



Tárcsás teherbírás-mérés megújítása, kiegészítése, 2. rész Statikus tárcsás méréssel meghatározott tömörségi fok

Schubert István, Subert András

Andreas Kft.

E-mail: mail@andreas.hu

DOI: [10.36246/UL.2023.2.06](https://doi.org/10.36246/UL.2023.2.06)

KIVONAT

Tanulmány célja a tárcsás mérési módszer mérési problémáinak mélyebb megismerése, elemzése, problémák felderítése és a lehetséges módosítás kidolgozása. A legfontosabb azonban annak vizsgálata, hogy hogyan lehetséges a statikus tárcsás mérés módosításával ismételhető teherbírási eredményeket elérni, valamint egy világszerte új módszerrel statikus tömörségi fokot meghatározni. Ehhez át kellett tekinteni az eddigi szabályozásokat, alkalmazásokat, elképzeléseket, a tömöritetőségi vizsgálatokat, alkalmazott jellemzőket. A tanulmány terjedelme miatt ezt több cikkben részletezzük. Másodiknak a tárcsás mérésből számított tömörségi jellemzőket elemezzük.

Kulcsszavak: Tárcsás teherbírás mérés, teherbírás, $E_2 - E_1 - c - TrESPLT\%$, ismételhetőség, mérési megbízhatóság, statikus tárcsás tömörségi fok

ABSTRACT

The purpose of this study is to gain a deeper understanding of the measurement problems of the plate load measuring method, to analyze and detect problems and to develop a possible modification. However, the most important thing is to investigate how it is possible to achieve repeatable load capacity results by modifying the static plate measurement, as well as to determine static degree of compactness with a world-wide new method. For this, it was necessary to review the previous regulations, applications, concepts, compressibility tests, and applied characteristics. Due to the scope of the study, this is detailed in several articles. Second, we analyze the compactness characteristics calculated from the Plate Test.

Keywords: Plate Load Test, Bearing Capacity, determine $E_2 - E_1 - c - TrESPLT\%$, repeatability and reliability of measure, static plate compactness-rate

Schubert István

Okleveles építőmérnök, okl. közlekedésgazdasági mérnök.

Subert András

Óbudai Egyetem Keleti Károly Gazdasági Kar Kereskedelem és Marketing szakos hallgató

1. BEVEZETŐ, ELŐZMÉNYEK

A világ egyik legrégebbi és legismertebb terepi mérési módszere a „Load-Plate Test” statikus tárcsás teherbírás mérés. Az első részben a nemzetközi és hazai szabványok tanulmányozásakor felismertük, hogy a terhelés sebessége, kivárások, ezek hatása az eredményre döntőek. A mérési eredmények jelentősen eltérőek lehetnek. Jelen részben a teherbírásmérés alakváltozásából számítható és a

tömörséget jellemző paraméterek bemutatásával, kritikájával és más lehetséges javaslatokkal foglalkozunk.

Az első részben [12] arra jutottunk, hogy a statikus tárcsás mérés innovációjával, a mérési módszer módosításával a jelenleginél jobb *ismételhető teherbírási eredményeket lehessen elérni. A statikus tárcsás teherbírás mérésekor a lépcsőzetes terhelés hatására a szemcsés réteg / talaj tulajdonsága (tömörsége, teherbírása) is változik, azaz kölcsönhatásban vannak.*

A különböző szabványok - hasonlóságuk ellenére - igen sok eltérést rejtenek, de a *megvalósíthatóságban a humán faktor bizonyult a legnagyobb hibalehetőségnek.* Ugyanazt a mérést mindenki egy kicsit másképp végzi el, sőt ugyanazt az eredményt ugyanaz a mérőszemélyzet sem tudja megismételni – legjobban szándéka mellett sem. A mérési munkakörülmények rendkívül rosszak, fárasztóak. A nehéz tárcsák elhelyezése, a felállítás a méréshez kimerítő feladat. Ki kellett jelentsük, hogy a *mérés automatizálása* az egyetlen hatékony megoldás. Az amerikai, brit és német szabványokból hasonló következtetésre juthattunk. Lehetetlen a párhuzamos mérés bevezetése, mert a vizsgálat ismételhetősége gyenge. Ez azért is mellbevágó, mert a teherbírás mérés egy fontos minősítő vizsgálatunk.

Áttekintettük az első részben a mérési eszközök kialakításait, milyen előnyöket és hátrányokat mutatnak, miben térnek el. A mérések előkészítése, a műszer felállításának feladata nehéz és sok időt vesz igénybe a terepen, egyszerűsítése indokolt. Később ezeknek a tapasztalatoknak nagy szerepe lehet a mérés innovatív továbbfejlesztéséhez, egy automata műszer kialakításával [11]. Elleneztek továbbá a Boussinesq képletben szereplő $(1-\mu^2) \cdot c$ szorzat „egyszerűsítését”, a Poisson tényező elhanyagolását. Vizsgáltuk az egy mérőóra, vagy három kérdésű, a merevítő bordák szükségességét, a hatásmélységet. Elvégeztük a magyar tárcsás vizsgálat hibáinak feltárását. Az ismertett *részletes hiba-analízis* a mérési eredményekben nagy problémákat jelzett a reprezentativitásban, a mérés ismételhetőségében. Első ezek kiküszöbölése az első feladat kell legyen.

Megállapítottuk, hogy a mérési módszerek, eljárások mindegyike túlszabályozott. Olyan előírásokkal találkozunk, ami nehezen tanulható és nehéz betartani. *Megállapíthattuk, hogy a mérési módszer tele van a humán hibák lehetőségeivel (a mérő személyzet legjobb akarata ellenére), és például a terhelési sebességről* szó sincs a szabványokban. Az alakváltozásnál sem különböztetik meg a rugalmas, a maradó – ezen belül pedig a plasztikus és a tömörödés miatti alakváltozást sehol, hiszen a teherbírás szempontjából csak ezek együttesen – mint summa alakváltozás - érdekesek. A mérési eredmények számítása hibás, mert $(1-\mu^2) \cdot c$ szorzat a Poisson tényezőtől függ, azaz nem tekinthető 1,5-nek. Fontos továbbá a mérőórák száma és elhelyezésük is, mert nem ugyanazt az alakváltozást mérik azonos terhelésre – a tárcsa behajlása kimutathatóan más közepén, mint a széleken mérve. Hiba-analízis kimutatta azt is, hogy ha ezeknek a megállapításoknak a helyállóságát elfogadjuk, akkor a terhelési ciklusokban a lépcsőnkénti kivárási időt szigorúan kell szabályozni, vagy meg kell szüntetni, vagy egységesíteni szükséges.

Fentiek alapján felvetettük egy lehetséges megoldásként az automatikus mérés alkalmazását, a humán hibák nélküli automata műszer szükségességét, mint a legkevesebb hibával terhelt egyetlen járható utat a mérés innovációjára.

2. EDDIGI TÖMÖRSÉG-BECSLÉSI MÓDSZEREK A TÁRCSÁS MÉRÉSBŐL

2.1. T_T TÖMÖRSÉGI TÉNYEZŐ ALKALMAZHATÓSÁGA (E_2/E_1)

A magyar előírásokban a szemcsés alaprétegek egy részénél a tárcsás teherbírás mérésekből számítható $T_T = E_2/E_1$ „tömörségi tényező” a tömörségi fokra előírt kritériumként jelenik meg. Ennek indoka az, hogy a viszonyítási (referencia) sűrűség, a módosított Proctor vizsgálatban (ρ_{dmax}) nem állítható elő a mért anyag/ talaj szemmagysága miatt. A magyar „Kötőanyag nélküli és hidraulikus kötőanyagú burkolatok” ÚME [2] a minőségi követelmények fejezetében a szemcsés rétegek *tömörségre* az alábbi előírást adja:

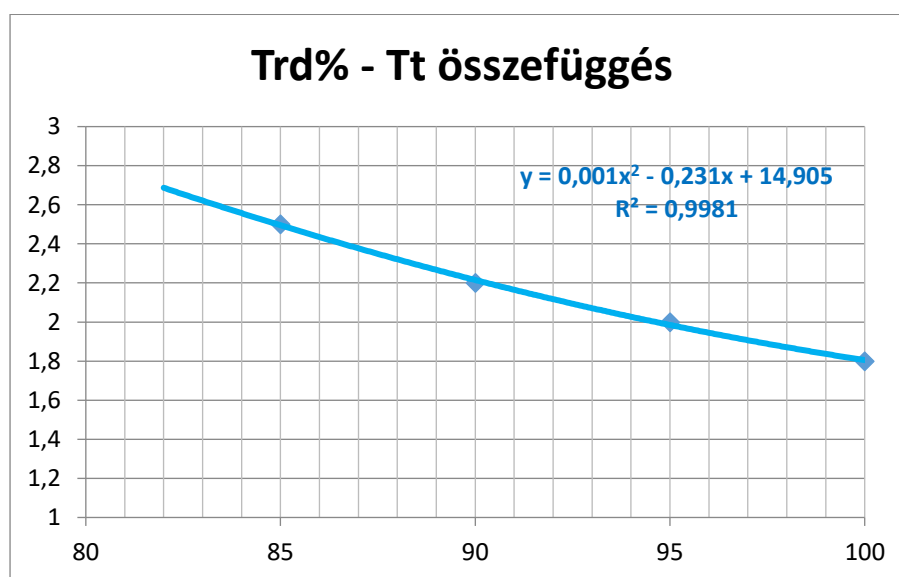
1. táblázat: Tömörségi tényezők „megfeleltetése” a tömörségi foknak.

Tömörítési tényező, $Tt=E_2/E_1$ legfeljebb	Tömörítés, Trp %, legalább
2,5	85
2,2	90
2,0	95
1,8	100

Egyértelmű mindenki számára, hogy ez az előírás „jobb híján” született meg, és máig állandó vitákat okoz. Liptay [10] német szakirodalomból [8-9] levont következtetése szerint ez azt jelenti, hogy a tömörítési tényező értékéből még a vizsgálati eredmények középértéke sem ad egyértelmű választ a tömörítés megfelelőségére. Véleménye szerint a $Tt=E_2/E_1$ tömörítési tényező a **tömörítés megítélésére sem a kivitelező saját ellenőrző méréseként, sem a megrendelő átvételi eljárásához nem alkalmas** – állapítja meg.

A Tt tömörítési tényező az E_2/E_1 (avagy s_1/s_2) arány az első és a második felterhelésből számított érték hányadosa, az MSZ2509-3 szerinti módszerrel mérve. Az FZKA típusú zúzott alapokra nem lehet Proctor vizsgálatot elvégezni a nagy d_{max} szemcseméret miatt.

Problémának látjuk, hogy az E_1 és E_2 teherbírási modulust a teljes alakváltozásból számítják - az alakváltozás arányainak vizsgálata nélkül. Belátható ugyanis, hogy a Tt tömörítési tényezőt a tömörítési alakváltozásból kellene meghatározni, nem a teljes alakváltozásból (plasztikus + rugalmas + tömörítési) alakváltozás. **Emiatt sajnos egyértelmű, hogy a $Tt=E_2/E_1$ arány nem hozható összefüggésbe a tömörítéssel**, egyezően több irodalmi adattal [10,11]. Más megoldást kell tehát találni a statikus tárcsás mérésből a tömörítési fok meghatározására.



1. ábra: Dr. Boromisza Tibor (KTI) által javasolt összefüggés a Tt és Tömörítési fok között.

2.2. MK MISKOLC KÖZELÍTŐ TÖMÖRÍTÉSI FOK ELMÉLETE

A módszert a megközelítő tömörítésre a Magyar Közútnál Tamás József [8] dolgozta ki. Nézzük, mit mond ez az elmélet az MSZ2509-3 statikus tárcsás mérésről [4]. A Tt (E_2/E_1) tömörítési tényezőt ő is következetesen elveti, annak alkalmatlanságát tapasztalva és új módszert keres a tömörítés jellemzésére. Javaslatára szerint a teherbírás mérésekből a modulusok meghatározása mellett a tömörítési fok is számítható. Ez bizony igen jó dolog lenne, főleg, ha számításba vesszük, hogy a teherbírás mérést amúgy is el kell végezni a minősítéshez. Szerző a következőt mondja: „közismert, hogy a leglazább és a legtömörebb állapot hányadosa kb. 1,4 (azaz $\sqrt{2}$) körüli érték.

Ha egy derékszögű háromszög hosszabbik oldala s_1 teljes alakváltozás és kisebbik oldala s_{im} maradó alakváltozás, akkor a $T\%$ tömörítést a következő a visszaterhelés utáni maradó alakváltozás és az átfogó

aránya adja (lásd 2.ábra): $T\% = 100 \cdot [S_{im} / \sqrt{(S_{im}^2 + S_i^2)}]$, ahol a nevező a „c” átfogó $= \sqrt{(a^2 + b^2)}$, ez esetben $\sqrt{(S_{im}^2 + S_i^2)}$

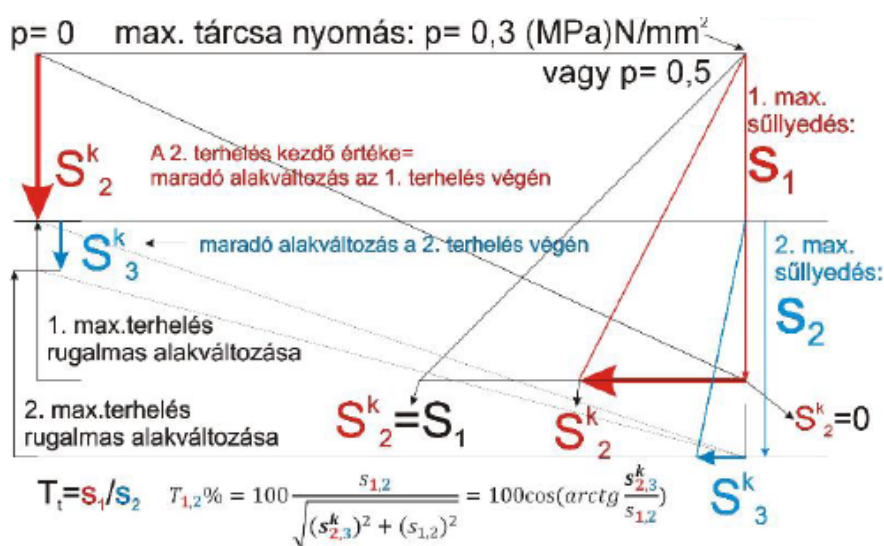
Az elméletre a következő a magyarázat: ha $S_m = 0$ akkor az átfogó értéke S_1 , azaz $T\% = 100 \cdot 1$ azaz mivel nem volt tömörödési maradó alakváltozás, emiatt a tömörségi fok 100% (gumi esete). Ha azonban az $S_m = S_1$ azaz a mért maradó alakváltozás a teljes összes alakváltozás, akkor az eset egy **laza plasztikus réteg**, azaz a mért alakváltozás teljes egészében maradó alakváltozás. Ekkor $S_{im}^2 = 1$ és $S_i^2 = 1$ azaz $(1+1) = 2$ és $T\% = 100 \cdot (1/\sqrt{2}) = 100 \cdot (1/1,41) = 70,7\%$ ami a legkisebb tömörségi fok. A mérésnél minden felterhelési ciklus után a visszaterhelés utáni **S_{im} maradó alakváltozás leolvasása** a feltétele ennek a számításnak.

2. táblázat: MK-Miskolc T% mérési módszer - mérési eredmény számítása.

Tárcsás teherbírásmérés MSZ 2509-3:1989											T ₁ = $s_{1,1} / \sqrt{((s_{1,2}^k)^2 + (s_{1,1})^2)}$ T ₂ = $s_{2,2} / \sqrt{((s_{2,3}^k)^2 + (s_{2,2})^2)}$		
Földmű és pályaszerkezeti alaprég esetén a terhelés nagysága 0,3 N/mm ² (Mpa), pályaszerkezeti réteg esetén 0,5 Mpa													
1. pályaszerk. Poisson: $\mu =$	kötött 0,5	vegyes 0,4	aszfalt 0,35	HK 0,35	Ct 0,3	Ckt 0,25	tényleges 0,3	A megfelelő beírn!		számítás	pontos: 1	1	közelítő 2
Mérés helye	kmsz	pály. old.	tengelytáv.	magasság	E1	E2	Tt = s_1/s_2	T1	T2	Megjegyzések: követelmények E2 ≥ 80 Tt ≤ 1,9 M2, X1 T _r ≥ 97%			
M30	73+760	bal	5,0	FF50F25	67	102	1,5	91,2	97,0				
p Mpa	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,20	= $s_{1,1}^k$ záró- $s_{1,1}^k$
leolv mm	0	0,15	0,36	0,55	0,80	1,00	1,22					1,22	s1 záró leolv.
leolv mm	0,55	$s_{1,2}^k$	0,90		1,10		1,35					0,80	s2
													0,75

A felvett arányok igazolására több Proctor-vizsgálatot is elemeztünk. Megállapítottuk, hogy a laboratóriumi Proctor-vizsgálat száraz tömeg $G_{sz} = \text{constans}$ modellben számított Proctor minta magasság – Proctor tömörségi fok Δh -Trd% összefüggése alapján a szemcsés anyag legkisebb tömörségi foka 71,7%-ra adódik.

Fenntartásokra int továbbá az a tény, hogy az MSZ2509-3 szabványban pont a mintaként megadott mérésre sem igazolódik ez az elmélet: az első felterhelés ($E_1 = 34 \text{ kN/mm}^2$) $s_{1m} = 1,5 \text{ mm}$, míg $s_1 = 2,01 \text{ mm}$. Ebből a fenti képlettel $T_1\% = 80,1\%$ lenne. A második felterhelésre sajnos nincs maradó alakváltozás megadva a szabványban (s_{2m}), ezért az már nem számolható. A Tt értéke azonban a bemutatott minta szerint kb $Tt = 2,5$, ami Boromisza Tibor által megadott összefüggés [2] szerint $Trp = 85\%$ -nak felelne meg. Ebből tehát az elmélet két végpontja (100 és 70,7%) közötti lineáris becslés lehetősége sajnos nem igazolható.



2. ábra: MK Miskolc statikus mérésből számítható „T2% tömörségi fok” elmélete (Tamás J.).

A javasolt módszer a *második felterhelés* utáni maradó alakváltozásból számítja ki az igazi, a minősítésben figyelembe venni javasolt T2% tömörségi fokot. Nem tudni, miért a második, amikor az eredeti tömörítési állapot (a hengerlés befejezésekor) az első felterhelés előtti állapot volt. A figyelembe vett maradó alakváltozás is az második felterhelés maradó alakváltozása, nem az első + második összege.

Az biztos, hogy a tömörség mérésekor figyelembe veendő alakváltozások összetétele NEM azonos a teherbírási modulus számításához alkalmazott alakváltozással. További gond az elmélet megértésében, hogy - mint minden tömörség mérési módszer - ez is figyelembe kellene vegye, hogy a nedvességtartalma a mért rétegnek mennyire tér el az optimális víztartalomtól. Ha eltér, kell a módosított Proctor vizsgálatból számított nedvességgörrekciók együttható ($T_{rw} = \rho_{di} / \rho_{dmax}$) és az alapján *korrigálni kell* a tömörségi fok eredményét az optimális víztartalomra.

Gond a fenti elméletben, hogy a módszer azt feltételezi, hogy a mért maradó alakváltozás teljes egésze a réteg tömörödéséből keletkezett, *azaz a plasztikus alakváltozás nulla. Ennek előfordulása lehetséges ugyan, de egy elméletbe foglalni nem szabad.* Ez sajnos jelentősen befolyásolhatja a pontos végeredményt. Nyilvánvaló továbbá, hogy nem csak a két peremfeltételnek kell teljesülni (eleje – vége), hanem valami elmélet is kellene, hogy a tömörödést hogyan adja ki más módszerrel is, a mérhető kontrollálható közbenső tömörségi fokokat.

Mindezek ellenére **kiemelendő és dicsőretre méltó a javaslat**, mert felkeltette a figyelmet és elsőnek próbálta meg a teherbírás mérési módszert alkalmazni a tömörség újszerű megítélésére. Ki gondolt eddig arra, hogy tárcsás mérésből tömörségi fokot mérjen? Senki a világon – csak egy Magyar Közutas. Nagy köszönet illeti Öt érte.

2.3. A STATIKUS TÖMÖRSÉGI FOK ÚJ MEGHATÁROZÁSA ÖT TERHELÉSI CIKLUSSAL

Ahhoz, hogy a statikus teherbírásra alkalmazott tárcsás mérésből a teherbírási modulusok mellett egy teljesen új statikus tömörségi fokot is meg lehessen állapítani, a teljes mérési elméletet és gyakorlatot elemezni kellett. A valóban tömörödést okozó alakváltozás meghatározásán túl a tömörségi fokhoz tartozó egyéb, hagyományos feltételeket is át kellett tekinteni, mint amilyen például a nedvességtartalom és a tömörítési munkavégzés kérdése.

Áttekintendő problémakör a tömörségi fok és az alakváltozás összefüggésének vizsgálata, alkalmazhatóságának feltételei, hiszen terepi mérésről beszélünk. Az új innovatív eljárás a valós tömörségi eredményt a helyszínen elvégzendő jelentős „többlitmunkával” kénytelen meghatározni, ami indifferens akkor, ha a mérés automatizált. A mérési idő növekedése sem egyértelmű és az is indifferens – ha a mérés automatizált. Márpedig ez a célunk.

Az automatizált mérés szoftveres vezérlésű, csak az elhelyezés és az elindítás a kezelő dolga. Emiatt a humán hibák száma kevesebb, a mérés nem fárasztó és szakképzett személyzetet sem igényel. Akkreditálásra csak a mérési módszer algoritmusa szorul.

2.3.1. AZ ALAKVÁLTOZÁSOK JELLEGÉNEK BEHATÁROLÁSA

A mért alakváltozás a teherbírás mérésekben rugalmas és a maradó alakváltozásból tevődik össze. A maradó alakváltozás azonban további két részre bontható, a plasztikus és a tömörödési alakváltozásra, mely utóbbi a levegő eltávolításával jár a $V = s + v + l$ térfogati rendszerből. Emiatt tömörödés méréséhez háromfázisú talajállapot szükséges.

Hogyan láthatnánk meg ezt a többltet információt statikus teherbírás mérésből? Ez a fő kérdés, ami jelenleg tárgyalni és kibontani szeretnénk.

A tárcsás mérésre vonatkozó szabályozások egyike sem kellett kitérjen arra a tényre, hogy az alakváltozás maradó, rugalmas és plasztikus részből áll, mert ezeket a teherbírás mérés egyben kezeli, mint a terhelés hatására bekövetkező alakváltozást. Az angol vizsgálati szabályozás [3] például felterhelésenként leolvasást kér az adott terhelési ponton 1-2-3-4-5-15. percben, azaz a három

felterhelésben és 4+6+7 ponton, visszaterheléseknél pedig 4 ponton. Egy mérés akár egy órát is igénybe vehet. Egy felterhelésen tehát 15 percet (900 sec) vesz igénybe a mérés (több leolvasással), azaz a konszolidációt minden terhelésnél kívárlják.

A jelenleg ismert szabályozásokat az cikksorozat első részében ismertettük [12], mint az MSZ 2509-3:1989, DIN 18134, ASTM D1194-94, ASTM D1195/D1195M-21, ASTM D 1196 – 93: Reapproved 1997, AASHTO [1981]. AASHTO T 222 – 94, EN1977-2 Eurocode 7 –Part 2, BS 1377- 9 [BS EN ISO 22476-3]. Ezekhez hasonló az olasz CNR BU 146 1992-12, osztrák ÖNORM B4417:1979-12, svéd SN6703176:1998, szlovén TSC 06.720:2003, francia NF P94-117-1:2000-04, spanyol UNE 103808:2006-2 előírások.

2.4. SMART STATIC-PLATE TEHERBÍRÁS MÉRÉSI MÓDSZER ÉS AZ 5-15 SEC MÉRÉSI TÖRVÉNY

Az elmélkedések során kialakult - az általunk javasolt statikus tárcsás tömörség- és teherbírás mérési módszer - *egyedülálló, új és szokatlan törvényt javasol követni, mely a teherbírás mérésben is előnyöket biztosít.* Az első két felterhelés E_1 és E_2 ugyan hasonlít a megszokotthoz, de a felterhelés sebességét és a kivárák hosszát pontosan szabályozza. A mérést **automatizált kell legyen, azaz a humán hibák egyáltalán nem érvényesülhetnek a mérésben.** Az első és második felterheléseket kiegészítettük egy harmadik, negyedik, végül egy ötödik (!!!) felterheléssel, az alábbiakban ismertetett módon és céllal.

- a tárcsát úgy kell kialakítani, hogy az könnyű, de tárcsalemez behajlására kellően érzéketlen legyen
- a tárcsát elhelyezzük 2-3mm homokréteg aláterítéssel. A felület legyen közel vízszintes, a terhelés pedig a tárcsaközép vonalában maradjon
- alkalmazunk $p=0,02\text{MPa}$ előterhelést 30sec-ig, majd tehermentesítünk. A pihentető- relaxációs kivárák 15sec után a digitális központi alakváltozás mérő automatikusan lenullázódik és a mérést megkezdődik
- az 1. és 2. felterhelési ciklus és leolvasás a megszokott módszer szerinti, azaz az első felterhelés $\Delta=0,05\text{MPa}$ (0,5bar) lépcsőkkel, a második $\Delta=0,1\text{MPa}$ (1bar) lépcsőkkel történik. A leolvasás minden lépcsőben 5sec kivárák után történik. Az első ciklusban 6 lépcsőben terhelünk fel, a második terhelési ciklus 10sec terhelési idővel és 5sec kivárák utáni óraleolvasásokkal - három lépcsőben. A visszaterhelés után a maradó alakváltozást is leolvassunk a relaxáció előtt és után
- Minden felterhelés után következő tehermentesítéskor a kötelező pihentetés (relaxáció) 15sec, utána le kell olvasni az alakváltozást (minden felterhelés után). Minden visszaterhelés után kivárák 15 sec-ot.
- A visszaterhelés mindig egy lépcsőben történik azonos sebességgel, mint felterhelés, a végén 15sec kivárással
- A felterhelés sebessége (automatizált, programozott) $0,05\text{MPa}/5\text{sec}$. **egy teljesen automatizált műszer SMART applikációval**
- a 3. felterhelést $\Delta p=2*0,15\text{MPa}$ -ban, azaz két terhelési lépcsővel végezzük az alakváltozás leolvasásával, majd a végén a tehermentesítés után a visszaterhelés után a maradó alakváltozást is leolvassunk a relaxáció előtt és után. (Érezhető a gyakorlott mérőszemélyzetnek, hogy ez már jóval rövidebb idő lesz, mint az első felterhelés volt)
- a 4. felterhelést ($\Delta p=0,3\text{Mpa}$ -ig) egy lépcsőben végezzük (a terhelési sebesség marad konstans), majd az alakváltozást leolvassuk 5sec kivárák után, majd a visszaterhelés után a maradó alakváltozást is kiolvassuk 15 sec után.
- minden eddigi felterhelésnél **lényeges az 5-15sec szabály betartása**, azaz minden lépcsőnél a kivárák a leolvasás előtt 5sec, és minden végterhelésnél a kivárák 15sec, **azaz NEM várjuk ki a szubjektívnak minősülő „teljes konszolidációt” soha, mert azt majd külön mérjük.**
- ezek után, az 5. felterhelés következik, aminek célja pont az eddig kihagyott, de itt már sokkal pontosabban kimérhető **plasztikus alakváltozás meghatározása**. Egy lépcsőben ismét felterhelünk $p=0,3\text{MPa}$ -ra és leolvassa az automata 5 sec múlva (S_{51}) és utána azonban a terhelést tartva, kivárák ötszörös **$5*5=25\text{sec}$ -ot**, majd az alakváltozást 5 sec múlva leolvassuk (S_{52}). A visszaterhelést egy lépcsőben végezzük el $p=0\text{MPa}$ -ra, ami után 15 sec-et kivárák a maradó alakváltozást is leolvassuk (S_{5m})

- Lehetőségként a szoftverben fennáll, hogy ha 25sec kevés lenne a plasztikus alakváltozás meghatározására, akkor tovább lehet a végterhelés elérése után (terhelés alatt) kivárni. Ekkor a plasztikus alakváltozás számítása ugyanolyan elven, az egy ciklus időre való átszámítással történhet. A konkrét értékét mindig 5sec-re kell korrigálni.
- A plasztikus alakváltozás jelölése az alapverzió szerint $S_{PL} = (S_{52} - S_{51})/5$ (ahol PL=plastic)
- a tisztán rugalmas alakváltozás jelölése $S_{FL} = S_4 - S_{PL}$ (ahol FL flexible)
- az egyes felterhelésekben a számított **tömörödési alakváltozás a tömörségi fok megállapításához lesz szükséges:**

$$S_{iCr} = S_i - S_{FL} - S_{PL} \quad (1)$$

ahol a „Cr” index jelölés compaction rate-et jelöl.

A mérés ezzel befejeződött, következhet a jellemző paraméterek kiszámítása és a tájékoztató értékek megadása.

Megjegyzés: a leírt mérési mód paraméterek egy verzióknak tekinthetők, azokat a mérőszoftver beállítás menüben lehet majd változtatni, melyet a verifikálás dönt el. Ugyanakkor megjegyezzük azt is, hogy a mérőszoftver egy verziója és a szenzorok kialakítása lehetővé tesz bármilyen más szabvány szerinti mérést is, mert a processzorvezérelt méréshez más hardverelem nem kell, a szoftver pedig állandó.

2.4.1. INFORMÁCIÓK, MÉRT ADATOK A SMART STATIC-PLATE-TEST (SPLT) VIZSGÁLATBÓL

- első – második felterhelésnél a mért alakváltozások süllyedési adatait mérjük és tároljuk
- végterhelések S_i (mm) azaz S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 -nél mérjük az alakváltozásokat két tizedesre
- visszaterhelések utáni maradó alakváltozások S_{mi} ahol $i=1-5$ azaz $(S_{1m} - S_{2m} - S_{3m} - S_{4m} - S_{5m})$ melyet mérünk relaxáció előtt és után, de igazán nem fogjuk használni a számításokban
- **rugalmas alakváltozás** (S_{FL}) meghatározása a 4. felterhelésből történik $S_{FL} = S_4 - S_{PL}$
- **a mérés alatt a víztartalmat is kell mérni két alkalommal (szoftveresen)**
- az S_{FL} tisztán rugalmas alakváltozás ismeretében meghatározható az M_{rSt} (*Helyszíni Statikus Reziliens modulus*) értéke, ehhez a μ_R értéke a Reziliens modulusnál elfogadott Poisson-tényezők listájából választandó
- **plasztikus alakváltozás** S_{PL} az anyag (talaj) adott telítettség mellett, alacsony vagy nulla a levegőtartalom. A mért érték a felterhelt és leolvasott alakváltozás után 5 sec kivárás (S_{51}), majd újabb $5 \times 5 \text{ sec} = 25 \text{ sec}$ (összesen) plasztikus alakváltozást kell kivárni, majd leolvasni. Azaz az összesen plasztikus alakváltozás ötödét értjük a plasztikus alakváltozás alatt
- S_{PL} (mm) = $(S_{52} - S_{51})/5$
- az utolsó felterhelést kizárólag erre a célra alkalmazzuk, feltéve, hogy a tömörödési alakváltozás jelentős részének végbemenetele már nagy valószínűséggel megtörténhetett.
- A tömörödési alakváltozás S_{cr} számítása már ebből adódik és mértéke a teljes alakváltozásból számítjuk ($S_{cr} = S_i - S_{FL} - S_{PL}$)

Új feltétel a Smart Static-Plate-Test vizsgálatnál, hogy a víztartalmat is mérni kell a mérés helyén ($M_wC\%$ mass-water-content% vagy $V_wC\%$ Volume-water-Content%) módszerrel.

Fentiekből adódóan tehát a **Smart Static-Plate-Test** vizsgálatnál egy adott ponton a tárcsa elmozdítása nélkül első felterhelést 6 lépcsőben hajtjuk végre, a másodikat három, azaz a vizsgálat teljes időigénye a szokásos első és második felterheléssel járó mérési időnek kb duplájára tehető. A szabályok betartásával azonban ennek árán igen sok és igen hasznos információkat nyerhetünk igen kis hibával mérve.

2.4.2. TÖMÖRÖDÉSI ALAKVÁLTOZÁS MÉRÉSE JELÖLÉSE (S_{CRI} MM)

Ábrázolva a felterhelés során mért alakváltozásokat egy görbét kapunk, mely a terhelések hatására bekövetkezett rugalmas, maradó és plasztikus alakváltozások összege. Ebből a *számított* maradó

alakváltozás a tömörödési és a plasztikus alakváltozás. ***A tömörödéshez tartozó alakváltozás kimérése tehát csak úgy lehetséges, hogy a teljes mért alakváltozásból le kell vonni a plasztikus, majd a rugalmas alakváltozásokat.*** Ezeket tehát meg kell ismerni a számításhoz.

A mérés során csak a ***terhelt ciklusvégek alakváltozásaiából dolgozunk***, a tehermentesített maradó alakváltozást nem használjuk a számításokban, de leolvassuk (5 sec + 15 sec relaxáció kivárása után).

Kérdésként felmerülhet, hogy a jelenleg az E2 határértékek teljesülésének elbírálására alkalmazott MSZ2509/3 teherbírás mérés 1989-ben milyen feltételezések alapján került elfogadásra és alkalmazásra annak idején. ***A felület, amin a teherbírást mérjük tömörített, és minősítésre előkészített.*** Erre felterhelünk $p=0,3$ MPa-ig egy első E1 terhelést, majd visszaterhelünk. Majd újra felterhelünk még egy ciklust (azaz még egyszer rátömörítünk), amit a teherbírást minősítő ***E2 értéknek*** nevezzük.

Ez azt jelenti, hogy azt feltételezhatték a mérés elfogadásakor, hogy az épített felület eltakarása után a szerkezet súlya, valamint a további rétegek építése, továbbá az építési forgalom terhelése valószínűleg a második terhelési ciklussal lehet egyenértékű. Ebben az akkori magyar műszaki gondolkodás ma is helytálló, akkoriban pedig élenjárónak tekinthető.

Egy másik feltételezés az lehetne, hogy az E_1 értékek olyan nagy szórást mutattak, hogy arra nem lehetett minősítést alapozni. Ennek ellentmond a svájci SN670317b szabályozás, ahol az M_{E1} érték a minősítő érték (de hát az Svájc), továbbá E_1 -re minősít az osztrák szabvány is.

2.4.3. KELL-E VISZONYÍTÁSI SŰRŰSÉG A STATIKUS TÖMÖRSÉGI FOK MÉRÉSÉHEZ?

A tömöríthetőségi vizsgálatot négy féleképp lehet elvégezni a jelenlegi EN 13 286-1 EU szabályozás szerint, ez jellemzően a módosított Proctor vizsgálat hazánkban. Lehetséges azonban további három meghatározási módszer is, mint a vibrokalapácsos, vibroasztalos, vagy vibrohengeres vizsgálat. Sajnos nem ismerjük még ezek egymásba való átszámíthatóságát, hasonlóságát, vagy alkalmazásának egyenértékűségét, ezért jellemzően nagy óvatosság látható ezen a területen. Minden ország inkább a korábban megszokott módszereit alkalmazza. A magyar szabályozás [5] a következőt mondja:

4.2.2.9. Tömöríthetőség

Ha az alapanyag vagy anyagkeverék szemmegeloszlásából adódóan lehetséges, akkor a legnagyobb laboratóriumi térfogatsűrűségét és a legkedvezőbb tömörítési víztartalmát meg kell határozni. Ennek értékét követelmény nem írja elő, a burkolatalapba beépített anyag tömörségét a legnagyobb laboratóriumi térfogatsűrűséghez mint referenciaértékhez viszonyítva lehet meghatározni.

A laboratóriumi legnagyobb száraz térfogatsűrűséget (ρ_{dmax}) és legkedvezőbb tömörítési víztartalmát (w_{opt}) az MSZ EN 13 286-1 szabványban előírtaknak megfelelően, a négy tömörítési módszer egyike alkalmazásával kell meghatározni.

A legnagyobb száraz térfogatsűrűség és legkedvezőbb tömörítési víztartalom vizsgálati módszerei közül előnyben kell részesíteni a módosított Proctor-vizsgálat alkalmazását, ha az anyag szemnagysága ezt lehetővé teszi. A módosított Proctor-vizsgálat alkalmazása azért is célszerű, mert ezzel egyidejűleg a dögölés hatására bekövetkező aprózódás nagysága is értékelhető (4.2.2.3.).

A tömöríthetőség vizsgálatának módszerét a vállalkozónak a munka megkezdése előtt egyeztetnie kell az építetővel, mert az alkalmassági vizsgálatoknál, a gyártásellenőrzésnél, valamint a beépített réteg megfelelő tömörségének ellenőrzésénél a viszonyítási térfogatsűrűséget mindig azonos módszer szerint kell meghatározni.

3. ábra: e-UT 06.03.53 „Kötőanyag nélküli és hidraulikus kötőanyagú burkolatok” előírás a Mechanikai Stabilizációkra.

Zúzott alapoknál, mint például a folyamatos szemeloszlású zúzott alap FZKA (ÚME 4.2.1.9.pont) a zúzottkő alap ***tömöríthetőségét nem kell vizsgálni*** ugyanakkor a LA_{40} aprózódás megengedett. Az FZKA és a mechanikai stabilizáció termékek besorolásai a D_{max} -tól függőek (pl. FZKA0/32, M0/32) és mindkettőre öt csoport van (D_{max} 22, 32, 45, 63 és 90mm).

Fentiekből levonható lenne az a következtetés, hogy ha a tömöríthetőségi vizsgálat (egyike legalább) elvégezhető a mechanikai stabilizáción az adott D_{max} -nál, akkor elvégezhető kellene legyen az FZKA-

nál is. A probléma a D_{\max} szemcsék zavaró hatása. Egy-két szemet ugyan ki szoktak venni, de 20-30m%-ot nyilván nem lehet – ezzel csak becsapnánk magunkat.

Nincs tehát megnyugtatóan megoldva annak a kérdése, hogy Proctor-görbét, illetve az abból számított nedvességhorrekciós együtthatót ($T_{rw} = \rho_{di} / \rho_{dmax}$) hogyan tudnánk biztonsággal meghatározni. Ez a dilemma okozza azt, hogy az FZKA zúzott alaprétegeknél nem a tömörségi fokkal, hanem a T_t (E_2/E_1) értékkel minősítjük a tömörséget. Ami ebben a segítség, az a most megadott T_t - $Tr_d\%$ összefüggés (lásd 1. ábra).

3. ELSŐ VERIFIKÁCIÓS STATIKUS TÖMÖRSÉG MÉRÉSEK TAPASZTALATAI

Az UTLAB szövetség keretében 2008 tavaszán az épülő M6 autópályán készült egy összehasonlító vizsgálat a Közlekedéstudományi Intézet és a Magyar Közút lebonyolításában. A kiválasztás szempontja volt az akkreditáltságon kívül a nagy gyakorlat és nagy projektekben való részvételek voltak. A statisztikai értékelésben – ahol lehetett – a minimum, maximum értékeket kihagyták és „korrigált” paramétereket határozott meg Ézsias [14]. Statikus teherbírás mérés MSZ25009-3:1989 módszerrel kilenc nagy tapasztalatú laboratórium mért 3-3 mérési helyen, meghatározva E_1 , E_2 és T_t értékeket. A statisztikai számítást a Student-féle eloszlással *megismételtük azért, hogy azt a későbbi egységes értékeléshez alkalmassá tegyük* (3. táblázat). A 90%-os valószínűséggel meghatározott intervallum relatív érték.

3. táblázat: Összehasonlító mérések M6 -2008 (Ézsias) relatív %.

Teherbírás MSZ2509-3 (E_2) mérési megbízhatóság (2008)

Mérési eredmény E_2	I. szakasz	II. szakasz	III. szakasz
labor száma db	9 (7)	9 (7)	9 (7)
MIN (MPa)	52,1	22,1	60,0
MAX (MPa)	78,5	63,8	82,7
Korr. átlag (MPa)	65,2	47,1	75,4
Korr. szórás	8,4	9,6	7,2
Rel. szórás %	13%	20%	10%
SZÁMÍTOTT (Új) $\pm\Delta$ (Student=1,943, $\alpha=0,1$ és $v=n-1$)	$\pm 9,5\%$	$\pm 14,7\%$	$\pm 7,3\%$

E szerint az E_2 teherbírasi modulus mérési megbízhatósága akár $\pm 15\%$ is lehet, a szerző által alkalmazott korrigálások (min-max elhagyása) ellenére. Megjegyzendő, hogy minősítéskor legálisan a min-max értékek nem hagyhatók el. Szerző megjegyzi továbbá, hogy a teljes mérési idő 1,5 perctől 14 percig terjedt, azaz eltérése igen jelentős volt az akkreditált laborok mérései ellenére.

4. MÁSODIK VERIFIKÁCIÓS MÉRÉS 8-AS ELKERÜLŐ ÚT VESZPRÉM 2021

Az UTLAB szervezésében 2021-ben volt egy másik összemérés is, egy épülő híd-háttöltésen a 8-as út mellett. Ez volt az *első lehetőség az 5 ciklusos statikus tömörség – teherbírás mérések kipróbálására*, melyért ez úton is köszönetet mondok minden résztvevőnek és a szervezőnek.

A verifikációban 11 db akkreditált laboratórium vett részt, nagy gyakorlattal rendelkező laboratóriumi munkatársakkal. Az átadott „kotta” alapján elvégezték a kísérleti öt ciklusos mérést, elsőként a világon. A mérés célja az volt, hogy a statikus tömörségi fok meghatározhatóságát az új elmélettel ellenőrizzük, másodsorban pedig az, hogy az ötciklusos SPLT mérési módszerrel kapott teherbírasi (E_2) és a $Tr_{E_{SPLT}}\%$ helyszíni relatív statikus tömörségi fok értékek ismételtetését, megbízhatóságát kiderítsük.

4. táblázat: Összehasonlító teherbírás mérések 8-as út, 2021 (ÚTLAB).

Statikus Teherbírás ismételtetésége új SPLT-módszerrel (E_2) 8-as út 2021

Mérési eredmény E_2	A szakasz	B szakasz	C szakasz	A+B+C
labor db	10	11	11	32

MIN (MPa)	67,0	83,5	88,1	67,0
MAX (MPa)	109,0	131,3	128,6	131,3
átlag / várható érték (MPa)	93,0	105,2	107,1	102,1
szórás	12,3	11,8	12,6	13,4
Rel. szórás %	13,2%	11,2%	11,7%	13,1%
Mérési megbízhatóság $\pm\Delta\%$ (Student=1,833, $\alpha=0,1$ és $v=n-1$) átlaghoz képest	$\pm 7,7\%$	$\pm 6,1\%$	$\pm 6,4\%$	$\pm 3,9\%$

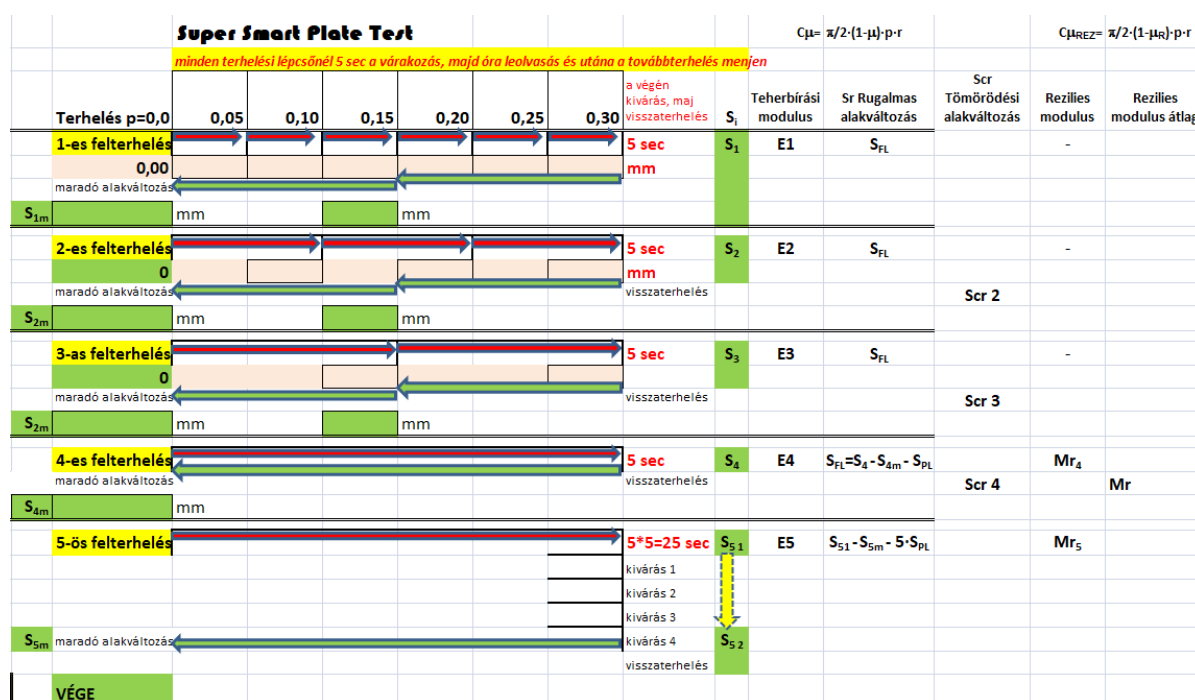
azaz az E_2 teherbírás-mérés megbízhatósága *kedvezőbb*. Megjegyzendő, hogy itt a min-max értékeket nem hagytuk el, mint az előbbi táblázat tette. Fentiek szerint – bár a mérési megbízhatóság javult - az SPLT tárcsás teherbírás mérés további fejlesztése lesz szükséges és vélhetően az egyetlen megoldás az lesz, hogy a humán hibák teljes kiküszöbölését el kell érjük.

5. táblázat: Összehasonlító új statikus tömörségi fok mérések 8-as úton 2021 (ÚTLAB).
Statikus Tömörségi fok ismételhetősége az új SPLT-módszerrel ($Tr_{PLT}\%$), 8-as út 2021

($Tr_w=0,991$ TPA GYF2021/00102 STRABAG $w\%=6,8$ $w_{opt}=5,8\%$)

Mérési eredmény	A szakasz	B szakasz	C szakasz	A+B+C
labor db	10	11	11	32
MIN (%)	93,4	95,6	95,3	93,4
MAX (%)	98,5	97,8	98,2	98,5
átlag / várható érték %	96,0	97,1	96,8	96,6
szórás	1,5	0,7	0,8	1,1
Rel. szórás %	1,6%	0,7%	0,8%	1,2%
Mérési megbízhatóság $\pm\Delta\%$ (Student=1,833, $\alpha=0,1$ és $v=n-1$) átlaghoz képest	$\pm 0,9\%$	$\pm 0,4\%$	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,4\%$

A fenti táblázatban - a statikus tömörségi fok mérésnél - az *ismétlési mérések megbízhatósága kedvezően alacsony* terjedelmet mutat. Ismétlési, azaz más műszerrel, más személyzettel, más laboratórium által végzett mérés, egy mérési módszerrel. Javasolt a kísérlet folytatása néhány laboratórium bevonásával, a mérési szám jelentős növelésével, homogénnek tekintett szakaszon, *a párhuzamos mérések megbízhatóságának meghatározására*. Kedvező esetben előírható lehetne a párhuzamos mérés kötelező alkalmazása és átlag képzése a minősítéshez.



4. ábra: SPLT – mérési „kotta” V.0 mérési terv.

A tömörítési munka eltérése esetén szükséges lehet további korrekció, mint a κ , a rétegvastagság eltérése miatti korrekció (LTP), valamint az optimális víztartalomtól való eltérés miatt alkalmazandó T_{rw} nedvességkorrekció. Ezek a korrekciók a dinamikus tömörségmérés elméletéből már jól ismertek [17, 18], és itt is alkalmazhatók.

4.1. STATIKUS TÖMÖRSÉGI FOK SZÁMÍTÁSA

Az a SPLT tárcsás méréssel a visszaterhelés után mért maradó S_{mi} alakváltozás (mint jeleztük) nem alkalmas a statikus tömörségi fok meghatározására, mert a tömörödés miatti alakváltozás (S_{1cr}) mellett tartalmazza a képlékeny (S_{PL}) azaz a plasztikus alakváltozást is. Ezért a maradó alakváltozást a következő elmélekedésből teljesen kihagytuk.

Ugyanakkor azonban az első ciklus végterhelésére is számítható:

$$S_{1cr} = S_{1i} - S_{PL} - S_{FL} \quad (2)$$

E mellett mindig teljesül, hogy $S_{1cr} \leq S_{1m}$ azaz sem a maradó, sem a rugalmas alakváltozás nem számít bele a tömörödésbe. Az első terheléskor S_{1cr} , majd S_{2cr} a mért tömörödési alakváltozás az $i=2$ azaz második felterheléskor, S_{3cr} a mért alakváltozás a harmadik felterheléskor, S_{4cr} a mért alakváltozás a negyedik terheléskor és S_{5cr} az ötödik felterheléskor. Nyilvánvaló, hogy a tömörödési alakváltozás a ciklusok számának emelkedésével a nullához tart ($S_{icr} \rightarrow 0$)

Számítható a **Dm deformációs mutató** (az MSZ15846 dinamikus tömörségi fok elméletéből átvéve), $D_{mi} = S_{icr}$ ami tisztán tömörödési alakváltozás. A tárcsát az öt ciklus között nem mozdítjuk el és minden újabb felterhelés újabb tömörödést okoz, azaz egyre inkább növekvő tömörségi fokot kapunk. ($TrE_{SPLT1}\%$, $TrE_{SPLT2}\%$, $TrE_{SPLT3}\%$)

Mindebből a helyszíni relatív Statikus PLT Tömörégi Fok terhelési ciklusonként:

$$TrE\%_{PLTi} = 100 - 1,25 \cdot \Phi \cdot D_{mi} \quad (3)$$

ahol Φ az MSZ15846 szerint értelmezett módosított Proctor-vizsgálatból számított alakváltozás-tömörégi fok összefüggés meredeksége ($0,38 \pm 0,02$), ahol D_{mi} definícióját lásd fentebb.

A statikus tömörégi fok természetesen függ a talaj nedvességtartalmától. T_{rw} értéket a módosított Proctor görbéből számítjuk $T_{rw} = \rho_{di} / \rho_{dmax}$ kifejezésből. Esetleges korrekció „ k ” továbbá lehetséges a nagyszámú összehasonlító vizsgálatok statisztikai feldolgozása alapján.

Fentiek alapján megállapítható, hogy

- a statikus tömörégi fok számítása során figyelembe vett alakváltozás más, mint a statikus teherbírási modulus számításakor figyelembe vett alakváltozás.
- emiatt a STATIKUS TÁRCSÁS TÖMÖRSÉG- és TEHERBÍRÁS mérés módszerét eleve úgy kell kialakítani és végrehajtani, hogy az alkalmas legyen mind a hagyományos statikus teherbírási modulus (E_2), mind a statikus tömörégi fok meghatározására egyetlen méréssel
- kizárólag automata mérési mód és műszer elkészítése és alkalmazása lehet a cél

Az alakváltozás összetétele (rugalmas, plasztikus, tömörödési- alakváltozás) a különböző talaj-anyagoknál nagyon különböző lehet, annak ellenére, hogy a tárcsa elmozdítása nélkül, ugyanazon mérésből számítjuk mindkét jellemzőt.

A statikus tömörégi fok mérést öt felterheléssel kell elvégezni, melyből az utolsóval a plasztikus alakváltozást határozzuk meg, az utolsó előttivel pedig a rugalmas alakváltozást. Fontos, hogy a felterhelés (és visszaterhelés) sebességét is szabályozzuk automatikus, processzorvezérelt méréssel. A statikus tárcsás teherbírás és tömörégi fok mérést $p=0,3$ N/mm² végterhelésig javasoljuk végezni, de alkalmas lehet $p=0,50$ MPa határig is, melynél vélhetően egy újabb szorzót kellene alkalmaznunk.

A mérési idő irreleváns, ha a mérés teljesen automatizált (de kb. 6-8 perc), mert emberi közreműködés nem szükséges – az elindítást kivéve. A berendezés részei a bordás-tárcsa és mérőkeret, mely könnyű - de igen erős, szénszálas kevlár anyagból készül. A műszer felállítása nem igényel szakszemélyzetet, így akár a kivitelező (QA) is elvégezheti.

A vezérlést és a mérési adatok tárolását és továbbítását okostelefonos applikációval is végezhetjük, bluetooth kapcsolattal. A felterhelés és visszaterhelés sebessége szabályozott és konstans. Lehetőség emiatt, hogy a szoftver nem csak a STATIKUS TÁRCSÁS TÖMÖRSÉG - és TEHERBÍRÁS mérést, hanem más szabványok szerint mérést is le tudja bonyolítani (DIN18134, ASTM D1196, CRD-C 655-95, AASHTO T222), ezzel a műszer piacképessége és vevőköre jelentősen növelhető.

5. A STATIKUS TEHERBÍRÁS - TÖMÖRSÉGI FOK ELSŐ MÉRÉSEK TAPASZTALATAI

5.1. TEHERBÍRÁSI MODULUSOK MEGHATÁROZÁSA AZ SPLT MÉRÉSBŐL

E1 (MPa vagy kN/mm²): az épített réteg szerkezeti réteggel terhelt várható teherbírási modulusa, ha a terhelést legalább 0,3MPa-ig folytatjuk és utána tehermentesítünk. Alternatíva lehet a $p=0,5$ kN/mm² terhelési határ nem csak pályaszerkezeti rétegekre, hanem akár talajokra, szemcsés anyagokra is. Az alakváltozás tartalmazza a plasztikus és a rugalmas, valamint a tömörödés miatti összes alakváltozást – mely az adott terhelési idő alatt megy végbe. Szubjektív hibáktól mentes automatizált mérés, ezért ismételhetősége várhatóan jó és nem függ a választott labortól sem.

E2 (MPa vagy kN/mm²): a tehermentesítés és relaxáció után a terhelést újabb ciklussal folytatjuk. Tartalmazza a plasztikus és a rugalmas, valamint a tömörödés miatti összes alakváltozást.

E3 MPa vagy kN/mm²: a harmadik és negyedik felterheléskor kimutatható a rugalmas alakváltozás a vélhetően végbement statikus tömörödés után, az épített és már kétszer felterhelt és tehermentesített rétegen, ahol valamennyi felterheléskor azt 0,3 (vagy 0,5) MPa-ig folytattuk.

E4 (MPa) egy menetben újra felterhelt mérés, a rugalmas alakváltozás biztos kimutatására. E3 és E4 átlaga (vagy E4-E5 átlaga, esetleg E3-E4-E5 átlaga) vélhetően egy rugalmasságra vonatkozó jó jellemző lesz, mely jellemezheti a reziliens (tisztán rugalmas) modulus is.

A tisztán rugalmas modulus egy anyagi jellemző és a Hook-féle törvényt követő Young-féle modulussal is várhatóan egyező lehet ($\sigma = E \cdot \varepsilon$).

Valamennyi fenti esetben betartjuk lépcsőnként az 5sec leolvasás előtti kivárást és a 15sec-es relaxációs kivárási szabályt, valamint a konstans terhelési sebességet.

E5 (MPa) a kimutatott rugalmas alakváltozás és a már vélhetően végbement statikus tömörödés után, a már négyszer felterhelt és tehermentesített rétegen - a tárcsa elmozdítása nélkül. Az ötödik felterhelés után kivárandó idő azonban $5 \cdot 5 = 25$ sec, ami kizárólag a plasztikus alakváltozás meghatározására szolgál, ezért mért értékét majd öttel osztjuk, hogy egy 5 sec kivárással arányos legyen.

A teherbírás mérésben annyi a szerepe, hogy E4 és E5 értékek átlagolhatók és így a rugalmas alakváltozásból számítható a statikus reziliens modulus értéke, mely átlagolással még pontosabbá tehető.

A teherbírás számítása változatlan:

$$E_i = \frac{c \cdot (1 - \mu^2) \cdot p \cdot r}{S_i} \quad (4)$$

Természetesen a jelenleg ismertetett értékek programozhatók és változtathatók, ezeket ezért V1.0 verzióknak kérjük tekinteni.

Mérés adatsora

A mérési eredmény egy lehetséges adatsora a TEXT-file, mely summázott formában tárolja a mért mm alakváltozás 100-szorosát és a hozzá tartozó nyomás értékét. A kivárások időpontja ciklusonként konstans, ezért azok a mérési-feldolgozási szoftver része, nem mérési eredmény.

A teherbírási modulusok számításakor a teljes S_i alakváltozást (maradó-, rugalmas- és plasztikus alakváltozásokat együtt) kell figyelembe venni.

Egyéb feldolgozáshoz (pl. ágyazási együttható) - a későbbiekben - javasolt inkább a folyamatos mintavétel pl. P_i (bar·100) és S_i ·100) szekundumonként mérve és lerakva, mert annak fejlesztési lehetőségei és teljesen nyitottak.

Az STX (Start text után a mérés alapadatait, majd a mérés során mért summa adatokat rögzítjük. Ezt mutatjuk be egy V.0 verziójú mintán:

STX			
Device	Nr=	20012409	
Measure	Nr=	120	
2025.11.14	16:30:48		
User	ID=	1	
Type	=	SPLT	
Model	=	1,571	
Poisson	=	0,3	
Trw	=	0,99	
p MPa	=	0,3	
Radius mm	=	150	
s10=	0	ciklus =	1
s11=	16	ciklus =	1
s12=	41	ciklus =	1
s13=	61	ciklus =	1
s14=	83	ciklus =	1
s15=	103	ciklus =	1
s16=	119	ciklus =	1
s20=	63	ciklus =	2
s22=	93	ciklus =	2
s24=	115	ciklus =	2
s26=	129	ciklus =	2
s30=	76	ciklus =	3
s33=	112	ciklus =	3
s36=	135	ciklus =	3
s40=	78	ciklus =	4
s46=	138	ciklus =	4
s50=	82	ciklus =	5
s561=	136	ciklus =	5
s562=	140	ciklus =	5
s570	86		
ETX			

5. ábra: STX adatsor egy lehetséges kialakítása.

5.2. A STATIKUS TÖMÖRSÉGI FOK SZÁMÍTÁSA A SMART STATIKUS TÁRCSÁS MÉRŐESZKÖZZEL

A statikus tömörségi fok meghatározásakor a tömörödési alakváltozást vesszük csak figyelembe (lásd 2. képlet) $S_{icr} = S_i - S_{iFL} - S_{iPL}$

Ehhez tudni kell az ötödik ciklusból meghatározott plasztikus alakváltozást és a negyedik ciklusból meghatározott rugalmas alakváltozást.

Az így számolt T_{REiPLT} tömörségi fok is csak az adott nedvességtartalom mellett, adott anyagra és adott rétegvastagságra megadható statikus relatív helyszíni tömörségi fok % (TRE_{ist}), melyet még korrigálni kell az optimális víztartalom függvényében a T_{rw} nedvességkorrekciós tényező értékével:

$$T_{iSPL}\% = T_{rw} * T_{REiPLT} \quad (5)$$

ahol $T_{rw} = \rho_{di}/\rho_{dmax}$ az anyag típusvizsgálatából (vagy alkalmassági) meghatározott Proctor görbéből számítva

a ρ_{di} a mért w_t terepi (természetes) víztartalomhoz tartozó módosított Proctor vizsgálatban megállapított görbéből számított száraz testsűrűség hányadosa

T_{rw} számítása:

$$T_{rw} = \frac{\rho_{di}}{\rho_{dmax}} (\leq 1,00) \quad (6)$$

Fentiek szerint a **Tri_{SPL}% STATIKUS TÁRCSÁS TÖMÖRSÉGI FOKOT** minden egyes felterhelésből számítjuk, azaz részenként, miközben a terhelési ciklusok során láthatóan tömörödik is a mért réteg. Ez mutatja, hogy az adott terhelési ciklusban milyen a tömörégi fok, illetve a következőben továbbtömörödés történt-e.

A mért terepi tömörégi fok így a teherbírás SMART-SLPT vizsgálatból a korrigált maradó alakváltozásból számítható a következő módon:

$D_{m1} = S_{1mer}$ az 1. ciklusban elért tömörégi fokhoz

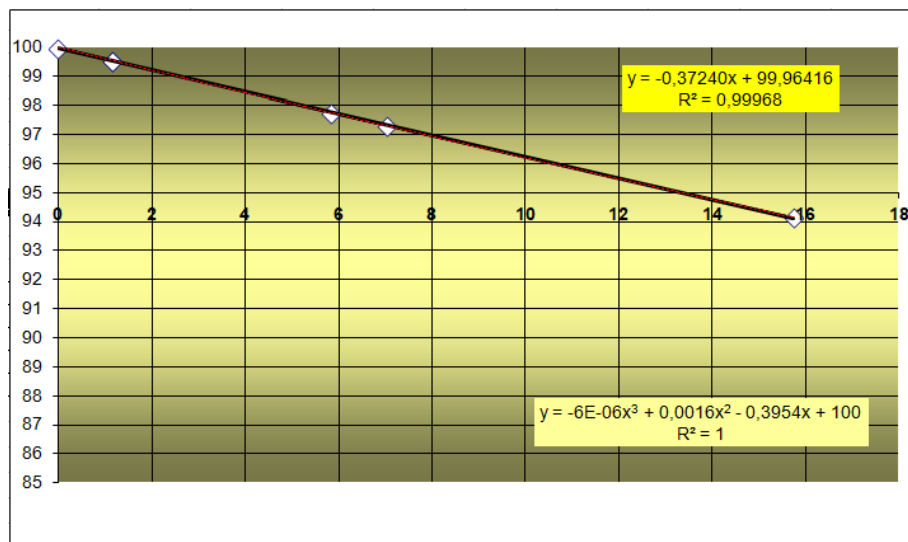
$D_{m2} = S_{2mer}$ a 2. ciklusban elért tömörégi fokhoz

$D_{m3} = S_{3mer}$ a 3. ciklusban elért tömörégi fokhoz

A HELYSZÍNI RELATÍV STATIKUS TÁRCSÁS TÖMÖRSÉGI FOK:

$$TrE_{SPL}\% = 100 - 1,25 \cdot \Phi \cdot D_{mi} \quad (7)$$

Ahol Φ az MSZ15846 szerint értelmezett EN 13286-2 szerinti módosított Proctor-vizsgálatból $G_{sz} = \text{const}$ modellben számított alakváltozás – Proctor tömörégi fok lineáris összefüggésének meredeksége.



6. ábra: TPA 8-as út módosított Proctor vizsgálat G_{sz} modell Δh - $Tr_{Pr}\%$ összefüggése.

A STATIKUS TÁRCSÁS TÖMÖRSÉGI FOK a nedvességtartalmat és a hatásmélységet figyelembe vevő alábbi képlettel számítható.

$$Tr_{iSPL}\% = T_{rw} \cdot T_{REist} \quad (7)$$

ahol T_{rw} nedvességkorrekciós együttható wopt-nál 1,00 és jobbra is, balra is – mindkét ágon kisebb. számítása:

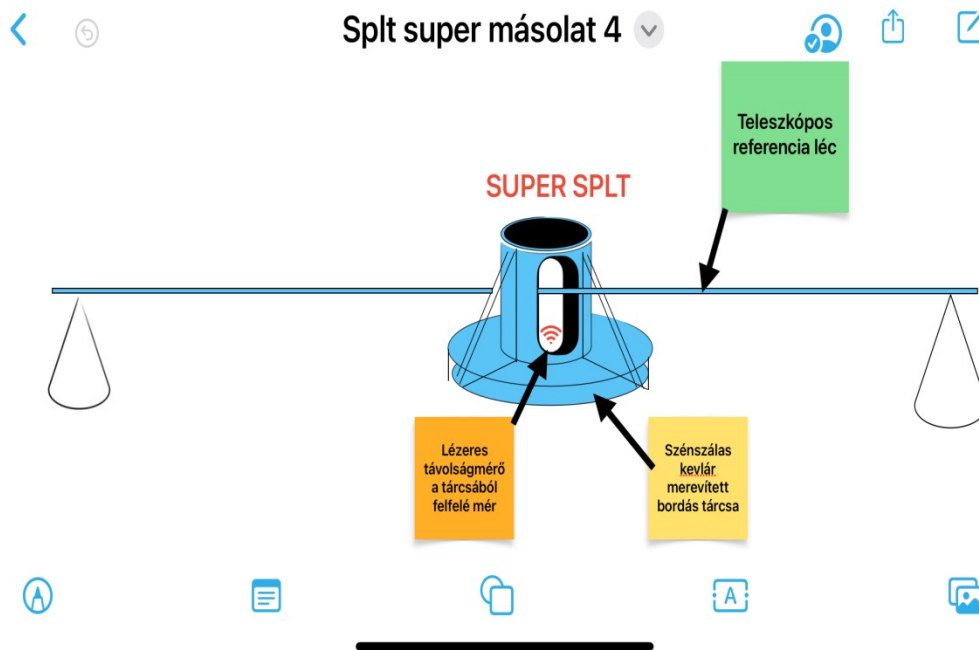
$$T_{rw} = \rho_{di} / \rho_{dmax} \quad (8)$$

6. SPLT statikus tömörség-teherbírás tárcsás mérő műszer kialakítási elve

A fő egységek eltérőek, a részegységek kialakítása kissé eltér az eddigi kézi felterheléstől és műszertől. A *bordás-tárcsa szénszálas kevlárból lehet kialakítva, egy univerzális kitámasztó - leolvasó*

rendszerrel. A mérőléc szénszál-as kevlárból, vagy alumínium teleszkópos rúdból lehet kialakítva, ami egy mozdulattal nyitható és elhelyezhető (lásd 4. ábra).

A tárcsa közepén van a hidraulika henger fogadóödre. Egy lítium akkus könnyű terhelő-tápegység (ON/OFF kapcsolóval) és hidraulika szivattyú csatlakozik a hidraulika hengerhez és egy vezeték a keretléc-hez. A terhelő-tápegység bluetooth-on kapcsolódik a SMART okostelefonon elhelyezett mérő-vezérlő – adattároló – adattovábbító applikációhoz, vagy ugyanabban a hordozótáskában van elhelyezve, mint a hidraulikaszivattyú.



7. ábra: SPLT műszer elvi kialakítása.

Az applikáció a mért adatokból azonnal képes jegyzőkönyvet előállítani a digitális adatokból és azt azonnal lehet továbbítani a minőségfelügyeletnek. Ez tartalmazhatja a határértékeket is és azt, hogy Megfelelt /Nem felelt meg a mérés. Ennek alapján az eltakarási engedély azonnal kiadható. Fentiek azt jelentik, hogy a mérés papírtakarékos, gyors, és már a mesterséges intelligencia alkalmazására készíti fel az építőipart.

6.1. TÁRCSÁS TEHERBÍRÁS MÉRÉS KIALAKÍTÁSA

A megoldás egy **új, automatikus mérési módszer**, ami a humán erőforrás hibáit a lehető legnagyobb mértékben kiküszöböli. A teherbírás mérést a XXI századba kell helyezni, melynek elemei:

- kevlár-szénszál-as tárcsa alkalmazása, megfelelő merevítéssel kialakítva, bordázott csúszásmentes talppal,
- lézeres távmérő alkalmazása alakváltozás mérésére
- távolságmérő elhelyezése a tárcsában (felfelé mérve)
- teleszkópos referencialéc alkalmazása középen gravitációs, önbeálló referencialappal
- egyenletes nyomásváltozású hidraulika pumpa,
- kétutas hidraulika henger, a felterhelési sebesség és tehermentesítési sebesség megfelelő szabályozhatóságára
- humán beavatkozás teljes kizárása szoftveres beállításokkal, AI alkalmazása
- fentiek megvalósításával ismétlődő, talajra jellemző teherbírás-mérési eredmények

A megvalósítás részletei

- mérőalagút a tárcsatoronyban, a hidraulika henger alatt
- igen gyors felállás a méréshez, egygombos mérés-indítás
- referencialéc teleszkópos, kihúzható, akasztólábas és középen önbeálló vízszintes leolvasó lemezzel
- akkreditálható mérési program, mely humán-hiba mentesen kialakítható
- mérőszoftver specifikáció és applikáció, vezeték nélküli adattovábbítással
- mérési jegyzőkönyv digitális adatokból, azonnali adattovábbítás a felügyelet részére
- mérési eredmény értékelése alkalmas legyen a térinformatikai feldolgozásra
- mérési hely GPS pozíciójának meghatározása
- teherbírasi mérési módszer elméleti kidolgozása (specifikáció)
- teherbírasi mérési módszer verifikációja (kontroll)
- statikus tömörségi fok és teherbírasi modulus, ágyazási együttható és CBR% és víztartalom mérése
- statikus tömörségi fok és teherbírasi mérési-, nedvességtartalom mérési módszer verifikációja
- ismételhetőség és megbízhatóság több anyag típuson, több terhelési határral, eltérő szerkezeti rétegekre
- statikus tömörségi fok mérésének lehetősége a módosított Proctor-vizsgálat anyagjellemzőiből
- statikus mérés és módosított Proctor vizsgálat munkavégzése
- „QC” mellett a „QA” célú mérési feladatokra történő kiterjesztés
- elérhetőség KKV (SMA) vállalkozások részére is

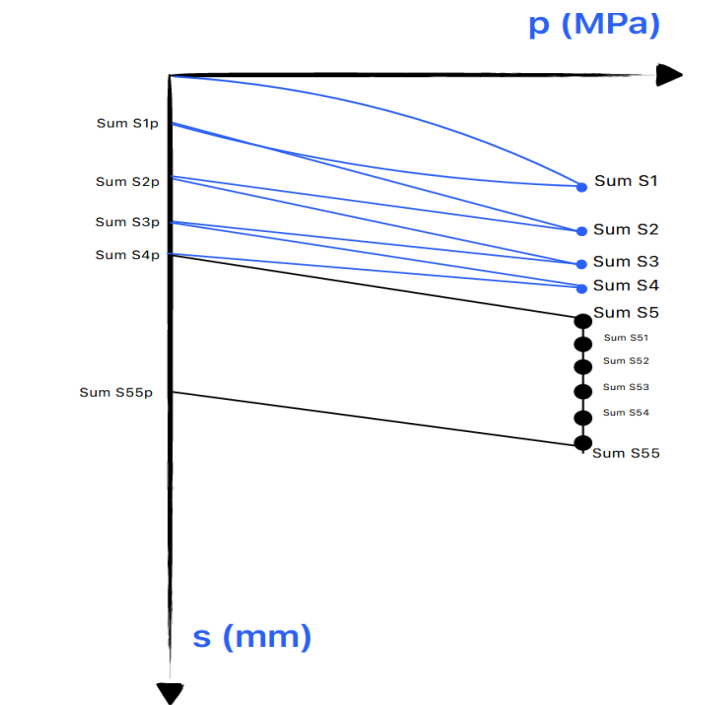
6.2. TERHELŐ AUTOMATIKA KIALAKÍTÁSA

- hidraulikus pumpa, adott (0,1bar/sec) sebességgel, adott kétutas hidraulika dugattyúhoz tartozó térfogatú hidraulikaolaj pumpálására (vagy sebességszabályozással ellátott visszaterheléssel, ekkor NEM kell kétutas hidraulika)
- kisméretű hidraulika szivattyú a szükséges fel/le terhelés és terhelési sebesség biztosítására
- kétutas hidraulika henger, mely alkalmas a felterhelés és visszaterhelés egyforma (választott) sebességének biztosítására
- nyomásmérő szenzor (pl. Tematec DMP331, vagy hasonló képességű)
- mérőszoftver által vezérelt processzoros mérés-vezérlés
- 12V vagy 24V Lítium-vasfoszfát akku tápellátással

A kialakítás változtatása még lehetséges, a megvalósíthatóságot akartuk bemutatni fenti kialakítással.

MÉRŐ AUTOMATIKA

- Távolagszmérő tapintásmentes, lézeres, ezred milliméter pontosságú, gyors, pontos mérés ezred mm pontossággal
- Nedvességtartalom mérés a tárcsa aljába épített
- IP67 védettség van a terepi használat miatt
- BT-192 Bluetooth adattovábbításra (alternatív)
- GPS pozíció meghatározás (LAT-LON),
- Mobil wifi,
- azonnali adattovábbítás, mérési jkv továbbítás informatikai feldolgozásra



8. ábra: SPLT műszer mérési elve.

6.3. MÉRÉS RÉSZLETES BEMUTATÁSA

Általános jellemzők: átszámítások, nyomás $1\text{ bar}=0,986\text{ atm}=100\text{ kPa}=0,01\text{ MPa}$

terhelési sebesség fel/le sebesség $v=0,1\text{ bar/sec} \gg 10\text{ kPa/sec} \gg 0,01\text{ MPa/sec-ig}$.

terhelési lépcső – egy ciklusban lépcsőkkel történő terhelés, kivárással és leolvasással.

Terhelés és visszaterhelés öt ciklusban, egymás után történik. Az első ciklusban a felterhelésben 6 terhelési lépcső van, a másodikban három, a harmadikban kettő, a negyedik és ötödikben nincs lépcső (mely szükség esetén a kialakítás, és szoftver alapján változtatható), és végig egyenletes terhelés történik. Terhelés és visszaterhelés *öt ciklusban* történik, folyamatos nyomás- alakváltozás méréssel.

ELŐTERHELÉS – PreLoading $0,02\text{ MPa}/30\text{ sec}$ kivárás, vissza és 5 s kivárás

TERHELÉS – LOADING $p=0,3\text{ MPa-ig}$

1.ciklus: lépcső 6, felterhelés $v=0,1\text{ bar/sec}$, $t=5\text{ sec}$, kivárás leolvasás előtt 5 sec . Felterhelés 1.ciklus vége 3 bar ($0,3\text{ MPa}$). Visszaterhelés után a pihentetés 15 sec , leolvasás visszaterheléskor és a pihentetés után 5 sec-dal is.

2.ciklus lépcső 3 lépcső, felterhelés $v=10\text{ kPa/sec}$, azaz $v=0,1\text{ bar/sec}$, $t=10\text{ sec}$, kivárás 5 sec . Felterhelés 2.ciklus vége 3 bar ($0,3\text{ MPa}$). Adat p-s 60 db , mérési idő $60\text{ sec} + \text{vissza } 60\text{ sec}$, (szoftver beállításától függően)

pihentetés 15 sec , leolvasás visszaterheléskor és a pihentetés után 5 sec-dal is.

3.ciklus lépcső 2 db, felterhelés $v=0,1\text{ bar/sec}$, $t=15\text{ sec}$, kivárás 5 sec . Felterhelés 3.ciklus vége 3 bar ($0,3\text{ MPa}$). Adat p-s 60 db , mérési idő $30\text{ sec} + \text{vissza } 30\text{ sec}$, (szoftver beállításától függő)

pihentetés 15 sec , leolvasás visszaterheléskor és a pihentetés után 5 sec-dal is.

4.ciklus lépcső 1db, felterhelés $v=0,1\text{ bar/sec}$, $t=30\text{ sec}$, kivárás 5 sec . Felterhelés 3.ciklus vége 3 bar ($0,3\text{ MPa}$)

adat p-s 60 db (60 sec) + vissza 60 sec , (szoftver beállításától függően)

pihentetés 15 sec , leolvasás visszaterheléskor és a pihentetés után 5 sec-dal is.

5.ciklus lépcső 1db, felterhelés $v=0,1\text{ bar/sec}$, $t=30\text{ sec}$, kivárás 5 sec . Felterhelés 3.ciklus vége 3 bar ($0,3\text{ MPa}$). Adatpár p-s $30\text{ db} + \text{kivárás leolvasás előtt } 5\text{ sec}$, vissza 30 sec , (szoftver beállításától

függően). Ez után új paraméter-mérés történik: terhelt állapotban kivárunk $5 \times 5 = 25$ sec-ot, leolvasás, majd visszaterhelés 30 sec, pihentetés 15sec, leolvasás, leolvasás visszaterheléskor és a pihentetés után 5sec-dal is.

SPLT MÉRÉS VÉGE.

Az SPLT mérés összesen 8-10 perc körüli, automatikus, emberi beavatkozás nélküli. Végén protokoll küldés beállított mail címre jkv/pdf.

PRINTER – egy lehetőség igény esetén, p-s grafikonnal ($x=p$ MPa, $y=s$ mm) hőpapíros, SEIKO DPU-H245 vagy hasonló, bármilyen típus megfelel. Beépített a lítium-akku, a hidraulika motor mellett, a vezérlő elektronika és adattároló (pld kivehető SSD) mellé helyezve.

Lehetséges párhuzamos – humánmentes - mérések

2 tárcsamérettel előre húzva, kitámasztva újabb vizsgálat, ami párhuzamosnak számíthat. Átlag, és protokoll küldés beállított mail címre jkv/pdf

Lehetséges ismételhetőségi – humánmentes - mérések

Másik műszerrel, másik pl. független labor egy időben mérhet a kivitelezői laborral, két tárcsa egymás mellett

Alternatíva lehetséges a leolvasásokban is. Másik megoldás lehet ugyanis az a mérési adatrögzítési megoldás, ahol minden sec-ben történik egy alakváltozási és egy terhelési érték leolvasás. Ez az adatpár p-s például 6 perc alatt $6 \cdot 60 = 360$ db adat ciklusonként majd egy visszaterhelés +360db (szoftver beállításától függően). Előnye a módszernek, hogy a 1,25mm-hez tartozó terhelés is (ezzel az ágyazási együtttható is) meghatározható egyetlen méréssel. Nyilván ez a megoldás összehangolandó a hidraulika (pneumatika) hengermozgásának sebességével (térfogatával) is.

Nedvesség-tartalom mérés

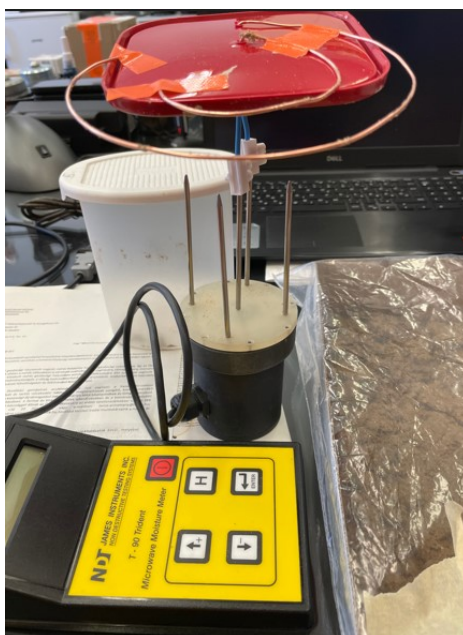
A víztartalom mérés a *statikus tárcsás tömörség mérési módszer*nél is nélkülözhetetlen. A laboratóriumi módszer mellett az alkalmazható a pontos és gyors mérési módszer a dielektromos állandó mérésének elvén történő nedvességmérési módszer, mely lehetséges oly módon, hogy a kevlár anyagú tárcsa talpán elhelyezett antennát alkalmazunk, A dielektromos-állandó elvén működő nedvességtartalom mérési eljárással nagy mérési tartomány (1-35m%) mellett, egy viszonylag szűk 1m% pontossági követelmény is teljesíthető.

A víz dielektromos állandója olyan nagymértékben különbözik minden más anyagétól, hogy emiatt a víztartalom közvetett mérése lehetségessé válik ilyen módszerrel. A kapacitív mérőcellás műszerek jellemző méréshatára 1-16% közötti és sokszor keveredik, hogy ez térfogatos, vagy tömegszázalékos eredmény-e egyáltalán. Pontos mérésre kalibrálva ezek a műszerek ezért nem kaphatók, gyári beállításuk ellenőrző mérése pedig igen komoly eltéréseket mutat. Felhasználói hangolásuk, finom kalibrálhatóságuk általában nem megoldott.

Arra a véleményre jutottunk, hogy először a fogalmak terén kell tiszta helyzetet teremteni, átláthatóvá és érthetővé tenni a mérés logikáját, mértékegységét (VwC% és MwC%). Jó példa erre a betontechnológia, ahol a tömegarányos száraz keverék-tervezés mellett a víztartalmat már liter/m³-ben tervezzük meg és a v/c tényezőnél döntő ennek ismerte. Ezt a VwC%*10 értékkel, mint liter/m³ tudjuk jellemezni, ami igen nagy dolog a stabilizációknál is, és a keverőtelepi cementes keverékeknél is.

Előkísérleteink szerint lehetséges a kevlár tárcsa alsó felén elhelyezett fém hurokkal a dielektromos állandót mérni (lásd 9.ábra) és ebből a VwC% (volume water content v%) és a hézag nélküli anyagsűrűség ismeretében MwC% (mass water content m%) értékét meghatározni. Ez a mért anyag módosított Proctor vizsgálatának ismeretében lehetővé teszi a Trw nedvességkorrekciós görbe meghatározását és ezzel a munkavégzési koefficiens értékével korrigált CWC munkavégzési korrekcióval a nedvességkorrekciós együttthatóval számított Statikus Tömörségi fokot. A lehetséges víztartalom mérés kialakítás a tárcsa alján is elképzelhető, melynek verifikációját mutatja a 9. ábra.

A nedvességtartalom meghatározása a nedvességhorrokción együtthatóhoz szükséges. Ugyanakkor ki fogunk térni a 3 cikkünkben arra is, hogy a szükséges módosított Proctor vizsgálat hogyan egyszerűsíthető, mi módon számítható a Proctor- görbe pontosan.



9. ábra: Dielektromos nedvességtartalom mérés – működő kísérleti verifikáció T-90 mérőműszerrel.

Balesetveszély sikeres csökkentése

A mérés fejlesztésében figyelemmel kell lenni a korábbi teherbírás mérés veszélyeinek minimalizálására is. Az automata mérés ezt is képes biztosítani. Veszélyes volt a mérőeszköz felállítása, és maga a mérés elvégzése is. Előfordult korábban a terhelés során kivágódó közgyűrű, támaszmagasító, vagy az ellensúly biztosító gép lebillenése. Ezeket a veszélyeket, a szükséges munkavédelmet az összes mérési szabvány elegánsan a mérést végzők hatáskörébe utalja, mint a mérőszervezetnél szabályozandó balesetvédelmi kérdést.

A lehetséges balesetek kivédésére is kitérő fejlesztést tartottunk szükségesnek, mely eleve kizárja a sérüléseket.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Célunk egyrészt a tárcsás teherbírás mérés problémáinak elemzése volt, mely alkalmas lehet a megoldás tesztelésére. Megadtuk a javasolt új automata műszer és mérési mód egy lehetséges változatát és alkalmazásának vizsgálatát - mint lehetséges módszert - egy új statikus tömörségi fok meghatározására.

Áttekintettük a korábban alkalmazott, tömörséget jellemezni kívánó megoldásokat, mint a tömörségi tényező és a MK megismert T1-T2% elmélete. Megállapítható, hogy a Tt nem alkalmas a tömörség jellemzésére, sem az elméleti megfontolások, sem a szakirodalom alapján, ugyanakkor megoldás szükséges arra, hogy ilyen esetekben is lehessen tömörséget előírni, mérni és minősíteni. Más megoldást kell tehát találni a statikus tárcsás mérésből a tömörségi fok meghatározására.

A MK módszerét részleteiben áttekintettük és más utat javasoltunk a tömörödési alakváltozás értelmezésére. Ennek ellenére a kísérlet *kiemelkedő és dicséretre méltó*, mert felkeltette a figyelmet. Elsőnek próbálta meg a statikus mérési módszert tömörség újszerű jellemzésére alkalmazni. Ki gondolt eddig arra, hogy tárcsás mérésből tömörségi fokot mérjen? Senki a világon – csak egy Magyar Közutas. Nagy köszönet illeti Öt érte.

A mért alakváltozás a teherbírás mérésekben is a rugalmas és a maradó alakváltozásból tevődik össze, de a teherbírás mérésben együtt vesszük figyelembe. A maradó alakváltozás további két részre bontható, a plasztikus és a tömörödési alakváltozásra, mely utóbbi a levegő eltávozásával jár a $V = s + v + l$ térfogati rendszerből. Ezért a Tömörödési fokot csak a tömörödési alakváltozás jellemzi.

Az általunk javasolt statikus tárcsás tömörség- és teherbírás mérési módszer - *egyedülálló, új és egy szokatlan törvényt ajánl.* Az első két felterhelés E_1 és E_2 ugyan hasonlít a megszokotthoz, de a felterhelés sebességét és a kivárások hosszát pontosan szabályozza. A mérés **automatizált**, azaz a **humán hibák egyáltalán nem érvényesülhetnek a mérésben.** Az első és második felterheléseket kiegészítettük egy harmadik, negyedik, végül egy ötödik felterheléssel, a tanulmányban részletesen ismertetett módon és céllal. A **humán hibák nagyságának igazoló kimérésére összehasonlító mérések előnyösen alkalmazhatók**, mely egyben az automatizált mérés előnyeit is igazolja a mérőszemélyzetnek.

Az új eljárás a valós tömörségi eredményt a helyszínen kis jelentős időtöbblettel, de jelentősen kevesebb fizikai munkával határozza meg. A negyedik –ötödik felterhelést egy lépcsőben végezzük. Minden felterhelésnél *lényeges az 5-15sec szabály betartása*, azaz minden lépcsőnél a kivárás a leolvasás előtt 5sec, és minden végterhelésnél a kivárás 15sec *azaz NEM várjuk ki a szubjektívnak minősülő „teljes konszolidációt” soha, mert azt külön megmérjük.*

Az ötödik felterhelés célja pont az eddig kihagyott, de itt már *sokkal pontosabban kimérhető plasztikus alakváltozás meghatározása.* Egy lépcsőben ismét felterhelünk $p=0,3$ MPa-ra leolvassuk 5 sec múlva (S_{51}) és utána a terhelést tartva, kivárunk pl ötszörös **5*5= 25sec-ot**, majd az alakváltozást 5 sec múlva leolvassuk (S_{52}). A visszaterhelést egy lépcsőben végezzük el $p=0$ MPa-ra, ami után 15 sec-et kivárva a maradó alakváltozást is leolvassuk.

Ezek alapján a számítások elvégezhetők, melyet a tanulmány részletesen és lépésenként bemutat. Számítható így módon a teherbírasi modulus, ágyazási tényező, CBR% hagyományosan, valamint sok új jellemző és sok egyéb átszámítás. Ezek között legfontosabb a statikus tömörségi fok meghatározása, mely felterhelésenként meghatározható.

Az összehasonlító és verifikációs mérések eredményeit bemutatva azt tapasztaltuk, hogy a teherbírasi modulusok ezzel a módszerrel pontosabban határozhatók meg, és a statikus tömörségi fok is alkalmasnak tűnik a további fejlesztések folytatására.

Összefoglalva, jelen publikációban célunk a statikus tárcsás tömörség- és teherbírás mérés problémáinak megoldására javasolt új műszer és egy új mérési mód bemutatása volt, mint lehetséges megoldás a teherbírasi modulusok, valamint a statikus tömörségi fok meghatározására. **A teherbírasi modulus** számításához mindig a teljes alakváltozást kell figyelembe venni, míg a tömörségi foknál csak a tömörödési alakváltozást.

Fontos az eredmények ismételtetősége szempontjából a felterhelési és kivárási idő egységesítése, az *alakváltozási sebesség.* Ennek megvalósítása csak a humán faktor kizárásával lehetséges. *Kizárólag az automatizált mérésben látjuk a megoldást, ami teljesen kiküszöböli a szubjektív hibákat.*

Ez nagy lépés lenne a párhuzamos teherbírás mérések szabványosítására is, mely most az MSZ 2509-3-ban nincs előírva. Az automatizált mérés lehetővé tenné, hogy a mérési eredményben kizárólag a talaj adottságok domináljanak és ne a mérőszemélyzet szokása. A felterhelés rögzített sebessége mellett a fix kivárás tűnik számunkra megvalósítandónak a valóban jellemző teherbírasi értékek mérésének biztosításához. Ez a prototípus tesztelesekor pontosítható. A megvalósításra javasolt **új statikus tömörség mérési módszer** és műszer prototípus mind a teherbírasi modulusok, mind a statikus tárcsás mérésből számított statikus tárcsás tömörségi fok jelenleg egyedülálló mérési módszere igen nagy segítség lenne az építőipari szakmának az egész világon, a minőségbiztosításban és a minősítésben egyaránt. Keressük ehhez Magyar partnereinket, és szponzorokat.

Az emberi hibáktól mentes automatizált mérés kiemelkedő lehet a QC/QA méréseknél. Jelenleg a minősítő teherbírás mérés a személyzettől és szokásoktól oly mértékben függ, hogy az automatizált mérés hatalmas változást és így módon **minőségi ugrást jelent az építőiparnak.**

A tapasztalatok alapján a hazai MSZ2509-3 statikus teherbírás mérést is vélhetően aktualizálni lehet. Ebben segítség a prototípus kialakításának felvázolt módja, de nyilván szükségesek lesznek a nagyszámú verifikációs mérések független személyzettel, melyből a végső kialakítás és következtetés

levonható. A bemutatott elmélet, a kísérleti mérések biztatóak és indokoltá teszik a fejlesztés folytatását, kibővítését.

A következő cikkben elemezni fogjuk a tömörségi fok meghatározásához szükséges tömöríthetőségi vizsgálatok lehetőségeit, egyszerűsítéseit, összefüggéseit, számítástechnikai alkalmazását, eddigi elemzéseket. Remélhetőleg ezek hozzájárulnak majd ahhoz, hogy egyszerűbben elvégezhetők, gyorsak és pontosak legyenek. Indokolt lehet továbbá áttekinteni a jelenlegi teherbírási előírásainkat is a megállapítások tükrében, lehet-e, kell-e változtatni valamit, milyen megoldások alkalmazhatók az eddigi problémák új megoldására, megközelítésére.

8. IRODALOMJEGYZÉK

- [1]: Kézdi, Á. 1975: Talajmechanika II. *TK Budapest*
- [2]: e-UT 06.03.53: Kötőanyag nélküli és hidraulikus kötőanyagú burkolatok
- [3]: BS 1377- 9 [BS EN ISO 22476-3] Methods for test for soils for civil engineering purposes In-situ tests, 4.1. Determination of the vertical deformation and strength characteristics of soil by the plate loading test
- [4]: MSZ 2509-3:1989 Útpályaszerkezetek teherbíró képességének vizsgálata. Tárcsás vizsgálat
- [5]: MSZ EN 13286 – 2 Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 2: Test methods for the determination of the laboratory reference density and water content. Proctor compaction.
- [6]: MSZ EN 13286 – 3 Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 3: Test methods for laboratory reference density and water content. Vibrocompression with controlled parameters.
- [7]: EN 13286 – 4 Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 4: Test methods for laboratory reference density and water content. Vibrating hammer.
- [8]: Tamás, J. MK Miskolc: E kettő (E2): ember és a tévedés (kézirat / mail)
- [9]: J. Hothan, H. Beyer 1993: Der Platendruckversuch im Spiegel seiner Ergebnisse. Straße und Autobahn 12 p725 – 727
- [10]: Tilmann, D. 1981: Grubbs – Type Estimators for Reproducibility Variances in an Interlaboratory Test Study. *Journal of Quality Technology*, Volume 23, p 324 – 335]
- [11]: Liptay, A. 2009: A tárcsás teherbíró képesség vizsgálatának pontossága. A mérési bizonytalanság meghatározásának problémái, *ÚTLAB*.
- [12]: Schubert, I. & Subert A. 2023: Tárcsás teherbírás-mérés megújítása, kiegészítése, 1. rész: Tárcsás teherbírás mérés módszereinek áttekintése és kérdései, *Útügyi Lapok*, <https://doi.org/10.36246/UL.2023.1.03>
- [13]: Subert I. 2005: A dinamikus tömörség- és teherbírás-mérés újabb paraméterei és a modulusok átszámíthatósági kérdései, *Közüti és mélyépítési szemle* 55. évf. 1. sz.
- [14]: Ézsaiás, L. 2009: Földművizsgálati módszerek megbízhatóságának elemzése, *Közlekedéscsépítési szemle*, 59.évf. 2.szám, p.15-23.
- [15]: MSZ EN 13286 – 2 Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 2: Test methods for the determination of the laboratory reference density and water content. Proctor compaction.
- [16]: Measuring Method for Dynamic Compactness & Bearing Capacity with SP-LFWD CWA 15846, WS33
- [17]: Subert et al. 2017: Test and Method is Proposed for Measuring The Dynamic Compaction-rate and Dynamic Modulus in Earthworks/ „Test et méthode sont proposés pour mesurer le taux de compression dynamique et le module dynamique dans les travaux de terrassement” Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017. p:657-660
- [18]: Subert, I. 2006: Method for measuring Compactness-rate with New Dynamic LFWD. XIII. Danube-European Conference on Geotechnical Engineering Ljubljana, Slovenia, 2006
- [19]: P02 00715 Eljárás szemcsés anyagrétegek tömörségének helyszíni mérésére
- [20]: P20 00170 Javított tulajdonságú terhelőtárcsa ejtősúlyos mérőkészülékekhez
- [21]: P22 00258 Előttértárcsa terhelőtárcsás ejtősúlyos mérőkészülékekhez

- [22]: P23 00011 Készülék és eljárás talajok és szemcsés anyagok fizikai jellemzőinek, különösen statikus tömörségének meghatározásához
- [23]: FGSV 516:2003 Merkblatt für die Verdichtung des Untergrundes mit Unterbaues im Straßenbau.
- [24]: CWA 15846 Measuring Method for Dynamic Compactness & Bearing Capacity with SP-LFWD, WS33
- [25]: Subert, I. 2006: Dynamical compactibility measurements on Hungarian highways and reconstruction in cities, Geotechnical Conference in Ráckeve, Hungary (17-18. of October 2006.)
- [26]: Subert, I. 2005: Dinamikus tömörségmérés aktuális kérdései. A dinamikus tömörség mérés újabb tapasztalatai, Geotechnika Konferencia, Ráckeve. (2005. október 18-20.)
- [27]: Subert, I. 2004: Új, környezetkímélő, gazdaságos mérőeszközök a közlekedésépítésben, Geotechnika Konferencia, Ráckeve. (2004. okt. 26-27.)
- [28]: Subert, I. 2005: A dinamikus tömörség- és teherbírásmérés újabb paramétereit és a modulusok átszámíthatósági kérdései, *Közüti és mélyépítési szemle* 55. évf. 1. sz.