

Zbijanje tla i drugih zrnatih materijala za građevine

Heinz Brandl

Ključne riječi

tlo,
zrnati materijal,
zbijanje,
geotehnika,
ceste,
željeznice,
zemljane građevine

Key words

soil,
granular material,
compaction,
geotechnics,
road,
railways,
earth structures words

Mots clés

sol,
matériau granuleux,
compactage,
géotechnique,
routes,
chemins de fer,
ouvrages en terre

Ключевые слова

грунт,
зернистый материал,
уплотнение,
геотехника,
дороги,
железные дороги,
земляные сооружения

Schlüsselworte:

Boden,
körniges Material,
Verdichtung,
Bodentechnik,
Strassen,
Eisenbahnen,
Erdbauwerke

H. Brandl

Pregledni rad

Zbijanje tla i drugih zrnatih materijala za građevine

U radu se (predavanje posvećeno prof. Nonveilleru) polazi od konstatacije da je kvalitetno zbijanje iznimno važno za pravilan odnos između nosivosti i deformacija odnosno za faktor sigurnosti, uporabivosti, vijek trajanja i održavanje građevina koje leže na zemljanom materijalu ili su od njega izgrađene. Opisani su postupci zbijanja i parametri važni za njihovo kvalitetno provođenje. Istaknuta je i važnost kontinuirane kontrole. Prikazano je i nekoliko odgovarajućih primjera.

H. Brandl

Subject review

Compaction of soil and other granular materials used in construction work

The paper (lecture consecrated to professor Nonveiller) starts by emphasizing that good-quality compaction is highly significant for the proper relationship between the bearing capacity and deformation, i.e. for the factor of safety, usability, life span and maintenance of structures either lying on earth material or made of such material. Compaction procedures and parameters significant for their proper implementation are described. The importance of continuous control is emphasized. Several relevant examples are also presented.

H. Brandl

Ouvrage de synthèse

Compactage du sol et d'autres matériaux granuleux pour les ouvrages

L'article (en hommage du professeur Nonveiller) part de la constatation qu'un bon compactage présente une grande importance pour un rapport correct entre la capacité portante et les déformations, c'est-à-dire pour les facteurs de sécurité, de conformité, de durée de vie et de maintenance des ouvrages reposant sur les matériaux en terre ou des ouvrages qui en sont construits. On décrit les méthodes de compactage et les paramètres importants à leur bonne réalisation. On souligne aussi l'importance d'un contrôle continu. Quelques exemples illustrent le thème abordé.

Х. Брандл

Обзорная работа

Уплотнение грунта и других зернистых материалов для строительных сооружений

В работе (лекция посвящена проф. Нонвайллеру) исходит из констатации, что качественное уплотнение является исключительно важным для правильного соотношения между несущей способностью и деформациями, соответственно для коэффициента запаса, употребительности, долговечности и содержания в исправности сооружений, лежащих на земляном материале или сооружённых из него. Описанные способы уплотнения и параметры являются важными для их качественного проведения. Подчёркнута и важность континуированного контроля. Показано и несколько соответствующих примеров.

H. Brandl

Übersichtsarbeit

Verdichtung des Bodens und anderer körniger Materiale für Bauwerke

Im Artikel (Vortrag gewidmet Herrn Prof. Nonveiller) geht man von der Konstatierung aus dass gute Verdichtung ausserordentlich wichtig ist für ein regelrechtes Verhältnis zwischen Tragfähigkeit und Verformung bzw. den Sicherheitsfaktor, Nutzbarkeit, Lebensdauer und Instandhaltung von Bauwerken die auf erdigem Material liegen oder davon erbaut sind. Beschrieben sind Verdichtungsverfahren und Parameter die für deren fachgemässe Durchführung wichtig sind. Hervorgehoben ist die Wichtigkeit einer kontinuierlichen Kontrolle. Dargestellt sind einige entsprechende Beispiele.

Autor: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dr. h. c. **Heinz Brandl**, Technical University of Vienna, Austria

1 Uvod

Optimalno zbijanje zemljanih i zrnatih materijala i kontrola tog postupka važna je ne samo za područje građenja cesta i željeznica već, i za mnoga druga područja koja se bave izvođenjem građevinskih konstrukcija, a u tom smislu svakako trebamo razlikovati površinsko zbijanje u slojevima od dubinskog zbijanja (= poboljšanja tla). Ovaj se rad bavi pitanjem kvalitetnog zbijanja u slojevima.

Ponekad se u građevinarstvu, tj. u području cesta, željeznica pa čak i u geotehnici, podcjenjuje značenje zbijanja i povećanja gustoće. Mnogi inženjeri smatraju zbijanje perifernim pitanjem ili pak misle da je u tom području sve jasno ("dovoljno je nekoliko prijelaza valjkom i sloj je dovoljno zbijen" ili "u slučaju potrebe dovoljno je upotrijebiti teži valjak"). Međutim, optimizacija zbijanja zemljanih i granularnih materijala i pouzdana kontrola tog procesa ipak nije tako jednostavna, a ovisi o brojnim međusobno povezanim faktorima koji opet ovise o cilju i načinu zbijanja, te o opremi koja se koristi za zbijanje. To je ilustrirano na slici 1. s pomoću dva primjera: duboko i površinsko dinamičko zbijanje teškim teretom (udarno nabijanje teškim nabijačima) i površinsko zbijanje u slojevima pomoću valjaka (statički, vibracijski i oscilacijski valjci). Slika 1. također pokazuje jaku međusobnu povezanost između podloge i opreme za zbijanje. Mjerenjem te povezanosti možemo ostvariti tri najvažnija cilja zbijanja:

- *Optimizacija zbijanja*

Tu se radi o kvaliteti zbijanja, o potrebnoj energiji i vremenu zbijanja, te o potrebnim geotehničkim parametrima materijala koji se zbija. Pretjerano zbijanje i ponovno rahljenje tla treba izbjegavati ništa manje nego heterogeno, tj. neujednačeno zbijanje. Stoga se može reći da je cilj suradnje između geotehnike i strojarstva zapravo razvoj "inteligentne" opreme za zbijanje koja će sama reagirati na lokalne promjene svojstava zemljanog/zrnatog materijala i to automatskim mijenjanjem odgovarajućih strojarskih parametara. Valjci opremljeni sustavima za automatsko reguliranje stupnja zbijanja (tj. vibriranja/osciliranja) već se smatraju značajnim korakom u tom pravcu jer se time zbijanje podiže s razine rutinskog umijeća na razinu složenoga tehničkog procesa utemeljenog na odgovarajućim znanstvenim postavkama.

- *Kontrola zbijanja*

Kontrolu treba obavljati već i tijekom postupka zbijanja.

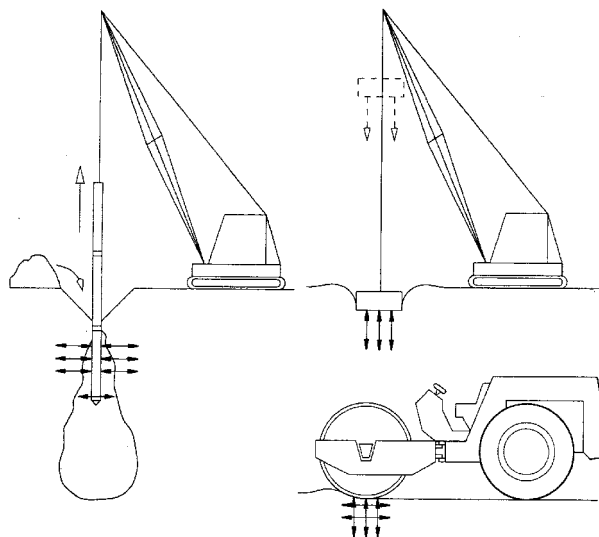
Od prvenstvenog je značenja baždarenje kontrolnih podataka utemeljeno na reakciji između tla i opreme za zbijanje. Broj kontrolnih ispitivanja nakon zbijanja treba smanjiti i u tom se smislu trebaju prorijediti

sadašnja tradicionalna slučajna ispitivanja nakon zbijanja. S druge strane, sve veća se važnost treba pridavati kontinuiranoj kontroli zbijanja (s pomoću kontrolnih uređaja koji su sastavni dio opreme za zbijanje). Dodatni je inovacijski korak razvoj "inteligentnog" valjka, koji ne određuje samo vrijednosti bezdimenzionalnog dinamičkog zbijanja, već definira i dinamičke module, a sve to registriranjem i interpretiranjem stalno promjenljivih odnosa između tla i valjka.

- *Dokumentacija o zbijanju*

Trebaju se iskazati i vrijednosti tradicionalnih kontrolnih ispitivanja u jednoj točki i vrijednosti koje se dobivaju kontinuiranom kontrolom (za razliku od tradicionalnih metoda, manipuliranje rezultatima gotovo da je nemoguće u slučaju kontinuirane kontrole s pomoću uređaja montiranog na valjku).

Odgovarajuće zbijanje nije potrebno samo za zemljane već i za druge zrnate materijale, a to uključuje i razne otpadne materijale. Reciklirani materijali, leteći pepeo, produkti izgaranja u palionicama, prethodno tretirani otpadni materijal, građevinski otpad itd. sve se češće ugrađuju u nasipe, cestovne objekte, brtvene slojeve, potporne konstrukcije itd. Osim toga, čak se i neprerađeni komunalni otpad mora nabijati u slojevima pri odlaganju na odlagališta.



Slika 1. Shematski prikaz dubinskog i površinskog zbijanja - uzajamno djelovanje opreme materijala koji se zbija

2 Opći aspekti dubokog i plitkog zbijanja

Zemljani i drugi zrnati materijali mogu se zbijati na više načina, a postupak koji ćemo odabrati ovisi o cilju zbijanja, o svojstvima materijala koji se zbija, o opremi za zbijanje, o rokovima građenja, o ugovorenoj cijeni itd. Primjenjuju se ovi postupci zbijanja: statičko, vibracijs-

ko, oscilacijsko, kružno, gnječenjem, tlačno, udarno, eksplozivno, kombinirano (kombinacija nekih od gornjih metoda).

Ti se postupci mogu provoditi kao zbijanje: kontinuirano, ciklično, isprekidano, povremeno.

Osim toga ti se postupci mogu provoditi pri različitim stanjima naprezanja (malo srednje ili veliko naprezanje) i uz nanošenje različite energije (mala, srednja ili velika vrijednost) što također utječe na rezultate. Na primjer, anizotropno ponašanje zbijenih slojeva i omjer između, vrijednosti nanese energije, vrijednosti naprezanja te naravno i o parametrima zemljanog ili drugog zrnatog materijala.

Duboko zbijanje je vrsta poboljšanja tla pri kojoj se najbolji rezultati postižu vibroflotacijom (skidanjem i zamjenom materijala), snažnim nabijanjem i dubokim miniranjem. Tim se metodama obično postižu rezultati do dubine od 10 do 20 m, ovisno o svojstvima tla, opremi za zbijanje i energiji zbijanja. Tlo se može poboljšati do dubine od 40 m s pomoću "gigastroja" za udarno nabijanje (težina je 200 t, visina pada 40 m), dok se vibroflotacijom poboljšanja ostvaruju do dubine od najviše 60 m.

Postupci dubokog zbijanja primjenjuju se i za poboljšanje prirodnog tla i za poboljšanje umjetnih nasipa, naročito kada se provodi u okviru postupaka za isušivanje tla. Udarno nabijanje smatra se najboljom metodom za intenzivno duboko zbijanje starih komunalnih odlagališta. Vibroflotacijskim se postupkom može koristiti za šljunčane pilote i za pilote otpadnog materijala.

Iskustva i opažanja na terenu pokazuju da se dubokim dinamičkim zbijanjem značajno povećava otpornost na likvefakciju i seizmičko opterećenje tla i umjetnih nasipa i to zato što se time uvelike izaziva dinamičko opterećenje i trešnja tla. Objekti temeljeni na tako poboljšanom tlu pokazali su se bitno otpornijim na seizmičke utjecaje od građevina koje stoje na tlu koje nije bilo poboljšano dinamičkim zbijanjem/povećanjem gustoće tla. To se odnosi i na plitke i na duboke temelje.

Površinsko zbijanje svakako je glavno područje zbijanja zemljanih i zrnatih materijala u slojevima. Kvalitetno zbijanje traži se za:

- ceste i autoceste,
- željeznice,
- uzletno-sletne staze, zračne luke,
- parkirališta,
- savitljive temelje na zrnatom materijalu (npr. za spremnike),
- plitke temelje na zamijenjenom tlu,
- nasipavanje iza objekata (zidovi, propusti, potporni objekti, upornjaci na mostovima),

- zatrpavanje jaraka (naročito jaraka za vodoopskrbne sustave u urbanim područjima),
- potporne konstrukcije (npr. armirano tlo),
- ispune na objektima (npr. rešetkasti zid od montažnih elemenata i ostale čelijaste konstrukcije),
- nasipe za prometnice,
- zemljane brane i brane od kamenog nabačaja za hidroelektrane,
- nasipe za zaštitu od poplave,
- nasipe za zaštitu od odrona kamenja, klizanja tla i lavina,
- nasipe za industrijski mulj,
- zamjenske nasipe i potporne nasipe na pokosima (za povećanje stabilnosti pokosa),
- brtvene slojeve na odlagalištima otpada (osnovni brtveni slojevi, brtveni slojevi na kosinama, gornji slojevi),
- odlagališta.

Za postizavanje optimalne vrijednosti zbijanja (tj. visokog stupnja i ujednačenosti zbijanja) posebno su značajni faktori koji bitno utječu na površinsko zbijanje (u slojevima). U nastavku se daju osnovni parametri (koji uvelike ovise jedni o drugima):

Parametri materijala su:

- vrsta tla,
- granulometrijski sastav,
- oblik zrna (uglatost, oblik, površinska tekstura),
- vlažnost,
- granice konzistencije sitnozrnatog tla,,
- krutost sloja koji se zbija,
- debljina nasipnog sloja,
- krutost i parametri tla za donji sloj,
- svojstva na kontaktu između susjednih slojeva nasipnog materijala.

Parametri valjka (vibracijskog ili oscilacijskog) su:

- smjer sile koja nastaje kao rezultat dinamičkog kontakta,
- frekvencija pobude,
- amplituda bubnja valjka,
- pokretni ili nepokretni bubanj,
- promjer bubnja,
- težina valjka,
- omjer između težine karoserije i težine bubnja te omjer između ukupne težine i vibracijske težine valjka,
- masa bubnja, ekscentra i karoserije te njihovi omjeri,
- geometrija i oblik bubnja (npr. cilindričan, višekutan);
- stanje bubnja (cilindričnost bubnja, ležajevi, proklizavanje guma),
- vučeni ili samohodni valjak.

Parametri postupka

- broj prijelaza valjka,
- brzina i smjer valjka,

- nagnutost površine koja se nabija,
- oblik, nagnutost i glatkost sloja koji se nabija i (eventualno) postojanje mjestimičnih neravnina.

Način rada vibracijskog valjka:

- stalni kontakt,
- djelomično uzdizanje (= djelomičan gubitak kontakta),
- preskakanje,
- njihanje kotača (trebalo bi se izbjegavati),
- nekontrolirano kretanje kotača (treba se izbjegavati).

Načini rada bubnja oscilacijskog valjka:

- lijepljenje,
- lijepljenje/klizanje.

Na temelju prethodno rečenog možemo zaključiti da je zbijanje složen postupak, te da u obzir trebamo uzeti velik broj faktora ako želimo dobiti prikladno zbijenu površinu. Pritom trebamo naglasiti da je uz stupanj zbijanja važna i ujednačenost zbijanja. Na osnovi iskustva i dugotrajnog praćenja postupaka zbijanja, ustanovljeno je da nosivost, stupanj deformacije, indeks sadašnje uporabivosti (PSI – *Present Serviceability Index*) i vijek trajanja autoceste ili željeznice uvelike ovise o stupnju zbijanja i o homogenosti višeslojnih cestovnih i željezničkih konstrukcija i posteljice (vrha nasipa ili iskopa).

Međusobni su utjecaji dobro ispitani već prije dva do tri desetljeća, a rezultati tih ispitivanja poslužili su za izradu detaljnih preporuka [4] (tablica 1.). Podaci iz tablice 1. usvojeni su 1980. godine kao pokazatelji mjerodavni za gradnju cesta i autocesta u Austriji. Sustav kontinuirane kontrole zbijanja kojim su opremljeni valjci omogućuje sofisticirano praćenje homogenosti i trebao bi postupno zamijeniti tradicionalne metode za ocjenu kakvoće zbijene površine.

Tablica 1 Zahtjevi homogenosti/ravnomjernosti za ceste i autoceste [4] i austrijski propisi za cestogradnju) koji se odnose na nevezane slojeve

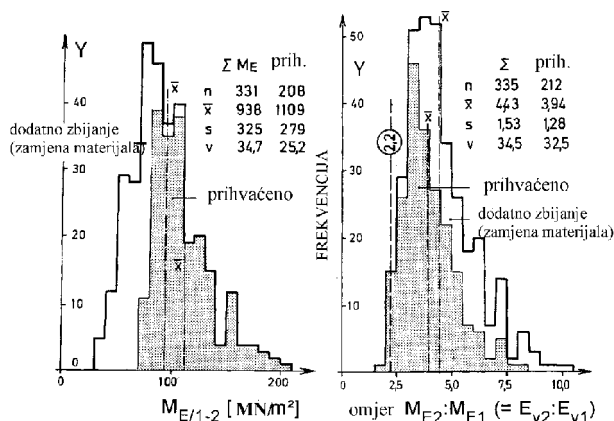
Parametar	Koeficijent varijacije v [%]		
	Posteljica	Tampon	Nosivi sloj
Gustoća suhog tla ρ_d	5	4	3
Moduli E_{v1}, E_{v2} (pokusi probnom pločom)	30	20	15
Benkelmanova greda B vrijednost	30	20	15
$v = \frac{s_x}{\bar{x}}$ gdje je s_x – standardna devijacija, \bar{x} – srednja vrijednost			

3 Kontrola zbijanja

3.1 Uvodne napomene

Kontrola zbijanja na licu mjesta važna je svuda gdje dolazi do interakcije između konstrukcije i tla te na objektima koji se sastoje od zemljanog ili nekog drugog zrnatog materijala. Odgovarajuća kontrola izuzetno je važna za postizanje optimalne kvalitete zbijanja te za ocjenjivanje kvalitete.

Iako se u mehanici tla tradicionalne metode uspješno primjenjuju već više desetljeća trebamo napomenuti da se one temelje samo na pojedinačnim ispitivanjima, tj. na ispitivanju manje ili više nasumce odabranih mjesta. Na slikama 2. i 3. prikazani su rezultati ispitivanja probnom pločom koje je obavljeno na gornjem nosivom sloju nekih dionica na autocestama. Optimizacija zbijanja i odgovarajuća kontrola provedeni su na tradicionalan način, tj. bez kontinuirane kontrole zbijanja (CCC). U slučajevima kada nisu postignute tražene vrijednosti, zatražena je zamjena lokalnog tla ili dodatno zbijanje. Omjer modula ponovnog opterećenja i prvog opterećenja, tj. $E_{v2} : E_{v1}$, bio je mnogo veći od dopuštene gornje granične vrijednosti od 2,2 koja je zadana u nekim propisima. Ovi primjeri pokazuju, kao i tisuće sličnih primjera, da se omjer $E_{v2} : E_{v1}$ nikako ne može smatrati općeprihvatljivim i pouzdanim kriterijem za ocjenu kvalitete zbijanja.

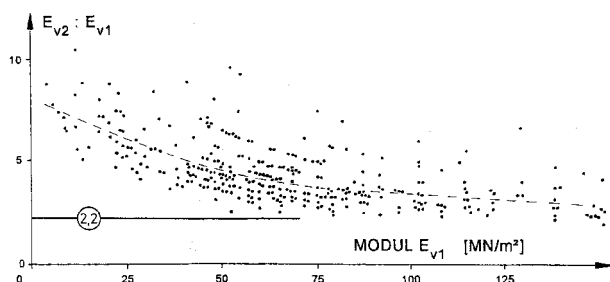


LEGENDA:

- prihv.- samo prihvaćene vrijednosti (tj. dovoljne kvalitete zbijanja)
- M_E - modul dobiven ispitivanjem probnom pločom u skladu sa švicarskim propisom SNV 670317
- M_E - $D \cdot \Delta p / \Delta s$
- $M_{E1/2}$ - sekantni modul prvog opterećenja određen pri pritisku od $p = 0,1 - 0,2 \text{ MN/m}^2$

Omjer $M_{E2} : M_{E1}$ ($= E_{v2} : E_{v1}$) odnosi se na ponovno opterećenje i prvo opterećenje

Slika 2. Histogram modula M_E i omjera $E_{v2} : E_{v1}$ ($= M_{E2} : M_{E1}$) za gornji nosivi sloj na jednoj dionici autoceste. Nasipni materijal: pješčani šljunak otporan na smrzavanje-odmrzavanje



Slika 3. Odnos između deformacijskog modula E_{v1} (prvo opterećenje) i omjera između drugog i prvog opterećenja, $E_{v2} : E_{v1}$. Posteljica autoceste (pješčani šljunak iz jednog izvora)

Rasap vrijednosti koji vidimo na slikama 2. i 3. može se prihvatiti kao tipičan za gradilišne uvjete u kojima je postignuta srednja do dobra kvaliteta zbijanja. To upozorava na dvije značajne činjenice:

- uglavnom neizbježnu heterogenost posteljice i tampona na kolničkim i željezničkim nasipima, čak i u slučaju uporabe pripremljenog nasipnog materijala.
- nepouzdanost tradicionalne metode za kontrolu zbijanja mjestimičnim provjeravanjem kvalitete.

Zbog sve strožih zahtjeva koji se postavljaju u vezi s gradnjom inženjerskih konstrukcija i nasipa, danas se zbijanje treba, kada je god to moguće, kontrolirati kontinuirano i to već tijekom samog postupka zbijanja. To danas omogućuju dvije nerazorne metode:

- kontinuirana kontrola zbijanja (CCC) uređajem koji se nalazi na valjku,
- spektralna analiza površinskih valova (SASW) ili kontinuirana analiza površinskih valova (CSW).

Obje su metode za kontrolu zbijanja nerazorne i mogu se primijeniti i za zemljani materijal i za sve tipove ostalih zrnatih materijala. Međutim, za razliku od postupka CCC koji se obavlja uređajem već montiranim na valjku, kod postupka CSW valja se koristiti posebnom vanjskom opremom za ispitivanje koju treba postaviti na ravnu površinu tla, a sastoji se od elektromagnetskog vibratora koji generira površinske valove te od niza geofona koji primaju te valove. Stoga stvarno kontinuirana optimizacija zbijanja (tj. optimizacija tijekom valjanja) nije moguća, a opsežna bi se baždarenja trebala obaviti za kontinuiranu kontrolu zbijanja. S druge strane, prednost postupka CSW sastoji se u dubini prodiranja, a to omogućuje naknadnu kontrolu čitave konstrukcije.

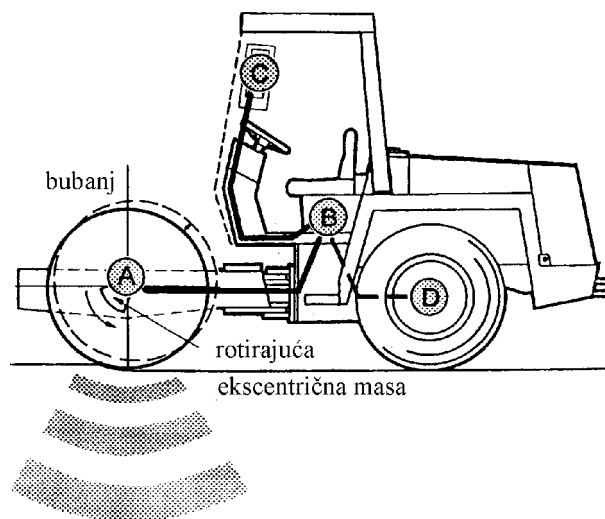
3.2 Kontinuirana kontrola zbijanja (CCC) tijekom valjanja

Ovaj inovativni postupak unosi značajno poboljšanje u područje kontrole zbijanja jer su podaci dostupni već u vrijeme zbijanja i to za čitavu površinu koju valjak zbjia.

Metoda se u početku primjenjivala samo za vibracijsko zbijanje. Kasnije je utvrđeno da je podobna i za oscilacijske valjke.

Osnovna prednost kontinuirane kontrole zbijanja (CCC) tijekom valjanja sastoji se u činjenici da je sam valjak sredstvo kojim se obavlja mjerenje, pa se kontrola obavlja istovremeno sa optimizacijom i stalnim iskazivanjem podataka o zbijanju. Mjerna se oprema jednostavno postavlja i na oscilacijske i na vibracijske valjke (glatke valjke, ježeve, pa čak i na valjke s poligonalnim bubnjevima). Iskustva pokazuju da su se operateri, nadzorni inženjeri itd. vrlo brzo priviknuli na ovu metodu kontrole. Time se eliminiraju nekvalitetni valjci kojima se postižu slabi rezultati, a dobiveni podaci ne mogu se mijenjati.

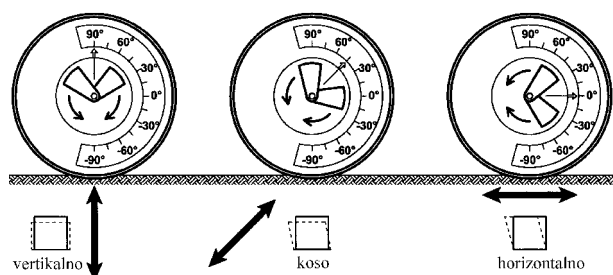
Zbijanje vibrovaljkom obavlja se s pomoću bubnja koji vibrira djelovanjem rotirajuće mase. Oscilacija bubnja mijenja se ovisno o odzivu tla. Ovom se činjenicom koristi sustav CCC za mjerenje krutosti tla. Prema tome, bubanj vibracijskog (ili oscilacijskog) valjka rabi se i kao sredstvo za mjerenje (slika 4.): Njegovo se kretanje bilježi (A), analizira u procesoru (B) gdje se izračunava vrijednost dinamičkog zbijanja, a rezultati se iskazuju na uređaju s ekranom (C) gdje se mogu i pohraniti. Osim toga, potreban je i dodatni senzor kojim se može odrediti lokacija i brzina valjka (D). Primjenom sustava GPS (globalnog sustava za pozicioniranje) položaj valjka može se locirati uz odstupanje od najviše 5 cm.



Slika 4. Princip rada na valjku montiranog uređaja za kontinuiranu kontrolu zbijanja (CCC). A = jedinica za registriranje; B = procesor; C = jedinica za prikaz rezultata; D = određivanje položaja i brzine

Najnovije inovacije su automatski kontrolirani valjci koji podešavaju smjer nanošenja sile ovisno o variranju svojstava tla, pa tako uzimaju u obzir i porast krutosti tijekom zbijanja. Na slici 5. prikazan je valjak tipa "vario" kod kojeg se zbijanje automatski prebacuje s oscili

ranja na vibriranje i obratno, ovisno o automatski registriranim svojstvima tla. Na slici 6. vidimo kako pritisak tla ovisi o smjeru pobude i načinu rada "vario"-valjka



Slika 5. "Vario"-valjak koji se može automatski i postupno prebaciti s vibriranja (vertikalna pobuda) na osciliranje (horizontalna pobuda) - ovisno o lokalnim svojstvima tla

(tablica 2.). Dakle, "vario"-valjcima možemo se koristiti kao univerzalnim valjcima pogodnim za sve vrste tla. Osim toga, takav optimalizirani postupak zbijanja omogućuje vrlo ravnomjerno zbijanje uz manji broj prijelaza valjka što, između ostalog, rezultira i u manjem drobljenju i uništavanju zrna. To je naročito značajno za nosive

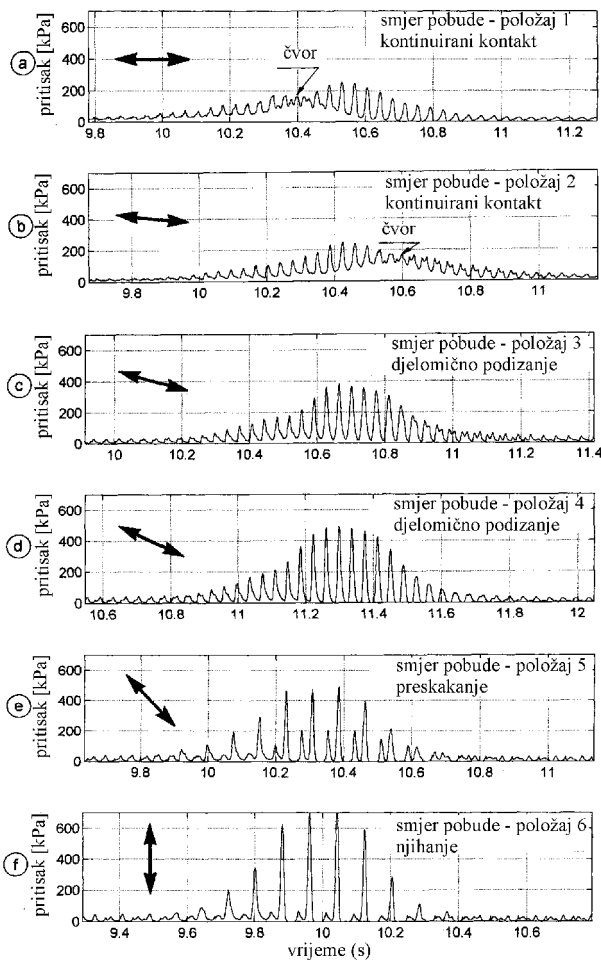
i tamponske slojeve na cestama itd. koji su izloženi naizmjeničnim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja.

Kao što se vidi na slici 7., vibracijski se valjak može teoretski modelirati s pomoću sustava sa dva stupnja slobode. Pretpostavlja se da je kretanje valjka definirano pomaci- ma bubnja i onog dijela karoserije valjka koji djeluje na bubanj. Oscilacijski valjak i horizontalno pobuđivani "vario"-valjak može se opisati s pomoću sustava sa dva stupnja slobode koji je prikazan na slici 8. U svim slučajevima, postupak zbijanja u početku uzrokuje nabiranje tla (izdizanje), zatim maksimalno slijeganje, te na kraju plastičnu deformaciju (slika 9.).

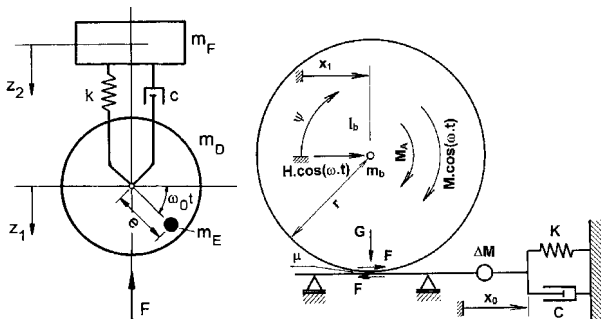
Danas se u Europi rabe dva sustava CCC: kompakto- ter i teramer. Oba sustava imaju senzor s jednim ili dva akcelerometra, koji su spojeni s ležajem bubnja valjka, zatim procesorsku jedinicu te ekran s kojeg se očitavaju izmjerene vrijednosti. Senzor stalno registrira akcelera- ciju bubnja. Prethodni akceleracijski signal analizira se u procesorskoj jedinici da bi se odredile vrijednosti dina- mičkog zbijanja u odnosu na zadane parametre valjka. Vrijednosti dinamičkog zbijanja označavaju se sa CMV i OMEGA.

Tablica 2 Način rada vibracijskog valjka

Način kretanja	Interakcija bubanj-tlo	NAČIN RADA	Vremenski ovisna kontaktna sila	CCC uporabiv	Krutost tla	Brzina valjka
periodičan	neprekidni kontakt	KONTAKT		da	mala	velika
	periodičan gubitak kontakta	DJELOMIČNO UZDIZANJE		da	↓ ↑	↑ ↓
		PRESKAKANJE		da		
		NJIHANJE		ne		
nekontroliran	neperiodičan gubitak kontakta	NEKONTROL. KRETANJE		ne		



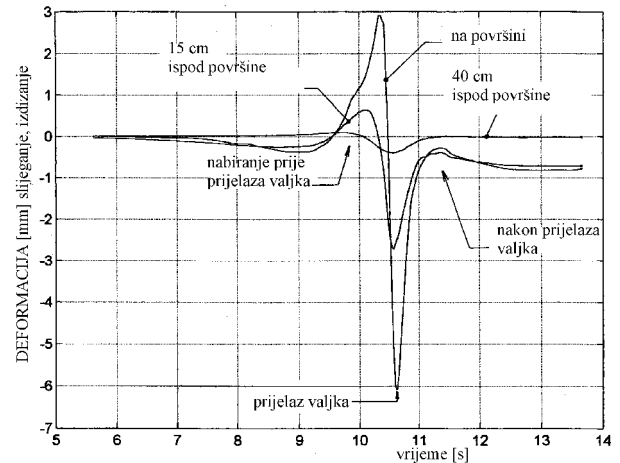
Slika 6. Dijagrami pritiska tla ispod bubnja "vario"-valjka koji varira ovisno o smjeru pobude i načinu rada



Slika 7. Sustav s dva stupnja slobode kojim se opisuje vibracijski valjak

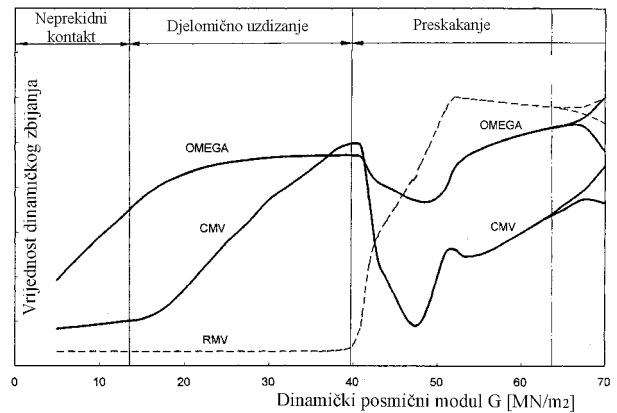
Slika 8. Sustav s dva stupnja slobode kojim se opisuje oscilacijski valjak (sila pobude $M \cos \omega t$) i horizontalno pobuđivani "vario"-valjak (sila pobude $H \cos \omega t$)

Kompaktometarska vrijednost (CMV) izračunava se tako da se amplituda prvog harmonijskog tona akceleraacijskog signala podijeli s amplitudom frekvencije pobude. Prijašnja empirijska istraživanja pokazala su da vrijednost prvog harmonijskog tona raste usporedo s pove



Slika 9. Deformacija tla u tri sloja (na površini, 15 cm ispod površine i 40 cm ispod površine) uzrokovana oscilacijskim zbijanjem (horizontalna pobuda). Nekoherentno tlo

ćanjem krutosti tla. Osim toga, zadana je i pomoćna vrijednost da bi se u obzir uzeo i način rada bubnja. Rezonancijska vrijednost (RM) izračunava se tako da se amplituda polufrekvencije akceleraacijskog signala podijeli s amplitudom frekvencije pobude. Ako vrijednost RMV nije jednaka nuli, to znači da pri kretanju kotača dolazi do preskakanja (slika 10., tablica 2.).



Slika 10. Vrijednosti dinamičkog zbijanja (OMEGA, CMV, RMV) u funkciji dinamičkog posmičnog modula, ovisno o načinu rada (kontinuirani kontakt - djelomično uzdizanje - preskakanje bubnja

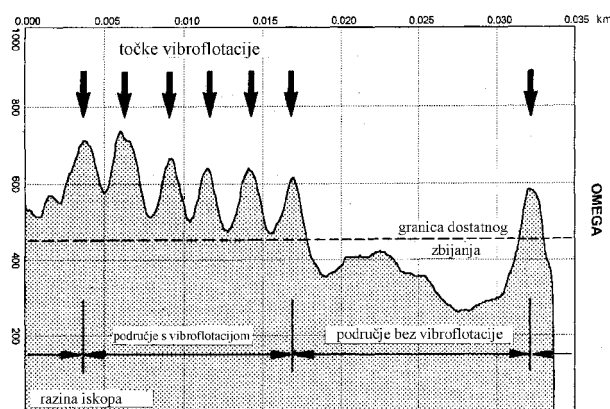
U postupku CCC kojeg primjenjuje teramerter, izračunava se energija koju apsorbira tlo (tj. vrijednost OMEGA). Akceleracija bubnja mjeri se u dva ortogonalna smjera, a brzina bubnja određuje se integriranjem akceleraacijskih komponenta. Energija se izračunava tako da se u obzir uzima masa bubnja, masa rotirajućeg ekscentra, statička sila i sila ekscentra. U integraciji diferencijalne jednačbe upotrebljavaju se dva ciklusa pobude da bi se u obzir uzeo način rada jer je to značajno za točnu interpretaciju (slika 10., tablica 2.). Detaljan prikaz dan je u radovima [2, 5].

Do sada su se vrijednosti dinamičkog zbijanja najčešće baždarile na temelju vrijednosti dobivenih iz tradicionalnih ispitivanja kao što je npr. stupanj zbijanja (D_{Pr}) i gustoća ρ , ili pak modul deformacije E_v . Međutim, sve se češće koriste dinamički moduli vibracije koji se izravno dobivaju u tijeku rada valjka, tako da možemo očekivati da će se ti moduli u budućnosti sve češće upotrebljavati kao parametri za određivanje kvalitete zbijanja. Osnovne prednosti kontinuirane kontrole zbijanja tijekom rada valjka su:

- kontinuirano se kontrolira čitava površina,
- rezultati su dostupni već tijekom zbijanja pa stoga nema ometanja niti kašnjenja građevinskih radova,
- samo zbijanje je optimalno - izbjegavaju se lokalne pojave pretjeranog zbijanja (što inače dovodi do ponovnog rahljenja površinskog sloja),
- na minimum se svodi drobljenje i uništavanje/abrazija zrna što bi inače moglo negativno utjecati na kvalitetu cestovnih i željezničkih konstrukcija,
- troškovi kontrole su manji od troškova tradicionalnog ispitivanja,
- trajno je dostupna potpuna dokumentacija za čitavu površinu.

Očito je da se postupak kontinuirane optimalizacije i kontrole tijekom zbijanja treba primjenjivati kada god je to moguće. Ponekad nailazimo na mišljenja da je taj postupak jako skup. Međutim, to nikako nije točno. Ekonomske studije obavljene u sprezi s geotehničkim istraživanjima i nadzorom na gradilištu jasno pokazuju da ova metoda kontrole na kraju dovodi do ušteda, do smanjenja vremena građenja, i do poboljšanja kvalitete. Potrebni su samo odgovarajuća oprema i obuka koju provodi geotehnički inženjer upoznat s tim mjernim uređajem.

Dubina mjerenja je kod uređaja za kontinuiranu kontrolu zbijanja bitno veća od dubina koje se postižu upotrebom tradicionalnih metoda. Mjerenje gustoće se kod tradicionalnih metoda obavlja do dubine od 0,1 do 0,3 m a standardna ispitivanja probnom pločom dopiru do dubine od 0,5 do 0,6 m. S druge strane, mjerenja obavljena postupkom CCC dosežu do dubine od 1,5 do 2,2 m. To je na slici 11. ilustrirano praktičnim primjerom. Za izvođenje armiranobetonske temeljne ploče jedne elektrane trebalo je obaviti dubinsko poboljšanje i djelomičnu zamjenu tla da bi se tako umanjila diferencijalna slijeganja. Poboljšanje tla u rastresitim riječnim nanosima (pješčani prah) obavljeno je izvođenjem šljunčanih pilota koji su prekriveni geotekstilom i slojevima pješčanog šljunka. Točan raspored i promjer šljunčanih pilota praćen je uređajem za CCC sve vrijeme izvođenja zemljanih radova i to sve do nanošenja konačnog sloja koji se nalazio 1,5 m iznad šljunčanih pilota (slika 11.).



Slika 11. Rezultati kontinuirane kontrole zbijanja (CCC) obavljene pomoću uređaja ugrađenog na valjku, na nasipu debljine 1,5 m na temeljnom tlu poboljšanom postupkom vibroflotacije. Položaj šljunčanih pilota dobro se vidi na dijagramu

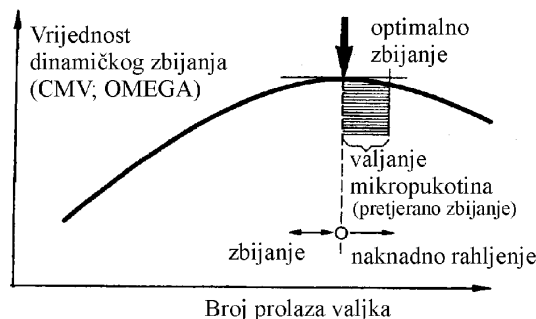
Osim toga, postupkom CCC povećana je trajnost geosintetičkog materijala koji je ugrađen u višeslojnu konstrukciju. Ravnomjerno zbijana glatka površina svakog sloja nije podložna stvaranju nabora u geosintetičkoj tkanini, a i teže dolazi do njezina probijanja. Time se također izbjegava i lokalno pretjerano zbijanje nasipanih slojeva, a tako i prekoračuje dozvoljenih naprezanja u zoni geotekstila ili u pokrovu.

Postupak kontinuirane optimizacije kontrole tijekom zbijanja pokazao se kao prikladan na mnogim gradilištima, pa je tako upotreba tog postupka već nekoliko godina obvezatna u Austriji (uglavnom pri izvođenju državnih cesta i autocesta, ali i kod gradnje željezničkih pruga i izvođenja glinenih brtvenih slojeva za odlagališta otpadnog materijala, te kod gradnje nasutih brana). Metoda se može primijeniti za sve vrste zemljanih ili nasutih materijala, pa tako i za razne proizvode dobivene recikliranjem, a uspješno se rabi i za zbijanje pokosa do nagiba od $\beta = 2:3$. Kod zbijanja pokosa, valjak se mora tegliti a treba se koristiti i posebnim postupkom upravljanja (da bi se izbjeglo klizanje). Pouzdana interpretacija podataka dobivenih mjerenjem moguća je samo ako se u obzir uzme i način rada valjka, a ti uvjeti variraju od kontinuiranog kontakta između bubnja i meke podloge pa do ljuljanja ili čak nekontroliranog kretanja u slučajevima kada je krutost tla vrlo velika (tablica 2., slika 10.). Način rada bitno utječe na porast dinamičkih vrijednosti zbijanja tijekom samog zbijanja, pa se stoga mogu lako uočiti na iskazanim dijagramima. Moduli dinamičke vibracije (E_{vib}) mogu se izravno odrediti pomoću posebno opremljenih valjaka, pri čemu se u obzir, osim vibracijskih karakteristika, uzima i odnos između opterećenja i slijeganja. Dobra je korelacija između ovih vrijednosti i statičkih modula i one su u velikoj mjeri neovisne o parametrima stroja (npr. o amplitudi i frekvenciji) te o brzini kretanja valjka. Ovaj se sofisticirani sustav može primijeniti

za sve vrste tla i ostalih zrnatih materijala, pa čak i za asfaltne slojeve.

U zaključku vrijedi napomenuti da se optimalizirano zbijanje ne smije bazirati na samo jednoj "vrijednosti zbijanja", tj. na minimalnoj dozvoljenoj vrijednosti koja se najčešće propisuje u većini propisa i norma (tj. modulu opterećenja probnom pločom E_v i/ili "stupnju zbijanja" D_{Pr}). Primjenom uređaja za kontinuiranu kontrolu i optimalizaciju zbijanja koji se nalazi na valjku (CCC) može se postaviti veći broj kriterija. Stoga se primopredajna ispitivanja mogu bitno poboljšati bez kompliciranja primopredajnog postupka. Ako želimo postići kvalitetno i ravnomjerno zbijanje, preporučuje se zadavanje sljedećih kriterija:

- minimalne i maksimalne vrijednosti dozvoljenog dinamičkog zbijanja. Jasno definirani minimalni/maksimalni kvantil (10%) ili maksimalna standardna devijacija (≤ 15 do 20 %, u odnosu na srednju vrijednost),
- porast vrijednosti dinamičkog zbijanja između dvaju prijelaza valjka: $< 5\%$,
- ne smije doći do smanjenja vrijednosti dinamičkog zbijanja (jer bi to značilo da dolazi do ponovnog rahljenja i/ili drobljenja zrna) osim kada se obavlja "valjanje mikropukotina" da bi se umanjila pojava odraznih pukotina u slojevima koji su stabilizirani cementom (slika 12.).

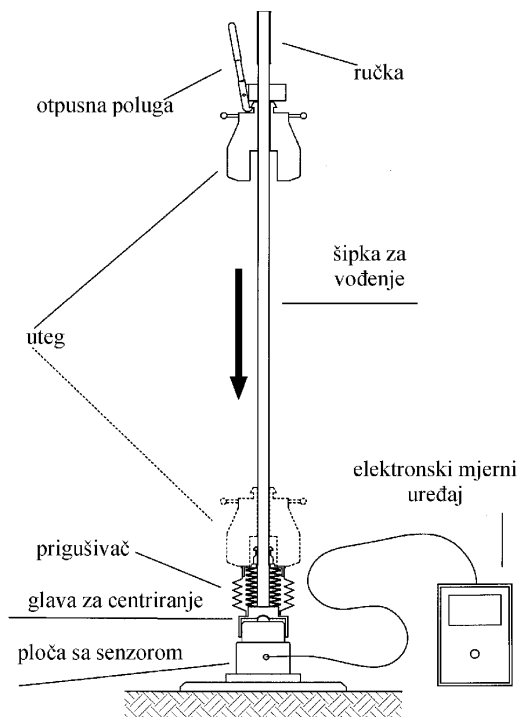


Slika 12. Shema kontroliranog relaksacijskog valjanja (valjanje mikropukotina) kojim se smanjuju odrazne pukotine u slojevima koji su stabilizirani cementom i to obavljanjem specifičnog dodatnog zbijanja i naknadnog površinskog rahljenja u sprezi s dinamičkom kontinuiranom kontrolom zbijanja (CCC) pomoću kontrolnog uređaja instaliranog na valjku

3.3 Dinamičko ispitivanje probnom pločom

Tradicionalna ispitivanja probnom pločom (dakle statička ispitivanja) i ispitivanja uređajem za kontinuiranu kontrolu zbijanja (CCC) ne mogu se provesti kada za to nema dovoljno prostora (npr. kod nasipavanja uskih jaraka, ili zasipavanja potpornih konstrukcija). U takvim se slučajevima sve češće primjenjuje dinamičko ispitivanje probnom pločom ili "ispitivanje deflektometrom s padajućim tere-

tom". Za razliku od statičkog ispitivanja probnom pločom, ovo se ispitivanje može obaviti vrlo brzo i nije potreban protuuteg. Shematski prikaz postupka je na slici 13. Dubina mjerenja otprilike odgovara dvostrukom promjeru



Slika 13. Elementi uređaja za dinamičko ispitivanje probnom pločom (deflektometar s padajućim teretom)

probne ploče, tj. iznosi 60 cm za standardnu ploču promjera 30 cm. Opsežnim su istraživanjima dobiveni sljedeći rezultati:

- pouzdani rezultati ispitivanja mogu se postići dovoljno osjetljivim mjerenjem slijeganja uređajem za dinamičko ispitivanje probnom pločom i pravilnim baždarenjem tog uređaja,
- osnovni je pokazatelj stupnja zbijenosti tla (ili nekog drugog zrnatog sloja) omjer između maksimalnog pomaka ploče i maksimalne brzine ploče,
- svojstva opruge-prigušivača moraju biti nepromjenjiva u rasponu od 0 do 40°C jer se ispitivanja često obavljaju u vrlo teškim terenskim uvjetima. Samo elementi napravljeni od čelika zadovoljavaju te zahtjeve. Karakteristike gumenih elemenata mijenjaju se već pri manjim temperaturama.

4 Prednosti kvalitetnog zbijanja

4.1 Općenito

Kvalitetnim se zbijanjem bitno poboljšavaju svojstva tla (ili drugog zrnatog materijala) a naročito:

- poboljšavaju se svojstva nosivosti-deformacije,

- smanjuju se štetni utjecaji koji se pojavljuju zbog promjene volumena (bujanje, skupljanje, uzdizanje zbog zamrzavanja),
- postiže se bolja kontrola protoka vode,
- povećava se stabilnost pokosa itd.

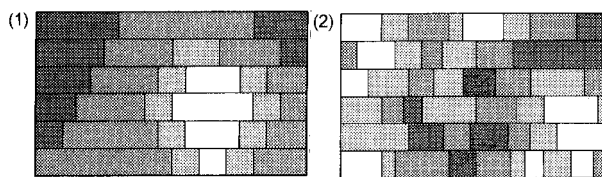
Krajnji su rezultat tih geotehničkih poboljšanja brojni pozitivni učinci za ceste, autoceste, željeznice, zračne luke, razne zemljane radove itd.:

- povećanje sigurnosti,
- poboljšanje uporabivosti (npr. komfornija vožnja),
- povećanje vijeka trajanja,
- smanjenje troškova održavanja,
- kraće vrijeme građenja (to uglavnom vrijedi ako se primjenjuje sustav kontinuirane kontrole zbijanja CCC),
- smanjen protok zagađivača (u slučaju zbijanja otpadnog materijala),
- građenje visokih nasipa umjesto mostova (to se naročito odnosi na ceste i autoceste),
- kod mostova, građenje niskih upornjaka na visokim nasipima umjesto visokih upornjaka; tako se smanjuje diferencijalno slijeganje između mosta i nasipa a i postižu se financijske uštede.

4.2 Ceste i željeznice

Povećanje vijeka trajanja i uporabivosti naročito je značajno u području cesta i željeznica. Ovdje nije potreban samo vrlo visoki stupanj zbijanja, već je od osnovnog značenja i ravnomjernost zbijanja. To se najbolje može provjeravati kontinuiranom kontrolom zbijanja (CCC) jer je taj postupak bitno bolji od tradicionalnih statističkih postupaka.

U ovom se postupku uvode i neki novi statistički kriteriji jer se unose i podaci kao što su ujednačenost zbijenog sloja te porast stupnja zbijanja nakon svakog novog prijelaza valjka. Relevantni su parametri i srednja vrijednost, maksimalna i minimalna vrijednost, standardna devijacija, te porast vrijednosti dinamičkog zbijanja. Osim toga, moći će se iskoristiti i "minimalni kvantil" (isto kao i "maksimalni kvantil") pošto se stekne odgovarajuće iskustvo u primjeni postupka CCC. Sadašnji statistički parametri ne omogućavaju ocjenu raspodjele kontrolnih podataka po dionici. Zone prikazane na slici 14. imaju istu srednju vrijednost, maksimalnu i minimalnu vrijednost te istu standardnu devijaciju. Međutim, kvaliteta se na njima ipak razlikuje. Na slici 14.-(1) prikazana je samo ograničena slaba zona koja se lako može poboljšati, dok se za drugu zonu trebaju poduzeti opsežne mjere da bi se postigla dostatno ujednačena kvaliteta slika 14.-(2)a).



Slika 14. Shematski prikaz kontrole dviju zbijenih zona istih statističkih karakteristika. Pojedine trake označavaju trakove kojima su se kretali valjci i obavljali kontrolu postupkom CCC. Statističko ocjenjivanje može se bitno poboljšati "variografijom" ili postupkom "Kriging"

Dvije metode, tj. "variografsku metodu" i "Kriging metodu", primjenjujemo za statističko određivanje raspodjele kontrolnih vrijednosti u nekom području. Prvobitno su te metode razvijene za interpretaciju geofizičkih podataka ali je kasnije ustanovljeno da bi mogle biti korisne i u području osiguravanja kvalitete zbijenih slojeva, dakle na cestama, autocestama, željezničkim prugama, zračnim lukama, nasipima, brtvenim slojevima i ostalim konstrukcijama od zemljanog ili nekog drugog znatog materijala.

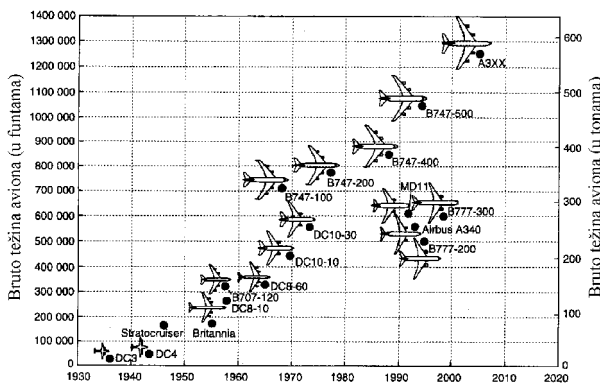
Na željezničkim se pragovima dinamičko opterećenje povećava s porastom krutosti podložnog zastora i posteljiće. To negativno utječe na kontakt između tračnice i kotača. Stoga mnogi inženjeri specijalizirani za područje željeznica smatraju da se u takvim slučajevima treba zadavati niži stupanj zbijanja, tj. da zbijanje takvih slojeva ne smije biti suviše intenzivno. Međutim sa stajališta mehanike tla, tako bi se situacija samo pogoršala. Zemljani materijal (ili neki drugi zrnati materijal) koji nije optimalno nabijen neizbježno prolazi kroz proces dodatnog zbijanja tijekom odvijanja prometa. To dodatno zbijanje uglavnom nije ujednačeno, pa su lokalne razlike krutosti velike. Stoga bi se tijekom izvođenja radova zbijanje trebalo obaviti tako da bude što intenzivnije (da bi se na taj način izbjeglo dodatno zbijanje tijekom prometa), ali se treba koristiti zemljanim materijalom (ili nekim drugim znatim materijalom) koji ne postiže suviše veliku krutosti nakon zbijanja.

Često se na vrlo prometnim cestama nosivi slojevi stabiliziraju cementom. Cementna se stabilizacija također sve češće rabi za poboljšanje recikliranog materijala koji je dobiven razbijanjem starih cesta/autocesta, a ponovo se upotrebljava za izradu kvalitetnih habajućih slojeva. Tu dolazi do pojave odraznih pukotina. Inovativna metoda za ublažavanje pojave odraznih pukotina u cementom stabiliziranim slojevima je relaksacijsko valjanje uz kontinuiranu kontrolu zbijanja tijekom valjanja, a pokazala se podobnom još od sredine devedesetih godina. Taj postupak "valjanja mikropukotina" uključuje pretjerano zbijanje (slika 12.) čime se dobiva fina mreža sastavljena od brojnih sitnih površinskih pukotina koje se ne šire u gornji bitumenski sloj ili u asfaltni zastor kolničke konstrukcije. Osim toga, kontinuirana kontrola zbijanja - pri

čemu se valjak rabi kao mjerno sredstvo - omogućuje intenzivno i vrlo homogeno zbijanje, a to je izuzetno značajno za osiguravanje dugoročnosti stabiliziranih slojeva, naročito onih koji su izloženi jakom prometnom opterećenju.

4.3 Zračne luke, uzletno-sletne staze

U proteklim je desetljećima došlo do značajnog porasta zračnog prometa, pa tako i do porasta statičkog/dinamičkog opterećenja i broja ciklusa opterećenja na pistama i uzletno-sletnim stazama. Na slici 15. vidimo porast maksimalnih težina putničkih zrakoplova pri uzlijetanju, a na istoj je slici i naznaka težina nekih od poznatih budućih zrakoplova. Možemo zaključiti da geotehnička kvaliteta nosivog sloja, tampona i posteljice postaje sve značajniji faktor tj. faktor koji sve više utječe na projektirani vijek trajanja (obično 20 do 30 godina), na uporabivost i na održavanje čitavog objekta.



Slika 15. Povijesni prikaz porasta težina civilnih aviona pri uzlijetanju, uključujući i poznate buduće modele [3]

Beton se smatra dominantnim materijalom za izradu kolnika u zračnim lukama i to uglavnom zbog njegove cijene određene na bazi vijeka trajanja, zatim zbog njegove otpornosti na utjecaj goriva, te zbog otpornosti na lokalne deformacije [3]. Uglavnom je svugdje obavezna stroga kontrola kvalitete betona za kolničku konstrukciju i za vezane nosive slojeve (tu se uglavnom misli na cemente stabilizacije), iako se često ta ista pravila ne primjenjuju na nevezane tamponske slojeve i posteljicu. Međutim, ti slojevi isto tako značajno utječu na ponašanje krutih i savitljivih ili pak kombiniranih kolničkih konstrukcija. Stoga bi se čitava konstrukcija trebala smatrati višeslojnim sustavom sastavljenim od uzajamno ovisnih komponenata (donji ustroj plus gornji ustroj), pri čemu su značajni sljedeći faktori:

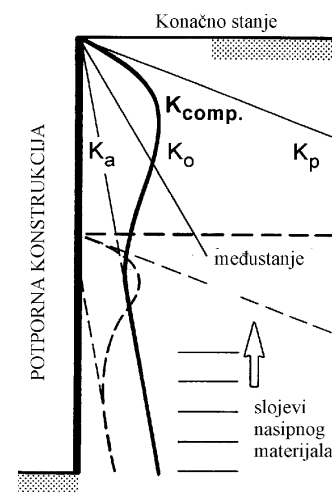
- djelotvorno prenošenje opterećenja (što uključuje i prijenos opterećenja preko spojnice),
- debljina i naponsko-deformacijsko ponašanje pojedinačnih slojeva,
- geotehnička svojstva posteljice,

- čvrstoća na savijanje i zamor betona (ili asfalta),
- utjecaj temperature,
- opterećenje koje se očekuje zbog uvođenja novih zrakoplova.

Slabo i neravnomjerno zbijanje posteljice, tamponskog sloja i/ili nosivog sloja dovodi do preuranjenog popuštanja kolnika (jednostrukih betonskih ploča, spojnice itd.). Na primjer, analizom postojećih vojnih kolnika utvrđeno je da habajuće površine kolnika postaju neupotrebljive pošto popusti 30-50 % kolničkih površina [3]. Stoga se tradicionalne metode za kontrolu zbijanja, tj. metode bazirane na pojedinačnim (točkastim) ispitivanjima, danas sve rjeđe primjenjuju. Visoka kvaliteta čitave konstrukcije može se postići samo uz kontinuiranu kontrolu zbijanja (CCC) pomoću uređaja instaliranog na valjku, a taj postupak pokazao se prihvatljivim ne samo za zemljane materijale, već i za ostale vezane ili nevezane zrnate materijale (poput slojeva stabiliziranih vapnom ili cementom, asfaltnih nosivih slojeva itd.).

4.4 Zasipi potpornih građevina

Postavka da se dobrim zbijanjem povećava sigurnost konstrukcije vrijedi za sve vrste konstrukcija i zemljanih radova. Poseban je slučaj zasipavanje zidova i potpornih konstrukcija gdje bi prejako zbijanje moglo dovesti do prekomjernog bočnog pritiska tla, koji bi na stražnjoj strani zida mjestimično mogao dosegnuti i graničnu vrijednost pasivnog otpora tla (slika 16.). Takvi "pritisci zbijanja" mogu čak uzrokovati i rušenje krutih potpornih konstrukcija, a iskustva pokazuju da je bilo takvih



Slika 16. Povećanje bočnog pritiska tla na potpurnu konstrukciju, upornjak mosta itd. zbog pretjeranog zbijanja materijala zasipa. Prikaz za faze građenja

slučajeva. Do pretjeranog povećanja napinjana uglavnom dolazi u gornjem dijelu krutih zidova. Iako se naprezanje donekle smanjuje u daljnjem tijeku građenja, preostala

vrijednost tog "pritiska zbijanja" može biti znatno veća od aktivnog tlaka ili od geostatičkog naprezanja. Takva koncentracija naprezanja može se izbjeći adekvatnijim zbijanjem i/ili postavljanjem stišljivih ploča iza građevine. To također olakšava kontrolirano popuštanje zida, a time i smanjenje geostatičkog naprezanja prema vrijednosti aktivnoga tlaka u slučaju relativno krutih konstrukcija (npr. krutih upornjaka za mostove). Takvi stišljivi umeci uglavnom se sastoje od geopjenastog materijala ali oni mogu biti i geokompoziti, a mogu se postavljati iza tradicionalnih betonskih zidova ili kao dopuna zidovima od armiranog tla [6].

4.5 Nasip za industrijski mulj

Povećanje sigurnosti kao rezultat odgovarajućeg zbijanja posebno se treba analizirati za projektiranje i izvođenje nasipa za industrijski mulj. Ti nasipi služe za zadržavanje industrijskih nusproizvoda, kao što je npr. rudnička jalovina, a po veličini su jednaki ili čak i veći od hidrotehničkih brana. Unatoč njihovoj veličini, tj. bez obzira što neki od njih pripadaju najvećim konstrukcijama koje je čovjek ikada napravio, ovi nasipi tek su se posljednjih desetljeća počeli tretirati kao "brane", predstavljaju trošak u postupku iskorištavanja rudnika, tj. ne donose prihod kao što je to slučaj kod brana za hidroelektrane.

Zbog tog smo razloga i suviše često svjedoci popuštanja takvih nasipa, kod njih se katastrofe događaju čak deset puta češće nego kod običnih nasutih brana [9]. Mnogi takvi slučajevi uzrokovali su velike štete, a u nekim je slučajevima bilo i ljudskih žrtava. Stoga kod takvih konstrukcija veliku pažnju treba posvetiti geotehničkom projektiranju i samom postupku građenja, te bi kontinuirana kontrola zbijanja takvih nasipa trebala postati obaveznom.

4.6 Zaštitni nasipi

Inženjerske konstrukcije od zemljanog materijala sve češće služe kao visoki nasipi za zaštitu od velikih odrona kamenja, lavina i blatnog toka. Takve pojave uglavnom ugrožavaju ljudska naselja i razne prometne objekte. Na zaštitne nasipe uglavnom djeluju dinamička udarna opterećenja koja su superponirana statičkim opterećenjima, s tim da ima i mjestimičnih pojava prekomjernog tlaka porne vode. Unutarnja i vanjska stabilnost takvih nasipa uvelike ovisi o stupnju zbijanja. Njihove kritične zone često se pojačavaju geosintetičkim materijalom [6]. I tu je zbijanje izuzetno značajno, jer se intenzivnim zbijanjem povećava zajedničko zaštitno djelovanje, pa tako i ukupna otpornost konstrukcije na udar.

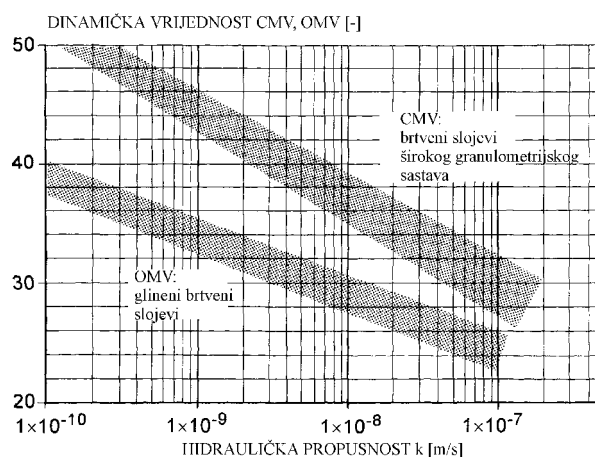
4.7 Odlagališta otpadnog materijala

Intenzivnim zbijanjem krutog otpada smanjuje se protok zagađivača i to uglavnom zbog smanjenja hidrauličke propusnosti. Osim toga, smanjuju se i kemijsko-fizikalne

i biološke reakcije unutar otpadnog materijala, pa tako i zagađivački potencijal odlagališta.

Mjerenja pokazuju da se preostala biološka reaktivnost mehanički i biološki tretiranog komunalnog otpada bitno smanjuje ako se otpad intenzivno zbija do vrijednosti hidrauličke propusnosti od otprilike $k \leq 5 \times 10^{-7}$ m/s. U takvim se slučajevima protok otpadnog materijala kroz procjednu vodu smanjuje za 80 do 90%.

I konačno, intenzivno zbijanje bitno je i za brtvene slojeve na odlagalištima otpada. I ovdje se uspješno primjenjuje metoda kontinuirane kontrole zbijanja s pomoću uređaja ugrađenog na valjku. U međuvremenu su za materijale uspostavljene korelacije između vrijednosti dinamičkog zbijanja i hidrauličke propusnosti (slika 17.). Ova se metoda može primijeniti i za kontrolu stupnja zbijenosti i propusnosti nasipnih slojeva zemljanih brana u hidrotehnici (to naročito vrijedi za brane s niskopropusnom jezgrom).



LEGENDA

CMV za vibracijsko zbijanje (izmjereno kompaktnometrom)

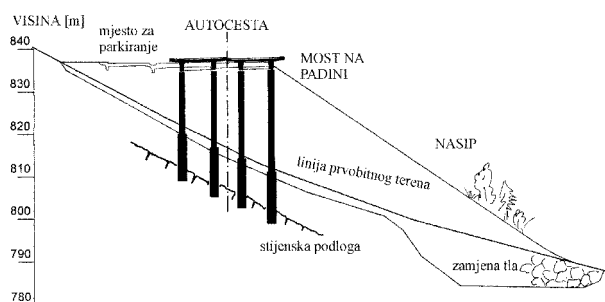
OMV za oscilacijsko zbijanje (izmjereno oscilometrom)

Slika 17. Terenska kontrola propusnosti brtvenih slojeva (od jednolike gline do dobro građuiranih mješavina gline i šljunka) pomoću kontinuirane kontrole zbijanja uređajem montiranim na valjak. Primjeri korelacija između vrijednosti dinamičkog zbijanja (CMV ili OMV) i koeficijenta hidrauličke propusnosti (k)

5 Visoki nasipi umjesto mostova

Moderna oprema za zbijanje, optimiziranje i kontrolu zemljanih radova otvorila je mogućnost građenja visokih nasipa umjesto mostova za ceste, autoceste i željeznice. U većini slučajeva, takva alternativna rješenja umanjuju troškove građenja i olakšavaju iskorištavanje obližnjeg nasipnog materijala (koji se dovozi iz građevinskih iskopa ili zasjeka). Osim toga, nasipi se mogu obložiti vegetacijom pa stoga nisu štetni za okoliš, a i troškovi njihovog održavanja znatno su niži nego kod mostova. Pona-

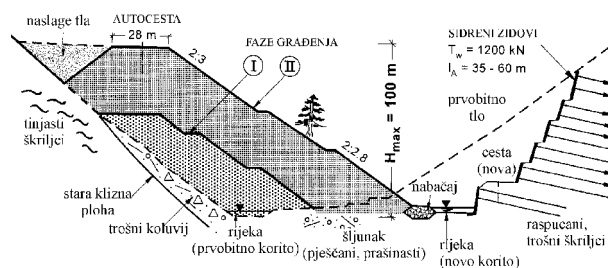
šanje visokih nasipa poboljšava se s vremenom, dok je kod mostova situacija upravo suprotna (naročito u slučaju prednapetih armiranobetonskih konstrukcija). Osim toga takvim se građevinama izbjegavaju diferencijalna slijeganja koja su prisutna na kontaktu između upornjaka mosta i prilaznih nasipa. I, na kraju, visoki nasipi mogu poslužiti i kao protuteža i tako povećati stabilnost nestabilnih pokosa - za razliku od mostova za koje treba izvoditi skupe temelje i provoditi zaštitne mjere da ne bi došlo do popuštanja pokosa. Dakle, nasipi su se pokazali kao vrlo uspješna alternativa mostovima koji se izvode na padinama (slika 18.).



Slika 18. Nasip umjesto mosta na trasi autoceste u pokosu

Gotovo trideset godina iskustva s raznim nasipima, čija visina varira od 40 do 120 m (koji su uglavnom bili građeni kao podloga za autoceste), pokazuje da ne postoje sveobuhvatni kriteriji kojima bi se jednoznačno vrednovala prednosti nasipa u odnosu na mostove. Stoga se na svakom pojedinom projektu treba donijeti zasebna odluka o gradnji bilo mosta ili nasipa. Osnovni faktori koji utječu na odluku o gradnji nasipa umjesto mosta su:

- smještaj objekta, uključujući i položaj postojećih građevina ili naselja,
- geomorfologija, stabilnost postojećih kosina,
- svojstva tla, uključujući i prisutnost vode u tlu i pokosu,
- dozvoljena apsolutna i diferencijalna slijeganja kruna nasipa (u vezi s ravnošću cestovnih ili željezničkih konstrukcija),
- dostupnost odgovarajućeg nasipnog materijala,
- količina materijala (iskop i zasjek u odnosu prema potrebnom nasipu) na određenom potezu,
- dužina i kvaliteta pristupnih cesta koje će se koristiti za dopremu nasipnog materijala,
- broj, promjer, dužina i lokacija eventualnih propusta u dnu i/ili u tijelu nasipa,
- dinamika građevinskih radova,
- troškovi građevinskih radova,
- dugoročni troškovi održavanja,
- lokalni klimatski uvjeti i estetika.



Slika 19. Stometarski nasip umjesto mosta na autocesti u uskoj dolini. Prikazane su i potrebne mjere iskopa i stabilizacije pokosa na suprotnoj strani doline

Na slici 19. prikazan je nasip visok 100 m koji je izveden u uskoj dolini umjesto prvobitno projektiranog mosta dužine 300 m. Nasip ujedno drži i nestabilnu kosinu, a da je odabrano rješenje s mostom temeljenje bi bilo složeno, a morale bi se poduzeti i odgovarajuće mjere za zaštitu pokosa. S druge strane, da bi uopće bilo moguće izgraditi visok nasip trebalo je odstraniti postojeće korito rijeke i saveznu cestu, te izvesti zasjek visine 75 m na suprotnoj strani doline. Taj su zasjek graditelji trebali učvrstiti s 447 prednapetih sidara ukupne dužine 13.800 m i s ukupnim radnim opterećenjem od $\Sigma T_w = 475$ MN. Dno doline sastojalo se od riječnog šljunka s pijeskom i oblucima, a tinjasti škrljac na padini formirao je miolitske zone s rezidualnim kutom trenja od svega $\phi_r = 9^\circ$. Prema nožici pokosa podložna je stijena bila prekrivena prašnasto-šljunčanim i trošnim pločastim slojevima. Zbog izraženog nedostatka prostora u uskoj dolini, određeno je da nagib pokosa iznosi od 2:3 do 2:2,8.

Nasipni materijal dopreman je s nekoliko zasjeka koji su se izvodili pri izgradnji autoceste. Stoga su svojstva tog materijala bila dosta raznolika: stijenski materijal (tinjasti škrljac, mjestimično trošan i fragmentiran), pješčani šljunak, sitni pijesak, plosnati koluvij te mjestimične naslage glinasto-pješčanog praha. Zbog toga se nasipni materijal ugrađivao u obliku sendviča, tj. tako da se slabiji materijal polagao u zone koje nisu bile značajne za stabilnost nasipa.

Debljina nasipnih slojeva varirala je od 20 do 110 cm ovisno o kvaliteti materijala, o njegovoj vlažnosti tijekom nasipavanja i o kapacitetu valjka. Za zbijanje je upotrijebljena sljedeća oprema:

- vibrovaljci težine do 15 tona,
- samohodni valjci gumenjaci, 16 - 20 tona,
- tegljeni vibrovaljci od 6,5 do 10,5 tona.

Kontrola zbijanja obavljena je kontrolnim valjanjem, mjerenjem gustoće, ispitivanjem probnom pločom i primjenom nekih pomoćnih kriterija. U to se vrijeme (1978./79.) još nije obavljala kontinuirana kontrola zbijanja s pomoću uređaja montiranog na valjku. Slijeganje temeljnog tla i samog nasipa izmjereno je u bazi i na ne-

koliko slojeva nasipa. Na taj je način omogućeno zasebno registriranje deformacija tla i deformacija nasipa.

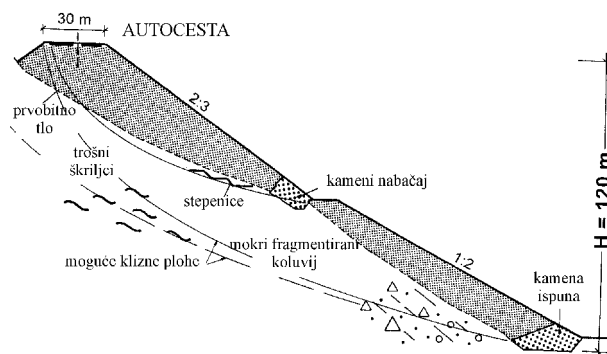
Rok građenja bio je vrlo kratak. Zbog toga su se zemljani radovi trebali izvoditi i tijekom zime. Maksimalna količina nasutog i zbijenog zemljanog materijala iznosila je oko 130.000 m³/mjesec. Kako su se temperature nekada spuštale i do -25°C, zemljani materijal za nasip trebao se iskopavati u malim kontingentima tako da se ne smrzne pri prijevozu i ugradnji. Dopuštala se upotreba smrznutih gruda do veličine glave, ali se u takvim slučajevima trebala povećati energija zbijanja. Slojevi zemljanog materijala nisu se smjeli ostavljati neobrađeni preko noći, već su se zbijali sve do tražene vrijednosti. Ako to nije napravljeno, smrznuti se sloj sljedećeg jutra trebao skidati. Zbog toga su se u hladnim razdobljima zemljani radovi obavljali u dnevnim i noćnim smjenama. Često je bilo potrebno, kada se prekid radova nije mogao izbjeći, odstraniti snijeg i led te grubo razrahliti površinu sloja prije nastavka nasipavanja. Sol je služila za odmrzavanje debelih slojeva leda koji bi mogli uzrokovati dugoročne deformacije ili klizanje terena. Tako rastopljena površina sloja osiguravala je dostatan kontakt sa sljedećim slojem.

Posebno je bilo teško udovoljiti zahtjevu da se nasip gradi u dva uzdužna presjeka - a to se trebalo obaviti zbog premještanja rijeke i stare ceste (slika 19.). Kako je u vršnim razdobljima cestom prolazilo i do 40.000 vozila na dan, graditelji su trebali osigurati stalni promet. Za nasipavanje vanjskog dijela nasipa (druga faza građenja, tj. II na slici 19.), bilo je potrebno postupno napraviti dubok usjek u postojeći nasip (faza I.). To je osiguralo dostatnu vezu između raznih dijelova nasipa. Slijeganje nasipa iznosilo je samo oko 1 - 2 ‰ od visine nasipa. Slijeganje temeljnog tla iznosilo je nekoliko decimetara. I jedno i drugo slijeganje brzo se stabiliziralo pa se, nakon razdoblja konsolidacije od nekoliko mjeseci (tijekom zime), moglo pristupiti ugradnji tampona, nosivog sloja i bitumenskog zastora i to bez primjene bilo kakvih posebnih mjera. Dugoročnim promatranjem nasipa ustanovljeno je da se nasip ponaša odlično. Diferencijalno slijeganje po osnovici nasipa (do kojeg je došlo zbog heterogenosti podloge) uglavnom se izjednačilo po visini nasipa tako da je, zbog krutosti tog stometarskog nasipa, kruna nasipa ostala vrlo ravna.

Kolnik je izveden na visini koja je za 10 cm viša od projektirane visine, a to je napravljeno da bi se kompenzirala buduća slijeganja. Ta je rezerva iskorištena kroz vrijeme od pet godina, a dugoročna slijeganja su od tog vremena bila praktički zanemariva. Stoga se od 1980. godine, kada je cesta otvorena, nisu trebale obavljati nikakve korekcije visine kolnika.

Izvođenje visokih nasipa umjesto mostova smatra se naročito prikladnim kada se nasip može iskoristiti i kao protuteža te tako dodatno učvrstiti nestabilne padine, naročito

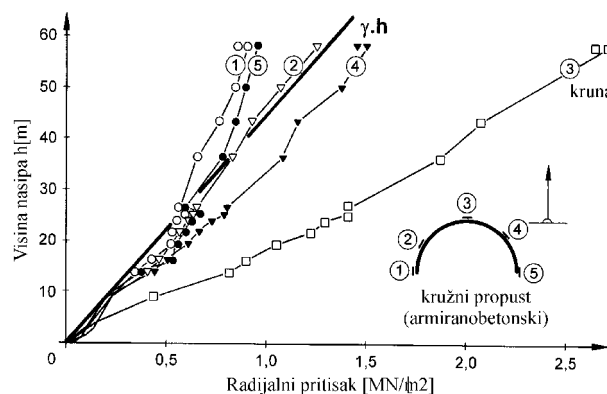
kada se radi o duboko usječnim kliznim plohama. U slučaju prirodno jako zaobljenog profila tla, ponekad može biti dovoljna čak i relativno mala visina nasipa, i to uglavnom u perifernim zonama visokih nasipa. Međutim, za to se trebaju obaviti detaljne analize stabilnosti pokosa i zemljani se radovi trebaju obaviti vrlo pažljivo da bi se izbjeglo mjestimično klizanje tla. Na slici 20. prikazan je takav presjek pri kraju nasipa visokog 120 m koji sada povećava ukupnu stabilnost 500 metara visoke nestabilne padine. Prvobitno projektirani most bi, da je izveden, "plutao" u puzajućoj masi tla (škrljajac i škrljasti koluvi) bez obzira na to što su bili predviđeni duboki temelji. Nasip dug 600 m hortikulturno je uređen tako da se dobro uklapa u okolni krajolik pa je autocesta gotovo sakrivena i uopće se ne može vidjeti iz naselja koja se nalaze u dolini, a to ne bi bio slučaj da je umjesto nasipa izveden višerasponski most.



Slika 20. Uski profil u perifernoj zoni 120-metarskog nasipa za autocestu koji sada povećava opću stabilnost nestabilnog pokosa visine 500 m. Prema prvobitnom projektu trebao se izvesti most dužine 600 m

Propusti u visokim nasipima

Propusti koji se izvode u dnu ili po visini visokih nasipa trebaju se dobro proanalizirati i adekvatno projektirati.



Slika 21. Izmjerena raspodjela pritiska tla na armiranobetonski propust u dnu nasipa visine 60 m

Sile koje djeluju na te objekte ovise o krutosti propusta i okolnog tla pa stoga i o stupnju zbijenosti nasipa. Slaba zbijenost bočnih slojeva nasipa i velika krutost propusta

dovodi do koncentracije naprezanja na objektu. Slika 21. pokazuje takav slučaj za betonski propust na dnu nasipa visokog 60 metara. Izmjereni pritisak na vrhu kružnog propusta bio je za više od dva puta veći od geostatskog pritiska nadsloja.

Pritisak nadsloja može se smanjiti slabijim zbijanjem prvih slojeva iznad propusta ili ugradnjom stišljivih umetaka (npr. geopjene). Takav stišljivi jastuk omogućuje prijenos opterećenja s nadsloja na bočne zone propusta. Stoga se te bočne zone trebaju dobro zbiti.

6 Građenje autocesta u dvije faze

Autoceste s više trakova ponekad se izvode u dvije faze, tj. kao dva paralelna pravca, a to se radi kada nema dovoljno novca za gradnju punog profila. Vremenska razlika između te dvije faze može varirati od nekoliko godina do više desetljeća. Prednost je takve filozofije projektiranja i građenja u činjenici da se tako građene prometnice mogu otvoriti vrlo brzo, ali s manjim prometnim kapacitetom. Autocesta se proširuje do punog profila u nekom kasnijem razdoblju (ovisno o gustoći prometa i dostupnosti sredstava za financiranje tog proširenja).

Takvo građenje autocesta u dvije faze (a svaku od njih nazivamo "poluautocestom") prikladnije je za mostove ali nije optimalno za nasipe, naročito kada su viši od tridesetak metara. Dodatni troškovi izgradnje punog nasipa u prvoj fazi građenja samo su 10 do 15 posto veći od cijene izvođenja polovice nasipa, dok su kod mostova ti troškovi 70 do 75 posto veći. Stoga možemo zaključiti da se, u slučaju nasipa, gradnja poluautoceste ne preporučuje niti s financijskog niti s geotehničkog gledišta. Naime, proširenje starog nasipa podrazumijeva posebne zemljane radove, mjere stabilizacije, dovodi do diferencijalnog slijeganja itd.

U tablici 3. usporedba je troškova građenja nasipa i mostova na autocestama, i to na temelju pretpostavljene vrijednosti od 100% za poluautocestu. Te procjene čine osnovu za donošenje odluka o gradnji mostova ili nasipa na autocestama u punom ili pak u polovici profila.

LITERATURA

- [1] Adam, D.; Kopf, F.: *Theoretical analysis of dynamically loaded soils*. Proceed. of ETC 11 Committee of ISSMGE. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2000.
- [2] Adam, D.; Kopf, F.: *Sophisticated compaction technologies and continuous compaction control*. Proceed. of ETC 11 Committee of ISSMGE. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2000.
- [3] Barling, J. M.; Glimsdale, J. E.: *Rigid pavements for airports*. Design applications of raft foundations. J.A. Hemsley (ed.), Thomas Telford, London, 2000., 71.-105.
- [4] Brandl, H.: *Ungebundene Tragschichten im Strassenbau*. Bundesministerium für Bauen und Technik; Strassenforschung, Heft 67, Wien, 1977.
- [5] Brandl, H.; Adam D.: *Sophisticated continuous compaction control of soils and granular materials*. Proceed. Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg. A.A. Balkema, 1997.

Tablica 3 Usporedba troškova građenja nasipa i mostova na autocestama i "poluautocestama"

Širina autoceste(H) i	Trošak građenja [%]			
	"Poluautocesta"		Autocesta	
	most	nasip	most	nasip
H = 25 m, L = 130 m 2 propusta po nasipu	100	86	177 (77)	93 (8)
H = 30 m, L = 130 m 1 propust po nasipu	100	83	171 (71)	91 (10)
H = 42 m, L = 400 m 2 propusta po nasipu	100	121	153 (53)	127 (5)
H = 40 m, L = 300 m 1 propust po nasipu	100	100	157 (57)	104 (4)
H = 50 m, L = 330 m 2 propusta po nasipu	100	135	154 (54)	149 (11)
H = 55 m, L = 400 m 3 propusta po nasipu	100	141	154 (54)	154 (9)
H = 60 m, L = 400* m 1-2 propusta po nasipu	100	132	150 (50)	145 (10)
H = 60 m, L = 570* m 2-3 propusta po nasipu	100	138	162 (62)	162 (17)

H – najveća visina nasipa ili mosta
L – duljina krune nasipa (nešto kraća ploča mosta)
U zagradama: dodatni trošak između izgradnje polovice i punog profila (nasipi ili mostovi)
* - vijadukt koji prelazi središnji dio doline jednak je za obje varijante

U navedenim je primjerima prikazana važnost kvalitetno izvršenog zbijanja tla i drugih znatih materijala. Nova građevinska oprema omogućuje kontrolu zbijanja, koja se pokazala kao pouzdana metoda za ocjenjivanje kvalitete zbijenih slojeva. Kontinuirana kontrola zbijanja (CCC) pomoću uređaja montiranog na valjku u velikoj mjeri olakšava izgradnju visokokvalitetnih nasipa, čak i u slučajevima kada se koristi materijal heterogenog sastava. Stoga se može (i treba) očekivati da će se visoki nasipi sve češće koristiti za temelje upornjaka mostova, pa čak i kao zamjena za visoke mostove.