

# Tömörégi fok átszámítása az egyszerűsített- és módosított Proctor-vizsgálatok között

*Basic Theory of BC- Part5*

Subert István okl ép.m, okl, gazd.m.

## 1 Bevezető, előzmények

A tömörség a legfontosabb minőségi jellemző a teherbírás mellett a mélyépítésben. A tömörséget hagyományosan a mért helyi nedves sűrűségből a víztartalom ismeretében számítjuk a száraz sűrűséget, majd ezt viszonyítjuk egy kiválasztott viszonyítási sűrűséghez, százalékban megadva.

A viszonyítási sűrűséget ( $\rho_{dmax}$ ) Magyarországon a módosított Proctor vizsgálatból, néhány országban az egyszerűsített Proctor vizsgálatból veszik. Az alkalmazott tömörségmérések általában közvetett módon, a sűrűség mérésén alapulnak, mint amilyen a homok-kitöltéses, a víztérfogat-méréses, vagy az izotópos sűrűségmérés. Újabban más viszonyítási sűrűségek is ismeretesek és szabványosak lettek, mint a vibrosajtólasos, vibrokalapácsos, vagy vibroasztalos európai vizsgálati módszerek.

A dinamikus tömörségmérés elmélete viszonyítási sűrűséget nem használja, hanem a Proctor-görbe normalizált ( $\rho_{dmax}$ -szal elosztott) változatát alkalmazza, mint nedvesség korrekciós együtthatót. Csak a görbület által adódó vízérzékenység dominál, emiatt a dinamikus tömörségmérés gyakorlati előnye kiemelkedő.

A dinamikus tömörségmérés a süllyedési amplitudókkal jellemzett, térfogatváltozás mérésén alapuló vizsgálati módszer, melynél a Proctor-tömörítési munkának megfelelő ütéssorozattal hajtja végre - a helyszíni víztartalom mellett - a tömörítést. A dinamikus tömörségi fok a helyszíni relatív tömörség ( $T_{RE}$ ) és a nedvességkorrekciós tényező ( $T_{rw}$ ) szorzata, mely az adott nedvességtartalmú réteg helyszíni relatív tömörségi fokát az optimális víztartalom mellett létrehozható legnagyobb tömörségre átszámítva adja meg.

Magyarországon a hatályos ÚT2-1.222 „Utak és autópályák létesítésének általános geotechnikai szabályai” Műszaki előírás 4.5. pontja szabályozza a földművek minőségellenőrzését. Az alkalmazható tömörségmérési módszerek (4.5.1.2.pont), kiszűrő-hengeres, üregkitöltéses, izotópos, a BC dinamikus ejtősúlyos, penetrométeres, statikus tárcsás dinamikus modulus, FDVK vagy CCC teljes felületű gyorsulásmérős, valamint a beépítési technológiát ellenőrző módszerek lehetnek. Ezek közül összefüggések alapján lehet következtetni a tömörségi fokra a penetrométeres, statikus tárcsás dinamikus modulus, FDVK vagy CCC teljes felületű gyorsulásmérős módszerekkel. Viszonyítási sűrűséget kell alkalmazni a kiszűrőhengeres, üregkitöltéses, izotópos módszerrel meghatározott terepi száraz sűrűségek értékeléséhez. A viszonyítási sűrűség Magyarországon a töltéstest tömörségi követelményeinek értékeléséhez az ÚT2-1.222 szerint az MSZ-EN 13286-2 szerinti, módosított Proctor vizsgálat maghatározott legnagyobb száraz térfogatsűrűség. Ha a tervező előírja, lehetséges a viszonyítási sűrűség maghatározása az MSZ EN 13 286-3 és MSZ EN 13 286-4, MSZ EN 13 286-5 szerinti dinamikus módszerekkel, de ehhez azonban a követelményeket (határértékeket) külön kell meghatározni.

Fentiekből következik, hogy a CWA15846 (magyar ÚT2-2.124 ÚME) *B&C dinamikus tömörség és teherbírás vizsgálat az egyetlen, mely nem viszonyítással ad tömörségi fok eredményt*, hanem a Proctor-vizsgálat elméletéből levezethető a süllyedési amplitúdó – tömörségi fok összefüggése alapján. A tömörségi fokkal való ilyen számítás a többi módszerrel nem hajtható végre.

Jelen cikk bemutatja a B&C SP-LFWD (kistárcsás dinamikus tömörség- és teherbírás mérő) berendezéssel mért eredmények átszámításának módját, lehetőségeit, a német területen használatos egyszerűsített Proctor-vizsgálatnak megfelelő tömörségi fok értékeléshez.

## 2 Tömöríthetőségi vizsgálatok

### 2.1 Módosított Proctor-vizsgálat

A módosított Proctor-vizsgálat (EN 13286-2 7.4. pont) lényege, hogy egy 10cm átmérőjű, 12cm (+5cm feltét) magasságú hengerbe 5 rétegben 25-25 ütéssel talajmintát tömörítünk, 4,5 kg tömegű, 45cm magasságból leejtett, 50mm fejtátmérőjű döngölőrúddal. A tömörítés után a feltét-gyűrűt levéve a felületet lehúzzuk, majd a minta ismert térfogatából és tömegéből a nedves térfogatsűrűséget ( $\rho_n$ ) meghatározzuk. A tömörített anyagból vett minták kiszáritása után a víztartalmat meghatározzuk, majd számítjuk a tömörítéssel elért száraz térfogatsűrűséget:

$$\rho_d = \frac{1}{\left(1 + \frac{w\%}{100}\right)} \cdot \rho_n \quad (1)$$

ahol

$\rho_n$	testsűrűség (Mg/m <sup>3</sup> );
$w\%$	minta víztartalma;
$\rho_d$	száraz sűrűség (Mg/m <sup>3</sup> );

Ezt a műveletet legalább öt különböző víztartalmú mintával megismételve, a kapott száraz térfogatsűrűség – víztartalom pontokat ábrázoljuk. A görbe maximuma a legnagyobb száraz térfogatsűrűség. Célszerű számítani a telítési vonalakat, hogy a helyszínen mért víztartalmat, a réteg telítettségét és tömöríthetőségét majd e szempontból is értékelni lehessen. A módosított Proctor görbe maximuma és az ehhez tartozó optimális víztartalom ( $w_{opt-m}$ ,  $\rho_{dmax-m}$ ) az anyag laboratóriumi alkalmassági vizsgálatának része. A munkavégzés mennyiségének számításakor a döngölő felületét kell figyelembe venni. A döngölés száma a kokilla területe és a döngölő területének hányadosa  $F_1/F_2=4$  miatt átlagosan  $(5réteg \times 5ütés)/4=125/4=31,25$  átlagos tömörítő ütésszám /cilinder a teljes edényfelületre vetítve. A munkavégzés értéke a fenti adatokkal számolva módosított a Proctor-vizsgálatnál  $W_{mPr} = 4,5 \times 0,45 \times 9,81 \times 31,25 = 621J$  (2)

### 2.2 Egyszerűsített Proctor-vizsgálat

Az egyszerűsített Proctor-vizsgálat során (EN 13286-2, 7.3.pont) 10cm átmérőjű, 12cm magasságú hengerbe 3 rétegben 25-25 ütéssel tömörítjük a talajmintát, 2,5 kg tömegű, 30,5 cm magasságból leejtett, 50mm fejtátmérőjű döngölővel. A feltétgyűrűt levéve, a felületet lehúzzuk, majd a minta ismert térfogatából és tömegéből a nedves

térfogatsűrűséget meghatározzuk. A talajminta kiszárítása után számított víztartalom ismeretében meghatározzuk a száraz térfogatsűrűségeket, ugyanúgy, mint a módosított Proctor-vizsgálatnál ( $w_{opt-s}$ ,  $\rho_{dmax-s}$ ). A döngölés száma a kokilla-terület/döngölő terület=4 miatt átlagosan  $75/4=18,75$  átlagos tömörítő ütés/cilinder. A munkavégzés az egyszerűsített Proctor vizsgálatnál (ha a döngölt felületet vesszük figyelembe):

$$W_{s,Pr} = 2,5 \times 0,305 \times 9,81 \times 18,75 = 140J \quad (3)$$

A módosított és az egyszerűsített Proctor-vizsgálat legnagyobb száraz térfogatsűrűségének aránya jellemzően 1,03-1,15 közötti, a tömörítési munkavégzés aránya pedig 4,4 azaz a módosított Proctor lényegesen nagyobb a tömörítési munkavégzést alkalmaz.

### 2.3 Egyéb tömöríthetőségi vizsgálatok

Újabban már nem csak a döngölős Proctor-vizsgálatok, hanem más, vibrációs tömörítési modellt alkalmazó vizsgálati módszerek alkalmazása is megengedett Európában, a viszonyítási sűrűség meghatározására. Ezek előnyei a szemcseleaprózódás elkerülésében jelentkeznek, másrészt a valós modellhatáshoz közelebb állnak. Ilyen vizsgálati lehetőségek:

EN 13286-3 Kötőanyag nélküli és hidraulikus kötőanyagú keverékek. 3. rész: A laboratóriumi viszonyítási térfogatsűrűség és a víztartalom vizsgálati módszerei. Vibrosajtolás szabályozott paraméterekkel.

EN 13286-4 Kötőanyag nélküli és hidraulikus kötőanyagú keverékek. 4. rész: A laboratóriumi viszonyítási térfogatsűrűség és a víztartalom vizsgálati módszerei. Vibrokalapács.

EN 13286-5 Kötőanyag nélküli és hidraulikus kötőanyagú keverékek. 5. rész: A laboratóriumi viszonyítási térfogatsűrűség és a víztartalom vizsgálati módszerei. Vibroasztal.

## 3 Választott kiindulási adatok

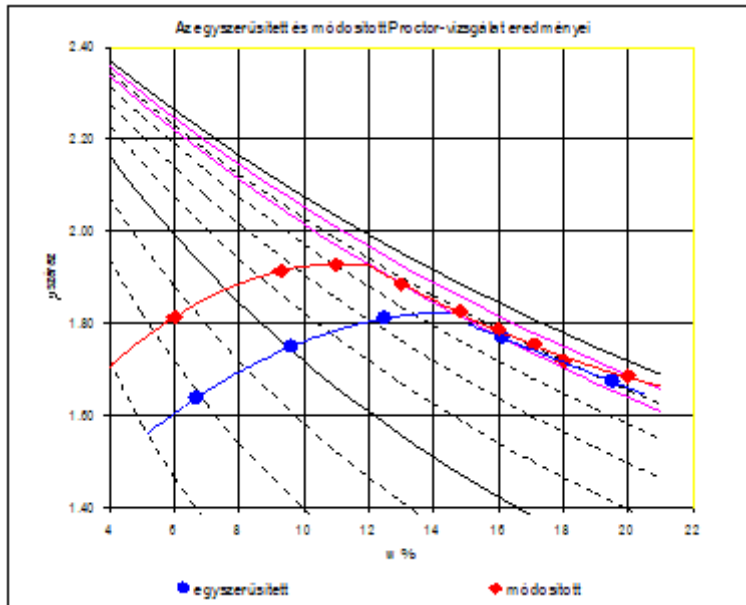
Tanulmányunkban egy korábban vizsgált iszapos homokliszt talaj vizsgálati eredményeit választottuk ki, melyre mind a módosított, mind az egyszerűsített Proctor vizsgálat egy időben készült el, a Széchenyi István Egyetem Geotechnikai laboratóriumában.

A módosított Proctor-vizsgálat eredményei:  $w_{opt-m} = 11,0\%$ ,  $\rho_{dmax-m} = 1,93 \text{ g/cm}^3$

$w_m$ [%]	6,0	9,3	13,0	14,8	17,1
$\rho_{d-m}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,814	1,912	1,885	1,803	1,722
$T_{rg-m}$ [%]	94,0	99,1	97,7	93,4	89,2
$T_{rw-m}$	0,940	0,990	0,977	0,934	0,892

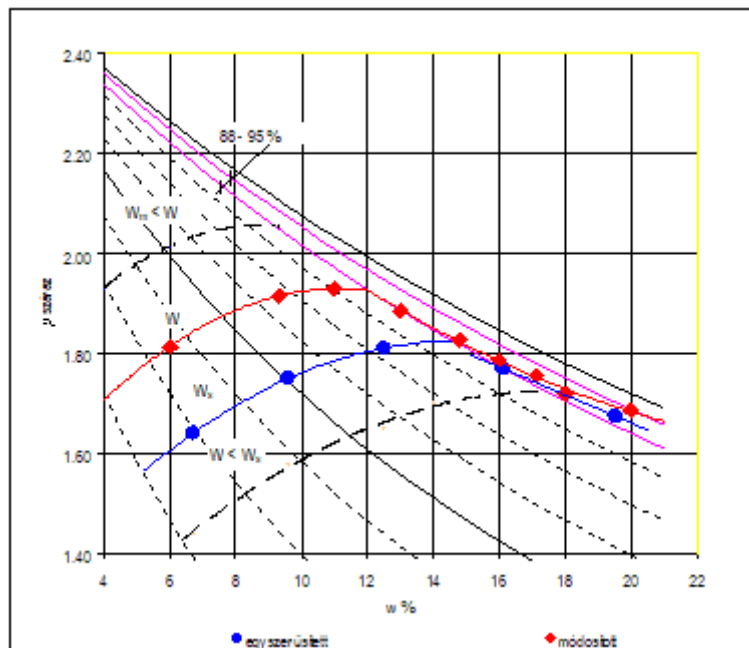
Az egyszerűsített Proctor-vizsgálat eredményei:  $w_{opt-s} = 13,5\%$ ,  $\rho_{dmax-s} = 1,82 \text{ g/cm}^3$

$w_s$ [%]	6,7	9,6	12,5	16,1	19,5
$\rho_{d-s}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,640	1,726	1,811	1,773	1,670
$T_{rg-s}$ [%]	90,1	94,8	99,5	97,4	91,8
$T_{rw-s}$	0,901	0,948	0,995	0,974	0,918



1. ábra Az egyszerűsített és módosított Proctor vizsgálati eredményei

A munkavégzés nagyságának hatása jól látható a Proctor-görbék elhelyezkedéséből. A száraz ágak közel párhuzamosak, a nedves ágak a telítési vonalba illeszkedők. Az ábrából következik, hogy az intenzívebb tömörítés esetén a szükséges (optimális) víztartalom csökken.



2. ábra optimális víztartalom és tömörítési munkavégzés összefüggése

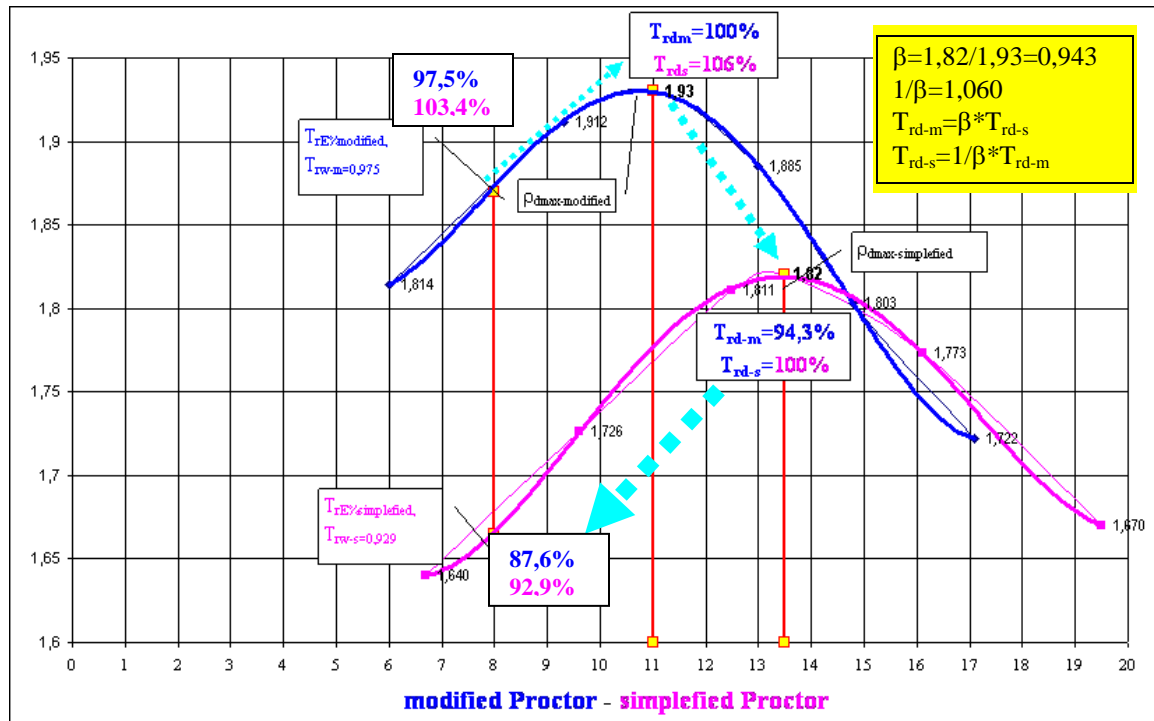
A víztartalom növelésével, a nedves ágon jól láthatóan egyre kisebb tömörítési munka kell, mellyel egyre kisebb tömörség érhető el. A 3.sz ábra szerinti jelleg Kézdi Professor szerint elemzett és leírt anyagviselkedés, melyből az is következik, hogy a jelenlegi két

szint (egyszerűsített – módosított), bármikor tovább bővíthető, annak csak a tömörítő gépek technikai fejlődése szab határt. Ha tehát a *laboratóriumi tömöríthetőségi vizsgálatnál nagyobb munkavégzéssel tömörítünk a hengerrel, akkor a laboratóriumban megállapított optimális víztartalomnál kisebb lesz a valós helyszíni optimális víztartalom.* A jelenleg alkalmazott, egyszerűsítettnek, módosítottnak nevezett tömöríthetőségi munkavégzés tehát egy választás, vagy egy megállapodás.

#### 4. Átszámítás az egyszerűsített és módosított Proctor szerinti tömörségi fokok között

A B&C dinamikus tömörség- és teherbírás mérő berendezés a módosított Proctornak megfelelő munkavégzést alkalmaz, ezért az egyszerűsített Proctor-vizsgálathoz szokott, az azt alkalmazó országokban való alkalmazása az átszámítás nélkül korlátozott. Nincs azonban akadálya annak, hogy ezt a számítást elvégezzük, így a B&C berendezés alkalmazását lehetővé tesszük.

Az adott talaj, szemcsés réteg anyagából az alkalmassági vizsgálat során minkét Proctor vizsgálatot elvégezzük. A szokásos jellemzőket és a nedvességkorrekciós görbét mindkettőre meghatározzuk. Az ábrákon és képletekben az egyszerűsített Proctor jellemzőknél „s” (simplefied), míg a módosítottnál „m” (modified) indexet alkalmaztuk.



4. sz. ábra. Módosított és egyszerűsített Proctor átszámítása

Az átszámítási szorzót a két Proctor vizsgálatból kapott legnagyobb száraz sűrűségek aránya adja:

$$\beta = \frac{\rho_{d \max-s}}{\rho_{d \max-m}}$$

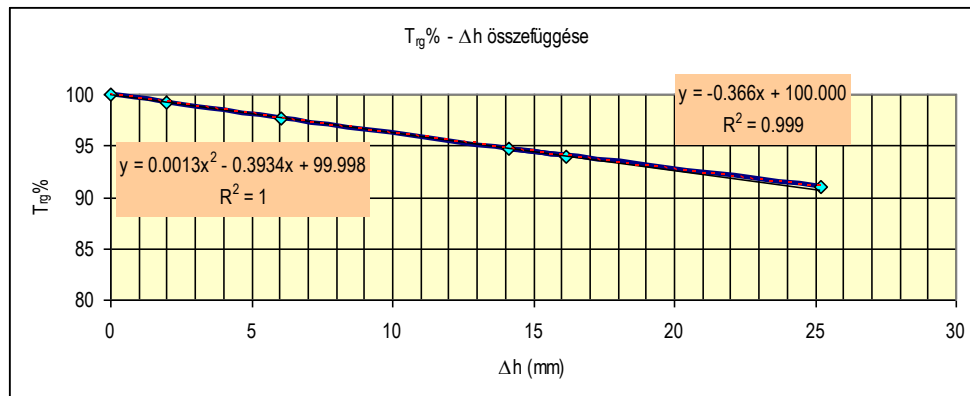
Az egyszerűsített Proctor munkavégzésének megfelelő tömörségi fok átszámításához (4. ábra), a módosított Proctor munkavégzéssel mért helyszíni relatív tömörségből számítjuk a módosított tömörségi fokot, majd a  $\beta$  tényezővel az egyszerűsített tömörségi fokra transzformáljuk azt. (Ezt oda-vissza is számíthatjuk, az ábrán külön színekkel jelöltük).

A példa szerint egyszerűsített Proctor szerinti 100% tömörség csak 94,3%-ot jelent a módosított Proctor szerinti skálán. Mivel a hengerlési munka megfelelőségének elbírálására a  $T_{RE}\%$  helyszíni relatív tömörségi fokot alkalmazzuk, azt is számítani kell. Ezt az egyszerűsített Proctor görbéből,  $T_{rw-s}$  nedvesség-korrektós együtthatóval vesszük figyelembe.

#### 4.1. Alakváltozás – tömörségi fok összefüggés az egyszerűsített Proctor vizsgálatnál

A dinamikus tömörségmérés elmélete a Proctor vizsgálatból elméleti úton levezethető. A  $G_{száraz} = \text{constans}$  modelltől számítjuk a tömörségi fok és az alakváltozás  $T_{rd}\% - \Delta h$  összefüggését, a merekséget jellemző  $\Phi$  értékeit, mind a módosított ( $\Phi_m$ ), mind az egyszerűsített ( $\Phi_s$ ) Proctor-vizsgálat adataiból. Azt tapasztaltuk, hogy a  $\Phi$  értéke független attól, hogy módosított, vagy az egyszerűsített vizsgálatból számítjuk.

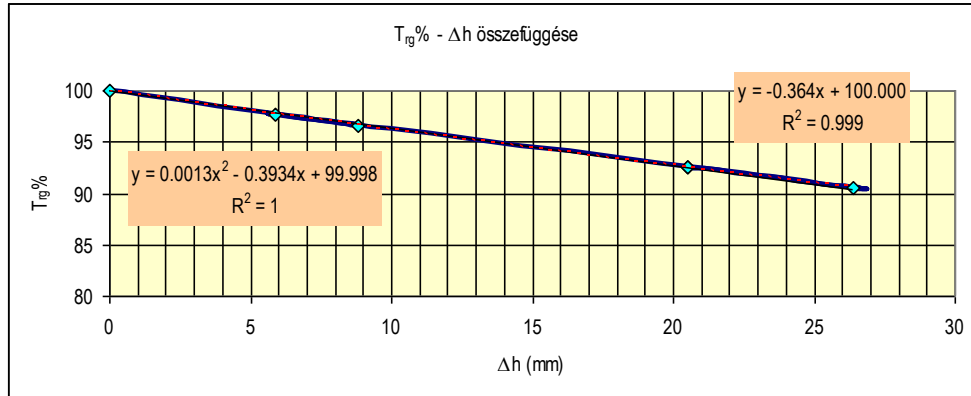
- a módosított Proctor-vizsgálat esetén:  $\Phi_m = 0,366$  adódott (5. ábra).



5. ábra. A tömörségi fok és az összenyomódás összefüggése a módosított Proctor esetén

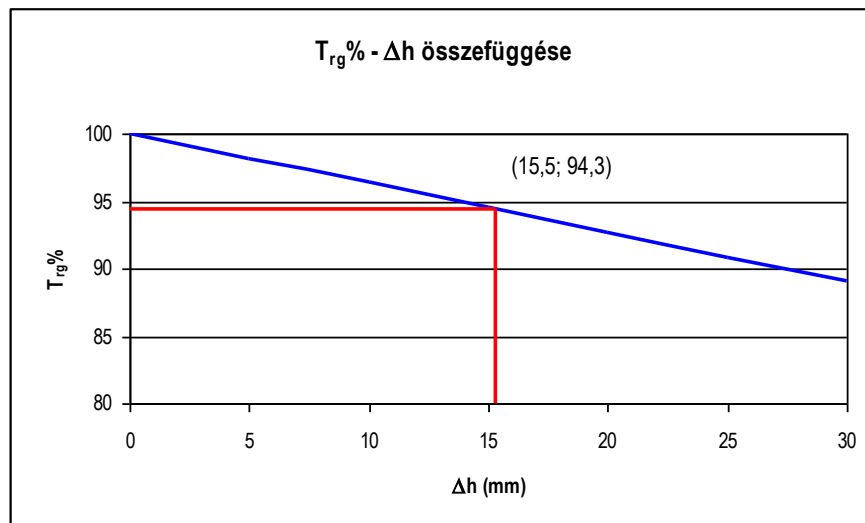
- az egyszerűsített Proctor-vizsgálat esetében  $\Phi_s = 0,364$  adódott (6-os ábra).

A módosított és egyszerűsített Proctor  $T_{rd}\% - \Delta h$  egyenese az azonos  $\Phi$  érték miatt párhuzamosak egymással és egymásba átszámíthatók.



6. ábra. A tömörségi fok és az összenyomódás összefüggése az egyszerűsített Proctor esetén

A tömörségi fok és az összenyomódás értékéből átlagolt összefüggés:  
 $T_{rE} \% = -0,366\Delta h + 100$



7. ábra. A tömörségi fok és az összenyomódás átlagos összefüggése

Az egyszerűsített Proctor-vizsgálatnál, a legnagyobb száraz sűrűségénél ( $T_{rd-s}\% = 100\%$ ,  $T_{rw-s} = 1$ ,  $w_{opt-s} = 13,5\%$ ) a módosított Proctor szerinti tömörségi fokban kifejezve  $T_{rd-m}\% = \beta * 100$ , azaz  $94,3\%$ . A  $G_{száraz} = \text{constans}$  modellből meghatározott összefüggés szerint az ehhez tartozó alakváltozás számítható:

$$\Delta h = 1/\Phi * \Delta T_{rd}\% = 1/0,366 * 5,7 = 15,5 \text{ mm}$$

Ez azt jelenti, hogy ha az egyszerűsített tömörségi fok  $100\%$ , akkor a módosított Proctor szerinti  $100\%$ -os tömörséghez a  $25\text{cm}$  vastag rétegen még  $15,5\text{mm}$  tömörödési alakváltozás szükséges. Emiatt a  $\beta$  szorzó kifejezhető a módosított Proctor így számított tömörségi fokából is (ha az egyszerűsített Proctor szerinti tömörségi fok  $100\%$ ):

$$\beta = \frac{T_{rg-m} \%}{100\%}$$

## 4.2 Mintapélda

### Helyszíni mérés eredménye

A jelen mintapélda szerint a helyszínen mért dinamikus tömörség értéke  $T_{rE-m}\% = 96,6\%$  a B&C méréssel meghatározva, iszapos homok (siSa) esetében,  $w_t = 9,6\%$  természetes víztartalom mellett, mely  $T_{rw-m} = 0,996$  nedvességkorrekciós tényezőt jelent.

### Módosított Proctornak megfelelő tömörségi fok számítása

Mérési eredmény a dinamikus tömörségi fokhoz a  $T_{rd-m}\% = T_{rE-m}\% \cdot T_{rw-m}$  alap képlet alapján:  $T_{rd-m}\% = 96,6\% \cdot 0,996 = 96,2\%$

### Egyszerűsített Proctornak megfelelő tömörségi fok számítása

Ekkor a  $T_{rd-s}\% = 1/\beta \cdot T_{rd-m} = 1/0,943 \cdot 96,2\% = 102,0\%$ , az egyszerűsített Proctornal számított tömörség. Az egyszerűsített Proctor optimális víztartalma  $w_{opt-s} = 13,5\%$ . A természetes víztartalom ugyanaz  $w_t = 9,6$ , mely most  $T_{rw-s} = 0,948$  nedvességkorrekciós tényezőt jelent.

Tudjuk, hogy a 100%-nak megfelelő módosított Proctor tömörítési munkához tartozó egyszerűsített Proctor-görbe legnagyobb lehetséges tömörsége 100%, a módosított Proctor szerinti értelmezésben 94,3%, az ennél nagyobb tömörségi fok érték a módosított Proctor szerinti skálán emiatt 100%-nál nagyobb egyszerűsített tömörségi fokot is eredményezhet. Ezért a német területen az előírásokban is gyakori a 100% feletti tömörségi fok előírása.

### Egyszerűsített Proctornak megfelelő helyszíni relatív tömörségi fok számítása

Az egyszerűsített Proctornal számított tömörségből számíthatjuk az annak megfelelő helyszíni relatív egyszerűsített tömörségi fokot (On Site Simplefied Relativ Compaction Rate = OSSRCR), de természetesen a saját, egyszerűsített Proctorból meghatározott  $T_{rw-s}$  nedvességkorrekciós együtthatóval:

$$T_{rE-s} = \frac{T_{rd-s}}{T_{rw-s}} \quad (\%)$$

A hengerlési munka megfelelőségét jellemző  $T_{rE-s}$  helyszíni relatív egyszerűsített tömörségi fok a mért  $w_t = 9,6\%$ -nál az egyszerűsített Proctorból meghatározott  $T_{rw-s}$  görbe alapján  $T_{rw-s} = 0,948$ , azaz  $T_{rE-s} = \frac{102,0}{0,948} = 107,6\%$ , azaz az adott víztartalomnál

alkalmazott helyszíni relatív egyszerűsített tömörségi fok  $T_{rE-s} = 108\%$  az egyszerűsített Proctornak megfelelő munkavégzéssel értelmezett esetben.

## 5 Helyszíni relatív tömörségi fok számítása különböző munkavégzéssel

A helyszínen, dinamikus módszerrel *a módosított Proctor munkavégzésnek megfelelő* helyszíni relatív tömörséget az adott természetes víztartalom mellett úgy határoztuk meg, hogy az első ütéssel mért tömörségi állapot és a 18 ütéssel tömörödési görbét hozunk létre, majd abból deformációs mutatót képezzünk. A helyszíni mérést jellemző maradó



alakváltozásból számított tömörséget, helyszíni relatív tömörségnek nevezzük és az adott víztartalom mellett elérhető tömörséget jellemző, legjobb esetben 100% érték. A relatív tömörségi fok a következő képlettel határozható meg:

$$T_{rE-m} = 100 - \Phi \cdot D_{m-m},$$

ahol

$D_{m-m}$  a módosított Proctor munkavégzéssel számított deformációs együttható  
 $\Phi$  a meredsége a Gsz=const modellből számított  $\Delta V_{mm} - T_{rp}\%$  összefüggésnek ( $\Phi = 0,365 \pm 0,025$ ) - a 2018 évi módosítás előtt

A módosított Proctor szerinti munkavégzéskor a  $D_m$  értékét az alábbi súlyozott átlaggal, a summa maradó alakváltozásból számítjuk. A teljes alakváltozás  $h_i$  a rugalmas és maradó alakváltozások összege. Így a süllyedés negatív növekménye a következő módon számítható:

$$s_i = \frac{(h_i - h_{i+1})}{1} i \dots$$

ahol  $h_i - h_{i+1} \geq 0$ , ha  $h_i - h_{i+1} < 0$ , akkor  $s_i = 0$

A rugalmas alakváltozás tehát kiesik a számításból. A süllyedés növekménye  $s_i$  az egyes ütéseknel egy numerikus derivált. Ezért ez a lépés értelmezhető úgy, hogy minden ejtésnél numerikus derivált. Az ejtésszám alapján visszafelé becsljük az addigi teljes süllyedést. Ezt a súlyozott átlagot a deformációs együtthatónak ( $D_{m-m}$ ) nevezzük, a következő, általánosított módon számítható

$$D_{m-m}, mm = \frac{\left[ \sum_{i=1}^{i=17} d_i \cdot \sum_1^i SUM \Delta s_i \right]}{17} \text{ ahol } SUM \Delta s_i = \Delta s_1 + \Delta s_2 + \dots + \Delta s_i,$$

ahol a véglegesnek tekinthető alakváltozás rész  $\Delta s_i = s_{i+1} - s_i$ , és  $d_i$  az ejtés száma ( $i=1-18$ ).

A  $h_i$  az ejtésekéből létrejött rugalmas és maradó (teljes) alakváltozás,  $i = 1..18$ .

$h_1 \geq h_2 \geq h_3 \dots \dots h_{17} \geq h_{18}$  Ha a  $SUM \Delta s_i = S_i$  jelöljük, akkor

$$S_1 = 1 \cdot (h_1 - h_2)$$

$$S_2 = 2 \cdot [ (h_1 - h_2) + (h_2 - h_3) ]$$

$$S_3 = 3 \cdot [ (h_1 - h_2) + (h_2 - h_3) + (h_3 - h_4) ]$$

...

$$S_{16} = 16 \cdot [ (h_1 - h_2) + (h_2 - h_3) \dots + \dots + (h_{17} - h_{16}) ]$$

$$S_{17} = 17 \cdot [ (h_1 - h_2) + (h_2 - h_3) + (h_3 - h_4) + \dots + \dots + \dots + (h_{17} - h_{18}) ]$$

**Az egyszerűsített Proctor munkavégzésnek megfelelő helyszíni relatív tömörséget az előbb bemutatott átszámítási módszeren kívül úgy is meghatározhatnánk, hogy csak az annak megfelelő munkavégzést (ejtésszámot alkalmazzuk). A süllyedési amplitúdókból ekkor csak 6 ütéssel kellene a tömörödési görbét létrehozni, deformációs mutatót ebből**

számíthatjuk. A helyszíni „egyszerűsített Proctor-állapotot” létrehozó maradó alakváltozás göbéjét, a helyszíni relatív egyszerűsített tömörségnek nevezzük és az adott helyszíni víztartalom mellett elérhető legnagyobb tömörséget jellemző érték. Jelentős hátránya e módszernek, hogy ez esetben 100% feletti egyszerűsített Proctor tömörséget nem lehet mérni, ezért az előző, átszámításos módszer alkalmazása várható.

Az elmélet azonban az egyszerűsített Proctornak megfelelő helyszíni relatív tömörségi fok számítására is adaptálható:

$$T_{rE-s} = 100 - \Phi \cdot D_{m-s}, \text{ - a 2018 évi módosítás előtt}$$

ahol  $D_{m-s}$  a deformációs együttható.

A teljes alakváltozás (mint előbb) itt is  $h_i$  a rugalmas és maradó alakváltozások összege. Így a süllyedés növekménye a következő módon számítható

$$s_i = \frac{(h_i - h_{i+1})}{1} i \dots$$

(ahol  $h_i - h_{i+1} \geq 0$ , ha  $h_i - h_{i+1} < 0$ , akkor  $s_i = 0$ )

A rugalmas részt tehát kiküszöböltük a számításokban. A fenti súlyozott átlagot egyszerűsített Proctorhoz tartozó deformációs együtthatónak ( $D_{m-s}$ ) nevezzük, a következő módon számítható

$$D_{m-s}, mm = \frac{\left[ \sum_{i=1}^{i=6} d_i \cdot \sum_1^i SUM \Delta s_i \right]}{17}$$

A  $\Phi_{-s}$  értéke empirikus módon meghatározott tényező, az egyszerűsített Proctor-vizsgálat  $Gsz = \text{constans}$  modellből számított  $\Delta V_{mm} - T_{rp}\%$  egyenes lineáris együtthatója.

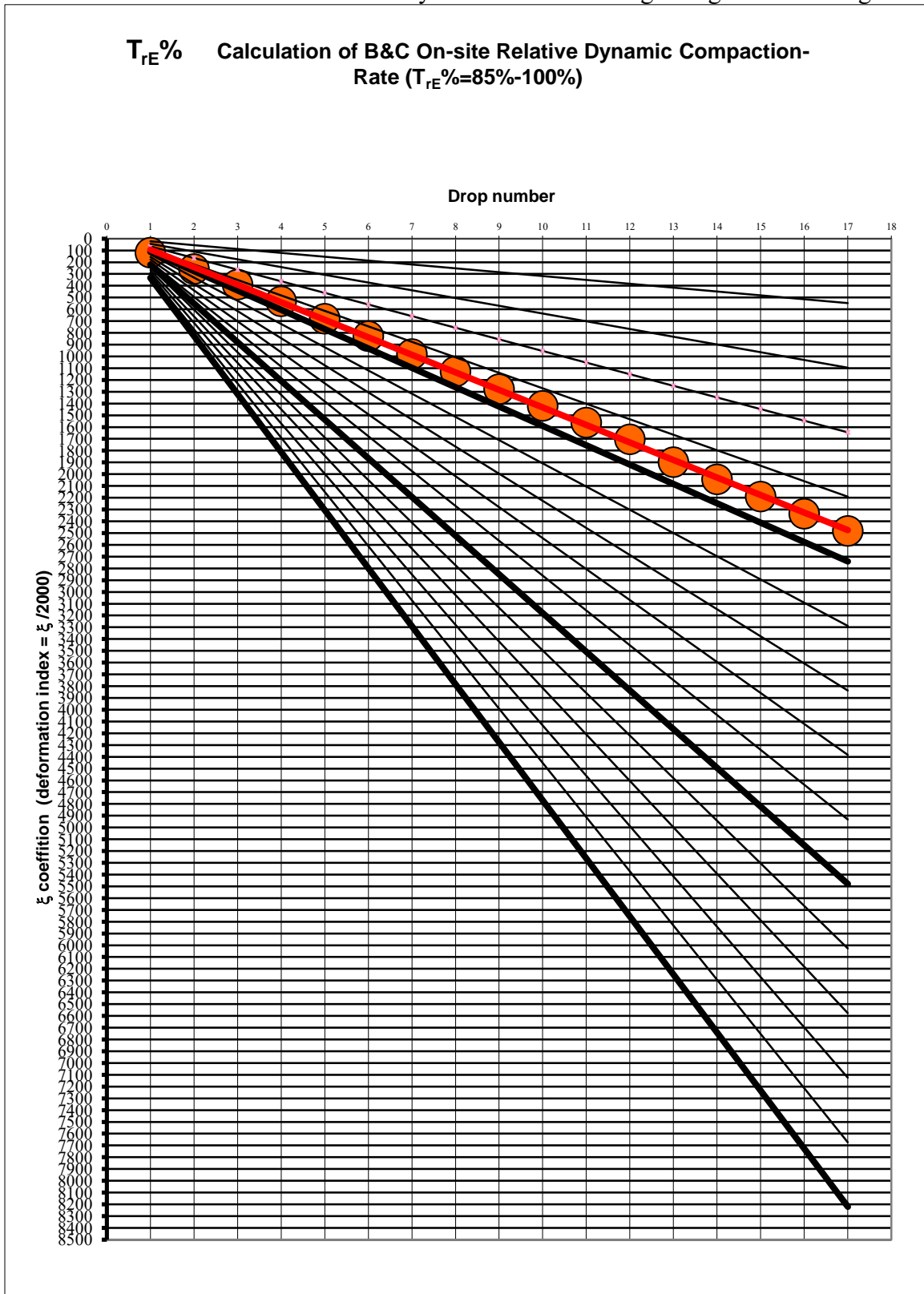
A  $h_i$  az ejtésekben létrejött rugalmas és maradó (teljes) alakváltozás,  $i = 1..6$ .

$$h_1 \geq h_2 \geq h_3 \dots \dots \dots h_{17} \geq h_{18}$$

*A dinamikus tömörségmérés elmélete tehát ugyanúgy alkalmas az egyszerűsített, mint a módosított Proctor munkavégzésnek megfelelő tömörségi fok számítására.*

Azzal, hogy számos előírás az egyszerűsített Proctor alkalmazási területén nagyobb mint 100%, értelemszerűen és célszerűen az általános módon kell mérni a módosított Proctor szerinti munkavégzéssel, majd ezt átszámítani az egyszerűsítettre. Ily módon a 100% feletti tömörségi fokok is meghatározhatók. Ezek legnagyobb értéke legfőljebb  $100 \cdot (1/\beta)$  lehet. A  $\xi = 2000/D_m$  bevezetésével a méréseket grafikusán is fel lehet dolgozni (8 ábra)

8. ábra Helyszíni relatív tömörségi fok grafikus feldolgozása



## 6 Összefoglalás

A tömörség a legfontosabb minőségi jellemző a mélyépítésben a teherbírás mellett. A tömörségméréseknél viszonyítási sűrűségként a módosított Proctor vizsgálattal meghatározott legnagyobb száraz sűrűséget ( $\rho_{dmax}$ ) használjuk, de német területeken még ma is alkalmazzák az egyszerűsített Proctorhoz történő viszonyítást. A módosított és az egyszerűsített Proctor legnagyobb száraz térfogatsűrűségének aránya jellemzően 1,03-1,15 közötti, a tömörítési munkavégzés aránya 4,4.

A különböző nagyságú munkavégzések jellegzetességei a Proctor-görbékből jól követhetők. A száraz ágak közel párhuzamosak, a nedves ágak a telítési vonalba illeszkedők. Egy kiválasztott munkavégzésnél intenzívebb tömörítés esetén tehát a szükséges víztartalom csökken, illetve a nedves ágon láthatóan a kisebb tömörítési munkával az optimális víztartalom növekedése törvényszerű, de kisebb tömörséget eredményez.

Kidolgoztuk az a módszert, mellyel a B&C dinamikus SP-LFWD mérőberendezéssel az egyszerűsített Proctor szerinti helyszíni relatív tömörségi fok is mérhető. Ennek egyik lehetősége az átszámítás, a másik a kevesebb ejtésszám. A két módszer vizsgálata szerint előnyösebb annak választása, hogy a hagyományosan, a módosított Proctor szerinti munkavégzéssel meghatározott mérési eredményt átszámítjuk az egyszerűsített Proctorra, a  $\beta$  tényező alkalmazásával. A transzponálás mindig csak a  $T_{rd-m}\%$ ,  $w_{opt-m}$  értékénél a  $T_{rd-s}\%$ ,  $w_{opt-s}$  értékére történhet és az egyszerűsített Proctor helyszíni relatív tömörségét már a  $T_{rw-s}$  egyszerűsített Proctor nedvességkorrekciós együtthatójának figyelembe vételével kell számítani, a méréskor tapasztalt helyszíni víztartalomra.

A B&C dinamikus tömörség- és teherbírásmérő berendezés kis szoftvermódosítással alkalmassá tehető mindkét tömörségi fok szerinti eredmény megadására. A szükséges ejtés-számok azonban arra figyelmeztetnek, hogy az egyszerűsített Proctor és a módosított Proctor szerinti munkavégzés közötti különbség igen nagy. A korszerű tömörítő gépek, hengerek teljesítményeit figyelembe véve a kivitelezés várható fejlődési iránya a magasabb tömörítési munkavégzés felé mutat.

### Irodalomjegyzék

CWA 15 846 Measuring Method for Dynamic Compactness & Bearing Capacity with SP-LFWD  
Comparison of B&C LFWD and sand filling method – Ms. Panarat – Ramkhamhaeng University, Thailand

D. Adam – F. Kopf : Operational devices for compaction optimization and quality control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device)

Dr. E. Imre – T.Q. Phong – I. Subert: The B&C in site compactness-rate test – the basic method

Dr. Kézdi Árpád: Talajmechanika I. TK, 1972 (Soil Mechanics Part I)

Dr. Pusztai József – Dr. Imre Emőke – Dr. Lőrincz János – Subert István – Trang Quoc Phong: Nagyfelületű, dinamikus tömörségmérés kifejlesztése helyazonosítással és a tömörítőhengerek süllyedésének folyamatos helyszíni mérésével (Development of large-area, dynamic compactness

measurement by site identification and the continuous on-site measurement of the settlement of compacting rollers). COLAS Report. 2007.

EN 13 286-2 Kötőanyag nélküli és hidraulikus kötőanyagú keverékek 2. Vizsgálati módszerek a laboratóriumi viszonyítási térfogatsűrűség és víztartalom meghatározására. Proctor-tömörítés (Mixtures without binding material and with hydraulic binding material 2. Test methods for the determination of the laboratory reference volume density and water content. Proctor-compaction)

EN 13 286-3 Kötőanyag nélküli és hidraulikus kötőanyagú keverékek 3. A laboratóriumi viszonyítási térfogatsűrűség és víztartalom vizsgálati módszerei. Vibrosajtolás szabályozott paraméterekkel

EN 13 286-4 Kötőanyag nélküli és hidraulikus kötőanyagú keverékek 4. A laboratóriumi viszonyítási térfogatsűrűség és víztartalom vizsgálati módszerei. Vibrokalapács

EN 13 286-5 Kötőanyag nélküli és hidraulikus kötőanyagú keverékek 5. A laboratóriumi viszonyítási térfogatsűrűség és víztartalom vizsgálati módszerei. Vibroasztal

Fáy M. – Király Á. – Subert I.: Egy földmű-tömörési anomália feltárása és megoldása (Presentation and solution of an anomaly of earthwork density). Mélyépítéstudományi Szemle, 2006.

Fáy M. – Király Á. – Subert I.: Közúti forgalom igénybevételének modellezése új, dinamikus tömörség- és teherbírásméréssel (Modelling of the straining of public road traffic by the new, dynamic compactness and bearing capacity measurement). Városi Közlekedés, 2006.

Király Á. – Morvay Z.: Földmunkák minősítő vizsgálatainak hatékonysági kérdései Magyarországon (Efficiency issues of qualification tests used for earthworks, in Hungary)

Metróber: ER-TRG01 Ellenőrzési rendszer próbatömörítések végrehajtására és értékelésére az M7 Zamárdi–Balatonszárszó szakaszán (Control system for the implementation and the evaluation of test compactness on the road section of M7 between Zamárdi and Balatonszárszó). Mérnöki Eljárási Utasítás. p. 10.

MSZ 15 320 Földművek tömörségének meghatározása radioizotópos módszerrel (Determination of the compactness of earthworks by radioisotopic method)

Report on usage of Andreas dynamic load bearing capacity and compactness deflectometer, University of Ljubljana, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

Subert I. – Phong T.Q.: Az izotópos és dinamikus tömörségi fok szórásanalízise 2007–2008. (Analysis of Standard deviation of the isotopic and the dynamic compactness rate)

Subert I. – Phong T.Q.: Proctor-vizsgálatok új értelmezési lehetőségei (Options for new interpretations of Proctor-tests). Mélyépítéstudományi Szemle, 2007.

Subert I. – Phong T.Q.: Sűrűségkorrekció alkalmazása dinamikus ejtősúlyos berendezéseknél, 2008.

Subert I.: A dinamikus tömörség- és teherbírásmérés újabb paraméterei és a modulusok átszámíthatósági kérdései (Recent parameters of dynamic compactness and bearing capacity measurement and recalculation issues of modulus). Közúti és Mélyépítési Szemle, 55. évf. 2005. 1. sz. p. 5.

Subert I.: B&C – egy hasznos társ (B&C – a useful partner). Magyar Építő Fórum, 2004/25. szám p. 36.

Subert I.: B&C dinamikus tömörségmérés (B&C dynamic compactness measurement). Mélyépítés, 2004 október–december pp. 38–39.

Subert I.: Dinamikus tömörségmérés a hazai autópályákon és városi helyreállításokon (Dynamic compactness measurement on Hungarian highways and urban reconstructions). Geotechnika Konferencia, Ráckeve. (2006. október 17–18.)

Subert I.: Dinamikus tömörségmérés aktuális kérdései. A dinamikus tömörségmérés újabb tapasztalatai (Recent issues of dynamic compactness measurement. New experiences of the dynamic compactness measurement). Geotechnika Konferencia, Ráckeve (2005. október 18–20.)

Subert I.: Új, környezetkímélő, gazdaságos mérőeszközök a közlekedésépítésben (New, environmental-friendly, economical measuring instruments in traffic building). Geotechnika Konferencia, Ráckeve (2004. október 26–27.)

Subert: Method for measuring Compactness-rate with New Dynamic LFWD. XIII. Danube–European Conference on Geotechnical Engineering Ljubljana, Slovenia, 2006.

ÚT 2-2.124 Dinamikus tömörség- és teherbírásmérés kistárcsás könnyűejtősúlyos berendezéssel (Dynamic compactness and bearing capacity measurement with small-plate light falling deflectometer)