

## Earthworks compaction ratio and compaction methods – deep compaction with Impactor 2000

### Földmunkák tömörsége és tömörítési módszerek – mélytömörítés Impactor 2000-rel

*FÜLÖP Balázs–Csaba*, drd építőmérnök

S.C. Inreco Remix S.r.l., Str. Călimanului, Nr. 26, Marosvásárhely, Maros megye,

[www.inreco.ro](http://www.inreco.ro)

#### Abstract

*The load from every building, bridge, road and railroad is transmitted in direct or indirect way into the deeper earth layers, through the earthwork. Whenever a structure is damaged, the quality of earthwork is checked first and in many cases the cause is found in it. This is when the question always arises: "Why did it happen? Who is to blame? What should have been done differently?". The answers we can find in Karl von Terzaghi's words: "The one thing an engineer should be afraid of is the development of conditions on the job which he has not anticipated. The construction drawings are no more than a wish dream. I have the impression that the great majority of dam failures were due to negligent construction and not to faulty design."*

#### Kivonat

*Minden egyes épület, híd, út és vasút tömegéből eredő terhelés közvetett vagy közvetlen módon, de végül egy földművön keresztül jut át a föld mélyebb rétegeibe. Valahányszor egy szerkezet megsérül, legelőször a földmű állapotát ellenőrzik és nagyon sok esetben ebben is találják meg a kiváltó okot. Ilyenkor mindig felmerül a kérdés: „Miért történt? Ki a hibás? Mit kellett volna másként tenni?”. A választ megtaláljuk Karl von Terzaghi szavaiban: „The one thing an engineer should be afraid of is the development of conditions on the job which he has not anticipated. The construction drawings are no more than a wish dream. I have the impression that the great majority of dam failures were due to negligent construction and not to faulty design.”, miszerint a kiváltó ok a legtöbb esetben nem a tervezésben, hanem a kivitelezésben keresendő.*

**Kulcsszavak:** tömörség, tömörítés, ellenőrzés, impactor

## FÖLDMUNKÁK TÖMÖRSÉGE ÉS TÖMÖRÍTÉSI MÓDSZEREK - MÉLYTÖMÖRÍTÉS IMPACTOR 2000-REL

### 1. Tömörség

A tömörödés az a fizikai folyamat, amely során mechanikai munka hatására az anyag szilárd összetevői újra rendeződnek, csökkentve az anyag porozitását és ezáltal egységnyi tömegű anyagnak a térfogatát. Más szóval, a tömörítés hatására megnövekszik az anyag sűrűsége. Ebből a gondolatmenetből kiindulva, a tömörség ellenőrzésére a legjobb módszer a sűrűség változásának a követése.

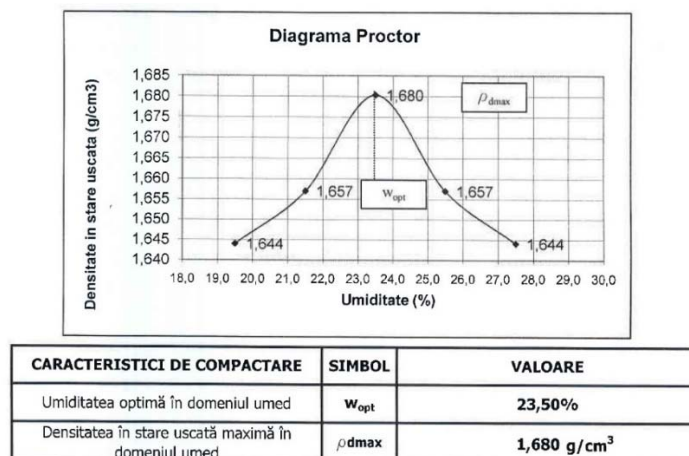
A tömörség növekedésének következménye az anyag mechanikai ellenállóképességének a növekedése és a vízáteresztő képességének a csökkenése. Vannak tömörség vizsgálatok, amelyek az anyag mechanikai ellenállásának mérésére alapoznak. Fontos megjegyezni, hogy az anyag tömörsége nagyban befolyásolja a teherbírást, de nem írja le annak valós értékét, így minősítésére célszerű külön teherbírás mérést végezni.

A tömörség mérésére a következő módszerek vannak használatban hazánkban:

#### 1.1. Proctor vizsgálat

Proctor vizsgálat [11] során követni lehet az anyag sűrűség változását a víztartalom függvényében. A próba sorozatban növekvő víztartalom mellett azonos mechanikai munkával tömörítik a próba testeket, majd

egy Gauss görbén ábrázolják az eredményeket. A görbe csúcsán található az optimális tömörödési víztartalom ( $w_{opt}$ ) hatására kialakult maximális sűrűség száraz állapotban ( $\rho^{d,max}$ ).



1. ábra  
Proctor vizsgálat eredményének ábrázolása

Annak függvényében, hogy milyen típusú anyagot vizsgálunk és azt milyen funkcióju rétegbe építjük be [14], az alábbi vizsgálatokat különböztetjük meg:

- Proctor normal: kötött talajok (földmunka, javítóréteg)
- Proctor modificat: szemcsés anyagok (alap és teherhordó réteg)

A két vizsgálat folyamatában nincs különösebb eltérés, a különbség a Proctor modificat próbatestek kialakításában és a többlet mechanikai munkával való tömörítésben van. A Proctor modificat értéke nagyobb, mint a Proctor normal értéke. Fontos, hogy a terepen való ellenőrzés folyamán nyomon kell követni a talaj típus változást, mivel ez téves eredményeket produkálhat.

A beépített anyag tömörségének a megállapításához [12] szükséges a beépített anyag sűrűségének a lemérése. Ehhez a vizsgálandó réteg teljes vastagságából mintát vesznek és megméri mérlegben (m), a minta térfogatát (V) vízzel vagy homokkal helyettesítve mérik le. Innen a beépített anyag sűrűsége  $\rho^d = m/V$ .

A labor körülmények között végzett Proctor vizsgálat eredményét tekintjük 100%-nak. A réteg tömörsége a Proctor vizsgálat eredményéhez viszonyított arány szám, százalékban kifejezve:  $D = (\rho^d / \rho^{d,max}) * 100$  (%).



2. ábra  
Tömörség mérés talaj javítás után: Hala NTN Sibiu

## 1.2. Könnyű ejtősúlyos tárcsa

Dinamikus tárcsás teherbírás vagy könnyű ejtősúlyos teherbírás (LWD – Light Weight Deflectometer) esetén [18] egy dinamikus erő hatására mért elmozdulást mérnek. A kapott adatokat ( $E_{VD}$ ) felhasználhatjuk teherbírás mérésére ( $MN/m^2$ ) és a tömörség kiszámítására. Európa nagy részén széles körben használják úgy teherbírás, mint tömörség mérésére, úgy szemcsés, mint kötött talajok esetén, de nem javasolt stabilizált talajok vizsgálatára, főleg miután a kötési folyamat megindult. Romániában ez a mérési módszer nincs szabványosítva, viszont a földmunkáknál elfogadják [1] belső ellenőrzéshez.



3. ábra  
LWD teszt: DJ 693, Temes megye

Fontosnak találom megjegyezni, hogy helyiszini méréseknek elfogadnak egy 3 terhelésből álló folyamatot, aminek eredményeit egyaránt felhasználják a teherbírás mérésére és a tömörség meghatározására. Az eredmények értelmezése főleg korábbi mérések tapasztalatára és összehasonlító táblázatra alapszik. Ez az értelmezési módszer nagyon sok esetben téves és/vagy rosszul kielemezett eredményeket hoz, ami hatására könnyen kivitelezési hibákat lehet véteni. Ezzel ellentétben a nemzetközi [18] szabványok szigorúbb használatra ösztönöznek, pl. a tömörség megállapításához 18 terhelés szükséges.

## 1.3. Statikus tárcsa

Statikus tárcsás teherbírás [4] [17] vagy Lucas tárcsás teherbírás esetén egy statikus, több lépcsős erő terhelés hatására mért elmozdulást mérnek. A második terhelésből ( $E_{v2}$ ) kapott adatokból kiszámítható teherbírás ( $MPa$  vagy  $N/mm^2$ ) és a két terhelés adataiból következtethetünk egy valószínű tömörségre. Ezt tömörödési tényezőnek [1] hívjuk ( $E_{v2}/E_{v1}$ ).

Pământuri coezive		Pământuri necoezive	
Gradul de compactare D (%)	Raportul $E_{v2}/E_{v1}$	Gradul de compactare D (%)	Raportul $E_{v2}/E_{v1}$
>100 %	<2.3	>100 %	<2.3
>97 %	<2.5	>98 %	<2.5
>95 %	<2.6	>97 %	<2.6

4. ábra  
AND 530 – tömörödési tényező és tömörség kapcsolata

A tömörödési tényezőt nem tekinthetjük egyértelmű eredménynek a tömörség meghatározására. Értelmezése tapasztalatot igényel és nehéz számszerűsíteni. Mivel a dinamikus tárcsával ellentétben, a statikus tárcsás mérés szabványosított hazánkban [13], a tervezési fázisban az elérendő teherbírást gyakran az  $E_{v2}$  értékében határozzák meg és vele együtt a tömörödési tényezőt  $E_{v2}/E_{v1}<2$ -ben. A realitás azt mutatja, hogy ez az érték csak zúzott kő és CKT esetén garantálható optimális körülmények között, míg a talajok esetén a fenti táblázatban is leírt 2,3 érték a várható, de előfordulhat cementes és meszes talajstabilizáció esetén a  $E_{v2}/E_{v1}<2$  eredmény.



5. ábra

*Lucas teszt: Kaufland Brassó, Brassó megye*

Továbbá fontosnak tartom megjegyezni, hogy a fenti mérések és a tömörség közti relációk hiányosak és nehezen értelmezhetők. Ugyanakkor a statikus és a dinamikus tárcsás mérések [1] közötti összefüggésre van egy megközelítő képlet  $E_{v2} \approx 600 \cdot \ln(300/300 - E_{VD})$ , ami nagy szórást eredményez  $E_{v2}/E_{VD}=(1-4)$ . Elméletileg lehetségessé teszi a tárcsás teherbírás kiváltását, de gyakorlatilag nagy valószínűséggel újabb téves eredményekhez vezet.

## 2. Tömörítési módszerek

A helyes tömörítési módszer [6] kiválasztásához szükséges előzetesen meghatározni a tömörítendő anyag típusát és a tömörítendő réteg vastagságát/mélységét.

Statikus tömörítés során a tömörödéshez csak a gép saját súlya járul hozzá, ami a kerekek felületén adódik át. Legtöbb esetben gumikerekekkel szerelt henger vagy juh lábas vaspalástú henger. A statikus tömörítést az alábbi esetekben javasolják:

- a szemcsés anyagok legfelső rétegére, mert az erőteljes vibrálás hatására hajlamos fellazulni
- bevágásban elhelyezkedő kötött talajokra, mert az erőteljes vibrálás hatására a víz hajlamos a felsőbb rétegben összegyűlni, ezáltal a kötött talaj plasztikussá válik és elveszíti tömöríthetőségét és teherbírását

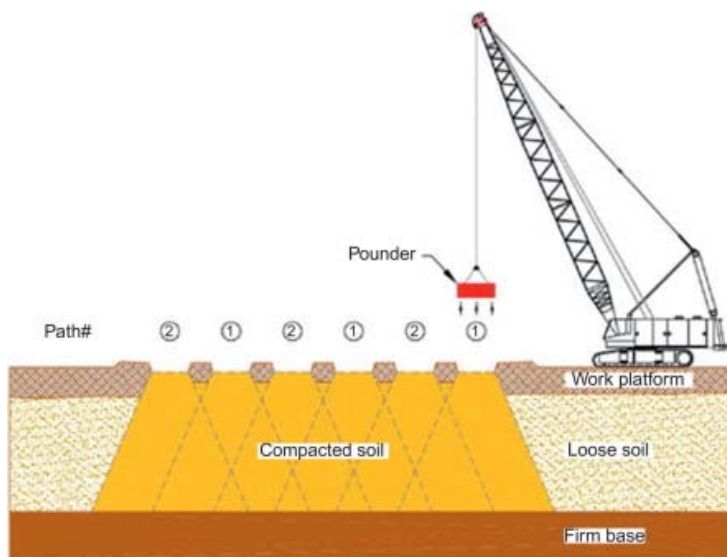


6. ábra  
Szemcsés anyag statikus tömörítése gumihengerrel: DJ693, Temes megye

Dinamikus tömörítés során a tömörödéshez együttesen járul hozzá a gép saját súlya és egy mozgási energia. Annak függvényében, hogy a tömörítendő réteg hol helyezkedik el, beszélhetünk felszíni és mély tömörítésről.

### 2.1. Mélytömörítés

Dinamikus mélytömörítés esetén egy beton és acélból álló, mérettől függően 6-40 tonna tömegű súlyt engednek szabadon esni 10-30 méter magasságból. Ezen módszer javasolt azoknak a homokos és lösszöid általajoknak melynek vastagsága minimum 2-3 m, de a gép méreteinek függvényében lehet akár 6-8 méter is.



7. ábra

Dinamikus mélytömörítés: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/dynamic-compaction>

Mivel a tömörítéshez szükséges az optimális víztartalom, szárazság esetén szükségessé válhat a víztartalom javítása locsolással. Az egyenletes eredmény érdekében célszerű a meghatározott számú üteget gyakorolni minden pontra és ezen pontokat rácsháló szerűen elhelyezni a munkaterületen. A munkálatok során az ütések hatására a felület egyenletlenné válik, amit a következő munkafázis kezdése előtt ki kell egyenlíteni.

Fontos megjegyezni, hogy ez a technológia nem alkalmazható agyagos talajokra és 2 méternél kisebb rétegekre. Szerkezetileg nagyok, szállítsuk körülményes és magasságuk miatt instabilak, egyenes felületre van szükség vontatásukhoz.

### 2.2. Felületi tömörítés

Felületi dinamikus tömörítés esetén a célgép rendelkezik egy vibráló szerkezettel. A súlyok szabadesése helyett az általa keltett vibrációkkal járul hozzá a folyamathoz. Az előző gépekhez képest tömegük

kisebb: 100 – 25.000 kg, ahogy az általuk tömörített vastagság is: ~50cm. Ebből az okból kifolyólag nem javasolják a szabványok [1] [3] a 30 cm-nél vastagabb rétegek betöltését/ tömörítést. Ugyanakkor nagyrésztük önjáró vagy vontatott, mozgás közben tömörít, nem igényel használatuk különleges körülményeket és szállításuk egyszerű.



8. ábra

*Dinamikus felszíni tömörítés: WDP Ștefănești de Jos, Ilfov megye*

Saját tapasztalataink alapján, az optimális tömörség eléréséhez a henger méretének megválasztásakor a következőket érdemes tartani:

- kötött talajok: 500 kg/cm
- szemcsés anyagok: 700 kg-cm

### 2.3. Impact technológia

Az Impact technológia felszíni és a mélytömörítés közti rést hivatott kitölteni, azaz 50-200 cm közti rétegek tömörítésére képes. A szerkezet a vontatott hengerek csoportjába tartozik [5]. Működési elve ugyancsak az előbbi két technológia keveréke. A vontatott eszköz egy forgó szögletes test valamely élével üti meg a felületet. Ez lehet három, négy vagy öt oldalú. A dinamikus hengereknél látott vibráló szerkezet helyett, egy a szabadesést felgyorsító rugós szerkezet segíti növelni a becsapódási energiát. Mivel az ütések frekvenciája és amplitúdója a két korábbi technológiában tapasztaltak közé esik, úgy az általa kifejtett hatás is ezen kettő közé esik.



9. ábra

*Impactor 2000 típusú vontatott impact henger*



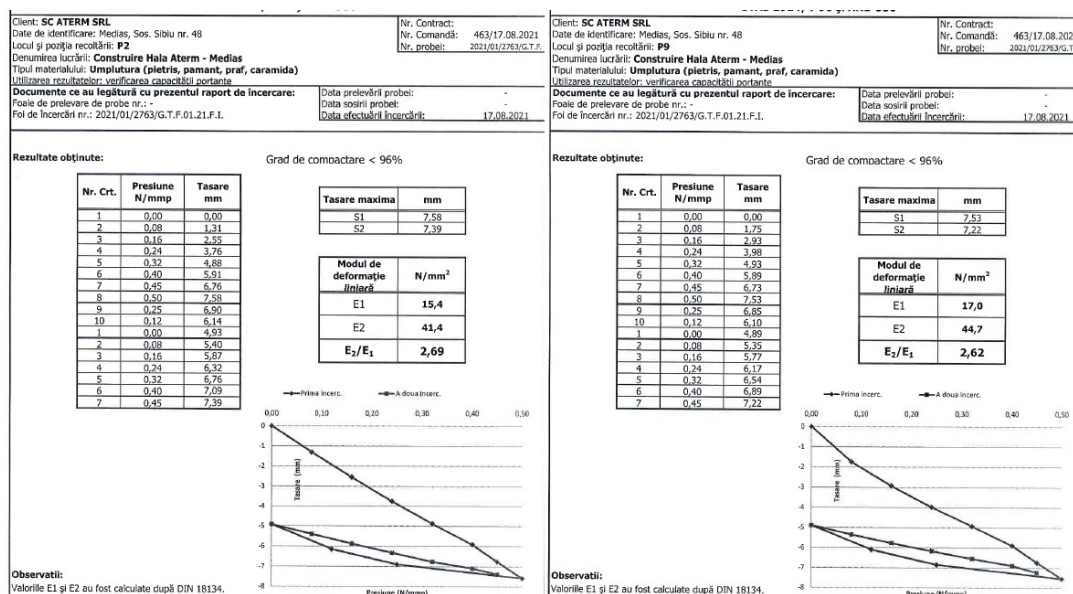
A földmunkálatok kezdetekor általánosan leástak közel 1-1,5 méter, kialakítva ezzel a földmű felső szintjét. Ezt a felületet dinamikus felszíni módszerrel tömörítették egy 16 tonnás kombi-vibro hengerrel.

### 3.2. Elvárások, munkavégzés, eredmények

#### 3.2.1. Elvárások

Tervezési fázisban a legelső és csaknem a lefontosabb feladat az alapozás megtervezése. Ez a földmű a geotechnikai szabványok alapján gyengének számít alapozáshoz, így cölöp alapokat terveztek az épületnek. A gond az úthálózat és az épület padlólemezének lehetséges süllyedésében van.

Tekintve, hogy a földmű nem homogén, a benne található nagyobb beton darabok miatt penetrációs vizsgálattal a teherbírás nem volt megállapítható. A padlólemez szerkezete alatti földmű teherbírását  $E_{v2} \geq 45$  MPa-ban határozták meg. A tömörítési folyamat befejeztével, ahol szemcsés anyagból volt a töltés, ott nagyrészt megközelítették a mérési eredmények az elvárt értékeket, a felületen magas agyag tartalmú zónák messze elmaradtak. További gondot jelentett, hogy az egyetlen rétegvastagság és nem homogén rétegek süllyedési mértéke nem előrelátható.



12. ábra

Statikus tárcsával mért teherbírás: Medgyes, Szegen megye

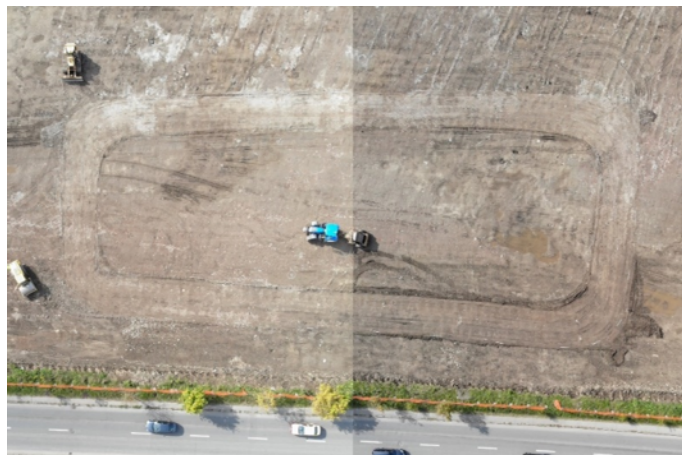
Elvárásként a következők fogalmazódtak meg:

1. általánosan el kellett érni az  $E_{v2} \geq 45$  MPa értéket
2. minimálisra csökkenteni a későbbi süllyedés esélyét
3. megtalálni és kijelölni azon területeket a földműből amit feltétlenül szükséges kicserélni

#### 3.2.2. Munkavégzés

A munkavégzés első szakaszában indokolt egy próbaszakasz építése annak érdekében, hogy meg lehessen állapítani a szükséges menetek számát. Ennek érdekében egy ellipszis alakú pályát alakítottunk ki úgy, hogy az egyik fele a szemcsés anyagon míg másik fele az agyagos területen fekdjön. Ahhoz, hogy a felület minden pontját ütés érje, minimum 3 hengerjárat szükséges. Többszöri próba után, a minimum szükséges hengerjárat számot 5 darabban állapítottuk meg.

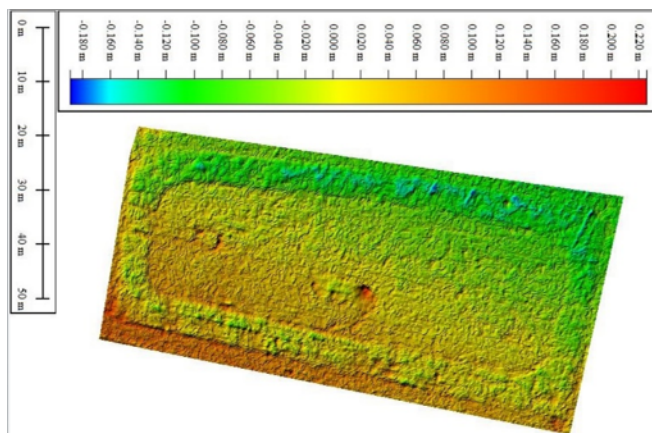




13. ábra  
Próbaszakasz felülnézetből: Medgyes, Szeben megye

Amint az Impactor végzett a szükséges számú járattal, az így egyenletlenné vált felületet bulldózerrel egyenesre simítottuk, ügyelve arra hogy csak a próbaszakasz területéről ne hordjon ki anyagot. Az így lazává vált felületet földmunka hengerrel újra tömörítettük.

A próba szakasz felületét és a tengerszinthez mért magasságát, a geodéták felmérték GPS segítségével és összetett drón felvételeket készítettek úgy tömörítés előtt mint a tömörítés után. Fotogrammetriával követni lehet a szint változásokat, a méréseket egymásra helyezve meghatározhatjuk süllyedés mértékét.



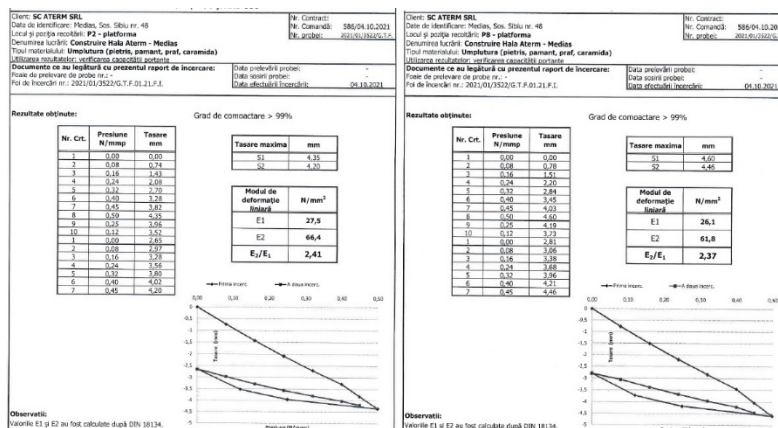
14. ábra  
Fotogrammetriával ábrázolt szintkülönbség: Medgyes, Szeben megye

A próbaszakasz építése a labormérésekkel ért véget. Ellenőrizve lett a tömörség és a teherbírás statikus tárcsás (Lucas) méréssel. Annak érdekében, hogy a változások minél inkább nyomon követhetőek legyenek, próbáltuk a méréseket a korábbi mérések közelében végezni. Mivel a töltés nem homogén és nagyobb beton elemeket is tartalmaz, nem sikerült sem a tömörítés előtt sem utána penetrációs vizsgálatot végezni.

### 3.2.3. Eredmények

Amint a labor visszaigazolja, hogy az eredmények megfelelnek az elvárásoknak, a munkálatok folytatódhatnak a teljes területen. A munkálatok előre haladtával folytatódnak a labor mérések is. A teljes felületet megvizsgálva a következő eredményeket kaptuk:

- sikerült elérni az  $E_{v2} \geq 45$  MPa értéket mindenhol, ahol a töltés szemcsés anyagból készült
- az agyagos területek elveszítik a stabilitásukat a nagy energiájú vibrációk hatására, ezáltal jól behatárolható az a terület, ahol kötelező módon ki kell cserélni a töltést
- átlagosan 10 cm-t süllyedt a felület, ami előtte is már tömörítve volt, így csökkent a későbbi süllyedés esélye



15. ábra

Statikus tárcsával mért teherbírás: Medgyes, Szegen megye

Szeretnénk ezen méréseket újra elvégezni egy homogén, természetes állapotában található, lehetőleg kevésbé kötött talajon. Ez esetben egy homogén környezet kizárná a téves eredmények lehetőségét. Ugyanakkor előtte és utána végezhetnénk penetrációs tesztet. Így remélhetőleg még pontosabb rálátást adna a tömörödés mélységéről és mértékéről. Vele egyidejűleg láthatnánk a teherbírás növekedését, olyan eredményeket kapva, amik sokkal értékelhetőbbek és relevánsabbak a tervezés folyamatában.

## KÖVETKEZTETÉS

Az Impactor 2000 és az impact technológia nagyon hatásos altalajok tömörítése és akár kontrolált töltések készítésére is. Gyenge teherbírású altalajok esetén alternatívát nyújthat a talaj cserére vagy a cementes/meszes talaj kezelésére, továbbá kiválthatja a nehezen szállítható mélytömörítő gépezeteket a homokos és löszöid talajok esetén.

Tekintve az elmúlt években példátlanul magas üzemanyag és építkezési anyag árakat, a fent prezentált technológiákhoz hasonló alternatívákat kell keresnünk egy ekonomikusabb földmunka építéshez, ügyelve arra, hogy nem vállaljon a minőség kárára.

## SZAKIRODALOM

- [1] „AND 530-2012 - Instructiuni privind controlul calitatii terasamentelor”.
- [2] „C 169-1988 - Normativ privind executarea lucrărilor de terasamente pentru realizarea fundațiilor construcțiilor civile și industriale.”.
- [3] „C 182-87 - Normativ privind executarea mecanizata a terasamentelor de drumuri”.
- [4] „DIN-18134 - Determining the deformation and strength characteristics of soli by plate loading test”.
- [5] „EN 16907 - Earthworks”.
- [6] „GE 026-1997 - Ghid pentru executia compactarii in plan orizontal si inclinat a terasamentelor”.
- [7] „GT 067-2014 - Ghidul privind controlul lucrarilor de compactare a pamanturilor necoezive”.
- [8] „NE 008-97 - Normativ privind imbunatatirea terenului de fundare prin procedee mecanice - Indicativ C 29-85”.
- [9] „NP 125-2010 - Normativ privind fundarea constructiilor pe pamanturi sensibile la umezire”.
- [10] „SR 4032-1-2002 - Lucrari de drumuri - Terminologie”.
- [11] „STAS 1913-13 - Teren de fundare, Determinarea caracteristicilor de compactare, incercarea PROCTOR”.
- [12] „STAS 1913-15 - Teren de fundare, Determinarea greutatii volumice pe teren”.
- [13] „STAS 2914-4 - Determinarea modulului de deformatie liniara - Lucrari de drumuri si de cale ferata”.
- [14] „STAS 2914-84 - Lucrari de drumuri, Terasamente\_Conditii tehnice generale de calitate”.
- [15] „STAS 8840-83 - Lucrari de drumuri, StratURI de fundatii din pamanturi stabilizate mecanic, Conditii tehnice generale de calitate”.
- [16] „STAS 9850-89 - Verificarea Compactarii Terasamentelor, Lucrari de imbunatatiri funciare”.
- [17] „MSZ 2509-3 – Útpályaszerkezetek teherbíró képességének vizsgálata\_Tárcsás vizsgálat”.
- [18] „UT 2-2.124 - Dinamikus tömörség és teherbírásmérés kistárcsás könnyűejtősúlyos berendezéssel”.