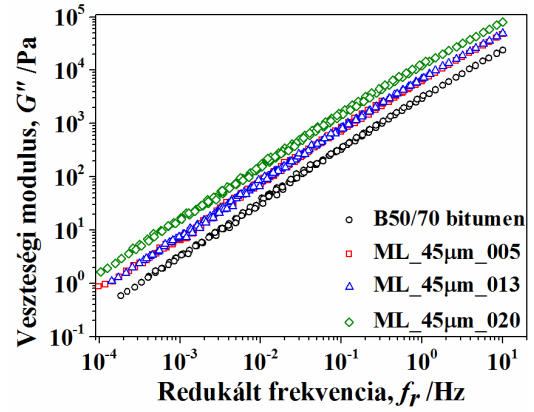


M10.13. ábra. Dolomit –  $d<0,063$  mm  $T/H:0,20$

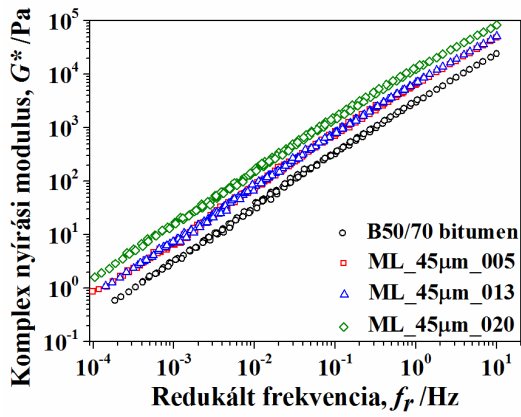
## 11. Melléklet: Aszfalthabarcok összesített mestergörbéi

Mészköliszt ( $d < 0,045 \text{ mm}$ )

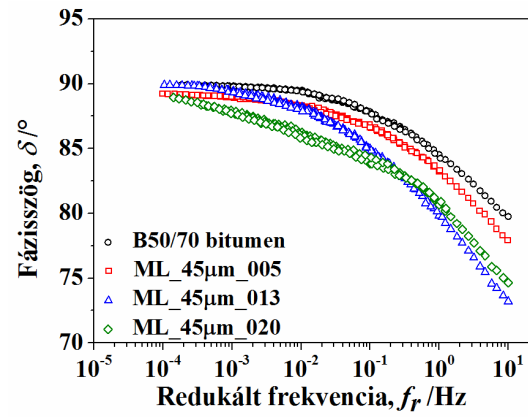
M11.1. ábra.



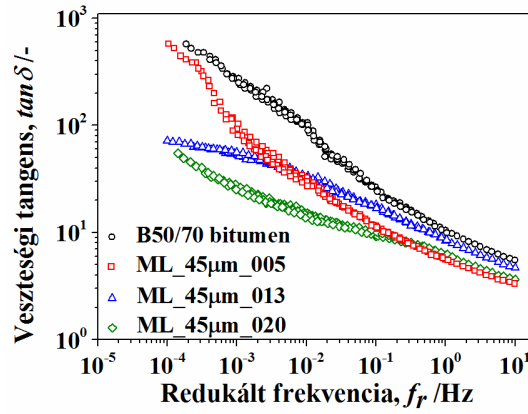
M11.2. ábra.



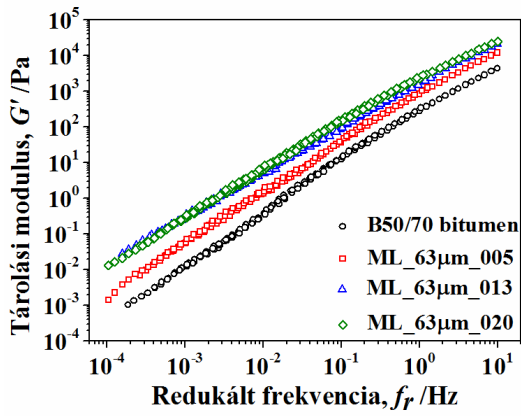
M11.3. ábra.



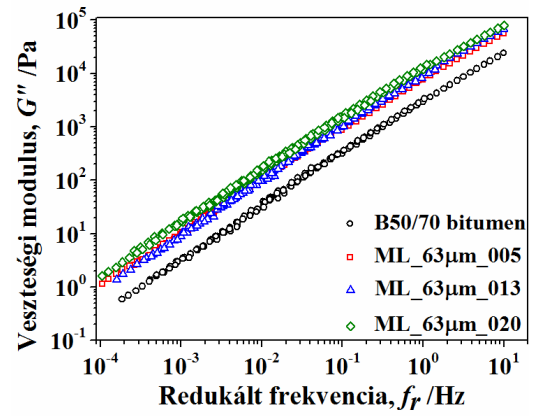
M11.4. ábra.



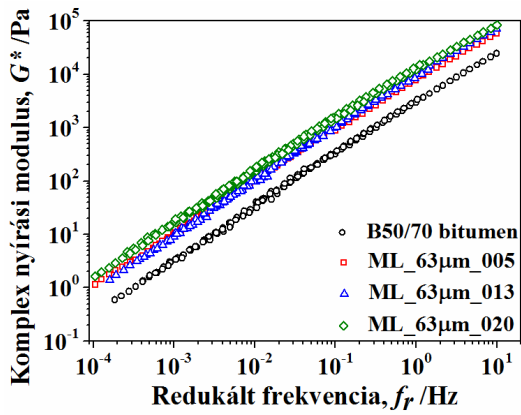
M11.5. ábra.

Mészkeőliszt ( $d < 0,063 \text{ mm}$ )

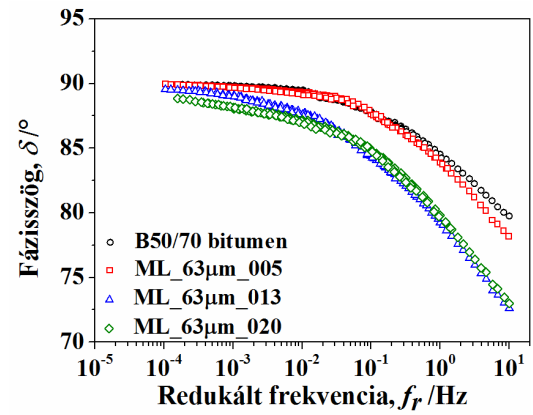
M11.6. ábra.



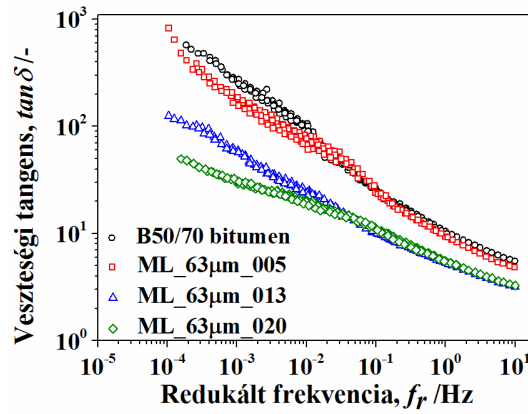
M11.7. ábra.



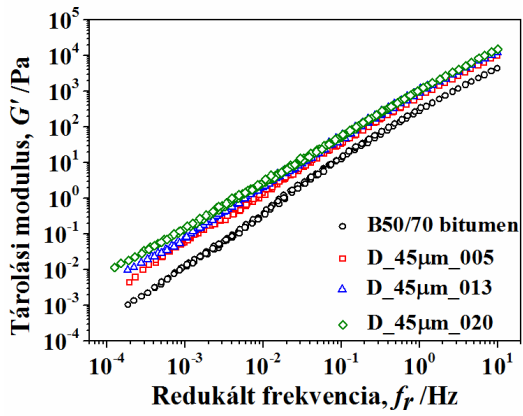
M11.8. ábra.



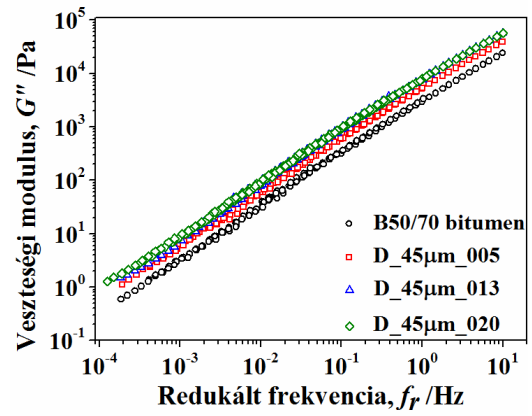
M11.9. ábra.



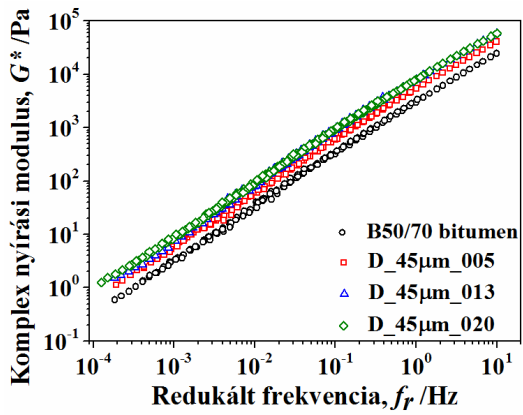
M11.10. ábra.

Dolomit ( $d < 0,045 \text{ mm}$ )

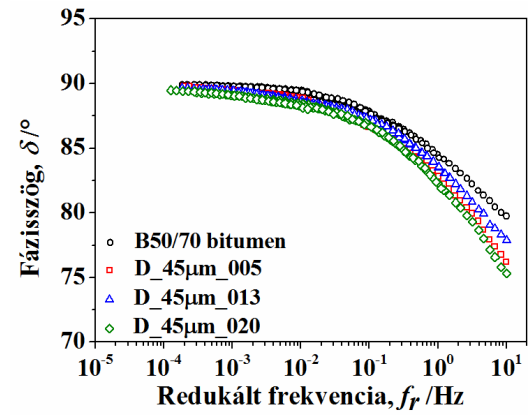
M11.11. ábra.



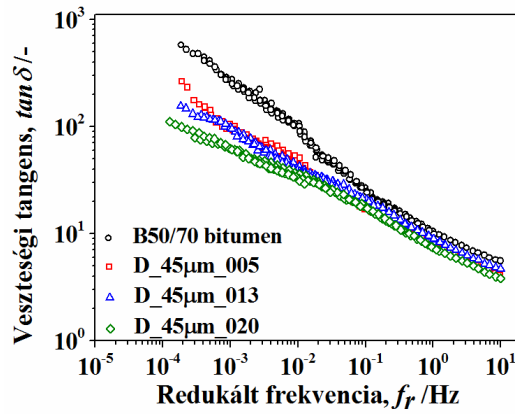
M11.12. ábra.



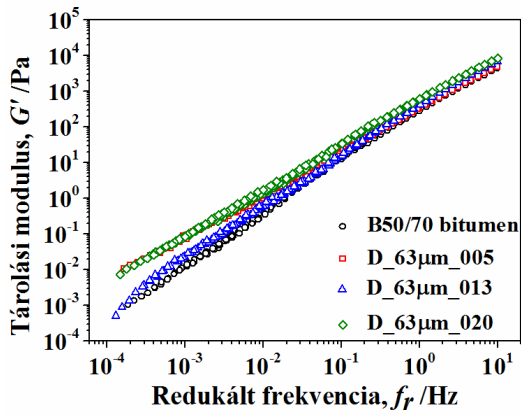
M11.13. ábra.



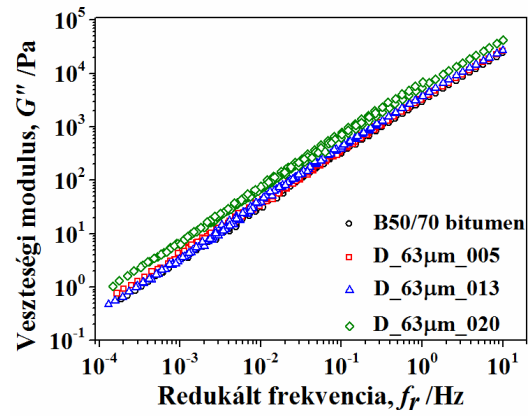
M11.14. ábra.



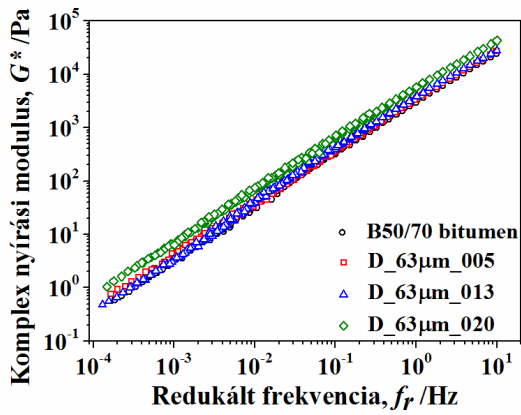
M11.15. ábra.

Dolomit ( $d < 0,063 \text{ mm}$ )

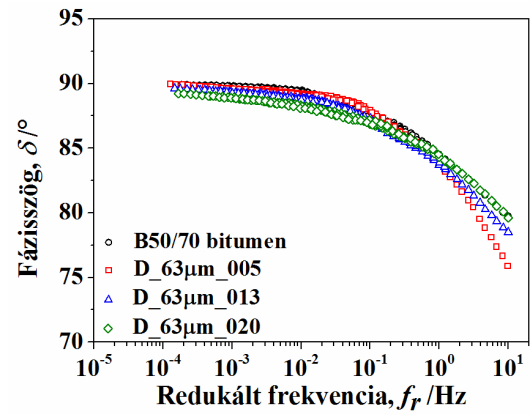
M11.16. ábra.



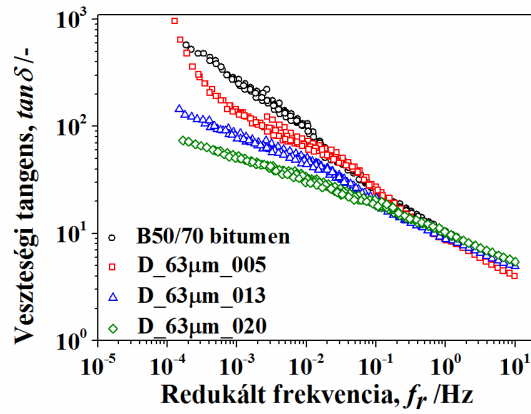
M11.17. ábra.



M11.18. ábra.



M11.19. ábra.



M11.20. ábra.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Nemesdy E.: *Útpályaszerkezetek – Útéptéstan II.*; Tankönyvkiadó, Budapest (1989)
- [2] <http://www.he-do.hu/lexikon.php>
- [3] KSH: *Statisztikai Tükör*; III. évfolyam, 154. szám (2009)
- [4] Lindenbach Á., Kengyel Á.: *Az EU útügyi feladatai*; Jegyzet, BME, Út és Vasútéptéti Tanszék
- [5] Reznák L. Kovács J., Badinszky P.: *Hazai útéptéti kőanyagok*; KTI, Budapest (1982)
- [6] Gezentsvey, L. B.: *Aszfaltbeton útburkolatok*; Moszkva (1960)
- [7] Ferenczy G.: *Aszfaltburkolatok I.*; Tankönyvkiadó, Budapest (1968)
- [8] D. N. Little; J. C. Petersen: *Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: physical and chemical interactions revisited*; Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 17. No. 2., pp. 207–218 (2005)
- [9] W. Grabowski, J. Wilanowicz: *The structure of mineral fillers and their stiffening properties in filler-bitumen mastics*; Materials and Structures, Vol. 41. pp. 793–804 (2008)
- [10] J. Chen: *Rheological properties of asphalt-mineral filler mastics*; Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, Vol. 36. No. 571. pp. 269–277 (1997)
- [11] S. Liu, C. Ma, W. Cao, J. Fang: *Influence of aluminate coupling agent on low-temperature rheological performance of asphalt mastic*; Construction and Building Materials, Vol. 24. Issue 5. pp. 650–659 (2009)
- [12] A. H. Aljassar, S. Metwali, M. A. Ali: *Effect of filler types on Marshall stability and retained strength of asphalt concrete*; The International Journal of Pavement Engineering, Vol. 58. No. 1. pp. 47–51 (2004)
- [13] I. Asi, A. Assa'ad: *Effect of Jordanian oil shale fly ash on asphalt mixes*; Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 17. No. 5., pp. 553–559 (2005)
- [14] M. Chen, J. Lin, S. Wu, C. Liu: *Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture*; Construction and Building Materials, Vol. 25. Issue 4, pp. 1532–1536 (2011)
- [15] S. Wu, M. Chen: *Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture*; Construction and Building Materials, Vol. 25. Issue 10, pp. 3909–3914 (2011)
- [16] Nemesdy E., Ambrus K., Pallós I., Török K.: *Az aszfaltkeverékek mechanikai és fizikai tulajdonságának laboratóriumi vizsgálatai*; BME Útlabor, Budapest (2000)
- [17] Útügyi Műszaki Előírás: ÚT 2-3.301:2010; *Útéptéti aszfaltkeverékek. Aszfaltbeton (AC)* (2010)
- [18] Kisgyörgy L.: *Utak*; BME, Út és Vasútéptéti Tanszék előadásjegyzet (2010)
- [19] <http://www.petroleum.hu/gudron.html>
- [20] A. F. Rawle: *Rheology and particle size*; Malvern Webinar, 2009. 02.25. [www.malvern.com](http://www.malvern.com)
- [21] Benke M., Boromissza T., Móczár F.: *Útépté II.*; Műszaki Könyvkiadó, Budapest (1983)
- [22] Útügyi Műszaki Előírás: ÚT 2-3.602:2008; *Kőlisztek. Kőanyagalmazatok utak, repülőterek és más közforgalmú területek aszfaltkeverékeihez és felületi bevonataihoz* (2008)
- [23] P. S. Kandhal, C. Y. Lynn, F. Parker: *Characterization tests for mineral fillers related to performance of asphalt paving mixtures*; NCAT Report No. 98–2 (1998)
- [24] D. A. Anderson: *Influence of fines on performance on asphalt concrete mixtures*; International Center for Aggregates Research (ICAR), 4<sup>th</sup> Annual Symposium (1996)
- [25] Skovrankó E.: *Töltőanyag szerepe az aszfaltkeverékben*; Kézirat (2007)



- [26] T. F. Yen, G. V. Chilingarian (ed.): *Asphaltenes and Asphalts*, 2., *Developments in Petroleum Science*; 40 B, Elsevier (2000)
- [27] D. Lesueur: *The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification*; *Advances in Colloid and Interface Science* Vol. 145 pp. 42–82 (2009)
- [28] M. Salou, B. Siffert, A. Jada: *Relationship between the chemical properties of bitumens and their colloidal properties in water*; *Fuel*, Vol. 77. No. 4. pp. 339–341 (1998)
- [29] *Útépítési, építőipari és speciális bitumenek*; MOL specifikáció, [www.mol.hu](http://www.mol.hu)
- [30] Ambrus K.: *Útpályaszerkezetek – Útépítési bitumenek, hígított bitumenek, bitumenemulziók* (BME előadás jegyzet)
- [31] Rosinger, A.: *Beiträge zur Kolloidchemie des Asphalts*; *Kolloid-Z*, Vol. 15. pp. 177–209 (1914)
- [32] Nellensteyn, F. J.: *The constitution of asphalt*; *Journal of Institution of Petroleum Technologists* (1924) Vol. 10 pp. 311–25.
- [33] Pfeiffer J.P., Saal, R.N.J.: *Asphaltic bitumen as colloid systems*; *The Journal of Physical Chemistry*, Vol. 44. pp. 139–49 (1940)
- [34] Bíró Sz.: *Kémiaiilag stabilizált gumibitumenek előállítása és vizsgálata*; Doktori értekezés, Veszprémi Egyetem (2005)
- [35] J. Read, D. Whiteoak: *The Shell Bitumen Handbook*; 5<sup>th</sup> Edition, London, Thomas Telford Publishing (2003)
- [36] A. Pérez-Lepe, F. J. Martínez-Boza, C. Gallegos, O. González, M. E. Munoz, A. Santamaria: *Influence of the processing conditions on the rheological behaviour of polymer-modified bitumen*; *Fuel*, Vol. 82, pp. 1339–1348 (2003)
- [37] N. Romero, A. Cárdenas, M. Henríquez, H. Rivas: *Viscoelastic properties and stability of highly concentrated bitumen in water emulsions*; *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 204. pp. 271–284 (2002)
- [38] Y. R. Kim, D. N. Little, I. Song: *Mechanistic evaluation of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics*; TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM
- [39] J. Chen, P. Kuo, P. Lin, C. Huang, K. Lin: *Experimental and theoretical characterization of the engineering behavior of bitumen mixed with mineral töltőanyag*; *Materials and Structures*, Vol. 41, pp. 1015–1024 (2008)
- [40] Y. R. Kim, D. N. Little: *Linear viscoelastic analysis of asphalt mastics*; *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 16. No. 2. pp.122–132 (2004)
- [41] Sakharov, P. V.: *Methods for designing asphalt mixtures*; *Transport and Roads of the city*, No. 12 (1935)
- [42] R. Géber, L. A. Gömze: *Characterization of mineral materials as asphalt fillers*; *Materials Science, Testing and Informatics V.*, Trans Tech Publication, pp. 471–476. (2010)
- [43] Lisihina A. I.: *Dorozhnye pokrytiya i osnavaniya s primeneniem bitumov i degtei*, Moscow, (1962)
- [44] N. V. Maidanova; D. A. Rozental: *Asphalt adsorption in relation to the surface area of the mineral töltőanyag and content of aromatic oils*; *Russian Journal of Applied Chemistry*; Vol. 79., No. 8., pp. 1386–1387 (2006)

- [45] J. Craus., I. Ishai., A. Sides: *Some Physico-Chemical Aspects of the Effect and the Role of the Filler in Bituminous Paving Mixtures*; Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 47. pp. 558-588. (1978)
- [46] D. A. Anderson, W. H. Goetz: *Mechanical behaviour and reinforcement of mineral filler-asphalt mixtures*; Proc. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 42, pp. 37–66. (1973)
- [47] B. M. Harris, K. D. Stuart: *Analysis of mineral fillers and mastics used in stone matrix asphalt*; Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 64, pp. 54–95. (1995)
- [48] A. Kavussi, R. G. Hicks: *Properties of bituminous mixtures containing different fillers*; Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 66, pp. 153–186. (1997)
- [49] L. Cooley, A. M. Stroup-Gardiner, E. R. Brown, D. I. Hanson, M. O. Fletcher: *Characterization of asphalt-filler mortars with superpave binder tests*; Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 67, pp. 42–65. (1998)
- [50] S. Hu, H. Zhang, J. Wang J.: *Research on alkaline filler flame-retarded asphalt pavement*; Journal of Wuhan University of Technology; Vol. 21. No. 3. pp. 146–148. (2006)
- [51] D. Lesueur: *Bitumen/filler interactions – Current understanding and perspectives*; Konferencia előadás, Chemo-mechanics of Bituminous Materials, Washington DC, 2010. január 10.
- [52] D. Lesueur, D. Little.: *Effect of hydrated lime on the rheology, fracture and ageing of bitumen*; Transportation Research Record, Vol. 1661. pp. 93–100. (1999)
- [53] D. G. Tunncliff: *Binding effect of mineral filler*; Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.36. pp. 114–154. (1967)
- [54.] P. B. Sheperd: *Mineral fillers in: Bituminous materials: Asphalts, tars and pitches*, Vol. 1. A. J. Hoiberg (ed.) New York: Interscience Publishers, pp. 347–373. (1964)
- [55] J. G. Mitchell, A. R. Lee: *The evaluation of fillers for tar and other bituminous surfaces*; Journal of The Society of Chemical Industry; Vol. 58., pp. 299–306. (1939)
- [56] D. J. Rigden: *Mineral fillers in bituminous road surfacings: a study of filler/binder systems in relation to töltőanyag characteristics*; Journal of The Society of Chemical Industry, Vol. 66., pp. 299–309. (1947)
- [57] W. Heukelom, P. W. O. Wijga: *Viscosity of dispersions as governed by concentration and rate of shear*; Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.40. pp. 418–435. (1971)
- [58] A. Einstein: *Eine neue Bestimmung der Molekuldimension*; Annalen der Physik, Vol. 19. pp. 289–306. (1906)
- [59] Rohrsetzer S.: *Kolloidika, mikrofázisok, micellák, makromolekulák*; Tankönyvkiadó, Budapest (1989)
- [60] H. A. Barnes, J. F. Hutton, K. Walters: *An introduction to rheology*; Elsevier (1989)
- [61] L. Landau, E. Lifschitz: *Fluid Mechanics*, Oxford, Pergamon Press (1958)
- [62] I. M. Krieger, T. J. Dougherty: *A mechanism to non-newtonian flow in suspension of rigid spheres*; Transaction of the Society of Rheology, Vol. 3, pp. 137-152 (1959).
- [63] V. Tomeckova, J. W. Halloran: *Flow behavior of polymerizable ceramic suspensions as function of ceramic volume fraction and temperature*; Journal of the European Ceramic Society, Vol. 31. pp. 2535–2542 (2011)
- [64] C. Kugge, J. Daicic: *Shear response of concentrated calcium carbonate suspensions*; Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 271. pp. 241–248 (2004)

- [65] K.M. Hurysz, J.K. Cochran: *The application of models for high solids content suspensions to pastes*; Journal of the European Ceramic Society, Vol. 23. pp. 2047–2052 (2003)
- [66] K.M. Hurysz, J.K. Cochran: *The application of models for high solids content suspensions to pastes*; Journal of the European Ceramic Society, Vol. 23. pp. 2047–2052 (2003)
- [67] S. Mueller, E. W. Llewellyn, H. M. Mader: *The effect of particle shape on suspension viscosity and implications for magmatic flows*; *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, pp. 5. (2011)
- [68] E. Gregorová, W. Pabst, J. Bouchet: *Influence of particle shape on the viscosity of kaolin suspensions*; *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, Vol. 6, No. 1 (153), pp. 101–109. (2009)
- [69] Z. Fan, J. Y. Chen: *A microstructural approach to the rheological behaviour of semisolid slurries*; Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Semisolid Metal Processing, pp. 479–484. (2002)
- [70] T. H. Omland, B. Dahl, A. Saasen, K. Svanes, P. A. Amundsen: *The influence of particle type and size distribution on viscosity in a non-Newtonian drilling fluid*; *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, Vol. 13. pp. 107–110. (2005)
- [71] Gácsi Z., Sárközi G., Réti T., Kovács J., Csepeli Zs., Mertinger V.: *Sztereológia és képelemzés*; Egyetemi Tankönyv, Well-Press Kiadó Kft. (2001)
- [72] V. V. Yadykina: *Properties of asphalt-lime-containing mineral powder system*; *Russian Journal of Applied Chemistry*; Vol. 77. No. 3. pp. 501–504. (2004)
- [73] W. G. Buttlar, R. Roque,: *Evaluation of empirical and theoretical models to determine asphalt mixtures stiffnesses at low temperature*; *Association of Asphalt Paving Technology*, Vol. 65. pp. 99–141. (1996)
- [74] G. Li, Y. Li, J.B. Metcalf, S.S. Pang,: *Elastic modulus prediction of asphalt concrete*; *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11. (3), pp. 236–241. (1999)
- [75] H. Zhu, J. Nodas: *Contact based analysis of asphalt pavement with the effect of aggregate angularity*; *Journal of Mechanical Materials and Structures*, Vol. 32. pp. 193 –202. (2000)
- [76] X. Shu, B. Huang: *Micromechanics-based dynamic modulus prediction of polymeric asphalt concrete mixtures*; *Composites, Part B*. Vol. 39. pp. 704–713 (2008)
- [77] G. Li, Y. Li, J. B. Metcalf: *Two-step approach to prediction of asphalt concrete modulus from two-phase micromechanical models*; *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 17. (4), pp. 407–415 (2005)
- [78] N. Shashidhar, P. Romero: *Factors affecting the stiffening potential of mineral fillers*; *Transportation Research Record*; Vol. 1638. pp. 94–100 (1998)
- [79] J. S. Chen: *Rheological properties of asphalt-mineral filler mastics*; *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements*, Vol. 36. pp. 269–277 (1997)
- [80] R. Lackner, M. Spiegl, R. Blab, J. Eberhardsteiner: *Is low-temperature creep of asphalt mastic independent of filler shape and mineralogy? – Arguments from multiscale analysis*; *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 17. No. 5. pp. 485–491. (2005)
- [81] R. Bandyopadhyaya, A. Das S. Basu: *Numerical simulation of mechanical behavior of asphalt mix*; *Construction and Building Materials*; Vol. 22 (6) pp. 1051–58 (2008)
- [82] Tóth S.: *Reológia, reometria*; Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém (2000)
- [83] A. Y. Malkin, A. Isayev: *Rheology. Concepts, methods & application*. ChemTec Publishing; Toronto (2006)

- [84] H.A. Barnes: *A handbook of elementary rheology*; University of Wales, Aberystwyth (2000)
- [85] J. Kolarík, A. Pegoretti: *Proposal of the Boltzmann-like superposition principle for nonlinear tensile creep of thermoplastics*; Polymer Testing, Vol. 27. pp. 596–606 (2008)
- [86] C. W. Macosko: *Rheology. Principles, measurements, and applications*; Wiley-VCH, Inc. (1994)
- [87] J. D. Ferry: *Viscoelastic properties of polymers*; Wiley, New York (1980)
- [88] Rheology Solutions: *Determining the linear viscoelastic region in polymers* (RS-23); TA Instruments specification
- [89] D. A. Anderson et al.: *Binder characterisation. Physical properties*. Vol. 3. SHRP-A-369. Strategic Highway Research Program. Washington DC. National Research Council (1994)
- [90] G. D. Airey, B. Rahimzadeh, A. C. Collop: *Viscoelastic linearity limits for bituminous materials*; Materials and Structures; Vol. 36. pp. 643-647. (2003)
- [91] G. D. Airey, M. H. Mohammed, C. Fichter: *Rheological characteristics of synthetic road binders*; Fuel, Vol. 87, pp. 1763–1775. (2008)
- [92] H. Zhai, D. Salomon, E. Milliron: *Using rheological properties to evaluate storage stability and setting behaviors of emulsified asphalts*; ISAET 2004, 4<sup>th</sup> International Symposium on Asphalt Emulsion Technology (2004)
- [93] Rheology Solutions: *Determination of the Linear Viscoelastic Region of a Polymer using a Strain Sweep on the DMA 2980* ; TA Instruments specification
- [94] D. Vader, H. Wyss: *Introduction to Rheology*; Weitzlab group meeting tutorial
- [95] A. Franck: *Measuring and evaluating oscillation data*, APN007; TA Instruments Germany
- [96] A. Ram: *Fundamentals of polymer engineering*; Plenum Press, New York (1997)
- [97] R. Pal: *Rheology of particulate dispersions and composites*; Surfactant Science Series, Vol. 136., CRC Press (2007)
- [98] R. Brummer: *Rheology essentials of cosmetic and food emulsions*; Springer-Verlag, Berlin (2006)
- [99] G. Schramm: *A practical approach to rheology and rheometry*; Gebrueder HAAKE GmbH, Karlsruhe, 2<sup>nd</sup> edition (2000)
- [100] J. F. Steffe: *Rheological methods in food process engineering*; Freeman Press, USA, 2<sup>nd</sup> edition (1996)
- [101] Tóth Cs.: *Aszfaltkeverékek viszkoelasztikus viselkedésének jellemzése Huet-Sayegh modellel*; Közlekedésépítési Szemle; Vol. 59. No. 8 (2009)
- [102] L. A. Gömze, R. Géber, L. N. Gömze: *Investigation of rheo-mechanical properties of asphalt mixtures as function of temperatures and pressures*; Proceedings of the 11<sup>th</sup> ECERS Conference, Kraków, p. 1122–1126. (2009)
- [103] L. A. Gömze, R. Géber, J. Csányi Tamásné: *The effect of temperature and composition to the rheological properties of asphalt mixtures*; Materials Science Forum, Vol. 589. pp 85–91. (2008)
- [104] G. D. Airey: *Dynamic shear rheometry, flourescent microscopy, physical and chemical evaluation of polymer modified bitumens*; 7<sup>th</sup> Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Victoria Falls, Zimbabwe; pp. 1 -22 (1999)

- [105] G. D. Airey, B. Rahimzadeh: *Combined bituminous binder and mixture linear rheological properties*; Construction and Building Materials; Vol.18. pp. 535 – 548 (2004)
- [106] P. Partal, F. Martínez-Boza, B. Conde, C. Gallegos: *Rheological characterisation of synthetic binders and unmodified bitumens*; Fuel; Vol. 78. pp. 1-10. (1998)
- [107] Y. Zhao; Y. R. Kim: *The time-temperature superposition for asphalt mixtures with growing damage and permanent deformation in compression*; submitted for presentation at the 2003 TRB Annual Meeting and Publication in the Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board (2003) Board (2003)
- [108] [http://zeus.plmsc.psu.edu/~manias/MatSE447/10\\_TimeTemperSuperposition.pdf](http://zeus.plmsc.psu.edu/~manias/MatSE447/10_TimeTemperSuperposition.pdf)
- [109] H. Cai, A. Ait-Kadi, J. Brisson: *Dynamic rheological analysis of a miscible blend showing strong interactions*; Polymer, Vol. 44. pp. 1481–1489 (2003)
- [110] T. O. Medani, M. Huurman: *Constructing the stiffness master curves for asphaltic mixes*; Report 7-01-127-3, ISSN 0169-9288 (2003)
- [111] E. N. da C. Andrade: *A theory of the viscosity of liquids*; Philosophical Magazine, Vol. 17, pp. 497–511. (1934)
- [112] R. Li: *Time-temperature superposition method for glass transition temperature of plastic materials*; Materials Science and Engineering A. Vol. 278. pp. 36–45 (2000)
- [113] M. L. Williams, R. F. Landel, J.D. Ferry: *The temperature dependence of relaxation mechanism in amorphous polymers and other glass forming liquids*; Journal of ACS, Vol. 77. pp. 3701 (1955)
- [114] G. D. Airey, J. Wilmot, J. R.A. Grenfell, D. J. Irvine, I. A. Barker, J. El Harfi: *Rheology of polyacrylate binders produced via catalytic chain transfer polymerization as an alternative to bitumen in road pavement materials*; European Polymer Journal, Vol. 47 pp. 1300–1314 (2011)
- [115] G. Sayegh: *Viscoelastic Properties of Bituminous Mixtures*; Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, MI, USA, University of Michigan, pp. 743-755. (1967)
- [116] R. L. Lytton, J. Uzan, E. M. Fernando, R. Roque, D. Hiltunen, S. M. Stoffels: *Development and validation of performance prediction models and specifications for asphalt binders and paving mixes*; SHRP Report A-357, SHRP/NRC, Washington DC, USA, (1993)
- [117] N. I. Md. Yussof, M. T. Shaw, G. D. Airey: *Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders*; Construction and Building Materials, Vol. 25. pp. 2171–2189 (2011)
- [118] E. Chailleux, G. Ramond, C. de la Roche: *A mathematical-based master curve construction method applied to complex modulus of bituminous materials*; Road Materials and Pavement Design, Vol. 7, pp. 75–92 (2006)
- [119] C. Van der Poel: *A general system describing the viscoelastic properties of bitumens and its relation to routine test data*; Journal of Applied Chemistry, Vol. 4. pp. 231–236 (1954)
- [120] D. A. Anderson, D. W. Christensen: *Interpretation of dynamic mechanical test data for paving grade asphalt*; Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.61. pp. 67–116 (1992)
- [121] O. Marasteanu, D. A. Christensen: *Improved model for bitumen rheological Characterization*; Eurobitume workshop on performance related properties for bitumens binder, Luxembourg, Paper No. 133 (1999)

- [122] M. Zeng, H. U. Bahia, H. Zhai, M. R. Anderson, P. Turner: *Rheological modelling of modified asphalt binders and mixtures*; Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.70. pp. 403–441 (2001)
- [123] K. G. Biswas, T. K. Pellinen: *Practical methodology of determining the in situ dynamic (complex) moduli for engineering analysis*; Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 19. pp. 508–513 (2007)
- [124] Tóth Cs.: *Aszfaltkeverékek merevsége a terhelési idő, a hőmérséklet és a kőváz szemeloszlásának függvényében*; Ph. D. értekezés, Budapest (2010)
- [125] G. Sayegh: *Viscoelastic properties of bituminous mixtures*; Proceedings of the 2nd International conference on structural design of asphalt pavement, University of Michigan, pp. 743–755 (1967)
- [126] Tóth Cs.: *Aszfaltkeverékek mestergörbájének meghatározása*; Közlekedésépítési Szemle, Vol. 60. No. 2. pp. 14–19 (2010)
- [127] F. Olard, H. Di Benedetto, B. Eckmann: *Linear viscoelastic properties of bituminous binders and mixtures at low and intermediate temperatures*; Road Materials and Pavement Design, Vol. 4 pp. 185–224 (2003)
- [128] F. Olard, H. Di Benedetto: *General “2S2PID” model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes*; Road Materials and Pavement Design; Vol. 4. pp. 185–224 (2003)
- [129] C. Huet: *Étude, par une méthode d'impédance, du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés*; Thesis, Faculté des Sciences de l'université de Paris, Paris (1963)
- [130] Pojják T.: *Ásvány- és kőzetan III.*; Tankönyvkiadó, Budapest (1987)
- [131] <http://www.beg.utexas.edu/mainweb/publications/graphics/calcite400.jpg>
- [132] <http://webmineral.com/data/Calcite.shtml>
- [133] <http://chemistry.about.com/od/geochemistry/a/mohsscale.htm>
- [134] Mauritz B.; Vendl A.: *Ásványtan – Általános ásványtan, I. kötet*; Budapest (1942)
- [135] Székyné dr. Fux V.: *Kristálytan (Ásványtan I.)*, Nemzeti Tankönyvkiadó (1994)
- [136] Pantó G.: *Ásvány- és kőzetan*; Műszaki Könyvkiadó, Budapest (1957)
- [137] Pápay L.: *Kristályok, ásványok, kőzetek*; JATEPress, Szeged (1998)
- [138] <http://howcrusherworks.com/orepics/dolomite.jpg>
- [139] <http://webmineral.com/data/Dolomite.shtml>
- [140] R. Géber, L. A. Gömze: *Investigation of hydrophilic and hydrophobic properties of different mineral fillers for asphalt mixtures*; Proceedings of the 11<sup>th</sup> ECERS Conference, Kraków, p. 945–950. (2009)
- [141] R. Géber, L. A. Gömze: *Examination of the "Pilisvörösvár" dolomite filler as aggregate material for asphalts*; MicroCAD International Scientific Conference, Kiadvány, p. 25–30. (2009)
- [142] B. Manning, A. Ichimura: *Bruker D8 ADVANCE Powder XRD instrument manual and Standard Operating Procedure (SOP)* (2006)
- [143] Gubicza J., Zsoldos L.: *Röntgendiffrakció*; Szilárdtestfizikai laboratóriumi gyakorlatok
- [144] Paulik F., Paulik J., Erdey L.: *Derivatograph elméleti alapjai*; Magyar Optikai Művek, Budapest
- [145] Géber R.: *Ásványbányában keletkező sajátfiller újrahasznosítási lehetőségeinek vizsgálata útépítési alapanyagként*; Építőanyag, 60. évfolyam, 1. szám, p. 19–23. (2008)
- [146] <http://www.angstrom.us/documents/TM1000.pdf>
- [147] R. Géber, L. A. Gömze: *Comparison examination of andesite fillers used in road construction*; MicroCAD International Scientific Conference, Kiadvány, p. 29–34. (2008)

- [148] Géber R.: *The selection of asphalt fillers by the comparison of hydrophilic properties*; Építőanyag, Vol. 59. No. 3. pp. 73–76. (2007)
- [149] S. Hu, H. Zhang, J. Wang: *Research on alkaline filler flame-retarded asphalt pavement*; Journal of Wuhan University of Technology, Vol. 21. No. 3. pp. 146–148. (2006)
- [150] M. Chen, J. Lin, S. Wu, C. Liu: *Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture*; Construction and Building Materials, Vol. 25. pp. 1532–1536. (2011)
- [151] J. Ren, S. Lu, J. Shen, C. Yu: *Electrostatic dispersion of fine particles in the air*; Powder Technology, Vol. 120, pp. 187–193. (2001)
- [152] Géber R.: *Aszfalt töltőanyagok kiválasztása hidrofíli tulajdonságaik alapján*; Építőanyag, 59. évfolyam 3. szám, p.73-77. (2007).
- [153] Kamarás K.: *Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia*; MTA Szilárdtestfizikai Kutató Intézet (Jegyzet)
- [154] <http://mkk.szie.hu/dep/talt/czi/muszer/ftir.pdf>
- [155] <http://www.cem.msu.edu/~harrison/cem483/wavenumbers.pdf>
- [156] [http://www.mol.hu/hu/vallalati\\_ugyfeleknek/termek/bitumenek/](http://www.mol.hu/hu/vallalati_ugyfeleknek/termek/bitumenek/)
- [157] Bánhegyi Gy.: *Kristályos és amorf polimerek termikus vizsgálata differenciális pásztázó kalorimetriával (DSC)*; Műanyagipari Szemle; 2005/1. szám
- [158] J-F. Masson, G. M. Polomark: *Bitumen microstructure by modulated differential scanning calorimetry*; Thermochimica Acta, Vol. 374, pp. 105–114 (2001)
- [159] M. Mouazen, A. Poulesquen, B. Vergnes: *Correlation between thermal and rheological studies to characterize the behavior of bitumen*; Rheologica Acta, Vol. 50. pp. 169–178 (2011)
- [160] MSZ EN 1097-7: *Kőanyag-halmazok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata. 7. rész: A kölszt anyagsűrűségének meghatározása. Piknométeres módszer.* (2000)
- [161] MSZ EN ISO 3838: *Ásványolaj és folyékony vagy szilárd ásványolajtermékek. A sűrűség vagy a relatív sűrűség meghatározása. Kapillárisdugós piknométeres és osztott bikapilláris piknométeres módszerek (ISO 3838:2004)* (2004)
- [162] Instruction Manual RheoStress RS80, Gebr. Haake GmbH, Karlsruhe
- [163] *Polimerek készítésének vizsgálata*; oktatási segédlet, BME Polimertechnika és Textiltechnológia Tanszék
- [164] H. Kim, J. Lee, S. Amirkhanian: *Rheology investigation of crumb rubber modified asphalt binders*; KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 14 pp. 839–843 (2010)
- [165] C. Liu, S. Wu, Q. Liu, G. Zhu: *Rheological characteristics of aged asphalt binder*; Journal of Central South University of Technology, Vol. 15. pp. 298–301 (2008)
- [166] Z. Vlachovicova, C. Wekumbura, J. Stastna, L. Zanzotto: *Creep characteristics of asphalt modified by radial styrene-butadiene-styrene copolymer*; Construction and Building Materials, Vol. 21. pp. 567–577 (2007)
- [167] F. Merusi, F. Giuliani: *Intrinsic resistance to non-reversible deformation in modified asphalt binders and its relation with specification criteria*; Construction and Building Materials, Vol. 25. pp. 3356–3366 (2011)
- [168] [https://bsa.bomag.com/bsa/boo/pdf\\_files/PRE92001001\\_SA06.pdf#toolbar=1&statusbar=1&messages=0&pagemode=thumbs&view=Fit](https://bsa.bomag.com/bsa/boo/pdf_files/PRE92001001_SA06.pdf#toolbar=1&statusbar=1&messages=0&pagemode=thumbs&view=Fit)
- [169] [http://www.epito.bme.hu/uvt/oktatas/feltoltesek/BMEEOUVAI05/ea\\_9\\_aszfaltrtg.pdf](http://www.epito.bme.hu/uvt/oktatas/feltoltesek/BMEEOUVAI05/ea_9_aszfaltrtg.pdf)

---

[170] J. De Visscher, A. Vanelstraete: *Practical test methods for measuring the zero shear viscosity of bituminous binders*; Materials and Structures, Vol. 37. pp. 360–364. (2004)

[171] Sz. Bíró, T. Gandhi, S. Amirkhanian: *Determination of zero shear viscosity of warm asphalt binders*; Construction and Building Materials, Vol. 23. pp. 2080–2086 (2009)