

UDK 625.85:001.5

Primljeno 27. 2. 2007.

Metode stabilizacije slabo nosivog tla pri izgradnji prometnica

Tatjana Rukavina, Vesna Dragčević, Sanja Lopuh, Slaviša Rajić

Ključne riječi

slabo nosivo tlo, stabilizacija, konvencionalni postupci, nekonvencionalni postupci, GeoCreta

Key words

poor capacity soil, stabilization, traditional procedures, unconventional procedures, GeoCreta

Mots clés

sol de faible capacité portante, stabilisation, procédés traditionnels, procédés non conventionnels, GeoCreta

Ключевые слова

слабонесущий грунт, стабилизация, конвенциональные способы, неконвенциональные способы, GeoCreta

Schlüsselworte

schlecht tragfähiger Boden, Stabilisierung, herkömmliche Verfahren, unkonventionelle Verfahren, GeoCreta

T. Rukavina, V. Dragčević, S. Lopuh, S. Rajić

Pregledni rad

Metode stabilizacije slabo nosivog tla pri izgradnji prometnica

U radu je dan kratak pregled konvencionalnih postupaka stabilizacije (vapno, cement) te postupaka u kojima se primjenjuju noviji proizvodi na bazi sintetičkih polimera (primjerice akrilat, polivinil acetat), encimi i biološka sredstva, ionski proizvodi, lignini, smole te ostali tipovi sredstava za stabilizaciju. Također su prikazani rezultati in situ i rezultati laboratorijskih ispitivanja tla stabiliziranog GeoCretom, jednim od novijih proizvoda dostupnih na hrvatskom tržištu.

T. Rukavina, V. Dragčević, S. Lopuh, S. Rajić

Subject review

Methods used for soil stabilization during construction of transportation facilities

A brief overview is given of traditional stabilization procedures (lime, cement) and procedures involving the use of new synthetic-polymer based products (such as acrylate, polyvinyl acetate), enzymes and biological products, ionic products, lignins, resins, and other types of stabilization products. Results of in situ and laboratory testing of soil stabilized with GeoCreta, one of the recent products available on Croatian market, are also presented.

T. Rukavina, V. Dragčević, S. Lopuh, S. Rajić

Ouvrage de synthèse

Méthodes de stabilisation de sol au cours de construction des voies de communication

Un court aperçu est donné des procédés de stabilisation traditionnels (chaux, ciment) et des procédures basées sur l'emploi de nouveaux produits basés sur polymères synthétiques (comme acrylate, acétate de polyvinyle), enzymes et produits biologiques, produits ioniques, résines, et les autres types de produits de stabilisation. Les résultats des essais in situ et en laboratoire obtenus sur le sol stabilisé par GeoCreta, l'un des produits nouveaux disponible sur marché croate, sont également présentés.

T. Рукавина, В. Драгчевич, С. Лопух, С. Райич

Обзорная работа

Методы стабилизации слабонесущего грунта при строительстве дорог

В работе дан краткий обзор конвенциональных способов стабилизации (известь, цемент), а также способов, в которых применяются новейшие продукты на базе синтетических полимеров (например, акрилат, поливинилацетат), энзимы и биологические средства, ионные продукты, лигнин, смолы, а также остальные виды средств для стабилизации. Также показаны результаты in situ и результаты лабораторных испытаний грунта, стабилизированного GeoCreta-ом, одним из новейших продуктов, доступных на хорватском рынке.

T. Rukavina, V. Dragčević, S. Lopuh, S. Rajić

Übersichtsarbeit

Stabilisierungsverfahren für schlecht tragfähige Böden beim Bau von Verkehrswegen

Im Artikel gibt man einen kurzen Überblick über die herkömmlichen Stabilisierungsverfahren (Kalk, Zement) sowie über die Verfahren bei denen neuere Erzeugnisse auf Grundlage sintetischer Polymere (z.B. Akrilat, Polyvinyl-Acetat), Enzyme und biologische Mittel, Ionerzeugnisse, Lignine, Harz und weitere Typen der Stabilisierungserzeugnisse angewendet werden. Dargestellt sind auch die Ergebnisse der in situ- und Labor-Untersuchungen des Bodens stabilisiert mit GeoCreta, eines der neueren Erzeugnisse die auf dem kroatischen Markt erhältlich sind.

Autori: Prof. dr. sc. **Tatjana Rukavina**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Vesna Dragčević**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; **Sanja Lopuh**, ing. građ.; **Slaviša Rajić**, dipl. ing. građ., Institut građevinarstva Hrvatske d.d., Zagreb

1 Uvod

Pri izgradnji prometnica ponekad je nemoguće izbjeći dionice na kojima temeljno tlo ili tlo posteljice ne mogu zadovoljiti minimalne zahtjeve kvalitete koje projekt ili neki opće vrijedeći propis postavljaju na njega i stanje njegove ugrađenosti. U takvim se slučajevima primjenjuju različiti postupci poboljšanja svojstava tala, stabilizacije, dodavanjem određenih veziva ili korekcijom granulometrijskog sastava i mehaničkim zbijanjem. Osim tradicionalno primjenjivanih materijala za stabilizaciju slabo nosivih tala, primjerice vapna kod koherentnih materijala te cementa kod nekoherentnih i onih koji predstavljaju prijelaz od nekoherentnih prema koherentnim materijalima, danas se u svijetu rabe brojni proizvodi na bazi sintetičkih polimernih emulzija, ulja, encima, katarana, bitumena i drugih materijala ili se rabe određena biološka sredstva. Pri tome takvi materijali djeluju samostalno ili u kombinaciji s nekim od tradicionalnih materijala (vapno, cement ili bitumen) pospješujući njihovo djelovanje.

Iako proizvođači sve ove proizvode deklariraju kao vrlo uspješne, u praksi se uspješnost njihove primjene pokazala promjenljivo. Provedena *in situ* ispitivanja uglavnom dokazuju da se primjenom ovih novih vrsta tipova materijala za stabilizaciju slabo nosivih tala postižu određeni učinci, no općenito je ostao nepoznat vijek trajanja ovih učinaka. Povrh toga vrlo se često primjećuje da je količina informacija koju proizvođači netradicionalnih sredstava za stabilizaciju daju inženjerima na gradilištu ili projektantima nedostatna, što rezultira smanjenim povjerenjem korisnika tih proizvoda za stabilizaciju. Široj primjeni netradicionalnih materijala za stabilizaciju bit će nužna prethodno dobro dokumentirana, dugotrajna ispitivanja na izgrađenim probnim dionicama. Pravilno i objektivno izvještavanje o rezultatima ispitivanja svakako će povećati povjerenje prema tim proizvodima te proširiti spoznaje o njihovim ograničenjima ili koristima.

2 Tradicionalni/klasični postupci stabilizacije

Stabilna tla kao što su kameni materijal ili šljunkovito pjeskoviti materijali u zbijenom stanju ne mijenjaju svojstva pod utjecajem vanjskih činitelja ponajprije vode i smrzavice. Nestabilna tla, bilo koherentna bilo nekoherentna, pod djelovanjem vode i smrzavanja mijenjaju svoja svojstva. Osnovni uzrok nestabilnosti nekoherentnih tala, primjerice sipkih jednozrnastih pijesaka, jest odsutnost kohezije između čestica i relativno malo trenje između zrna zbog nedostatka ispune šupljina među zrnima sitnijim materijalom, dok je kod koherentnih tala osnovni uzrok nestabilnosti voda.

Nestabilnost materijala pri građenju vrlo je nepoželjno svojstvo. Tradicionalnim se postupcima stabilizacije po-

najprije nastojalo prevladati ili ograničiti promjenljivost onih svojstava nestabilnih materijala koja su ga činila takvim. Cement i vapno smatraju se materijalima koji su se tradicionalno primjenjivali pri stabilizacijama tla. Mehanička stabilizacija kod koje se korekcijom granulometrijskog sastava i mehaničkim zbijanjem postižu stabilizacijski efekti može se, osim navedenih, svrstati u tradicionalne načine stabilizacije.

Navedeni su se načini stabilizacija dugo proučavali i o njima se zna mnogo ili gotovo sve te će se u nastavku samo kratko osvrnuti na svaki način pojedinačno.

2.1 Stabilizacija tla vapnom

Stabilizacija vapnom može se primjenjivati kod koherentnih glinovitih tala. Vapno nije samostalno vezivo, nego vezivo nastaje iz produkta reakcije vapna i komponenta tla pri čemu mineraloški sastav gline uvelike utječe na jačinu reakcije.

Glinovitom tlu dodano vapno (kalcijev hidroksid) reagira s mineralima gline. Kalcijev hidroksid, vapno, disocira u Ca^+ i OH^- ione. U tlu dolazi do zamjene pojedinih vrsta iona kojima su obložene koloidne čestice glina (kationske izmjene), te se kalcij uključuje u sastav glina, mijenjajući pritom svojstva glinovitog tla. Ova je korekcija brza te je vidljivo gotovo trenutačno poboljšanje obradivosti, mogućnosti zbijanja i početne čvrstoće. Nakon ove reakcije započinje dugotrajna reakcija vapna s aktivnim silikatima i mineralima gline, takozvana pucolanska reakcija. Silikati se razgrađuju, nastaje nova kristalna faza pri čemu nastaju kalcijevi i silikatni hidrati koji sljepljuju zrna tla povećavajući na taj način njegovu čvrstoću.

Općenito se može reći da se dodatkom vapna u tlu izazivaju pojave koje se očituju u sniženju sadržaja vode i indeksa plastičnosti, promjeni granulometrijskog sastava pri čemu tlo dobiva znatno krupnozrnatiju strukturu, promjeni Proctorovih elemenata, smanjenju bubrenja, povećanju posmične čvrstoće te nosivosti izražene CBR-om. Ovako poboljšane karakteristike pokazuju da su vapnom stabilizirane gline jedan nov, mnogo bolji materijal što se onda uvelike odražava na brzinu i kvalitetu građenja.

Vapno se dodaje u količini od 3-5, iznimno do 10% mase suhog tla, odnosno oko 10 – 15 kg/m^2 .

2.2 Stabilizacija tla cementom

Cementom se najučinkovitije mogu stabilizirati nekoherentna tla (prašinstva i pjeskovita) te tla koja su prijelaz od koherentnih prema nekoherentnim tlima (prašinstvo glinovita).

Mehanizam stabilizacije tla cementom razlikuje se kod nekoherentnih tala od koherentnih. Kod koherentnih tala

dotatkom cementa uz prisutnost vode dolazi do hidratacije cementa, do stvaranja kalcijevih i aluminijskih hidrata te sljepljivanja i povezivanja zrnaca. Zbog relativno male količine cementa (6-12% mase suhog tla odnosno 22 do 37 kg/m³) obavljanje zrnaca je nepotpuno, tako da sustav ima veliku poroznost, ali je čvrst i stabilan te mu je znatno poboljšana otpornost na djelovanje vlage i smrzavice.

Kod mješavine nekoherentnog tla i cementa dolazi do hidratacije i pojave vezivanja čestica tla. Dodatkom manje količine cementa u stabilizacijskoj se mješavini mogu stvoriti jezgre koje međusobno nisu povezane, ali ipak učvršćuju strukturu, dok se kod većih količina cementa razvija fini cementni skelet koji prožima materijal i poboljšava mu mehaničke karakteristike. Kod koherentnih tala postoji i dodatni stabilizacijski efekt. Naime, pri hidrataciji iz cementa se oslobađa određena količina živog vapna koje zatim stupa u reakciju s aktivnim silikatima i mineralima gline iz tla i u jednom duljem razdoblju dodatno povećava čvrstoću materijala.

Materijal stabiliziran cementom ne mijenja ili tek malo mijenja svoja svojstva s promjenom vlažnosti, temperature ili drugih klimatskih utjecaja, tako da predstavlja pouzdanu podlogu.

2.3 Mehanička stabilizacija

Mehanička se stabilizacija primjenjuje kod nekoherentnih, jednoznastih materijala. Stabilnost nekoga zrnatog sustava obrnuto je proporcionalna sadržaju šupljina. Osim toga, jednoznasti je sistem nestabilan jer i u najgušćem rasporedu zrna takav sustav ima velik udio šupljina s malim unutarnjim trenjem. Stabilnost ovakvog sustava može se povećati dodavanjem zrnatog materijala drugačijih dimenzija zrna, tako da sitnija zrna mogu ispuniti šupljine između krupnijih. To je ujedno i princip mehaničke stabilizacije materijala. Dakle, dodavanjem sitnije ili krupnije zrnatog materijala materijalu nepovoljnoga, jednolikoga, granulometrijskoga sastava, koji kao takav nije stabilan, popravljamo mu sastav. Dodatno, zbijanjem mu se povećava gustoća te se dobiva mehanički stabilan sustav s velikim unutarnjim trenjem.

3 Suvremeni materijali u postupcima stabilizacije

Broj suvremenih materijala za stabilizacije ili poboljšanje svojstava obradljivosti tala raste iz godine u godinu. Rezultati istraživanja uporabe industrijskih nusproizvoda kao sredstava za smanjivanje prašenja na prometnicama bez vezanog zastora, ili kao sredstava za povećanje nosivosti temeljnog tla, ili tla posteljice pri izgradnji prometnica objavljeni su u nizu radova, [1], [2] i [3]. Proizvođači cementa, radi unapređivanja djelovanja cementa kao stabilizacijskog sredstva, također su razvili određene

ne proizvode u obliku aditiva. Broj na tržištu dostupnih proizvoda povećavao se kako su se razvijale i spoznaje o utjecajnim mehanizmima ovih netradicionalnih sredstava za stabilizaciju, dok su se troškovi njihove proizvodnje smanjivali.

Općenito, ti se proizvodi mogu podijeliti prema svojoj namjeni u tri velike grupe: proizvodi koji su namijenjeni smanjenju prašenja, proizvodi kojima se olakšava zbijanje materijala te veziva [4]. S obzirom na to da su po svojoj definiciji postupci stabilizacije postupci kojima se povećava nosivost temeljnog tla ili tla posteljice, u radu će se osvrnuti na sredstva koja ili omogućuju lakše zbijanje ili djeluju kao veziva te na taj način povećavaju nosivost temeljnog tla ili posteljice.

Jedinstvena podjela suvremenih materijala koji se mogu primjenjivati u postupcima stabilizacije slabo nosivih tala ili tala nepovoljnih karakteristika do danas ne postoji. Kod postojećih klasifikacija jasno se uočava utjecaj lokalne primjene te jesu li iskustva onih koji su podjelu radili više vezana za rad sa sredstvima za sprječavanje prašenja ili onima koja služe za poboljšanje obradivosti ili nosivosti tla.

Proizvodi za stabilizaciju slabo nosivih tala mogu se podijeliti u nekoliko osnovnih grupa: proizvodi na osnovi sintetskih polimera (primjerice akrilat, polivinil acetat), encimi i biološka sredstva, ionski proizvodi, lignini, smole te ostali tipovi sredstava za stabilizaciju.

3.1 Proizvodi na osnovi sintetičkih polimera

Na tržištu je danas dostupan velik broj sredstava na osnovi sintetičkih polimera [5]. Dostupni su većinom u obliku emulzija ili u praškastom obliku. Ako se nalaze u obliku emulzija primjena im je vrlo jednostavna. Polimerna emulzija uobičajeno sadrži 40-50 % polimera te 1-2 % emulgatora rastopljenih u vodi. Kod praškastih su sredstava polimeri obično pomiješani s nekim drugim materijalima, primjerice vapnom ili letećim pepelom, tako da polimeri obavijaju čestice tih materijala.

Polimeri u tlu mogu djelovati na više načina. Primjerice akril polimeri pri sušenju očvršćuju te razvijaju kemijsku vezu koja sljepljuje zrna. Neki od polimernih materijala djeluju i kao encimi.

Najveći broj proizvoda na bazi polimera namijenjenih stabilizacijama tla su vinil acetati ili akril kopolimeri. Od proizvoda na bazi polimera poznatiji su Aerosprey 70 A, Earthbound, PolyPavement, PX-300, Soil Sement i TerraBound.

3.2 Proizvodi na osnovi encima

Osnovnu strukturu encima čine proteini koji u biološkom sustavu djeluju kao katalizatori. Za stabilizaciju sredstvima na osnovi encima pogodna su tla s udjelom

prašinstih čestica, čestica gline i organskih materijala većim od 20 %.

Encimi koji se dodaju u tlo ostaju stalno reaktivni. Djeluju tako da u tlu sintetiziraju određene grupe kemijskih komponenata i njihovo djelovanje ograničavaju na određene veze u tvarima s kojima reagiraju. Djelovanje encima raspršenih po tlu može biti raznoliko. Reakcija koju izazivaju može rezultirati razbijanjem veza između kristalnih jedinica minerala gline, kationskom izmjenom ili spajanjem kationa s ostalim spojevima, uz pomoć organskih molekula. Razbijanjem veza između kristalnih jedinica minerala glina smanjuje se njihova veličina čime se olakšava njihovo povezivanje s organskim tvarima. Ako se rabe sredstva za stabilizaciju na osnovi encima, posebnu pozornost treba posvetiti zbijanju kojim se omogućuje gusto slaganje čestica te započinjanje procesa povezivanja.

Prema nekim izvorima [6], encimi zahtijevaju određeno razdoblje njege (minimalno 72 sata), što može biti otežavajuća okolnost u njihovoj primjeni, posebice u područjima s vlažnom klimom.

Od proizvoda na osnovi encima poznatiji su Bio cat 300-1, Perma-Zyme 11X, Terrazyme, UBIX No. 0010, Endurazyme i brojni drugi.

3.3 Ionski proizvodi

Elektroliti koje sadrže sredstva za stabilizaciju na bazi iona utječu na osnovnu prirodu minerala glina. U tlima s normalnim sadržajem vlage elektroliti se prenose osmozom. Oni otpuštaju apsorbiranu vodu pretvarajući se pritom u gustu suhu masu. Prema informacijama koje daju proizvođači, sredstva na osnovi iona su učinkovita ako je sadržaj finih čestica najmanje 35 % mase suhog tla te ako postoji određen udio minerala glina u sastavu sitnih čestica.

Obradu s ionskim sredstvima za stabilizaciju treba obaviti kada je tlo u stanju najpovoljnije vlažnosti ili blizu potpune saturacije. Ako se postupak stabilizacije provodi na maloj dubini, s pomoću rijača, moguće je dobiti vrlo glatku površinu po kojoj odvijanje prometa nije preporučljivo. Prema Scholenu i Coghlanu [7], obrada tla sredstvima za stabilizaciju na osnovi iona može se izvršiti i duboko ispod površine tla injektiranjem. Nakon stabilizacije i zbijanja ciklusi sušenja i vlaženja te smrzavanja i odmrzavanja nemaju nikakvog učinka na obrađeni materijal.

Najveći broj proizvoda koji se ubrajaju u ovu grupu izrađuje se na osnovi sulfoniranih ugljikovodika. Kako su se u postupcima stabilizacija tala pokazali vrlo uspješni, kratko će se razložiti. Sam naziv opisuje glavni aktivni sastojak ovih proizvoda. Sulfatni naftni proizvodi u os-

novi su proizvodi koji djeluju na površini. Glavni reagens je dvodijelna molekula. Jedan dio molekule apsorbira se na površinu čestica gline, smanjuje im kapacitet ionske izmjene. Takva transformacija minerala gline rezultira nemogućnošću apsorpcije vode, odnosno gline se iz hidrofilnih pretvaraju u hidrofobne. Druga komponenta djeluje kao mazivo koje omogućuje bolju pokretljivost čestica te time i mogućnost postizanja boljih učinaka zbijanja uz primjenu manje energije. Uporabom ovih materijala za stabilizaciju postiže se veća suha gustoća za određenu energiju zbijanja u usporedbi s prirodnim tlom. Sulfatni naftni proizvodi su prema tome proizvodi koji omogućuju lakše zbijanje, a nisu vezivo. Promjene karakteristika materijala su očite, tlu se smanjuje indeks plastičnosti i optimalna vlažnost, smanjuje se bubrenje i skupljanje, povećava maksimalna suha prostorna masa, povećava tlačna čvrstoća, CBR i krutost te smanjuje vodopropusnost.

Tretirano tlo postaje manje osjetljivo na promjene vlažnosti.

U ovu grupu ubrajamo sljedeće proizvode: Conaid, CBR-Plus, Consolid, Condor, ISS2500, RRP 235, Pennzsupress te još mnoge druge.

3.4 Lignini

Lignin je prirodni polimer, bitan sastojak drva. Sulfatni lignin koji se rabi pri stabilizacijama dobiva se pri preradi drveta prilikom proizvodnje celuloze. Proizvodi na osnovi lignina ponajprije se upotrebljavaju kao sredstva za sprječavanje prašenja, no pokazali su se i kao dobra sredstva za kratkotrajno povećanje nosivosti. Provedena istraživanja primjene ovih materijala pokazala su da se dodatkom od 5 % lignosulfata osigurava vodonepropusnost u prašinstim pijescima [7]. Iz navedenoga proizlazi da se proizvodi na osnovi lignina mogu upotrebljavati samo ako se žele ostvariti privremeni učinci, kao na primjer kod šumskih ili gradilišnih prometnica privremenog karaktera.

Od proizvoda na osnovi lignina poznatiji su Dustac, RB Ultra Plus, Polybinder, DC-22, Calbinder i drugi.

3.5 Proizvodi na osnovi smola

Grupa sredstava na osnovi smola obuhvaća širok raspon proizvoda. Dio sredstava na osnovi smola su prirodni proizvodi, što znači da su biodegradibilni i kao takvi imaju prilično kratkotrajan učinak. S druge strane, proizvodi na osnovi uljnih smola, koji kao nerazgradivi imaju mnogo trajniji učinak pripadaju u, za okolinu, niskorizične proizvode, ali samo u slučaju ako bi u toku postupka stabilizacije dio tog sredstva, primjerice, dospio u vodoopskrbni sustav.

Mehanizam djelovanja koji karakterizira ovu grupu proizvoda sastoji se u oblaganju i povezivanju sitnih čestica tla. Neke od smola na osnovi kojih su izrađeni ovi proizvodi pri tome mogu tvoriti hidrofobnu površinu nakon obavljavanja sitnih čestica [8].

Od proizvoda na bazi smola poznatiji su Dustbinder, Dustrol EX, Enduraseal 200, Resin Pavement, Resinpave, Road oil, TerraPave i drugi.

3.6 Ostali proizvodi

Grupu ostalih proizvoda predstavljaju sredstva koja se sastoje od kombinacije barem dvaju različitih sastojaka od kojih se svaki za sebe može svrstati u neku od navedenih grupa proizvoda, ali se u proizvodu u kojem se pojavljuju u kombinaciji ni jednom ne može dati atribut prioritetnoga, kao i ona koja se ne mogu svrstati ni u jednu od prethodno navedenih grupa.

4 Primjena suvremenih materijala za stabilizaciju slabo nosivih tala u Hrvatskoj

Primjene novih, netradicionalnih materijala za stabilizaciju slabo nosivih tala u Hrvatskoj gotovo da i nema. U proteklom desetogodišnjem razdoblju napravljeno je nekoliko probnih polja radi promocije ili dokazivanja uporabivosti takvih proizvoda. U posljednje vrijeme na tržištu se pojavio proizvod GeoCreta, no i ovaj je proizvod primijenjen na tek nekoliko gradilišta. GeoCreta je materijal koji se pri postupku stabilizacije tla upotrebljava kao dodatak cementu, pri čemu se nakon miješanja postojećeg tla sa stabilizacijskom mješavinom stvaraju, prema navodima proizvođača, elastični nosivi slojevi visoke čvrstoće [9]. Primjenjuje se pri izgradnji temeljnih i nosivih slojeva prometnica svih kategorija, od autocesta pa do šumskih i gospodarskih cesta.

Po svom je sastavu GeoCreta bijeli praškasti materijal koji se sastoji od alkalnih i alkalno zemljanih elemenata ili složenih komponenata. Potpomaže proces hidratacije cementa i sprječava djelovanje fulvinskih i karbonskih kiselina. Strukturne promjene i mineralizacija za hidrataciju cementa znatno povećavaju tlačnu čvrstoću tretiranog materijala, statički i dinamički modul elastičnosti, vlačnu čvrstoću na savijanje, otpornost tla na djelovanje smrzavice, a primjenom ovog materijala moguće je stabilizirati i tla s većim udjelom organskih tvari. Povrh toga, uporabom GeoCreta potpomaže se imobilizacija onečišćenja koja uzrokuju negativne posljedice na okoliš. U to uključujemo teške metale kao i organske supstance, koji postaju stalno ugrađeni u nove kristalne strukture u tlu.

U proljeće 2006. godine nakon provedenih laboratorijskih ispitivanja materijala na dionici državne ceste D-41 Vrbovec – Gradec, radi dokazivanja učinkovitosti i promo-

cije sredstva za stabilizaciju slabo nosivih tala GeoCreta, proizvođača GeoCreta bv iz Nizozemske, obrađeno je probno polje ploštine 75 m² na trasi budućeg paralelnog puta kod stacionaže 18 + 400,00 km + m (desna strana). Probno je polje izrađeno u zemljanom materijalu s visokim udjelom organskih tvari. Provedeno ispitivanje modula stišljivosti zemljanog materijala probnog polja nije dalo mjerljive rezultate. Nakon primjene GeoCreta provedena su terenska i laboratorijska ispitivanja [10] rezultati kojih su opisani u nastavku.

Terenska ispitivanja na probnom polju provedena su samo 24 sata nakon primjene proizvoda za stabilizaciju tla, tako da ne postoje informacije o njegovu produženom djelovanju.

4.1 Svojstva zemljanoga materijala probnog polja

Probno je polje izrađeno u zemljanom materijalu s visokim udjelom organskih tvari (15,6 %). Prirodna vlažnost tla iznosila je 33,4 %, granica tečenja materijala tla bila je 86,98 %, granica krutosti 29,89 %, odnosno indeks plastičnosti tla u području probnog polja iznosio je 57,09 %.

Laboratorijski izmjerena vrijednost CBR-a bila je 6,2% dok ispitivanje modula stišljivosti metodom kružne ploče nije davalo mjerljive rezultate.

4.2 Tehnologija izvedbe sloja na probnom polju na dionici državne ceste D-41, Vrbovec – Gradec

Sloj od cementom stabiliziranoga zemljanog materijala uz dodatak GeoCreta na probnom polju na dionici državne ceste D-41 Vrbovec – Gradec ugrađivalo je poduzeće STRABAG d.o.o. postupkom miješanja na licu mjesta (*mix in place*) primjenom za takvu tehnologiju predviđene mehanizacije.



Slika 1. Cisterna za razastiranje cementa s dozatorom

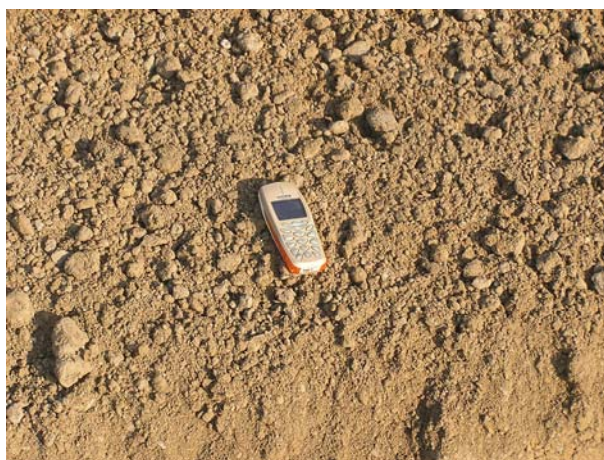
Razastiranje cementa provedeno je cisternom za razastiranje cementa sa dozatorom dok je za miješanje temelj-

nog tla i cementa upotrijebljena miješalica Wirtgen – recycler WR 2000. Količinu doziranja pojedinih komponenta mješavine na licu mjesta odredio je naručitelj bez prethodno laboratorijski dobivenog radnog sastava.



Slika 2. Miješalica Wirtgen – recycler WR 2000

Umješavanju ostalih komponentata u zemljani materijal prethodilo je skidanje gornjeg sloja zemljanog materijala u debljini od dvadesetak centimetara. Prema navodima naručitelja ispitivanja, na navedenu površinu jednolično je razastrto 200 kg GeoCreta, dok je cement CEM II/B (V-LL) 32,5 R, proizvođača Holcim d.o.o., doziran u količini od 60 kg/m². Miješanje je provedeno u dubini od 30 cm. Umješavanje dodane mješavine cementa i GeoCreta provedeno je bez dodatnog doziranja vode uz broj prijelaza potreban da se grude zemljanog materijala potpuno usitne.



Slika 3. Izgled mješavine prirodnog tla, cementa i GeoCreta, nakon miješanja

Sloj je zbijen valjanjem statičkim valjkom i njegovan površinskim vlaženjem vodom.



Slika 4. Zbijanje statičkim valjkom

4.3 Provedena ispitivanja

Programom ispitivanja na terenu je predviđeno samo ispitivanje modula stišljivosti Ms metodom kružne ploče prije i nakon tretiranja tla probnog polja cementom s dodatkom GeoCreta, dok je predviđeni opseg laboratorijskih ispitivanja bio znatno širi.

4.3.1 Terenska ispitivanja

Terenskim je ispitivanjem bilo predviđeno ispitivanje modula stišljivosti metodom kružne ploče prema hrvatskoj normi HRN U.B1.046. Prije dodatka mješavine cementa i GeoCreta ispitivanje modula stišljivosti metodom kružne ploče nije dalo mjerljive rezultate. Slika 1. zorno prikazuje nosivosti prirodnog tla probnog polja.



Slika 5. Nosivost tla na probnom polju

Ispitivanje modula stišljivosti M_s metodom kružne ploče 24 sata nakon ugradnje sloja s dodatkom mješavine cementa i GeoCreta provedeno je na dvije lokacije. Na prvoj lokaciji, u stacionaži 18 + 385 km + m, dobivena je vrijednost modula stišljivosti $M_s = 46,1 \text{ MN/m}^2$ dok je na drugoj lokaciji, u stacionaži 18 + 405 km + m, modul stišljivosti iznosio $M_s = 166,7 \text{ MN/m}^2$. Na žalost ispitivanja modula stišljivosti nisu provedena u kasnijem razdoblju, tako da eventualni prirast vrijednosti nije poznat. No već i ova mjerenja provedena 24 sata nakon ugradnje sloja pokazala su znatno povećanje modula stišljivosti, tako da je njegova vrijednost od nemjerljive narasla na vrijednost koja je veća od minimalno tražene vrijednosti za posteljicu od zemljanog materijala, a koja prema Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama [11] iznosi 30 MN/m^2 .

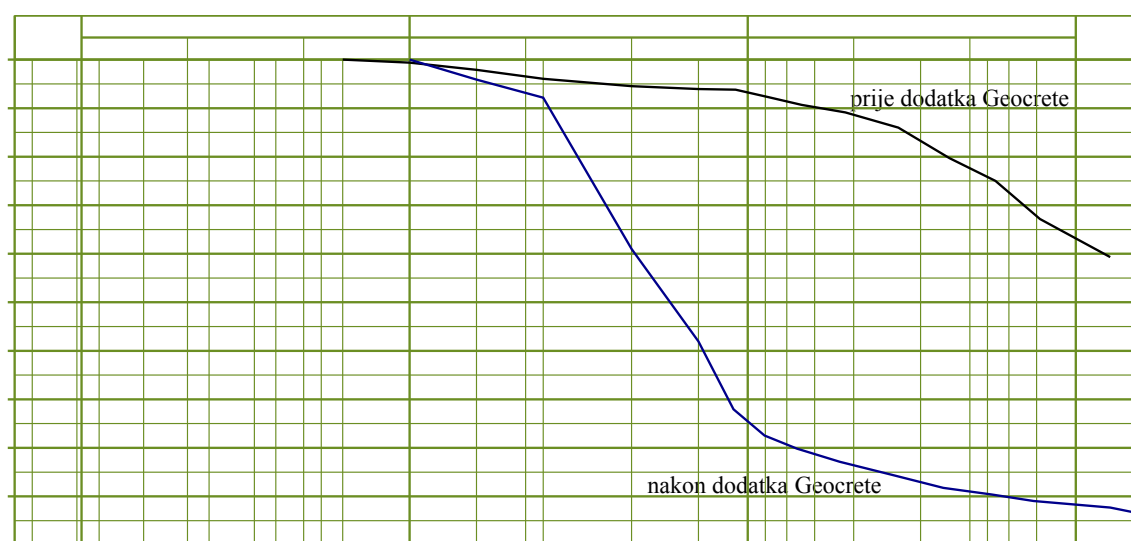
4.3.2 Laboratorijska ispitivanja

Laboratorijskim je ispitivanjima određena vlažnost materijala tla, gustoća, granulometrijski sastav, sadržaj sagorljivih i organskih čestica, optimalni sadržaj vode standardnim Proctorovim pokusom, konzistencija tla, tlačna čvrstoća te CBR na prirodnom tlu bez dodatka te s dodatkom mješavine cementa i GeoCreta. Na probnom su polju provedena terenska ispitivanja modula stišljivosti

Tablica 1. Rezultati laboratorijskih ispitivanja tla s probnog polja na dionici državne ceste D-41 Vrbovec – Gradec

Mjesto uzimanja uzoraka:		Usporedna cesta uz državnu cestu D-41, 18 + 400 km + m	
		bez dodatka	s dodatkom cementa i GeoCreta
Prirodna vlaga,%:		33,4	20,0
St.Proctor	najpovojnija vlaga,%:	27,2	23,9
	suha prostorna masa, Mg/m^3	1,403	1,599
Konzistencija tla	granica tečenja,%:	86,98	30,67
	granica krutosti,%:	29,89	16,88
	indeks plastičnosti,%:	57,09	13,79
Granulometrijski sastav	koeficijent nejednolikosti U	113,86	45,77
	udio čestica manjih od 0,02 mm	86,91	16,43
	promjer najvećeg zrna, mm	4,0	2,0
Bubrenje,%:		1,7	0
CBR,%:		6,2	75
Suha prostorna masa, Mg/m^3		1,410	1,644
Organske materije, mase %:		15,6	-
Gustoća tla, Mg/m^3		2,492	2,642
Tlačna čvrstoća nakon 7 dana (MN/m^2)		nemjerljivo	0,3
Suha prostorna masa, Mg/m^3		1,388	1,620

prije i nakon primjene GeoCreta, dok su u laboratoriju provedena ispitivanja vlažnosti materijala tla, gustoće, granulometrijskog sastava, sadržaja sagorljivih i organskih čestica, optimalnog sadržaja vode standardnim Proctorovim pokusom, konzistencije tla, tlačne čvrstoće te CBR-a, također na tlu bez dodatka te s dodatkom cementa, i GeoCreta, a koja su detaljno opisana u nastavku.



Slika 6. Grafički prikaz granulometrijskog sastava uzorka prije i nakon dodatka mješavine cementa i GeoCreta

Pregled rezultata provedenih laboratorijskih ispitivanja je u tablici 1.

Prirodna vlaga uzorka određena prema hrvatskoj normi HRN U.B1.012 koja je prije dodatka mješavine cementa i GeoCreta iznosila 33,4%, nakon dodatka mješavine cementa i GeoCreta smanjila se na 20,0 %.

Gustoća materijala određena prema HRN U.B1.014 povećala se od 2,492 Mg/m³ koliko je iznosila prije dodatka mješavine cementa i GeoCreta na 2,642 Mg/m³.

Granulometrijskom analizom uzorka prema HRN U.B1.018, prije i nakon dodataka mješavine cementa i GeoCreta, dobivene su krivulje prikazane na slici 6. Iz dijagrama se vidi da je prije dodatka stabilizacijske mješavine uzorak predstavljao mješavinu zrnja od 0 mm do 4,0 mm s koeficijentom nejednolikosti $U = 113,86$, dok je nakon dodatka cementa i GeoCreta uzorak predstavljao mješavinu zrnja od 0 mm do 2,0 mm s koeficijent nejednolikosti $U = 45,77$.

Optimalna vlaga i najveća suha prostorna masa određeni su prema HRN U.B1.038, zbijanjem uzorka prije i nakon dodataka mješavine cementa i GeoCreta, a energijom standardnoga Proctorova postupka (0,66 MNm/m³), uz različito doziranje vode.

Optimalna vlaga prirodnog tla iznosila je $W_{opt} = 27,2$ %, a nakon dodatka stabilizacijske mješavine smanjila se na 23,9 %. Najveća se suha prostorna masa pritom s 1,403 Mg/m³ povećala na 1,599 Mg/m³.

Grafički prikaz odnosa vlažnosti i suhe prostorne mase pri zbijanju određen standardnim Proctorovim pokusom prikazan je na slici 7.

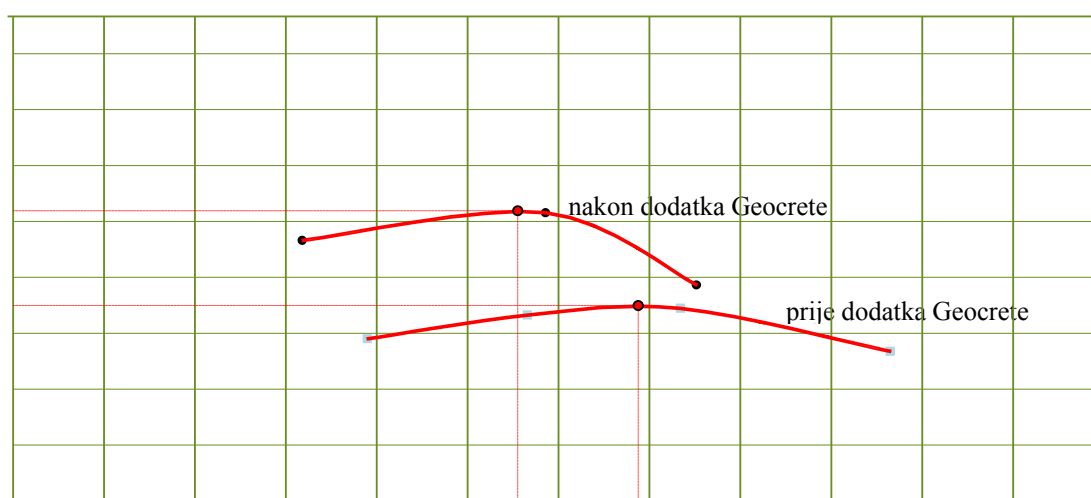
Bubrenje je ispitano prema HRN U.B1.042 na uzorcima izrađenim od prirodnog materijala te uzorcima s dodatka mješavine cementa i GeoCreta. Uzorci su zbijeni prema standardnome Proctorovu postupku s optimalnom vlagom, te su četiri dana potapani u vodi. Na uzorcima bez dodatka stabilizacijske mješavine bubrenje je iznosilo 1,7 %, dok kod uzoraka izrađenih s dodatkom stabilizacijske mješavine nije bilo bubrenja.

Na uzorcima tla s dodatkom stabilizacijske mješavine određeni su također i granica tečenja koja je iznosila 30,67 % (prije dodatka mješavine 86,98 %), granica krutosti, koja je iznosila 16,88 % (prije dodatka mješavine 29,89 %), što je rezultiralo indeksom plastičnosti od 13,79 % (prije dodatka mješavine 57,09 %).

Kao posljednje provedeno je ispitivanje sedmodnevne tlačne čvrstoće (prema HRN U.B1.030) uzoraka materijala s dodatkom stabilizacijske mješavine i bez nje. Sedmodnevna tlačna čvrstoća uzoraka bez dodatka mješavine cementa i GeoCreta nije bila mjerljiva, dok je tlačna čvrstoća uzoraka s dodatkom cementa i GeoCreta iznosila 0,3 MN/m².

4.3.3 Analiza rezultata ispitivanja

Klasifikacijska geomehanička ispitivanja pokazala su da osnovni materijal pripada skupini visokoplastičnih glina sa znatnim udjelom organskih tvari i gustoćom od 2,492 Mg/m³. Stabilizirani materijal možemo svrstati u niskoplastične gline bez organskih primjesa, uz porast gustoće materijala na 2,642 Mg/m³. Radikalna promjena granulometrijskog sastava (slika 6.) za posljedicu ima i poboljšanje odnosa optimalna vlaga-najveća suha prostorna masa dobivenog standardnim Proctorovim pokusom (slika 7.).



Slika 7. Grafički prikaz odnosa vlažnosti i suhe prostorne mase pri zbijanju (standardni Proctorov pokus)

Stabilizacijom osnovnog materijala poboljšana je i postojanost materijala na vodu, a prirodni sadržaj vode smanjen je za više od 13 %.

Parametri nosivosti prije stabilizacije bili su nemjerljivi do veoma loši. Nakon dodatka cementa i GeoCreta i laboratorijski i terenski parametri nosivosti su porasli do vrijednosti koje se inače postižu upotrebom bitno kvalitetnijih materijala.

Pojednostavnjeno rečeno, materijal koji je bio neupotrebljiv za temeljno tlo, dodatkom cementa i GeoCreta dobio je karakteristike koje zadovoljavaju kriterije za posteljice od zemljanih materijala prema Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama [11].

Zanimljivo bi bilo da je paralelno s ovim načinom stabilizacije provedena stabilizacija i s nekim drugim tradicionalnim sredstvom, primjerice samo cementom ili vapnom. Na taj bi se način moglo ocijeniti koliki je zapravo doprinos u odnosu na ova tradicionalna sredstva što bi bilo vrlo zanimljivo. Na žalost ni ispitivanje u nekom duljem razdoblju nije bilo moguće provesti jer je vrlo kratko nakon izrade probnog polja ono uništeno.

Budući da se probna dionica radila bez laboratorijski dobivenoga prethodnoga radnog sastava, izostalo je najpovoljnije doziranje pojedinih komponenata mješavine, što je bitno pri ekonomskoj analizi ovog tipa stabilizacije.

5 Zaključak

U postupcima poboljšanja karakteristika slabo nosivih tala, u svijetu se sve češće rabe nekonvencionalni materijali koji se primjenjuju samostalno ili u kombinaciji s nekim od klasičnih materijala kao što su vapno i cement, a koja znatno pospješuju njihovo djelovanje. Ova se sredstva upotrebljavaju pri poboljšanju karakteristika slabo

nosivih tla posteljice, ali jednako tako i kao sredstva koja omogućuju uporabu materijala lošijih karakteristika pri izradi gornjih nosivih slojeva kolničke konstrukcije.

U našoj zemlji ova sredstva za sada još nisu u upotrebi (zbog cijene ili nekoga drugog razloga), no tamo gdje su upotrijebljena pokazala su da svojom učinkovitošću opravdavaju nešto višu cijenu od one konvencionalnih sredstava. Ova su se sredstva pokazala pogodnima u tlima vrlo loših geomehaničkih karakteristika, zaglinjenim materijalima, organskim tlima i svim ostalim tlima osjetljivim na djelovanje vode.

Usporede li se cijene pojedinih klasičnih materijala koji se rabe za poboljšanje karakteristika slabo nosivih ili nepovoljnih materijala (cement 110-150 \$/t, vapno 130-180 \$/t, leteći pepeo 30-60 \$/t, bitumen 300-400 \$/t) s cijenama ovih nekonvencionalnih materijala koje se kreću od 600-900 \$/t, uočljivo je da njihova cijena bitno odskaka od cijene konvencionalnih materijala, no pri analizama svakako treba imati na umu činjenicu da je količina ovih materijala koja je potrebna da se postignu isti stabilizacijski učinci kao konvencionalnim materijalima višestruko manja.

U radu su osim pregleda suvremenih materijala koji se primjenjuju u postupcima stabilizacije tla prikazani i rezultati terenskih i laboratorijskih ispitivanja provedenih na zemljanom materijalu stabiliziranom uz upotrebu GeoCreta, jednog od rijetkih takvih materijala dostupnog na našem tržištu. Rezultati ovih ispitivanja, iako nedostadni za detaljne analize, pokazali su učinkovitost ovakvog proizvoda te će svakako predstavljati temelj za razbijanje nepovjerenja prema njima, a koje je sigurno velika prepreka u njihovoj široj primjeni.

LITERATURA

- [1] Newman, K.; Tingle, J.S.: *Stabilization of silty sand using polymer emulsions*, Transportation Research Record 2004 Annual Meeting CD-ROM, paper no 04-3108, pp. 24
- [2] Santoni, R. L.; Tingle, J. S., Webster, S. L.: *Stabilization of silty sand with nontraditional additives*, Transportation Research Record 1787, TRB, National research Council, Washington, D.C., 2002, pp. 61-70.
- [3] Roughton International, Birmingham University, Nottingham University; *Appropriate and efficient maintenance of low cost rural roads in developing countries. Review of Soil Stabilisation Methods*, Report No. V, Department for International Development Special Report, London, UK, 2000.
- [4] Petry, T. M.; Das, B.: *Evaluation of Chemical Modifiers and Stabilizers for Chemically Active Soil – Clays*, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 1757, TRB, National research Council, Washington, D.C., 2001, pp. 43-49.
- [5] Nwankow, K. N.: *Polyacrylamide as a Soil Stabilizer for Erosion Control*, Wisconsin Department of Transportation, Report no. WI-06-98, Madison, 2001.
- [6] Tplleson, A. R.; Shatnawi, F. M.; Harman, N. E.; Mahdavian, E.: *An Evaluation of Strength Change on Subgrade Soils Stabilized with an Enzyme Catalist Solution Using CBR and SSG Comparisons*, Final Report to University Transportation Center Grant R-02-UTC-ULTERPAVE-GEO-01, 2003.
- [7] Scholen, D.; Coghlan, S.: *Nonstandard stabilization of aggregate road surfaces*, Transportation Research record 1291, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1991, pp. 285-293.
- [8] Ajayi-Majebi, A.; Grissom, W. A.; Smith, L. S.; Jones, E. E.: *Epoxy-Resin-Based Chemical stabilization of a Fine, Poorly Graded Soil System*, Transportation Research record 1295, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1991, pp. 185-191.
- [9] *Izveštaj o ispitivanju temeljnog tla od zemljanog materijala stabiliziranog cementom uz dodatak „GeoCret-a“*, Izveštaj o ispitivanju br. 2753-714/06, Institut građevinarstva Hrvatske, Zavod za prometnice, Cestograđevni laboratorij, Zagreb, 2006.
- [10] *GeoCret ST, Construction of sub-base and frost protection layers using the GeoCret ST01 Systems*, informativni materijal GeoCret bv, Nizozemska
- [11] *Opći tehnički uvjeti za radove na cestama*, Knjiga II, Zemljani radovi, odvodnja, potporni i obložni zidovi, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, 2001.