

# MESZES TALAJSTABILIZÁCIÓ ALKALMAZÁSA AZ ERDÉSZETI ÚTÉPÍTÉSBEN



# **MESZES TALAJSTABILIZÁCIÓ ALKALMAZÁSA AZ ERDÉSZETI ÚTÉPÍTÉSBEN**

Szerkesztette: Dr. Primusz Péter

Témavezető: Dr. Péterfalvi József

Lektorálta: Dobó István

Készült:  
a Magyar Mérnöki Kamara 24/2015/3. számú FAP pályázatának támogatásával

## TARTALOMJEGYZÉK

1.	Bevezetés.....	3
2.	Az erdészeti utak pályaszerkezete.....	5
2.1.	A pályaszerkezeti rétegek funkciói.....	5
2.2.	A pályaszerkezeti rétegek anyagai .....	7
2.2.1.	Burkolatok és alaprétegek .....	8
2.2.2.	A megfelelő építőanyag kiválasztása .....	10
2.2.3.	Az anyagfelhasználás környezetvédelmi szempontjai .....	14
3.	A talajstabilizációról általában .....	15
3.1.	Kémiai talajstabilizáció .....	16
3.2.	Stabilizált talajok törési mechanizmusai .....	16
4.	A meszes talajstabilizáció anyagai .....	17
4.1.	A talaj .....	17
4.1.1.	A talajok talajmechanikai ismertetése.....	17
4.1.2.	A talaj és mészhidráttal való kölcsönhatása .....	18
4.2.	A mészhidrát .....	20
4.2.1.	Égetett mészhidrát .....	21
4.2.2.	Száraz mészhidrát.....	21
4.2.3.	Péppé oltott mészhidrát .....	21
4.3.	A víz .....	21
5.	A mészhidrát és talaj kölcsönhatását bemutató eredmények.....	22
5.1.	A vizsgált talajok .....	22
5.2.	Hőmérsékletváltozás a mészhidrát bekeverésekor.....	23
5.3.	A szemeloszlás változása.....	23
5.4.	A plasztikus tulajdonságok változása .....	23
5.5.	A tömörítési jellemzők változása .....	24
5.6.	Vízállóság .....	24
6.	Korábbi építési tapasztalatok az erdészeti utakon.....	25
6.1.	Építési tapasztalatok .....	25
6.2.	A Szalafői út építésének tapasztalatai .....	27
6.3.	Pályaszerkezet feltárása.....	27
6.4.	Összefoglalás .....	28
7.	Valós léptékű útkísérletek .....	29
7.1.	A Makk-pusztai és Bassdorfi útkísérletek .....	29

7.2.	A Bánokszentgyörgyi útkísérlet .....	30
7.2.1.	A kísérleti útszakasz helyszínének bemutatása .....	31
7.2.2.	A kísérleti útszakasz keresztmetszeti kialakítása .....	31
7.2.3.	A kísérleti útszakasz pályaszerkezet variációi .....	31
7.2.4.	A kísérleti útszakasz meszes stabilizációjának építése .....	32
7.2.5.	A kísérleti útszakaszok teherbírása .....	33
7.3.	Összefoglalás .....	36
8.	Laboratóriumi teherbírás vizsgálatok .....	37
8.1.	A CBR vizsgálat elve .....	37
8.2.	A kísérleti beállítások .....	37
8.3.	A CBR vizsgálatok eredményeinek értékelése .....	38
8.4.	A vizsgálati eredmények gyakorlati felhasználása .....	42
8.5.	Az $E_2$ érték meghatározása CBR vizsgálatból .....	42
9.	A meszes talajstabilizáció építési technológiája .....	43
9.1.	A meszes talajstabilizáció építésének általános technológiái .....	43
9.2.	A meszes talajstabilizáció javasolt építési technológiái .....	45
9.2.1.	Szakaszos technológia, kézi kötőanyag adagolással .....	45
9.2.2.	Porszegény technológia .....	46
9.2.3.	Pormentes technológia .....	48
10.	A kísérlet út tapasztalatai alapján épült erdészeti feltáróutak .....	50
11.	Mészstabilizációs típus pályaszerkezetek .....	52
11.1.	A forgalmi terhelési osztály meghatározása .....	52
11.2.	Mészstabilizációs réteg tervezése .....	52
11.3.	A típus pályaszerkezetek kiválasztásának szempontjai .....	53
12.	Összefoglalás .....	54
12.1.	Laborvizsgálat .....	54
12.2.	Méretezés .....	54
12.3.	Kivitelezés .....	54
13.	Irodalomjegyzék .....	55

## 1. Bevezetés

A világ energiafelhasználása, környezetünk szennyezése évről-évre egyre nagyobb méreteket ölt. Energiaigényeink jövőbeni kielégítésére, környezetünk megóvására, a megújuló energiaforrások látszanak megfelelő alternatívának (Vágvölgyi, 2013).

Magyarország energiafelhasználása az elmúlt években 1000-1100 PJ körül mozgott (KSH, 2013), a hazai energiatermelés egyre csökkent, míg energiafüggőségünk fokozatosan növekedett. Az Európai Unió tagországai számára célul tűzte ki, hogy 2020-ra az EU teljes energiafogyasztásának legalább 20%-a megújuló energiaforrásokból származzon. A Nemzeti Fejlesztési Minisztérium elkészítette Magyarország 2020-ig szóló megújuló energia hasznosítási cselekvési tervét, amelyben célkitűzésként nagyobb mértékű, 14,65% részesedést határoz meg. Az ország adottságait tekintve hosszútávon fenntartható és versenyképesen előállítható megújuló energiaforrás a biomassza<sup>1</sup>.

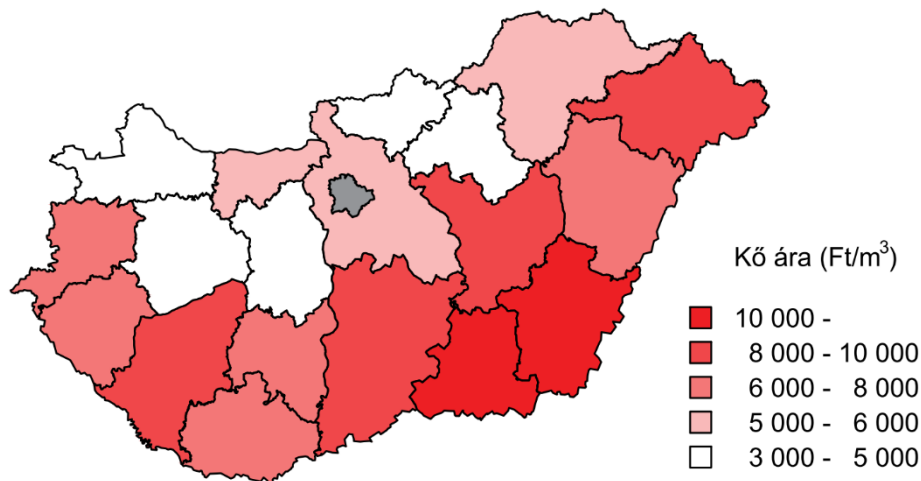
A megtermelt biomassza energiasűrűsége viszont igen alacsony. Összehasonlításképpen a szén energia sűrűsége 28 GJ/t, az ásványi olajé 42 GJ/t, a földgázé 52 GJ/t, míg a biomasszáé csak 8 GJ/t (50%-os nedvességtartalmat feltételezve). A kis határfok miatt a szállítás, a megtermelt energia egy jelentős hányadát felemészti, ezért a biomassza alapú energiatermelő rendszerek tervezésekor a **szállítási távolság** minimalizálása alapvető fontosságú. A szállítási távolság mellett a **szállító pálya minősége** is kritikus tényező a végleges energiamérleget nézve (1. ábra). A fás szárú biomasszát a leggyakrabban az erdőterületeket a közutakkal összekötő feltáró utakon szállítják.

Az erdészeti utak célja az, hogy a termeléshez szorosan hozzátartozó anyagmozgatást gazdaságossá tegyék. Ezt a célt akkor érjük el, ha az út által nyújtott kedvező hatások (előnyök) meghaladják azokat a kedvezőtlen hatásokat (terheket) amelyeket az utak létesítése jelent. A terhek csökkentésének egyik leghatásosabb módja az építési költségek csökkentése, ezért ezeknek az utaknak a megvalósításakor állandóan keressük az építési költség csökkentésének lehetőségeit. A költségcsökkentés egyik módja az, hogy olyan útépítési technológiákat alakítunk ki, amelyekhez egyszerű gépek szükségesek. Ezáltal elkerülhető, hogy kis volumenű munkákhoz felvonuló nagy teljesítményű speciális gépek magas költségei – amelyet rossz kihasználtság még fokoz – az útépítési költségeket növeljék. A mezőgazdasági és erdészeti utak építésénél felmerülő másik probléma az útépítések nagy anyagigénye.



1. ábra. Aprítékkal elakadni nem jó móka (Sike Péter fotója)

<sup>1</sup> Energetikailag hasznosítható növények, melléktermékek, növényi és állati hulladékok.



2. ábra. Magyarország kőár térképe, forrás: Gradex, 2003

Az útpályaburkolatok ősidőktől legáltalánosabban használt anyaga a kő. A kőanyagok termelése, zúzása, osztályozása és helyszínre szállítása azonban meglehetősen költséges, különösen hazánkban, ahol a kőbányák az ország nyugati és északi részén vannak és szállításuk az ország többi területére igen költséges (Lehotzky, 1962). Magyarország földrajzi elhelyezkedése és geológiai viszonyai miatt kőben szegény ország. Tömör kőzetek a középhegységekben fordulnak elő. Ezek jelentős hányadának alapkőzete mészkő és dolomit, ami az útépités szempontból nem túl előnyös. Folyóink alsó folyásúak, ezért hordalékukban csak rövid szakaszon jelenik meg a kavics, túlnyomó részben homok és finomabb talajfrakciók rakódnak le. Területünk mintegy 50%-át borítja lősz, jelentős területeket foglalnak el a kötöttebb talajjal borított területek (Kosztka, 2006). Ez az adottság alapvetően meghatározza azt, hogy az ország különböző területein az útépitéshez legnagyobb mennyiségben használt kőanyag ára között jelentős különbségek alakultak ki (2. ábra).

A pályaszerkezet tervezésekor felmerül az a kérdés, hogy milyen alapanyagból készüljenek a pályaszerkezeti rétegek, milyen legyen a pályaszerkezet felépítése, milyen kompromisszumokat szabad tenni az alapanyag kiválasztásánál az építési költségek csökkentése érdekében anélkül, hogy azzal a hosszú távú útfenntartási költségeket kedvezőtlenül befolyásoljuk (Kosztka, 2006).

Ahhoz, hogy a feltett kérdésre a választ meg lehessen adni, meg kell vizsgálni azokat a peremfeltételeket, amelyek döntéseinket befolyásolják. Ezek lehetnek

- az anyagkiválasztás általános szempontjai,
- a helyi adottságok,
- a vizsgált technológia alkalmazásának feltételei,
- környezetvédelmi szempontok.

Általánosságban kimondható, hogy egy pályaszerkezetet olyan rétegsorral kell felépíteni, amelynek, műszaki, közgazdasági és környezetvédelmi előnyei kimutathatók.

A felvetett probléma megoldására számos építési és fenntartási módszert, alapelvet és előírást dolgozott ki, és folyamatosan fejleszt a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet, Erdőfeltárási Tanszéke. Jelen munka ebből ad rövid áttekintést.

## 2. Az erdészeti utak pályaszerkezete

A faanyag gazdaságos szállítása, az üzemirányítás hatékonysága, a vadgazdálkodás és a közjóléti szolgáltatások megalapozása megkívánja, hogy az erdészeti utak forgalma, *biztonságos, gyors, gazdaságos és kényelmes* legyen.

A változatos igénybevételnek (forgalom, időjárás) kitett pályaszerkezet a vele szemben támasztott igényeknek akkor tud megfelelni, ha kialakítása korszerű alapelvek szerint történik:

- a pályaszerkezet felépítése és anyaga megfelel a várható igénybevételeknek,
- a pályaszerkezet felépítéséhez felhasznált anyagok minősége arányos az igénybevételekkel.

Ilyen pályaszerkezetek a többrétegű pályaszerkezetek, amelyeknek két csoportját különítjük el alapvető tulajdonságaik alapján:

- hajlékony útpályaszerkezetek,
- merev pályaszerkezetek.

Hajlékony útpályaszerkezetek azok, amelyeknél a kerékterhelés alatt 1,0-2,0 mm-es rugalmas alakváltozás (behajlás) alakul ki, kisebb teherelosztó képességük miatt (pl.: aszfalt pályaszerkezetek).

Merev pályaszerkezetek azok, amelyek nagyobb merevségük miatt jobb teherelosztó képességgel rendelkeznek és ezért a kerékterhelés alatt kisebb behajlások keletkeznek (pl.: beton pályaszerkezetek).

Az erdészeti útépítésben használt félmerev pályaszerkezeteket a hajlékony pályaszerkezetek közé soroljuk. A merev pályaszerkezetek jelentősége erdészeti utakon alárendelt, ezért a következőkben részletesen a hajlékony útpályaszerkezetekkel foglalkozunk.

### 2.1. A pályaszerkezeti rétegek funkciói

Az utakat terhelő forgalom hatására a pályaszerkezetek keresztmetszetében különböző igénybevételek lépnek fel, ennek megfelelően azt több rétegből kell felépíteni, ahol is minden rétegnek meg van a maga szerepe (3. ábra).

A többrétegű hajlékony pályaszerkezet részei:

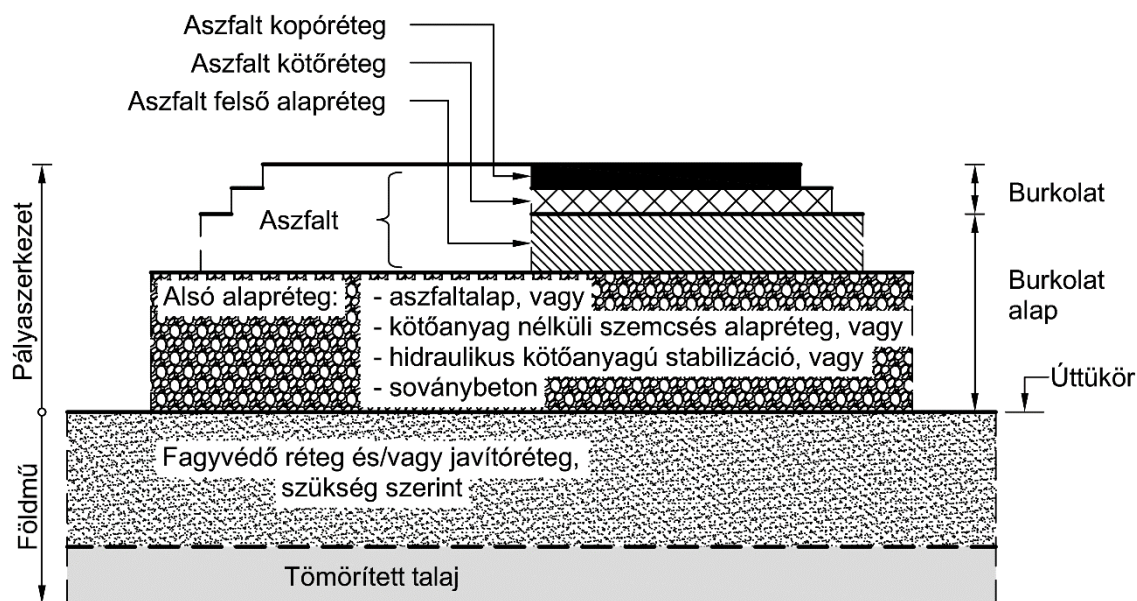
- a burkolat,
- a burkolatalap,
- a védőréteg.

**A pályaszerkezetnek nem része a földmű felületén elhelyezkedő javított talajréteg.**

A **burkolat** a pályaszerkezet legfelső része. A forgalom ennek felületén halad, az időjárással közvetlen kapcsolatban áll. A forgalom szempontjából ezért a burkolat felületi tulajdonságai lesznek a mértékadók (egyenletesség, érdesség, vízelvezető képesség stb.). A pályaszerkezet időjárásnak legjobban kitett részeként el kell viselni azokat az igénybevételeket is, amelyeket a fagy, a csapadék és a hőmérséklet okoz. Nagyobb forgalom esetén két rétegből áll: a felső kopórétegből és az alatta lévő kötőrétegből.

Az időjárásból és a forgalomból származó hatásokat a kopóréteg viseli el közvetlenül, ezért megkülönböztetett fontosságú réteg. Fontos, hogy nedves időben is megfelelő csúszásellenállása legyen, és az élettartam alatt ne alakuljon ki, a felületén a megengedetnél nagyobb keréknyomvályú.





3. ábra. Az útpályaszerkezet és felépítése

A kötőréteg feladata a nagyobb vízszintes erőhatások felvétele és a kopóréteg alaphoz való kapcsolása. A nyári meleg periódusban a kötőréteg hőmérséklete csak néhány Celsius fokkal alacsonyabb, mint a kopórétegé. Ezért olyan útszakaszokon, ahol a forgalom lefolyása lassú, – fékezési és gyorsítási hatások vannak – a kötőréteg nyíró feszültségekkel szembeni ellenállásának is megfelelőnek kell lenni.

A burkolatot az **alap** vagy **burkolatalap** támasztja alá, ami szintén több rétegből épülhet fel. Fő feladata a földre jutó terhelések felvétele és csillapítása. Az alap két része: a felső- és alsó alapréteg. Nagy forgalom esetén ezek további rétegekből állhatnak. A felső alapréteg feladata – nagy stabilitása és szilárdsága mellett –, hogy a hajlító igénybevételeket felvegye, valamint a víz elleni szigetelést biztosítja. Az alsó alaprétegre már csökkentett mértékben érkeznek a terhelések ezért elegendő kisebb szilárdságú anyagokból felépíteni. Az aszfalt alaprétegeket nem szabad másodlagos – a kopó- és kötőrétegnél jóval kisebb fontosságú – rétegeknek tekinteni.

A teljes pályaszerkezetet a földmű támasztja alá, ami bevágásban vagy töltésben lévő tömörített talaj. A földműnek megfelelő teherbírással kell rendelkeznie, hogy a pályaszerkezet és a rajta folyó forgalom terhét viselni tudja. Ez a teherbírás optimális víztartalom melletti tömörítéssel biztosítható. A földmű felületén alkalmazott javító réteget is ide soroljuk, nem pedig a pályaszerkezethez.

A **javított talajréteg** a földmű felső része, amely nem tartozik a pályaszerkezethez. Ez lehet a pályaszerkezet teherbírásába be nem számított védőréteg (fagyvédőréteget), vagy az építés közben elnedvesedett földmű kellő teherbírását biztosító talajréteg. A pályaszerkezet méretezésekor ennek a rétegnek a felületén kialakuló teherbírást tekintjük a földmű mértékadó teherbírásának.

Az erdészeti utak forgalmából származó igénybevételek nem teszik szükségessé a klasszikus felépítésű hajlékony pályaszerkezet teljes rétegsorának megépítését. Az erdészeti utak pályaszerkezetéből ezért elhagyhatók azok a rétegek, amelyeknek szerepe alárendelt, de meg kell tartani azokat, amelyek műszaki, vagy egyéb szempontok miatt szerepet játszanak a pályaszerkezet stabilitásának és teherbírásának kialakításában. Ennek figyelembevételével elhagyható a kötőréteg és az egyik alapréteg. Nem hagyható el a védőréteg, amelyet legalsó alapként célszerű figyelembe venni.



Az erdészeti utak pályaszerkezetének felépítése:

- kopóréteg,
- alapréteg,
- legalsó alapréteg, vagy védőréteg.

A pályaszerkezet felépítésének ilyen egyszerűsítése azért fontos a kis forgalmú erdészeti utakon, mert a rajtuk áthaladó forgalom megengedi a törekvést egy „technikai minimum” megvalósítására. Ezért sokszor elég egyetlen olyan réteget alkalmazni, amely az alappal és a burkolattal szemben támasztott követelményeket egyaránt kielégíti (pl. mechanikai stabilizáció).

A pályaszerkezet vastagságát méretezéssel állapítjuk meg. A szükséges vastagság ismeretében megtervezzük a pályaszerkezet felépítését, amikor az egyes rétegek geometriai vastagságát határozzuk meg a kiválasztott anyagok mechanikai és építéstechnikai tulajdonságai alapján. A következőkben ezért először a pályaszerkezet építéséhez felhasználható anyagok tervezésével, és építési technológiával foglalkozunk (Kosztka, 2009).

## **2.2. A pályaszerkezeti rétegek anyagai**

A pályaszerkezeti rétegekben a különböző anyagok egymást helyettesíthetik úgy, hogy azokból műszakilag egyenértékű pályaszerkezetek épülnek fel. Ezek közül az anyagok közül egyesek olyanok, amelyek a pályaszerkezet különböző rétegeitől megkívánt igényeket egyaránt kielégítik, ezért burkolatként, vagy alapként is használhatók. Ezeket az anyagokat burkolat-alapnak nevezzük.

Az egyes pályaszerkezeti rétegekbe beépített anyagok fogják biztosítani

- a pályaszerkezet teherbírását,
- a pályaszerkezet stabilitását.

A teherbírás az az igénybevétel, amelyet túllépve az anyag rendeltetésszerűen tovább nem használható. Ez az igénybevétel származhat a forgalom dinamikus igénybevételeiből és a hajlításokból, ezért főként az ebből származó igénybevételekkel szembeni ellenállást fejezi ki az élettartam alatt. A stabilitás különféle egyéb hatásokkal (időjárásból származó hatások, kopásellenállás, nyomvályú képződés stb.) szembeni ellenállást fejezi ki és biztosítja.

A pályaszerkezeti anyagok teherbírása, illetve stabilitása az alapanyagok célszerű összeállításával teremthető meg. A teherbírást elsősorban a köváz biztosítja, amelyet fokozni fog és annak stabilitást biztosíthatja:

- a kötőanyag,
- a kiékelés,
- a térkitöltés.

A kötőanyag hatása kétféleképpen érvényesül:

- a kohézió nélküli szemcsés anyagnak kohéziót kölcsönöz a kohézióval rendelkező kötőanyag (bitumen);
- a hidraulikus kötőanyagok a hidraulikus kötésük közben kialakuló kristályosodási folyamatok alatt összekristályosítják (összecementálják) a szemcsés anyagokat.

Kiékeléskor az ékhatást és a belső súrlódást használjuk ki úgy, hogy a nagyobb szemcsék közé egy külön technológiai lépésben kisebb szemcsékből álló kiékelő réteget hengerlünk, aminek eredményeként szakaszos szemeloszlás alakul ki.

Térkitöltéskor a szemcsék elmozdulását a hézagot kitöltő egyre kisebb szemcsék akadályozzák meg, amelynek feltétele az anyag folyamatos szemeloszlása.

Nem minden pályaszerkezeti réteg anyagát lehet építés közben a végső tömörségnek megfelelően megépíteni. Ezek a pályaszerkezeti rétegek végső tömörségüket a forgalom hatására érik el. Az ilyen pályaszerkezeteket utántömörödő pályaszerkezeteknek nevezzük.

A pályaszerkezeti rétegek anyagának összetételét, az építést és építési minőséget a közúti igények figyelembevételével elkészített műszaki irányelvek írják elő. A közúti és az erdészeti útépités feltételei és igényei közötti különbség (pl.: építési minőség egyenletessége, építési, megvalósulási minőség szigorú betartása, alapanyag felhasználás elvei stb.) miatt ezeket az előírásokat nem lehet és célszerű mindig figyelembe venni. Az erdészeti utakra vonatkozó építésminősítési előírásokkal nem rendelkezünk, ennek ellenére ezeket is a célokkal arányos, jó minőségben kell megépíteni. Azokat az építésminőségi előírásokat, amelyekben a közúti előírásoktól eltérhetünk, a tervezőnek kell megfogalmazni és a tervdokumentációban azt rögzíteni. Különösen érvényes ez a helyi talajok felhasználását lehetővé tevő talajstabilizációknál és a hagyományos, egyszerű zúzottkő pályaszerkezeteknél. Az igényesebb, korszerűbb és drágább rétegeknél a műszaki előírásokat azonban figyelembe kell venni.

### **2.2.1. Burkolatok és alaprétegek**

Az alapréteg a burkolat és a földmű közötti kapcsolatot biztosítja. Alátámasztja a burkolatot és teherelosztó hatásán keresztül megakadályozza, hogy a forgalom a földműben olyan alakváltozásokat hozzon létre, amelyek a burkolaton káros alakváltozásokként jelennek meg. Az alapréteg a felülről lefelé jelentősen csökkenő feszültségek miatt csak kis igénybevételnek van kitéve, mégis a rétegek feladatukat csak akkor tudják maradéktalanul ellátni, ha a földmű:

- talaja megfelelő állapotú,
- kellően tömör,
- gondosan víztelenített és
- a tervnek megfelelő szintben készült.

Az alaprétegek anyaga különféle ásványi anyagokból és kötőanyagokból készíthető el. Az alapon fellépő kisebb igénybevételek miatt ehhez gyengébb minőségű alapanyagok is felhasználhatók. Alaprétegek lehetnek:

- a stabilizációs alapok,
- a zúzottkő alapok,
- a hidraulikus kötőanyag felhasználásával készülő alapok,
- az aszfalttípusú burkolat-alapok.

A stabilizációs alapok a helyi talaj felhasználását teszik lehetővé, meghatározott szemeloszlás előállításával, vagy talaj és kötőanyag (cement, bitumen, mész stb.) keverék készítésével. A zúzottkő alapokhoz kötőanyagot nem használunk, a teherbírást és a stabilitást a kiékeléssel előállított nagy belső súrlódás biztosítja. A hidraulikus kötőanyag felhasználásával készülő alapok kötőanyaga a cement, a pernye, a granulált kohósalak. Az aszfalttípusú burkolatalapok kötőanyaga a bitumen, amely különféle kötőanyagokból álló vázat köt össze.

#### **2.2.1.1. Burkolatok (kötő- és kopórétegek)**

A gépjárművek gumibroncsos forgalmát elviselő korszerű burkolatok készítése csak megfelelő kötőanyag felhasználásával lehetséges. Kötőanyag lehet:

- a cement, amely hidraulikus kötéseket hoz létre,
- a bitumen, amely a szemcsés ásványi váz kohézióját növeli, és ezáltal biztosítja azokat a tulajdonságokat, amelyeket a burkolatoktól megkövetelünk.

Cement felhasználásával a betonburkolatok, míg bitumen felhasználásával az aszfaltok készülnek. Mindkét típusú burkolati anyagnak vannak előnyös és hátrányos tulajdonságai, amelyek alapján nem lehet egyik vagy másik szerkezet alkalmazása mellett egyértelműen állást

foglalni. A döntést mindig az adott gazdasági és műszaki színvonal elemzése alapján kell meghozni.

#### 2.2.1.2. Stabilizációs alapok

Az alaprétegek közül, jelen tanulmányban csak a stabilizációs alapokra térünk ki részletebben. A pályaszerkezetek gazdaságos és olcsó kialakításának feltétele, hogy a kisebb igénybevételeknek kitett alsóbb rétegekbe, mint amilyenek az alaprétegek, ne építsünk be kiváló minőségű zúzottkővet, hanem törekedjünk a helyi anyagok széles körű felhasználására.

Előnyös a helyi anyag stabilizálása azért is, mert építésük rendkívül rugalmas. Elkészíthetők saját kivitelezésben egyszerűbb gépekkel, vagy kisebb teljesítményű korszerű gépekkel, de megépíthetők nagy teljesítményű gépláncokkal is.

A közgazdasági előnyök mellett jelentősek a műszaki előnyök is. A helyi anyagok stabilizálásával olyan alaprétegeket tudunk létrehozni, amelyek a vizet nem eresztik át és nem tárolják, valamint a forgalom hatására nem tömörödnek (nem utántömörödő rétegek).

A stabilizációk pályaszerkezetben elfoglalt helyét a forgalom nagysága határozza meg:

- közepes és nagy forgalmú utak hajlékony pályaszerkezetének alsó alaprétege,
- kis forgalmú utak (ide tartoznak a nagyobb forgalmú erdészeti és mezőgazdasági utak alapja,
- igen kis forgalmú utak (mint az erdészeti és mezőgazdasági utak) burkolata valamilyen vékony bitumenes lezárással, vagy önállóan mechanikai stabilizáció formájában.

Stabilizáláskor a talaj nyírószilárdságát a körülmények által meghatározott feltételek között, adott követelményeknek megfelelően növeljük, azt az időjárástól és forgalomtól függetlenül állandósítjuk, stabilizáljuk. A talajok stabilizálásakor a talaj tulajdonságait céljainknak megfelelően változtatjuk meg:

- talajkeverék készítésével,
- kötőanyag bekeverésével,
- tömörítéssel.

Fontos az optimális tömörítési víztartalmon történő gondos tömörítés. Ennek hatására nő a belső súrlódás, ezzel együtt a teherbírás, a hézagok csökkenésével pedig csökken a vízáteresztő és víztartó képesség.

A kötőanyag *cement, mész, bitumen, pernye, granulált kohósalak*, esetleg különféle vegyszerek lehetnek, ezeket a talaj tulajdonságai alapján választjuk ki. Többféle kötőanyag közül közgazdasági elemzések alapján kell a megfelelőt kiválasztani. A különféle stabilizációk felhasználási lehetőségét elsősorban a helyszíni talajviszonyok határozzák meg:

- Mechanikai stabilizáció készíthető a kedvező szemeloszlású, kötött frakciót viszonylag magas arányban tartalmazó kavicsos talajokból, valamint az egyenletes szemeloszlású kavics talajokból, amelyek szemeloszlását iszapos agyag hozzákeverésével javítjuk.
- Cementes talajstabilizációra elsősorban az iszap, iszapos homok, iszapos kavics talajok alkalmasak. Egyenletes szemeloszlású homokos kavics és homok csak nagy mennyiségű cement adagolásával stabilizálható.
- Bitumenes talajstabilizációt az egyenletes szemeloszlású homoktalajokból készíthetünk, mint amilyen a futóhomok, durva homok, kavicsos homok.
- Meszes talajstabilizáció kötött talajokból, vagy agyagos kavics talajokból készíthető.
- Pernye és granulált kohósalak kötőanyag felhasználásával szemcsés, kissé kötött, agyagmentes talajok stabilizálhatók.

A felsorolt stabilizációs alapok közül csak a meszes talajstabilizációval foglalkozunk részletesebben.

### 2.2.2. A megfelelő építőanyag kiválasztása

Az erdészeti utak pályaszerkezetének tervezési lépései (4. ábra):

- a pályaszerkezet méretezése,
- a pályaszerkezet felépítésének megtervezése,
- az útfenntartási munkák megtervezése és elemzése.

A pályaszerkezet méretezését az AASHO-útkísérletekre (American Association of State Highway Officials), a korábban érvényben lévő Hajlékony Útpályaszerkezetek Méretezési Utasítása elveire, valamint a hazai mező- és erdőgazdasági utak pályaszerkezetének méretezésére lefolytatott kiegészítő vizsgálatok alapján kidolgozott és az átdogozott Erdészeti Utak Tervezési Irányelveiben (2001) foglalt méretezési eljárás szerint végezzük.

A méretezés alapelve az, hogy a talaj teherbírása (CBR, California Bearing Ratio) és az élettartam alatti forgalom ( $F_{100}$  (db), 100 kN-os egységtengelyáthaladás az élettartam alatt) figyelembevételével meghatározunk egy egyetlen rétegből álló egyenértékű pályaszerkezet vastagságot:

$$H_{esz} = (-14,5 + 14 \log(F_{100})) \left[ \frac{2,5}{CBR\%} \right]^{0,4} \quad (1)$$

ahol  $H_{esz}$  : szükséges egyenérték-vastagság (ecm)

$F_{100}$  : a tönkremenetelhez szükséges egységtengely-áthaladás (db)

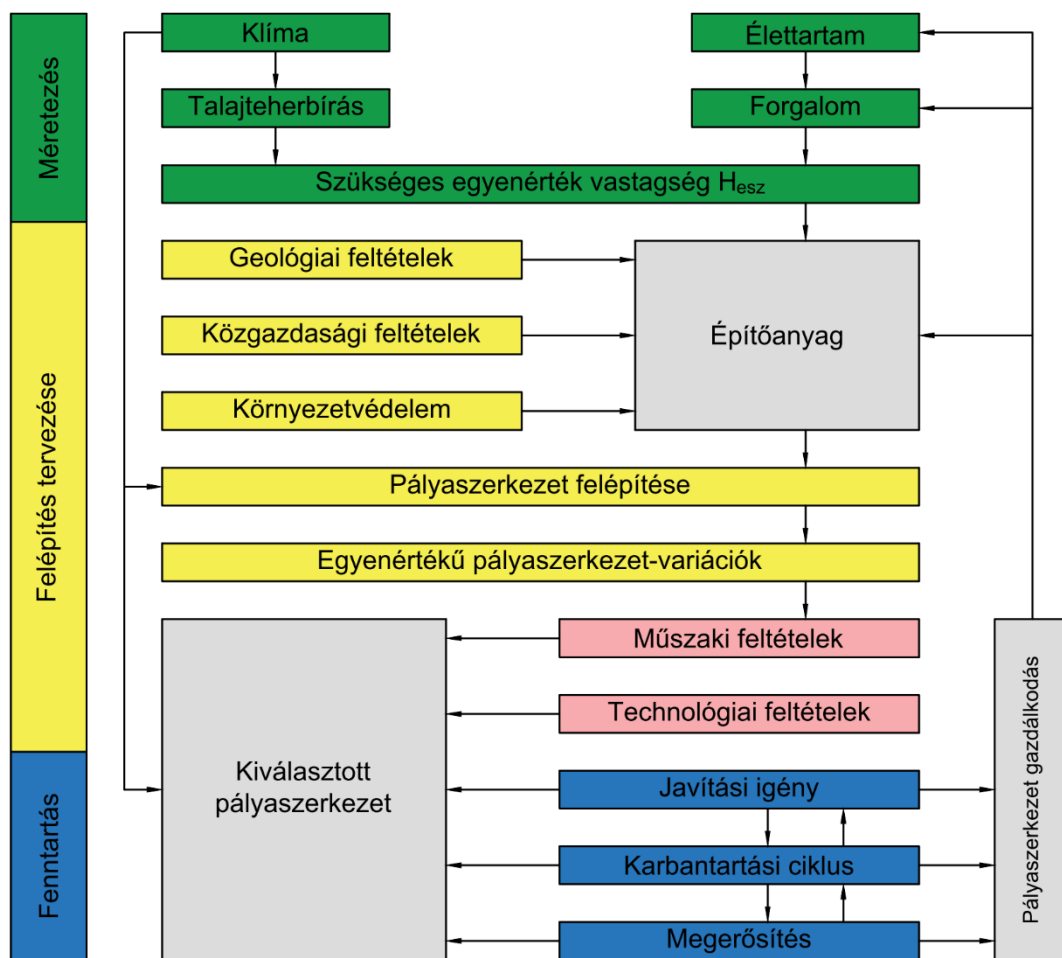
CBR : az altalaj teherbírása (%)

A továbbiakban ezért az eredeti útpályaszerkezetet egy olyan egyrétegű elméleti réteggé fogjuk fel, amelynek vastagsága eltér a geometria vastagságtól, de teherbírás szempontjából azzal mégis egyenértékű, anyaga pedig szabványos zúzottkőréteg (Herpay 1967).

A méretezési összefüggés és a tapasztalatok alapján a tervezési paraméterek közül **a talaj teherbírása a mértékadó tényező**, a forgalom nagysága kevésbé befolyásolja a pályaszerkezet szükséges egyenérték-vastagságát. Mivel a pályaszerkezet méretezésénél feltételezzük azt, hogy a földmű az előírt építés szabályainak megfelelően épül meg, ezért a pályaszerkezet állékonysága és élettartama szempontjából alapvetően fontos a földmű gondos, az optimális tömörítési víztartalomnak megfelelő víztartalom melletti tömörítése a felső 50 cm-es vastagságban a minimális 90% tömörségi fokig.

A pályaszerkezet felépítésének tervezésekor a helyszíni talajviszonyok ismeretében döntést hozunk a védőréteg szükségességéről, majd a rendelkezésre álló anyagokból felépítjük a forgalom igénybevételének megfelelő pályaszerkezeteket. Ezekből a műszakilag egyenértékű pályaszerkezetekből lehet kiválasztani a környezetvédelmi szempontból is megfelelő pályaszerkezetet.

A műszakilag és környezetvédelmi szempontból egyaránt megfelelő pályaszerkezetek közül közgazdasági szempontok alapján választjuk ki azt az egy pályaszerkezetet, amelyet megvalósítunk. A döntést nem csak az építési költségek vizsgálatára alapozva kell meghozni, hanem meg kell vizsgálni azt is, hogy a pályaszerkezet élettartama alatt milyen fenntartási munkákat kell elvégezni, azoknak mi a közgazdasági és környezetvédelmi hatása. Nem elég ugyanis az utat alacsony építési költséggel megvalósítani, mert később a felújítás időpontjáig (az élettartam alatt) folyamatosan javításokkal és karbantartásokkal kell az út állapotát fenntartani.



4. ábra. A pályaszerkezet tervezésének folyamata

Ez környezetvédelmi és közgazdasági szempontból egyaránt kedvezőtlen megoldást eredményez.

A pályaszerkezet-tervezés folyamatából világosan kiválaszthatók azok a tényezők, amelyek egy út pályaszerkezetének építési költségeit meghatározzák:

- a klíma, amely a földmű teherbírását befolyásolja,
- a talaj (geológiai) viszonyok, amelyek meghatározzák a talaj fagyveszélyességét,
- a földmű teherbírása, amely szakszerű földmű építéssel biztosítható,
- a rendelkezésre álló építőanyagok,
- a technológiai feltételek,
- a műszaki feltételek, amelyekkel a technológia megvalósítható.

A klíma és a geológiai viszonyok adottságok, azokhoz alkalmazkodni kell. A földmű teherbírását az építés minősége határozza meg, amelyet folyamatos műszaki ellenőrzéssel meg kell követelni. A pályaszerkezet építési költségeire közvetlenül hat az építőanyag ára, ezért az építőanyagot a legcélszerűbben kell felhasználni. Ez azt jelenti, hogy ki kell használni az építőanyag által nyújtott lehetőségeket, valamint az igénybevételeknek megfelelő, azokkal arányos minőségű anyagokat kell felhasználni. Ennek feltétele egyrészt a technológiák pontos ismerete, valamint a technológiának megfelelő géppark megléte.

#### 2.2.2.1. A kőnemű útépítési anyagok kiválasztását befolyásoló tényezők

A pályaszerkezet tervezésekor kiválasztjuk a pályaszerkezetet felépítő anyagokat és meghatározzuk a belőlük építendő réteg geometriai vastagságát. Ezzel az egyes anyagokból szükséges anyagmennyiség meghatározottá válik. A pályaszerkezet építési költségeit ezek után az építőanyag ára határozza meg.

A pályaszerkezet zömét alkotó kőnemű útépítési anyagok ára több költségtényezőből tevődik össze:

- az anyag értéke,
- a kitermelés költsége,
- a továbbfeldolgozás költsége,
- a szállítás költsége,
- a deponálás költsége.

Az anyag értéke és a kitermelés költsége viszonylag alacsony. Az anyag értékét nem kell megfizetni akkor, ha az a helyszínen található, a földműépítéssel megmozgatott talaj, vagy egy helyi anyagnyerőhelyből származik. A kitermelés költsége ebben az esetben közvetlenül, vagy másodlagosan jelentkezik. Idegen anyag felhasználásakor mindkét költség terheli az anyag árát.

A továbbfeldolgozás költsége szintén alacsonynak tekinthető. Ennek ellenére az anyag további feldolgozása gyakran elmarad. Meg kell azonban gondolni azt, hogy a kis költséggel feldolgozott, műszakilag is kedvezőbb anyag felhasználásával kevesebb anyagot kell beépíteni, ami csökkenti a szállítási feladatot, valamint csökkenti az idegen anyag koncentrációját, ami környezetvédelmi szempontból fontos. Amennyiben ez így van, érdemes a magasabb árat a bányának, vagy az anyagnyerőhely tulajdonosának megtéríteni. Vélelmezhető az is, hogy az igényesebb anyagfelhasználással létesített pályaszerkezetek fenntartási költségei alacsonyabbak lesznek.

---

**A szállítási költség mértékadóan meghatározza az építőanyag árát az építés területén. Feltétlenül célszerű ezért minden esetben megvizsgálni azt, hogy a helyi talaj, vagy közeli anyagnyerőhelyből kitermelhető anyag milyen formában alkalmas pályaszerkezeti réteg építésére!**

---

A deponálás költségei alacsonyak. Megfelelő munkaszervezéssel ezt a költségelemet meg lehet takarítani, ha az anyagot közvetlenül a beépítés helyére szállítjuk.

Összefoglalva az előbbieket kimondhatjuk, hogy a költségcsökkentés érdekében törekedni kell a helyi anyagok, vagy közeli anyagnyerőhelyek anyagának mind szélesebbkörű felhasználására, illetve ahol erre mód van, továbbfeldolgozott alapanyag beépítésére. A kevesebb idegen anyag megjelenése a pályaszerkezetben környezetvédelmi szempontból szintén előnyös (Kosztka, 2006).

#### 2.2.2.2. A kötőanyag kiválasztását befolyásoló tényezők

Az utak pályaszerkezetének építéséhez felhasználható kötőanyagok, a *bitumen*, a *cement*, a *mész* és a *másodlagos ipari nyersanyagok*. Az erdészeti utak pályaszerkezetének építésekor a burkolati és kopórétegbe a *bitumen*, alapokhoz a *bitumen*, *cement* és *mész* kötőanyagot célszerű használni.

A másodlagos ipari nyersanyagokat jelenleg ott célszerű felhasználni, ahol azok keletkeznek, ezért az adott körülmények között ezek használata nem jöhet számításba.



Az utak pályaszerkezetének általánosan elterjedt kötőanyaga a bitumen, amelyet

- utibitumen,
- hígított bitumen,
- kationaktív bitumenemulzió

formájában lehet felhasználni.

Az utibitumenek felhasználását az aszfaltkeverőtelepek hálózatának kialakulásával fellépő kapacitásfelesleg és annak lekötése jelentősen megnövelte. Az útépítő vállalkozások törekednek a beton rendszerű (meleg eljárással készített, tömör) aszfalt előállító géppark minél jobb kihasználására, ezért a hagyományos (permetezéssel, félmeleg keverés, stb.) eljárások egyre jobban kiszorulnak a gyakorlatból. A tömör aszfaltok kétségtelen előnyeit az erdészeti utakon is ki lehet használni, azonban áruk rendkívül magas, valamint az erdészeti utakon fellépő igénybevételeknek leggyakrabban az aszfaltmakadám típusú pályaszerkezetek is megfelelnek. A tömör aszfaltok anyagának (a keverékeknek) az előállítása a környezetet terheli, a beépített pályaszerkezetben lévő bitumen azonban a környezetet nem károsítja, mert abból káros anyag már nem mosódik ki.

A hígított bitumen a félmeleg keverés és permetezés kötőanyaga, amelyből a hagyományosnak tekinthető, utántömörödő aszfaltmakadám pályaszerkezeteket lehet készíteni. A hígított bitumen kötése a hígítóanyag elpárolgásának függvényében alakul ki. Az elpárolgó hígítóanyag a környezetbe jut, amit ezáltal terhel. Ez a tény is hozzájárult ahhoz, hogy a hagyományos technológiák kezdenek kiszorulni az útépítésből.

A kationaktív bitumenemulzió a permetezéssel, vagy hideg keveréssel eljárások kötőanyaga. A környezetet nem szennyezi, mert törése közben utibitumenre és vízre válik szét. Felhasználható aszfaltmakadám pályaszerkezetek készítésére, de hidegen előállított tömör aszfaltok is készíthetők belőle. Az előző bitumenfajtákhoz viszonyítva a technológiára érzékenyebb kötőanyag. Az aszfaltmakadám pályaszerkezetek készítésekor a hígított bitumennél megszokott technológiát lehet alkalmazni, a kötőanyag jellegét figyelembe vevő változtatásokkal. A beton elven alapuló hideg aszfaltkeverékeket egyszerű keverőgépekben (pl.: folyamatos működésű keverő-teknőben, amelyben más pályaszerkezeti anyagok – mint a cementes talajstabilizáció anyaga – is keverhetők) lehet előállítani, majd a tömör aszfaltok beépítési technológiájával beépíteni. Az erdészeti útépítés területén a kationaktív bitumenemulzióval készített pályaszerkezeteket kedvezően lehetne használni.

A cement erdészeti utak pályaszerkezetének építésekor cementes talajstabilizáció készítéséhez használható. Ezzel lehetővé válik a helyi, vagy a közelben beszerezhető helyi szemcsés anyag felhasználása. Betonburkolatok építése az erdészeti útépítés gyakorlatában nem terjedt el. Ennek döntő oka, hogy a széles körben elterjedő technológiákat a közútépítés határozza meg és ezen a területen nem terjedtek el a merev pályaszerkezetek. Ennek következménye, hogy a betonútépítés hazai szellemi és műszaki háttere sem terjedt el széles körben, így az erdészeti útépítésben sem születtek meg azok az elméleti vizsgálatok, amelyek alapján ki lehetett volna dolgozni a speciális erdészeti viszonyokra megfelelő betonút építési előírásokat (pl.: burkolat-szélesség – burkolatvastagság – hézagkiosztás kapcsolata stb.). A beton pályaszerkezet jól megépítve tartós és alacsony fenntartási igényű, de a rosszul megépített betonút gyakorlatilag fenntarthatatlan. A merev pályaszerkezetek építését ezért a továbbiakban sem javasoljuk az erdészeti útépítéseknél.

A meszet kötött talajok javítására használhatjuk, meszes talajstabilizációként. Ez a réteg a pályaszerkezetben a védőréteg, vagy a legalsó alap szerepét töltheti be. A pályaszerkezet geometriai összvastagságának csökkentése érdekében a meszes talajstabilizációt a pályaszerkezet teherbírásába célszerű beszámítani, aminek feltétele, hogy az minimum 15 cm

egyenletes vastagú legyen, megfelelő mészadagolással. A pályaszerkezetben ez a réteg alsó alapként jelenik meg. Amennyiben a feltételek nem biztosíthatók, akkor a teherbírásba beszámítani nem célszerű, ilyenkor az a javított földmű szerepét tölti be.

### **2.2.3. Az anyagfelhasználás környezetvédelmi szempontjai**

A környezetvédelmi szempontból helyes anyaggazdálkodási elvek a következőképpen foglalhatók össze:

- élettartam növelés,
- célszerű, az igénybevételnek megfelelő anyagok beépítése,
- a felesleges anyagok elhagyása,
- helyettesítő anyagok felhasználása,
- újrahasznosított, vagy újra hasznosítható anyagok alkalmazása,
- pontos adagolás,
- technológiai váltás, amely előnyben részesíti a mechanikai megoldásokat.

Az első öt feltételt a pályaszerkezet tervezés folyamán kell figyelembe venni. A helyettesítő, illetve az újra hasznosított, vagy újra hasznosítható anyagok felhasználásának feltételeit az általános és a szűkebb értelemben vett természetvédelmi szemléletváltás fogja megteremteni, amikor ezeket az anyagokat nem hulladéknak, hanem másodlagosan felhasználható ipari nyersanyagoknak tekintik, amely egyben garantálja a környezetkímélő elhelyezésüket is. További feltétel az is, hogy a felhasználás technológiája széles körben elterjedjen, valamit kialakuljon az a környezetvédelmi szabályozás, ami az ilyen anyagok felhasználását gazdaságossá teszi. (Ez utóbbi feltétel akkor alakul ki, amikor a szennyezőanyag elhelyezésére kirótt környezetvédelmi bírság magasabb lesz, mint a beépítés feltételeinek megteremtése.) A pontos adagolást a pályaszerkezeti réteg anyagának tudatos megtervezésével alapozhatjuk meg, majd a gondos építéssel érhetjük el (Kosztka, 2006).

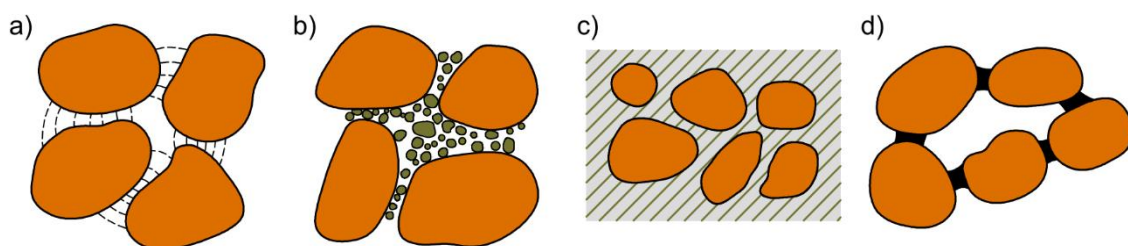
### 3. A talajstabilizációról általában

A földműveket építő emberek már mintegy 5000 évvel ezelőtt törekedtek a talajok tulajdonságainak megjavítására. Ennek érdekében tapasztalataikra támaszkodva felhasználták a meszet különböző mérnöki létesítmények építésénél. Az ókori útépítés egyik legékesebb kincse a Via Appia, az egykori Római Birodalom talán legfontosabb útja, amit Kr.e. 312-ben kezdtek el építeni, teljes hossza elérte az 563 km-t. Először Rómát kötötte össze az Albai hegygel. Róma első hadiúttjaként kezdték el építeni. A római útépítést az alapos kivitel jellemezte, évezredes fennmaradásukat a mély alapozásnak köszönhetik. Az alapozás legalább 1 méter mély, de a fagyhatárig biztosan leért. A terméskő alap 30 cm vastagságú lapos kövekből álló réteg volt. Erre jött az ökölnyi kövekből készült 25 cm vastagságú, fölé pedig a kisebb kavicsokból álló réteg. Valamennyi réteget mészhabarcba tették. A kötőanyagul használt mész után nevezték el a franciák a kövezett utat sosszé-nak (chaussée).

Kézdi (1979) szerint a talajstabilizáció területén elért első újkori tapasztalatok az USA-ban voltak, homok-mész keverékek formájában 1906 körül. A XX. században a 30-as évek táján a talajstabilizáció fontos tényezője lett az úttervezésnek Európában. A mérnökök gyakran szembesülnek az alépítmények tervezésének problémáival (különösen a terjedékeny és képlékeny agyagtalajoknál). Ezek a talajok nem rendelkeznek megfelelő szilárdsággal ahhoz, hogy a rájuk ható kerékterhelést kibírják akár a földmű, akár a pályaszerkezet élettartama alatt. Így ezeket a talajokat javítani kell, hogy szilárd útágyazatot kapjunk, illetve a pályaszerkezet építéséhez megfelelő réteget biztosítsuk.

Különösen napjainkban vált fontossá ez a kérdés, amikor építményeinket a fenntartható fejlődés szempontjából vesszük vizsgálat alá. Kiemelt fontosságú ez a közlekedési építményeknél, amelyeknél a rendelkezésre álló talaj tulajdonságainak megváltoztatásával csökkenthető az idegen anyag bevitelle a környezetbe, valamint csökkenthető a korlátozottan rendelkezésre álló kőművi építési anyag felhasználása is. A közlekedésépítésben elterjedten használt fogalom a talajok stabilizálása. Különbséget kellene azonban tenni a talajjavítás és a talaj szilárdítás fogalma között. Talajjavításkor a cél a talaj építési tulajdonságainak és tömöríthetőségének megváltoztatása. Talajszilárdításnál a talaj teherbírását és stabilitását kell megnövelni. A földmű építés területén a stabilizáció fogalmának használata terjedt el, amely eljárástól bizonyos teherbírás növekedést is elvárható. Ez a hatás azonban számottevő szórást mutathat.

Az útépítésben a talajok stabilizálására cementet, égetett meszet, mészhidrárt és péppé oltott meszet használnak. A kötőanyagot általában a szemeloszlás alapján javasolják kiválasztani. A mész használatának ajánlásakor az előbbi mellett a talaj plasztikus tulajdonságait is figyelembe veszik. Ez egyben egy utalás arra, hogy a kötött talajok esetében a szemeloszlás által befolyásolt tulajdonságokon kívül a kötött talajok felépítését és szerkezetét alaposabban figyelembe kellene venni. Célszerűbbnek látszana azonban először az építési feladatot és a stabilizáció célját meghatározni, majd ezután megvizsgálni, hogy melyik anyaggal és milyen mértékben tudjuk a talaj tulajdonságait és a talaj jellemzőit megváltoztatni. Ehhez figyelembe kell venni a rendelkezésre álló talajt annak tulajdonságaival együtt, valamint az építmény talajmechanikai követelményeit. Az optimális kötőanyagot és az építési technológiát nem előzetes elképzelések, építési szerződési kényszer vagy korábbi átmentett tapasztalatok alapján kellene kiválasztani, mint ahogy azt napjaink gyakorlata is teszi. Mint minden más építőanyagnál, először a stabilizálandó talaj tulajdonságait kell rögzíteni, amelyek közül a legfontosabb a talaj nyírószilárdsága, merevsége, zsugorodási és duzzadási hajlama, valamint állékonysága a környezeti hatásokkal szemben. A rendelkezésre álló talajt ezután talajmechanikai és ásványtani vizsgálatnak és értékelésnek kell alávetni. Ezután lehet a stabilizáció módját, anyagát és az összetételét meghatározni. Csak erre alapozva és ezek megértésével lehet egy gazdaságos tervezést és tartós eredményt elérni.



5. ábra. A talajszemcsék kapcsolata a különböző stabilizációkban. a) kohéziót a szemcsék közötti felületi erő biztosítja, b) a szemcsék hézagait inert anyag tölti ki, c) a talajszemcsék folytonos mátrixba vannak ágyazva, d) a szemcsék közötti kapcsolatot „ponthegesztés” biztosítja.

### 3.1. Kémiai talajstabilizáció

A kémiai stabilizáció kémiai adalékanyag (kötőanyag) összekeverését jelenti a természetes talajjal, amely kivonja a nedvességet, és a talaj (altalaj) szilárdsági tulajdonságait javítja. Általában a kezelés alatt a kötőanyag szerepe a részecskék közötti kötések megerősítése és (vagy) a pórustér kitöltése. Kémiai talajstabilizáció megvalósítása megfelelő százaléku cement, mész, pernye, bitumen vagy ezek kombinációjának talajhoz történő hozzáadásával történik.

### 3.2. Stabilizált talajok törési mechanizmusai

A stabilizációt létrehozó anyag és a talajszemcsék kölcsönhatásának természete szerint két alapesetet különböztetünk meg – aszerint, hogy a stabilizátor alkot-e folytonos mátrixot, vagy sem. Az első esetben a talajszemcsék az adagolt vegyi anyagba, vagy a lezajló kémiai folyamatok során létrejött anyagba be vannak teljesen ágyazva, a másodikban ez nem áll fenn. Az első esetben a létrejött rendszer tulajdonságait mindenképpen a stabilizáló anyag határozza meg. Ha ugyanis a talajszemcsék a megszilárdult stabilizáló anyagban inert töltőanyagként úsznak, akkor nyilvánvaló, hogy terhelés hatására a törés a stabilizátorban jön létre, hisz ez összefüggő vázszerkezetet alkot, a „töltőanyag” szemcséi nem is kapnak terhelést.

Abban az esetben, ha a stabilizáló anyag és a talajszemcse felülete között kötés jön létre és a kötés szilárdsága nagyobb, mint a stabilizátor saját szilárdsága, akkor a terhelés növelésekor nyilván maga a stabilizátor megy előbb tönkre. Ellenben, ha a kötés szilárdsága a kisebb, akkor előbb ez a kötés szűnik meg, így azután a talajszemcse inert töltőanyag, „filler” lesz és a rendszer szilárdsága szempontjából megint csak a stabilizáló anyag szilárdsága lesz a mértékadó. Nem folytonos mátrix esetén, háromféle módon jöhet létre stabilizáló hatás. Az első a talajszemcsék felszíni tulajdonságainak megváltoztatása, ionok adszorpciója, vagy kicserélése révén, vegyi anyagok segítségével. A másik hatás a szemcsék közötti hézagoknak közömbös, inert anyaggal való kitöltése révén jön létre. Ez a hatás hozza létre a mechanikai stabilizáció során a keverék szilárdságát; elképzelhető viszont, hogy a hézagok eltömése a talajban végbemenő kémiai reakcióval is létrehozható (Kézdi és Nagyváti, 1967).

A harmadik mechanizmus, mely nem folytonos mátrix esetén stabilizációt képes létrehozni, a szemcsék egyes pontokban való összekötése, mintegy, „ponthegesztés” révén. Egy ilyen rendszerben kétféle kohézió lép fel: a talajrészecskék és a stabilizátor saját kohéziója jelentkezik, működik továbbá a talajrészecske és a stabilizátor közötti adhézió. A törés kétféleképpen jöhet létre: ha az adhézió nagyobb, mint a kétféle kohézió, akkor törés a stabilizátorban, vagy a talajszemcsékben (vagy olyan szemcsehalmazokban, melyeken belül a kötőerőt nem a stabilizátor hatása hozza létre) lép fel; ha viszont a kohézió értéke felülmúlja az adhéziót, akkor a szemcse és a stabilizátor érintkezési felületén jön létre törés. A törési mód ismerete gyakorlati szempontból is lényeges, mert ha például a stabilizált talaj törése az adhézió elégtelensége miatt jön létre, akkor a kohézió növelése nem okoz szilárdságnövekedést. Az előző fejtegetésnek megfelelően a különböző szemcsekapcsolatok jellegét a 5. ábra mutatja be.

## **4. A meszes talajstabilizáció anyagai**

### **4.1. A talaj**

A talaj természeti képződmény, amely az ún. talajképző tényezők hatására (klíma, vegetáció, víz stb.) alakul ki a kiindulási anyagok mállása, átalakulása, átrendeződése, humifikálódása és szerkezetképződése következtében. A talaj folyamatosan megújuló természeti erőforrás, amelynek védelme, okszerű kezelése alapvető emberi érdek. A talaj nem egynemű közeg, hanem szilárd részecskék és a közöttük meghúzódnó levegős pórusok tarka keveréke. A pórusokban levegő vagy víz helyezkedik el. Ha a pórusok túlnyomó része levegővel telt, akkor csekély a víz mennyisége és fordítva (Szodfridt, 1993).

#### **4.1.1. A talajok talajmechanikai ismertetése**

A talaj háromfázisú diszperz rendszer, amely szilárd, folyékony és légnemű alkotókból áll. Ennek a többfázisú rendszernek a kezelhetőségét és talajfizikai tulajdonságait a szemeloszlással, a szemcsealakkal, a hézagviszonyokkal, a víztartalommal, a plasztikus tulajdonságokkal továbbá az ásványi összetétellel jellemezhetjük.

A kötött talajok stabilizálására általában a meszet használják. A talaj struktúrája és ásványi összetétele jelentősen meghatározza a stabilizáció kémiai és fizikai hatását. Jellemző és domináns ilyen szempontból az iszap- és az agyagfrakció. A szemeloszlás mellett ezeknél a talajoknál ezért fontos ismerni a plasztikus tulajdonságokat, a víztartó képességet, a duzzadási és zsugorodási tulajdonságokat, vagyis mindazokat a jellemzőket, amelyek a finom részek felépítéséből és az ott ható erőkből és hatásokból állnak.

A kötött talajok eltérő viselkedése és ezek speciális reakciói a kötőanyagokkal már csak az ásványtani ismeretek alapján magyarázhatók. A  $2\text{ }\mu\text{m}$  szemcseátmérő alatti részek már nem csak fajlagos felületük nagysága miatt, hanem felépítésük miatt is rendkívül bonyolult és változatos rendszert alkotnak. Az ebbe a tartományba tartozó agyaglevelecskék önmaguk is mintegy 80 szilikátrétegből épülnek fel. Ezek a rétegek oktaéderekből és tetraéderekből állnak. Ezek alapján kétrétegű, háromrétegű és vegyes rétegezetséggű ásványokat különíthetünk el. A két és háromrétegű ásványok kémiai fizikai tulajdonságai világosan eltérnek egymástól, amely ismét az őket jellemző talajmechanikai tulajdonságokban tükröződnek vissza. Az egyik viselkedését a rétegek és a részek között ható erők fogják meghatározni, mint amilyenek a Van der Waal erők, a hidrogénkötések vagy a dipol kölcsönhatások. A másik esetben inkább a speciális felületnagyságból származó hatások lesznek a mértékadók, amelyek erősen befolyásolják a talajnak a vízzel összefüggő és a mechanikai hatásokkal szembeni viselkedését.

Az 1. táblázat alapján összehasonlítható a klasszikus kétrétegű kaolinit és a háromrétegű montmorillonit jellemző talajmechanikai és struktúrájának jellemzői, valamint a kationcicserélési kapacitása (KAK). A jellemzők közötti jelentős eltérésekből következtethetünk a szemcseméretből és az ásványi felépítésből származó hatásokra, amelyek azután alapvetően meghatározzák a talajmechanikai tulajdonságokat is.

A pórusvíz kémiai összetételének változásakor – ami megtörténhet a kötőanyag bevitelkor – ioncicserélődés indulhat be a rétegek között elhelyezkedő kationok között, amely a víztartó képességet és a talaj plasztikus tulajdonságait befolyásolja. Az agyagásványok víztartó képessége mértékadóan befolyásolja a duzzadási és zsugorodási hajlamot valamint a plasztikus tulajdonságokat. További változásokat idézhet elő a talajfizikai jellemzőkben az időjárási és mechanikai hatásokra kialakuló ásványi átalakulások. Végül a telítetlen talajokban kialakul egy jól megfigyelhető húzófeszültség, amelynek nagysága a víztartalom függvényében széles skálán változhat és ezáltal döntően befolyásolja a talaj nyírószilárdságát és merevségét.

Jellemzők		Kaolinit	Montmorillonit
Folyási határ	w <sub>L</sub> %	70	190
Sodrési határ	w <sub>P</sub> %	30	50
Plasztikus index	I <sub>P</sub> %	40	140
Vízfelvétel	w <sub>b</sub> %	60	200
Belső sűrűdés	φ°	22	12
Kohézió	c' kN/m <sup>2</sup>	25	5
Rétegtávolság	Nm	0,7	1-2
Fajlagos felület	m <sup>2</sup> /g	25	600
KAK	mmol/100g	4	120

1. táblázat. Az ásványi felépítés hatása a talajmechanikai jellemzőkre

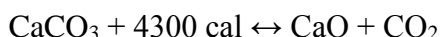
Áttekintve a talaj tulajdonságait befolyásoló tényezőket megállapíthatjuk, hogy a mész felhasználásának lehetőségét nem elegendő a szemeloszlás alapján eldönteni. Közelebb visz a probléma megoldásához, ha a talaj plasztikus tulajdonságai és tömörítési viszonyai alapján indokoljuk a mész felhasználásának lehetőségét. A legpontosabb értékelést a mész hatásáról az ásványtani és talajkémiai vizsgálatokkal lehetne megadni.

#### 4.1.2. A talaj és mész kölcsönhatása

A talaj és mész kölcsönhatás általánosságban ismert, azonban célszerű azt kissé mélyebben elemezni, mert vizsgálatainkat ezek ismeretében tervezzük meg, illetve a kapott eredményeket is ennek figyelembevételével lehet értékelni.

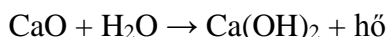
A meszes talajstabilizációnál a legfontosabb hatások a talajok víztelenítése, a kötött talajrészecskék kémiai összetapadása (aggregációja), az ionkicserélés és a puzzolános reakciók. Hosszú távú hatásként felléphet karbonátosodás is. A kívánt hatásokat égetett mész, méshidrárt és méshpép bekeverésével érhetjük el.

A „mészegetés”, mint ismeretes, a következő reverzibilis kémiai folyamat:



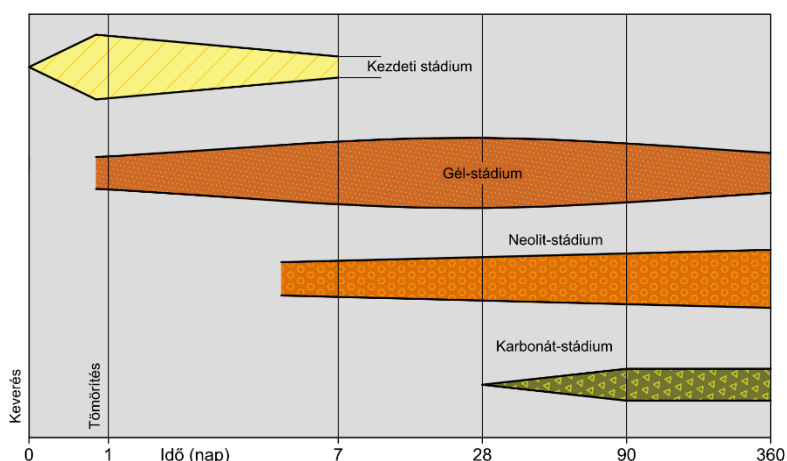
A kalcium-oxidot általában méshkő hevítésével állítják elő, ugyanis hő hatására a kalcium-karbonát (CaCO<sub>3</sub>) kalcium-oxidra (CaO) és szén-dioxidra (CO<sub>2</sub>) bomlik. A folyamat 825 °C fölött megy végbe. A folyamat tehát endoterm, elméletileg 1 Mol CaCO<sub>3</sub> felbontásához 4300 kalória hő szükséges. A CaO, a két vegyértékű kalcium oxidja az égetett mésh. A méshégetés az első, ember által felfedezett kémiai reakciók egyike, már az őskorban is ismerték ezt az eljárást.

Az őrlött égetett fehérmeszet akkor célszerű használni, amikor a talajt ki kell szárítani. A szárító hatás a mésh oltódása miatt következik be:



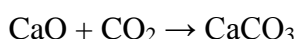
Egy kg mésh oltódásakor mintegy 300 g pórusvizet von el a talajból. Nagyon jelentős a reakcióhő kialakulása miatt bekövetkező párolgás és a mésh bekeverésével együtt járó átforgatás, szellőztetés. Gyakorlati szabályként elfogadhatjuk, hogy a talaj víztartalma az őrlött égetett mésh bekeverése után a felhasznált mésh arányának megfelelően csökken. Ez egy azonnal észlelhető hatás, aminek eredményeként a kezelt kötött talaj beépítésre alkalmassá válik.



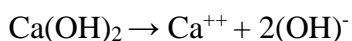


6. ábra. A mész hatásának szakaszai

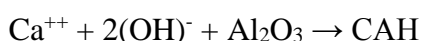
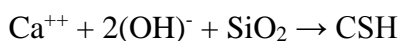
A kalcium-oxid a levegő szén-dioxidjával lassan reagál, és kalcium-karbonáttá alakul vissza, ezért levegőtől elzárva kell tartani:



A mész bekeverése után jelentkező azonnali hatást követi egy hosszú ideig tartó folyamat. Ezt a kalciumhidroxid, illetve a közvetlenül bevitt méshidrát disszociációja vezeti be:



A disszociált ionok növelik az elektrolit koncentrációt és a pórusvíz pH értékét. Ennek hatására oldódásnak indulnak az agyagrészecskékben lévő  $\text{SiO}_2$  és  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vegyületek, valamint az amorf felületek anyagai. A hatás ioncserélés, hidrogénhid képzés és puzzolános reakció.



Ezeknek a reakcióknak az eredménye a megkívánt talajmechanikai hatás, amelyet szemmel láthatóan is érzékelni lehet és talajfizikai vizsgálatokkal kimutathatók. A hosszú távú folyamat több évig is eltarthat és különböző szakaszokra osztható a jellemző változások szerint (6. ábra).

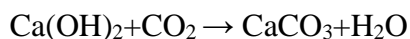
Az azonnali reakció a vízháztartás változásában jelentkezik, ami a szívóerők megnövekedésében és a morzsalékossá válásban jut kifejezésre. Ebben a **kezdeti stádiumban** indul meg az ioncserélés. A nátrium és egyes más kationok kalcium ionokkal cserélődnek ki. A szívóerők és a részecskék között megváltozott kapcsolatok miatt megindul egy struktúraváltozás: az agyagrészecskék nagyobb szemcsékké egyesülnek, tapadnak össze.

Talajmechanikai szempontból ez alatt az idő alatt nő meg a plasztikus határ, csökken a plasztikus index, és nő meg a konzisztencia index. Ezzel egy időben megváltozik a Proctor-görbe helyzete is, a legnagyobb száraz halomsűrűség lecsökken, az optimális tömörítési víztartalom megnő. A pH értéktől függő összetapadási folyamat a talaj finomrész tartalmától és a talajhoz adott mész mennyiségétől függ. A reakció 2-3% mésztartalom után kimerül.

Az azonnali reakciót követő ioncserélődés hatását a talaj ásványi összetétele befolyásolja, amelyben meghatározó az ioncserélődési kapacitás. Ekkor alakul ki a gél állapot. A **gél-stádium** szilárdsági szempontból a legfontosabb. A gél-anyag összeköti és összeragasztja az ásványi szemcséket.

A mész, a szilikátok és aluminátok között meginduló puzzolános reakciók a hidratáció után néhány nappal megindulnak és 1-5 évig is eltarthatnak (16 év után is mérhetőek voltak a

reakciók, egyes kutatók szerint a folyamat 30 évig is eltarthat). A gél anyagból lassan mikroszkóppal látható kristályok – ún. neolitok – kristályosodnak ki, és ezek alkotják a **neolit-stádiumot**. A szilikátok és aluminátok gélszerűen kitöltik a hézagokat, a puzzolános reakciók hatására a szemcsék cementálódnak vagy összeragadnak, növelve ezzel a talaj szilárdságát. Az eredmény függ a mészmennyiségtől és a talaj finom részének ásványi összetételétől. Amikor a talaj ásványi összetétele nem ismert, a hatást gyors vizsgálatok alapján kell megjósolni. A kis reakcióképességű agyagásványok esetében ezek a reakciók nem játszódnak le, ezért szilárdságnövekedést sem tapasztalunk. Ilyenkor a mész reakcióképességének növelésével érhetünk el eredményt. További hosszú távú reakció a **karbonátosodás**:



Építéstechnikai szempontból ezt a folyamatot inkább kedvezőtlennek ítéltethetjük meg, mert az egyesével képződő karbonát kristályok nem kapcsolódnak össze, ezért a kezelt réteg szilárdságcsökkenéséhez vezethet. Ezzel a hatással a burkolt, vagy levegőtől elzártan beépített stabilizációknál nem is számolhatunk, mert a reakció lefolyásához szükséges levegő nem áll rendelkezésre.

A hidraulikus kötések kialakulásában a víz közvetítőelemként vesz részt. A vízhiány csökkenti, vagy meggátolja a hidratáció folyamatát, a puzzolános reakciók kialakulását.

#### 4.2. A mész

A mészkő anyagának eredeti forrása a magmás kőzetek ásványaiból származó kalcium-ion ( $\text{Ca}^{2+}$ ) és a vulkáni működés során a légkörbe kerülő szén-dioxid ( $\text{CO}_2$ ). A mészkő jellemzően monomineralikus (egyásványos) kőzet, aminek legalább 90%-a  $\text{CaCO}_3$ , azaz kalcit vagy aragonit. A fennmaradó rész főleg más karbonátásvány, kvarc vagy kova, agyag és szerves anyag. Ahogy nő a mészkő dolomit-tartalma, a kőzet fokozatosan dolomittá alakul. A mészkő színe anyagi összetételétől függően nagyon változatos. A magas karbonát-tartalmú, tiszta mészkövek fehérek. A szürkés árnyalatot az agyag vagy a szerves anyag okozza. A viszonylag sok szervesanyagot tartalmazó, ún. bitumenes mészkövek jellegzetesen feketék. Az ugyancsak gyakori sárga, vörös, barna színű mészköveket a vas-ion ( $\text{Fe}^{3+}$ ) színezi ilyenre. A kalcium-karbonát (mészkő, calcium carbonate, calcii carbonas, szénsavas mész,  $\text{CaCO}_3$ ) kristályos, szervesetlen vegyület. A kalcium-oxid ( $\text{CaO}$ ), (más néven égetett mész) egy széles körben használt szervesetlen vegyület, melyet kalcium és oxigén alkot. Fehér színű, korrozív, lúgos kémhatású kristályos port alkot. A kereskedelemben kapható kalcium-oxid általában más vegyületeket (magnézium-oxidot, szilícium-oxidot, kis részben alumínium-oxidot és vas-oxidot) is tartalmazhat.

A kalcium-hidroxid (más néven oltott mész) egy szervesetlen vegyület, melynek képlete  $\text{Ca(OH)}_2$ . Szintelen kristályok, vagy fehér por formájában fordul elő. A kalcium-oxidból, víz hozzáadásával állítják elő. A folyamatot a mész oltásának is nevezik. Vízen oldva erősen bázikus kémhatású. Az oldaton szén-dioxidot átvezetve tejfehér oldat kapható, melyben a kalcium-hidroxid a szén-dioxiddal reagálva kalcium-karbonáttá alakul. A legtöbb talajjavításra használt mész magas kalcium-tartalmú mész, ami legfeljebb 5% magnézium-oxidot, vagy hidroxidot tartalmaz. A karsztos mész jól alkalmazható talajstabilizációhoz, bár a benne lévő magnézium-frakció sokkal lassabban lép reakcióba, mint a kalcium-frakció. A talaj ásványi tulajdonságai meghatározzák mésszel való reakcióképességüket és az alapvető szilárdságot, amit a stabilizált réteg fog jelenteni. Általában a finom-szemcsés agyagtalajok (legalább 25% átesik a #200-as szitán (74 µm)) és a plastikus index nagyobb, mint 10) megfelelőek a stabilizálásra. Ha a talaj jelentős mennyiségű szerves anyagot (több, mint 1%), vagy szulfátot (több, mint 0,3%) tartalmaz, a tervezés megkívánja a meszet és/vagy különleges tervezési eljárást (NLA, 2004).

#### **4.2.1. Égetett mész**

Az őrölt égetett mész nagy előnye, hogy oltódás során hő keletkezik (140 kalória hő/kp), tehát nemcsak vegyileg von el vizet a talajból (300 cm<sup>3</sup>/kg), hanem a hőhatással és a keveréssel együtt járó szellőzéssel is. Ez azt jelenti, hogy 3 súlyszázalék mész kb. 1% vizet köt le. Gazdaságos, mivel az égetett mész sokkal koncentráltabb formája a mésznek, mint a mészhidrát, 20-24%-al több elérhető mész oxid tartalommal. Így kb. 3% égetett mész egyenértékű 4% mészhidrátal, ha a körülmények elegendő nedvességgel lehetővé teszik a teljes hidratációját az égetett mésznek. Nagyobb térfogatsűrűség kisebb raktározási kapacitást igényel. A tervezési időszak kiterjedhet, mert a víz és az égetett mész által kiváltott hőtermelő reakció felmelegítheti a talajt. Az égetett mész kiváló elnedvesedett talajok kiszáritására. Ezek a jelenségek, párosulva a mész kolloidkémiai hatásával, alkalmassá teszik a meszet arra, hogy segítségével a sokszor járhatatlanságig felázott alépítményt járhatóvá tegyünk, építésre alkalmas állapotba hozzuk, illetve vízre érzéketlen teherbíró réteget építsünk.

Hátránya, hogy az égetett mészhez 32 tömegszázalék víz szükséges, hogy mészhidrátá alakuljon, és jelentős további elpárolgás jelentkezik a hidratáció következtében kialakuló hő hatására. Ügyelni kell az égetett mész használata közben, hogy biztosítsuk a megfelelő víz utánpótlást, lazítani, keverni kell. Ezek az óriási vízigények logisztikai és anyagi problémákat vethetnek fel, olyan területeken, ahol nincs a közelben vízforrás. Az égetett mész több keverést igényel, mint a mészhidrát vagy péppé oltott mész, mert a nagyobb részecskék először a vízzel reagálnak, oltódnak, majd alapos keverés következik a talajjal.

#### **4.2.2. Száraz mészhidrát**

Előnyös tulajdonsága, sokkal gyorsabban alkalmazható, mint a péppé oltott mész. A száraz mészhidrátot agyag kiszáritására használhatjuk, bár nem olyan hatékonyan, mint az égetett meszet, tehát olyan talajokon célszerű felhasználni, melyeknek természetes víztartalma nem tér el nagyon az optimálistól.

Hátránya, hogy a mészhidrát szemcsék finomak. Így tehát a por problémát jelent, ezt az alkalmazást nem vehetjük számításba népes területeken.

#### **4.2.3. Péppé oltott mész**

Előnyös tulajdonsága a pormentes alkalmazás, könnyebb megvalósítani bármilyen elosztatást. Szétterítési, öntési alkalmazások egyesítve vannak. Kevesebb víz hozzáadása szükséges a végső keveréshez. Hátrány: lassabb a felhasználás sebessége. Magasabb költségek az extra felszerelési igények miatt. Kevésbé hatékony elnedvesedett talajoknál. Nem használható kiszáritásra (NLA, 2004).

Bármelyik mészfajtát alkalmazzuk is, fontos hogy finomra őrölt legyen. Ha ugyanis nagyobb szemcsék vannak, akkor ezek esetleg csak a tömörítés után oltódnak, miközben a felszínen szétnyíló „rózsásodó” foltokat okoznak. Ha pedig mészhidrátot alkalmazunk, akkor a nagyobb darabba összeállt anyag Ca-tartalmát nem tudjuk hasznosítani. Ezen okok miatt a gyorsabban oltódó, illetve oldódó mészfajták előnyösebbek. Jelentős szilárdságnövekedés következik be, ha a mész mellett hidraulikus kötőanyagok is vannak jelen. Ilyenek eredetileg is előfordulnak a talajban, mint pl. az aktív kovásv, vagy trassz, illetve egyes agyagásványok, de adagolhatjuk is őket. Felhasználható a trassz, az őrölt garnulált kohósalak, a pernye stb. Fontos az őrlési finomság a hatásfokozó hidraulikus kötőanyagoknál, mert felületkémiai folyamatok játszódnak le, s ezért hatásukat csak finomszemcsés alakban fejthetik ki.

### **4.3. A víz**

A meszes talajstabilizáció készítéséhez ivóvíz minőségű vizet lehet felhasználni.

## 5. A mész és talaj kölcsönhatását bemutató eredmények

A meszet már régen alkalmazták útépitési célokra. A rómaiak híres útjainak építésénél is használták, így a Via Appia 5 rétegű pályaszerkezetéből három réteg mésszel keverve készült. Ez a módszer feledésbe merült és újabban csak 1920 után került sor először a mész útépitési alkalmazására, de tömegesen csak a második világháború után építettek mészstabilizációt.

2004-ben a mészstabilizáció témájával kapcsolatosan újra intenzív kutatás indult Kosztka Miklós vezetésével az Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Tanszéken. A meszes talajstabilizáció a korszerű talajmarók és kötőanyag adagolók megjelenésével ismét elérhetővé vált az erdőgazdaságok számára (Kosztka és mtsai., 2004).

### 5.1. A vizsgált talajok

A mész hatása nagyban függ a talajok agyagásvány tartalmától és minőségétől. Talajmechanikai szempontból ez befolyásolja a talajok kötöttségét is, ezért négyféle kötöttségű talajt vontak be a vizsgálatokba Kosztka és mtsai. 2004-ben:

- sovány agyagot Bucsuta község határából,  $I_p=18,1\%$
- közepes agyagot a Rigyáci erdészeti feltárási úttól,  $I_p=22,9\%$
- közepes agyagot a soproni téglagyár meddőjéből,  $I_p=26,4\%$
- kövér (kék) agyagot a soproni téglagyár anyaggyerő helyéről,  $I_p=38,5\%$

A Rigyáci út mellől vett talajmintát az indokolta, hogy ennek az útnak egy szakaszán az útalap meszes talajstabilizációból készült (lásd 6.3). A kezeletlen talajok talajmechanikai jellemzői:

#### 1. Bucsuta

Folyási határ	$w_L=43,7\%$
Sodrasi határ	$w_P=25,6\%$
Plasztikus index	$I_P=18,1\%$
Folyási index	$I_L=9,8\%$

#### 2. Rigyác

Folyási határ	$w_L=46,0\%$
Sodrasi határ	$w_P=22,1\%$
Plasztikus index	$I_P=22,9\%$
Folyási index	$I_L=19,3\%$

#### 3. Téglagyár meddő

Folyási határ	$w_L=50,9\%$
Sodrasi határ	$w_P=24,5\%$
Plasztikus index	$I_P=26,4\%$
Folyási index	$I_L=13,7\%$

#### 4. Téglagyár anyaggyerő, Kék agyag

Folyási határ	$w_L=61,7\%$
Sodrasi határ	$w_P=23,2\%$
Plasztikus index	$I_P=38,5\%$
Folyási index	$I_L=12,6\%$

## 5.2. Hőmérsékletváltozás a mész bekeverésekor

A nedves talajba kevert mész heves reakcióba lép a talaj víztartalmával. Ezt bizonyítja, hogy minden talajtípusnál a talaj hőmérséklete 40 °C fölé emelkedett, ami az eredeti hőmérsékletnél mintegy 20 °C-al magasabb. A hőmérsékletemelkedés a gyakorlat számára azért jelentős, mert ez hozzájárul az elnedvesedett kötött talajok kiszáritásához.

## 5.3. A szemeloszlás változása

A talaj mész keveréken elvégezték a szemeloszlási vizsgálatokat. A szemeloszlási görbéket elemezve Kosztka és mtsai. (2004) arra a megállapításra jutottak, hogy a mész hatására, mint ahogy várható volt a talaj finom szemcséi összetapadnak. A vizsgált talajok esetében ez azt jelenti, hogy

- Bucsutánál a 15 % I+A frakció aránya 0%-ra csökkent,
- Rigyácnál a 18% I+A frakció aránya 0%-ra csökkent,
- Téglagyár esetében a 19% A frakció 0%-ra csökkent, a 8% I frakció 18%-ra emelkedett,
- Kékagyagnál a 21% A frakció 4%-ra, a 17% I frakció 5%-ra csökkent.

Minden esetben nőtt a HL és H aránya. Szembetűnő, hogy a Kékagyag jelű mintában a közepes és finom homok frakció aránya jelentősen megnő (2. táblázat).

Minta	Bucsuta		Rigyác		Téglagyár		Kékagyag	
	0	Kezelt	0	Kezelt	0	Kezelt	0	Kezelt
Frakció	%							
Kavics	25	16	6	12	10	4	0	0
Homok	52	68	55	60	47	43	42	77
Homokliszt	8	16	21	28	16	35	20	14
Iszap	3	0	5	0	8	18	17	5
Agyag	12	0	13	0	19	0	21	4
Összesen	100	100	100	100	100	100	100	100

2. táblázat. A szemeloszlás változása mész hatására

## 5.4. A plasztikus tulajdonságok változása

A talaj plasztikus tulajdonságai jelentősen megváltoztak. Ahogy az a korábbi megfigyelések szerint várható volt, ezek a tulajdonságok a kisebb kötöttség felé tolódtak el. A változások azonban nem a megszokott módon alakultak ki (3. táblázat):

- A kisebb kötöttségű talajok (Bucsuta, Rigyác) esetében a mésszel kezelt talajok folyási és sodrási határát nem lehetett megállapítani. A vizsgálatok közben ezek a talajok homok, homokliszt talajokra jellemző viselkedést tanúsítottak. A Casagrande-csészében összezsúsztak, sodorni azokat nem lehetett.
- A kötöttség növekedésével (Téglagyár) a folyási határt már meg lehetett állapítani, de a sodrási határt továbbra sem.
- A legkötöttebb talajon a folyási és a sodrási határt meg lehetett állapítani. A folyási határ csökkent, a sodrási határ nőtt, egyszersmind a plasztikusindex csökkent – a kövér agyagból közepes agyag jellegű talaj alakult ki.

Minta	Bucsuta		Rigyác		Téglagyár		Kékagyag	
	0	Kezelt	0	Kezelt	0	Kezelt	0	Kezelt
Konzisztencia	%							
Folyási határ	43,7	-	46,0	-	50,9	43,5	61,7	54,3
Sodrási határ	25,6	-	22,1	-	24,5	-	23,2	31,0
Plasztikus index	18,1	-	22,9	-	26,4	-	38,5	23,2
Folyási index	9,8	-	19,3	-	13,7	18,1	12,6	14,1

3. táblázat. A plasztikus tulajdonságok változása

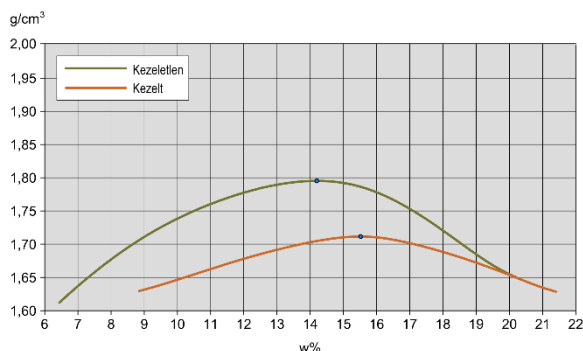
## 5.5. A tömörítési jellemzők változása

A mész hatására a talajok tömörítési tulajdonságai és ezzel együtt tömöríthetőségük is előnyösen megváltozik. A mésszel kezelt talaj (7. ábra és 8. ábra):

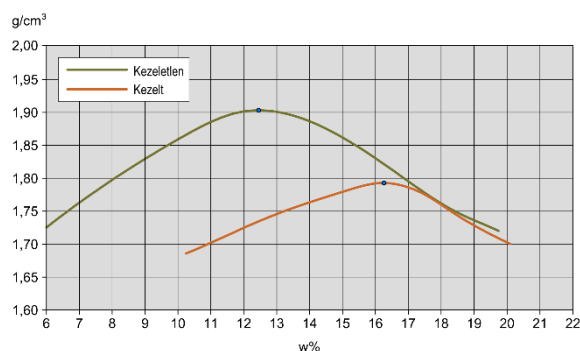
- legnagyobb száraz halomsűrűsége lecsökken,
- az optimális tömörítési víztartalma megnő,
- a tömörítési görbe pedig ellaposodik.

Ennek jelentősége az, hogy a tömörítés magasabb víztartalomnál is jól elvégezhető és a talaj kevésbé érzékeny a tömörítési víztartalom változására.

A talajok tömöríthetőségére jellemzőit a 4. táblázat foglalja össze (Kosztka és mtsai., 2004).



7. ábra. „Bucsuta” Proctor-görbék



8. ábra. „Rigyác” Proctor-görbék

Minta	Kezeletlen		Kezelt		Kezeletlen			Kezelt		
	$\rho_{dmax}$	$W_{opt}$	$\rho_{dmax}$	$W_{opt}$	le	fel	össz.	le	fel	össz.
	g/cm <sup>3</sup>	%	g/cm <sup>3</sup>	%	$\Delta w\%$					
Bucsuta	1,76	14,1	1,72	15,6	- 8	+ 8	16	-10	+12	22
Rigyác	1,91	12,5	1,79	16,2	- 6	+ 7	13	-10	+9	19
Téglagyár	1,79	16,4	1,71	18,1	- 3	+10	13	- 6	+12	18
Kékagyag	1,76	17,7	1,70	18,5	- 8	+ 9	17	-10	+12	22

4. táblázat. A tömörítési jellemzők változása

## 5.6. Vízállóság

A mésszel kezelt próbatestek vízállósága jelentősen megnőtt. A talaj kötöttségének növekedésével együtt a vízállóság is növekszik. A hazai kutatáshoz hasonlóan mérték a stabilizációk kapillaris vízfelszívását és tartósságát az USA-ban is (9. ábra). A laboratóriumi vizsgálatok szerint a mésszel kezelt talajok vízfelvétele a kezeletlen talajokéhoz képest elenyésző, annak hatására csak hosszú idő elteltével vagy egyáltalán nem megy tönkre.



9. ábra. Kapillaris vízfelszívás és tartóssági teszt az USA-ban



## 6. Korábbi építési tapasztalatok az erdészeti utakon

Az erdészeti útépitések virágkorát az 1960-1970-es évekre tehetjük. Ebben az időszakban azoknál az erdőgazdaságoknál, amelyek kőben szegény vidéken gazdálkodtak, keresték a hiányzó kőanyag kiváltásának lehetőségét. Kézenfekvő elképzelés volt az, hogy a helyi talajokat kíséreljék meg bevonni a pályaszerkezet építésébe. Erre az időszakra esnek más üti ágazatok hasonló törekvései is. Ennek a folyamatnak az eredménye, hogy az erdészeti útépitések körében a kővel nem rendelkező erdőgazdaságoknál megindult a talajstabilizációk építése. Ebben élen jártak a Somogyi, a Zalai és a Szombathelyi erdőgazdaságok (Kosztka, 2006). A stabilizációk között fontos szerep jutott a mésztalajstabilizációnak, amely a költségek csökkentése mellett lehetővé tette a kötött talajok útépitési anyagként való felhasználását is (5. táblázat).

### 6.1. Építési tapasztalatok

Az építési tapasztalatokat idős kollégákkal folytatott személyes megbeszélések alapján lehet felvázolni. Az adott korban hazánkban nem rendelkezünk stabilizációs géplánccal, amellyel egy menetben lehetett volna megépíteni egy-egy útszakaszt. Az elterjedt technológia a talajlazító vezérgépre alapozott szakaszos építési folyamat volt.

A meszet ömlesztett formában vasúti kocsikban szállították a leadóállomásra, ahol azt tehergépkocsikra rakták át, majd tehergépkocsival szállítottak egy fedett tároló helyre. A közbelső tárolásra egyrészt az volt szükség, mert az anyagellátást és az építés ütemét nem lehetett összehangolni, továbbá megfelelő silók és kötőanyag elosztó berendezések sem álltak rendelkezésre. A tároló helyen a meszet zsákokba töltötték (10. ábra) és így szállították az építés helyére.

A helyi talaj fellazítására mezőgazdasági tárcsát, rotációs kapát illetve talajmarót használtak. Azok az erdőgazdaságok, amelyek rendelkeztek Mercedes-UNIMOG tehergépkocsival, annak talajmarójával lazították fel a stabilizálandó talajréteget. Az egy menetben építhető rétegvastagságot a talaj lazítására használt eszköz teljesítménye és a talaj kötöttsége együttesen meghatározta. Az épített rétegvastagságokból látható, hogy egy menetben általában 15-18 cm vastag réteget lehetett fellazítani. Vastagabb réteget két lépésben építettek meg (pl.: 2×12 cm). A fellazított szakasz hosszát úgy állapították meg, hogy egy műszak alatt a teljes technológiát meg lehessen valósítani, a stabilizált réteg tömör legyen, felületéről a víz akadálytalanul lefolyhasson.

A mésztalaj adagolásának mennyiségét laboratóriumi vizsgálattal állapították meg az Erdészeti és Faipari Egyetem Erdészeti Szállítástani Tanszékén. A mésztalaj adagolását ennek figyelembevételével kézzel végezték. A közel azonos súlyú mesztalaj tartalmazó zsákokat az adagolásnak megfelelő távolságra helyezték el a padkán, majd lapáttal, gereblyével és más szerszámokkal a fellazított felületen elterítették (11. ábra).

A mésztalajba keverését a lazításra használt gépekkel végezték. Az egyenletes, teljes keverést a gépek többszöri járatásával valósították meg (12. ábra). Általános tapasztalat az, hogy a mésztalaj hatására a keverés egyre könnyebbé vált. A nedvesítéshez lajtos kocsit használtak (13. ábra). A kedvező víztartalmat a helyszínen, tapasztalatok alapján állították be. A nedves keverést is a rendelkezésre álló gépek végezték el. A talajkeveréket vontatott gumi vagy sima hengerrel tömörítették.

A bemutatott építési eljárás legkényesebb mozzanatait a mésszel való közvetlen érintkezés jelentette. A teljes építési folyamat alatt 4-5 alkalommal kellett az őrölt égetett mészpórral dolgozni, közvetlen kapcsolatba kerülni.

Út		Építés éve	Szektor km	Hossz km	Mész stab. cm	Alap	Burkolat	Zárás
száma	neve							
Somogy								
004	Bári mjr.-Kéri út	1965	0,9-5,7	4,8	15		lt-7	Fel. bev.
010	Cserénfa-Tótfalu	1966	0,0-3,6	3,6	18	7 cm Z	lt-5	Fel. bev.
012	Lipótfá-Bőszénfa	1964	11,2- 25,1	13,9	2x12	10 cm Z		Fel. bev.
013	Simonfa-Kardosfa	1972	3,3-10,3	7,0	2x12		lt-7	Fel. bev. Aszf. szőny
019	Csurgónagymarton -Ágneslak-Erzsébet	1964 1971	0,0-4,1 8,6-9,1	4,1 0,5	12 2x12		lt-10 lt-7	Aszf. szőny Fel. bev.
020	Pogányszentpéter- Szentpál	1968	0,5-3,6	3,1	2x12	10 cm Z	lt-7	Fel. bev.
Meszes talajstabilizáció összesen				37,0				
Zala								
007	Istvándi	1959	0,0-1,7	1,7	18	25 cm Z	lt-5	Fel. bev.
008	Szurkosárok	1959	1,0-1,7	0,7	18	10 cm Z	lt-5	Fel. bev.
009	Kislakosi	1965	0,0-1,9	1,9	18	10 cm Z	lt-5	Fel. bev.
015	Rigyác	1969	0,0-2,4	2,4	12	5 cm Z	lt-5	Fel. bev
022	Pölöskei	1969	0,0-1,5	1,5	15		lt-7	Aszf. szőny
026	Irsa Nyugati	1967	0,0-1,8 1,8-3,1	1,8 1,3	15 15	16 cm Z 16 cm Z	lt-5+lt-7 lt-5	Fel. bev. Fel. bev.
036	Zajk-Nagyvölgy	1982	0,-1,5	1,5	20	10 cm kavics		Aszf. szőny
Meszes talajstabilizáció összesen				12,8				
Szombathely								
	Szalafő	1968		?		Kavics		
	Tilalmasi	1969		3,0				
Meszes talajstabilizáció összesen								

5. táblázat. Meszes talajstabilizációk az erdészeti utakon

Ebben az időben a munkavédelmi és balesetelhárítási rendszabályok és lehetőségek egyaránt alacsony színvonalon álltak, védőruha nem állt rendelkezésre (12. ábra). Ez az építőmunkásokat rendkívül igénybe vette, ezért idegenkedtek ettől a kötőanyagtól. Ennek eredménye az lett, hogy a meszes talajstabilizáció építéséről az adott körülmények között lassan le kellett mondani.

A bemutatott építési technológiával jellemzően 10 cm vastagságban épültek a kísérleti útszakaszok, a stabilizált rétegre 12 cm zúzottkő pályaszerkezetet helyeztek, melyet bitumenes zárással láttak el (Szilágyi, 2014). A kísérleti szakaszok sikeresnek bizonyultak, és értékes információkkal szolgált az építési technológiára vonatkozóan. E tudás birtokában az említett három erdőgazdaság 1960 és 1980 között mintegy 60 km mészstabilizált utat épített. Az utak közös jellemzője, hogy a stabilizált helyi talajra jellemzően aszfaltmakadám pályaszerkezet került, amit felületi bevonással zártak le (Kosztka, 2006).



10. ábra. Zsákokba adagolt mészpor



11. ábra. Az UNIMOG forgókapájával keveri a meszes stabilizációs alapot



12. ábra. A mészpor kitergetése



13. ábra. Vizeslajt munkában

## 6.2. A Szalafői út építésének tapasztalatai

A Szombathelyi Erdőgazdaság Szalafői útjának építésekor egy hosszabb útszakaszt vettek munkába. A talajt fellazították, meszet keverték hozzá és ekkor egy nagyobb zápor eláztatta a laza meszes talajkeveréket. Az elázott réteg habarcsszerű állapotba került, amin hetekig nem lehetett járni. Az idő előrehaladásával azonban a stabilizáció anyaga megszilárdult. Ezt a réteget profilba hozták, betömörítették és végül egy jó útalapot alakítottak ki. Erre az útalapra egy kavics burkolat került, ami jelenleg is jól ellenáll a forgalom és időjárás hatásának.

Az esettel kapcsolatban felmerül a kérdés:

- Milyen víztartalom mellett építsük meg a meszes talajstabilizációt?
- Milyen legyen az utókezelés?
- Mi a pihentetés hatása és az milyen körülmények között fejti ki hatását?

## 6.3. Pályaszerkezet feltárás

Pályaszerkezet feltárásra csak a Rigyáci úton kaptunk engedélyt, a helyreállítási bizonytalanságokra hivatkozva. Ezen az úton 3 db feltárást végeztünk. Az útleltárban leírt és a helyszíni feltárásban talált pályaszerkezetek között eltéréseket tapasztaltunk. Egy feltárás hozott értékelhető eredményt, ebben a meszes talajstabilizációs alapréteg elkülöníthető volt.

Konzisztencia határ	Földmű	Meszes stabilizáció
Folyási határ	35,0	28,2
Sodrási határ	19,4	19,3
Plasztikus index	15,6	8,9
Folyási index	9,7	5,9

6. táblázat. A földmű és a meszes talajstabilizáció talajfizikai jellemzői

A feltárt pályaszerkezet rétegsora:

1. aszfaltszőnyeg változó vastagságban,
2. It-5 típusú aszfaltmakadám,
3. homokos kavics 10 cm,
4. meszes talajstabilizáció 10 cm,
5. földmű felső rétege.

A földmű talaját és a stabilizációs réteget a rétegvastagságok és a szemmel látható különbségek alapján különítettük el. Pontos réteghatár megállapítására nem volt módunk, de a meszes stabilizációnak feltételezett réteg anyagára csepegtetett sósav pezsgésének intenzitásából lehetett következtetni a rétegek eltérő tulajdonságára. A földmű és a meszes talajstabilizáció talajfizikai jellemzőit az 6. táblázat foglaljuk össze.

A táblázat alapján megállapítható, hogy a mésszel stabilizált réteg az építés után mintegy 35 évvel még kimutatható. Messzemenő következtetéseket ebből az eredményből még nem lehet levonni. Keresni kell egy kevesebb rétegsorból álló útszakaszt, amelyet egy nagyobb területre kiterjedő, aprólékos feltárás alapján lehet megismerni.

#### 6.4. Összefoglalás

Az erdészeti útépités „aranykora” az erdőfeltárás kezdetétől a rendszerváltásig terjedő időszakot öleli át. Az ezt követő átmenti időszakban – ami 1990-1994 közé tehető – a megerősödő természetvédelmi mozgalmak nagy támadást intéztek az erdészeti útépitések ellen. Ennek hatására a következő években megszűnt az erdészeti útépitések állami támogatása, megszűntek az erdészeti útépitések, ennek következményeként az erdészeti útépitő vállalatok sem kaptak munkát saját erdőgazdaságuktól, az erdőgazdaságon kívüli munkáknál nem tudták a versenyben maradni, végül tönkrementek. Az erdőgazdaságok a veszteséges egységeket felszámolták. Mintegy négy év alatt leépült az a szellemi, technológiai és műszaki bázis, amit az aranykorban elődeink felépítettek. Később az állami támogatásokat ugyan újra folyósítani kezdték különféle pályázatokon keresztül, de ekkor már nyilvánvaló volt, hogy nincsen erdészeti útépitő vállalkozás és az ágazaton belül a meszes talajstabilizáció eredményei is a feledésbe merültek (Kosztka, 1993, 1996). Szerencsére nem végleg...

## 7. Valós léptékű útkísérletek

Annak eldöntésére, hogy az adott talajhoz milyen fajta és milyen mennyiségű mész adagolása szükséges, laboratóriumi vizsgálatokat kell végezni. Ezek a vizsgálatok alkalmasak többféle talajtípus és mészfajta 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 (Metcalf, 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 kísérlethez 470 féle pályaszerkezetet épült meg gyenge altalajon. A pályaszerkezetek homokos kavics, zúzottkő és aszfalt rétegeket tartalmaztak. A kísérleti útszakaszt műforgalommal terheltek két éven át. Eközben a pályaszerkezetek állapotát rendszeresen értékelték. Az értékelés szemrevételezéssel, hullámosság és behajlás mérésekkel történt. 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; Metcalf, 1996).

Szintén az Egyesült Államokban épült meg az „mnROAD” nevű kísérleti útszakasz. Itt 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 figyelembe vétele is. Az alacsonyrendű szakaszokat műforgalommal terheltek. A pályaszerkezetek állapot paramétereit a beléjük épített szenzorok segítségével valamint dinamikus teherbírás mérő eszközzel mérték (Tompkins & Khazanovich, 2007). Az alacsonyrendű szakaszon végzett vizsgálatok alapján megállapították, hogy kötött talajokban 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. Emellett lehetőség van különböző altalajok vizsgálatára is 3 m mély kibetonozott árkokban. Az úton végzett kísérletekből főleg a fagyás-olvadás, valamint a gumiabroncs szélesség hatására találtak összefüggéseket (LeBel et al. 2000).

Behak 2011-ben végzett vizsgálatokat a mészstabilizáció hatásának megismerésére. Két teszt szakaszt hoztak létre, amelyeken az altalajt 3%, illetve 5% mésszel stabilizálták. Ismert nagyságú, de valós forgalom áthaladása előtt és után is behajlás méréseket végeztek, valamint szemrevételezéssel értékelték a burkolat állapotát. A központi behajlás értékek az építést követő 2,44 mm-ről 4 hónap elteltével 0,77 mm-re változtak (Behak, 2011).

### 7.1. A Makk-pusztai és Bassdorfi útkísérletek

Az 1970-es években a mezőgazdasági és erdészeti utak pályaszerkezet tervezésének pontosítása érdekében három kísérleti út épült. Két kísérleti út épült fagyveszélyes kötött talajon a Német Demokratikus Köztársaságban, egy pedig Magyarországon, fagyveszélytelen talajon Makk-pusztán. Itt futóhomok altalajra 72 féle pályaszerkezet épült meg (14. ábra).



14. ábra. A Makk-pusztai kísérleti útszakaszok

A vizsgálatban aszfalt és beton burkolatokból, mechanikai, cement és kohósalak stabilizációkból, valamint zúzottkő rétegekből álltak össze a pályaszerkezetek. Ezeket összesen 11 500 egységtengely áthaladással terheltek. A kiindulási állapot értékelése után 5 terhelési periódus hatását vizsgálták mérésekkel.

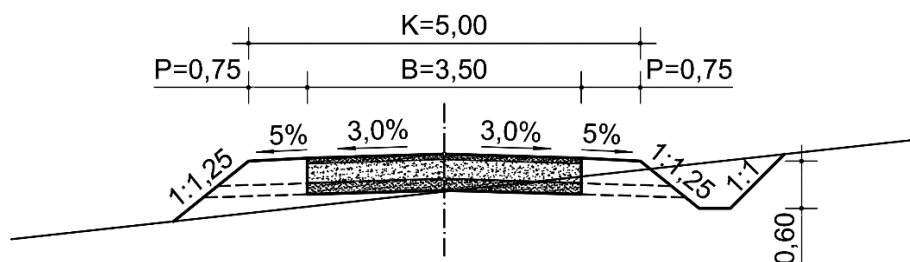
Meteorológiai adatok (hőmérséklet napi min. és max., csapadék, talajhőmérséklet), teherbírási jellemzők (központi behajlás, behajlási teknő) és járhatóság értékek (hosszirányú hullámosság, keresztaszvélvénny alakváltozás, repedés, ütőkátyú és egyéb felületi hibák) meghatározása történt meg. Ezek alapján megállapítást nyert, hogy a 11 500 et áthaladás csak az építési hibás szakaszokon okozott tönkremenetelt. A többi szakasz esetében a szubjektív értékelők érzékelték először a hibákat, a behajlásmérések csak az utolsó terhelési periódus után kezdtek el a teherbírás egyértelmű csökkenését mutatni. Kiderült, hogy az AASHO méretezési eljárás alkalmazható kis forgalmú utak esetén is, bár kismértékű túlméretezést eredményez. Bizonyítást nyert az a felvetés is, hogy mező- és erdőgazdasági utak esetén jól alkalmazhatók a különböző stabilizációs eljárások is (Kosztka, 1989).

Az NDK-ban épült kísérleti utak egyike alacsony talajvízállású (Bassdorf mellett), a másik magas talajvízállású (Kossdorf mellett) területen épült. A Bassdorf mellet épült kísérleti úton teljes hosszban (1 500 m) a legalsó alapréteg meszes talajstabilizáció volt. Erre épült meg 27 variációban a felső alapréteg, amelyet bitumenes homokréteggel zártak le. A kooperációs program megszakadása miatt a teljes kiértékelés anyaga nem áll rendelkezésünkre. Ismert azonban az, hogy a kísérleti úton 1971 tavaszán 20 000 db-ot meghaladó teheráthaladást teljesítettek. A veszélyes tavaszi időszakban terhelt úton sem a forgalomból sem a fagy-olvadási periódusból az alap hibájára visszavezethető károsodást nem lehetett tapasztalni.

## 7.2. A Bánokszentgyörgyi útkísérlet

A kötött talajon épülő erdészeti utak pályaszerkezetét a homokos kavics legalsó alap helyett célszerű mésszel stabilizált földműre építeni. Ez a megoldás csökkenti a helyszínrre szállított anyag mennyiségét és egyben mérsékli a kötött talaj utépítés szempontjából kedvezőtlen tulajdonságait. Az utépítés költségei tovább csökkenthetők, ha a mésszstabilizációs réteg a pályaszerkezet teherbírásába beszámítható, mert így a beépítendő zúzottkő réteg vastagsága is csökkenthető.

A jelenlegi építési előírások a mésszel kezelt talajt csak legfeljebb javítórétegnek 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.



15. ábra. Keresztmetszeti kialakítás

A kísérleti útszakaszok az Erdő és Fahasznosítási Regionális Egyetemi Tudásközpont (ERFARET) keretén belül a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet (GEVI) és a Zalaerdő Zrt. közreműködésével épültek meg.

### 7.2.1. A kísérleti útszakasz helyszínének bemutatása

A kísérleti út megépítésével és az elvégzett mérésekkel az volt a fő cél, hogy megbecsüljék a mészstabilizációs rétegek teherbírás növelő hatásának mértékét, valamint azt, hogy a hagyományos szerkezetekhez képest mennyivel nagyobb teherbírást biztosítanak a zúzottkőrétegek számára a homokos kavicsréteggel szemben. A kísérleti útszakasz a Zalaerdő Zrt. Bánokszentgyörgyi Erdészeti Igazgatóságának területén, Oltárc község határában a Győrerdői II. o. erdészeti út mellékvonalának 580 m hosszú földművén épült meg. A földmű talaja az útépitéshez készült talajmechanikai szakvélemény alapján közepes agyag, amelynek jellemzői: folyási határ  $w_L = 44,6\%$ , plastikus határ  $w_p = 22,4\%$ , plastikus index  $I_p = 22,2\%$ , folyási index  $I_L = 18,4\%$ , konzisztencia index  $I_c = 1,2$ , maximális száraz halomsűrűség  $\rho_{dmax} = 1,82 \text{ g/cm}^3$  és az optimális tömörítési víztartalom  $w_{opt} = 15\%$ .

Az útépités feltételeit a klíma jellemzői közül főként a csapadékviszonyok és a téli hőmérsékleti viszonyok befolyásolják. A csapadékviszonyokat a Bánokszentgyörgyi meteorológiai adatgyűjtő állomás adatainak feldolgozásával elemezték. Eszerint a csapadékos napok száma 94 nap, amelynek jelentősebb része az útépités szempontjából általában kedvező április-november hónapok közé esik. Ez az erdészeti útépités szempontjából azt jelenti, hogy a földmű építésre rendelkezésre álló kedvező napok száma alacsony. Különösen azért kedvezőtlen a helyzet, mert a lehulló csapadék mennyisége is jelentős ( $694 \text{ mm/év}$ ), ami a kötött talajú földmű kiszáradását nehezíti. Az egyszer elázott földmű ezért teherbírását tartósan elveszti, az hosszú ideig nem támasztja alá a pályaszerkezetet. A hőmérsékleti viszonyok közül az útépités 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 egymást gyakran követik. Ez a fagyveszélyes és fagyérzékeny, illetve az olvadási kárra érzékeny talajokon a télvégi burkolatkárok kialakulását segíti elő. A pályaszerkezetet ezeken a talajokon védőrétegre, vagy legalsó alapra kell megépíteni.

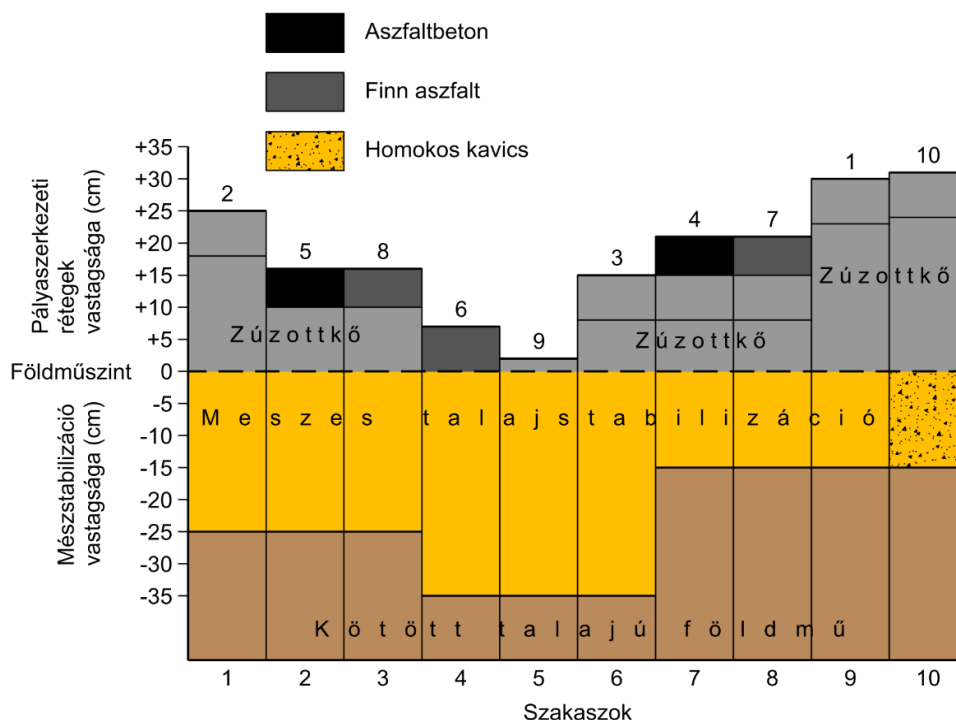
### 7.2.2. A kísérleti útszakasz keresztmetszeti kialakítása

A kísérleti út a II. osztályú erdészeti út paramétereinek megfelelő szélességi méretekkel épült (15. ábra). A keresztmetszet jellemző adatai az alábbiak: burkolatszélesség (B) 3,50 m, padkaszélesség (P) 0,75 m, koronaszélesség (K) 5,00 m, burkolat dőlése 3,0%, padkadőlés 5%, töltési és árokrézsú 1:1,25, bevágási rézsú 1:1.

### 7.2.3. A kísérleti útszakasz pályaszerkezet variációi

A pályaszerkezet variációk felépítésének tervezésénél abból indultak ki, hogy minden rétegsor azonos teherbírású legyen.





16. ábra. A megépült kísérleti útpályaszerkezet szakaszok

A pályaszerkezet-variációk építési sorrendjének meghatározásakor arra törekedtek, hogy az azonos vastagságú mézstabilizációval készülő rétegek egymás mellé kerüljenek. A mézstabilizáció teherviselő képességének jobb megismeréséhez egy külön szakaszt terveztek, amelyen a mézstabilizáción kívül csak a felület érdesítését szolgáló zúzalékterítést alkalmaztunk. A fenti tervezési elvek alapján a kísérleti útszakasz első 360 m-én 15-25-35 cm-es helyi talajt felhasználó mézstabilizációs rétegre 9 darab egyenként 40 m hosszú, aszfalt és makadám burkolatú különböző vastagságú pályaszerkezet épült. Ezek közül az 5. szakaszon csak 35 cm vastagságú mézstabilizációt és a felület érdesítését szolgáló 2 cm-es zúzalékterítést alkalmaztunk. A hagyományos, mézstabilizáció nélküli pályaszerkezettel való összehasonlítást a 10-es 220 m-es kontrol szakasz tette lehetővé. A meszes talajstabilizációs alapra háromféle burkolati réteget terveztek: folyamatos szemeloszlású murva réteg, meleg bitumenes útalap réteg és finn aszfalt. A meleg bitumenes útalap helyett beszerzési nehézségei miatt K-20 (új nevén AC 22) kötőréteg épült. A megépült pályaszerkezeteket a 16. ábra mutatja be hossz-szelvény szerűen. A kísérletek sorrendjét célszerű véletlenszerűsíteni, ezért a 10 féle pályaszerkezet variációt nem a generálásuk sorrendjében építették meg. A 16. ábra a pályaszerkezet variációk sorszámát felül, míg az építési sorrendjüket (szakaszsorszámukat) alul tüntették fel.

#### 7.2.4. A kísérleti útszakasz meszes stabilizációjának építése

A kísérleti út mézstabilizációs rétegét egy menetes géplánc építette meg. Az alkalmazott gépek: STREU Master SW 16 kötőanyag adagoló és WIRTIGEN WR 2000 talajmaró. A munkafolyamat (17. 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 (gépkészítő végzi).
4. A kötőanyag adagoló ellenőrzése (C fázis).
5. A kötőanyag kiszórása a felületre (D fázis).
6. A keverés a talajmaróval (E fázis).
7. A tömörítés vibrációs hengerrel (F fázis).





**A fázis**



**B fázis**



**C fázis**



**D fázis**



**E fázis**



**F fázis**

17. ábra. Az építési technológia egyes fázisai



18. ábra. Földmű a mészstabilizáció előtt (bal) és után (jobb)

A földmű anyagának és a felhasználni kívánt őrölt égetett mészpor ismert tulajdonságai alapján a mészadagolást 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 tervezettnak megfelelő. A talajmaró szintén két menetben végezte a keverést, két keverés között átfedéssel. Keverés közben a fellazítás mélységét központi vezérléssel a gép automatikusan végezte. A kísérleti út három különböző vastagságú meszes talajstabilizációját 3,50 m szélességben a gépsor három óra alatt készítette el. Összességében elmondható, hogy az imént ismertet eljárással a mészstabilizáció kiváló minőségben épült meg. Az így kialakított javított földműre (mészstabilizációra) épültek meg a tervezett pályaszerkezet variációk (18. ábra).

#### 7.2.5. A kísérleti útszakaszok teherbírása

Mind a 10 kísérleti szakaszon mértek statikus  $E_2$  értékeket. A méréseket minden szakasz közepén a tengelyben, valamint tőle jobbra és balra a várható keréknyomok vonalában végezték el felváltva.

No.	Var.	Mészstabilizáció 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

7. táblázat. A tárcsás teherbírás vizsgálattal meghatározott modulus értékeke

No.	Var.	Mészstabilizáció 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
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

8. táblázat. A dinamikus teherbírás vizsgálattal meghatározott modulus értékeke

Az elázott magas víztartalmú földművön csak két szakaszon volt sikeresen végrehajtható a mérés. Ezek az eredmények viszont jól egyeztek az előzetes mérésekkel, így a földműre átlagosan 10 MPa teherbírási értéket határoztak meg. A jelenlegi műszaki szabályozás szerint, ha a földmű teherbírási modulusa kisebb, mint 40 MPa, akkor a földműre már javítóréteget kell építeni.

A mésztstabilizáció építése után kétféle modellhatással (statikus és dinamikus) vizsgálták a teherbírás növekedését. A kétféle mérés adatsorát a tervezéshez szükséges statikus modulus meghatározására kívánták felhasználni, mivel a jelenlegi műszaki szabályozás erre fogalmaz meg előírásokat. A mésztstabilizációs rétegeken kívül vizsgálták még a mésztstabilizációra épült pályaszerkezetek teherbírás változását is. A mésztstabilizáción végzett méréseink azt mutatták, hogy a különböző modellhatásokkal meghatározott teherbírás értékek közel esnek egymáshoz. A 7. táblázat és 8. táblázat jól látható, hogy mind a 24 órás, mind a 48 órás statikus ( $E_2$ ) és átlagos dinamikus modulus ( $E_d$ ) értékek jól egyeznek egymással. Ezért azt mondhatjuk, hogy a dinamikus modellhatással meghatározott teherbírási értékeket azonosnak tekinthetjük a tervezéshez szükséges statikus  $E_2$ -vel. A mésztstabilizáció teherbírás növekedését öt napon át követték nyomon a B&C típusú berendezéssel. A mérések alapján a mésztstabilizációs rétegek vastagsága egyértelműen nem hozható összefüggésbe a teherbírás növekedésével.

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 meghatározható
5	9	60	2	Nem meghatározható
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

9. táblázat. A szemcsés rétegek E modulusa pályaszerkezet variációnként

A talaj-mész reakció nagyon összetett folyamat és számos olyan tényező is befolyásolja a teherbírás mértékét, amit eddig még nem sikerült feltárni. 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 mésztabilizációs kísérleti szakaszok produkáltak. A mérések alapján három vastagsági csoportot alakított ki, a terepi mérések alapján:

$$H_{\text{mész}} = 15 \text{ cm} \quad E_{\text{jf.}} = 40 \text{ MPa}$$

$$H_{\text{mész}} = 25 \text{ cm} \quad E_{\text{jf.}} = 50 \text{ MPa}$$

$$H_{\text{mész}} = 35 \text{ cm} \quad E_{\text{jf.}} = 60 \text{ MPa}$$

ahol  $H$  a mésszel kezelt talajréteg vastagsága, és  $E_{\text{jf.}}$  a javított földmű modulusa. A mésztabilizáció után a zúzottkőréteg elterítése és tömörítése következett az építéskor, ennek a felületén is mértek teherbírás. 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):

$$E_2 = E_1 \cdot 0,2 \cdot H_2^{0,45}$$

ahol  $H_2$  a zúzottkő vagy szemcsés réteg vastagsága mm-ben,  $E_1$  pedig az alsó réteg modulusa MPa-ban. Az összefüggés hiánya, 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 pályaszerkezeten belül a vastagabb szemcsés alaprégeket vizsgálták, különbséget téve zúzottkő és mechanikai stabilizáció között. Zúzottkő alapra a következő képlettel alkalmazható (Barker és mtsai, 1977):

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

Kavicsalapra, mechanikai stabilizációra:

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

A homokos kavics (HK) rétegek modulusát is ezzel az összefüggéssel becsülhetjük. Az összefüggések alkalmazásánál 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).

A mészstabilizációs rétegeket, mint javított földmű vittük be a modellbe. A számítások eredményét a 9. táblázat foglalja össze.

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

### **7.3. Összefoglalás**

A tapasztalatokat összefoglalva azt mondhatjuk, hogy a kísérleti útnál alkalmazott géplánc professzionális megoldása a meszes talajstabilizáció építésének. A mészstabilizációs rétegek minimálisan építhető vastagságára 15 cm, az egy menetben építhető maximális vastagságra pedig 30 cm javasolható. A mészstabilizáció 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 mészstabilizáció alkalmazásával nagymennyiségű zúzottkő takarítható meg, ami nagymértékben csökkenti az építés helyszínére szállítandó anyagmennyiséget, így csökkentve a szállítási és az építési költségeket. 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 mészstabilizáció építését a tervező a helyszínen is ellenőrizte. A síkvidéki terepviszonyok között megépített földmű vízelvezetését 1,0-1,50 m mélységű szikkasztó árok és esetenként a mély fekvésű helyeken kialakított szivárogtató medencék biztosították. A kiváló minőségben megépített mészstabilizációs 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 mészstabilizációs útpályaszerkezetek arra is rámutatnak, hogy kötött talajú földmű esetén a jó vízelvezetés és a földmű víztartalom növekedésének elkerülése mindenképpen szükséges ahhoz, hogy a megépített mészstabilizációs, vagy zúzottkő pályaszerkezet teherbírása megmaradjon.

## 8. Laboratóriumi teherbírás vizsgálatok

A Bánokszentgyörgyi kísérleti útszakaszok 3,0-3,5% mészadagolás mellett épültek meg. Abból a célból, hogy a mérési eredményeket más talajokra és eltérő mészadagolási tartományokra is ki lehessen terjeszteni, további laboratóriumi vizsgálatok elvégzésére volt szükség.

2007-ben a Carmeuse Hungária Kft. felkérte a Nyugat-magyarországi Egyetem Erdőmérnöki Karán a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézetét (GEVI), hogy tegyen javaslatot egy olyan vizsgálatssorozatra, amelynek eredményeire alapozva lehetővé válik egy, a meszes talajstabilizációk tervezéséhez szükséges ütügyi műszaki előírás elkészítése. A GEVI mellett két további bevont kutatóhelyen is kísérletek folytak. A bevont kutatóhelyek az alábbiak:

1. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnikai Tanszék
2. TLI Technológiai, Laboratóriumi és Innovációs Zrt.

A kutatásban vizsgált talajok:

1. Hajdúnánás, iszapos homokliszt
2. Szarvas, közepes agyag
3. Adony, iszapos homokliszt
4. **Bánokszentgyörgy, közepes agyag (a kísérleti út talaja)**

Jelen tanulmányban nem térünk ki a teljes kutatási anyag ismertetésére, csupán a bánokszentgyörgyi közepes agyagtalajjal kapcsolatos eredményeket foglaljuk össze.

### 8.1. A CBR vizsgálat elve

A CBR érték (California Bearing Ratio) a hajlékony útpályaszerkezetek alatti talaj vagy az alsó alapréteg százalékban kifejezett teherbírása a tömör zúzottkőréteg teherbírásához viszonyítva.

Az eljárás közben a vizsgált talajt (vagy alsó alapréteget) 50 mm átmérőjű hengerrel terhelve penetrációs vizsgálatot végzünk, és felvesszük a terhelőerő függvényében a talaj (alapréteg) benyomódását. A penetrációs görbén a 2,5 mm, illetve 5,0 mm benyomódáshoz tartozó terhelőerő-értékeket összehasonlítjuk a 100%-os teherbírásúnak elfogadott tömör zúzottkőréteg penetrációs görbéjén a 2,5 mm, illetve az 5,0 mm benyomódást előidéző terhelőerők értékeivel.

A CBR értékek laboratóriumi meghatározásánál, a Proctor-féle tömörítési vizsgálattal megegyező módon előállított próbatesteken végezzük el a kísérletet. A talajok teherbíró képessége és víztartalma között szoros összefüggés fedezhető fel, az egyes talajok másként reagálnak a víztartalom változására, különböző víztartalom alakul ki a maximális teherbírásuk stb.

### 8.2. A kísérleti beállítások

A vizsgálatssorozattal arra keresték a választ, hogy a vizsgált talajok különböző víztartalmú állapotukban mekkora teherbírásúak, illetve hogy milyen mészadagolással lehet megfelelő teherbírást elérni. A kérdés megválaszolásához talajonként 6 különböző víztartalom és 4 különböző mészadagolással (0, 2, 4, 6 %) készítettek próbatesteket. A mészstabilizációnál a teherbírás-változás kialakulása egy időben elhúzódó folyamat. Azért, hogy ezt a jelenséget nyomon lehessen követni, minden víztartalom és mészadagolás beállításnál 3 próbatestet készítettek és a próbatesteket eltérő pihentetési idő (1 óra, 3 nap, 28 nap) elteltével terhelték meg. A kezeletlen talajminták teherbírását azonos, 1 órás pihentetés után mérték meg. A vizsgált próbatestek száma tehát talajonként a következőképpen alakult:

$$n = 6 \times 3 \times 3 + 6 = 60 \text{ db}$$

összesen tehát 60 db kísérleti beállítás készült.

### 8.3. A CBR vizsgálatok eredményeinek értékelése

A kutatás alatt minden kísérleti beállításnál a terhelés és a benyomódás közötti összefüggést rögzítették és grafikusan ábrázolták. A CBR értékeket a következő képletekkel határozták meg:

$$CBR_1 = 100 \times \frac{a}{b} = 100 \times \frac{a}{10,37}, \quad CBR_2 = 100 \times \frac{c}{d} = 100 \times \frac{c}{20,60}$$

ahol:

$a$  = a vizsgált anyag 2,5 mm-es benyomódásához szükséges erő.

$b$  = az alapul vett tömör zúzottkőréteg 2,5 mm-es benyomódásához szükséges erő.

$c$  = a vizsgált anyag 5,0 mm-es benyomódásához szükséges erő.

$d$  = az alapul vett tömör zúzottkőréteg 5,0 mm-es benyomódásához szükséges erő.

A két hányados közül a nagyobbat fogadjuk el CBR értéknek. A végeredmény az alsó és a felső véglapon, így meghatározott értékek átlaga. A CBR közelítő értékelése a következő:

CBR = 2-4%      gyenge, elázott, vagy nem tömör földmű

CBR = 5-7%      közepesen mérsékelt teherbírású földmű

CBR = 7-15%    megfelelő teherbírású földmű

CBR = 16-20%   jó és kiváló teherbírású földmű

A CBR értékek feldolgozásakor a mért eredményekre exponenciálisához hasonló függvényt illesztettek a legkisebb négyzetek módszerével. Az alkalmazott függvény alakja:

$$CBR = a \times w^b \times c^w$$

ahol:

$a, b, c$  = regressziós paraméter.

$w$  = a talaj víztartalma %-ban (a mészpor bekeverése előtt).

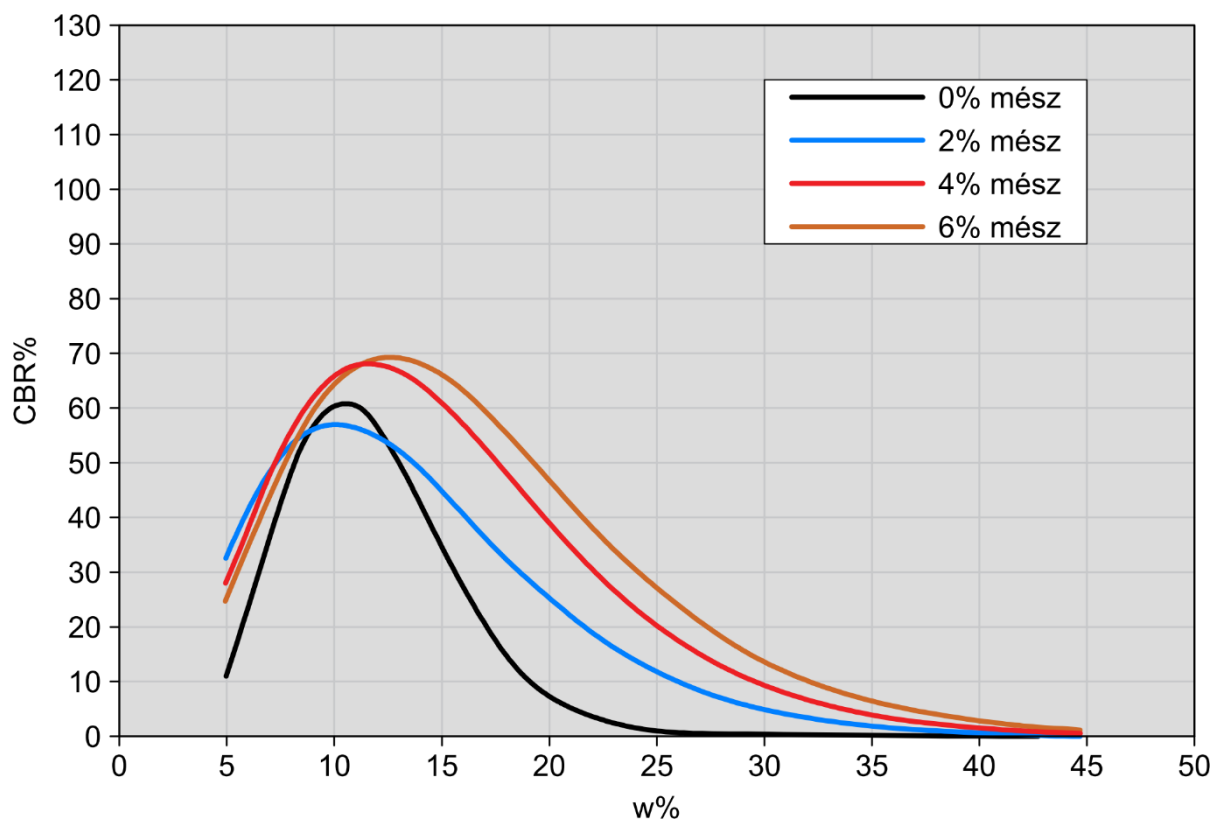
A fenti egyenletből látható, hogy ez a függvény csak a  $w^b$  tényező elmaradása esetén mondható exponenciálisnak. Az exponenciális függvénynek tulajdonsága, hogy ha  $y$  az  $x$ -nek exponenciális függvénye, akkor  $\log(y)$  az  $x$ -nek lineáris függvénye. Ez pedig az általános formára nem áll fenn. A jobb oldal második tagja logaritmikus, tehát nem lineáris. A fenti függvény gyakorlati haszna annak rugalmasságában rejlik, hiszen az általános formában szereplő „ $b$ ” és „ $c$ ” paraméterektől függően a függvény sokféle alakot vehet fel. Ha az általános függvény mindkét oldalának logaritmusát vesszük, akkor kétváltozós lineáris regressziós egyenletté lehet azt alakítani és így a kereset paraméterek meghatározhatóak:

$$\ln(CBR) = \ln(a) + b \times \ln(w) + w \times \ln(c)$$

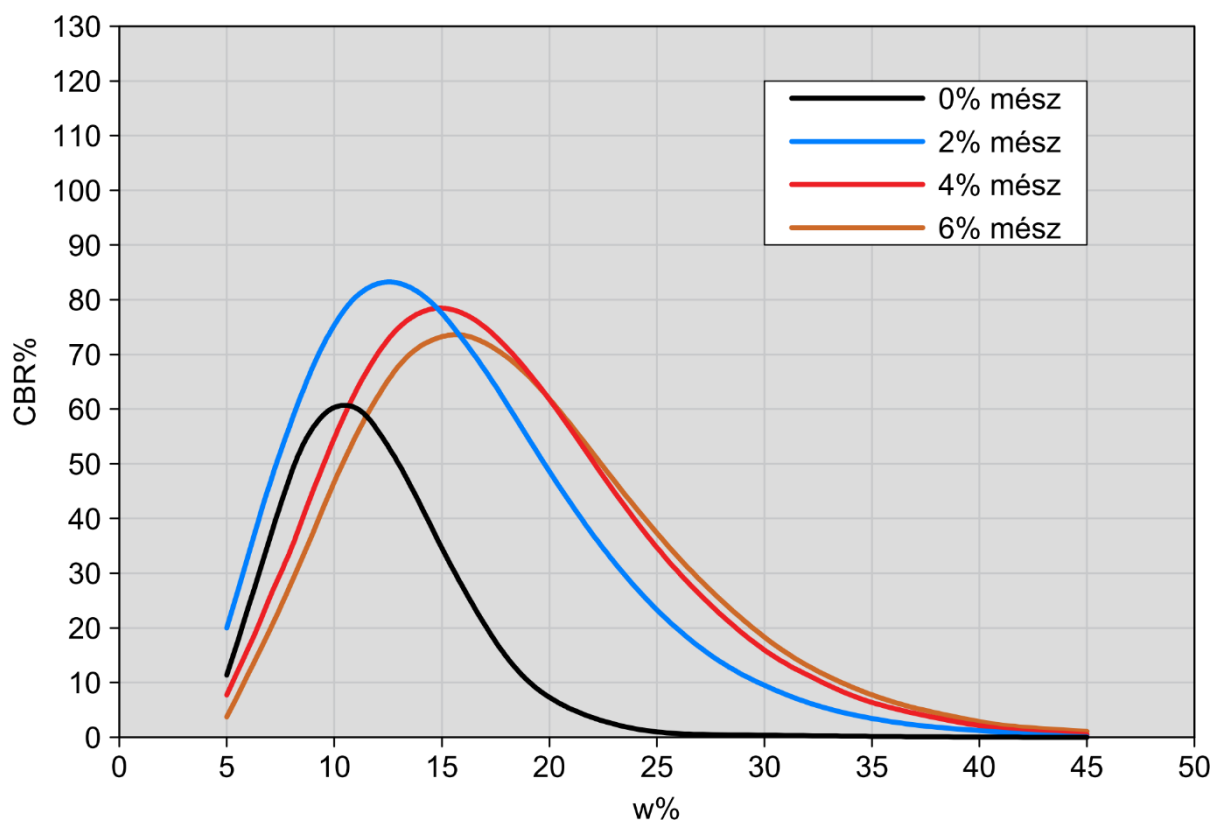
Az egyes talajok mérési eredményeire illesztett görbék paramétereit, illetve az illesztés fokát kifejező  $R^2$  értékeket táblázatban foglalták össze. Az illesztés nem minden esetben volt kielégítő, de ennek ellenére mégis a fenti függvénynél maradtak, mivel a mérési eredmények trendjét jól visszaadta és a CBR meghatározás bizonytalanságai mellett is kielégítő eredményeket adott. A regresszió számításnál meghatározott függvényekkel minden talajra elkészítették egy modelltáblát, ami a talaj pillanatnyi víztartalma ( $w$ ), az adagolt mésheménység és az idő függvényében megadja a várható CBR értéket. Jelen írásunkban csak az Bánokszentgyörgyi talajra kidolgozott modellt mutatjuk be grafikusan (19. ábra, 20. ábra és 21. ábra) és táblázatosan (10. táblázat).

BÁNOKSZENTGYÖRGY										
w%	0 óra	1 óra			72 óra (3 nap)			672 óra (28 nap)		
	0%	2%	4%	6%	2%	4%	6%	2%	4%	6%
5	11,20	32,50	28,00	25,10	21,90	8,70	6,60	7,90	4,00	0,90
6	22,00	41,10	38,10	34,70	33,60	15,60	12,20	15,10	8,70	2,60
7	34,80	48,00	47,50	43,80	45,80	24,40	19,60	24,60	15,80	5,90
8	46,90	53,00	55,30	52,00	57,30	34,20	28,10	35,80	25,30	11,40
9	55,80	56,00	61,30	58,70	67,20	44,40	37,30	47,90	36,50	19,40
10	60,40	57,10	65,40	63,80	74,90	54,00	46,30	59,80	48,90	29,90
11	60,50	56,70	67,50	67,20	79,90	62,50	54,60	70,80	61,40	42,40
12	56,70	55,00	67,90	68,90	82,50	69,30	61,60	80,00	73,20	56,30
13	50,40	52,40	66,90	69,20	82,70	74,20	67,10	87,10	83,50	70,70
14	42,80	49,00	64,60	68,20	80,90	77,00	70,80	91,80	91,80	84,50
15	34,90	45,30	61,30	66,20	77,50	78,00	72,80	94,10	97,70	97,00
16	27,50	41,30	57,50	63,30	72,80	77,20	73,10	94,10	101,20	107,30
17	21,00	37,20	53,20	59,80	67,30	74,80	72,00	92,20	102,20	115,00
18	15,60	33,20	48,70	55,90	61,40	71,30	69,60	88,60	101,00	119,90
19	11,40	29,40	44,10	51,70	55,30	66,90	66,30	83,70	97,90	121,80
20	8,10	25,90	39,60	47,50	49,20	61,90	62,10	77,90	93,30	121,10
21	5,60	22,60	35,30	43,20	43,30	56,50	57,50	71,50	87,50	117,90
22	3,90	19,60	31,20	39,10	37,80	51,10	52,60	64,80	80,90	112,70
23	2,60	16,90	27,50	35,10	32,70	45,60	47,70	58,10	73,80	106,00
24	1,70	14,50	24,00	31,40	28,00	40,40	42,70	51,50	66,60	98,10
25	1,10	12,40	20,90	27,90	23,90	35,40	37,90	45,30	59,40	89,60
26	0,70	10,50	18,00	24,60	20,20	30,80	33,40	39,50	52,50	80,70
27	0,50	8,90	15,50	21,70	17,00	26,60	29,20	34,10	45,90	71,90
28	0,30	7,50	13,30	19,00	14,20	22,80	25,40	29,30	39,80	63,30
29	0,20	6,30	11,40	16,50	11,80	19,40	21,90	24,90	34,30	55,10
30	0,10	5,30	9,70	14,40	9,80	16,50	18,70	21,10	29,30	47,60
31	0,10	4,40	8,20	12,50	8,10	13,90	16,00	17,70	24,80	40,70
32	0,00	3,70	6,90	10,80	6,60	11,60	13,50	14,80	20,90	34,50
33	0,00	3,00	5,80	9,30	5,40	9,70	11,40	12,30	17,50	29,10
34	0,00	2,50	4,90	7,90	4,40	8,00	9,60	10,20	14,60	24,30
35	0,00	2,10	4,10	6,80	3,60	6,60	8,00	8,40	12,10	20,10
36	0,00	1,70	3,40	5,80	2,90	5,50	6,70	6,90	10,00	16,60
37	0,00	1,40	2,80	4,90	2,30	4,50	5,50	5,60	8,20	13,60
38	0,00	1,20	2,40	4,20	1,90	3,70	4,60	4,60	6,70	11,00
39	0,00	0,90	2,00	3,60	1,50	3,00	3,70	3,70	5,40	8,90
40	0,00	0,80	1,60	3,00	1,20	2,40	3,10	3,00	4,40	7,20
41	0,00	0,60	1,30	2,50	1,00	1,90	2,50	2,40	3,50	5,80
42	0,00	0,50	1,10	2,10	0,80	1,60	2,00	1,90	2,80	4,60
43	0,00	0,40	0,90	1,80	0,60	1,30	1,70	1,60	2,30	3,60
44	0,00	0,30	0,70	1,50	0,50	1,00	1,30	1,20	1,80	2,90
45	0,00	0,30	0,60	1,30	0,40	0,80	1,10	1,00	1,40	2,30

10. táblázat. A Bánokszentgyörgyi agyag mészstabilizációs modellje

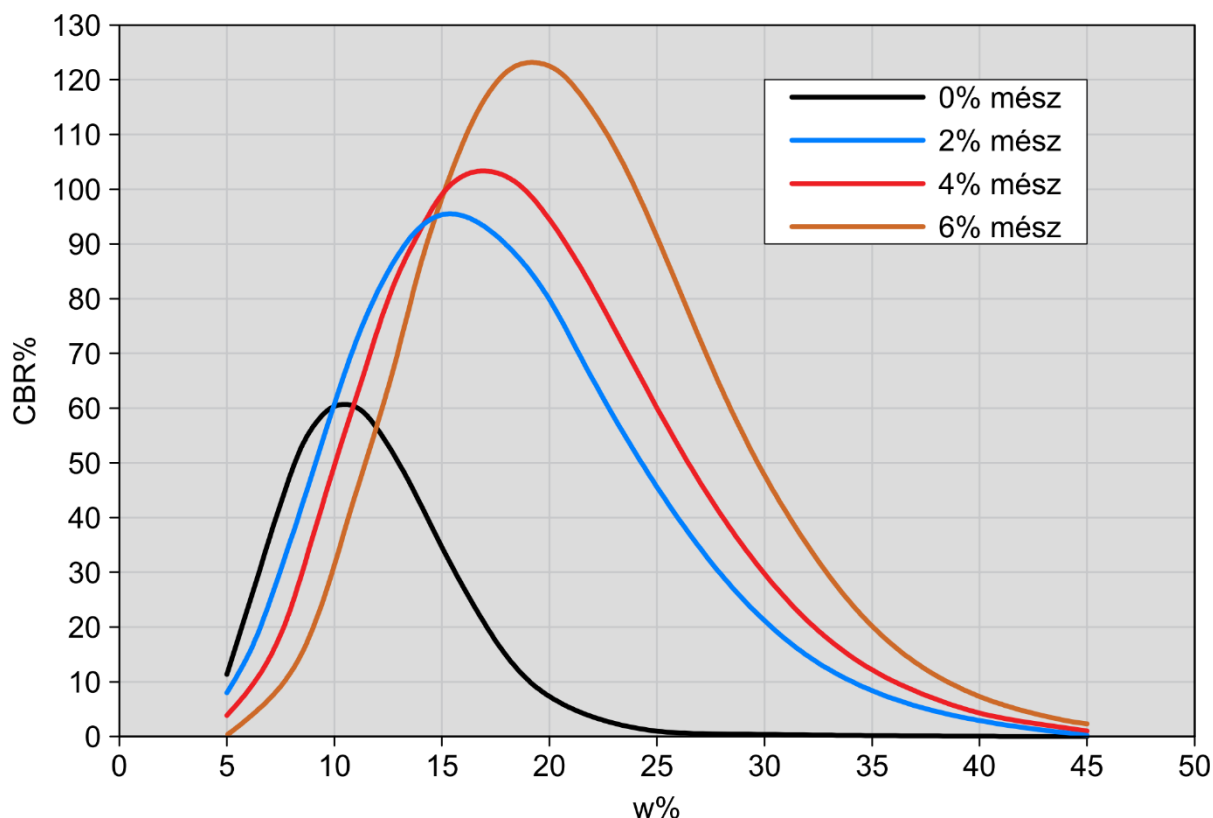


19. ábra. A Bányószentgyörgyi agyagtalaj a mész bekeverése után 1 órával



20. ábra. A Bányószentgyörgyi agyagtalaj a mész bekeverése után 3 nappal





21. ábra. A Bánoksztgyörgyi agyagtalaj a mész bekeverése után 28 nappal

A vizsgálatok közben szerzett tapasztalatokat, valamint a kapott eredmények alapján leszűrhető következtetéseket az alábbiak szerint foglalhatjuk össze:

- A kezeletlen agyagtalaj alacsony víztartalom mellett ( $w\% < 10\%$ ) a száraz ágon igen magas CBR értéket képes produkálni. A víztartalom kismértékű növekedése (+5-6%) viszont már jelentősen lecsökkenti az elérhető CBR értékét.
- A mészstabilizáció teherbírás növelő tulajdonsága a *száraz ágon* nem jelentkezik. A teherbírás nem hogy nő, hanem csökken, jóval a kezeletlen talaj értéke alatt marad. Az idő és a mészadagolás növelésével a teherbírás fokozatosan csökken.
- A vizsgált agyagtalaj természetes nedvességtartalma  $w = 20\%$  volt, ami a kísérletek szerint 4-5 CBR% elérhető teherbírást jelent. A mésszel kezelt talaj teherbírása ugyanezen a nedvességtartalom 100-120 CBR%-nak adódott. A kezeletlen talaj ennél magasabb nedvességtartalom mellett teljesen elvesztette teherbírását, míg a mészstabilizáció  $w = 30-35\%$ -on is CBR 4-5%-ot mutatott. Egyenértékű teherbírás áll fent tehát a kezeletlen és a kezelt minták között  $w_{agyag} = 20\%$  és  $w_{mész} = 35\%$  nedvességtartalom mellett.
- A mészstabilizáció teherbírásnövelő hatása  $w = 10\%$  és  $w = 30\%$  nedvességtartalmak között a legszembetűnőbb. Az idő előrehaladtával a mészadagolás függvényében a teherbírás fokozatosan növekszik!
- A mészadagolás növelésével nem fokozható tovább a teherbírás  $w = 35\%$  nedvességtartalom fölött.
- A legmagasabb CBR% értékeket  $w = 18\%$  és  $w = 22\%$  nedvességtartalmak között rögzítették.
- Az alkalmazható mészadagolás mennyisége:

1. 2%-os mészadagolást  $w = 10\%$  és  $w = 15\%$  nedvességtartalom között érdemes alkalmazni, ennél nagyobb mészadagolás kedvezőtlenül hat az elérhető teherbírásértékre.
2. 4%-os mészadagolást  $w = 15\%$  és  $w = 20\%$  nedvességtartalom között érdemes alkalmazni.
3. 6%-os mészadagolás  $w = 20\%$  felett alkalmazható  $w = 30\%$ -ig bezárólag.

#### 8.4. A vizsgálati eredmények gyakorlati felhasználása

A kutatásba bevont négy talaj esetében a tanulmányban grafikusan, illetve táblázatosan közölt teherbírás-adatok felhasználásával a víztartalom függvényében tervezhetővé válik a mészadagolás szükséges mértéke.

Az alábbiakban egy egyszerű mintapéldán keresztül bemutatjuk az adatok egy lehetséges felhasználási módját.

Tegyük fel, hogy a tervezett út földművét a bánokszentgyörgyi agyagtalajból kívánják megépíteni. A talaj természetes állapotában a teherbírás szempontjából az optimális víztartalom 10,5% (ezt a kezeletlen minta görbéjéről olvashatjuk le). Az 19. ábra az is leolvasható, hogy a talaj – természetes állapotában – a 10% és 20% közötti tartományban nagyon érzékeny a víztartalom változására, 20%-os víztartalom teherbírása már csak 8 CBR%. (A talaj begyűjtésekor a természetes víztartalom 21,1 % volt.)

Tegyük fel, hogy talajunk az építés kezdetén  $w_{term} = 20\%$  víztartalmú. Ebben az esetben 2 tömeg% mész adagolással 78 CBR%, 4%-al 93 CBR% és 6%-al 121 CBR% teherbírás érhető el (21. ábra). Az ábráról az is leolvasható, hogy ha a talaj a földmű építése közben elázik, és a felázott talajréteget átgyúrva a teljes földmű elnedvesedik, akkor a teherbírás gyakorlatilag megszűnik. Ha azonban építés kezdetén a talajt mésszel kezelik, akkor az elfogadható teherbírású tartomány jelentősen kitolódik.

Egy másik alkalmazási lehetőség, ha meghatározzuk azokat a víztartalmi értékeket, amelyeken belül maradv a adott mészadagolással az előzetesen megkövetelt teherbírást biztosítani tudjuk. Az előző példánál maradv a, ha az előírt teherbírás 20 CBR% (ez durván  $E_2 = 74$  MPa teherbírásnak felel meg), akkor ez a teherbírás a bánokszentgyörgyi agyagtalajon 2% mészadagolással 6% és 30% közötti víztartalom esetében biztosítható, 6% mészadagolással a felső víztartalmi határ 35%-ra tolódik ki.

#### 8.5. Az $E_2$ érték meghatározása CBR vizsgálatból

Ismert, hogy a CBR és az  $E_2$  érték között jó korrelációval rendelkező összefüggés adható meg (MSZ 2509/2:1989):

$$E_2 = 10 \cdot CBR^{2/3}$$

Ez az összefüggés lehetőséget teremt arra, hogy a laboratóriumi vizsgálatok eredményeit felhasználjuk a Bánokszentgyörgyi útkísérletnél rögzített tárcsás teherbírás-mérések kiterjesztésére.

A Bánokszentgyörgyi kísérleti útszakaszoknál a nyers földmű teherbírása 10 MPa-ra adódott 20% nedvességtartalom mellett. A laboratóriumi vizsgálatok ugyanennél a nedvességtartalomnál 8 CBR%-ot mutattak ki a kezeletlen agyagtalajon. A fenti összefüggés szerint ez az érték 40 MPa-nak feleltethető meg. A terepi és a laboratóriumi mérések között felelhető négyszeres eltérés a mérési körülményekben keresendő. Laboratóriumban sokkal optimálisabb viszonyok teremthetők meg, mint terepen, ezért a laboratóriumi eredmények terepi körülmények közötti felhasználásánál  $n = 40$  MPa / 10 MPa azaz  $n = 4$  biztonsági tényezővel kell számolni minimum.

## **9. A meszes talajstabilizáció építési technológiája**

### **9.1. A meszes talajstabilizáció építésének általános technológiái**

A kötőanyagot felhasználó talajstabilizációk építése nagyon hasonló. Mindegyik stabilizációt általában 13-30 cm, általában 15, 20, 25 cm tömör vastagságban építik meg, mert ez az a vastagság, amely a helyszínen még jól megkeverhető és betömöríthető. Vastagabb stabilizációt több rétegben kell megépíteni, vagy megfelelő talajmarót és hengereket kell használni.

A stabilizációk készítése két fő lépésre osztható:

- a keverék előállítása,
- a keverék beépítése.

Ezt a két fő lépést négy alapvető műveletben kell elvégezni megfelelő sorrendben:

- a stabilizálandó talaj egyenletes fellazítását, felaprítását,
- a kötőanyag és víz előírt mennyiségének egyenletes bekeverését a talajba,
- a talaj-kötőanyag-víz keverék gondos és hatékony betömörítését,
- utókezelést.

A kötőanyag-talaj keverék elkészíthető:

- keverőgéppel, keverőtelepen, vagy a helyszínen;
- talajmaróval, a helyszínen keverve.

Keverőgépben a keverés történhet:

- adagokban, 700-1.000 liter nagyságú betonkeverőben
- folyamatos keveréssel, keverőteknőben.

A keverőgépes keveréskor:

- a stabilizálandó talajt, a vizet és a kötőanyagot a keverőgéphez szállítjuk,
- elkészítjük a talaj-kötőanyag-víz keveréket,
- a kész keveréket a beépítés helyére szállítjuk,
- a keveréket elterítjük,
- betömörítjük és közben a profilt kialakítjuk.

A keverőgép felállítható:

- a keverés súlypontjában,
- az anyagnyerőhelyen,
- állandó jelleggel kialakított keverőtelepen.

Az anyagnyerőhelyre telepített keverőgép azért előnyös, mert egy keverőgéppel több távolabbi munkahely is kiszolgálható.

A keverőgépben történő keverés előnye, hogy a keverék egyenletes minőségű lesz és a kész keverék ellenőrzése is könnyen megszervezhető. Az eljárás hátránya, a nagy szállítási munkaigény, amely csak akkor válhat gazdaságossá, vagy indokoltá, ha a stabilizáció anyaga nem a helyi talaj, hanem az a tükörbe szállított idegen anyag.

A keverőgépes keverés általában akkor célszerű, amikor nem a helyi talajt stabilizáljuk, illetve olyan helyeken, ahol a keveréket talajmaróval nem tudjuk előállítani (pl. útszélesítéseknél, tagolt felületeknél stb.).

Meszes talajstabilizáció készítésére a telepi keverés nem javasolható. A helyszíni keveréssel készített stabilizációk készítésének vezérgépe a talajmaró, amely dolgozhat önállóan, vagy gépláncba szervezve.

A helyi talaj helyszíni keverésekor is fontos, hogy a földmű, amelyre a stabilizáció kerül kellően tömör legyen. Ezért a felső, később stabilizálandó réteget gréderrel félre kell húzni a padkára és a földmű felső rétegét, illetve a tükröt tömöríteni kell. Ezután a félrehúzott stabilizálandó talajt gréderrel visszahúzzuk és elterítjük a tömörített tükrőbe.

Amikor a stabilizációt helyszíni keveréssel, de tükrőbe szállított anyagból készítjük, akkor a földművet készre építjük, betömörítve és felszínét egyenletesre alakítva. Ezután egy közeli anyagnyerőhelyről, vagy a bevágási, illetve a töltési rézsű lazább részeiből nyert stabilizálandó anyagot laza terítési rétegvastagságban elterítjük a földművön. (A földmű kitűzésekor a szükséges túlméretet biztosítani kell.) A meszes talajstabilizációt általában nem építjük tükrőbe szállított anyagból.

Mivel a keverő és tömörítő eszközök megszabják a hatékony keverés és tömörítés felső határát ezért vastagabb stabilizációt több rétegből kell építeni. A 15-25 cm tömör vastagságot (20-30 cm laza vastagságot) kell az építhető maximumnak tekinteni, amely egyben a leggazdaságosabb vastagság is a gépek maximális kihasználtsága miatt. A többretegű stabilizáció építése úgy történik, hogy a földmű felső részéről első menetben lehúzzuk a felső stabilizálandó réteg anyagát, illetve a földműre az alsó réteg anyagát terítjük el és ezt stabilizáljuk. Ezután elterítjük a második réteg anyagát és azt a már elkészült alsó rétegen stabilizáljuk.

A korszerű talajmarók azonban 40 cm vastagságú talajrétegeket is fel tudnak lazítani.

Por alakú kötőanyagot használva, helyszíni keveréssel a következőképpen készíthető el a stabilizáció:

- profiligazítás, valamint az egyenletes felszínű tükrő kialakítása gréderrel,
- talaj fellazítása talajmaróval,
- por alakú kötőanyag egyenletes elosztása géppel, vagy kézzel,
- száraz keverés talajmaróval az egyenletes elkeveredés biztosítása érdekében,
- nedvesítés,
- nedves keverés,
- előtömörítés vibrálassal, vagy könnyű hengerrel,
- főtömörítés gumihengerrel,
- profiligazítás gréderrel, majd simítóhengerlés.

A por alakú kötőanyagot célszerű kötőanyag elosztóval felszerelt talajmaróval elosztani és azonnal a talajba keverni. Ezzel biztosítható a pontos kötőanyag adagolás és elosztás. Ekkor a kötőanyag adagoló és a kötőanyag szállító tehergépkocsi között a folyamatos kapcsolatot meg kell teremteni, vagy tárolótartállyal egybeépített adagoló-keverő berendezést kell használni.

A kötőanyagot kézzel is el lehet teríteni. Zsákolt őrölt égetett meszet, vagy mészhidrárt használva ez egyszerűen megoldható, ha a padkán olyan szakaszokat jelölünk ki, amelyeken az adagolásnak megfelelő kötőanyag mennyisége kerek számú zsákkal biztosítható, majd a zsákokat ennek megfelelően kiosztjuk. Ezekből az egymástól néhány méterre lévő depóniákból a kötőanyagot kézzel elterítjük, majd azt talajmaróval azonnal szárazon bekeverjük. Az őrölt égetett mészipor kezelése azonban nehézkes és balesetveszélyes. Célszerű ezért azt előre, az adagolástól függő adagokba zsákokba tölteni, majd a továbbiakban az előzőekben elmondottak szerint eljárni.

A kötéshez szüksége vizet locsolókocsi permetezheti ki a felszínre. Amennyiben a talajmaró kialakítása olyan, hogy azzal a nedvesítés is megoldható, akkor a vízadagolás és a nedves keverés egy ütemben történhet. Ennek szintén feltétele, hogy a vízszállító tehergépkocsi és a talajmaró között folyamatos kapcsolat legyen.

Kis volumenű útépítéseknél a keverék előállítása helyszíni keveréssel, egy talajmaróval, mint vezérgéppel is elvégezhető. A szükséges gépek:

- gréder a felületek kialakításához, esetleg a felszín felszaggatásához;
- talajmaró, a lazításhoz és keveréshez;
- henger a tömörítéshez.

Ennél az eljárásnál célszerű akkora szakaszt munkába venni, amelyet a rendelkezésre álló idő alatt (egy műszak, a várható eső időpontja) el lehet készíteni. A talaj lazítását, a száraz és nedves keverést a talajmaró többszöri járatásával végezzük el. A kötőanyag adagolása és elosztása géppel vagy kézzel történhet, a vizet locsolókocsiból biztosítjuk. A locsolást közvetlenül követő nedves keverés után a réteget azonnal – meszes stabilizációnál esetleg valamivel hosszabb idő múlva – be kell tömöríteni.

A helyszíni keveréssel készülő stabilizációt el lehet készíteni géplánccal is. A géprendszer összeállításánál figyelembe kell venni, hogy:

- a géplánc egy menetben végezze el az összes részfeladatot,
- kevés gépegységből álljon,
- a gépsor tagjai egyenkapacitásúak legyenek.

A gépláncot a következő gépegységből kell összeállítani:

- összerék hajtású traktor, amelynek mászó sebességfokozata három pont felfüggesztésű hidraulikus emelőrendszere, meghajtó tengelycsonkja van;
- gréder a profil alakítására a talaj félrehúzására és elterítésére;
- terítő és adagoló berendezés a kötőanyag elosztására, talajmaróval egybeépítve;
- talajmaró, amelyet a vontató tengelycsonkja hajt meg és olyan kialakítású, hogy keverés közben a vizet, illetve a bitument a keverőtérbe lehet adagolni;
- tehergépkocsi a cement, a bitumen és víz szállítására, mászó sebességfokozattal és elosztó egységgel felszerelve;
- gumihenger tömörítéshez (6-8 tonnás, önjáró);
- úthenger (6-8 tonnás, kéthengerlőjű).

A meszes és cementes talajstabilizáció elkészítése után utókezelést igényel, amellyel a felület állandó nedvesen tartását biztosítjuk. Ez megoldható öntözéssel, locsolókocsiból vagy a felület párologtatását megakadályozó műanyagfilm vagy bitemenemulzió bevonat készítésével.

A legkorszerűbb folyamatos technológia gépsora egy kötőanyag szállító tartálykocsi, egy kötőanyag tárolóval és adagolóval összeépített szóró kocsi és egy önjáró talajmaró.

## **9.2. A meszes talajstabilizáció javasolt építési technológiái**

### **9.2.1. Szakaszos technológia, kézi kötőanyag adagolással**

A vezérgép a talajmaró (22. ábra). Ennél az eljárásnál célszerű akkora szakaszt munkába venni, amelyet a rendelkezésre álló idő alatt (egy műszak, a várható eső időpontja) el lehet készíteni. A talaj lazítását, a száraz és nedves keverést a talajmaró többszöri járatásával végezzük el. A kötőanyag adagolása kézzel történik, a vizet locsolókocsiból biztosítjuk. A locsolást közvetlenül követő nedves keverés után a réteget azonnal – meszes stabilizációnál esetleg valamivel hosszabb idő múlva – be kell tömöríteni.



22. ábra. Korszerű talajmaró (Gyártó: Stehr, Németország)

Az építés kezdetén ki kell jelölni az egy műszakban elkészíthető szakaszt. Kötőanyag biztosítása: zsákolt égetett őrölt mészpör a gyártótól.

A kötőanyagot kézi terítése, zsákolt cementet, vagy mészhidrátot használva egyszerűen megoldható, ha a padkán olyan szakaszokat jelölünk ki, amelyeken az adagolásnak megfelelő kötőanyag mennyisége kerek számú zsákkal biztosítható, majd a zsákokat ennek megfelelően kiosztjuk.

Ezekből az egymástól néhány méterre lévő kötőanyag depóniákból a kötőanyagot kézzel elterítjük, majd azt talajmaróval azonnal szárazon bekeverjük. Az őrölt égetett mészpör kezelése nehezebb és balesetveszélyes. Célszerű ezért azt előre, az adagolástól függő adagokba zsákokba tölteni, majd a továbbiakban az előzőekben elmondottak szerint eljárni.

Az építés menete a következő:

- profilgazítás, valamint az egyenletes felszínű tükör kialakítása gréderrel,
- talaj fellazítása talajmaró többszöri járatásával,
- a zsákolt kötőanyag egyenletes elosztása kézzel, védőruhában, védőfelszereléssel,
- száraz keverés talajmaróval az egyenletes elkeveredés biztosítása érdekében a talajmaró többszöri járatásával,
- nedvesítés, amennyiben szükséges,
- nedves keverés, a talajmaró szintén többszöri áthaladásával,
- előtömörítés vibrólappal, vagy könnyű hengerrel,
- főtömörítés gumihengerrel.
- profilgazítás gréderrel, majd simítóhengerlés.

### 9.2.2. Porszegény technológia

A por alakú kötőanyagot célszerű kötőanyag elosztóval felszerelt talajmaróval elosztani és azonnal a talajba keverni (23. ábra). Ezzel biztosítható a pontos kötőanyag adagolás és elosztás. A keskeny erdészeti utakon problémát jelenthet a kötőanyag adagoló és a kötőanyag szállító tehergépkocsi között a folyamatos kapcsolatot megteremtése. Célszerű ezért olyan saját kötőanyag tartállyal rendelkező adagoló és maró berendezést használni, amely a kötőanyagot tárolni tudja és pormentes építést valósít meg.



23. ábra. Kötőanyag elosztó és talajmaró (Gyártó: Steyr, Németország)

Az építéshez felhasznált meszet célszerű ömlesztve beszerezni, mert annak ára jelentősen alacsonyabb a zsákolt őrölt égetett mészhhez viszonyítva. Ekkor azonban meg kell oldani az ömlesztett anyag és az adagolás közötti összhangot. Ennek lehetőségei:

- a mészporthoz szállító tartálykocsiból közvetlenül töltik fel az adagolót. Ilyenkor a szállító tartálykocsi jelentős várakozási idejével kell számolni, ami a szállítási költségnövekedését okozza;
- a mészpor tárolható silóban is, ekkor a tartálykocsi feltölti a silót, a kötőanyag felhasználása innen rugalmasan biztosítható közvetlenül a kötőanyag adagolóba;
- a mészporthoz kiszállítható műanyag konténerben is, amely alkalmas arra. Hogy belőle a meszet a töltőnyíláson keresztül szakaszosan ürítsék ki. Ezzel megoldódik a mész rövid idejű tárolása, valamint a kötőanyag adagoló feltöltése is, továbbá megtakarítható a siló felállításával együtt járó munkák és költségek.

A legkorszerűbb „porszegény” építést biztosító gépeknél a kötőanyagtartályt és a talajmarót egybeépítik (24. ábra).

Az építés további menete a következő

- profilgázítás, valamint az egyenletes felszínű tükör kialakítása gréderrel,
- talaj fellazítása talajmaró többszöri járatásával,
- kötőanyag adagolás és száraz keverés talajmaróval az egyenletes elkeveredés biztosítása érdekében a talajmaró többszöri járatásával,
- nedvesítés, amennyiben szükséges,
- nedves keverés, a talajmaró szintén többszöri áthaladásával,
- előtömörítés vibrálassal, vagy könnyű hengerrel,
- főtömörítés gumihengerrel.
- profilgázítás gréderrel, majd simítóhengerlés.





24. ábra. Porszegény építési mód (Gyártó: Stehr, Németország)

### 9.2.3. Pormentes technológia

A Bánokszentgyörgyi erdészeti kísérleti út pormentes technológiával épült meg (29. ábra). Mivel a földmű és a mésztabilizáció megépítése között majdnem egy év telt el, ezért az időjárás hatásai (pl. sok csapadék) nagymértékben meglátszottak a kísérleti út földművén. Ezért az építés során első lépésként a felső húsz centiméter átázott talajt, a rajta elhelyezkedő lágyszárú vegetációval együtt eltávolították (25. ábra). A humuszmentes földmű felületén a közel egyenletes felszínt pedig gréderrel alakították ki (26. ábra).

Az így előkészített földművön a talajstabilizációt egy menetes géplánc építette meg (27. és 28. ábra). Ennek oka az volt, hogy hazánkban a korábban bemutatott kisebb, az erdészeti útépítésben jól használható gépek még nincsenek, de az autópálya építésénél rendelkezésre állnak a célnak megfelelő gépek.



25. ábra. Humusz eltávolítás



26. ábra. Profilgazítás gréderrel





27. ábra. STREU Master SW 16 kötőanyag adagoló



28. ábra. WIRTIGEN WR 2000 talajmaró

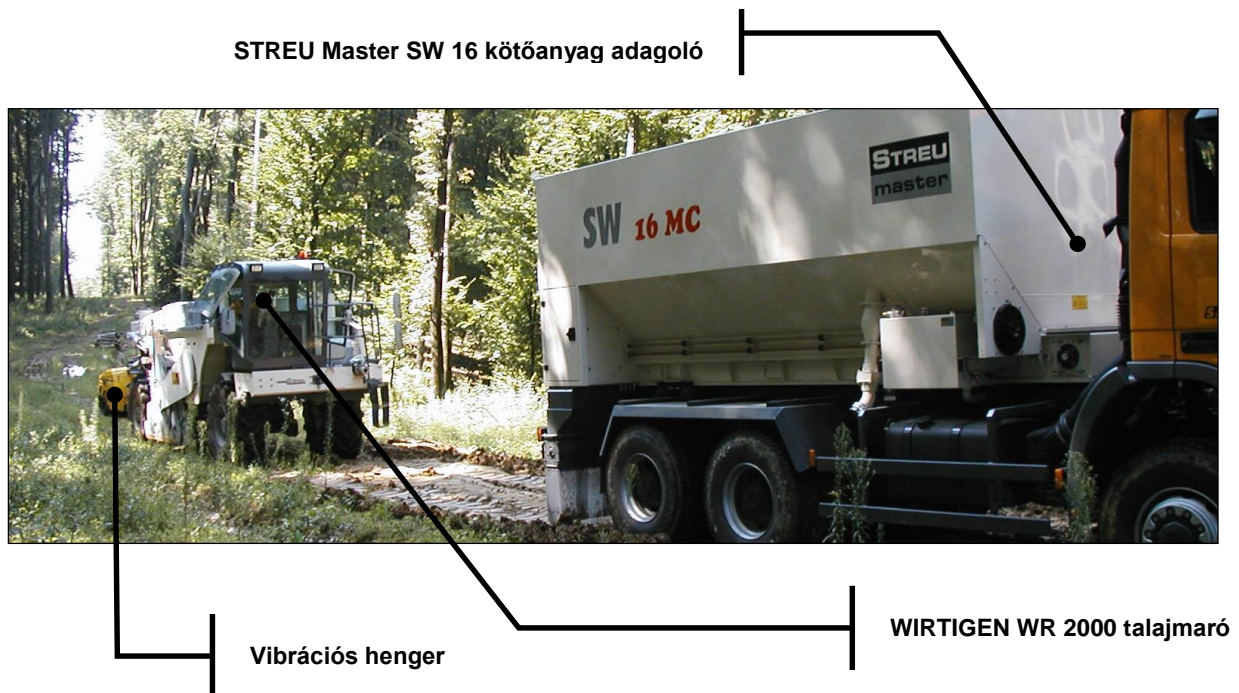
A stabilizáció építését:

- STREU Master SW 16 kötőanyag adagoló
- WIRTIGEN WR 2000 talajmaró

végezte.

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 tervezettnél megfelelően alakult. A talajmaró szintén két menetben végezte a keverést, két keverés között átfedéssel. Keverés közben a fellazítás mélységét központi vezérléssel a gép automatikusan végezte.

A kísérleti út három különböző vastagságú meszes talajstabilizációját 3,50 m szélességben a gépsor 3 óra alatt készítette el. Összességében elmondható, hogy az imént ismertet eljárással a mésztalajstabilizáció kiváló minőségben épült meg!



29. ábra. Az alkalmazott géplánc a meszes talajstabilizáció megépítésénél

## 10. A kísérlet út tapasztalatai alapján épült erdészeti feltáróutak

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 vízelvezetését 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, valamint a Zalaerdő Zrt. területén a Vöröspart-Magyarföld földút 500 méteres szakaszának stabilizációja is megépült.

A kivitelezők törekedtek a lehető legkisebb költségigényű, de jó eredményt produkáló gépek kiválasztására. A kivitelezéshez különböző teljesítményű és összetételű gépláncot alkalmaztak. Az építések sikeressége alapján megállapítható az erdészeti körülmények között készülő mésztabilizációhoz szükséges minimális gépszükséglet.

A mésszel történő talajstabilizáció eredményes kivitelezéséhez szükséges, hogy a vezérgép megfelelő teljesítménnyel rendelkezzen. Földutak esetében a vezérgép egy mezőgazdasági vontatóból (traktor) és egy a talaj felmarására alkalmas speciális adapter (talajmaró) párosításából tevődik össze. A talajmaró műszaki paraméterei határozzák meg a vontató minimális paramétereit. Általánosságban elmondható, hogy **a vontató névleges teljesítmény legalább 150 kW / 200 Le körül felel meg, és mászó fokozattal is rendelkezik!**

A talajmarót tekintve számos márka jöhet szóba, a legismertebbek a teljesség igénye nélkül a következők: Wirtgen, Hamm-Raco, Bomag, Stehr stb. Erdészeti körülmények között eddig a Wirtgen és a Stehr cég talajmaróival szereztünk tapasztalatokat.

A Wirtgen cég WS 220 típusú vontatott talajmarója mind méretben mind árban megfelel a földutak mésszel történő gazdaságos stabilizálására (30. ábra. Vontatott talajmaró). Ezt a típusú talajmarót alkalmazták a Nyírerdő Zrt. Lónyai II. o. mésszel stabilizált feltáróút építésénél. Jellemző munkaszélessége 2 m, maximális marási mélység 50 cm, a szükséges erőgép minimális paraméterei: 150 kW / 200 Le. Természetesen, ha a marási mélység csak 20-30 cm, akkor az erőgép névleges teljesítménye is lehet kisebb. Ennek ellenére célszerű a specifikációban megadott paramétereket betartani.

A Stehr cég SBF 22-L típusú talajmarója, a magyarföldi kísérleti szakasz építésénél mutatkozott be. Az elméleti marási mélysége 40 cm, a vontatóval szemben támasztott minimális követelménye pedig 96kW / 140 Le.



30. ábra. Vontatott talajmaró



31. ábra. Vontatott kötőanyag adagoló

A gyakorlatban az elérhető maximális marási mélység nagymértékben függ a mart anyag szerkezetétől. Ezért kötött anyagtalajokban a 40 cm mély marási mélység nem mindig érhető el. Így pl. a Stehr cég kisebb gépe is jól alkalmazható, ha csak 15-20 cm mély stabilizációt tervezünk. Ennél nagyobb mélység esetén viszont már csak a nagyobb vontatót igénylő talajmarók jöhetnek szóba.

A keskeny földutakon olyan kötőanyag tartállyal rendelkező adagoló berendezést célszerű használni, amely a kötőanyagot tárolni tudja és így a pormentes építés is megvalósítható. E tekintetben arányosnak és jó megoldásnak tűnik a Stehr cég kötőanyag adagolója és tárolója (31. ábra), amely a vontató gépre felszerelhető és így a kötőanyag adagolását és a marást is ugyanaz a gép (vontató) végezheti el.

A vontatón, a talajmarón és a kötőanyag adagolón kívül szükség van még gréderre és hengerre is, amikkel a finom földmunka és a tömörítés elvégezhető. Tömörítés nélkül a mészsztabilizáció önmagában kedvezőtlenebb körülményeket teremt, mint amilyenek a felmarás és mésszel való átkeverés előtt voltak. A mésszel kevert talajt 15 tonnás gumihengerrel, minimum 2 hengerjáratlall kell előtömöríteni. Ezután nehéz földmunkahengerrel, két hengerjáratlall kell elvégezni a mélytömörítést (nagy amplitúdó, kis frekvencia). A mélytömörítés után gréderrel kell kialakítani a felület végső profilját. Végül újból nehéz földmunkahengerrel kell megadni a réteg végső tömörségét, minimum két hengerjáratlall. A 15 tonnás gumihengerrel, három hengerjáratlall a felület zárását végezzük el (Péterfalvi 2009, 2010).

## 11. Mészstabilizációs típus pályaszerkezetek

A méréssorozatok valamint a szubjektív megfigyelések segítségével elkészíthető a mézstabilizációs pályaszerkezetek típuskatalógusa erdészeti feltáróutak számára. A katalógus a forgalom, a mézszadagolás valamint a vastagság függvényében adja meg az alkalmazható pályaszerkezetet.

### 11.1. A forgalmi terhelési osztály meghatározása

Az eddigi kutatások szempontjából az erdészeti feltáró utak öt terhelési osztályba (TO) sorolhatóak. A tervezési forgalmat (TF) a 100 kN-os egységtengelyek tervezési élettartalma alatt várható összes száma alapján lehet felvenni.

Terhelési osztály (TO)	TF ( $F_{100}$ )
A <sub>1</sub>	< 5000
A <sub>2</sub>	5000 – 10000
A <sub>3</sub>	10000 – 15000
A <sub>4</sub>	15000 – 20000
A <sub>5</sub>	20000 – 25000

Példa:

A tervezési forgalom TF = 12775 db egységtengely, ennek megfelelően az út az A<sub>3</sub> terhelési osztályba sorolandó.

### 11.2. Mészstabilizációs réteg tervezése

A teherbírás szempontjából mértékadó a meglévő vagy tervezett földmű felső 50 cm vastag rétegének talaja. Ha a talaj tervezési teherbírása nem éri el a 30-40 MPa értéket, akkor javítóréteg tervezése szükséges. A mézstabilizációs javítóréteg tervezéséhez szükséges adatokat a lenti 11. táblázat tartalmazza.

Mész (%)	2%	3%	4%	5%	6%
h (cm)	E <sub>2</sub> (MPa)	E <sub>2</sub> (MPa)	E <sub>2</sub> (MPa)	E <sub>2</sub> (MPa)	E <sub>2</sub> (MPa)
15	35	40	45	50	55
20	40	45	50	55	60
25	45	50	55	60	65
30	50	55	60	65	70
35	55	60	65	70	75

11. táblázat. Mészstabilizációs javítóréteg tervezése

### 11.3. A típus pályaszerkezetek kiválasztásának szempontjai

A típus-pályaszerkezetek csak akkor alkalmazhatóak, ha a földmű építési előírásai teljesülnek és a pályaszerkezet víztelenítése megoldott. A megfelelő típus kiválasztásánál a helyi lehetőségeket, a gazdaságosságot és a fenntarthatóságot figyelembe kell venni. A típus-pályaszerkezeteket a 12. táblázat mutatják be.

A szemcsés anyagból készülő makadám rendszerű pályaszerkezetek esetében a kész burkolatalapokat át kell adni a forgalomnak egy hónapra, hogy az utántömörödés jelentős része lezajljék. Erről forgalomtereléssel gondoskodni kell. Ezalatt az építési hiányosságok előjönnek és javíthatóvá válnak.

A kísérleti pályaszerkezetek bebizonyították, hogy a kontrolszakaszhoz képest jelentősen ellenállóbbak a forgalom hatására és megfelelő alapot biztosítanak a makadám rendszerű pályaszerkezetek számára. Ezért a mésztabilizációt elsősorban javított földműnek tekinthetjük, amit a korona teljes szélességében kell megépíteni. A padkát is mésztabilizációból célszerű megépíteni, mert így biztosítható a szükséges oldalmegtámasztás. A mérési eredmények egyértelműen kimutatták, hogy a mésztabilizációs rétegek nem képesek teljes mértékben kikapcsolni az alattuk elhelyezkedő gyenge teherbírású altalajok hatását, ezért nagymértékű alakváltozások jöhetnek létre. Ezért az aszfalt pályaszerkezetek építését teherbírás növelő hatásának ellenére sem javasolható.

Terhelési osztály (TO)	Mésztabilizációs javítóréteg felszínén mért teherbírás			
	40-45 (MPa)	50-55 (MPa)	60-65 (MPa)	70-75 (MPa)
A <sub>1</sub>	20 cm FZKA <sup>2</sup>	15 cm FZKA	10 cm FZKA	5 cm FZKA
A <sub>2</sub>				
A <sub>3</sub>	25 cm FZKA	20 cm FZKA	15 cm FZKA	10 cm FZKA
A <sub>4</sub>				
A <sub>5</sub>	30 cm FZKA	25 cm FZKA	20 cm FZKA	15 cm FZKA

12. táblázat. Mésztabilizációs típuspályaszerkezetek

<sup>2</sup> Folytonos szemeloszlású zúzottkőből (FZKA)



## 12. Összefoglalás

A tanulmányban bemutatott kutatási eredmények és építési tapasztalatok eredményeit célszerű a gyakorlati élet számára összegezni.

### 12.1. Laborvizsgálat

A tervezési munka a talajfeltárással kezdődik. A kezelést igénylő talajból mintát kell venni és abból az alábbi vizsgálatokat kell elvégezni (Tárczy, 2007):

- Plasztikus index ( $I_p$ ) meghatározása MSZ 14043-3 szabvány szerint.  $I_p \geq 15\%$  esetén a kezeléstől intenzív teherbírás növekedés várható.  $10\% \leq I_p \leq 15\%$  értékek közötti talaj kezelésekor mérsékelt teherbírás növekedés várható.
- Proctor- féle tömörítési vizsgálat MSZ 14043-7 szerint.
- Szerves anyag tartalom meghatározása MSZ 14043-9 szabvány szerint.

A talajvizsgálati adatokból megállapíthatjuk, hogy van-e lehetőség mészstabilizációra, ha igen, milyen mészféleséget kell alkalmazni, szükség van-e ezenkívül még hidraulikus adalék hozzáadására is. Ezután különböző mészadagolással (2%-4%-6%) CBR mintákat készítünk és megfigyeljük, hogy milyen mészadagolásnál érjük el a legkiválóbb teherbírás eredményeket 3 (lehetőség esetén 28) napos korban.

### 12.2. Méretezés

A meghatározott mészadagolás ismeretében a 11. táblázat segítségével megtervezhetjük a szükséges mészstabilizáció vastagságát. A kiválasztott vastagság és mészadagolás együtt megadja a várható felületi modulus nagyságát. A mészstabilizációs réteg várható teherbírása és a forgalmi terhelési osztály ismeretében pedig már kiválaszthatjuk a minimálás FZKA réteg vastagságát a 12. táblázatból.

### 12.3. Kivitelezés

A mészstabilizáció csak megfelelő célgépek segítségével építhető meg elvárt homogén minőségben. A WIRTGEN, HAMM-RACO, BOMAG G+ típusú professzionális marógépek a talaj fellazítását és az elterített kötőanyag összekeverését egy lépcsőben meg tudják oldani. Az erdészeti gyakorlatban ezek a gépek méretükből adódóan nem a legpraktikusabbak, ezért inkább a mezőgazdasági vontatóra (vezérgép) szerelhető speciális adapterekből (talajmarókból) célszerű a talajstabilizációs gépláncot kialakítani. A mésszel történő talajstabilizáció eredményes kivitelezéséhez szükséges, hogy a vezérgép megfelelő teljesítménnyel rendelkezzen. A vontató névleges teljesítményének legalább 200 lóerő körül kell lennie, és fontos, hogy mászó fokozattal rendelkezzen!

A javítandó felületet egyenesben min. 4% oldalesés mellett kell kialakítani. A mész terítését kötőanyagszóró célgép segítségével – ritkán, kis felületeknél kézzel – vagy mésztej felhasználása esetén közvetlenül a talajmaró keverőterébe juttatva lehet elvégezni. Gépi terítés előtt a kiszórt mész mennyiségét  $0,5 \text{ m}^2$  alapterületű tálca segítségével tudjuk meghatározni. 500 m/terítési sávonként kell ellenőrizni. Előírás  $\pm 10\%$ , szemben az elméleti értékkel. Hosszirányban 1,0 m és átlapolással, keresztirányban 0,25 m átlapolással kell dolgozni úgy, hogy kötőanyag az átlapolásokra is csak egyszer kerülhet (Tárczy, 2007).

A tömörítést legalább 12 tonnás vibrohengerekkel kell végrehajtani. Nagy amplitúdójú, kis frekvenciájú vibro tömörítést követően. Gréderezéssel kell a végső profílkialakítani. Ezután kis amplitúdóra és nagy frekvenciára állított tömörítő géppel kell a végső tömörítést elvégezni, acél palástú tömörítő hengerrel, majd a felületet gumihengerrel be kell simítani (Tárczy, 2007).

### 13. Irodalomjegyzék

- 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.
- Garg, N. and Thompson, M. R. (1998): Mechanistic-empirical evaluation of the Mn/ROAD low volume road test sections. University of Illinois, Urbana, USA
- Herpay Imre (1967): Erdei utak pályaszerkezetének méretezése az új hazai utasítás szerint, Az Erdő, XVI. évf. 8. szám, pp. 337-345
- Kézdi A. és Nagyváti B. (1967): Stabilizált talajok szilárdsága. Mélyépítéstudományi Szemle, XVII évf. 11. sz. 481-488 o.
- Kézdi Árpád (1967): Stabilizált földutak, Akadémiai Kiadó, Budapest
- Kosztka M. (1989): A Makk-pusztai kísérleti úton végzett megfigyelések a vékony útpályaszerkezetek tönkremenetelének folyamatáról. Erdészeti és Faipari Tudományos Közlemények, (2): 25-36.
- Kosztka M. (1993): Erdőfeltárás a társadalmi változások és a többcélú erdőgazdálkodás feltételei között. Kézirat. Sopron.
- Kosztka M. (1996): A természetközeli, többcélú erdőgazdálkodás műszaki fejlesztése. Erdészeti lapok, (131. évf.) 9. sz. 274-276. old.
- Kosztka M. (2004): Agyagtalajok stabilizálhatósága mésszel. Kutatási jelentés. Sopron.
- Kosztka M. (2006): Teherbírásváltozások a meszes talajstabilizációs alappal készített pályaszerkezeteken. Kutatási jelentés.
- Kosztka M., Markó G., Péterfalvi J., Primusz P. (2008): Kötött talajon épített erdészeti kísérleti út. XXXII. MTA-AMB K+F Tanácskozás, Gödöllő.
- Kosztka M., Péterfalvi J., Markó G., Primusz P. (2006): A kötött talajok stabilizálására javasolt technológiák. Kutatási jelentés, Sopron, p. 51
- Kosztka Miklós (2006): Choosing Building Materials in the Process of Pavement Planning, Present and Future of Forest Opening-Up and Hydrology. Proceedings of the International Science Conference. Sopron, Hungary. 21th–22th September 2006. p: 104-111.
- Kosztka Miklós (2009): Erdészeti útépítés, Erdészeti utak építése, Országos Erdészeti Egyesület, Egyetemi tankönyv, Budapest
- Központi Statisztikai Hivatal (KSH), adatbázisa, 2013. [www.ksh.hu](http://www.ksh.hu)
- 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
- Lehotzky Kálmán (1962): A mezőgazdaság és a közlekedés, Mérnöki Továbbképző Intézet, Előadássorozatok: 4079, Kézirat, Budapest
- 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, Lime stabilization & Lime modification
- 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 részjelentés I., BME Útépitési Tanszék, Budapest
- Pankotai G., Herpay I. (1965): Erdészeti szállítástan, Mezőgazdasági Kiadó, Egyetemi tankönyv, Budapest
- Péterfalvi J. (szerk.) (2009): A meszes talajstabilizáció alkalmazhatóságáról földutakon, a ZALAERDŐ Zrt. Vöröspart-Magyarföld közötti földútjának példáján. Kutatási jelentés. NYME-ERFARET Nonprofit Kft. Sopron, 2009. 36 o.
- Péterfalvi J. (szerk.) (2010): A meszes talajstabilizáció alkalmazásának feltételei a Zalaerdő Zrt. Vöröspart-Magyarföld földútja stabilizált szakaszának tapasztalatai alapján. Kutatási jelentés. NYME-ERFARET Nonprofit Kft. Sopron, 2010. 20 o.
- Péterfalvi J., Primusz P., Markó G., Kisfaludi B., Kosztka M. (2014): Mésszel stabilizált földmű hatásainak vizsgálata egy kísérleti útszakaszon. Erdészettudományi Közlemények 4 (1): 119-134.
- Primusz P., Péterfalvi J., Kisfaludi B., Kosztka M. (2015): Meszes talajstabilizáció alkalmazásának tapasztalatai az erdészeti útépitésben, In: Szendefy János, Vámos Máté (szerk.) 4. Kézdi Konferencia. pp. 192-200. (ISBN:978-963-313-180-0)
- Szilágyi J. (2014): Erdőfeltárás Somogy megyében. Szerkesztette: Kosztka Miklós. SEFAG Erdészeti és Faipari Zrt. ISBN: 978-963-12-1024-8. 64 o.
- Szodfridt I. (1993): Erdészeti termőhelyismerettan
- Tárczy L. (2007): Meszes talajkezelés. Közúti és mélyépítési szemle, (2): 26-28.
- Thompkins, D. and Khazanovich, L. (2007): MnROAD lessons learned, Final report. Minnesota Department of Transportation Research Services Section, Minnesota, USA
- Vágvölgyi A. (2013): Fás szárú energetikai ültetvények helyzete Magyarországon napjainkig; üzemeltetésük, hasznosításuk alternatívái. Doktori értekezés, Sopron, 195 o.