



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

# **Hulladékok geotechnikai hasznosítása**

**TALAJMEREVÍTÉS, ERŐSÍTÉS, STABILIZÁLÁS HULLADÉKOKKAL**

**TALAJSZILÁRDÍTÁS, FÉMEK FIZIKAI IMMOBILIZÁCIÓJA  
SZENNYEZETT TERÜLETEN**

## **Irodalmi áttekintés**

Készítette: Vaszita Emese (BME-ABÉT)

# Összefoglaló táblázat

	Hulladék	Felhasználás	Módszerek	Referencia
<b>TALAJMEREVÍTÉS, ERŐSÍTÉS, STABILIZÁLÁS HULLADÉKOKKAL</b>				
1.	<b>MgO (égetett magnézia), hamu villamos energia előállítására használt rizspelyva égetésből, hamu gabonaszalma égetésből hamu széntüzelési erőműből hamu acélgyártásból, gipsz, aluminát tartalmú kitöltő anyag (aluminiumgyártás melléktermék)</b>	Duzzadó talajok (agyagos) megerősítése (duzzadóképesség csökkentése, talajmechanikai tulajdonságok javítása) ipari adalékanyagokkal és melléktermékekkel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Talaj geotechnikai vizsgálata:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Atterberg határok meghatározása</li> <li>○ Proctor teszt</li> <li>○ duzzadóképesség meghatározás ödométerrel</li> </ul> </li> <li>• Adalékanyagok kémiai összetételének vizsgálata</li> <li>• Talaj + adalék keverék kétlépcsős kezelése:               <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Proctor teszt,                   <ul style="list-style-type: none"> <li>○ alakváltozási jellemzők (duzzadóképesség) meghatározása ödométerrel 1 nap megkötési idő után,</li> <li>○ a leghatékonyabb kombináció kiválasztása a következő lépéshez</li> </ul> </li> <li>2) egytengelyű nyomás mérése UNE 103400 szerint (AENOR, 1993) 7, 14 és 28 nap keményedési idő után</li> </ol> </li> </ul>	Seco, A, Ramirez, F, Miqueleiz, L, Garcia, B. <i>Applied Clay Science</i> 51 (2011) 348-352
2.	<b>Pernye szennyvíziszap égetésből (erőművi pernyék helyett) és mészhidrát keveréke</b>	Lágy, kötött altalaj geotechnikai tulajdonságainak javítása 4:1 arányú szennyvíziszap pernye és mészhidrát keverék talajhoz adagolásával	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Szennyvíziszap-égetés 800 C<sup>0</sup></li> <li>• Szennyvíziszap pernye és mészhidrát 4:1 arányú összekeverése és talajhoz adagolása 0%, 2%, 4%, 8%, 16% arányban</li> <li>• Pernye és mészhidrát vizsgálata:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ pH mérés,</li> <li>○ kémiai összetétel vizsgálat EDS (<i>Energy-dispersive X-ray spectroscopy</i>)</li> <li>○ röntgendiffraktometria vizsgálat</li> <li>○ TCLP (<i>Toxicity characteristic leaching procedure</i>) vizsgálat</li> </ul> </li> <li>• Talaj és talaj + adalék keverék vizsgálata:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ pH mérés,</li> <li>○ Atterberg határok meghatározása, tömörítési teszt,</li> <li>○ egytengelyű nyomás mérése,</li> <li>○ Kaliforniai teherbírási tényező meghatározása CBR (Californian Bearing Ratio). duzzadóképesség meghatározása,</li> <li>○ pásztázó elektronmikroszkópos</li> </ul> </li> </ul>	Deng-FOng Lin, Kae-long lin, Min-Jui Hung, Huam-Lin Luo: <i>J. of Hazard. Mater.</i> 145 (2007) 58-64

			(SEM) és röntgendiffrakciós szerkezetvizsgálat (XRD)	
3.	<b>Finom és durva gumiabroncs apríték keverék</b>	Kohéziós, agyagos talajba kevert gumiabroncs apríték könnyű töltés kialakítására	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agyagos talaj térfogatsűrűsége, szemcsemérete, talajtípus meghatározása (USCS szerint), gumiabroncs apríték szemcseméret meghatározása</li> <li>• Atterberg határok meghatározása agyagos talajon és a finom gumiabroncs aprítéken: plasztikus határ, folyási határ, zsugorodási határ meghatározása,</li> <li>• Agyagos talaj, valamint a talaj-apríték keverékek áteresztőképesség vizsgálata terheléses rendszerben (46, 93, 185, 287 és 370 kPa nyomáson)</li> <li>• Agyagos talaj, valamint a talaj-apríték keverékek közvetlen konszolidált drénezetlen nyírókísérlet (nyírófeszültség, nyúlás vagy térfogatváltozás meghatározására),</li> <li>• Szabványos Proctor tömörödési teszt (agyagos talajon, talaj és finom gumiabroncs apríték keverékeken, talaj és durva gumiabroncs keverékeken)</li> </ul>	Hasan Cetin, Mustafa Fener, Osman Gunydin, <i>Engineering Geology</i> 88 (2006), 110-120
4.	<b>Hulladék autógumi-abroncsból készült rácsrétegek, „Tirecell”</b>	Talajjavítás, homoktalaj erősítése, merevítése gumiabroncsrács rétegekkel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gumiabroncsrács „Tirecell”előállítás</li> <li>• A homoktalaj fizikai tulajdonságainak vizsgálata: egyenlőtlenségi együttható, homorúsági együttható, legnagyobb száraz térfogatsúly, minimum száraz térfogatsúly, fajsúly, belső súrlódási szög, súrlódási szög aránya</li> <li>• Tirecell-el merevített homok próbatest tárcsás terhelési vizsgálata: teherbíró képesség változása a cellák szélessége, a cellákat összefogó csavarok számának, a merevítő rács homokba terítési mélysége függvényében,</li> <li>• talajmerevítő hatás kifejezése a merevített és merevítetlen talaj teherbíró képességének arányaként, süllyedés meghatározása határteherbírásra</li> </ul>	Yeo Won Yoo et al, <i>Geotextiles and Geomembranes</i> 26 (2008) 100-107
5.	<b>Vörösiszap, valamint vörösiszap és cement keveréke</b>	Természetes agyag szigetelőréteg stabilizálása adalékanyaggal geotechnikai célra	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atterberg határok meghatározása (konzisztencia határok meghat.),</li> <li>• Tömörítési teszt,</li> <li>• Egytengelyű nyomószilárdság teszt (nyomószilárdság meghatározása),</li> <li>• Vezetőképesség teszt (hidraulikus vezetőképesség meghatározása),</li> <li>• Függőleges duzzasztási teszt (duzzadás %)</li> </ul>	Ekrem Kalkan. <i>Engineering Geology</i> 87 (2006) 220-229

<b>TALAJSZILÁRDÍTÁS FÉMEK FIZIKAI IMMOBILIZÁCIÓJA SZENNYEZETT TERÜLETEN</b>			
<b>6.</b>	<b>Cementfajták (kalcium aluminát cement, portland cement, pozzolán cement) és adalékanyagok (plasticizers, fibers, acrylic polymers, non-ionic detergent) keveréke</b>	Fémekkel szennyezett talaj stabilizálása/szilárdítása hatékonyságának modellezése fém-kilúgzás és diffúzió csökkentésére.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cement és talaj keverék próbatestek előállítás</li> <li>• Mechanikai szilárdság meghatározása (téglalap alakú monolitkocka próbatesten)</li> <li>• Fémek egyensúlyi kilúgzása ionmentes vízbe</li> <li>• Fémek egyensúlyi kilúgzása TCLP oldatban (toxicity characterisitic leaching procedure)</li> <li>• Fémtömeg átvitel meghatározás</li> </ul>
			Grega E Voglar and Domen Lestan. <i>J. of Hazard. Mater.</i> 192(2011)753-762

(Publikációk összefoglalása)

## GEOTECHNIKAI ALKALMAZÁSOK

### TALAJMEREVÍTÉS, ERŐSÍTÉS, STABILIZÁLÁS HULLADÉKOKKAL

#### 1. Duzzadó (agyagos) talajok megerősítése ipari adalékanyagokkal és melléktermékekkel

A duzzadó, agyagos talaj térfogata nagymértékben változik a talaj nedvességtartalmának függvényében, ezért alkalmatlan infrastruktúra és épületek telepítésére. A talaj duzzadókéességének csökkentésére a szakirodalom kimerítően tárgyalja a mészt, pernye vagy cement használatát adalékanyagként. Ezen kívül, más adalékanyagok alkalmazására is folynak kísérletek. Spanyol kutatók (*Seco et al, 2011*) kétlépcsős laboratóriumi kísérletben vizsgálták, a mészt mellett, további ipari és mezőgazdasági eredetű melléktermék hatását, nagyon duzzadó agyagos talajra. Első lépésben, a talaj duzzadókéességének csökkentésére koncentráltak, míg a másodikban a kezelt talaj mechanikai tulajdonságainak javítására, teherbíró kéességének növelésére a puzzolán aktivitás növelésével.

A kísérletben a következő adalékanyagokat használták: MgO (égetett magnézia), hamu villamos energia előállítására használt rizspelyva égetésből, hamu gabonaszalma égetésből, hamu széntüzelési erőműből, hamu acélgyártásból, gipsz, alumínium gyártás melléktermékeként keletkezett aluminát tartalmú kitöltő anyag. Az adalékanyagok duzzadáscsökkentő hatását a referenciaként használt mészt (82% Ca(OH)<sub>2</sub> tartalmú) viszonyították.

A kísérletben vizsgált talaj-adalékanyag kombinációk az alábbiak:

kezeletlen talaj, talaj+2% mészt, talaj+4% mészt, talaj+2% égetett magnézia, talaj+4% égetett magnézia, talaj+1% mészt+2% égetett magnézia, talaj+2% mészt+1% égetett magnézia, talaj + 5% rizspelyva hamu, talaj +5% széntüzelési erőmű hamu, talaj+5% gipsz, talaj+5% hamu acélgyártásból, talaj+5% aluminát kitöltő anyag

Az eredmények azt mutatták, hogy több adalékanyag kombináció, de különösen a 2% mészt +1% égetett magnézia keveréke csökkentette a legnagyobb mértékben a kezelt talaj duzzadókéességét. A talaj duzzadókéességének csökkentésével egyidejűleg a kezelt talaj egyirányú nyomása a kezeletlenhez viszonyítva háromszoros lett. A talaj mechanikai tulajdonságainak javítását célzó kezelésekt az első lépcsőben kiválasztott mintákon minden esetben a talaj tömörödési hajlamának kétszeres és maximum négyszeres csökkenését eredményezték a kezeletlen talajhoz képest. E szempontból különösen hatékonynak bizonyult a mészt és rizspelyva hamuval, valamint az égetett magnézia és rizspelyva hamuval való kezelés.

A következő vizsgálati módszereket használták:

**Agyagos talaj:**

- ásványtani összetétel vizsgálat
- geotechnikai vizsgálatok:
  - Atterberg határok meghatározása (plasztikus határ, folyási határ),
  - Proctor teszt (egytengelyű nyomás),
  - Duzzadóképeség meghatározás ödométerrel

**Adalékanyagok:**

- kémiai összetétel vizsgálat

**Kezelt talaj:**

1) talaj duzzadóképeségének kezelése/csökkentése, adalékanyag- kombinációkkal, különböző arányban

- geotechnikai vizsgálatok:
    - Proctor teszt: próbatestek szabvány tömörségének meghatározása
    - alakváltozási jellemzők (duzzadóképeség) meghatározása ödométerrel 1 nap megkötési idő után
- 2) a puzzolán hatás növelése a kiválasztott kezelt próbatestekben
- geotechnikai vizsgálatok:
    - egytengelyű nyomás mérése UNE 103400 szerint (AENOR, 1993) 7, 14 és 28 nap keményedési idő után

**Forrás:**

Seco, A, Ramirez, F, Miqueleiz, L, Garcia, B. Stabilization of expansive soils for use in construction, *Applied Clay Science* 51 (2011) 348-352

## 2. Szennyvíziszap pernye/mészhidrát adalék kötött, lágy altalaj mechanikai tulajdonságainak javítására

Kötött, lágy altalaj tulajdonságainak és szilárdságának javítására szennyvíziszap égetésből származó pernye és méshidrát keverékét vizsgálták (Deng-Fong Lin et al, 2007) laboratóriumi kísérletben. A kísérlet célja helyettesíteni az eddig talajszilárdításra használt erőművi pernyét a szennyvíziszap pernyével, mely az egyre növekvő mennyiségben keletkező szennyvíziszap égetésének terméke.

A kísérletben használt szennyvíziszapot 800 C<sup>0</sup>-on égették. Az így kapott pernyét 4:1 arányban keverték össze méshidráttal és 0%, 2%, 4%, 8% 16% tömegarányban adagolták a talajhoz.

A szennyvíziszap pernye és méshidrát mechanikai talajstabilizáló hatását két mechanizmusnak köszönheti:

1. puzzolán reakció a Ca(OH)<sub>2</sub> és a pernye aktív anyaga (elsősorban az SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) közötti reakció, melynek során a kezelt talaj megszilárdul
2. flokkuláció-aglomeráció, mely során a vízben oldott Ca<sup>2+</sup> ion helyettesíti a dupla agyagrétegek felületén található egy vegyértékű hidrogén iont, ezzel megakadályozza a kettős réteg duzzadását, csökkenti a talaj általi víz abszorpciót és nagyobb talajrészecskéket eredményez a talajrészecskék közötti taszító erő csökkentésével.

Az adalékanyagokat az alábbi vizsgálatoknak vették alá:

- pH mérés,
- kémiai összetétel vizsgálat
  - EDS (*Energy-dispersive X-ray spectroscopy*) félkvantitatív analízis Si, Al, Fe jelenlétét mutatta ki a pernyében

- röntgendiffraktometria vizsgálat 84-95% Ca(OH)<sub>2</sub> és 5% CaO tartalmat mutatott ki a mészhidrátban
- TCLP (*Toxicity characteristic leaching procedure*) vizsgálat kimutatta a kioldott fémkoncentrációkat Cd: 0.03 mg/L; Cu: 0.25 mg/L; Cr: 0.24 mg/L; Pb: 0.54 mg/L; Zn: 16.75 mg/L, melyek a kínai környezetvédelmi határérték alatt voltak

A kezeletlen valamint a kezelt talajok geotechnikai tulajdonságait az alábbi mérésekkel követték:

- a kezelt és kezeletlen minták pH mérése 3 óra, 3,7,14,21 és 28 nap megkötési idő alatt
- Atterberg határok meghatározása (plasztikus határ, folyási határ, plasztikus index)
- tömörítési teszt
- egytengelyű nyomás mérése (3h, 3,7,14,28,56 és 90 nap megkötési idő alatt)
- kaliforniai teherbírási tényező (CBR-California Bearing Ratio) meghatározása, a nyomóteherbírási és a térfogat növekedés megállapításához
- triaxiális nyomás mérése
- pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) és röntgendiffrakciós szerkezetvizsgálat (XRD) kezelt és kezeletlen talajon

A geotechnikai mérések, a kémiai összetétel és szerkezetvizsgálatok alapján a szennyvíziszap pernye/mészhidrát keverék 8% tömegarányban adagolva a talajhoz csökkenti a legjobban a talaj duzzadókéességét. A 8% adagolási arány alkalmas a talaj további geotechnikai tulajdonságainak a javítására is, ezáltal a rossz minőségű talajt, jó minőségű talajjává változtatja. A szennyvíziszap/mészhidrát keverék 95%-al növelte a kezelt talaj teherbírását, ugyanakkor javította a triaxiális nyírószilárdságát, egyirányú nyomószilárdságát, különböző szimulált rétegetterheléses nyomásra.

#### **Forrás:**

Deng-Fong Lin, Kae-Long lin, Min-Jui Hung, Huam-Lin Luo. Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil, *J. of Hazard. Mater.* 145 (2007) 58-64

### **3. Kötött, agyagos talajba kevert gumiabroncs apríték könnyű töltés kialakítására**

Több kutató vizsgálta a gumiabroncs aprítékok építőipari alkalmazását összenyomható (compressible), tömörödéssre hajlamos, gyenge talaj javítására úti támfalak és töltések létesítésére. Azonban, a gumiabroncs apríték optimális szemnagysága, talajhoz való adagolási aránya, valamint a talajtípus tekintetében, további kutatásra van igény. Kötött, agyagos talajba kevert finom (<0.425mm) és durva (2-4,75mm) gumiabroncs apríték geotechnikai tulajdonságait vizsgálta Ceting (*Ceting et al* 2006) egy talajmechanikai kísérletsorozatban, könnyű töltőanyag létrehozására (autópálya töltés, híd alátámasztási anyag és támfal tömedékelésére) kötött, agyagos talajon.

A kísérlet az alábbi talaj + gumiabroncs apríték (w%) keverékeket vizsgálta: agyag, agyag+10% finom gumiabroncs apríték, agyag+20% finom gumiabroncs apríték, agyag+30% finom gumiabroncs apríték, agyag+40% finom gumiabroncs apríték, agyag+50% finom gumiabroncs apríték, 100% finom gumiabroncs apríték, agyag+10% durva gumiabroncs apríték, agyag+20% durva gumiabroncs apríték, agyag+30% durva gumiabroncs apríték, agyag+40% durva gumiabroncs apríték, agyag+50% durva gumiabroncs apríték, 100% durva gumiabroncs apríték.

A kísérletben használt vizsgálati módszerek:

- Agyagos talaj térfogatsűrűsége, szemcsemérete, talajtípus meghatározása (USCS szerint), gumiabroncs apríték szemcseméret meghatározása

- Atterberg határok meghatározása agyagos talajon és a finom gumiabroncs aprítékon: plasztikus határ, folyási határ, zsugorodási határ meghatározása,
- Agyagos talaj, valamint a talaj-apríték keverékek áteresztőképesség vizsgálata terheléses rendszerben (46, 93, 185, 287 és 370 kPa nyomáson)
- Agyagos talaj, valamint a talaj-apríték keverékek közvetlen konszolidált drénezetlen nyírókísérlet (nyírófeszültség, nyúlás vagy térfogatváltozás meghatározására),
- Szabványos Proctor tömörödési teszt (agyagos talajon, talaj és finom gumiabroncs apríték keverékeken, talaj és durva gumiabroncs keverékeken)

Az eredmények szerint a talaj nyírószilárdsága maximum 30%-al nő a finom, és 20%-al a durva gumiabroncs apríték hatására. A nyírószilárdság nő a merőleges nyomás növekedésével. A talaj kohéziója (összetartó erő) nő, úgy a finom, mint a durva gumiabroncs apríték 40% tömegarányú adagolásáig, a belső súrlódási szög pedig csökken. Azonban 40 % fölött csökken a kohézió és nő a belső súrlódási szög. A merőleges nyomás növekedésével, úgy a finom, mint a durva apríték adagolása csökkent a függőleges feszültséget a talajban. A kezelt talaj áteresztőképessége nő (eléri a homok áteresztőképességét) a merőleges nyomás és a hozzáadott gumiabroncs apríték % növekedésével, ami alkalmassá teszi autópálya töltésanyagként.

Az eredményekből következik tehát, hogy talajvízszint fölött, ahol könnyű, kis áteresztőképességű és nagy szilárdságú töltőanyagra van szükség (mint például autópálya töltéseknél, híd alátámasztásnál és támfal tömedékeléséhez) maximum 20% durva és maximum 30% finom gumiabroncs apríték keverék a legoptimálisabb, főleg akkor, ha az altalaj kis teherbíró képességű és süllyedésre hajlamos. Abban az esetben, ha drénezni kell, azért, hogy vízzel telített környezetben a pórusnyomás ne növekedjen, a talaj+gumiabroncs aprítékhoz nagy áteresztőképességgel rendelkező anyagot lehet, keverni, például homokot és kavicsot.

#### **Forrás:**

Hasan Cetin, Mustafa Fener, Osman Gunaydin. Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material, *Engineering Geology* 88 (2006), 110-120

#### **4. Talajjavítás, homoktalaj erősítése, merevítése gumiabroncsrács rétegekkel**

Homokos talaj erősítésére, merevítésére új módszert dolgoztak ki dél koreai kutatók (C.W.Yoo et al, 2008) hulladék autógumi abroncs felhasználásával. Autógumi abroncs alsó és felső falát eltávolították és a maradék lapos, nagy átmérőjű abroncsot összefogva 1 db 8-as alakú egységet alakítottak ki. Ezeket a 8-as alakú egységeket csavarral összekapcsolva hozták létre a gumiabroncsrácsot (Tirecell), amely több 8-as egységből áll és a kereskedelemben kapható georácshoz (Geocell) hasonló módon használható. A Tirecell talajmerevítő hatását homokos talajra a georáccsal összehasonlítva vizsgálták kísérleti kamrában. Megvizsgálták a Tirecell fizikai tulajdonságait, a homok fizikai tulajdonságait (egyenlőtlenlenségi együttható, homorúsági együttható, legnagyobb száraz térfogatsúly, minimum száraz térfogatsúly, fajsúly, belső súrlódási szög, súrlódási szög aránya, szemcseméret eloszlás).

Tirecell-el merevített homok próbatestet tárcsás terhelési vizsgálatnak vetették alá. A kísérlet során követték a teherbíró képesség változását a cellák szélessége, a cellákat összefogó csavarok száma és a merevítő rács homokba terítési mélysége függvényében. Ahhoz, hogy a terhelési vizsgálat eredményei összehasonlíthatóak legyenek a georács használatával mért értékekkel, a talajmerevítő hatást, valamint a süllyedést határteherbírássra, a merevített és merevítetlen talaj teherbíró képességének arányaként fejezték ki. Az eredmények azt

mutatták, hogy a Tirecell-el merevített homok teherbíró képessége nagyobb, mint a georáccsal merevített homoké, ugyanakkor a süllyedése határteherbírásra kisebb.

**Forrás:**

Yeo Won Yoo, Seung Beom Heo, Keun Soo Kim. Geotechnical performance of waste tires for soil reinforcement from chamber tests. *Geotextiles and Geomembranes* 26 (2008) 100-107

## 5. Természetes agyag szigetelőréteg stabilizálása vörösiszappal geotechnikai alkalmazásra

A szilikapor (szilikafüst), erőművi pernye és egyéb hulladék és melléktermék geotechnikai hasznosítását kimerítően tárgyalja a szakirodalom. Ehhez képest kevesen vizsgálták a vörösiszap hatását természetes agyag szigetelőrétegek geotechnikai tulajdonságaira. Kalkan (2006) laboratóriumi kísérletben tanulmányozta az agyag+vörösiszap, valamint agyag+vörösiszap+cement, különböző arányú keverékén, egy geotechnikai célra alkalmas új összetett szigetelőanyag fejlesztésének lehetőségét. A kísérlethez egyesített mintákat készítettek, melyben az adalékanyagok arányát a minta teljes száraz tömegének függvényében határozták meg. Az egyesített mintákban a vörösiszap aránya 5%, 10%, 15%, 20% és 50% tömegszázalék, míg cement aránya 1%, 2,5% és 5%. A kísérleti mátrix 24 mintát tartalmazott, amelyben a kezeletlen agyagmintán (1 db) kívül a csak 5%, 10%, 15%, 20% és 50% (5 db) vörösiszappal kezelt, valamint a csak 1%, 2,5% és 5% (3 db) cementtel kezelt agyagminta, és ezek kombinációi (15 db) szerepeltek.

A leghatékonyabb keverék kiválasztására az alábbi vizsgálatokat végezték el:

- Az agyag, a vörösiszap és mészkémiai összetételének vizsgálata
- Az agyag, a vörösiszap és mészkémiai szemcseméret eloszlás vizsgálata
- Atterberg határok meghatározása (konzisztencia határok meghatározása 2 és 7 nap után) (ASTM D 4318 szerint)
- Tömörítési teszt a tömörödési paraméterek meghatározására (maximum száraz sűrűség, optimális, nedvességtartalom (Proctor teszt - ASTM D 698)
- Egytengelyű nyomószilárdság teszt (nyomószilárdság meghatározása) (STM 2166)
- Vezetőképesség teszt (hidraulikus vezetőképesség meghatározása) (ASTM D 5084)
- Függőleges duzzasztási teszt (duzzadás %) (ASTM 4546-90)

A vizsgálati eredmények azt mutatták, hogy a vörösiszap+cement alkalmazása javította a kezelt minta nyomószilárdságát, növelte az egytengelyű nyomószilárdságát, csökkentette képlékenységét (nagyon képlékeny kategóriából, kevésbé képlékeny kategóriába), csökkentette vezetőképességét és függőleges duzzadását (23,6%-ról 1.6 %-ra).

A vizsgálatokból következik, hogy a vörösiszap+cement együttesen alkalmazható geotechnikai célokra és egy összetett agyag szigetelőanyag előállítására. A vörösiszap pedig gazdaságos alternatívát jelent a természetes agyag szigetelőrétegek módosítására, szilárdítására.

**Forrás:**

Ekrem Kalkan. Utilization of red mud as stabilization material for the preparation of clay liners. *Engineering Geology* 87 (2006) 220-229



# TALAJREMEDIÁCIÓS TECHNOLÓGIA GEOTECHNIKAI MÓDSZEREKKEL FÉMEK FIZIKAI IMMOBILIZÁCIÓJA SZENNYEZETT TERÜLETEN

## 6. Különböző cementfajta és adalékanyag keverék hatékonyságának modellezése fémekkel szennyezett talaj stabilizálására/szilárdítására.

A talajszilárdítás/stabilizálás kötőanyagok (Portland cement, kalcium aluminát cement, kohósalak stb) toxikus fémekkel és félfémekkel szennyezett talajba keverésével hatékony módszernek bizonyult fémekkel szennyezett ipari területeken, mivel a megszilárdított talaj megakadályozza/lecsökkenti a szennyezőanyagok kioldódását. A cementtel + adalékanyagokkal kezelt talaj fizikailag elszigeteli/bezárja a toxikus fémeket, mivel lecsökken a talajfelszín és a beszivárgó víz közötti kontaktus és a kötőanyag hatására kialakult stabil pH-jú környezetnek köszönhetően a toxikus fémek oldhatatlan formában maradnak. A fizikai elszigetelés mellett a talaj-kötőanyag kölcsönhatásnak köszönhetően a szennyezőanyagok kémiai is immobilizálódnak.

A különböző cement és adalékanyag talajba keverésének hatékonyságát általában a kezelés előtt és után vizsgálják a toxikus fémek és félfémek egyensúlyi kioldása és fémtömeg diffúziója alapján. *Voglar és Lestan* (2011) laboratóriumi kísérletben talaj, cement, víz és adalékanyag keverékből álló próbatesteken vizsgálták a stabilizálás/szilárdítás hatékonyságát. A kísérleti mátrix 18 elemből állt, ami három típusú cementet (kalcium aluminát cement, portland cement, puzzolán cement) egyenként, valamint mindegyik cementtípusnak egyenként a négy adalékanyagfajta (két féle plaszticizáló anyag, polipropilén szálak, polimér akril nem ionos detergens) talajjal és vízzel alkotott keverékből alkotott próbatesteket és az adalékanyag mintákat egyenként külön foglalja magába. A vizsgálatokhoz téglalap alakú monolitikocka próbatestek és henger alakú próbatestek készültek. A kezelés hatékonyságának modellezéséhez mechanikai és kémiai vizsgálatokat végeztek el:

- Mechanikai szilárdság meghatározása
- Fémek egyensúlyi kilúgzása ionmentes vízbe
- Fémek egyensúlyi kilúgzása TCLP oldatban (toxicity characterisitc leaching procedure)
- Fémtömeg átvitel (diffúzió) meghatározás

A cementtel kezelt próbatestek mechanikai szilárdságát téglalap alakú monolitikockákon vizsgálták. A Cd, Pb, Zn, Cu, Ni és As egyensúlyi kilúgzását ionmentes vízbe, TCLP oldatba, valamint a fémtömeg átvitelt kezeletlen talajmintákból és henger alakú próbatestekből egyaránt mérték. A TCLP egyensúlyi kilúgzás az *US EPA* (1995) szabvány szerint készült. A fémek kilúgzási képessége, valamint diffúziója változását a kezelt talajban, a kezeletlenhez képest, statisztikai analízissel értékelték ki.

Az eredmények szerint a kalcium aluminát cement csökkentette a leghatékonyabban a fémek kilúgzását és diffúzióját, ugyanakkor, a talaj és kalcium aluminát cement keverékkel készült próbatest mechanikai szilárdsága sokkal nagyobb volt, a portland cementtel, valamint a puzzolán cementtel készült próbatesthez képest. A cement adalékanyagok közül viszont egyik sem járult hozzá nagymértékben a talajstabilizálás/szilárdítás hatékonyságához. Tehát a kalcium aluminát cement és a polimér akril adalékanyag talajhoz adagolva csökkentette a Cd, Pb, Zn, Cu, Ni és As kilúgzását ionmentes vízbe, míg a fémek kilúgzása TCLP oldatba az alábbiak szerint csökkent: Cd: 55 szörösen, Pb: 185 szörösen, Zn: 8750 szörösen, Cu: 214-szeresen, Ni: 4,7 szeresen és As:1,2 szeresen.

Ugyanakkor, ennek a keveréknek köszönhetően, a fémtömeg átvitel a próbatestekből az alábbiak szerint csökkent, fémenként: Cd: 740 szeresen, Pb: 746 szoroson, Zn: 104 000 szeresen, Cu: 4,7-szeresen, Ni: 343- szeresen és As:181-szeresen.

A vizsgálatok azt mutatták, hogy a Cu és az As mindvégig kevésbé stabilizálható, mivel a cementtel kezelt talaj bázikus pórúsvizében oldható Cu hidroxid és kalcium arzenit és arsenát képződik. Ezzel ellentétben, a Zn és az Pb a legerősebben fixálódik a kalcium szilikát anyagban, mivel a Zn és Pb nagyobb affinitással rendelkeznek a cementálás során képződött karbonáthoz. Egyébként a stabilizált/szilárdított talajból leggyakrabban a felszíni kimosódásnak köszönhetően oldódnak ki a fémek.

**Forrás:**

Grega E Voglar and Domen Lestan. Efficiency modeling of solidification/stabilization of multi-metal contaminated industrial soil using cement and additives *J. of Hazard. Mater.* 192(2011)753-762

US Environmental Protection Agency. Test Methods for Evaluation of Solid Waste Laboratory Manual Physical/Chemical methods, SW846, 40 CFR parts 403 and 503, vol. IA, third ed. Office of Solid Waste and Emergency Response (OSWER), Washington DC, 1995