



# Reziliens modulus mérése és talajstabilizációknál mért értéke

## Back Márta, Szendefy János<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnika és Mérnökeológia Tanszék

E-mail: [back.marta@epito.bme.hu](mailto:back.marta@epito.bme.hu), [janos@epito.bme.hu](mailto:janos@epito.bme.hu)

### KIVONAT

Hazánkban a földművek teherbírását jelenleg is statikus teherbírasi mérőszámokkal jellemzik. Azonban célszerű lenne áttérni a forgalmi terhelést jobban modellező dinamikus terhelésből számítható teherbírasi modulusra a reziliens modulusra. A cikk bemutatja a reziliens modulus mérésének menetét, valamint az első hazai mérési eredményeket, amelyek stabilizált talajokkal készültek. Mindezek mellett összehasonlítja a közvetlen méréssel kapott eredményeket a CBR-ből számítottakkal.

#### Back Márta

*Építőmérnök MSc hallgató, BME Geotechnika és Mérnökeológia Tanszék.*

#### Szendefy János

*Okl. építőmérnök, PhD, egyetemi adjunktus BME Geotechnika és Mérnökeológia Tanszék*

## 1. BEVEZETÉS

Hazánkban jelenleg a típuspályaszerkezetek használatával történik az útpályaszerkezet méretezése. A módszer hátránya, hogy alkalmazásával egy magasabb teherbírású földmű előnye nem érvényesül, ami lehetővé tenné a pályaszerkezetek vastagságának hatékony csökkentését. Ennek lehetővé tétele érdekében egy alternatív pályaszerkezet méretezési eljárást dolgoztak ki [Pethő-Primusz-Tóth 2016], amely már számolni tud a korábban elvárt földműteherbírásról magasabb értékekkel is. Az alternatív pályaszerkezet méretezéséhez alkalmazott összefüggések a földmű dinamikus, forgalmi terheléshez hasonló terhelésből számítható rugalmassági modulusát, az úgynevezett reziliens modulus ( $M_R$ ) értékét használják.

A reziliens modulus ( $M_R$ ) az útpályaszerkezetek alsó rétegeként definiált földmű réteg dinamikus terhelésnél figyelembe vehető rugalmassági modulusa. A földmű  $M_R$  értéke, mint bemenő paraméter szolgál az útpályaszerkezetek méretezésénél, értéke nagy hatással van a pályaszerkezet alap és burkolati rétegeinek vastagságára és élettartamára.

A reziliens modulus ( $M_R$ ) közvetlenül meghatározható dinamikus triaxiális berendezés segítségével, azonban ilyen vizsgálat hazánkban korábban még nem készült. A dinamikus triaxiális vizsgálatok mellett az  $M_R$  meghatározásra a szakirodalom a CBR teherbírasi vizsgálatot javasolja, amely laboratóriumban egyszerűbb eszközökkel is végrehajtható, és aminek eredményéből különböző összefüggésekkel származtathatók az értékek. Ezen összefüggések segítségével laboratóriumi vagy helyszíni CBR teherbírasi mérés alapján is számíthatóvá válik a reziliens modulus értéke, vagyis kiváltható a speciális berendezést igénylő és költséges dinamikus triaxiális vizsgálat. Jelentős hátrányuk, hogy egy-egy összefüggést adott területen végzett talajok eredményei alapján állították fel, így

érvényességük értéktartományokhoz, talajtípusokhoz ajánlottak, így a belőlük számolt értékekben jelentős szórás és bizonytalanság adódik.

Kutatásunk során a reziliens modulus mérési lehetőségét vizsgáltuk, abból a célból, hogy ennek az új paraméternek a közvetlen módszerrel történő meghatározására hazai mérések is készüljenek. Vizsgálataink során jellemző hazai talajok kötőanyag stabilizálásával készített mintákat alkalmaztunk, mivel az útépitésben a teherbírás javítása érdekében beépített durva szemcsés anyagú rétegek sikeresen kiválthatók a helyi talajok kötőanyag stabilizálásával is.

## 2. SZAKIRODALMI ADATOK AZ $M_R$ ÉRTÉKÉRE

Külföldi kutatások már vizsgálták a különböző talajok  $M_R$  értékeit, illetve ezek változását eltérő kötőanyagokkal készült stabilizációk hatására. Az általunk fellelt adatok alapján természetes állapotú talajok esetében az  $M_R$  értéke jellemzően 10-100 MPa között változik, az optimális víztartalomnál szárazabb minták általában magasabb, a kissé nedvesebb minták alacsonyabb reziliens modulussal rendelkeznek. A természetes állapotú talajok között a Közép-Amerikában és Afrikában sok helyen előforduló laterites talaj kiugró, 70-600 MPa nagyságú reziliens modulus értékkel jellemezhető, ami csaknem egy nagyságrenddel nagyobb a többi talajtípushoz képest. Az általunk fellelt szakirodalmi adatok az 1. táblázatban láthatók.

1. táblázat: Szakirodalmi adatok a talajok  $M_R$  értékére

Publikáció	Talaj típusa	Reziliens modulus [MPa]
Drumm et al.	sovány agyag (CL)	34-103
	iszapos homok (SM)	72-83
	sovány iszap (ML)	14-124
	kövér iszap (MH)	45-117
Mohammad et al.	kötött (A-4, A-6, A-7-5, A-7-6)	8-87
Akoto	laterit	350-500
Achampong et al.	sovány agyag (CL)	14-66
	kövér agyag (CH)	10-61
Kung et al.	laterit (CL, A-7-6)	110-250
	porított iszapkő (CL, A-6)	40-440
Qiu et al.	kötött	10-129
Li és Qubain	sovány agyag (CL)	38-111
	clayey sand (SC)	50-125
	clayey gravel (GC)	53-104
	homokos sovány agyag	58-137
	homokos sovány agyag kavicszal	55-90
	agyagos homok kavicszal	41-132
Bandara et al.	homok, iszapos homok	60-97
Trindade et al.	latosol	70-500
	szapolit	60-200

2. táblázat: Szakirodalmi adatok a stabilizált talajok  $M_R$  értékére

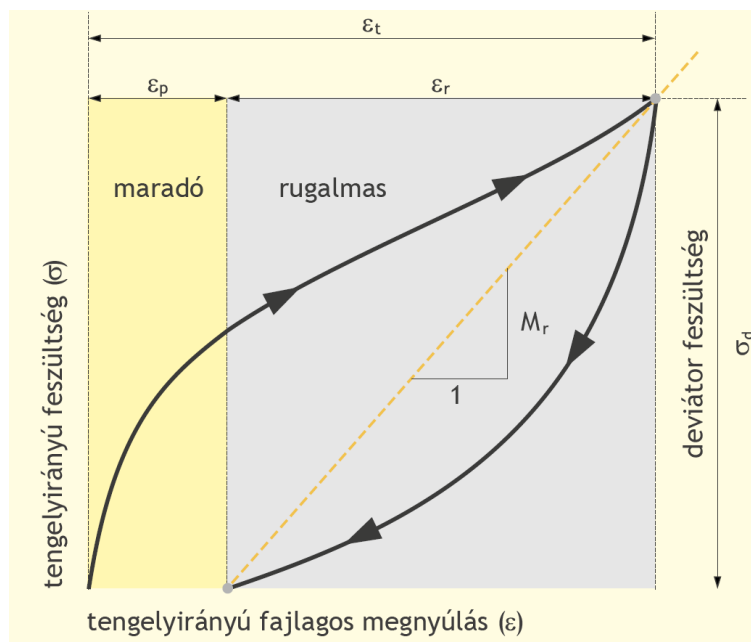
Publikáció	Talaj típusa	Stabilizáció	Reziliens modulus [MPa]
Akoto	laterit	10% mész	3000-12000
Achampong et al.	sovány agyag (CL)	2% mész	40-86
		4% mész	47-103
		6% mész	50-115

	kövér agyag (CH)	4% cement	42-121
		8% cement	48-139
		2% mész	34-79
		4% mész	47-96
		6% mész	50-111
		4% cement	35-80
		8% cement	50-132
		Trindade et al.	latosol
	szaprolit	5% cement	1000-3000

A 2. táblázat a stabilizált talajok szakirodalomban fellelhető reziliens modulus értékeit tartalmazza a talaj típusának és a stabilizációhoz alkalmazott kötőanyag és adagolás megnevezésével. Látható, hogy a szakirodalomban talált stabilizált talajokat  $M_R = 40-140\text{MPa}$  értékkel lehetne jellemezni. Az eredmények azt mutatják, hogy a gyakorlatban használt kötőanyag mennyiség (3-6%) az  $M_R$  értékét nem növeli jelentősen, azonban a nedvességgel szemben kevésbé lesz érzékeny a talaj, azaz viszonylag magas  $M_R$  értékkel lehet számolni a stabilizált rétegek tartóssága miatt a földmű élettartama alatt. A stabilizált laterit talajokra talált szakirodalmi értékek egy nagyságrenddel magasabbat mutattak, így hasonló különbség adódott, mint a stabilizálatlan talajok esetében. Azonban a stabilizált laterit talajok  $M_R$  értékeinek értékelése során azt is figyelembe kell venni, hogy a stabilizáláshoz az általánosnál magasabb kötőanyag mennyiséget használtak, ami természetesen nagyobb teherbírást is szolgáltat.

### 3. A REZILIENS MODULUS MÉRÉSÉNEK BEMUTATÁSA

Általános definícióját tekintve a reziliens modulus a deviátor feszültség és a rugalmas alakváltozás aránya. Alapvetően a merevséget jellemzi, nem pedig az anyag szilárdságát. Értéke függ az oldalirányú nyomás nagyságától is, ezért többféle terhelés és oldalnyomás kombinációja mellett is meghatározható. A reziliens modulus többnyire olyan terhelési körülmények között jellemzi a talajt, amely nem eredményezi a pályaszerkezet tönkremenetelét.

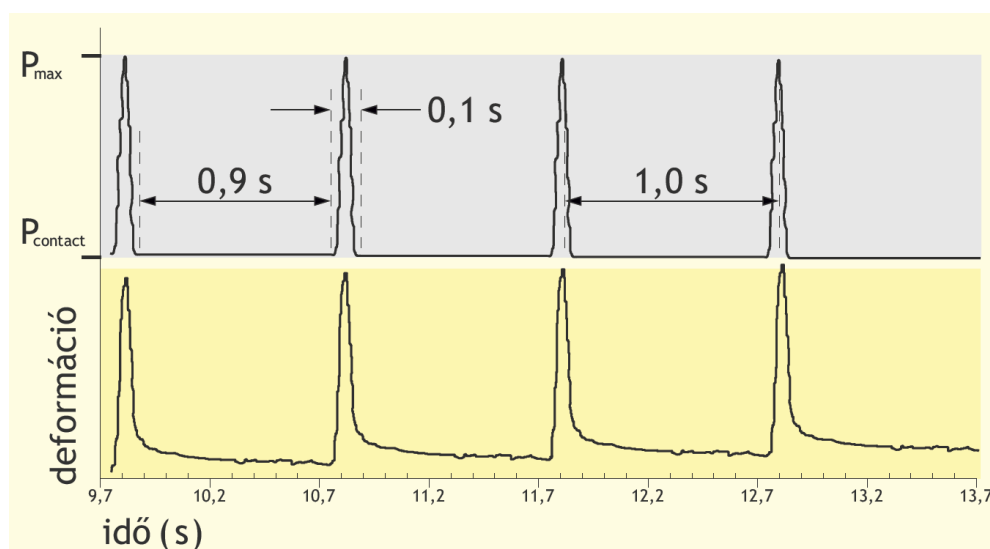


1. ábra: A reziliens modulus értelmezése

A jelen cikkben tárgyalt kutatás elsődleges célja a kötőanyagokkal stabilizált talajok  $M_R$  értékének közvetlen módszerrel, azaz dinamikus triaxiális vizsgálattal történő meghatározása volt. A dinamikus kísérletekkel párhuzamosan CBR-vizsgálatok is készültek azonos módon előállított próbatesteken annak

érdekében, hogy a szakirodalomban található CBR-vizsgálatokra vonatkozó összefüggéseket is össze lehessen hasonlítani a dinamikus vizsgálatok eredményeiből kapott  $M_R$  értékekkel. Ezen vizsgálatokon kívül a kutatás további célkitűzése volt az  $M_R$  értékének elnedvesedés hatására bekövetkező változásának vizsgálata stabilizált talajok esetében. Ehhez a vizsgálatához az elkészített próbatestek egy részét 28 napos kötésidőt követően, míg a másik részét további 4 nap víz alatt tárolás után vetették alá dinamikus terhelésnek.

A laboratóriumi vizsgálati programot az AASHTO T-307 amerikai előírás alapján végeztük el. Ennek keretében különböző deviátor feszültségek alkalmazása mellett összesen 150 db dinamikus triaxiális vizsgálat készült, amelyek során előre megadott nagyságú tengelyirányú ciklikus terhelés került a mintákra. Egy terhelési ciklus minden esetben 1 másodperc hosszúságú volt, ez alatt a 0,1 másodpercig tartó terhelési fázist 0,9 másodperces nyugalmi periódus követte (lásd 2. ábra). Az egyes minták elsőként 1000 cikluson keresztül 27,6 kPa cellanyomás és 27,6 kPa deviátor feszültség mellett, ún. kondicionáló terhelést kaptak, aminek célja, hogy megszüntesse a tömörödés és a terhelés közti időszak hatását, illetve a kezdeti terhelést az újrateherelés ellenében. Ezen kívül minimalizálja a minta végei, illetve a terhelőfej és az alapzat között esetlegesen fennálló nem megfelelő érintkezés hatását. A kondicionáló terhelés után a 27,6 kPa cellanyomást fenntartva 5 különböző, fokozatosan emelkedő deviátor feszültség alkalmazása mellett, 100-100 cikluson keresztül történt a minták terhelése. A vizsgálat záró fázisaként pedig az utolsó terhelési lépcső 68,9 kPa nagyságú deviátor feszültségének alkalmazásával a minták terhelése további 10 000 cikluson keresztül folytatódott a maradó alakváltozások vizsgálata érdekében.



2. ábra: A ciklikus triaxiális vizsgálat során alkalmazott teher időbeli lefutása

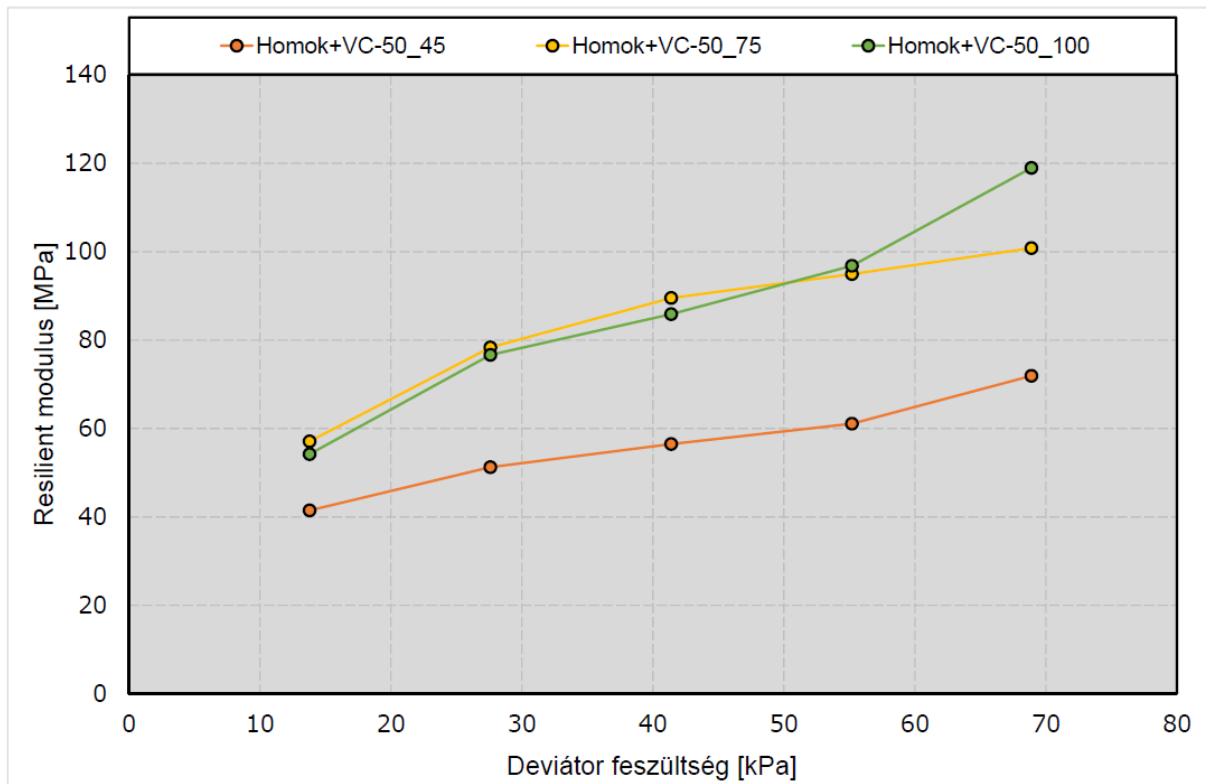
#### 4. A MÉRÉSI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA ÉS ÉRTÉKELÉSE

A vizsgálatokat kötőanyag hozzáadásával stabilizált homok- és löszmintákon hajtottuk végre. A homok talaj stabilizációja cement és ViaCalco 50, a lösz talajok pedig cement, ViaCalco 30 és ViaCalco 50 kötőanyagok felhasználásával történt. A kötőanyagok hozzáadása három különböző mennyiség adagolással valósult meg, amelyek 40, 75 és 100 kg/m<sup>3</sup> voltak. Ahogy a fentiekben már szerepel, a vizsgálatosorozatok normál állapotú, illetve 4 napig víz alatt tárolt próbatesteken is végrehajtásra kerültek. A reziliens modulus értékei a 100-as ciklusszámú terhelési lépcsők eredményeiből, valamint a 10 000 ciklusszám mellett végzett terhelés első és utolsó 10 ciklusának mérési adatsorából kerültek meghatározásra.

A 100 db ciklusszám mellett végzett terhelések esetében általános tapasztalat volt, hogy a reziliens modulus növekszik a deviátor feszültség emelkedésével, amint azt a 3. ábra is mutatja. Ezt a megfigyelést a normál, nem stabilizált talajokra fellelt szakirodalmi adatok nem támasztják alá, sőt az ellenkezőjéről számolnak be. Az ellentmondásra némi magyarázattal szolgál, hogy az általunk

alkalmazott deviátor feszültségek a törőfeszültség kb. 10%-áig terjedtek, míg a szakirodalmi hivatkozásokban több helyen a deviátor feszültséget törésközeli feszültségig emelték.

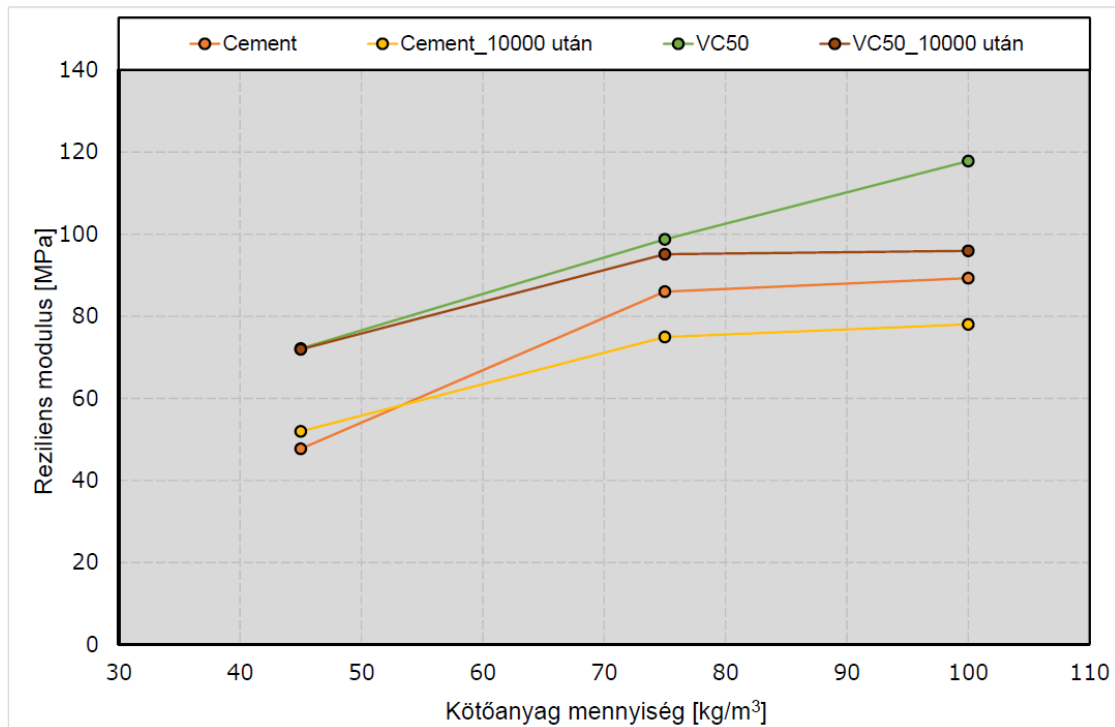
A vizsgálatok eredményei alapján megállapítható volt továbbá, hogy az  $M_R$  értéke a kötőanyag-adagolás növelésével emelkedik. Az emelkedés mértéke nem egyenes arányos a kötőanyag-adagolással, ahogyan az a korábbi szakirodalmakban (Szendefy 2009) is szerepel, ami szerint az optimális kötőanyag-mennyiség eléréséig jelentős növekedés következhet be, azonban azt követően már nincs számottevő hatása az adagolás növelésének.



3. ábra: ViaCalco C50-tel stabilizált homok minták reziliens modulusa a deviátor feszültség és a kötőanyag mennyiség függvényében

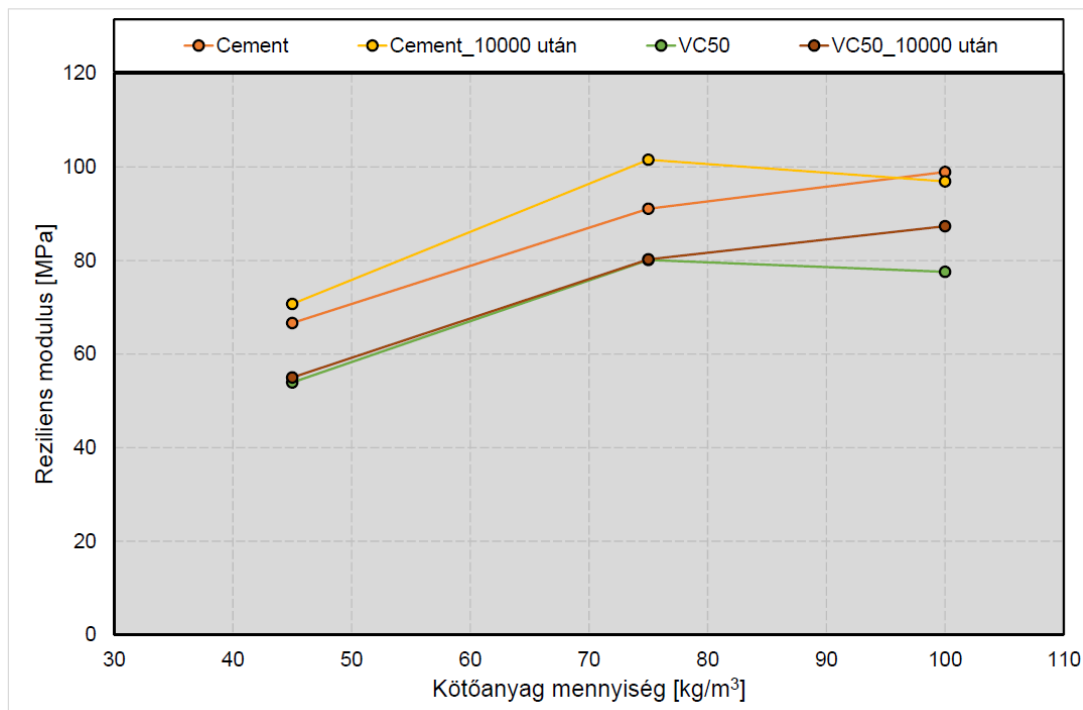
A nem stabilizált talajokból készült minták a víz alá helyezve felpuhulnak és szétesnek, így az áztatás utáni teherbírásuk nem mérhető. A stabilizált talajminták vízzel szembeni tartósságának vizsgálata céljából a mintákat 4 napon keresztül víz alatt tároltuk, majd utána végeztük el a dinamikus triaxiális vizsgálatokat. Az eredmények nem adtak koherens összefüggést. A homok talaj cementtel stabilizált mintáinál, illetve a VC50 50 kg/m<sup>3</sup> adagolású mintájánál a száraz mintánál is magasabb értékek adódtak, ami szerint a víz alatt tárolás nem rontotta, hanem javította a minták ellenálló képességét, míg a VC50 75 kg/m<sup>3</sup> és 100 kg/m<sup>3</sup> adagolásánál ~20%-os leromlás volt tapasztalható. A lösztalajok keverékeinél 20–40%-os leromlás volt tapasztalható, azonban a leromlás mértéke nem mutatott korrelációt a kötőanyag típusával vagy a kötőanyag adagolásával.

A homok talaj alapú stabilizációk esetében, azoknál a mintáknál, amelyeket nem tároltunk víz alatt, megfigyelhető volt, hogy a 10 000 ciklusszámú terhelés hatására az  $M_R$  értékében kismértékű csökkenés következik be. Az eredmények alapján a csökkenés nagyságát a kötőanyag-adagolás befolyásolja, ugyanis magasabb kötőanyag mennyiséget alkalmazva nagyobb csökkenés volt tapasztalható, amint azt a 4. ábra mutatja. Ez valószínűsíthetően azért következik be, mert a kötőanyag adagolással a merevség is nő, aminek jó része a kevésbé rugalmas hidraulikus kötésekből áll, és ezek terhelés hatására bekövetkező tönkremenetele okozhatja a merevség csökkenését is.



4. ábra: Stabilizált homok talaj reziliens modulus értékeinek változása a kötőanyag-adagolás mennyiségének és a terhelési ciklusszámnak függvényében

A stabilizált homok talajoknál tapasztalt trend nem jelent meg a stabilizált lősztalajok reziliens modulus értékeiben, ugyanis itt nem volt megfigyelhető leromlás, a 10 000 ciklus után inkább kismértékű felkeményedés volt tapasztalható. Ezt mutatja be az 5. ábra.

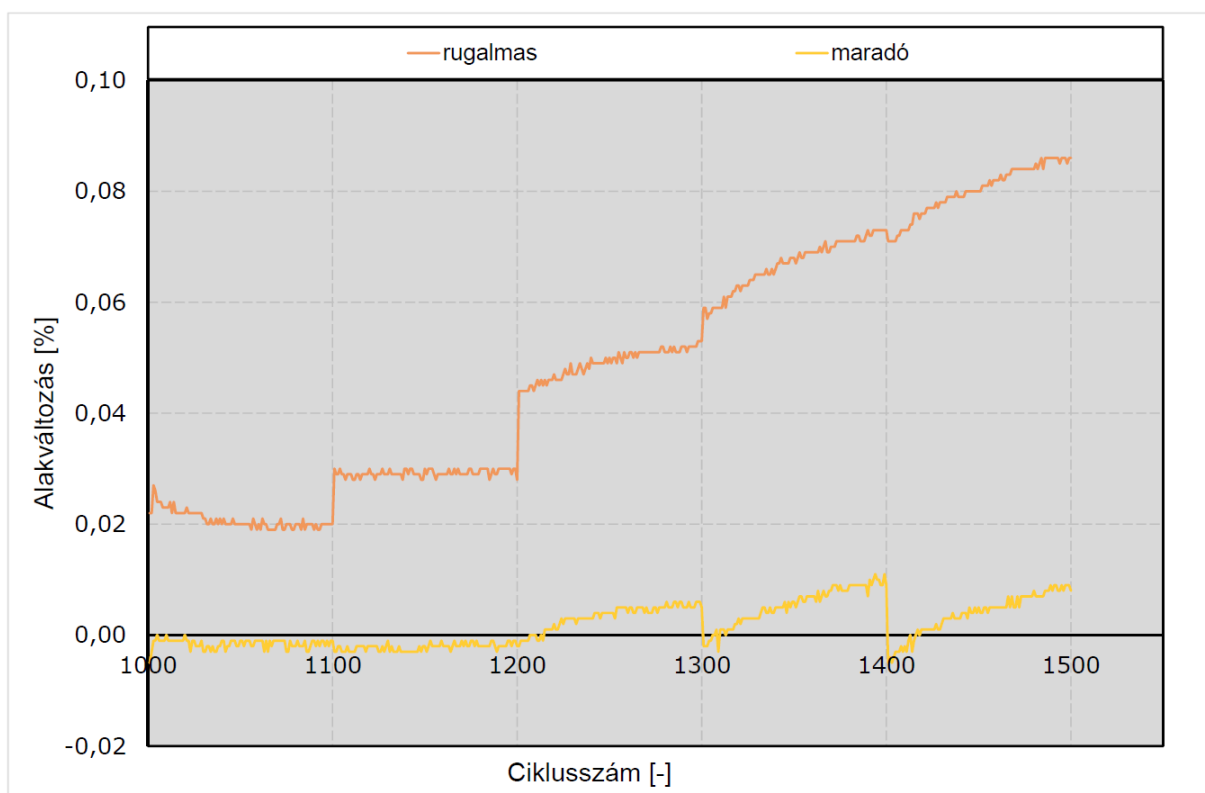


5. ábra: Stabilizált lősztalaj reziliens modulus értékeinek változása a kötőanyag-adagolás mennyiségének és a terhelési ciklusszámnak függvényében

A 4 napig víz alatt tárolt minták hasonló eredményeket mutattak, mint a száraz próbatestek. A stabilizált homok talajok esetében csökkenés nem volt kimutatható, ugyanakkor javulás sem következett

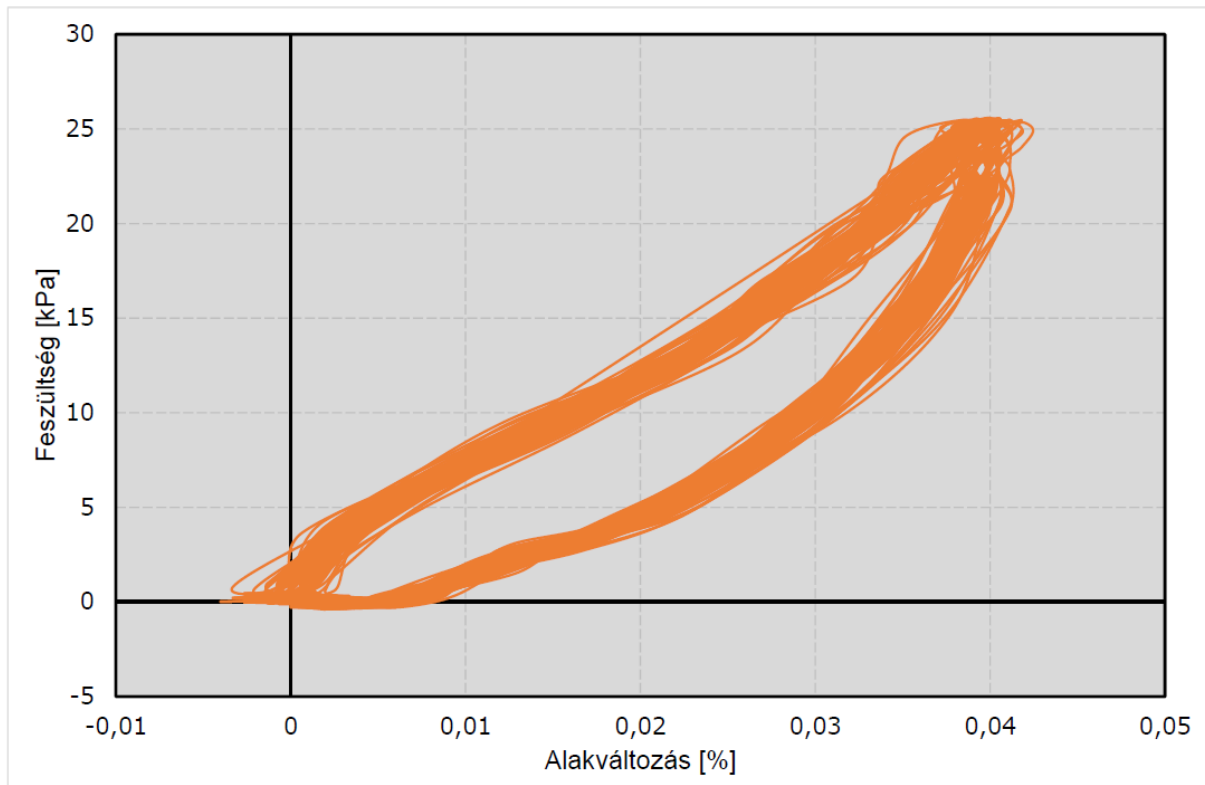
be, míg a lösz talajokból készült stabilizációk eredményei kismértékű emelkedést mutattak. Valamennyi vizsgálati eredményt tekintetbe véve megállapítható volt, hogy a homok minták összenyomódási modulusai adódtak a legnagyobbra, ezen belül a cementtel stabilizált minták adták a legnagyobb, 100 MPa feletti értékeket, míg a ViaCalcoval kezelt homok valamivel alacsonyabb,  $M_R \sim 100$  MPa körüli modulusot mutatott. A lösz minták esetében a reziliens modulus  $M_R = 30-80$  MPa közötti értékekre adódott.

A reziliens modulus vizsgálata során a feszültség-alakváltozás összefüggéseit is elemeztük. Az eredményeket tekintve az első 100 ciklus során az alakváltozások növekednek, majd az első terhelési lépcső esetében az alacsonyabb deviató feszültség alkalmazása miatt az alakváltozások csökkennek, azaz expanzió alakul ki. A második terhelési lépcső esetében a deviató feszültség megegyezik a kondicionáló terhelés során alkalmazott értékkel, így gyakorlatilag nem alakul ki maradó alakváltozás. A további 100-as ciklusszámú terheléseken keresztül a deviató feszültség emelkedésével az alakváltozások is növekednek. Az egyes terhelési lépcsők között az expanzió hatásának köszönhetően gyakorlatilag eltűnik a maradó alakváltozás, amit a 6. ábra szemléltet.



6. ábra: Áztatott,  $100 \text{ kg/m}^3$  adagolású cementtel stabilizált homok alakváltozása a 100 ciklus időtartamú terhelési lépcsők során a ciklusszám függvényében

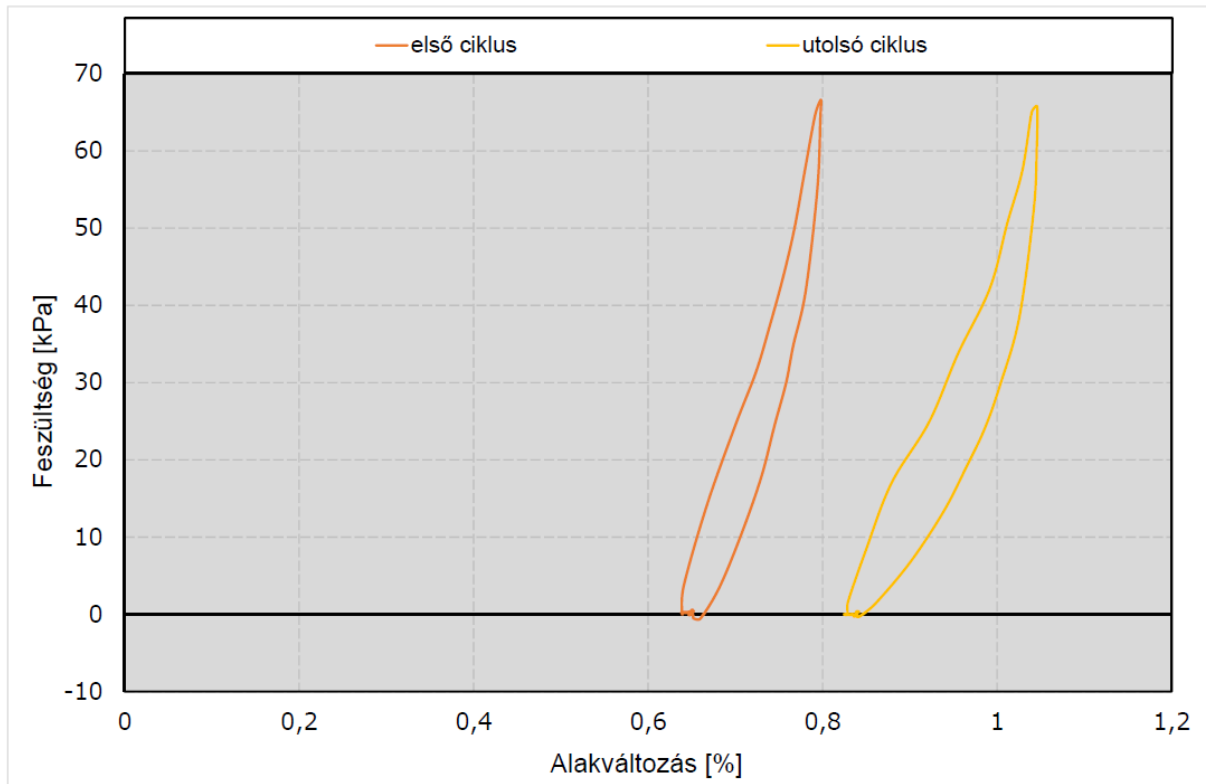
A 100-as terhelési lépcsők jellemző hiszterézis hurokjait mutatja a 7. ábra. A hiszterézis hurok az egy terhelési ciklus feszültség-alakváltozás összefüggéseként rajzolódik ki. Látható, hogy egy terhelési lépcsőn belül az alakváltozás minimálisan változik a ciklusszám emelkedésével. Szintén megjelenik az ábrán, hogy a  $27,6 \text{ kPa}$  deviató feszültséggel végzett terhelési lépcső esetében gyakorlatilag nincs maradó alakváltozás, mivel a hurkok mindig az origóba térnek vissza. Minimális mértékű negatív feszültség és alakváltozás is létrejön, a terhelő berendezés elhanyagolható pontatlanságából fakadóan. Látható továbbá, hogy a reziliens modulus is szinte változatlan a terhelési lépcső során, mivel a hurkok meredeksége gyakorlatilag valamennyi ciklus esetében azonos.



7. ábra: A 27,6 kPa deviátor feszültség mellett végrehajtott 100-as ciklusszámú terhelés hiszterézis hurokjai

A végső, 10 000 ciklusszámú terhelés során az alakváltozások további növekedése figyelhető meg, azonban a növekedés ütemében eltérések tapasztalhatók az egyes minták eredményeinek összehasonlításakor. A teljes terhelések végén kapott alakváltozás alapján megállapítható, hogy globálisan az a tendencia érvényesül, miszerint a magasabb kötőanyag-adagolás esetén kisebb rugalmas és maradó alakváltozások jönnek létre, tehát nagyobb és „tartósabb” reziliens modulus érték adódik. A 10 000 ciklus során bekövetkező maradó alakváltozás jól szemléltethető a terhelés első és utolsó hiszterézis hurokjának ábrázolásával (8. ábra). A hurokok távolsága mutatja a 10 000 ciklus során kialakuló teljes maradó alakváltozást. Látható, hogy ennek mértéke akár az egy cikluson belül bekövetkező alakváltozás nagyságát is meghaladhatja.





8. ábra: A 10.000-es ciklusszámú terhelés első és utolsó ciklusához tartozó hiszterézis hurok

## 5. A DINAMIKUS TRIAXIÁLIS MÉRÉSEK ÉS A CBR-BŐL SZÁRMAZTATOTT ÉRTÉKEK ÖSSZEHOSONLÍTÁSA

A reziliens modulus meghatározása alapvetően a CBR-érték alapján történik. Ennek megfelelően a szakirodalomban több különböző összefüggés is megtalálható, amelyek segítségével a CBR teherbírás átszámítható  $M_R$  értékre. Ezen összefüggések többek közt azt a célt szolgálják, hogy a laboratóriumi vagy helyszíni CBR teherbírás mérés alkalmazásával számítható legyen a reziliens modulus, illetve a még kevésbé elterjedt dinamikus triaxiális berendezést igénylő közvetlen mérés helyett az  $M_R$  értéke egy egyszerűbb, kevésbé költséges laboratóriumi vizsgálattal is előállítható legyen. A laboratóriumi vizsgálatok során végrehajtott CBR-mérések eredményeit 7 különböző szakirodalmi ajánlás felhasználásával számítottuk át  $M_R$  értékekké, és vetettük össze a laboratóriumban mért  $M_R$  értékekkel. Az alábbiakban ismertetjük a szakirodalom kutatás során fellelt különböző szerzők által javasolt CBR és  $M_R$  összefüggéseket. Amennyiben az egyes összefüggések esetén valamilyen értéktartományt is megadtak a szerzők, úgy az egyes összefüggéseknél azokat is feltüntettük.

### 1. Heukleom&Klomp (1962):

$$M_R(psi) = 1,42 \cdot CBR \tag{1}$$

(értéktartomány CBR<10)

$$M_R(psi) = 1,5 \cdot CBR \tag{2}$$

(értéktartomány CBR=10-20)

### 2.Green&Hall (1975):

$$M_R(psi) = 5,409 \cdot CBR^{0,711} \tag{3}$$

(értéktartomány CBR 2-200)

**3. Powell et al. (1984):**

$$M_R(psi) = 2,554 \cdot CBR^{0,64} \tag{4}$$

(értéktartomány CBR 2-12)

**4. Lofti et al (1988):**

$$\log M_R(ksi) = 1,006 + 0,043(CBR) - 1,9557 \left( \frac{\log(\sigma_d)}{CBR} - 0,1705 \log(\sigma_d) \right) \tag{5}$$

**5. Ohio DOT (2008):**

$$M_R(psi) = 1,2 \cdot CBR \tag{6}$$

**6. South African Council (2002):**

$$M_R(psi) = 3,0 \cdot CBR^{0,65} \tag{7}$$

**7. Georgia Department of Transportation:**

$$M_R(psi) = 3,0 \cdot CBR^{0,65} \tag{8}$$

A különböző szerzők által publikált összefüggések alapján a laboratóriumban mért CBR értékből meghatározott  $M_R$  értékek az alábbi táblázatban láthatók. Az elemzés során kiszámításra kerültek az egyes elméletekből kapott legkisebb, legnagyobb és átlag értékek is, amelyeket szintén a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: Stabilizált talajminták CBR értékeiből számított MR értékei

Talaj	Kötőanyag típusa és mennyisége	CBR	1. Heukleom & Klomp	2. Green&Hall	3. Powell et al.	4. Ohio DOT	5. South African Council	6. Georgia Department of Transportation	Min	Max	Átlag
Homo k	Cement 40kg/m <sup>3</sup>	128,15	1325,4	1175,5	393,3	1060,3	484,9	218,6	218,6	1325,4	776,3
Homo k	Cement 75kg/m <sup>3</sup>	133,50	1380,7	1210,2	403,7	1104,6	498,0	222,9	222,9	1380,7	803,3
Homo k	Cement 100kg/m <sup>3</sup>	133,70	1382,3	1211,2	404,0	1105,8	498,4	223,0	223,0	1382,3	804,1

<b>Homo</b> <b>k</b>	VC50 40kg/m <sup>3</sup>	74,30	797,5	797,5	277,3	614,3	340,1	168,4	168, 4	797,5	494, 3
<b>Homo</b> <b>k</b>	VC50 75kg/m <sup>3</sup>	96,80	1001,2	963,0	328,6	800,9	404,1	191,1	191, 1	1001, 2	614, 8
<b>Homo</b> <b>k</b>	VC50 100kg/m <sup>3</sup>	106,0 0	1096,3	1027,2	348,3	877,0	428,7	199,6	199, 6	1096, 3	662, 8
<b>Lösz</b>	Cement 40kg/m <sup>3</sup>	23,50	243,0	351,9	132,8	194,4	161,0	97,2	97,2	351,9	196, 7
<b>Lösz</b>	Cement 75kg/m <sup>3</sup>	63,10	652,6	710,3	249,9	522,1	306,0	155,8	155, 8	710,3	432, 8
<b>Lösz</b>	Cement 100kg/m <sup>3</sup>	79,30	820,2	835,7	289,3	656,1	355,0	173,8	173, 8	835,7	521, 7
<b>Lösz</b>	VC30 40kg/m <sup>3</sup>	32,80	339,2	446,1	164,4	271,4	200,0	113,9	113, 9	446,1	255, 8
<b>Lösz</b>	VC30 75kg/m <sup>3</sup>	37,55	388,4	491,1	179,3	310,7	218,3	121,5	121, 5	491,1	284, 9
<b>Lösz</b>	VC30 100kg/m <sup>3</sup>	40,85	422,5	521,4	189,2	338,0	230,6	126,5	126, 5	521,4	304, 7
<b>Lösz</b>	VC50 40kg/m <sup>3</sup>	30,75	318,0	426,1	157,8	254,4	191,8	110,5	110, 5	426,1	243, 1
<b>Lösz</b>	VC50 75kg/m <sup>3</sup>	52,65	544,5	624,5	222,6	435,6	272,0	142,9	142, 9	624,5	373, 7
<b>Lösz</b>	VC50 100kg/m <sup>3</sup>	58,00	599,9	669,0	236,8	479,9	289,7	149,6	149, 6	669,0	404, 1

Az eredményeket vizsgálva látható, hogy a CBR teherbírásból számított reziliens modulusok jóval magasabbak, mint a közvetlen mérésből kapott értékek. Méréseinkhez az átszámítási módok közül a legkisebb értékeket adó Georgia Department of Transportation ajánlása adta a legközelebbi értékeket. Ezek a homok talajok esetében a cementtel stabilizált mintáknál 200-220 MPa közötti értékeket, míg a dinamikus triaxiális vizsgálat eredményei 40-180 MPa között változtak a deviátor feszültségtől függően. A VC50 adalékszer hozzáadásával készített minták CBR értékeiből ezzel a módszerrel számítva 170-200 MPa nagyságú reziliens modulus adódik, míg a közvetlen mérés eredményei 40-120 MPa közötti értékek között mozogtak. Lösz talajok esetében cement kötőanyag használata mellett a CBR eredményekből számított reziliens modulus értékek 90-175 MPa között változtak, míg a közvetlen mérés eredményeként 45-105 MPa közötti értékeket kaptunk. A VC30 kötőanyaggal készített mintákon végzett CBR vizsgálatok 115-130 MPa közötti eredményeket mutattak, míg a dinamikus triaxiális vizsgálatok 30-85 MPa nagyságú reziliens modulus értékeket adtak. A tendencia a VC50 kötőanyag esetében is hasonló volt: a CBR vizsgálatok eredményeiből számított reziliens modulusok 110-150 MPa-os értékeivel szemben a közvetlen mérés 30-90 MPa közötti eredményeket adott.

Összességében véve a stabilizált földművek esetében az alkalmazott átszámítási módok közül tehát a legkisebb értékeket adó Georgia Department of Transportation ajánlása is 1,5-szeresen meghaladják a laboratóriumban dinamikus triaxiális berendezéssel mért  $M_R$  értékeket. A 7 különböző összefüggéssel számítható értékek összehasonlítása alapján azonban látható, hogy az egyes eljárásokkal számított reziliens modulusok átlagértéke 3-4-szeres értéket mutat.

A közvetett eljárással meghatározott reziliens modulusok értéke jó egyezést mutat helyszíni vizsgálatok eredményével (Szendefy 2017), azonban a dinamikus triaxiális vizsgálatokból kapott értékekhez képest jelentős eltéréseket mutatnak. Ezzel szemben a dinamikus triaxiális vizsgálatokból kapott reziliens modulusok hasonló értékeket vettek fel, mint az általunk fellelt szakirodalmakban meghatározott értékek. A közvetlen és közvetett módszerek között ezért bizonyos ellentmondás jelentkezik, amelynek egyik lehetséges magyarázata, hogy a reziliens modulus érzékenyebben reagál a teherbírás változására, mint a CBR-érték. Az ellentmondás feloldása érdekében további vizsgálatok lennének szükségesek, amelyek segítségével meghatározható lenne, hogy az  $M_R$  értéke hogyan reagál a különböző paraméterek, mint például a víztartalom változására. Ezen felül megfontolandó továbbá,

hogyan a stabilizált talajokra a fenti számítási eljárások alkalmazása nem javasolt, helyettük más összefüggések kidolgozása válhat szükségessé.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A típuspályaszerkezetek használatán alapuló méretezési eljárás a földművet és annak teherbírását az  $E_2=40$  MPa értékkel veszi figyelembe. A hazai talajok többsége azonban nem tudja biztosítani ezt a teherbírást, ezért durvaszemcsés anyagból készült teherbírásjavító réteg beépítése szükséges. A durvaszemcsés réteg helyettesíthető a talajok kötőanyagossal való talajstabilizálásával, ami lehetőséget adna magasabb földmű teherbírások elérésére is. Azonban ezt a magasabb földmű teherbírásértéket a típuspályaszerkezet méretezés nem tudja figyelembe venni. Ezzel szemben az alternatív méretezési eljárás lehetőséget biztosít arra, hogy a pályaszerkezet optimalizálása elvégezhető legyen a földmű, az alapréteg és a burkolati rétegek teherbírása és más fizikai tulajdonságai alapján.

A kutatás során az alternatív pályaszerkezet méretezéséhez használt összefüggések bemenő paramétereit, a földmű dinamikus, forgalmi terheléshez hasonló terhelésből számítható rugalmassági modulusát, az úgynevezett reziliens modulus ( $M_R$ ) értékét vizsgáltuk kötőanyagossal stabilizált talajok esetében. Az  $M_R$  a dinamikus teher és az annak hatására létrejövő rugalmas alakváltozás hányadosából számítható, mérése dinamikus triaxiális berendezéssel történik, illetve a szakirodalomban fellelhető más talajfizikai mérésekből (pl. CBR) való átszámítási módok is.

Hazánkban korábban még nem végeztek  $M_R$  meghatározáshoz szükséges dinamikus triaxiális vizsgálatokat, a technikai feltételek is csak az elmúlt években lettek adottak ehhez. A vizsgálatok során homok és lösz talajokból készült talajstabilizációs minták dinamikus triaxiális vizsgálatait végeztük el, amelyekből meghatározott  $M_R$  értékek a szakirodalomban fellelhető értékekkel jó azonosságot mutattak. A mérési eredmények alapján a homok talajoknál a kötőanyag típusa és mennyisége, valamint a deviátor feszültség függvényében  $M_R=40-120$  MPa, míg lösz talajoknál  $M_R=30-80$  MPa értékeket kaptunk. A stabilizált talajminták esetében a reziliens modulus értékek 4 nap víz alatti tárolás hatására nem mutattak számottevő értékcsökkenést, ami bizonyítja a stabilizált talajok vízzel szembeni ellenállóképességét.

A reziliens modulus mérések során kiegészítő vizsgálatokat végeztünk, ahol további nagy számú (10.000db) teherciklussal terheltük a mintákat és vizsgáltuk a létrejövő alakváltozásokat. A mérések szerint a rugalmas alakváltozás nagysága érdemben nem változott a 10.000 ciklus után, így az  $M_R$  értéke is kvázi változatlanul tekinthető, azonban említésre méltó maradó alakváltozások következtek be, amelyek pályaszerkezetre gyakorolt hatását a továbbiakban még vizsgálni szükséges.

A stabilizált talajok teherbírásának meghatározása céljából CBR vizsgálatok is készültek. A CBR vizsgálatok eredményeiből a szakirodalomban megtalálható összefüggések alapján  $M_R$  érték is számítható. A számított értékek a dinamikus triaxiális berendezéssel mért  $M_R$  értékeknél minden esetben magasabb értékeket adtak, a különböző összefüggések alapján számítható értékek között akár fél nagyságrendi eltérés is adódott. A dinamikus triaxiális vizsgálatok eredményeiből közvetlenül kapott reziliens modulus értékek jó egyezést mutatnak a szakirodalomban fellelhető értékekkel. Egyelőre bizonytalan, hogy mi eredményezi ezt az ellentmondást az eredményekben, ennek feloldására az összefüggések további elemzése és hazai összehasonlító vizsgálatok készítése lenne szükséges.

## 7. IRODALOMJEGYZÉK

Achampong, F., Usmen, M., Kagawa, T. (1997): Evaluation of reziliens modulus for lime- and cement-stabilized synthetic cohesive soils, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Volume 1589

Akoto, B. K. A. (1986): The effect of repeated loading on the ultimate unconfined compressive strength of a lime-stabilized laterite, Engineering Geology, 23: 125-135

Bandara, N., Rowe, G. M. (2003): Design subgrade resilient modulus for Florida subgrade soils, in: Durham

- Berg, R. L., Bigl S. R., Stark, J., Durell, G. (1996): Resilient Modulus Testing of Materials from Mn/ROAD Phase1, Technical Report Minnesota Department of Transportation
- Buchanan, S. (2007): Resilient Modulus: What, Why and How?, Report, Vulcan Materials Company
- Drumm, E. C., Boateng-Poku, Y., Johnson Pierce, T. (1990): Estimation of subgrade resilient modulus from standard tests, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, No. 5
- Durham, G. N., Marr, W. A., De Groff, W. L. (2003): Resilient Modulus Testing for Pavement Components ASTM STP 1437
- Kung, J. H. S., Lin, H. D., Yand, S-J., Huang, W-H. (2006): Reziliens modulus and Plastic Strain of Unsaturated Cohesive Subgrade Soils
- Li, J., Qubain, B. S. (2003): Resilient modulus variations with water content
- Mohammad, L. N., Herath, A., Abu-Farsakh, M. Y., Gaspard, K., Gudishala, R. (2007): Prediction of resilient modulus of cohesive subgrade soils from dynamic cone penetrometer test parameters, Journal of Materials in Civil Engineering, 2007 november
- Primusz P., Tóth Cs., Pethő L. (2016): Alternatív méretezési eljárásokra vonatkozó tanulmány és az alternatív módszerek bevezetését segítő irányelv
- Qiu, X., Yang, Q., Wang, B., Luo, X. (2014): Prediction model of dynamic resilient modulus of cohesive subgrade soil based on triaxial test system, Key Engineering Materials Vols. 579-580, pp 873-876
- SAS, W., Gluchowski, A., Szymanski, A., (2012): Determination of the Resilient modulus  $M_R$  for the lime stabilizaed clay obtanied form the repeted loading CBR test, Annals of Warsaw University of Life Sciences Land Reclamatoin No44
- Szendefy J. (2009): A hazai talajok szerkezetének és teherbírásának változása meszes talajstabilizáció hatására, Phd dolgozat Budapesti Műszaki És Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar
- Szendefy J. (2014): Viacalcoval kezelt talajok laboratóriumi vizsgálata, Geotechnika Konferencia, Ráckeve
- Szendefy (2017): Kutatási jelentés aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének alternatív módszere című tervezői utasítás geotechnikai paramétereinek pontosítására
- Trindade, T. P., Carvalho, C. A. B., Silva, C. H. C., de Lima, D. C., Barbosa, P. S. A. (2003): Resilient modulus of soils and soil-cement mixtures, in: Durham
- Vogrig, M. & all. (2003): A Laboratory Technique for Estimation the Resilient Modulus of Unsaturated Soil Specimens from CBR and Unconfined Compression Test, 56th Canadian Geotechnical Conference