

MÉSSZEL STABILIZÁLT FÖLDMŰ HATÁSAINAK VIZSGÁLATA EGY KÍSÉRLETI ÚTSZAKASZON

**Péterfalvi József¹, Primusz Péter¹, Markó Gergely², Kisfaludi Balázs¹
és Kosztka Miklós¹**

¹Nyugat-magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar

Kivonat

A kötött talajon épülő erdészeti utak pályaszerkezetét a legelső homokos kavicsalap helyett célszerű mésszel stabilizált földműre építeni. Ez a megoldás csökkenti a helyszínre szállított anyag mennyiségét, és egyben mérsékli a kötött talaj utépítés szempontjából kedvezőtlen tulajdonságait. Az utépítés költségei tovább csökkenthetők, ha a méssztabilizációs réteg a pályaszerkezet teherbírásába beszámítható, mert így a beépítendő zúzottkő réteg vastagsága is csökkenthető. Ehhez azonban szükség van a méssztabilizációs réteg teherbírásának vizsgálatára, amelyet egy erdei körülmények között megépített kísérleti útszakaszon célszerű elvégezni. Ennek megvalósítását szolgálta az Erdő- és Fahasznosítási Regionális Egyetemi Tudásközpont keretén belül a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet és a Zalaerdő Zrt. közreműködésével épített kísérleti út. A vizsgálat eredményei egyértelműen igazolták, hogyha a helyi kötött talajt megfelelő mészadagolással stabilizáljuk, akkor a mésszréteg egyben az erdészeti utak pályaszerkezetének teherbírását is növeli.

Kulcsszavak: méssztabilizáció, kísérleti út, erdészeti utépítés

TESTING OF SUBGRADE STABILIZED WITH LIME ON AN EXPERIMENTAL ROAD SECTION

Abstract

When constructing forest roads on cohesive soil, it is suitable to substitute sandy gravel sub-base course with lime stabilized subgrade. This solution reduces the volume of construction materials and at the same time moderates the unfavourable properties of cohesive soils. If the bearing capacity of the lime stabilized layer can be included in the bearing capacity of the pavement, then the costs of road construction can be reduced by reducing the thickness of the crushed stone course. To achieve this, the testing of the bearing capacity of the lime stabilized layer is necessary. It is suitable to complete the test on an experimental road-section practically in forest circumstances. Such an experimental road-section was constructed in cooperation between the Institute of Geomatics and Civil Engineering and the Zalaerdő Forestry Closed Company, within the frame of the Regional University Knowledge Centre of Forest and Wood Utilization. The results of this test clearly demonstrate that the local cohesive soil stabilized with suitable lime feeding can be the bearing layer of the pavement of forest roads.

Keywords: lime-stabilization, experimental road, forest road construction

Levelező szerző/Correspondence:

Péterfalvi József, H-9400 Sopron, Ady E. u. 5. e-mail: jpeterfa@emk.nyme.hu



BEVEZETÉS

Magyarországon az erdészeti utak jelentős része kőben szegény vidéken, kötött altalajon épül. Különösen nehéz az útépités az ország nyugati részén, ahol az évi csapadék mennyisége jelentős, eloszlása kedvezőtlen. Az útépitésre ezért csak rövid időszakok állnak rendelkezésre, a kötött talajú földmű kiszáradása az erdei mikroklímában alig várható ki. A kötött talajok teherbírása általában gyengébb, amit a nedves állapot tovább ront. Ezek a körülmények azt eredményezik, hogy csak nagyobb teherbírású, vastagabb pályaszerkezetekkel lehet a forgalom terhelésének megfelelni. Az útépités költségei tovább növekednek, ha a kőműves útépitési anyagot nagyobb távolságról kell az építés helyszínére szállítani. Ilyen körülmények között célszerű az útpályaszerkezet alaprétégebe olyan építési anyagot felhasználni, amely a kedvezőtlen időjárás hatásait mérsékelni tudja.

A helyi talajokat általában talajstabilizáció céljáraformájában használhatjuk fel a pályaszerkezet alaprétégeibe. A kötött talajok esetében ez meszes talajstabilizációt jelent. Korábban, 1960-1970 között, mintegy 53 km erdészeti út épült meszes talajstabilizáció alkalmazásával Somogy, Zala és Vas megyékben. Az ezt követő időszak közgazdasági és műszaki viszonyai nem kedveztek a talajstabilizációk további elterjedésének. Ennek eredménye lett a talajstabilizációkkal folytatott kutatások visszaszorulása is. Napjainkban azonban a szigorodó közgazdasági helyzet, a környezetvédelmi igények, a korszerű talajmarók és kötőanyag-adagolók alkalmazása együttesen ismét ráirányították a figyelmet a talajstabilizációk felhasználására.

A jelenlegi építési előírások a mésszel kezelt talajt csak legfeljebb javítórétnek ismerik el, azt a pályaszerkezet teherbíró részébe nem számítják be. A kísérleti útszakasz építésének ebből következően az elsődleges célja annak vizsgálata volt, hogy az erdészeti utak pályaszerkezeteinek tervezésénél milyen teherbírással lehet a meszes talajstabilizációs réteget figyelembe venni. A másik alkalmazási terület a kötött talajú földutak járhatóságának javítása, amelynek vizsgálatára a kísérleti útszakasz szintén lehetőséget kínált.

A meszes talajkezelés

A meszet régóta használják kötött talajok fizikai tulajdonságainak javítására. A mész a víz megkötésével méshidráttá alakul, mialatt hő szabadul fel. Talajhoz keverve a méshidrát Ca^{++} ionjai az agyagszemcsék felületéhez kötődnek, és onnan a vizet és egyéb ionokat kiszorítják. Ennek hatására a plasztikus index jelentősen csökken, és a talaj szemcsés állagúvá válik. Ha megfelelő mennyiségű mész van jelen, a pH-növekedésnek köszönhetően az agyagszemcsék felbomlanak. Az így felszabaduló alumínium és szilícium reakcióba lép a kalciummal, és hidrátokat képeznek. Ezek a hidrátok hálózatot alkotnak, és ez tovább növeli a teherbírást (NLA 2004). A tapasztalat szerint 1-3 tömegszázalék mész adagolásával az elázott kötött talajok kiszáríthatóak, 3-5 tömegszázalékos kezelés hatására a száradás mellett jelentősen megnő a talajok teherbíró képessége, nyírószilárdsága és optimális tömörítési víztartalma. Az adagolandó mész mennyiségét a stabilizálni kívánt talaj és az alkalmazott mész tulajdonságai határozzák meg. Ezta jelenlegi gyakorlat szerint laboratóriumi vizsgálatokkal állapítják meg (Tárczy 2007).

A stabilizált réteg készülhet a helyszínen vagy keverőtelepen. A helyszínen a meszet közvetlenül a stabilizálandó talajba lehet juttatni, de elképzelhető olyan megoldás is, amikor a talajt kiemelik, és így keverik össze a mésszel. A helyszínen készülő stabilizáció első lépéseként őrölt-égetett mésporot vagy száraz méshidrátot kell a talaj felületére juttatni a laboratóriumi vizsgálatokkal meghatározott mennyiségben. Az égetett mész alkalmazása célszerűbbnek tűnik, hiszen magasabb a mésztartalma, mint a méshidráté, emiatt a leját-szódó reakciók is gyorsabbak. Mivel a nagyobb keletkező hő a talajt felmelegíti, az építés-re alkalmas időszak meghosszabbítható. Hátránya, hogy több vizet igényel, mint a méshidrát, valamint rosszabbul is keveredik a talajjal.

A kijuttatást kézi erővel és mésszadagoló gépekkel lehet elvégezni. A gépi terítés jóval hatékonyabb. A kijuttatandó méssz mennyiségét az adagoló nyílás méretének és a tehergépkocsi sebességének összehangolásával lehet beállítani. A méssz talajba juttatása gréderrel vagy talajmaróval végezhető. A talajmaró használata előnyösebb, hiszen rövidebb idő alatt egyenletesebb keverés érhető el vele, amennyiben a teljesítménye megfelelő. A keverés közben, amennyiben szükséges, vizet kell adagolni a talajhoz. Ez történhet szórófejjel ellátott tartályos tehergépkocsival vagy víz adagolására képes talajmaróval. Az utóbbi használatával jobb eredmények érhetők el. A legtöbb talaj esetén a keverés egy menetben elvégezhető, csak ha nagyon kötött a talaj, akkor kell két menetben végezni a keverést. Az első keverés után a földművet enyhe hengerléssel le kell zárni, illetve a két keverés között 24-72 óra időnek kell eltelnie. Ahhoz, hogy a mésszel stabilizált réteg megfelelő teherbírással és szerkezettel rendelkezzen, tömörítésre van szükség. A tömörítés többféle módon végezhető el. Ezek közül szokványos a juhláb henger és gumihenger vagy egy legalább 12 tonnás vibrációs henger és gumihenger egymás utáni alkalmazása. A tömörítés a keverés után hamarosan megkezdhető, de kötött talajon és elég nedvesség esetén négynapos eltérés általában még megengedhető (Little 1995; Tárczy 2007).

Valós léptékű útkísérletek

Annak eldöntésére, hogy az adott talajhoz milyen fajta és milyen mennyiségű méssz adagolása szükséges, laboratóriumi vizsgálatokat kell végezni. Ezek a vizsgálatok alkalmasak többféle talajtípus és mésszfajta összehasonlítására is. Annak vizsgálatára azonban, hogy különböző pályaszerkezetek és alapok különféle altalajokon milyen tulajdonságokkal rendelkeznek, a valóságban megépült utak a legalkalmasabbak. Mivel az utak leromlása hosszú folyamat, elterjedtek az úgynevezett valós léptékű, gyorsított pályaszerkezet-vizsgálatok (Metcalfe 1996). Ezek lényege, hogy a vizsgálni kívánt pályaszerkezeteket ténylegesen megépítik, és így végeznek rajtuk méréseket. A mérések célja általában annak meghatározása, hogy a különféle pályaszerkezet-variációk hogyan reagálnak adott mértékű forgalmi terhelésekre.

A legjelentősebb ilyen jellegű nagyminta-kísérletsorozat és annak eredményei „AASHO útkísérletek” néven váltak ismertté. A kísérleteket az USA-ban végezték 1956-1962 között. A vizsgálatok célja közúti pályaszerkezet-méretezési eljárások kidolgozása volt. A kísérlet-hez 470 féle pályaszerkezet épült meg gyenge altalajon. A pályaszerkezetek homokos kavics, zúzottkő és aszfaltrétegeket tartalmaztak. A kísérleti útszakaszt műforgalommal terheltek két éven át. Eközben a pályaszerkezetek állapotát rendszeresen értékelték. Az értékelést szemrevételezéssel, hullámosság- és behajlásmérésekkel végezték. A vizsgálat legfontosabb eredményeként összefüggést találtak a pályaszerkezet tervezési paraméterei (egyenérték-vastagság), a tengelyterhelés és -elrendezés, valamint a terhelések száma között. A kapott robosztus összefüggések más típusú altalaj és pályaszerkezet esetén is használhatónak bizonyultak (Nemesdy 1985, Metcalfe 1996).

Szintén az Egyesült Államokban épült meg az „mnROAD” nevű kísérleti útszakasz, melyen a kísérletek 1994-ben kezdődtek. Az itt végzett kísérletek a méretezési paraméterek meghatározása mellett kiterjedtek az évszakos változások, új anyagok, fenntartási technológiák vizsgálatára is. Lényeges eleme volt a kísérleteknek az alacsonyrendű utakon alkalmazott tipikus pályaszerkezetek vizsgálata, valamint különböző altalajok figyelembevételére is. Az alacsonyrendű szakaszokat műforgalommal terheltek. A pályaszerkezetek állapotparamétereit a beléjük épített szenzorok segítségével, valamint a dinamikus teherbírást mérő eszközzel mérték (Tompkins & Khazanovich 2007). Az alacsonyrendű szakaszon végzett vizsgálatok alapján megállapították, hogy kötött talajok-ban a nedvességtartalom 1%-os változása 14 MPa csökkenést eredményez a pályaszerkezet felületi modulusában (Garg & Thompson 1998).

Kifejezetten erdészeti utak pályaszerkezetének vizsgálatára épült Kanadában a SERUL (Laval University Road Experimental Site) nevű kísérleti út. Itt többféle pályaszerkezetet építettek a helyi altalajra, illetve lehetőség volt különböző altalajok vizsgálatára is 3 m mély kibetonozott árkokban. Az úton végzett kísérletekből főleg a fagyás-olvadás, valamint a gumibroncs-szélesség hatására találtak összefüggéseket (LeBel et al. 2000).



Behak 2011-ben végzett vizsgálatokat a mészstabilizáció hatásának megismerésére. Két tesztszakaszt hoztak létre, amelyeken az altalajt 3%, illetve 5% mésszel stabilizálták. Ismert nagyságú, de valós forgalom áthaladása előtt és után is behajlasméréseket végeztek, valamint szemrevételezéssel értékelték a burkolat állapotát. A központi behajlásértékek az építést követő 2,44 mm-ről négy hónap elteltével 0,77 mm-re változtak (Behak 2011).

Magyarországon mezőgazdasági utak vizsgálatára épült kísérleti út Makk-pusztán. Itt futó-homok altalajra 72 féle pályaszerkezet épült meg. A vizsgálatban aszfalt- és betonburkolatokból, mechanikai, cement- és kohósalak stabilizációkból, valamint zúzottkő rétegekből álltak össze a pályaszerkezetek. Ezeket összesen 11 500 egységtengelynyi áthaladással terheltek. A kiindulási állapot értékelése után öt terhelési periódus hatását mérték. Meteorológiai adatokat (a hőmérséklet napi minimuma és maximuma, csapadék, talajhőmérséklet), teherbírási jellemzőket (központi behajlás, behajlási teknő) és járhatóságértékeket (hosszirányú hullámosság, a keresztzelvény alakváltozása, repedés, ütőkátyú és egyéb felületi hibák) mérték. Ezek alapján megállapították, hogy a 11 500 egység-tengelynyi áthaladás csak az építési hibás szakaszokon okozott károsodást. A többi szakaszon a szubjektív értékelők érzékelték először a hibákat, a behajlasmérések csak az utolsó terhelési periódus után kezdték el a teherbírás egyértelmű csökkenését mutatni. Kiderült, hogy az AASHO méretezési eljárás alkalmazható kis forgalmú utak esetén is, bár kismértékű túlméretezést eredményez. Bebizonyosodott az a felvetés is, hogy mező- és erdőgazdasági utak esetén jól alkalmazhatók a különböző stabilizációs eljárások is (Kosztka 1989).

ANYAG ÉS MÓDSZER

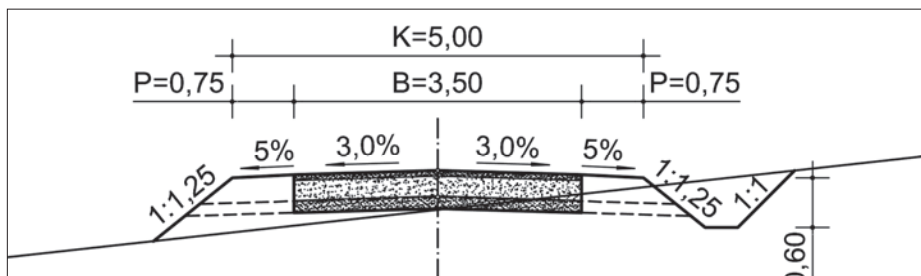
A kísérleti útszakasz helyszínének bemutatása

A kísérleti út megépítésével és az elvégzett mérésekkel az volt a fő célunk, hogy megbecsüljük a mészstabilizációs rétegek teherbírásnövelő hatásának mértékét, valamint azt, hogy a hagyományos szerkezetekhez képest mennyivel növelik a teherbírását a zúzottkő rétegeknek a homokos kavicsréteghez képest. A kísérleti útszakasz a Zalaerdő Zrt. Bánok-szentgyörgyi Erdészeti Igazgatóságának területén, Oltárc község határában a Györerdő II. o. erdészeti út mellékvonalának 580 m hosszú földművén épült meg. A földmű talaja az útépítéshez készült talajmechanikai szakvélemény alapján közepes agyag, amelynek jellemzői: folyási határ $w_L=44,6\%$, plasztikus határ $w_p=22,4\%$, plasztikus index $I_p=22,2\%$, folyási index $I_L=18,4\%$, konzisztenciaindex $I_c=1,2$, maximális száraz halomsűrűség $\rho_{dmax}=1,82 \text{ g/cm}^3$ és az optimális tömörítési víztartalom $w_{opt}=15\%$.

Az útépítés feltételeit a klíma jellemzői közül főként a csapadékviszonyok és a téli hőmérsékleti viszonyok befolyásolják. A csapadékviszonyokat a bánok-szentgyörgyi meteorológiai adatgyűjtő állomás adatainak feldolgozásával elemeztük. Eszerint a csapadékos napok száma 94, amelynek jelentősebb része az útépítés szempontjából általában kedvező április-november hónapok közé esik. Ez az erdészeti útépítés szempontjából azt jelenti, hogy a földműépítésre rendelkezésre álló kedvező napok száma alacsony. Különösen azért kedvezőtlen a helyzet, mert a lehulló csapadék mennyisége is jelentős (694 mm/év), ami a kötött talajú földmű kiszáradását nehezíti. Az egyszer elázott földmű ezért teherbírását tartósan elveszti, hosszú ideig nem támasztja alá a pályaszerkezetet. A hőmérsékleti viszonyok közül az útépítés szempontjából a vizsgált területen a fagy és az olvadás, valamint ennek periodikus váltakozása a döntő. A hőmérsékleti adatokat ilyen szempontból csoportosítva azt tapasztaljuk, hogy a téli középhőmérséklet $+3,7^\circ\text{C}$, a januári középhőmérséklet $-0,4^\circ\text{C}$, a fagyos napok száma 100-110 nap. A téli hőmérsékleti viszonyokból következően a fagyási és olvadási periódusok gyakran követik egymást. Ez a fagyveszélyes és fagyérzékeny, illetve az olvadási kárra érzékeny talajokon a télvégi burkolatkárok kialakulását segíti elő. A pályaszerkezetet ezeken a talajokon védőrétegre vagy legelső alapra kell megépíteni.

A kísérleti útszakasz keresztmetszeti kialakítása

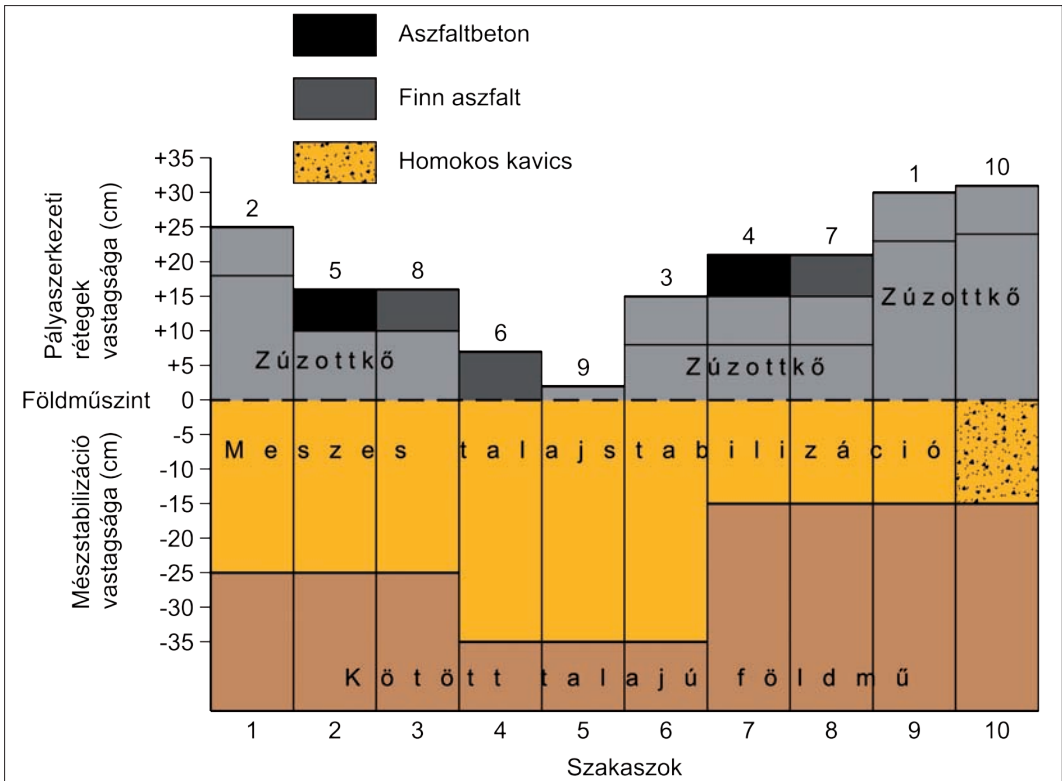
A kísérleti út a II. osztályú erdészeti út paramétereinek megfelelő szélességi méretekkel épült (1. ábra). A keresztmetszet jellemző adatai az alábbiak: burkolatszélesség (B) 3,50 m, padkaszélesség (P) 0,75 m, koronaszélesség (K) 5,00 m, a burkolat dőlése 3,0%, pad-kadőlés 5%, töltési és árokérsű 1:1,25, bevágási rézsű 1:1.



1. ábra: Keresztmetszeti kialakítás.
Figure 1: Typical cross-section.

A kísérleti útszakasz pályaszerkezet variációi

A pályaszerkezet-variációk felépítésének tervezésekor abból indultunk ki, hogy minden rétegsor azonos teherbírású legyen. A pályaszerkezet-variációk építési sorrendjének meg-határozásakor arra törekedtünk, hogy az azonos vastagságú mésztabilizációval készülő rétegek egymás mellé kerüljenek. A mésztabilizáció teherviselő képességének jobb meg-ismeréséhez egy külön szakaszt terveztünk, amelyen a mésztabilizáción kívül csak a felület érdesítését szolgáló zúzalékterítést alkalmaztuk. A fenti tervezési elvek alapján a kísérleti útszakasz első 360 m-én 15-25-35 cm-es helyi talajt felhasználó mésztabilizációs rétegre 9 darab egyenként 40 m hosszú, aszfalt- és makadámburkolatú különböző vastagságú pályaszerkezet épült. Ezek közül az 5. szakaszon csak 35 cm vastagságú mésztabilizációt és a felület érdesítését szolgáló 2 cm-es zúzalékterítést alkalmaztunk. A hagyományos, mésztabilizáció nélküli pályaszerkezettel való összehasonlítást a 10. 220 m-es kontrollszakasz tette lehetővé. A meszes talajstabilizációs alapra háromféle burkolati réteget terveztünk: folyamatos szemeloszlású murvaréteg, meleg bitumenes útalapréteg és finn aszfalt. A meleg bitumenes útalap helyett beszerzési nehézségek miatt K-20 (új nevén AC 22) kötőréteg épült. A megépült pályaszerkezeteket a 2. ábra mutatja be hossz-szelvényyszerűen. A kísérletek sorrendjét célszerű véletlenszerűsíteni, ezért a 10 féle pályaszerkezet-variációt nem a generálásuk sorrendjében építettük meg. A 2. ábrán a pályaszerkezet-variációk sorszámát felül, míg építési sorrendjüket (szakaszszámukat) alul tüntettük fel.



2. ábra: A megépült kísérleti útpályaszerkezet szakaszok.
Figure 2: The built experimental pavement sections.

A kísérleti útszakasz meszes stabilizációjának építése

A kísérleti út mézstabilizációs rétegét egymenetes géplánc építette meg. Az alkalmazott gépek: STREU Master SW 16 kötőanyag-adagoló és WIRTIGEN WR 2000 talajmaró. A munkafolyamat (3. ábra):

1. A tartálykocsiban szállított méz átfejtése a kötőanyag-adagolóba (A fázis).
2. A kötőanyag-adagoló felvonulása az építés kezdőpontjához (B fázis).
3. A kötőanyag-adagoló beállítása (a gépkezelő végzi).
4. A kötőanyag-adagoló ellenőrzése (C fázis).
5. A kötőanyag kiszórása a felületre (D fázis).
6. Keverés a talajmaróval (E fázis).
7. Tömörítés vibrációs hengerrel (F fázis).

A földmü anyagának és a felhasználni kívánt örlt égetett mézpor ismert tulajdonságai alapján a méz-adagolást 3,0~4,5 tömeg%-ban határoztuk meg, a 95% tömörséghez tartozó száraz halomsűrűsége vonatkoztatva.

A kötőanyag-adagoló két menetben tudta a teljes felületen a kötőanyagot elteríteni. Az elterítéskor átfedés nem alakult ki, tehát az adagolás a teljes felületen a tervezetnek megfelelő volt. A talajmaró szintén két menetben végezte a keverést, a két keverés között átfedéssel. Keverés közben a fellazítás mélységét központi vezérléssel a gép automatikusan végezte. A kísérleti út három különböző vastagságú meszes talajstabilizá-

cióját 3,50 m szélességben a gépsor három óra alatt készítette el. Összességében elmondható, hogy az imént ismertetett eljárással a mésszstabilizáció kiváló minőségben épült meg. Az így kialakított javított földműre (mésszstabilizációra) épültek meg a tervezett pályaszerkezet–variációk (4. ábra).



A fázis



B fázis



C fázis



D fázis



E fázis



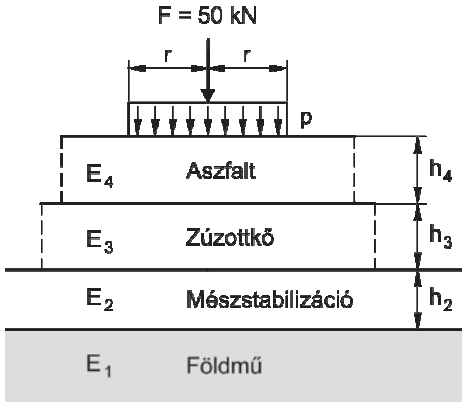
F fázis

3. ábra: Az építési technológia egyes fázisai.
Figure 3: Phases of the construction technology.

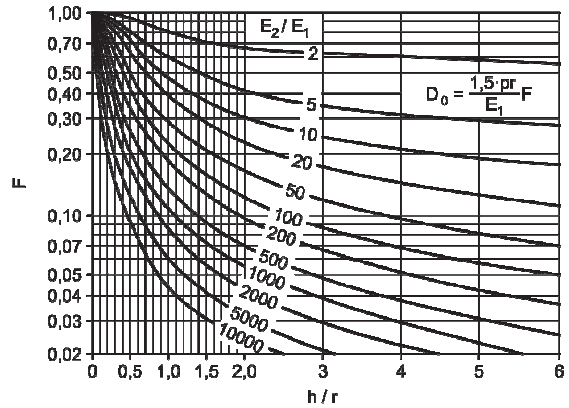


4. ábra: A földmű a mésszstabilizáció előtt és után.
Figure 4: The earthwork before and after lime stabilization.

Az útpályaszerkezetek mechanikai modellje



5. ábra: Hajlékony pályaszerkezet modell.
Figure 5: Model of flexible pavements.



6. ábra: Burmister diagramja kétrétegű rendszerre.
Figure 6: Diagram by Burmister for a two-layer system.

A mésszel stabilizált rétegek, valamint a kötőanyag nélküli szemcsés alapok mechanikai jellemzői a több-rétegű útpályaszerkezeten belül az 5. ábrán látható hajlékony pályaszerkezeti modell alapján értelmezhetők. Legalul az elkészült földmű modelljének mechanikai szempontból az egyrétegű rendszerek rugalmas, homogén végtelen féltérként való számítása feleltethető meg, vagyis olyan rétegezés nélküli talajtömegről lesz szó, amely vízszintes síkkal határolt, kiterjedése vízszintes irányba és mélységbe végtelen. A földmű felett a kísérleti útszakaszokon H_2 vastagságú mésszel stabilizált rétegek helyezkednek el, felettük pedig kötőanyag nélküli szemcsés anyagú (pl. zúzottkő) alaprétegek húzódnak H_3 vastagsággal. Ezek felett pedig az aszfaltrétegek összesen H_4 összvastagsága következik. A rétegeket a mechanikai méretezés szempontjából az E_1, E_2, E_3, E_4 modulusok és a $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ Poisson-féle számok jellemzik. A terhelés egy 50 kN súlyból adódó, kb. $2r = 30$ cm átmérőjű kör alakú egyenletes terhelés, amely a nagy tehergépkocsi abroncsnyomásához közelálló $p = 0,7$ MPa értékű. További részleteket a hajlékony útpályaszerkezetek analitikus méretezéséről Bocz és mtsai (2009) munkájában olvashatunk.

A végtelen homogén féltér összefüggései

Az alkalmazott modellben a talajt/földművet egy $2r = 30$ cm átmérőjű merev/hajlékony tárcsán ható p megoszló erő terheli. A terhelés hatására bekövetkező alakváltozások közelítő számítását – rugalmas homogén féltérre – Boussinesq oldotta meg még 1885-ben. A felállított süllyedésképlet a következő:

$$E = c \cdot (1 - \mu^2) \frac{p}{d} \cdot r \quad (1)$$

ahol

- E = a féltér anyagának rugalmassági modulusa (MPa);
- c = a Boussinesq-féle tárcsasorzó ($c = \pi/2$ merev és $c = 2,0$ hajlékony);
- r = az alkalmazott tárcsa sugara (mm);
- p = az alkalmazott legnagyobb nyomás (MPa);
- d = a tárcsa alatti függőleges elmozdulás (mm);
- μ = a Poisson-féle szám (-).

A fenti képletben szereplő μ a Poisson-féle szám, a rugalmasságtan ismert anyagjellemzője. Ennek értéke $0 \leq \mu \leq 0,5$ között változhat. Abban az esetben, ha a talajt közelítően, mint összenomthatatlan folyadékot vesszük számításba (kötött talajoknál (agyag) ez fennáll) $\mu = 0,5$ -nek vehető. Így már tekinthető a földmű, mint homogén rugalmas féltér.

A kétrétegű rendszer megoldása

A kétrétegű rendszer matematikai-mechanikai szempontból egzakt megoldását először Donald M. Burmister adta meg 1945-ben. Később módszerét n rétegre is kiterjesztette 1954 és 1956 között. A kétrétegű rendszer megoldására – a bonyolult számítások elkerülése érdekében – diagramot is közölt (6. ábra). A központi lehajlás számítására az egyrétegű rendszerénél már megismert képletet alkalmazta (Burmister 1945):

$$d = 2 \cdot (1 - \mu^2) \frac{p \cdot r}{E_1} \cdot F \quad (2)$$

A képletben az alsó réteg (a féltér) modulusát veszi figyelembe, ezt egy F süllyedési tényezővel szorozza, amelyet az ismert h/r és E_2/E_1 arányszámok alapján határoz meg. A süllyedési tényező tulajdonképpen az

$$F = \frac{E_1}{E_e} \quad (3)$$

hányadossal egyezik meg, ahol E_e az egyenértékű felületi modulus (Nemesdy 1985). Fontos kiemelnünk, hogy a felületi modulus nem réteg modulus, hanem a többrétegű rendszerek felületén végzett mérésekből levezetett átlagos, az összes réteget együtt jellemző paraméter.

A szemcsés rétegek modulusának meghatározása

A kötőanyag nélküli, gömbölyű szemekből álló rétegek modulusa függ az alatta lévő réteg modulusától. Az egyik legrégebbi megoldást alkalmazza a SHELL méretezési kézikönyv (Claussen 1977):

$$E_2 = E_1 \cdot 0,2 \cdot H_2^{0,45} \quad (4)$$

Ahol H_2 a zúzottkő vagy szemcsés réteg vastagsága mm-ben, E_1 pedig az alsó réteg modulusa MPa-ban. Az összefüggés hiányossága, hogy nem mutat rá a zúzottkő alap és a gömbölyű szemű alapok közötti minőségkülönbségre (Nemesdy 1991).

Ezt a hiányosságot később Barker és mtsai (1977) figyelemreméltó munkája pótolja. A hajlékony pálya-szerkezeten belül a vastagabb szemcsés alaprétegeket vizsgálták, különbséget téve zúzottkő és mechanikai stabilizáció között. Zúzottkő alapra a következő képlet alkalmazható (Barker és mtsai 1977):

$$E_2 = E_1 \cdot (1 + 10,52 \cdot \log(H_2) - 2,10 \cdot \log(E_1) \cdot \log(H_2)) \quad (5)$$

Kavicsalapra, mechanikai stabilizációra:

$$E_2 = E_1 \cdot (1 + 7,18 \cdot \log(H_2) - 1,56 \cdot \log(E_1) \cdot \log(H_2)) \quad (6)$$

A homokos kavics (HK) rétegek modulusát is ezzel az összefüggéssel becsülhetjük. Az összefüggések alkalmazásakor ügyelni kell arra, hogy az E modulusok psi (pounds per square inch), a H rétegvastagságok pedig inch-ben szerepelnek az eredeti tanulmányban (1 psi = 0,006894 MPa és 1 inch 2,54 cm).



Statikus (E_2) és dinamikus (E_d) teherbírásmérés

A hajlékony útpályaszerkezetek többrétegű mechanikai modellje igényli, hogy az egyes rétegeket a rájuk jellemző rétegvastagságokkal és modulus értékekkel vegyük számításba. A talaj és az egyes burkolati rétegek teherbírási modulusát statikus és dinamikus elven működő helyszíni mérőeszközök segítségével lehet meghatározni.

Az elkészült földművön meg lehet mérni a statikus modulusot, mint a rugalmas, homogén és izotróp féltérnek tekintett legelső talajréteg teherbírási modulusát. A vizsgálat alatt egy 30 cm átmérőjű hajlékony tárcsát terhelünk pl. hidraulikus emelő és tehergépkocsi ellensúly segítségével. A terhelést fokozatosan adjuk rá – kivárva a konszolidációt – miközben mérjük az egyes terhelési lépcsők hatására bekövetkező deformációt. A $p = 0,40$ MPa terhelés elérése után tehermentesítjük a tárcsát, majd másodszor is elvégezzük a mérést. A két terhelés adataiból meg lehet már szerkeszteni a terhelés-behatolás görbéket. A földmű statikus modulusát a második terhelés görbéjéből számítjuk (ezért szerepel 2 az alsó indexben) az (1)-es süllyedésképlet segítségével. Az E_2 statikus vizsgálat esetén alkalmazott tárcsa geometria méretei alapján, körülbelül 75 cm vastag felső réteg vizsgálatára nyílik lehetőség ($v \leq 2,5 \cdot D = 75$ cm). A számításoknál merev tárcsamodellt és anyagtól függő Poisson-számot (agyag $\mu = 0,5$, meszesett talaj $\mu = 0,3$) vettünk figyelembe. A statikus vizsgálatok hátránya, hogy nagyon időigényesek és nem modellezik megfelelően a tehergépkocsik mozgó kerékterhelését. Ezeket a hátrányos tulajdonságokat próbálják kiküszöbölni a dinamikus elven működő eszközök.

A dinamikus teherbírási mérésének lénege, hogy egy 70-75 cm magasságból leejtett kb. 10 kg tömegű súly 18 ± 2 milliszekundum ideig tartó terhelésének a hatására bekövetkezett alakváltozást rögzít. A terhelés nagysága megegyezik a statikus mérésnél alkalmazottal. A vizsgálat a dinamikus terhelésre jellemző anyagviselkedést modellezi, mivel ilyen rövid idő alatt a konszolidáció nem tud lejátszódni. A dinamikus teherbírási (E_d) vizsgálati eljárása legfeljebb 63 mm legnagyobb szemnagyságú, legfeljebb a tárcsaátmérő mintegy kétszeresének megfelelő vastagságú (30 cm) friss anyagréteg vagy földműréteg vizsgálatára alkalmas (Subert 2005). A kísérletnél alkalmazott B&C (Bearing Capacity & Compaction-rate Tester) típusú kistárcsás könnyű ejtősúlyos készülék esetében a dinamikus hatás közelítően egy ~ 35 km/h sebességgel közlekedő tehergépkocsi 16 cm-es megtett útját jelenti.

Minden egyes kísérleti útszakaszon öt ponton határoztuk meg a földmű dinamikus teherbírási modulusát. Négy mérést a várható keréknyomok vonalában végeztünk el (kettőt a szakasz elején és kettőt a szakasz végén), valamint egy mérést a szakasz közepén. A mérési helyen három ejtéssel előterhelést végeztünk, majd három mérőejtést hajtottunk végre. Az egyes mérési pontok mértékadó értékét a három mérési sorozat segítségével (háromszög kötésben) átlagolással határoztuk meg. Ez kísérleti szakaszonként $5 \times 3 = 15$ db mérést jelentett. A számítások alatt merev tárcsamodellt és változó Poisson-tényezőt alkalmaztunk: agyag esetében $\mu = 0,5$, míg a mésszel kevert talaj esetében $\mu = 0,3$ volt a feltételezett érték. A kapott modulus értékeket egészre kerekítve adtuk meg.

EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

A földmű teherbírási modulusa

Mind a 10 kísérleti szakaszon megpróbáltunk statikus E_2 értékeket meghatározni. A méréseket minden szakasz közepén a tengelyben, valamint tőle jobbra és balra a várható ke-réknyomok vonalában végeztük el felváltva. Sajnos az elázott magas víztartalmú földmű-vön csak két szakaszon lehetett sikeresen mérni. Ezek az eredmények viszont jól egyeztek az előzetes mérésekkel, így a földműre átlagosan 10 MPa teherbírási értéket határoztunk meg. A jelenlegi műszaki szabályozás szerint, ha a földmű teherbírási modulusa kisebb, mint 40 MPa, akkor a földműre már javítóréteget kell építeni.

A statikus és a dinamikus teherbírás mérésének értékelése

A mésszstabilizáció építése után kétféle modellhatással (statikus, dinamikus) vizsgáltuk a teherbírás növekedését. A kétféle mérés adatsorát a tervezéshez szükséges statikus modulus meghatározására kívántuk felhasználni, mivel a jelenlegi műszaki szabályozás erre fogalmaz meg előírásokat. A mésszstabilizációs rétegeken kívül vizsgáltuk a mésszstabilizációra épült pályaszerkezetek teherbírás változását is, statikus (E_s) és dinamikus (E_d) teherbírás értékeket határoztunk meg a már ismertett módon. Az 5. és a 4. sz. pályaszerkezeti variációknál (K-20, új nevén AC 22) nem érzékelt elmozdulást a B&C könnyűejtősúlyos készülék, ezért a mérést nem lehetett végrehajtani. A számításoknál $\mu = 0,5$ volt az alkalmazott Poisson-féle szám. A mérési eredményeket az 1-es és 2-es táblázat tartalmazza.

A nemzetközi szakirodalom alapján a dinamikus mérések modulusa a statikus mérés teherbírasi modulusával közvetlen összefüggésbe a talajoknál sem hozható, így általános összefüggés egységesen nem adható (Subert 2005). A témáról részletesen Tompai (2008) dolgozatában lehet olvasni. Minden talajfajtára, szemcsés pályaszerkezeti rétegre, minden esetben külön-külön kell az anyag típusára és a körülményekre jellemző határértéket meghatározni, párhuzamos mérésekkel.

1. táblázat: A tárcsás teherbírasi vizsgálattal meghatározott modulus értékeke.

Table 1: Values of the moduli determined by plate bearing tests.

No.	Var.	A mésszstabilizáció vastagsága [cm]	Teherbírás E_2 [MPa]			
			Földmű	Mész (0h)	Mész (24h)	Mész (48h)
01	02	25	–	–	34	45
02	05	25	–	–	53	65
03	08	25	–	–	53	53
04	06	35	–	–	53	69
05	09	35	9	–	50	54
06	03	35	12	–	41	50
07	04	15	–	19	27	38
08	07	15	–	36	39	43
09	01	15	–	–	37	45
10	10	Nincs	10	–	–	–
	ÁTLAG	10	28	43	51	

2. táblázat: A dinamikus teherbírasi vizsgálattal meghatározott modulus értékeke.

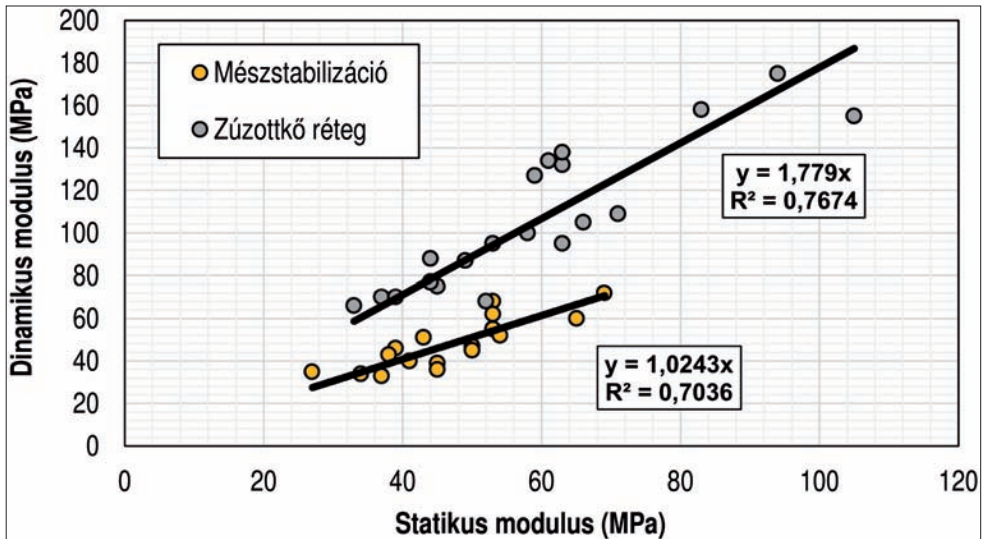
Table 2: Values of the moduli determined by dynamic bearing tests.

No.	Var.	A mésszstabilizáció vastagsága [cm]	Teherbírás E_d [MPa]				
			Földmű	Mész (0h)	Mész (24h)	Mész (48h)	Mész
(120h)							
01	02	25	11	24	34	39	50
02	05	25	12	41	55	60	66
03	08	25	15	36	55	62	74
04	06	35	12	52	68	72	74
05	09	35	10	24	47	52	54
06	03	35	9	24	40	45	50

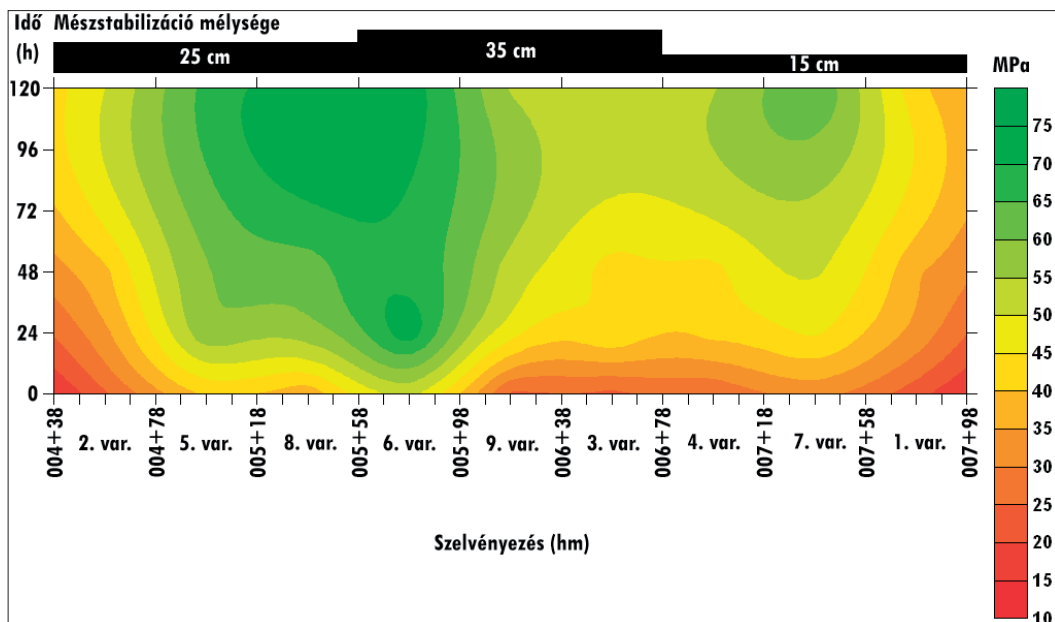
No.	Var.	A mészstabilizáció vastagsága [cm]	Teherbírás Ed [MPa]				
			Földmű	Mész (0h)	Mész (24h)	Mész (48h)	Mész
07	04	15	8	26	35	43	55
08	07	15	10	32	46	51	65
09	01	15	11	22	33	36	42
10	10	Nincs	10	–	–	–	–
	ÁTLAG	11	31	46	51	59	

A mészstabilizáción végzett méréseink azt mutatták, hogy a különböző modellhatásokkal meghatározott teherbírás értékek közel esnek egymáshoz. A 7. ábrán jól látható, hogy a 24 órás, és a 48 órás statikus (E_2) és átlagos dinamikus modulus (E_d) értékek jól egyeznek egymással. Ezért azt mondhatjuk, hogy a dinamikus modellhatással meghatározott teherbírasi értékeket azonosnak tekinthetjük a tervezéshez szükséges statikus E_2 -vel.

A mészstabilizáció teherbírás növekedését öt napon át követtük nyomon a B&C típusú berendezéssel. A mérési eredmények feldolgozását a 8. ábra foglalja össze. A méréseink alapján a mészstabilizációs rétegek vastagsága egyértelműen nem hozható összefüggésbe a teherbírás növekedésével. A talaj-mész reakció nagyon összetett folyamat és számos olyan tényező is befolyásolja a teherbírás mértékét, amelyet eddig még nem sikerült feltárnunk. Az egyik legvalószínűbb ok a talaj víztartalmának nagyfokú heterogenitása, amely jelentősen képes befolyásolni a talaj-mész keverék reakcióját. Ennek ellenére az jól látszik, hogy legnagyobb teherbírás növekedést a 25 és 35 cm vastag mészstabilizációs kísérleti szakaszok adták. A mészstabilizáció után a zúzottkőréteg elterítése és tömörítése következett az építéskor, ennek a felületén is mértük a teherbírás. A zúzottkő rétegek felszínén végzett vizsgálataink már azt mutatták, hogy a dinamikus modulusok kb. kétszer nagyobbak, mint a statikusak (7. ábra).



7. ábra: Az egymással párhuzamosan mért statikus és dinamikus teherbírasi modulusok.
Figure 7: Values of dynamic and static bearing modulus measured at same places.



8. ábra: A mésszel stabilizált rétegek teherbírásának növekedése az idő függvényében.
 Figure 8: Increase of the bearing capacity of lime-stabilized layers as a function of time.

A kész pályaszerkezetek felületén párhuzamosan mért statikus és dinamikus teherbírás modulusuk pedig már egyáltalán nem mutatnak egymással jó egyezést. Ennek az alapvető oka az lehet, hogy míg a statikus teherbírás mérése kb. 75 cm vastagságú réteget képes vizsgálni, addig a dinamikus könnyűéjtősúlyos mérés érzékelési tartománya 30 cm. Emiatt a dinamikus mérés már nem alkalmas az eltérő felépítésű pályaszerkezetek vizsgálatára, mivel nem képes érzékelni a földmű kedvező vagy kedvezőtlen tulajdonságait.

A mésszel stabilizációs rétegek teherbírás modulusa

A bemutatott statikus és dinamikus teherbírás mérések eredményeiből következtetni lehet a mésszel kezelt talajrétegek saját modulusára. Mechanikai szempontból a megépült földmű és mésszel stabilizáció együttesen már kétrétegű rendszert alkot. Mivel ismert a kötött agyagtalajú földmű teherbírás modulusa (10 MPa), valamint a mésszel kezelt rétegek H vastagsága és az azok felszínén mért egyenértékű felületi modulusok (E_e) értéke, a (3)-as összefüggés alapján számítható az F süllyedési tényező. Burmister (1945) elmélete alapján ezeknek a paramétereknek az ismeretében már meghatározható a H vastagságú mésszel kezelt talajréteg saját modulusa (6. ábra). A számítások után a mésszel stabilizációs rétegek saját modulusára $E_{mész} = 500$ MPa értéket kaptunk, amelyik közel esik a jól betömörített folyamatos szemeloszlású zúzottkőréteg modulusához. Ez az eredmény lehetővé teszi, hogy a mésszel kezelt talajrétegeket pályaszerkezeti réteggként vegyük számításba a későbbiek során.

Lehetőségünk van arra is, hogy visszavezzessük ezt a kétrétegű rendszert egy olyan egyrétegű rendszerre, amely azonos igénybevételek hatására hasonlóképpen viselkedik mint az eredeti. Tulajdonképpen a mésszel stabilizációt, mint javított földművet vesszük számításba és nem tekintjük a pályaszerkezet részének. Ilyenkor a javított földmű saját modulusa a kétrétegű rendszer felszínén meghatározott egyenértékű felületi modulus (E_e). Három vastagsági csoportra határoztuk meg ezt az értéket a terepi mérések alapján:



$$\begin{array}{ll}
 H_{\text{mész}} = 15 \text{ cm} & E_{\text{f}} = 40 \text{ MPa} \\
 H_{\text{mész}} = 25 \text{ cm} & E_{\text{f}} = 50 \text{ MPa} \\
 H_{\text{mész}} = 35 \text{ cm} & E_{\text{f}} = 60 \text{ MPa}
 \end{array}$$

ahol H a mésszel kezelt talajréteg vastagsága, és E_{f} = a javított földmű modulusa.

A szemcsés rétegek teherbírasi modulusa

A szemcsés rétegek modulusát a 2.4.3. pontban bemutatott Baker és mtsa (1977) által felállított összefüggésekkel becsültük meg, a mésztabilizációs rétegeket pedig, mint javított földmű vittük be a modellbe. A számítások eredményét a 3. táblázat foglalja össze.

Jól látható, hogy a kontroll szakasz esetében a legalacsonyabb a szemcsés rétegek modulusa. A vele azonos vastagságban megépített 9. sz. szakasznál (15 cm mésztabilizáció) a zúzottkőrétegek modulusa 150 MPa, ami több mint kétszeres érték a hagyományos megoldáshoz képest (15 cm homokos kavics). Ahol a mésztabilizáció vastagsága 35 cm, a javított földmű teherbírasi modulusa egyenlő a kontrollszakasz teljes pályaszerkezetének teherbírásával! Ez a teherbírasi egyenlőség pedig hatalmas gazdasági előnyt jelent a hagyományos pályaszerkezetekkel szemben.

3. táblázat: A szemcsés rétegek E modulusa pályaszerkezet variációnként.

Table 3: „ E ” moduli of the granular layers by pavement variations.

No.	Var.	Földmű	Szemcsés rétegek	
		E (MPa)	H (cm)	E (MPa)
1	2	50	25	170
2	5	50	15	120
3	8	50	15	120
4	6	60	0	Nem határozható meg
5	9	60	2	Nem határozható meg
6	3	60	15	160
7	4	40	15	120
8	7	40	15	120
9	1	40	30	150
10	10	10	45	60

ÖSSZEFOGLALÁS

A tapasztalatokat összefoglalva azt mondhatjuk, hogy a kísérleti útnál alkalmazott géplánc professzionális megoldása a meszes talajstabilizáció építésének. A mésztabilizációs rétegek minimálisan építhető vastagságára 15 cm, az egy menetben építhető maximális vastagságra pedig 30 cm javasolható. A mésztabilizáció hatására egyértelműen megnőtt az altalaj teherbírása, ezért a teherbírás növelő hatása vitathatatlan. A talaj-mész reakció közben a talajszemcsék összecementálódnak és a teherbírás az idő előrehaladtával növekszik. A mésztabilizáció alkalmazásával nagymennyiségű zúzottkő takarítható meg, ami nagymértékben csökkenti az építés helyszínére szállítandó anyagmennyiséget, így a szállítási és az

építési költségeket is. A helyi talaj felhasználása környezetvédelmi szempontból is előnyösebb, mint a hagyományos zúzottkő pályaszerkezet.

A kísérleti útszakasz tapasztalatai alapján az Erdőfeltárási Tanszék megtervezte a Nyírerdő Zrt. 2,5 km hosszú Lónyai II. o erdészeti útját, amelynek legalsó alaprétege a helyszíni kötött agyag talaj meszes stabilizációjával készült. A földmű és mésztabilizáció építését a tervező a helyszínen is ellenőrizte. A síkvidéki terepviszonyok között megépített földmű vízvezetését 1,0-1,50 m mélységű szikkasztó árok és esetenként a mély fekvésű helyeken kialakított szivárogtató medencék biztosították. A kiváló minőségben megépített mésztabilizációs rétegre zúzottkő pályaszerkezet épült, amelynek járhatósága azóta is kiváló. Az itt szerzett kedvező tapasztalatok alapján a Lónyai feltáróút további több, mint 3 km hosszú második szakasza is megépült.

A kísérleti útszakasz és a már jól megépített mésztabilizációs útpályaszerkezetek arra is rámutatnak, hogy kötött talajú földmű esetén a jó vízvezetés és a földmű víztartalom-növekedésének elkerülése mindenképpen szükséges ahhoz, hogy a megépített mésztabilizációs vagy zúzottkő pályaszerkezet teherbírása megmaradjon.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kísérleti útszakasz az Erdő és Fahasznosítási Regionális Egyetemi Tudásközpont (ERFARET) keretén belül a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet, a Carmeuse Hungária Kft. és a Zalaerdő Zrt. közreműködésével épült.

Primusz Péter „Mésszel stabilizált földmű hatásainak vizsgálata egy kísérleti útszakaszon” publikációját megalapozó kutatása a TÁMOP-4.2.4.A/2-11/1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. A kutatáshoz előzményként kapcsolódik a Pázmány Péter program (RET-03/2004), 1.3. Erdőgazdálkodás Műszaki Fejlesztése, Erdészeti feltáráshálózatok fejlesztése elnevezésű projekt. A projekt megvalósulási ideje: 2005-2008.

A szerzők köszönetet mondanak a terepi mérésekben résztvevő segítőknek, különösen Balázs László tanszéki technikusnak.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Barker, W.R., Brabston, W.N., and Chou, Y.T. 1977: A General System for the Structural Design of Flexible Pavements. 209-248. In: Proceedings of the Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor.
- Behak, L. 2011: Performance of full-scale test section of low-volume road with reinforcing base layer of soil-lime. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2204): 158-164.
- Bocz P., Devecseri G, Fi I. és Pethő L. 2009: Pályaszerkezetek analitikus méretezése. Közlekedésépítési Szemle, 59 (5): 8-22.
- Burmister, D.M. 1945: The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems. Journal of Applied Physics, 16 (2): 89-94.
- Claussen, A.I.M., Edwards, J.M., Sommer, P. and Ugé, P. 1977: Asphalt Pavement Design, The Shell Method. 39-74. In: Proceedings of the Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. I, Ann Arbor.
- Garg, N. and Thompson, M. R. 1998: Mechanistic-empirical evaluation of the Mn/ROAD low volume road test sections. University of Illinois, Urbana, USA.



- Kosztka M. 1989: A makk-pusztai kísérleti úton végzett megfigyelések a vékony útpályaszerkezetek tönkremenetelének folyamatáról. Erdészeti és Faipari Tudományos Közlemények, (2): 25-36.
- LeBel, L.; Doré, G. and Provencher, Y. 2000: Laval University's full-scale experimental site for construction and maintenance of forest roads. Proceedings of the COFE-CWF Conference. 2000. 09. 11-14. Kelowna, British Columbia, Canada.
- Little, D. N. 1995: Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. Lime Association of Texas, USA.
- Metcalf, J. B. 1996: NCHRP Synthesis of highway practice: Application of full-scale accelerated pavement testing. TRB, National Research Council, Washington D.C., USA
- National Lime Association (NLA) 2004: Lime-treated soil construction manual. National Lime Association, USA.
- Nemesdy E. 1985: Útpályaszerkezetek méretezésének és anyagállandó-vizsgálatainak mechanikai alapjai. Kutatási rész-jelentés I., BME Útépítési Tanszék, Budapest.
- Nemesdy E. 1991: A zúzottkőalapok és kavicsalapok szerepe és hatékonysága az új útpályaszerkezetekben. Közlekedés-építés- és Mélyépítéstudományi Szemle, 41 (7): 241-253.
- Subert I. 2005: A dinamikus tömörség- és teherbírásmérés újabb paraméterei és a modulusok átszámíthatósági kérdése. Közúti és Mélyépítési Szemle, 55 (1): 5.
- Tárczy L. 2007: Meszes talajkezelés. Közúti és Mélyépítési Szemle, 57 (2): 26-28.
- Tompkins, D. and Khazanovich, L. 2007: MnROAD lessons learned, Final report. Minnesota Department of Transportation Research Services Section, Minnesota, USA.
- Tompai Z. 2008: Földművek és kötőanyag nélküli alaprétegek teherbírásának és tömörségének ellenőrzése könnyű ejtősúlyos módszerekkel. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, PhD értekezés, Budapest.

*Érkezett: 2014. március 17.
Közlésre elfogadva: 2014. július 15.*