

**Srebro(I)-oksid**,  $\text{Ag}_2\text{O}$ , dobiva se djelovanjem alkalija na otopinu srebro-nitrata, pri čemu se prolazno stvara srebro-hidroksid, koji na svjetlosti i na temperaturi nižoj od  $60^\circ\text{C}$  u vodenoj otopini prelazi u oksid. Pri sušenju na više od  $60^\circ\text{C}$  razgrađuje se do metala. Kristalizira u obliku smeđih kubičnih kristala. Slabo je topljiv u vodi, netopljiv je u višku alkalija, a lako se otapa u nitratnoj kiselini i amonijaku. Ostavi li se otopina srebro-oksida da stoji u amonijaku, izdvaja se crn talog, tzv. praskavo srebro, sastava  $\text{NH}_2\text{Ag}$  ili  $\text{NHAg}_2$ , koji već pri malom potresanju snažno eksplodira. Srebro-oksid se upotrebljava za proizvodnju katodnih depolarizatora primarnih izvora struje i za proizvodnju katalizatora.

**Srebro-sulfid**,  $\text{Ag}_2\text{S}$ , dobiva se djelovanjem sumporovodika na topljive soli srebra ili vodene suspenzije, a služi kao katalizator.

Srebro gradi i mnogo kompleksnih spojeva. Najvažniji su kompleksni spojevi jednovalentnog srebra s koordinacijskim brojem 2 i 4.

### PROIZVODNJA I POTROŠNJA SREBRA, NJEGOVIH SLITINA I SPOJEVA

Prosječna godišnja svjetska proizvodnja srebra iz primarnih sirovina u periodu od 1975...1984. iznosila je 11200 tona. U tom je periodu proizvodnja stalno rasla i dostigla je maksimum 1984. u količini od 12789 tona. Najveći proizvođači srebra u svijetu iz primarnih sirovina (s proizvodnjom većom od 1000 t godišnje) jesu: SAD, Kanada, Meksiko, Peru, Australija i bivši SSSR. Tih 6 zemalja daje oko 60% ukupne svjetske proizvodnje srebra. Godišnja potrošnja srebra veća je od njegove proizvodnje iz primarnih sirovina za 3000...5000 tona, pa se ta količina nadoknađuje proizvodnjom iz sekundarnih sirovina.

Prosječna godišnja proizvodnja srebra u SFRJ u vremenu od 1975-84. iznosila je 115 tona. To je činilo oko 16% europske ili oko 1% svjetske proizvodnje. Poslije Poljske SFRJ je bila najveći proizvođač srebra iz primarnih sirovina u Europi. Proizvodnja srebra u SFRJ najvećim je dijelom (oko 80%) bila vezana uz proizvodnju i preradu olovo-cinkovih koncentrata, odnosno uz proizvodnju olova, a manjim dijelom (oko 20%) uz proizvodnju bakra. U okviru SFRJ najveći je proizvođač srebra bio Rudarsko-metalurško-kemijski kombinat Trepča, a srebro se još proizvodilo u talionici u Titovom Velesu pri preradi olovo-cinkovih koncentrata, u talionici olova u Mežici i u Rudarsko-topioničarskom bazenu Bor prilikom proizvodnje bakra.

Potrošnja srebra u SFRJ, ne računajući fotografski materijal, kretala se u granicama od 70...90 tona godišnje. U zadnjem je desetljeću izgrađeno više postrojenja za preradu srebra, npr. u Prizrenu (Famipa), u Srebrenici (Fabrika lemovi), pa se danas izrađuje više finalnih proizvoda od srebra, koji su se doskora uvozili.

LIT.: A. Butts, C. Coxe, Silver – Economics, Metallurgy, and Use. Van Nostrand Co., New York 1967. – Gmelin, Silber, System – Nr. 61. Verlag Chemie, Weinheim 1970/76. – M. A. Малишев, В. Д. Румянцев, Серебро. Металлургия, Москва 1976. – H. Renner, Silber, Silber-Verbindungen und Silber-Legierungen, u djelu: Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, Band 21. Verlag Chemie, Weinheim 1982. – Ц. Г. Хаяк, А. А. Куранов, А. М. Чебыкин, Промышленные изделия из благородных металлов и сплавов, Справочник. Металлургия, Москва 1985.

Redakcija

**STABILIZACIJA TLA**, postupci za prevladavanje ili ograničavanje nekog ili nekih nepoželjnih svojstava tla. Postoji više postupaka, odnosno grupa postupaka stabilizacije tla: mehanička, stabilizacija vapnom, cementom ili sličnim hidrauličnim vezivima, bitumenskim vezivima, posebnim kemijskim sredstvima i pomoću geotekstila.

Osnovni je mehanizam za mehaničku stabilizaciju tla najčešće zgušnjavanje; tada se većinom mora popraviti i njegov granulometrijski sastav.

Kad se stabilizacija tla provodi vezivima, učvršćivanje se postiže povezivanjem čestica tla miješanjem s vezivima.

Posebnu grupu čine postupci stabilizacije tla pomoću geotekstila; tada se preko slabog i nestabilnog tla polažu geotekstili (netkani tekstil, mreža) i sloj kamenog materijala pomoću kojeg se uspostavlja potrebna nosivost.

Prva je poznata primjena stabilizacije tla ostvarena prije ~5000 godina kada su na tibetsko-mongolskoj visoravni sagrađene tzv. šensi-piramide (prema pokrajini Shensi) od gline pomiješane s vapnom. I kineski zid (III. st.) između stijena od opeke ima jezgru od gline stabilizirane vapnom, a Kinezi su isti postupak iskoristili za gradnju cesta i poboljšanje tla pri temeljenju mostova. Indijci su mješavinu gline i vapna upotrebljavali kao mort za zidanje, a Rimljani su još prije 2000 godina gradili ceste pomoću vapna i vulkanskog pepela.

Rimska cesta Via Appia ima tri od četiri sloja kolničke konstrukcije (debele 1,2 m) stabilizirana vapnom. Praksa stabilizacije tla hidrauličnim vezivima (vapno, pucolani) u mnogim se zemljama zadržala do naših vremena. O postupcima ne postoje, međutim, detaljniji podaci jer su se iskustva prenosila usmenom predajom. Moderni postupci stabilizacije tla, koji se osnivaju ne samo na iskustvu nego i na stručnim i znanstvenim postavkama, počeli su se razvijati najprije u SAD. Tamo su se, zbog vrlo lošeg stanja cesta početkom našeg stoljeća i potrebe da se povežu vrlo udaljeni predjeli, zarana počele proučavati različite mogućnosti učvršćenja tla. Oko 1910. godine, na temelju ispitivanja i opažanja (C. M. Strachan), postavljeni su temelji za mehaničku stabilizaciju gline pomoću pijeska. Nedugo nakon toga počelo se graditi tzv. uljane ceste natapanjem tla uljem, a zatim i ceste od zemljanih materijala stabiliziranih hidrauličnim vezivima, u prvom redu cementom. Prvi su pokusi stabilizacije tla vapnom načinjeni 1920. u Iowi. Iako su radovi objavljeni dosta primitivno, iz ranih se američkih izvještaja vidi da su se tako izgrađene ceste dobro držale i da su bile otporne prema kiši. Vapnena i cementna stabilizacija naglo se razvijaju i šire u SAD, osobito na cestama i aerodromima građenim u toku drugoga svjetskog rata, pa i poslije. Istraživanja na sveučilištima Purdue i Texas omogućila su da se izrade propisi kojima je uvedena i obveza prethodnih laboratorijskih ispitivanja i kontrole kvalitete radova. U Evropi se stabilizacija vapnom i cementom uvodi 1955. te naglo i uspješno razvija i primjenjuje u niskogradnji, a veoma se često primjenjuje i u Africi i drugdje u zemljama u razvoju, jer omogućuje gradnju jeftinijih cesta.

Iz nacionalnih se izvještaja organizacije svjetskih kongresa za ceste (AIPCR) vidi da se danas primjenjuju četiri osnovna postupka stabilizacije (mehanička, pomoću vapna, pomoću hidrauličnih veziva, bitumenska) i da su oni postali standardnom tehnikom u više od 50 zemalja. U našoj se zemlji od šezdesetih godina također primjenjuju spomenuti postupci stabilizacije. Oni su uglavnom standardizirani standardima JUS. Stabilizacija, odnosno poboljšanje nosivosti tla pomoću geotekstila počelo se primjenjivati mnogo kasnije (oko 1960. godine), što je bilo uvjetovano sposobnošću industrije da proizvede dovoljne količine tih materijala po dovoljno niskim cijenama, da bi se racionalno mogli upotrebljavati u građevinarstvu.

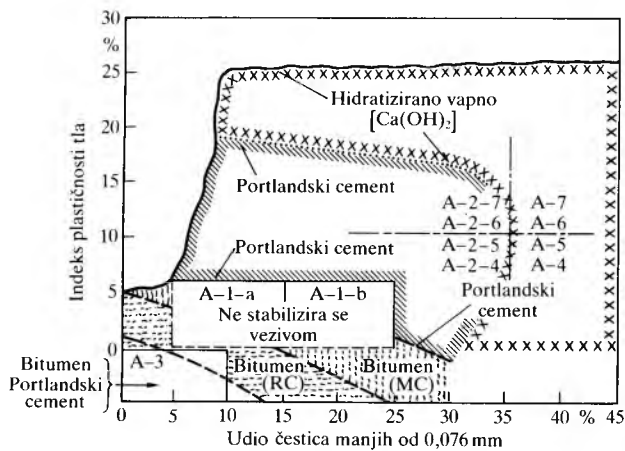
Postupci pomoću netkanih tekstila pojavili su se na više mjesta u svijetu oko 1960. a mreže od polimernih materijala prvi put su upotrijebljene za poboljšanje nosivosti tla u Japanu 1967 (T. Yamanouchi).

Treba napomenuti da su se takvi postupci s prirodnim materijalima (koža, pleriti od šiblja) primjenjivali još davno, npr. za komunikaciju u Rimskom Carstvu, ali su tek proizvodi suvremene industrije omogućili razvoj kvalitetnih i trajnih rješenja. U našoj se zemlji takvi postupci primjenjuju od ~1975. godine.

**Faktori nestabilnosti i pogodnost tla za stabilizaciju.** Neka su tla, kao što su kameniti tereni, tla od šljunčano-pjeskovitih zbijenih materijala i sl. stabilna sama po sebi, tj. ona ne mijenjaju svojstva djelovanjem vanjskih faktora, u prvom redu vode i smrzavanja. Mnoga se druga tla djelovanjem tih faktora više ili manje mijenjaju, pa se kaže da nisu stabilna. Nestabilna mogu biti i nekoherentna i koherentna tla. Od nekoherentnih je tala nestabilan npr. sipki, jednakozratni pijesak, koji slabo podnosi opterećenje, a podložan je i eroziji. Slično je i s jednakozratnim šljunkom u kojemu nema pijeska.

Tla su od takvih materijala nestabilna jer nema kohezije među česticama i jer je trenje između zrna relativno slabo zbog nedovoljne ispunjenosti šupljina među zrnima sitnijim materijalom. Koherentna su tla nestabilna uglavnom zbog djelovanja vode. Koherentna glinasta tla imaju kristaličan sastav, tj. sastoje se od gline, pa u njezinu strukturu može ulaziti voda koja uzrokuje znatno bubrenje i promjenu konzistentnog stanja. Stoga glina u dodiru s vodom može postati žitka, gubeći tako u potpunosti nosiva svojstva.

Postupak stabilizacije, koji se može primijeniti za određeno tlo, ovisi o vrsti tla. Općenito govoreći, mehanička stabilizacija i stabilizacija bitumenskim vezivima najviše se primjenjuju za stabilizaciju nekoherentnih materijala, stabilizacija cementom za stabilizaciju nekoherentnih materijala i materijala koji čine prijelaz od nekoherentnih ka koherentnim materijalima, a stabilizacija vapnom za stabilizaciju koherentnih materijala (sl. 1).



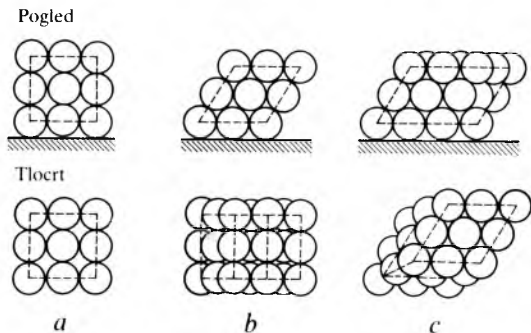
Sl. 1. Dijagram za određivanje orijentacijske pogodnosti tla za njegovu stabilizaciju

Stvarna pogodnost određenog tla za stabilizaciju i detaljni uvjeti određuju se na temelju laboratorijskih ispitivanja.

### MEHANIČKA STABILIZACIJA

Temelj je mehaničke stabilizacije zgušnjavanje tla. Pritom se osnovnom, nedovoljno stabilnom tlu popravlja granulometrijski sastav kako bi se olakšalo zbijanje i osiguralo zadržavanje stabilnosti materijala. U tu se grupu postupaka stabilizacije mogu ubrojiti i termički postupci zagrijavanjem ili zamrzavanjem tla. Mehanička je stabilizacija najraširenija metoda stabilizacije, jer se tada iskorištavaju prirodni lokalni materijali. Najčešće se primjenjuje pri gradnji prometnica za stabilizaciju nasipa, posteljice i kolničke konstrukcije (donji i gornji stroj). Zagrijavanjem se mijenja struktura tla, pa ono očvršćuje. Zamrzavanje se primjenjuje u posebnim slučajevima kao privremeno, odnosno pomoćno rješenje. Svrha mu je da omogući izradbu pojedinih dijelova građevine u stabilnim uvjetima.

**Mehanizam.** Stabilnost zrnatog materijala (tla) najviše ovisi o trenju između pojedinih zrna. Zato je izvanredno važan granulometrijski sastav, koji mora biti takav da šupljine u sustavu budu što manje. U jednakoznatim sustavima (sl. 2) šupljine se mogu nešto smanjiti različitim rasporedom zrna, što smanjuje stupanj slobode pomicanja i povećava stabilnost, ali i u *najgušćem* rasporedu zrna ipak šupljine ostaju velike; broj je dodira zrna malen, tako da je unutrašnje trenje sustava maleno, a sustav nestabilan. Znatno se smanjenje šupljina može postići ako se upotrijebe zrna različitih veličina. U takvim sustavima manja zrna mogu ulaziti u šupljine između većih i ispunjavati ih (sl. 3), pa je unutrašnje trenje veliko.

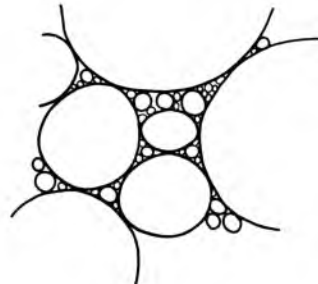


Sl. 2. Sustav jednakih zrna s tri moguća rasporeda zrna. a s najviše i c s najmanje šupljina

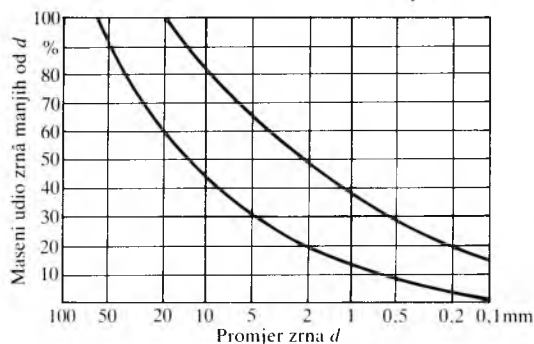
Dakako, svaki mehanički sustav mora biti i zbijen, jer se tek u zbijenom stanju smanjuju šupljine na najmanju količinu i ostvaruje potpun međusobni dodir zrna. Zbog toga je preduvjet mehaničke stabilnosti materijala kontinuiranost njegovog granulometrijskog sastava, te vrijedi Fullerov zakon:

$$p = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (1)$$

gdje je  $p$  postotak zrna koja prolaze kroz sito s otvorom  $d$ , a  $D$  promjer najvećeg zrna. U praksi dobre rezultate daju i granulometrijske krivulje koje se nalaze u širem području s graničnim linijama sličnima Fullerovoj krivulji. Granične linije za nevezane nosive slojeve u kolničkim konstrukcijama prema JUS U.E9.020 vide se na sl. 4.



Sl. 3. Sustav nejednakih zrna (prirodni pjeskoviti šljunak)



Sl. 4. Granične linije za nevezane, mehanički stabilizirane nosive slojeve

**Projektiranje.** Projekt i izradba mehaničke stabilizacije najviše ovisi o raspoloživim materijalima i namjeni. Ako se radi o kolničkoj konstrukciji bez vezanog zastora (za laki promet), zrnati materijal mora biti kamen dovoljno otporan na djelovanje kotača vozila i na klimatske promjene. Slojevi na većoj dubini mogu biti i od materijala nešto slabije kvalitete.

Najjednostavnije se osigurava materijal za mehaničku stabilizaciju izborom prirodnih materijala koji već u prirodnom stanju zadovoljavaju tražene granulometrijske kriterije. To je u nas dosta često npr. pri izradbi nasipa ili nosivih tamponskih slojeva za koje se često pronalaze i upotrebljavaju nalazišta prirodnih pjeskovito-šljunčanih materijala (šljunčare). U tu su svrhu vrlo pogodni i oštrobidni prirodni ili drobljeni kameni materijali koji se relativno lako i dobro ugrađuju i zbijaju. Teža je situacija kad osnovni materijal, kojim se raspolaže i želi ga se iskoristiti, nema pogodan granulometrijski sastav, pa se u prirodnom stanju ne može dobro učvrstiti zbijanjem. Tada se popravljiva granulometrijski sastav dodatkom drugog materijala. Rješenje ovisi o mogućnostima dobave takva materijala, točnije o lokalnim uvjetima. Potrebne su, naime, velike mase dodatnog materijala (20-30%), a mehanička stabilizacija ne podnosi velike prijevozne udaljenosti zbog velikih troškova. Osnovni je problem popravljenog miješanog materijala kako odrediti udio dodatnoga materijala za korekciju sastava osnovnog materijala.

Primjenjuju se dva postupka, već prema vrsti materijala, koji se osnivaju na indeksu plastičnosti i na granulometrijskom sastavu. Udio  $a$  materijala A koji pomiješan s materijalom B daje traženi (manji) indeks plastičnosti određuje se prema izrazu

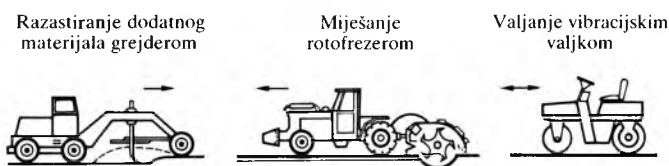
$$a = 100 \frac{S_B(P - P_B)}{S_B(P - P_B) - S_A(P - P_A)} \quad (2)$$

gdje je  $P$  traženi indeks plastičnosti mješavine,  $P_A$  i  $P_B$  su indeksi plastičnosti materijala A i B, a  $S_A$  i  $S_B$  udio zrna materijala A i B koja prolaze kroz sito 425  $\mu\text{m}$ . Udio je materijala B:

$$b = 100 - a. \quad (3)$$

Udio materijala na temelju granulometrijskog sastava može se odrediti grafički metodom G. Rothfuchsa, koja je opisana u stručnim priručnicima.

**Izradba.** Dodatni se materijal može s osnovnim materijalom pomiješati u postrojenju za miješanje, ali se mnogo češće materijali miješaju na gradilištu. Ta tehnologija obuhvaća pripremu (planiranje) osnovnog sloja koji se želi mehanički stabilizirati, navoženje dodatnog materijala i razastiranje u sloj jednolične debljine, miješanje posebnim strojem (rotofrezerom), podešavanje vlažnosti tako da bude u optimalnim granicama za zbijanje, zbijanje pogodnim sredstvima (vibracijski valjci, vibracijske ploče, gumeni valjci). Neka od tih sredstava vide se na sl. 5. Zbijenost se kontrolira usporedbom prostorne mase *in situ* i laboratorijski određene suhe prostorne mase Proctorovim pokusom.



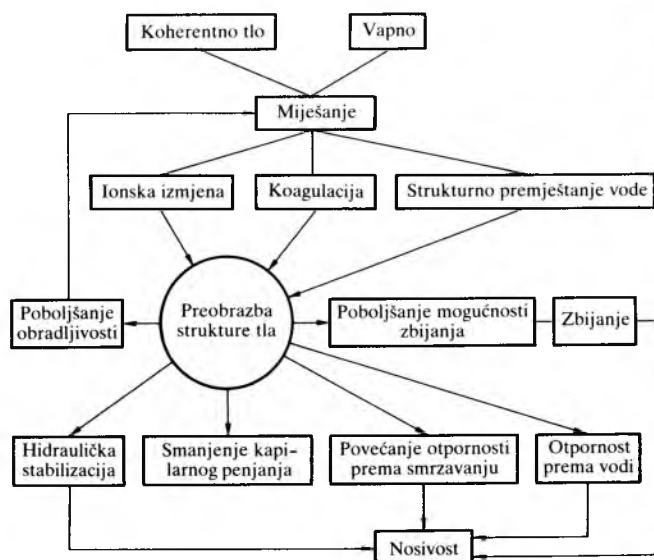
Sl. 5. Shematski prikaz postupka mehaničke stabilizacije

### STABILIZACIJA VAPNOM

Stabilizacija vapnom osniva se na miješanju tla s određenom količinom vapna u prahu i zbijanju. Tako se poboljšavaju svojstva tla. Pogodna je za plastične materijale (gline). Vapno pri tome može do određene granice riješiti i problem prevelike vlage u tlu, što se ne postiže upotrebom drugih veziva. Stabilizacija vapnom upotrebljava se najviše u nisko-gradnji za temelj nasipa, nasipe, posteljicu, dok je primjena u kolničkim konstrukcijama rjeđa.

**Mehanizam stabilizacije.** Bilo koje tlo nije pogodno za stabilizaciju vapnom. Za djelotvornu stabilizaciju tla osobito je važna njegova frakcija s česticama manjim od 0,002 mm, tj. čista glina. Taj dio materijala, međutim, u različitim vrstama tla ne reagira jednako s vapnom, jer to ovisi i o mineraloškom sastavu gline.

Osnova kemijske stabilizacije tla jest izmjena iona (v. *Izmjena iona*, TE 6, str. 576). Glina je zapravo, prirodna finodisperzna sedimentna stijena koja kao glavne mineralne



Sl. 6. Učinci vapna na glinovito tlo (prema W. Brandu)

komponente sadrži filosilikatne minerale (v. *Silicij*). U nekim su od tih slojevitih silikatnih minerala skupine slojeva međusobno povezane različitim slobodnim ili hidratiziranim kationima. Veze među skupinama slojeva nisu jake, pa su ti kationi podložni izmjeni s drugim vrstama kationa s kojima dolaze u dodir, a pritom se mogu promijeniti svojstva glinenih minerala i tla. Tako se u montmorilonitim glinama zamjenom natrijskih iona kalcijem smanjuje plastičnost, a poboljšava obradivost i mogućnost zbijanja, čime se tlo stabilizira. Kao izvor kalcijevih iona služi vapno, koje se u tlo najčešće dodaje kao kalcij-hidroksid. Opisana ionska izmjena vrlo je brza, pa se i svojstva tla brzo mijenjaju. Nakon toga započinju i druge kemijske reakcije vapna s glinenim mineralima i aktivnim silikatima, pa nastaje nova kristalna faza, većinom kalcijski i aluminijski hidrati koji sljepljuju i povezuju čestice tla i povećavaju mu čvrstoću (sl. 6). Iz toga proizlazi da vapno nije samostalno vezivo, nego vezivo nastaje kao rezultat reakcije sa sastojcima tla. Iz opisanih mehanizama slijedi da se vapno ne može primijeniti za stabilizaciju nekoherentnih materijala, osim ako je udio gline veći od 15-20%.

**Fizikalni i geomehanički učinci vapna.** Vapno pobuđuje znatne pojave u tlu koje se očituju u sniženju sadržaja vode, sniženju indeksa plastičnosti, promjeni granulometrijskog sastava, povećanju optimalne vlažnosti, smanjenju bubrenja, povećanju čvrstoće, povećanju nosivosti i povećanju otpornosti na vodu. Zbog poboljšanja svih tih svojstava glina stabilizirana vapnom predstavlja jedan sasvim drugi, mnogo bolji, materijal nego što je to osnovno, nestabilizirano tlo. To omogućuje tehnički bolja, a često i ekonomičnija rješenja.

**Tehnološki postupak.** Pomoću vapna može se stabilizirati temeljno tlo (tlo ispod nasipa), nasipi, posteljica prometnica i drugi slični plošni elementi u građevinarstvu. Najčešće se vapneni prah miješa s tlom na gradilištu. Radi se u slojevima debljine najčešće od 15-25 cm, ali se (posebnom mehanizacijom) može raditi i u slojevima debljine od 40 cm. Slojevi se najprije razrahlje posebnim strojevima (rotofrezerima, sl. 7). Zatim se na razrahljeni sloj razastire potrebna količina vapna (3 do 5% od mase suhog tla, odnosno 10 do 15 kg/m<sup>2</sup>) mehaničkim razastiračima (sl. 8). Poslije se rotofrezerom miješa zemljani materijal i vapno sve dok se ne dobije



Sl. 7. Sitrjenje i rahljenje tla rotofrezerom



Sl. 8. Razastiranje vapna pomoću mehaničkog razastirača

homogena mješavina. Sloj se konačno zbija ježevima, gumenim ili glatkim valjcima do potrebne zbijenosti. Prilikom zbijanja mješavina tla i vapna mora imati optimalnu vlažnost. Ako uvaljani stabilizirani sloj ostaje određeno vrijeme nepokriven, treba ga njegovati vlaženjem tri do sedam dana, kako bi se neometano mogli odvijati stabilizacijski procesi.

**Potrebna svojstva.** Svojstva koja stabilizirano tlo mora imati ovise o zahtjevima projekta. Za ceste je kvaliteta stabilizacije regulirana standardom JUS U.E9.026. Glavni su zahtjevi: monoaksijalna čvrstoća (uzorci promjera 10 cm, visine 11,7 cm, njegovani 28 dana u vlazi) za donji stroj 0,3 do 0,5 MN/m<sup>2</sup>, a za kolničku konstrukciju najmanje 1,4 MN/m<sup>2</sup>, nosivost izražena indeksom CBR najmanje 15%, zbijenost po standardnom Proctorovu pokusu 95 do 100% za donji stroj, a 97% po modificiranom Proctorovu pokusu za kolničku konstrukciju.

### STABILIZACIJA CEMENTOM I SLIČNIM HIDRAULIČNIM VEZIVIMA

I taj se postupak stabilizacije osniva na miješanju tla s vezivom kad se cementacijom povećava čvrstoća i poboljšavaju druga svojstva tla. Cementom i drugim sličnim hidrauličnim vezivima, kao što su leteci pepeli i pucolani, stabiliziraju se manje plastična, prašinstva, pjeskovita tla i krupnozrnati materijali. Upotrebljava se pretežno u niskogradnji, slično kao vapnena stabilizacija, ali se mnogo više upotrebljava u cestovnim kolničkim konstrukcijama (za nosivi sloj).

**Mehanizam stabilizacije.** Za razliku od vapna, koje zahtijeva glinoviti materijal, cement može stabilizirati i potpuno nekoherentno tlo. Cement, naime, sadrži pucolanske komponente, te predstavlja samostalan vezivo. Kad je tlo pomiješano s cementom u prisutnosti vode, nastaje hidratacija cementa i stvaraju se određeni produkti, u prvom redu kalcijski i aluminijski hidrati koji sljepljuju i povezuju čestice tla. Kad su materijali koherentni, osim opisanog procesa nastaju reakcije između vapna, koje se pri hidrataciji izdvaja iz cementa, i minerala gline i aktivnih silikata iz tla, što dodatno poboljšava svojstva tla. Količina cementa koja se dodaje ovisi o vrsti tla i obično iznosi od 3-10% od mase suhog tla. Ta je količina relativno malena, pa su zrnca tla nepotpuno obavijena. Većinom se, pogotovo, kad su tla sitnozrnata, ne može postići homogenost mješavine. U mješavini cementa i tla stvaraju se najčešće jezgre s većom koncentracijom cementa između kojih se nalazi manje cementa ili su takve jezgre povezane finim cementnim skeletom. Ipak, i takva struktura osigurava znatno poboljšana mehanička svojstva.

**Fizikalni i mehanički učinci cementa.** Zbog hidratacijskih efekata cementa mehanička se svojstva stabiliziranog materijala s vremenom poboljšavaju. Nakon mjesec dana čvrstoća dostiže oko 80% konačne vrijednosti. Neka druga veziva imaju sporije djelovanje (leteći pepeo), pa se toliki porast mehaničkih svojstava ostvaruje otprilike nakon dva mjeseca. Kao parametar učinka stabilizacije najčešće se uzima tlačna čvrstoća, a u određenim je okolnostima nekada važna i otpornost prema niskim temperaturama ili vodi.

Ako se cementom stabilizirani materijal promatra u obliku veće površine, tada je važna i pojava pukotina kojoj su takve površine, odnosno slojevi, sklone. Nastanak se pukotina nastoji spriječiti ili umanjiti upotrebom cementa nižih čvrstoća (PC-25) i primjenom najmanje potrebne količine cementa dostatne za postizanje traženih svojstava.

**Tehnološki postupak.** Tehnološki je postupak stabilizacije sitnozrnatih tala sličan stabilizaciji tla vapnom. Određenu specifičnost uvjetuje praktički jedino vrsta tla. Cementom se, zbog vrlo velikih potrebnih količina, ne stabiliziraju jako plastične gline, nego u prvom redu niskoplastična prašinstva i pjeskovita tla. Stoga je i priprema (sitnjenje materijala) lakša nego za vapnenu stabilizaciju, jer je tada tlo plastičnije i ima jaku koheziju. Tada se miješa strojevima na gradilištu.

Kad se stabilizira kvalitetni zrnati kameni materijal za kolničke konstrukcije, pogodnija je proizvodnja stabilizacijske

mješavine u posebnim postrojenjima. Stabilizacijska se mješavina zbija najčešće vibracijskim sredstvima, a djelotvorni su i gumeni valjci (sl. 9). Uvaljani sloj izložen suncu ili zraku mora se određeno vrijeme (do 7 dana) njegovati vlaženjem ili na neki drugi način kako bi se spriječilo gubitak vode i osigurala pravilna hidratacija.



Sl. 9. Valjanje sloja cementom stabiliziranog šljunka

**Potrebna svojstva.** Svojstva tla stabilizirana cementom ovise o zahtjevima projekta. Za podlogu (posteljicu) ceste često se traži najmanja čvrstoća od 1,75 MN/m<sup>2</sup>. Također može biti postavljen zahtjev za otpornost prema smrzavanju i vodi. Za nosive slojeve cesta standard JUS U.E9.024 propisuje granice čvrstoće nakon 28 dana od 3,0-6,5 MN/m<sup>2</sup>. Gornja je granica postavljena zbog opasnosti od pukotina. Zbijenost sloja treba biti najmanje 98% po modificiranom Proctorovu pokusu.

### STABILIZACIJA BITUMENSKIM VEZIVIMA

Stabilizacija bitumenskim vezivima primjenjuje se za sve vrste tala od krupnozrnatih do zemljanih, iako je primjena za zemljana tla rjeđa. Za bitumensku stabilizaciju osobito su pogodna pješčana tla. Stabilizacija djeluje na temelju veza koje bitumenska sredstva stvaraju između čestica tla i zbog djelomičnog ispunjavanja pora, koje daje određenu otpornost prema vodi. Primjenjuje se većinom za nosive slojeve kolničke cestovne konstrukcije.

**Mehanizam.** Dva su osnovna mehanizma na kojima se temelji djelovanje bitumenske stabilizacije: impregnacija tla i vezanje čestica. Prema jednoj od teorija pri impregnaciji začepuju se pore u tlu i tako se zatvaraju kanalići kroz koje bi voda mogla ući u tlo. Prema drugoj, tzv. membranskoj, teoriji smatra se da bitumenski film obavija pojedine čestice ili grupe čestica što daje isti rezultat, tj. onemogućuje ulazak vode u tlo. Tako tlo zadržava početno stanje praktički nepromijenjenim. Što se tiče povezivanja čestica, ono također nesumnjivo postoji, a osniva se na adheziji između čestica tla i veziva. Dobroj adheziji uvelike pridonosi suha površina čestica. Bitumensko se vezivo, kojim su obavijene pojedine čestice, spaja međusobno te tako povezuje i stabilizira strukturu materijala. Pri tome je bitno da veziva ne bude previše. Čestice tla moraju se djelomično dodirivati, a ne smiju *plivati* u vezivu, jer bi tako bila smanjena stabilnost sustava, osobito pri višim temperaturama.

**Izrada.** Tehnologija bitumenske stabilizacije ovisi o vrsti materijala, vrsti veziva i namjeni.

**Stabilizacija pijeska** provodi se pomoću bitumena, razrijeđenog bitumena i bitumenskih emulzija, a može se upotrijebiti i katran. Ako se upotrebljavaju bitumeni, prednost imaju tvrdi tipovi bitumena zbog boljeg stabilizacijskog učinka. Količina bitumena u stabilizacijskim mješavinama iznosi 5-10%. Pijesak prije obavijanja bitumenom mora biti osušen i zagrijan, tj. stabilizacijska se mješavina priprema u postrojenjima za proizvodnju asfaltnih mješavina (asfaltne baze). Vruća se masa (~160 °C) razastire pomoću razastirača, a

razastri se sloj valja valjcima do tražene zbijenosti. Razrijeđeni se bitumen često upotrebljava jer ga ne treba zagrijavati do tako visokih temperatura kao bitumen. Na temperaturi od  $\sim 90^\circ\text{C}$  razrijeđeni bitumen ima dovoljno nisku viskoznost da može dobro obaviti zrna materijala. Upotrebljavaju se najčešće tipovi razrijeđenog bitumena sa srednjom brzinom isparivanja razrijeđivača (tzv. *medium curing*, MC). Takvo se vezivo češće miješa u centralnom postrojenju. Slojevi su relativno tanji i moraju određeno vrijeme ostati nepokriveni kako bi se mogao ispariti razrijeđivač i postići najbolji stabilizacijski učinak. Bitumenske se emulzije najviše dodaju na gradilištu, pa se emulzija na normalnim temperaturama dodaje na materijal i miješa neposredno na gradilištu. I tada sloj mora određeno vrijeme ostati nepokriven da bi isparila voda koja se oslobađa nakon *razbijanja emulzije*.

**Stabilizacija šljunka.** Bitumenska stabilizacija krupnijeg zrnatog materijala, u prvom redu pješkovitog šljunka, vrlo je slična postupku stabilizacije pijeska. Mješavine su mehanički vrlo otporne, pa se upotrebljavaju za veća opterećenja (nosivi slojevi cesta, završetak donjeg sloja željezničkih pruga za velike brzine i sl.). Udio je veziva manji nego za stabilizaciju pijeska, te iznosi 3...5%.

**Stabilizacija zemljanih materijala.** Iako se zemljani materijali rjeđe stabiliziraju bitumenskim vezivima, ipak se to u određenim prilikama radi. Tlo za stabilizaciju ne smije imati indeks plastičnosti veći od 18%, inače se ne može vezivo dobro izmiješati s tlom. Uglavnom se upotrebljavaju razrijeđeni bitumeni. Važan je udio vode u tlu, koji mora biti  $\sim 2/3$  od optimalnog, ali ne uvijek, pa su potrebna prethodna laboratorijska ispitivanja.

**Stabilizacija pomoću mineralnih ulja.** Mineralna ulja, naftni derivati niske viskoznosti, prodiru u šupljine postojećeg tla zbog gravitacije, te ga tako impregniraju i zaštićuju od djelovanja vode. Najbolji se rezultati postižu tretiranjem dobro granuliranih, mehanički stabilnih materijala.

## STABILIZACIJA POSEBNIM KEMIJSKIM SREDSTVIMA

Zbog aktualnosti problema stabilizacije tla, koji usprkos brojnim postupcima što se redovito upotrebljavaju, ipak još uvijek nije jedinstveno i sasvim zadovoljavajuće riješen, u svijetu se ispituju učinci različitih kemijskih sredstava od kojih se očekuje da bi mogli dati dobre rezultate. Sa sredstvima kao što su kalcij-klorid, natrij-silikat, fosfatna kiselina, anilin-furfurol, kalcij-akrilat, sulfatni lug i neka druga, postignuti su povoljni rezultati. Postoje i neka patentom zaštićena sredstva. Ipak, zasad se niti jedan od tih postupaka nije uveo u širu primjenu.

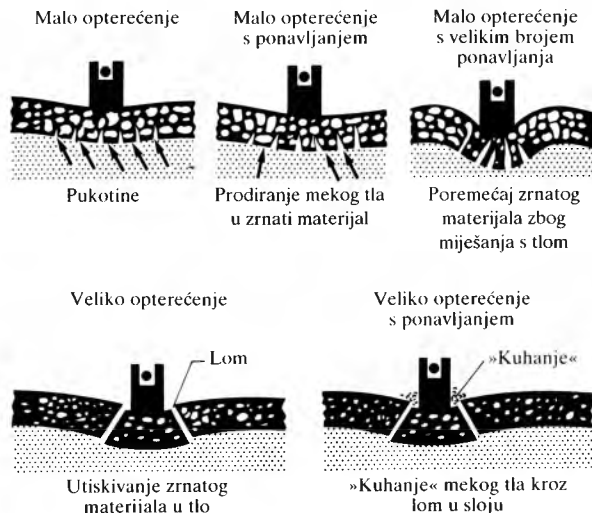
## STABILIZACIJA SLABONOSIVOG TLA POMOĆU GEOTEKSTILA

Za takvu stabilizaciju nisu potrebne nikakve akcije u tlu koje se želi učvrstiti. To bi zapravo bilo i vrlo teško učiniti jer se taj postupak primjenjuje za vrlo slaba tla (močvarna, organska tla) ili tla koja su zasićena vodom bez prave mogućnosti za njihovo poboljšanje. Stabilizacijski se sustav zbog toga postavlja zapravo iznad površine postojećeg slabog tla, a sastoji se od geotekstila (najčešće netkani tekstil ili polimerne mreže) položenog na tlo i sloja zrnatog kamenog materijala određene debljine preko toga. Uspostavljaju se mehanizmi interakcije sustava zrnati kameni materijal-geotekstil-tlo, te se na površini kamenog sloja postiže potrebna razina nosivosti.

**Geotekstili (geosintetici).** To su industrijski proizvodi u obliku tankih membrana, većinom s određenom propusnošću za vodu, koji se upotrebljavaju u građevinarstvu. Za stabilizaciju tla najčešće dolaze u obzir netkani tekstili i polimerne mreže. Ti se proizvodi dosta upotrebljavaju i u nas. Netkani se tekstili proizvode mehaničkim, kemijskim ili termičkim sastavljanjem sintetičkih vlakana položenih u slojeve. Glavne su im karakteristike dobra otpornost prema istezanju, sposobnost za filtriranje vode i otpornost na utjecaje okoliša.

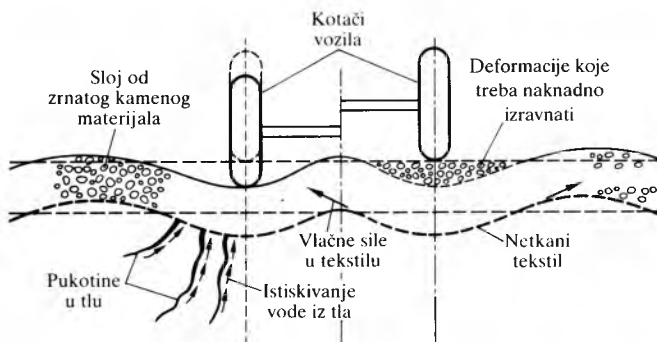
Polimerne su mreže mrežasti geotekstili (geosintetici) proizvedeni od polimernih materijala posebnim postupkom ekstruzijom. Odlikuju se velikom vlačnom čvrstoćom, te su također otporni na utjecaje okoliša.

**Mehanizam djelovanja geotekstila.** Djelovanje sustava s geotekstilom može se najbolje razjasniti ako se najprije promotri ponašanje sustava bez geotekstila, tj. kad je sloj zrnatog kamenog materijala položen neposredno na slabo tlo. Najkritičnija je situacija za takve sustave kad se neposredno po kamenom sloju kreće pokretno opterećenje. Razmatrani sustav (bez geotekstila) može se neprihvatljivo deformirati, pa sloj i probiti pri manjim opterećenjima ako je broj prijelaza velik, a pri većim opterećenjima već i pri malo prijelaza (sl. 10). Pri malim se opterećenjima sloj kamenog materijala elastično ugiba prema dolje, a opterećenje se prenosi na površinu tla na mnogo većoj širini od otiska kotača.



Sl. 10. Ponašanje sloja zrnatog kamenog materijala položenog neposredno na meko tlo pod kotačem vozila

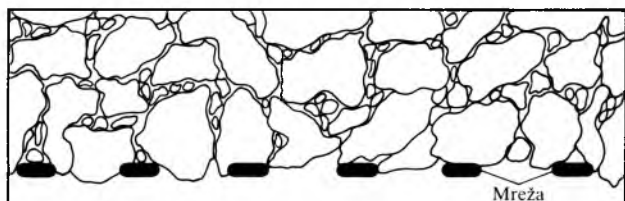
Pri opetovanim opterećenjima zrnati kameni materijal ne može podnijeti vlačna naprezanja koja se javljaju s njegove donje strane, te počinje pucati počivajući od donje površine sloja. U te pukotine i šupljine ulazi meko tlo, pa se remete kontakti među zrnima i smanjuje trenje te zrna počinju *plivati* u mekom zemljanom materijalu. Tako se smanjuje čvrstoća sloja i njegova sposobnost raspodjele opterećenja, a pri većem broju prijelaza opterećenja nastaju osjetne deformacije i propadanje sloja uz pojavu plastičnih lomova u tlu. Pri velikim se opterećenjima vrlo brzo, praktički odmah, lomi kameni sloj i utiskuje piramida zrnatog materijala u tlo.



Sl. 11. Ponašanje sustava zrnati kameni materijal-netkani tekstil-meko tlo pod kotačem vozila

Kad je ugrađen netkani tekstil, situacija je bitno drugačija (sl. 11). Netkani tekstil mijenja ponašanje sustava. Pri malim opterećenjima poboljšava se rasprostiranje opterećenja, smanjuju se deformacije te se sprečava prodor mekog tla u pukotine i šupljine u sloju zrnatog kamenog materijala. Pri velikim opterećenjima u tekstilu se pojavljuje i povećano

vlačno naprezanje koje djeluje povoljno na rasprostiranje opterećenja kroz sloj kamenog materijala. Svojom sposobnošću filtracije netkani tekstil pridonosi i konsolidaciji tla tokom vremena, jer se pod opterećenjem iz tla istiskuje i dio porne vode, koja se na prikladan način odvodi iz zone objekta. Djelovanje mreža nešto je drugačije. Takvi sustavi uspješno djeluju čak i kad je tlo slabo i kad ne postoje izgledi da mu se stanje popravi. Iznad mreže se ugrađuje zrnati kameni materijal krupne granulacije, pa u donjoj zoni sloja dio kamenih zrna ulazi u otvore mreže i tamo se uklješćuje. Time je kameni sloj pri dnu čvrsto spregnut s mrežom, pa je spriječeno bočno razmicanje kamenih zrna pod opterećenjem. Meko tlo, stoga, ne može ulaziti u sloj i kvariti mu svojstva pa je sačuvana cjelovitost sloja i njegova efektivna debljina.



Sl. 12. Armiranje donje zone kamenog sloja polimernom mrežom

Donja površina sustava, tj. mreža kojoj kroz otvore vire kamena zrna, vrlo je hrapava, što pridonosi armirajućem djelovanju, odnosno njegovoj spregnutosti s tlom. Poboljšava se i djelovanje tla koje je obuhvaćeno mrežom i kamenim slojem, pa nema prevelikih deformacija pod opterećenjem, a na površini se sloja ostvaruje potrebna nosivost. (sl. 12).

**Izrada stabilizacije tla pomoću geotekstila.** Prije početka rada na stabilizaciji potrebno je odrediti debljinu sloja zrnatog kamenog materijala. Debljina sloja mora biti takva da se na njegovoj površini može ostvariti nosivost koja je dovoljna za dalju uspješnu izradbu i oslanjanje nasipa ili za neposredno odvijanje prometa. Njegova debljina ovisi o stanju slabog tla, vrsti i jakosti geotekstila i vrsti zrnatog kamenog materijala, a određuje se na pokusnom odsječku ceste u stvarnim uvjetima. Orijentacijski, debljina kamenog materijala iznad netkanog tekstila iznosi 25...50 cm, a iznad polimernih mreža 15...30 cm.

Tlo na koje se postavlja geotekstil potrebno je najprije urediti. Ponekad se skida najgornji humusni sloj, osobito ako je to povezano i s odstranjivanjem panjeva, korijenja, šiblja i grmlja koje bi moglo probiti ili poderati geotekstil. Katkad se pak najgornji vegetativni sloj ne smije dirati, jer to može biti i najčvršći dio tla. Ako se može planirati, dobro je da se tlo izravna i da mu se da određeni pad (oko 5%), jer to omogućuje kasnije otjecanje vode. U pogledu nosivosti tla ne postavljaju se nikakvi zahtjevi, dakako uz pretpostavku da je kvaliteta tla u dubini jednaka ili bolja nego pri površini, ali da nije lošija. Ako nije tako, potrebna su posebna geotehnička ispitivanja i rješenja.



Sl. 13. Polaganje netkanog tekstila na provlaženo tlo

Geotekstili se isporučuju i dopremaju na gradilište u rolama širine 2...4 m i duljine 100...300 m. Masa je role ograničena mogućnostima manipulacije i obično iznosi 100...200 kg. Razmotavanjem rola geotekstil se polaže neposredno na tlo (sl. 13). Trake treba međusobno spajati u uzdužnom i poprečnom smjeru. Netkani tekstili spajaju se preklapanjem, zavarivanjem i šivanjem. Spajanje je preklapanjem najjednostavnije, ali se tada troši više materijala. Preklopi moraju biti široki 20...50 cm, što ovisi o vrsti tla i o tome da li se radi o uzdužnom ili poprečnom preklopu. Kad je tlo slabije, preklopi moraju biti veći nego za bolje tlo, a preklopi poprečnog spoja moraju biti širi nego preklopi uzdužnog spoja. Ako se spojevi vare ili šivaju, oni su mnogo uži, 10...20 cm. Zavaruje se plamenikom tako da se tekstil u zoni spoja rastali, što omogućuje slijepljivanje s drugom trakom. Šiva se posebnim šivaćim strojevima pomoću kvalitetnog konca. Polimerne mreže spajaju se preklapanjem, vezanjem ili zabijanjem željeznih spojnica promjera 5...8 mm.



Sl. 14. Razastiranje zrnatoga kamenog materijala preko netkanog tekstila i zabijanje

Na razastrti se geotekstil razastire zrnati materijal (sl. 14), koji može biti krupni prirodni šljunak, prirodne drobine ili drobljeni kameni materijal, tucanik iz kamenoloma. Dovozi se i istovaruje s čela, tj. vozila se moraju kretati po nasipnom sloju. Vožnja preko sloja od zrnatog materijala moguća je i povoljno djeluje na zbijanje. Razastire se i planira lakim buldozerima ili grejderima, a isplanirani se sloj zbjija lakšim vibracijskim napravama, vibropločama ili vibrovaljcima. Postignuta se nosivost najčešće ispituje pomoću kružne ploče.

LIT.: Road Research Laboratory, *Mehanika tla pri projektovanju i građenju putova* (prijevod). Građevinska knjiga, Beograd 1964. – H. L. Jessberger, *Grundlagen und Anwendung der Bodenstabilisierung*. VDI-Verlag, Düsseldorf 1967. – A. Kezdi, *Stabiliserte Erdstrassen*. VEB Verlag, Berlin 1973. – C. A. O'Flaherty, *Highways*, Volume II. Edward Arnold Ltd, London 1974. – R. M. Koerner, *Designing with Geosynthetics*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs 1986.

B. Babić

## STABILNOST GRAĐEVNIH KONSTRUKCIJA, znanstvena grana koja proučava stabilnost ravnoteže građevnih konstrukcija.

Teorija stabilnosti građevnih konstrukcija relativno je mlada znanost; s usavršavanjem materijala i konstrukcijskih sustava ona postaje sve važnija, jer omogućuje gradnje vitkijih i tako ekonomičnijih i elegantnijih konstrukcija. Početkom teorije stabilnosti smatra se studija *Sur la force de colonnes* (1759) L. Eulera, u kojoj je on pokazao da nosivost tlačnih štapova ne ovisi samo o čvrstoći njihova presjeka nego i o stabilnosti ravnoteže. Eulerove spoznaje potvrdio je i proširio J. L. Lagrange u svom radu *Sur la figure de colonnes* (1770). Da Eulerova formula vrijedi samo za štapove kojima je vitkost veća od neke granične vitkosti, utvrdio je E. Lamarle (1845). F. Engesser usavršio je Eulerov postupak primjenom dvostrukog modula elastičnosti (1889). Eksperimentalna verifikacija potječe od T. v. Karmana (*Die Knickfestigkeit gerader Stäbe*, 1910). W. Ritz je na osnovi ekstremalnih svojstava potencijalne