

# Model interakcije geosintetičke trake i kamene ispune u konstrukcijama od armiranoga tla

---

Gradiški, Karolina

Doctoral thesis / Disertacija

2017

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:146673>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-12**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Karolina Gradiški

**MODEL INTERAKCIJE GEOSINTETIČKE  
TRAKE I KAMENE ISPUNE U  
KONSTRUKCIJAMA OD ARMIRANOGA  
TLA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2017.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Karolina Gradiški

**MODEL INTERAKCIJE GEOSINTETIČKE  
TRAKE I KAMENE ISPUNE U  
KONSTRUKCIJAMA OD ARMIRANOGA  
TLA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Petar Hrženjak

Prof. dr. sc. Mensur Mulabdić

Zagreb, 2017.



UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF MINING, GEOLOGY AND PETROLEUM  
ENGINEERING

Karolina Gradiški

**MODEL OF INTERACTION BETWEEN  
GEOSYNTHETIC STRIP AND UNBOUND  
SOIL IN REINFORCED EARTH  
STRUCTURES**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:

Associate Prof. Petar Hrženjak, PhD

Prof. Mensur Mulabdić, PhD

Zagreb, 2017.



*Doktorski rad izrađen je na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.*

*Mentori: Izv. prof. dr. sc. Petar Hrženjak i Prof. dr. sc. Mensur Mulabdić*

*Doktorski rad sadrži: 196 stranica teksta, 126 slika i 22 tablice.*

## ZAHVALE

*Pisanje ovog rada bio je jedan od zahtjevnijih izazova s kojim sam se susrela u životu, a bez pomoći, strpljenja i korisnih savjeta mnogih divnih ljudi ovaj rad ne bi bio završen te stoga na početku ovog rada koristim priliku da izrazim najiskreniju zahvalu upravo onima koji su najzaslužniji za izradu ovog rada.*

*Mentoru izv.prof.dr.sc. Petru Hrženjaku zahvaljujem na svom trudu, uloženom vremenu, podršci i strpljenju koje mi je pružao kroz izradu ovog rada. Hvala Vam na riječima ohrabrenja i stručnom vodstvu, na svoj stručnoj pomoći oko izrade uređaja za izravno smicanje i na pomoći u provedbi ispitivanja i analizi rezultata, bez Vaše pomoći ovaj rad ne bi bio završen. Također, zahvaljujem se na pruženoj financijskoj potpori ostvarenoj u okviru projekta „Razvoj postupka ispitivanja posmične čvrstoće i krutosti materijala ispune“.*

*Mentoru prof.dr.sc. Mensuru Mulabdiću zahvaljujem na svim savjetima, susretljivosti, pomoći i stručnom vodstvu prilikom izrade ovog rada, na pomoći oko definiranja programa ispitivanja te na pomoći u organizaciji i provođenju ispitivanja koja su provedena na Građevinskom fakultetu u Osijeku. Hvala Vam što ste mi omogućili da u ovom radu imam priliku surađivati s prekrasnim ljudima i da ostvarim suradnju s kolegama na Građevinskom fakultetu u Osijeku bez kojih ovaj rad ne bi bio završen.*

*Prof.dr.sc. Predragu Kvasnički dugujem posebnu zahvalnost na pomoći pri odabiru područja ispitivanja i konačne teme doktorskog rada. Professore, hvala Vam na svim savjetima, razumijevanju, podršci, susretljivosti i strpljivom odgovaranju na moja brojna pitanja kojima sam Vas često prekidala u radu. Također, želim Vam se zahvaliti i na financijskoj potpori kojom ste omogućili provedbu potrebnih ispitivanja za izradu ovog rada.*

*Članovima povjerenstva prof.dr.sc. Biljani Kovačević Zelić i doc.dr.sc. Borisu Kavuru zahvaljujem na korisnim savjetima i dopunama koje su osigurale da ovaj rad bude što kvalitetniji.*

*Posebnu zahvalnost dugujem kolegi doc.dr.sc. Krunoslavu Minažeku koji je proveo sva ispitivanja izvlačenja geosintetičkih traka iz tla pri čemu je svojim znanjem i iskustvom pomogao da se unaprijedi postupak ispitivanja te da se doradi uređaj kako bi se provela što kvalitetnija ispitivanja. Hvala na nesebičnoj pomoći, utrošenom vremenu, trudu, konstruktivnim razgovorima i sugestijama koje su omogućile da ovaj rad uspješno privedem kraju.*

*Doc.dr.sc. Daliboru Kuhineku zahvaljujem na razvoju programa za mjerenje i upravljanje pokusa izravnog smicanja bez kojeg ne bi bilo moguće provesti ispitivanja izravnog smicanja.*

*Tehničarima s GF Osijek Zlatku Krstinu i Vjekoslavu Butkoviću zahvaljujem što su pomogli u doradi uređaja za ispitivanje te u pripremi i provođenju ispitivanja izvlačenja trake.*

*Kolegama i prijateljima s Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, a posebno Vinku i Dubravku hvala na svim savjetima, pomoći i podršci koju su mi pružili od prvog radnog dana.*

*Posebno se želim zahvaliti Evelini, Želimiru i Heleni koji su bili uz mene u najtežim trenucima i koji su mi pružali nesebičnu podršku, riječi utjehe i ohrabrenja, koji su me poticali da budem bolja osoba i da vjerujem u sebe. Hvala vam što ste tako predivni prijatelji.*

*Danijeli hvala na razgovorima, riječima ohrabrenja i podršci i pomoći pri izradi ovog rada, a Ani hvala na druženjima i opuštanjima uz kavu i kolače na kojima je najčešća tema bila provođenje ispitivanja i izrada rada.*

*Petri, Mariji i Jasmini hvala što su uz mene od prve godine upisa na fakultet, hvala što ste sa mnom prolazile sve uspone i padove i što ste tako divne prijateljice na koje se mogu u svakom trenutku osloniti.*

*Božidaru i Snježani hvala što su bili uz mene kad je bilo najteže.*

*Sergeju hvala na podršci, savjetima i što je vjerovao u mene.*

*Na kraju se želim zahvaliti mami, tati, sestri i baki što su vjerovali u mene, bili mi podrška od prvog dana, što su mi pružali utjehu kad je bilo najteže i što su sa mnom dijelili i lijepu i tešku trenutke na ovom putovanju. Bez vas sve ovo ne bi imalo smisla, vi ste mi dali snagu kad je bilo najteže.*

*Posvećeno mojim roditeljima*

## SAŽETAK

Poznavanje mehanizma interakcije između tla i elemenata armature ključno je za projektiranje konstrukcija od armiranog tla, a ovisi o vrsti armaturnih elemenata i tlu koje se koristi. U većini dosadašnjih istraživanja proučavan je mehanizam interakcije između metalnih traka ili mreža, te geosintetičkih mreža ili geotekstila i tla, dok je mali broj ispitivanja proveden za određivanje mehanizma interakcije geosintetičkih traka i tla. U istraživanjima koja su provedena za određivanje mehanizma interakcije geosintetičkih traka i tla, ispitivanja su provedena za slučajeve kada je kao materijal ispune korišten pijesak ili rjeđe šljunak, dok za ispitivanja kada se kao materijal ispune koristio lomljeni kamen ne postoje dostupni podaci u literaturi. Kako je u Hrvatskoj u izgradnji dva visoka zida od armiranog tla (Strikići i Sv. Trojica) korišten upravo lomljeni kamen i geosintetičke armaturne trake pojavila se potreba za proučavanjem mehanizma interakcije između lomljenog kamena i geosintetičke armature. Dosadašnja istraživanja pokazala su da su koeficijenti interakcije u šljunku veći od onih u pijesku, te je za očekivati da će koeficijenti interakcije u lomljenom kamenu biti veći od onih koji su određeni u šljunku. Kako bi se što bolje objasnio mehanizam interakcije između elemenata armature i tla provode se laboratorijska ispitivanja izravnog posmika i ispitivanja izvlačenja elemenata armature iz tla. Ispitivanje izravnog posmika slično je ispitivanjima koja se provode za tlo pri čemu se uzorak armature ugradi u uređaj i smiče, a u ispitivanju se registriraju posmična sila i pomak. Kod ispitivanja izvlačenja, armatura se ugradi između dva sloja tla, a nakon ugradnje uzorak armature se izvlači iz sloja tla. U ispitivanju se registriraju sila izvlačenja i pomaci koji se prate u pojedinim točkama na armaturi. Cilj ispitivanja je da se odredi sila koja je potrebna za izvlačenje armature ili sila pri kojoj dolazi do sloma armature. Dobivena sila izvlačenja podijeli se s površinom uzorka armature i dobije se otpor izvlačenju (koeficijent interakcije) koji se koristi kod projektiranja konstrukcija od armiranog tla. Mehanizam interakcije između tla i armaturnih elemenata ovisi o vrsti tla koje se koristi i o vrsti armaturnih elemenata, a ovaj rad je usmjeren na određivanje mehanizma interakcije između istežljive geosintetičke trake i lomljenog kamena. Kako bi se što bolje objasnio mehanizam interakcije između tla i geosintetičke trake potrebno je imati podatke o parametrima čvrstoće tla za koje je potrebno provesti ispitivanja izravnog posmika i parametre o interakciji između elemenata tla za koje je potrebno provesti ispitivanja izvlačenja armature iz tla. U ovom radu promatran je utjecaj granulometrijskog sastava materijala na koeficijent interakcije između geosintetičke trake i tla.

Ispitivanja su provedena za jednoliko graduirani lomljeni kamen s rasponom frakcija od 30 do 60 mm i dobro graduirani lomljeni kamen s rasponom frakcija od 4 do 60 mm i od 0 do 60 mm. Parametri čvrstoće lomljenog kamena određeni su u velikom uređaju za izravni posmik koji je razvijen na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Dimenzije uređaja su 300x300x300 mm, a maksimalni promjer zrna koji je ispitan u uređaju za izravni posmik je 31 mm. Rezultati ovih ispitivanja pokazali su da je kut trenja i dilatancije najveći kod jednoliko graduiranog materijala, dok su najmanji kutovi trenja određeni za dobro graduirani materijal. Koeficijenti interakcije između geosintetičke trake i lomljenog kamena određeni su u velikom uređaju za ispitivanje izvlačenja, tip GFOS. Ispitivanja su također provedena za tri različita granulometrijska sastava materijala: jednoliko graduirani materijal s rasponom frakcija od 30 do 60 mm i dobro graduirani materijal s rasponom frakcija od 4 do 60 mm i od 0 do 60 mm. Ispitivanja su provedena za slučaj izvlačenja jedne trake i za slučajeve izvlačenja dvije odvojene i dvije spojene geosintetičke trake. Ispitivanja izvlačenja jedne trake provedena su s ciljem određivanja utjecaja granulometrijskog sastava i gustoće materijala na koeficijente interakcije, dok se kod ispitivanja izvlačenja s dvije trake promatrao utjecaj bočnog trenja na koeficijent interakcije. Rezultati provedenih istraživanja pokazali su da su najveći kutovi trenja kod dobro graduiranog materijala od 0 do 60 mm, što je obrnuto od rezultata izravnog posmika gdje su za jednoliko graduirani materijal određeni najveći kutovi trenja. Ispitivanja s dvije odvojene i dvije spojene trake pokazala su da bočno trenje doprinosi povećanju koeficijenta interakcije. Uz laboratorijska ispitivanja određivanja koeficijenata interakcije i parametra koji utječu na koeficijent interakcije provedene su i povratne analize izvlačenja trake u programu Plaxis 2D. U povratnim analizama korišteni su parametri materijala određeni izravnim posmikom i koeficijenti interakcije određeni pokusom izvlačenja.

**Ključne riječi:** Armirano tlo, koeficijent interakcije, geosintetička traka, ispitivanje izvlačenjem, izravni posmik, numeričke analize

## SUMMARY

Knowledge of the mechanism of interaction between the soil and the reinforcement element is crucial for the design of reinforced soil structures. It depends on the type of the reinforcing element and the soil that is used. The majority of previous research studied the mechanism of interaction either between the metal strip or nets, or else geosynthetic nets or geotextile and soil, while a small number of tests were conducted to determine the mechanism of interaction between geosynthetic strips and soil. In studies that were conducted to determine the mechanism of interaction between geosynthetic strip and soil, tests were conducted in cases when the fill material used was sand or, less frequently, gravel, while there are no available data in the literature for tests performed with crushed stone as fill material. Since in Croatia broken rock and geosynthetic reinforcement strip were used in the construction of two high reinforced earth walls (Strikić and Sveta Trojica), there was a need to study the mechanism of interaction between the crushed stone and geosynthetic reinforcement. Previous studies have shown that coefficients of interaction in the gravel are higher than those in the sand. Therefore, it is to be expected that the coefficients of interaction in crushed stone are to be higher than those for the gravel. In order to clarify the mechanism of interaction between the elements of reinforcement and soil, the laboratory direct shear tests and pull-out tests on reinforcement elements and soil were performed. Direct shear test with reinforcement is similar to usual direct shear test, for which the reinforcement is incorporated in the device and shear, and the test registers shear force and displacement. For pull-out test, reinforcement is incorporated between two layers of the soil, and after emplacement the reinforcement is pulled out from the soil. During the test, withdrawal forces and displacements are registered at particular points on the reinforcement. The goal of testing is to determine the force required to pull out the reinforcement or the force at which the reinforcement broke. The resulting pull-out force is divided with the surface of the reinforcement material and the obtained value is the draw resistance (coefficient of interaction) which is used in the design of reinforced soil structures. The mechanism of interaction between soil and reinforcement depends on the type of soil used and on the type of reinforcement elements. This thesis is attempting to determine the mechanisms of interaction between extensible geosynthetic strips and crushed stone. In order to better clarify the mechanism of interaction between soil and geosynthetic strips, soil strength parameters are necessary (for which direct shear test is performed), as well as parameters of the interaction between the

elements of the soil (for which pull-out tests are performed). In this study, the effect of particle size distribution of the material on the coefficient of interaction between geosynthetic strips and soil was observed. Tests were performed on uniformly graded crushed stone fraction with a range of 30 to 60 mm and a well graded crushed stone fraction with a range of 4-60 mm, and from 0 to 60 mm. Strength parameters of the crushed stone are determined in a large direct shear device developed at the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering. Device dimensions are 300x300x300 mm and the maximum diameter of the grain that was investigated is 31,5 mm. The results of these tests showed that the friction angle and dilatancy are highest in uniformly graded material, while the smallest friction angles are specific to well graded material. Coefficients of interaction between geosynthetic stripe and crushed stone were determined in a large pull-out test device, GFOS model. These tests were also carried out for three different granulometric compositions: uniformly graded material with fraction range of 30 to 60 mm and a well-graded material with fraction range of 4-60 mm and from 0 to 60 mm. Tests were performed in the case of extraction of one strip and for two separated and two connected geosynthetic strips. One-strip extraction was conducted in order to determine the influence of particle size distribution and density of material on the interaction coefficient. For the extraction of the two strips, the effect of side friction on interaction coefficient was observed. The results of the study show that well graded materials (0-60 mm) show the greatest angles of friction between soil and strip, which is contrary to the results of direct shear test, where the uniformly graded material had greatest friction angles. Tests with two separate strips and two connected strips showed that side friction contributes to the coefficient of the interaction. In addition to laboratory tests for determining coefficients of interaction and parameters that affect the coefficient of interaction, feedback analyses have been conducted for strip pull-out in Plaxis 2D. In feedback analyses, parameters for materials were determined with direct shear and interaction coefficients were determined by pull-out test.

**Keywords:** Reinforced soil, friction interaction coefficient, geosynthetic strip, direct shear test, pullout test, numerical analysis



# Sadržaj

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1	Predmet istraživanja .....	3
1.2	Ciljevi istraživanja.....	4
1.3	Struktura disertacije.....	5
<b>2</b>	<b>ARMIRANO TLO</b> .....	<b>7</b>
2.1	Povijesni razvoj i primjena konstrukcija od armiranog tla.....	8
2.2	Osnovne komponente konstrukcija od armiranog tla.....	11
2.2.1	Tlo koje se koristi u izgradnji konstrukcija od armiranog tla .....	11
2.2.2	Armaturni elementi .....	12
2.2.3	Fasadni elementi.....	14
2.3	Osnovni koncept armiranog tla.....	15
2.4	Osnove proračuna konstrukcija od armiranog tla.....	20
2.5	Interakcija tla i elemenata armature.....	29
2.5.1	Interakcija tla i geosintetičke trake.....	31
2.5.2	Parametri koji utječu na koeficijent interakcije tla i elemenata armature .....	33
<b>3</b>	<b>PREGLED PROBLEMATIKE DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA</b> .....	<b>39</b>
3.1	Dosadašnja ispitivanja parametra čvrstoće lomljenog kamena pokusom izravnog posmika .....	40
3.1.1	Izravni posmik.....	41
3.1.2	Otpornost na smicanje nekoherentnih tala .....	43
3.2	Dosadašnja ispitivanja međusobnog odnosa geosintetičke trake i nekoherentnog materijala pokusom izvlačenja armature iz tla.....	55
3.2.1	Pokus izvlačenja.....	55
3.2.1.2	Parametri koji utječu na rezultate pokusa izvlačenja armature iz tla .....	62
3.2.2	Dosadašnja ispitivanja izvlačenja geosintetičke trake i tla .....	66
<b>4</b>	<b>ODREĐIVANJE PARAMETARA ČVRSTOĆE KAMENE ISPUNE</b> .....	<b>74</b>
4.1	Opis uređaja.....	74

4.2	Materijal korišten u ispitivanju.....	76
4.3	Ugradnja materijala i provedba ispitivanja.....	77
4.4	Prikaz i analiza rezultata.....	80
<b>5</b>	<b>ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA INTERAKCIJE GEOSINTETIČKE TRAKE I KAMENE ISPUNE .....</b>	<b>90</b>
5.1	Opis uređaja GFOS za ispitivanje otpornosti na izvlačenje .....	90
5.2	Materijal korišten u ispitivanju.....	93
5.2.1	Polietilenske (Paraweb) trake.....	93
5.2.2	Materijal ispune – lomljeni kamen.....	95
5.3	Ugradnja uzorka i provedba ispitivanja.....	96
5.3.1	Ispitivanje izvlačenja jedne trake .....	96
5.3.2	Ispitivanje izvlačenja dviju traka.....	99
5.4	Prikaz i analiza rezultata ispitivanja .....	101
5.4.1	Rezultati ispitivanja izvlačenja jedne geosintetičke trake.....	101
5.4.2	Rezultati ispitivanja izvlačenja dvije geosintetičke trake .....	118
5.4.3	Usporedba koeficijenata interakcije za jednu i dvije trake s podacima iz literature 127	
<b>6</b>	<b>POVRATNE ANALIZE IZVLAČENJA GEOSINTETIČKE TRAKE .....</b>	<b>130</b>
6.1	Metoda konačnih elemenata .....	130
6.1.1	Program Plaxis 2D .....	131
6.2	Definiranje modela .....	136
6.2.1	Geometrijske karakteristike modela.....	136
6.2.2	Definiranje parametra materijala.....	138
6.2.3	Definiranje kontaktnih elemenata .....	141
6.3	Rezultati numeričkih analiza .....	142
6.3.1	Određivanje ekvivalentne krutosti trake u modelu .....	142

6.3.2	Povratne analize za koeficijente interakcije manje od 1,0 definirane preko $R_{int}$ ...	147
6.3.3	Povratne analize za kontaktne elemente definirane kao poseban materijal .....	149
<b>7</b>	<b>DISKUSIJA REZULTATA.....</b>	<b>162</b>
<b>8</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>178</b>
<b>9</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>183</b>

# 1 UVOD

Armirano tlo je kompozitni materijal koji se sastoji od tla i elemenata armature koja se ugrađuje u tlo kako bi preuzela vlačna ili posmična naprezanja, čime se smanjuju opterećenja koja bi inače uzrokovala posmični slom ili pretjerane deformacije konstrukcije. Ovisno o vrsti i namjeni konstrukcije bira se odgovarajući tip armaturnih elemenata koji mogu biti načinjeni od istežljivog ili neistežljivog materijala i to u obliku mreža, traka ili geotekstila, a uz odabir odgovarajućih armaturnih elemenata važan je i odabir odgovarajućeg tla koje će se koristiti u izgradnji. Tlo koje se najčešće koristi je nekoherentno tlo s manje od 15% sitnih čestica (manjih od 75  $\mu\text{m}$ ), dok se koherentna tla koriste vrlo rijetko (Kvasnička, 2009). Armirano tlo omogućava relativno jeftinu, brzu i jednostavnu izgradnju potpornih zidova, upornjaka za mostove, marinskih konstrukcija, armiranih kosina i nasipa, a koji se uz to mogu i lijepo uklopiti u okoliš. Prostor potreban za izgradnju ovih konstrukcija je minimalan tako da su ove konstrukcije pogodne za lokacije s ograničenim prostorom, a konstrukcije se lako mogu prilagoditi nestabilnostima na terenu te mogu podnijeti veća slijeganja i gradnju na slabijem tlu. Upravo zbog ovih prednosti armirano tlo je našlo široku primjenu u geotehnici, građevinarstvu i rudarstvu.

Projektiranje konstrukcija od armiranog tla podrazumijeva provjeru vanjske i unutarnje stabilnosti konstrukcija, pri čemu provjera vanjske stabilnosti odgovara provjerama stabilnosti klasičnih konstrukcija, dok je provjera unutarnje stabilnosti jedinstvena za ovaj tip konstrukcije i podrazumijeva provjeru sigurnosti protiv pucanja i izvlačenja armature. Sigurnost protiv pucanja ovisi o vlačnoj čvrstoći armature, dok sigurnost na izvlačenje ovisi o interakciji koja se odvija između tla i elemenata armature. Kako bi se odredio mehanizam interakcije provodi se ispitivanje izravnog posmika ili izvlačenja armature iz tla (eng. pull out test). Pri čemu je kod izravnog posmika armatura fiksirana, a tlo se pomiče relativno u odnosu na armaturu, dok se kod ispitivanja izvlačenja armatura izvlači iz tla te dolazi do pomaka armature u odnosu na tlo. Kako se ispitivanjem izvlačenja armature bolje opisuje stvarno ponašanje armature u konstrukcijama od armiranog tla upravo se ta ispitivanja koriste kako bi se objasnio mehanizam interakcije tla i armature. Do sada je proveden velik broj ispitivanja koji je uključivao određivanje mehanizma interakcije između tla i armaturnih elemenata (metalnih traka, metalnih mreža, geosintetika, geomreža) dok je manji broj ispitivanja bio proveden za slučajeve kada se

kao armaturni elementi koriste istezljive geosintetičke trake. Uz to većina tih ispitivanja je provedena za slučajeve kad se kao materijal ispune (tlo) koristio pijesak ili rjeđe šljunak, dok je vrlo mali broj ispitivanja proveden kada se kao materijal ispune koristio lomljeni kamen. Kako su se geosintetičke trake pokazale kao vrlo dobra zamjena za metalne trake, osobito u sredinama gdje može doći do korozije metalnih traka ili gdje se očekuju veće deformacije konstrukcije, pojavila se i veća potreba za proučavanjem mehanizama interakcije između geosintetičkih traka i tla. Dosadašnja ispitivanja izvlačenja geosintetičkih traka provodila su se za slučajeve kada je kao materijal ispune korišten pijesak ili šljunak, dok ispitivanja za slučajeve kad se koristi lomljeni kamen nema dostupnih u literaturi. Kako su geosintetičke trake s ispunom od lomljenog kamena korištene u gradnji zidova od armiranog tla u obalnom dijelu Republike Hrvatske (zidovi Strikići i Sv. Trojica) i kako se pretpostavlja da će u budućnosti biti potrebe za izgradnjom ovakvih zidova, ovaj rad je usmjeren na određivanje mehanizma interakcije geosintetičke trake i lomljenog kamena.

S ciljem što boljeg definiranja modela interakcije proveden je niz ispitivanja koji je uključio određivanje parametra čvrstoće lomljenog kamena pokusom izravnog smicanja i koeficijenta interakcije geosintetičke trake i lomljenog kamena pokusom izvlačenja armature, te niz numeričkih analiza izvlačenja geosintetičke trake. Za potrebe ispitivanja parametara čvrstoće lomljenog kamena provedene su potrebne preinake velikog uređaja za izravni posmik koji je razvijen na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, a ispitivanja su provedena za lomljeni kamen različitog granulometrijskog sastava, kod tri različita vertikalna opterećenja. Parametri čvrstoće lomljenog kamena potrebni su kako bi se objasnio mehanizam interakcije tla i armature te kako bi se osigurali potrebni parametri za provedbu numeričkih analiza. Mehanizam interakcije lomljenog kamena i geosintetičke trake proučavan je provedbom laboratorijskih ispitivanja izvlačenja na velikom uređaju koji je razvijen na Građevinskom fakultetu u Osijeku, a ispitivanja su provedena za jednu vrstu geosintetičke trake i za tri različita granulometrijska sastava materijala. Cilj istraživanja bio je da se odredi utjecaj granulometrijskog sastava materijala i dodatnog vertikalnog naprezanja na koeficijent interakcije te da se odrede koeficijenti interakcije između geosintetičke trake i lomljenog kamena. Kako bi se eksperimentalno odredio utjecaj bočnog trenja geosintetičke trake i tla ispitivanja su provedena za slučaj s jednom geosintetičkom trakom i za slučaj izvlačenja dvije razmaknute i dvije spojene trake. Rezultati provedenih ispitivanja pokazali su, kao što je bilo i očekivano, veće koeficijente interakcije za dobro graduirani materijal i veće koeficijente od onih koji su provedeni za

geosintetičku traku, ali za slučaj kada je kao materijal ispune bio pijesak ili šljunak. Uz to dokazano je i da bočno trenje na rubu trake utječe na silu izvlačenja.

Povratne numeričke analize provedene su upotrebom programa Plaxis 2D, a cilj provedbe povratnih analiza je bio da se utvrdi koji parametri najviše utječu na silu izvlačenja.

## 1.1 Predmet istraživanja

U ovom radu istraživanja su usmjerena na određivanje koeficijenta interakcije između istežljive geosintetičke trake i kamene ispune. Istežljive geosintetičke trake koriste se u izgradnji AT-a kod kojih se očekuju veće deformacije konstrukcije i gdje postoji opasnost od korozije metalnih traka. Takav slučaj bio je u izgradnji zidova od armiranog tla u Hrvatskoj. Zidovi Strikići i Sv. Trojica izgrađeni su „Terre arme“ tehnologijom, koja podrazumijeva naizmjenično postavljanje slojeva tla (drobljeni kamen) i armature (istežljive poliestar-polietilenske) trake. Kako bi se osigurala sigurnija i ekonomičnija izgradnja ovih konstrukcija potrebno je poznavati model trenja koji se javlja na kontaktu trake i tla. Klasični modeli razvijeni za određivanje trenja na kontaktu tla i metalne (neistežljive) armature temelje se na modelu linearne krutosti trake i elastoplastičnom modelu trenja za modeliranje interakcije na kontaktu trake i tla. Ovakav model ne opisuje dobro ponašanje istežljivih traka čije ponašanje je kompleksnije (Abdelouhab et al. 2010). Za primjenu ovog modela na istežljivu armaturu potrebno je prilagoditi trenutni model trenja na kontaktu tla i armature kako bi se dobili što realniji podaci. Kako bi što bolje objasnili interakciju geosintetičkih traka i tla Lo (1998) i Abdelouhab i drugi (2009, 2010) provode ispitivanja izvlačenja geosintetičkih traka. Ispitivanja su provedena u uređajima za ispitivanje otpornosti na izvlačenje u laboratorijskim uvjetima pri čemu se kao materijal ispune najčešće koristio pijesak, dok je rjeđe kao materijal ispune bio korišten šljunak. Abdelouhab i drugi (2009) su na temelju provedenih istraživanja zaključili da je trenje na kontaktu trake i tla veće kad je materijal ispune šljunak. Ova razlika povezana je s većom gustoćom i koeficijentom nejednoličnosti što dovodi do većeg kuta dilatancije i kuta trenja. Istraživanjem koeficijenata interakcije istežljivih sintetičkih traka (GeoStrap 37,5) i tla (pijesak i šljunak) Abdelouhab i drugi (2010), zaključili su sljedeće: maksimalni koeficijent interakcije smanjuje se s povećanjem dodatnog opterećenja, koeficijent trenja u šljunku je veći od koeficijenta u pijesku,

koeficijent interakcije na kontaktu armature i tla je značajno veći (približno 50%) od onog koji se koristi u praksi.

Kako se u izgradnji konstrukcija od armiranog tla, kao materijal ispune često koristi drobljeni kamen, koeficijent interakcije koji je određen laboratorijskim istraživanjima s uzorcima pijeska ili šljunka, nije reprezentativan za drobljeni kamen (uglavnom je premalen). Prema tome, da bi se odredile stvarne vrijednosti koeficijenata interakcije te omogućilo ekonomičnije projektiranje konstrukcija potrebno je provesti ispitivanje otpornosti na izvlačenje za slučaj kada je materijal ispune drobljeni kamen. Uz ispitivanje koeficijenta interakcije potrebno je provesti i ispitivanja parametara čvrstoće drobljenog kamena pokusom izravnog smicanja kako bi se odredio kut trenja i kut dilatancije. Ova ispitivanja nužna su kako bi se utvrdilo da li je koeficijent trenja na kontaktu trake veći ili manji od kuta unutarnjeg trenja samog materijala. Izravni posmik je nužan kako bi se odredio kut trenja i dilatancije, te utjecaj vertikalnog opterećenja na promjenu kuta dilatancije.

## 1.2 Ciljevi istraživanja

Ciljevi istraživanja prvenstveno su uključivali određivanje mehanizma interakcije između geosintetičke trake i lomljenog kamena i određivanje koeficijenta interakcije između geosintetičke trake i tla, kao i određivanje ključnih parametara koji utječu na koeficijent interakcije. Provedenim istraživanjima planiralo se odrediti utjecaj kuta dilatancije nekoherentnog tla na koeficijent geosintetičke trake i tla, jer se do sada taj kut nije uzimao u obzir nego samo kut unutarnjeg trenja iz izravnog posmika. Eksperimentalnim ispitivanjima planira se odrediti utjecaj bočnog trenja geosintetičke trake i tla. Uz ispitivanja mehanizma interakcije trake i tla dodatni cilj ispitivanja je bio i unapređenje uređaja za izravni posmik kojim je moguće ispitivati parametre čvrstoće lomljenog kamena s maksimalnim promjerom do 30 mm. Uz eksperimentalni dio ispitivanja provedene su i povratne numeričke analize pokusa izvlačenja. Pretpostavljene hipoteze s kojima se krenulo u istraživanje su sljedeće: koeficijent interakcije za lomljeni kamen kao ispunu ima veće vrijednosti u odnosu na vrijednosti utvrđene za pijesak i šljunak te vrijednosti koeficijenata interakcije ovise o vertikalnom naprežanju i karakteristikama kamena; kod manjih vertikalnih opterećenja

koeficijent interakcije na kontaktu tla i armature je veći od kuta unutarnjeg trenja materijala ispune, koeficijent nejednoličnosti materijala ispune znatno utječe na koeficijent interakcije između trake i tla, utjecaj kuta dilatancije na koeficijent interakcije značajan je kod manjih naprezanja, postoji utjecaj bočnog trenja na ukupnu silu izvlačenja.

### 1.3 Struktura disertacije

Disertacija sadrži ukupno devet poglavlja.

U uvodnom poglavlju opisano je područje istraživanja i potreba za određivanjem koeficijenta interakcije geosintetičke trake i kamene ispune. Opisani su glavni ciljevi istraživanja i navedene su metode istraživanja koje uključuju laboratorijska ispitivanja i numeričke analize, a koje su potrebne kako bi se odredio koeficijent interakcije i parametri koji utječu na koeficijent interakcije.

U drugom poglavlju dan je kratak opis povijesnog razvoja konstrukcija od armiranog tla i područje primjene modernih AT konstrukcija gdje su navedene osnovne komponente AT konstrukcija. Uz povijesni pregled i primjenu opisan je i osnovni koncept armiranog tla i osnove proračuna AT konstrukcija. Također je opisan mehanizam interakcije između tla i elemenata armature s posebnim osvrtom na interakciju geosintetičke trake i tla, opisani su i najznačajniji parametri koji utječu na koeficijent interakcije.

U trećem poglavlju opisana je problematika dosadašnjih ispitivanja po dva ključna aspekta ispitivanja koja uključuju određivanje parametra čvrstoće lomljenog kamena i ispitivanja izvlačenja armature iz tla s ciljem određivanja koeficijenta interakcije. U prvom dijelu opisan je pokus izravnog smicanja s posebnim osvrtom ispitivanja izravnog smicanja za krupnozrnata tla, pri čemu je dan pregled najvažnijih parametra koji utječu na parametre čvrstoće (kut trenja i koheziju) krupnozrnatog tla. U drugom dijelu opisan je pokus izvlačenja armature iz tla, gdje je dan pregled dosadašnjih istraživanja interakcije armature i tla i pregled najvažnijih parametra koji utječu na rezultate ispitivanja.

U četvrtom poglavlju opisan je veliki uređaj za izravni posmik koji je razvijen na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, opisan je materijal korišten u ispitivanju kao i postupaka provedbe ispitivanja. Dan je i prikaz rezultata provedenih ispitivanja određivanja parametra čvrstoće lomljenog kamena.



U petom poglavlju opisan je veliki uređaj za ispitivanje izvlačenja, tip GFOS. Uz opis uređaja dan je i opis materijala korištenog u ispitivanju kao i postupak provedbe ispitivanja. Prikaz rezultata ispitivanja podijeljen je na rezultate ispitivanja za jednu traku i rezultate ispitivanja s dvije trake. Kod ispitivanja jedne trake promatrao se utjecaj granulometrijskog sastava materijala i vertikalnog naprezanja na rezultate ispitivanja, dok se kod ispitivanja s dvije trake promatrao utjecaj dodatnog bočnog naprezanja na koeficijent interakcije. Na kraju je dana usporedba koeficijenata interakcije koji su određeni za lomljeni kamen s dostupnim podacima iz literature gdje su određeni koeficijenti interakcije geosintetičke trake i pijeska ili šljunka.

U šestom poglavlju opisane su provedene povratne numeričke analize u programu Plaxis 2D. Parametri materijala korišteni u povratnim analizama određeni su na temelju laboratorijskih ispitivanja izravnog posmika i izvlačenja armature iz tla. Rezultati provedenih numeričkih analiza pokazuju dobro slaganje s rezultatima provedenih laboratorijskih ispitivanja izvlačenja trake iz tla.

U sedmom poglavlju u diskusiji rezultata dan je sumarno prikaz rezultata svih provedenih ispitivanja.

U osmom poglavlju navedeni su glavni zaključci koji su proizašli iz provedenih laboratorijskih istraživanja i numeričkih analiza.

U devetom poglavlju naveden je popis korištenih referenci.

## 2 ARMIRANO TLO

Armirano tlo (AT) je konstrukcija u kojoj se u osnovni materijal (materijal tla) ugrađuju umeci koji preuzimaju vlačna naprezanja iz tla i na taj način povećavaju čvrstoću tla. Osnovne komponente AT konstrukcija su tlo, armaturni elementi i obloga. Tlo koje se najčešće koristi u izgradnji AT konstrukcija je nekoherentno tlo. Kao armaturni elementi mogu se koristiti istežljivi ili neistežljivi materijali i to u obliku mreža, traka ili geotekstila. Ovisno o vrsti i namjeni objekata te o karakteristikama temeljnog tla, odabire se i vrsta armaturnih elemenata koji će se koristiti u izgradnji konstrukcija od armiranog tla, a mehanizam interakcije koji se javlja između armaturnih elemenata i materijala ispune ovisi o vrsti armaturnih elemenata (traka, geosintetika, geomreža) i o vrsti tla. Obloga u konstrukcijama od armiranog tla ne doprinosi značajno čvrstoći konstrukcije, njena glavna uloga je da se spriječi erozija materijala u konstrukcijama od armiranog tla. Glavni dijelovi konstrukcije od armiranog tla prikazani su na slici 2-1.



**Slika 2-1** Glavni dijelovi konstrukcija od armiranog tla  
([http://www.terre-armee.com/ta/wterrearmee\\_en.nsf](http://www.terre-armee.com/ta/wterrearmee_en.nsf))

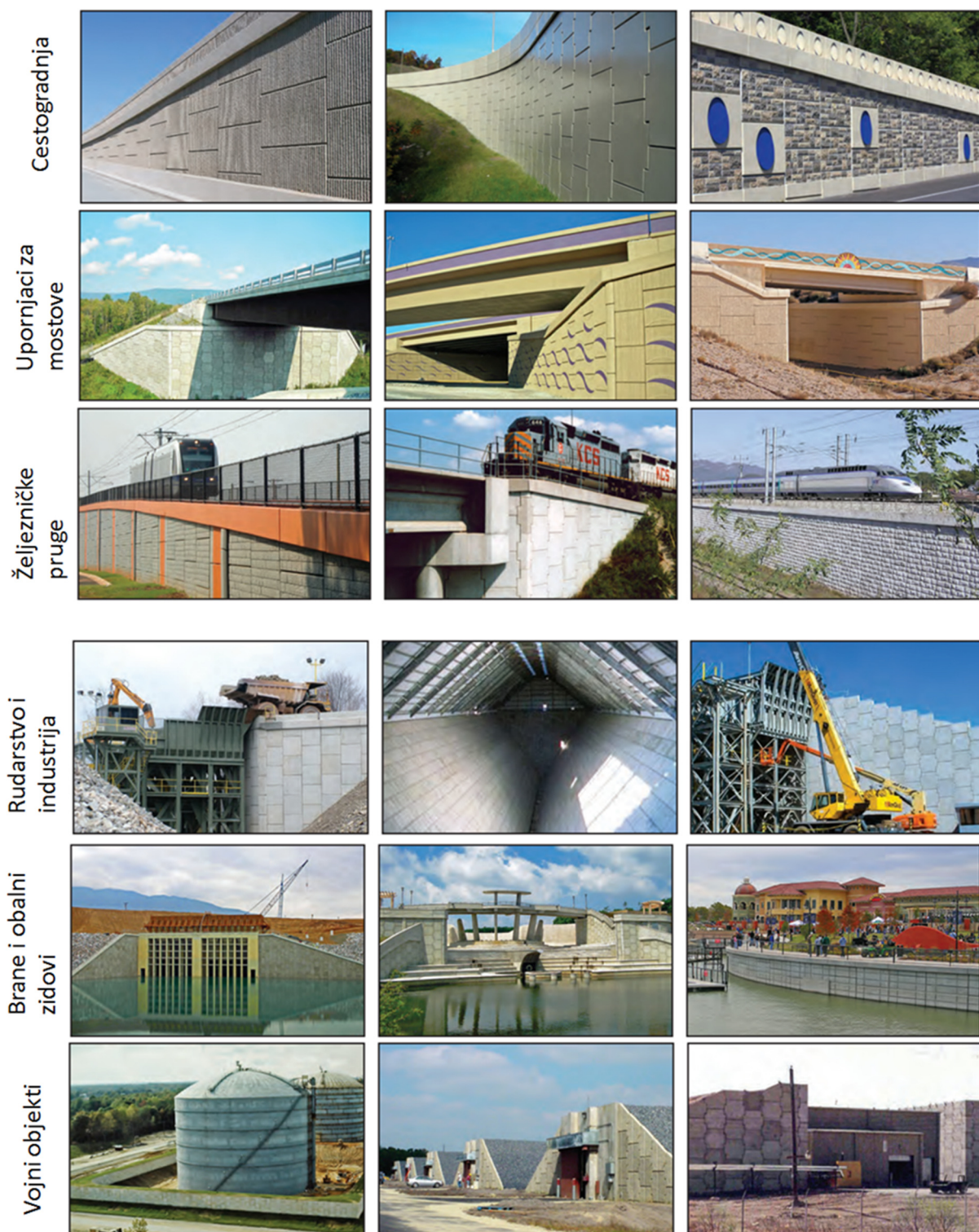
## 2.1 Povijesni razvoj i primjena konstrukcija od armiranog tla

Armirano tlo nije nova konstrukcija, kroz povijest su ovakve konstrukcije korištene prije više od 3000 god. Najstariji primjeri ovakvih konstrukcija su Agar-Quf zigurat (5 km sjeverno od Bagdada) i Kineski zid, gdje se za vlačne elemente koristilo šiblje i granje. Rimljani su koristili armirano tlo za izgradnju objekata duž rijeke Tigris. U 17. i 18. stoljeću sličan princip ojačanja tla upotrebom šiblja i granja korišten je u cijelom svijetu (Amerika, Europa, Azija) uz razne varijacije za izgradnju zidova, brana i nasipa. Moderan koncept armiranog tla kakav poznajemo danas pojavio se krajem 20-ih godina prošlog stoljeća u sustavima koje je patentirao Coyne u Francuskoj i Munster u SAD-u (Clayton et al. 2013). Francuski inženjer Henri Vidal 60-ih godina prošlog stoljeća dao je rješenje armiranja tla pomoću čeličnih natega (sajli), a termin koji je predložio i patentirao je ojačano tlo ( fr. „*Terre Arme*“ ili eng. „*Reinforced earth*®“). Zbog toga se, kao alternativni termin, rabi naziv *Mechanically stabilised earth wall* – MSEW (Jones 1985). Prvi veliki zid od armiranog tla izgrađen je 1968. godine u blizini grada Mentona na jugu Francuske. Fasadni elementi kod izgradnje ovog zida bili su metalne savitljive obloge U-profila, a elementi ojačanja metalne trake. Predgotovljeni betonski paneli počeli su se koristiti 70-ih godina prošlog stoljeća kao alternativni elementi metalnim oblogama i od tada pa sve do danas su u širokoj primjeni. U SAD-u prvi objekt izgrađen metodom koju je predložio Vidal izgrađen je 1972. godine za sanaciju klizišta u Kaliforniji, dok je u Velikoj Britaniji prvi objekt od armiranog tla izgrađen 1973. godine (Jones 1985). Nakon predstavljanja Vidalovog rješenja za ojačanje tla, ovaj koncept je doživio nagli razvoj te su bila financirana brojna istraživanja u Francuskoj, SAD-u i Velikoj Britaniji koja su doprinijela poboljšanju i razumijevanju osnovnih principa armiranja tla (Jones 1985). Kalifornijski *Department of Transportation* uveo je 1974. godine upotrebu mreža kao elementa ojačanja u izgradnji zidova od armiranog tla, što je dovelo do daljnjeg razvoja armiranog tla.

U izgradnji prvih konstrukcija od armiranog tla kao armaturni elementi korištene su metalne, prvenstveno čelične trake. Međutim u međuvremenu su se pojavili novi (geosintetički) materijali koji se za potrebe armiranja tla proizvode u obliku: traka, geotesktila i geomreža. Upotreba geosintetika omogućila je izgradnju ekonomičnih konstrukcija. Usporedbom cijene izgradnje potpornih konstrukcija i konstrukcija od armiranog tla pokazalo se da je izgradnja potpornih konstrukcija od armiranog tla najjeftinija (Yako & Christopher 1988 i Koerner &

Soong 2001). U usporedbi s masivnim betonskim zidovima, konstrukcijama od armiranog tla postižu se uštede od 20 - 30%, osobito za zidove više od 5 m (Clayton et al. 2013). Uz ekonomske prednosti konstrukcije od armiranog tla imaju i druge značajne prednosti u odnosu na klasične potporne konstrukcije, a to su: jednostavna izgradnja, fleksibilnost konstrukcije te odlično uklapanje u okoliš. Fleksibilnost konstrukcija od armiranog tla osigurava funkcionalnost konstrukcije i u slučajevima slabog temeljnog tla gdje se očekuju diferencijalna slijeganja ili gdje se očekuju seizmička opterećenja uslijed djelovanja potresa na konstrukciju. Upravo zbog ovih prednosti konstrukcije od armiranog tla primjenjuju se u geotehnici, građevinarstvu i rudarstvu, slika 2-2. Jones (1985) navodi da se armirano tlo koristi:

- kod izgradnje upornjaka za mostove
- kao zamjena za vijadukt gdje je slabo temeljno tlo
- kod izgradnje brana
- kod izgradnje nasipa
- za ojačanje temeljnog tla
- za ojačanje nasipa kod izgradnje ceste ili željezničke pruge
- u rudarstvu za izgradnju utovarnih/istovarnih rampi kod postrojenja za oplemenjivanje
- u rudarstvu za izgradnju silosa za skladištenje mineralnih sirovina, npr. ugljena
- za izgradnju taložnih bazena
- za ojačanje krovinskih naslaga u rudarstvu
- u vojsci za izgradnju bunkera, prolaza i skloništa
- za izgradnju obalnih zidova i plovni putova.



**Slika 2-2** Primjeri primjene armiranog tla

([http://www.reinforcedearth.com/sites/default/files/reinforced\\_earth\\_brochure.pdf](http://www.reinforcedearth.com/sites/default/files/reinforced_earth_brochure.pdf))

## 2.2 Osnovne komponente konstrukcija od armiranog tla

Konstrukcije od armiranog tla, pri čemu se prvenstveno u ovom radu misli na zidove od armiranog tla, sastoje se od tri osnovna dijela:

- tla
- armaturnih elemenata
- obloge (obložnih elemenata).

### 2.2.1 Tlo koje se koristi u izgradnji konstrukcija od armiranog tla

Upotreba tla koje se koristi za izgradnju armiranog tla ovisi o vrsti konstrukcije, trajnosti konstrukcije, da li se radi o trajnoj ili privremenoj konstrukciji, fizikalno kemijskim svojstvima materijala i o ekonomskim parametrima. Za izgradnju zidova od armiranog tla potrebna su bolja fizikalno – mehanička svojstva tla (kut trenja i kohezija) nego primjerice u izgradnji nasipa gdje je potrebno da konstrukcija od armiranog tla samo poboljša već postojeće parametre. Za stabilnost konstrukcija od armiranog tla potrebno je da se razvije odgovarajuće trenje na kontaktu tla i elemenata armature. Može se reći da je trenje koje se razvija na kontaktu tla i elemenata armature funkcija parametara tla i elemenata armature, pri čemu su od parametara tla najznačajniji zbijenost tla, gustoća i granulometrijski sastav materijala (Saran 2010). Tlo koje se najčešće koristi u izgradnji konstrukcija od armiranog tla je dobro graduirani krupnozrnati materijal s najviše 15% sitnih čestica (manjih od 0,075 mm). Uz ovaj zahtjev postavljaju se još i dopunski zahtjevi o minimalnom kutu unutarnjeg trenja, kut unutarnjeg trenja bi trebao biti minimalno  $34^\circ$ , određen ispitivanjem izravnog posmika na uzorku zbijenom na gustoću koja je minimalno 95% maksimalne gustoće određene standardnim Proctorovim postupkom, indeksu plastičnosti (manji ili jednak 6) (Kvasnička 2009). Dobro zbijeno krupnozrnato tlo je dobro propusno, dobrih mehaničkih svojstava i trajno. Upotrebom ove vrste tla osigurava se dobro prenošenje efektivnih posmičnih naprezanja iz tla na armaturne elemente, tlo se ponaša kao elastičan materijal, a pomaci konstrukcije nakon izgradnje su vrlo mali (Saran 2010). Nedostatak korištenja ove vrste materijala je to što je vrlo često potrebno krupnozrnati materijal dopremiti do lokacije izgradnje konstrukcije što može u pojedinim slučajevima biti skupo. S druge strane upotreba koherentnog tla se ne preporuča za izgradnju konstrukcija od



armiranog tla zato jer je tlo slabo propusno, te može doći do porasta pornog tlaka za vrijeme izgradnje konstrukcije, čime se može narušiti stabilnost konstrukcije. Koherentno tlo se ponaša kao elastoplastičan materijal te se povećava mogućnost većih pomaka konstrukcije nakon izgradnje. Nedostaci upotrebe koherentnog tla u izgradnji konstrukcija su loša mehanička svojstva, veća mogućnost korozije kad se koristi metalna armatura, potreba za zahtjevnom drenažom dok je prednost upotrebe ove vrste materijala dostupnost materijala čime se umanjuju troškovi izgradnje. Kad se govori o zahtjevima koje mora ispuniti tlo koje se koristi za izgradnju konstrukcija od armiranog tla, tvrtke koje su licencirane za proizvodnju armaturnih elemenata propisuju svoje kriterije koje tlo mora zadovoljiti da bi se osigurala stabilnost i trajnost konstrukcija.

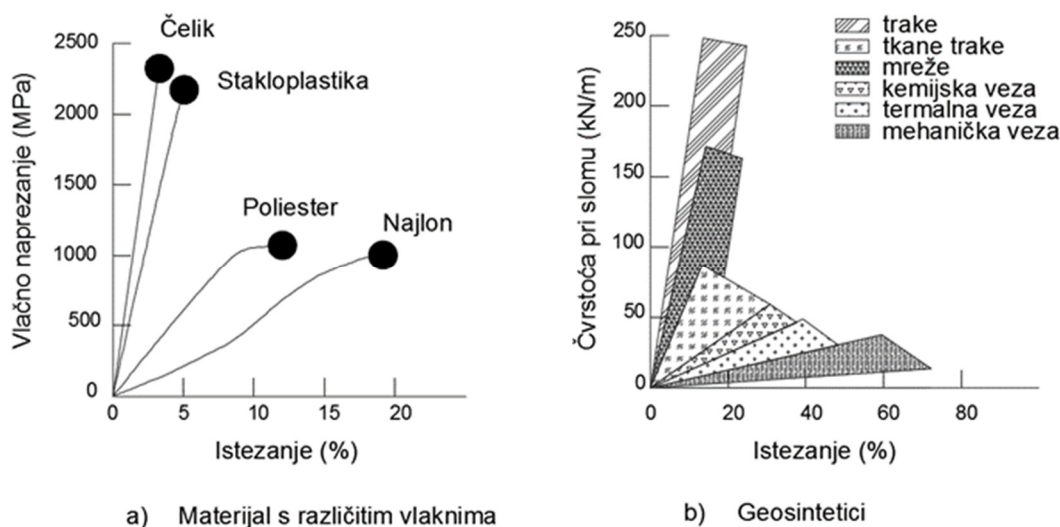
### 2.2.2 Armaturni elementi

Armaturni elementi koji se najčešće koriste u konstrukcijama od armiranog tla dijele se na neistezljive i istezljive armaturne elemente. Pokharel (1995) navodi da su McGown i drugi (1978) prvi definirali istezljivu i neistezljivu armaturu te da su Bonaparte i drugi (1987) proširili definiciju i definirali izduživu i neizduživu armaturu kao:

- Neizduživa armatura je armatura koja se koristi na takav način da su vlačne deformacije u armaturi značajno manje od horizontalnog izduženja potrebnog da se razvije aktivno plastično stanje u tlu dok je apsolutno neizduživa armatura definirana kao tako kruta armatura da se ravnoteža postiže pri približno nultom horizontalnom produljenju.
- Istezljiva armatura je armatura koja se koristi na takav način da su vlačne deformacije u armaturi jednake ili veće od horizontalnog produljenja koje je potrebno da se razviju plastične deformacije. Armatura koja se definira kao apsolutno izduživa ima tako mali modul da se vlačne sile iz armature ne prenose u tlo pri deformacijama koje su potrebne da se razvije aktivno plastično stanje.

Bonaparte i drugi (1987) smatrali su čeličnu armaturu kao neizduživu, a geosintetičke armature kao izdužive za gotovo sve praktične probleme. Za neizduživu čeličnu armaturu može se reći da konstrukciju čini krutom, dok istezljiva geosintetička armatura povećava duktilnost konstrukcije. Čelična armatura može se podijeliti u tri skupine: trake, mreže i rešetke, dok se

istezljiva armatura dijeli na geosintetičke trake, geomreže, te tkane i netkane geotekstile. Deformacijska svojstva materijala koji se koriste kao armatura prikazana su na slici 2-3.

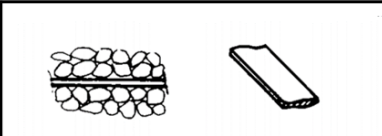
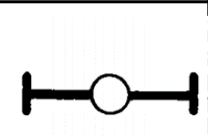
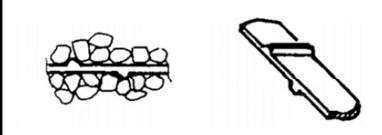
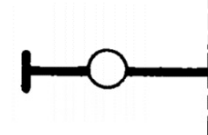

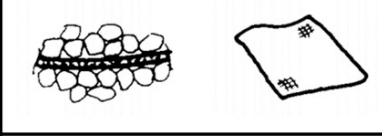
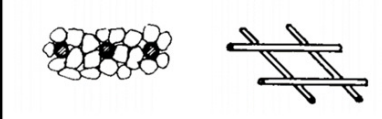
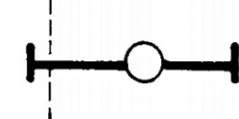


**Slika 2-3** Deformacijska svojstva materijala koja se koriste kao armaturni elementi (Pokharel 1995)

Neistezljiva armatura se najčešće koristi u AT-konstrukcijama kod kojih se posebna pažnja posvećuje kontroli pomaka, kao što su upornjaci od AT konstrukcija, nasipi za željeznice i sl. Kod upotrebe čelične armature potrebno je armaturu zaštititi od korozije, što se donedavno činilo galvanizacijom, ali novi europski propisi za AT više ne dozvoljavaju upotrebu galvaniziranih čeličnih elemenata (Kvasnička 2009). Istezljiva armatura koristi se u slučajevima gdje manje promjene oblika ne mijenjaju bitno funkcionalnost konstrukcija ili gdje je čak i poželjno da AT konstrukcija može podnijeti deformacije temeljnog tla bez većih oštećenja kao što je slučaj na nestabilnim terenima i klizištima. Istezljiva armatura se koristi i kao zamjena za čeličnu armaturu gdje postoji opasnost od korozije čelične armature. U Republici Hrvatskoj je izgrađeno više zidova primjenom istezljive armature, pri čemu se po svojim dimenzijama ističu dva vrlo visoka zida Strikići (visine do 27 m i duljine 600 m) i Sveta Trojica (visine do 34 m i duljine 430 m) koji su izgrađeni u obalnom području. Armaturni elementi korišteni u izgradnji ovih zidova bile su geosintetičke trake poznate pod nazivom *ParaWeb* trake. Interakcija koja se odvija između *ParaWeb* traka i lomljenog kamena je predmet ovog istraživanja i detaljnije će biti opisana nešto kasnije.



U konstrukcijama od armiranog tla važna je interakcija (veza) koja se ostvaruje između tla i elemenata armature. Interakcija između tla i armature ovisi o vrsti armature koja se koristi i o karakteristikama tla. Kada se kao armaturni elementi koriste geotekstili, čelične ili geosintetičke trake interakcija između armature i tla ostvaruje se preko trenja na kontaktu tla i armature. Kod upotrebe mreža, ovisno o geometriji i karakteristikama mreže interakcije između tla i armature ostvarene je preko trenja i preko nosivosti poprečnih rebara. Na slici 2-4. prikazani su razne vrste armaturnih elemenata i mehanizam interakcije koji se javlja između tla i armature.

vrsta armature		mehanizam	
		trenje	otpor poprečnih rebara
glatke metalne trake			
rebraste metalne trake			
geotekstil			
geomreža			

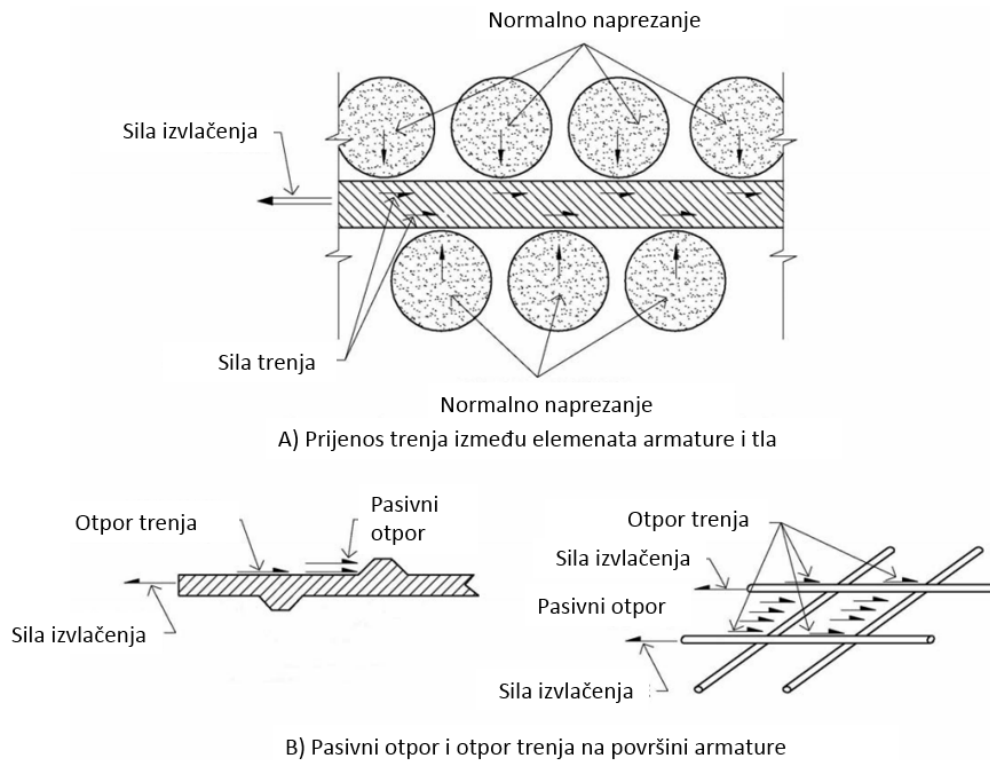
**Slika 2-4** Vrsta armature i mehanizam interakcije armature i tla (Palmeira 1987)

### 2.2.3 Fasadni elementi

Obložni elementi kod konstrukcija od armiranog tla mogu biti: predgotovljene betonske ploče, suho lijevani (modularni) betonski blokovi, zavarene plastične mreže ili geotekstil. Iskustva pokazuju da obložni elementi ne doprinose bitno stabilnosti AT konstrukcije, ali moraju biti dobro povezani s armaturom i napravljeni od materijala koji je dovoljno otporan da traje koliko je i predviđeni vijek trajanja konstrukcije. Uloga obložnih elemenata je da se spriječi erozija tla, te da se postigne bolji estetski izgled konstrukcije.

## 2.3 Osnovni koncept armiranog tla

Uloga armature u konstrukcijama od armiranog tla odgovara ulozi koju ima armatura u betonu, a to je povećanje vlačne čvrstoće. Tlo ima prirodno veliku tlačnu čvrstoću, ali malu vlačnu čvrstoću i zbog toga se u tlo ugrađuje armatura koja preuzima vlačna naprezanja. Poboļšana vlačna svojstva tla rezultat su interakcije između tla i elemenata armature. U armiranom tlu naprezanja između tla i armature mogu se prenositi preko trenja koje se javlja na kontaktu tla i armature (slika 2-5 a) i/ili pasivnim otporom na poprečnim rebrima (slika 2-5 b) pri čemu mehanizam interakcije ovisi o obliku elemenata armature. Trenje se razvija na mjestima gdje postoji relativni pomak i odgovarajuće posmično naprezanje između tla i površine armature. Kada se armirano tlo opterećuje tlačnim naprezanjima, zrna tla oko armature vrše pritisak na nju, a sila trenja između zrna i armature izaziva vlačna naprezanja u armaturi koja zbog toga ne dozvoljavaju zrnima da se razdvoje. Na taj se način zrna i armatura povezuju u kompaktnu cjelinu, a pomaci su smanjeni u smjeru armature, što uzrokuje da se armirano tlo ponaša kao koherentni anizotropni materijal (Schlosser & Bastick 1991). Elementi armature ovisno o trenju trebaju biti poravnati sa smjerom relativnog pomaka tla. Primjeri armature kod koje je trenje glavni mehanizam prijenosa naprezanja iz tla su čelične trake, longitudinalna rebra kod mreža, geotekstili, geosintetičke trake. Pasivni otpor javlja se na poprečnim rebrima u smjeru okomitom na smjer relativnog pomaka armiranog tla. Općenito se smatra da je pasivni otpor primarni mehanizam interakcije kod metalnih mreža i geomreža s relativno krutim poprečnim rebrima. Rebra na čeličnim rebrastim trakama također pružaju određeni pasivni otpor. Doprinos pojedinog mehanizma interakcije (trenje i/ili pasivni otpor) za pojedini element armature ovisit će o: hrapavosti površine, normalnom efektivnom naprezanju, dimenziji otvora mreže, debljini poprečnih rebra i karakteristikama izduljenja armature. Uz karakteristike armature na razvoj interakcije između armature i tla utjecat će i karakteristike tla koje uključuju: veličinu zrna, granulometrijski sastav, oblik zrna, gustoću, vlažnost, koheziju i krutost.

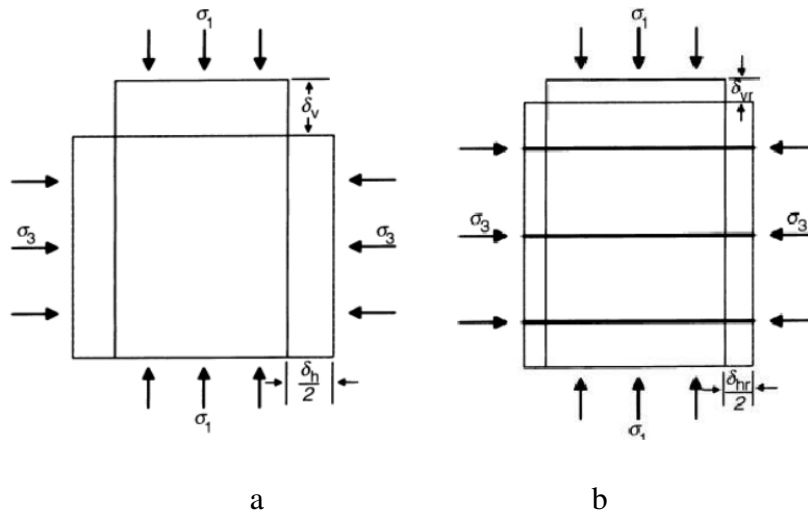


**Slika 2-5** Mehanizam interakcije tla i armature (Berg et al. 2009)

Osnovni mehanizam djelovanja armature u tlu može se objasniti preko dva uzorka suhog pijeska pri čemu je jedan od njih ojačan pomoću horizontalnih slojeva armature, slika 2-6. Ako se uzorak suhog pijeska koji je pridržan vanjskim tlačnim opterećenjem  $\sigma_3$ , opteretiti tlačnim naprezanjem  $\sigma_1$ , pri čemu je  $\sigma_1 > \sigma_3$ , nearmirani uzorak doživjet će aksijalno stlačivanje  $\delta_v$  i bočno širenje  $1/2\delta_h$  (BS 8006 2010). Ako se ovo isto opterećenje primijeni na armirani uzorak smanjit će se aksijalne  $\delta_{vr}$  i bočne deformacije  $1/2 \delta_{hr}$ ,  $\delta_{vr} < \delta_v$  i  $1/2 \delta_{hr} < 1/2 \delta_h$ . Prema BS 8006 (2010) smanjenje u iznosu deformacija direktan je rezultat dodatnog bočnog pritiska  $\Delta\sigma_3$  koji je nastao zbog unutarnje interakcije između tla i armature. Čimbenici koji su uključeni u ovu interakciju definiraju osnovne principe armiranog tla.

Kad se aksijalno opterećenje primijeni na armirano tlo generiraju se aksijalne tlačne deformacije što rezultira bočnim vlačnim deformacijama. Ako armatura ima veću aksijalnu krutost od tla, horizontalno pomicanje tla može se dogoditi samo ako se tlo može pomicati relativno u odnosu na armaturu. Pod uvjetom da je armatura dovoljno gruba, pomicanje tla, relativno u odnosu na armaturu generirat će posmična naprezanja na kontaktu tla i armature. Ova posmična naprezanja uzrokuju vlačna naprezanja u armaturi koja se redistribuiraju natrag

u tlo u obliku unutarnjeg bočnog napreznja  $\Delta\sigma_3$  koji je dodatak bilo kojem vanjskom bočnom napreznju  $\sigma_3$ . Ukupni vanjski učinak ove unutarnje interakcije vidljiv je u smanjenju uzdužnih i bočnih deformacija armiranog uzorka u odnosu na nearmirani.



**Slika 2-6** Utjecaj armature na element tla: a) nearmirano tlo i b) armirano tlo (BS 8006 2010)

Armatura u tlu uz to što smanjuje deformacije tla ujedno i povećava čvrstoću kompozita armiranog tla. Kod nearmiranog tla, koje je pridržano konstantnim napreznjem  $\sigma_3$  dok se  $\sigma_1$  progresivno povećava, tlo će biti podloženo progresivno povećanom posmičnom napreznju  $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ . Kad se posmična napreznja približe posmičnoj čvrstoći doći će do generalnog posmičnog sloma nearmiranog tla. Kod armiranog tla povećanje inkrementa  $\sigma_1$  uzrokuje nastanak inkrementa  $\Delta\sigma_3$ , što dovodi do relativno malih inkremenata u primijenjenim posmičnim napreznjima ( $\frac{1}{2}[\sigma_1 - (\sigma_3 + \Delta\sigma_3)]$ ), te je zbog toga potrebna veća vrijednost  $\sigma_1$  da uzrokuje slom tla. Praktična granica nametnuta čvrstoći armiranog tla je ili vlačnim slomom armature ili u popuštanju veze uzrokovane klizanjem na kontaktu tla i armature.

Kako bi došlo do aktiviranja posmičnog napreznja potrebno je da se armatura može pomicati relativno u odnosu na tlo, pri čemu deformabilnost armature sudjeluje u raspodijeli sila duž armature. S druge strane posmično napreznje ograničeno je koeficijentom interakcije (trenja) koji se javlja na kontaktu armature i tla.

Schlosser i Bastick (1991) navode da su u „Laboratoire Centre des Pont set Chaussées“ 1989 godine provedena brojna ispitivanja u uređaju za troosni posmik kako bi se objasnio mehanizam interakcije armature i tla. Ispitivanja su provedena na uzorcima pijeska armiranim

aluminijskom folijom, a rezultati ispitivanja su pokazali utjecaj brojnih parametara (gustoće pijeska, razmaka elemenata armature, vlačne čvrstoće folije) na svojstva malog uzorka armiranog tla. Ovim ispitivanjima su se prvi put pokazala dva moguća sloma u sloju armiranog tla, a to su slom uslijed pucanja armaturnih elemenata i slom klizanjem po kontaktu tla i armature. Ova ispitivanja su provedena na uzorcima koji su armirani u dva smjera što se razlikuje od konstrukcija od armiranog tla u kojima se kao armaturni elementi koriste trake. Schlosser i Bastick (1991) navode da ova razlika u armaturnim elementima ima mali utjecaj kada se radi o slomu uslijed pucanja armature, ali da je značajna kada se radi o slomu uslijed klizanja na kontaktu armatura – tlo. Autori uz ovo ispitivanje navode da su slična ispitivanja provodili i Yang (1972), Laréal i Bacot (1973), Haussmann (1976) i Romstad i drugi (1978) te da je zaključak svih provedenih ispitivanja bio da armatura značajno poboljšava mehanička svojstva pijeska. Schlosser i Bastick (1991) navode da se ovisno o bočnom naprezanju ( $\sigma_3$ ) mogu razviti dva tipa sloma, slika 2-7. Kod malih bočnih naprezanja ( $\sigma_3$ ) dolazi do sloma klizanjem armature, pri čemu se krivulja čvrstoće, prikazana u glavnim osima, može aproksimirati pravcem koji prolazi kroz os. Čvrstoća armiranog sloja pijeska može se prikazati prividnim kutom trenja  $\varphi_r$  većim od unutarnjeg kuta trenja pijeska,  $\varphi$ . U slučaju velikih bočnih naprezanja ( $\sigma_3$ ) do sloma uzorka dolazi uslijed pucanja armature. Pucanje armature kod većih bočnih naprezanja dovodi do ravne linije popuštanja koja je paralelna s linijom popuštanja za pijesak. Što dokazuje da se armirani pijesak ponaša kao koherentan materijal koji ima isti kut trenja kao pijesak i anizotropnu pseudokoheziju ( $C$ ). Vrijednost  $C$  je proporcionalna broju armaturnih elemenata i njihovoj vlačnoj čvrstoći prema relaciji 2-1 (Schlosser & Bastick 1991):

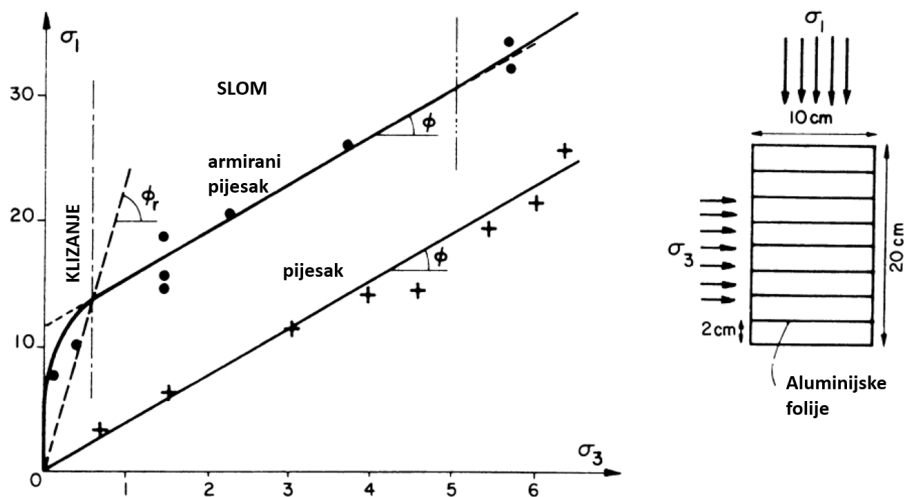
$$C = \sqrt{K_p} \times \frac{RT}{\Delta H}, \quad (2-1)$$

gdje je:

$$K_p = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$$

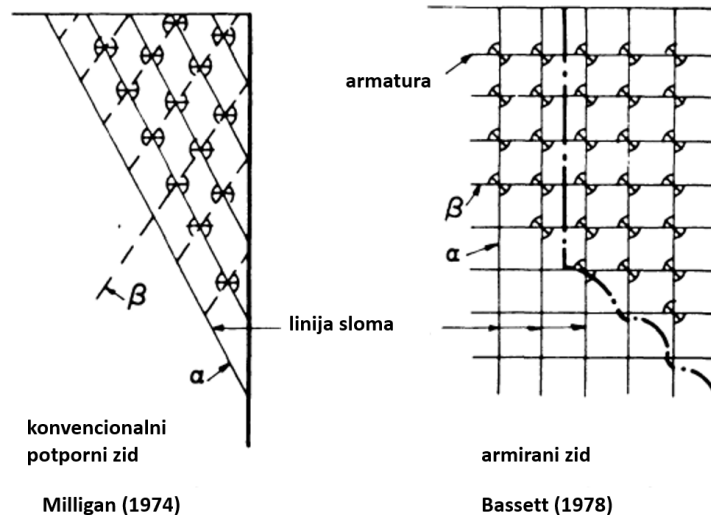
$RT$  – vlačna čvrstoća elemenata armature

$\Delta H$  – vertikalni razmak elemenata armature.



**Slika 2-7** Armirani i nearmirani uzorci u triaksonalnom ispitivanju (Schlosser & Bastick 1991)

Troosnim ispitivanjima na uzorcima pijeska utvrđeno je da maksimalna vlačna sila u armiranom tlu definira dvije zone: aktivnu zonu i zonu otpora. Granica između te dvije zone predstavlja potencijalnu liniju sloma konstrukcije, a njen položaj ovisi o brojnim čimbenicima kao što su geometrijske karakteristike, opterećenje i dinamički efekti. Troosnim ispitivanjima uočeno je da vlačna sila duž elemenata ojačanja nije konstanta već da postiže vršne vrijednosti. Položaj vršnih vrijednosti za različite slojeve armature definira liniju maksimalne vlačne sile. Ispitivanja koja su provedena na zidovima od armiranog tla s vertikalnim licem pokazala su da je linija maksimalne vlačne sile vertikalna u gornjem dijelu konstrukcije, što je različito od klasičnog Coulomb-ovog modela sloma za potporne zidove, slika 2-8. Ova razlika u modelu sloma povezana je s prisutnošću metalnih i neistezljivih elemenata ojačanja, koji zbog spriječenog bočnog pomaka mijenjaju smjer glavnih naprezanja. Schlosser i Bastick (1991) navode da su Bassett i Last (1978) pokazali da prisutnost armature vodi ka rotaciji glavnih smjerova tenzora deformacija. Kada se linija nultog izduženja ( $\alpha$ ) podudara sa smjerom horizontalnih traka, linija ( $\beta$ ) je vertikalna i podudara se s plovom sloma. Schlosser i Bastick (1991) navode da su John i drugi (1983) pokazali da se kod zidova armiranih poliesterskim trakama linija maksimalnog vlačnog naprezanja pomiče prema Coulombovom kriteriju sloma.



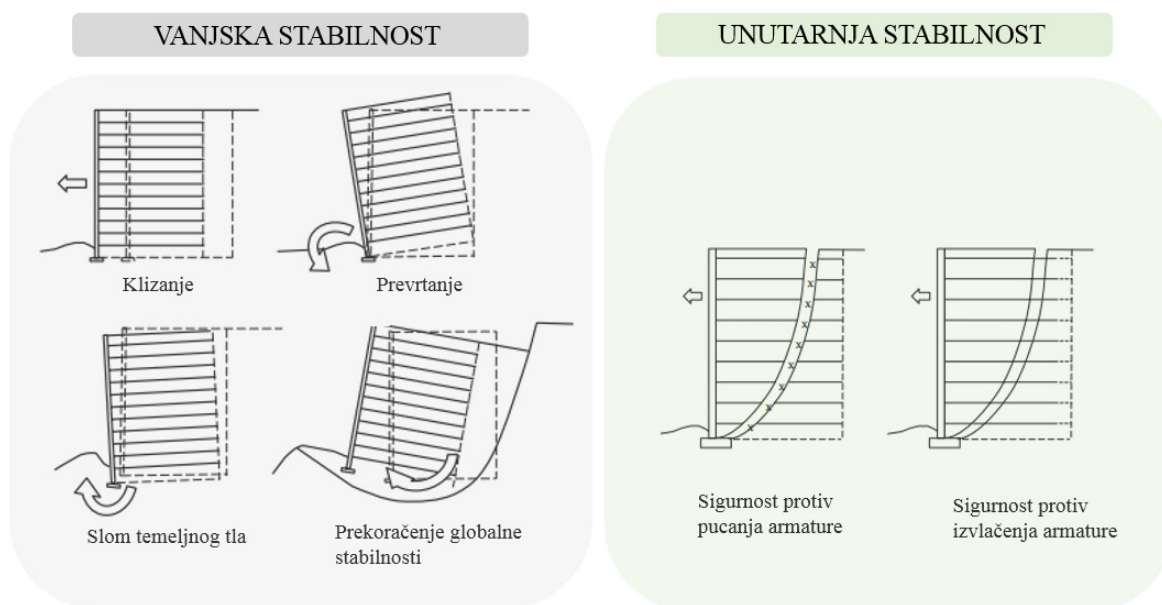
**Slika 2-8** Linija nultog izduženja i potencijalne ravnine sloma za armirano i nearmirano tlo (Schlosser & Bastick 1991)

## 2.4 Osnove proračuna konstrukcija od armiranog tla

Od početnog razvoja konstrukcija od armiranog tla početkom 30-ih godina prošlog stoljeća pa sve do danas provodila su se brojna istraživanja kojima je cilj bio utvrditi prikladne metode i analize za projektiranje konstrukcija od armiranog tla. Kod proračuna AT konstrukcija potrebno je provjeriti stabilnosti i deformacije konstrukcije. Minažek (2010) u svom radu navodi da su se u dosadašnjoj praksi stabilnost i deformacije konstrukcije uvijek promatrale odvojeno, te da je većina istraživanja bila usmjerena na analize stabilnosti konstrukcija, dok se u današnje doba s razvojem naprednijih sustava opažanja na konstrukcijama i razvojem numeričkih metoda značajno istražuje i deformacijsko ponašanje AT konstrukcija. Proračun stabilnosti AT konstrukcija dijeli se na proračun unutarnje i vanjske stabilnosti konstrukcija, dok je kod proračuna deformacija važno odrediti diferencijalna slijeganja i horizontalne pomake konstrukcije.

Kod proračuna stabilnosti zidova od armiranog tla može se promatrati šest neovisnih tipova sloma koji se dijele na vanjske i unutarnje, slika 2-9. Vanjski tipovi sloma su: slom klizanjem, prevrtanjem, slom temeljnog tla i slom prekoračenjem globalne stabilnosti, dok unutarnja stabilnost podrazumijeva sigurnost protiv pucanja i izvlačenja armature. Općenito govoreći, proračun vanjske stabilnosti utjecati će na proračun potrebne duljine armature, dok će proračun

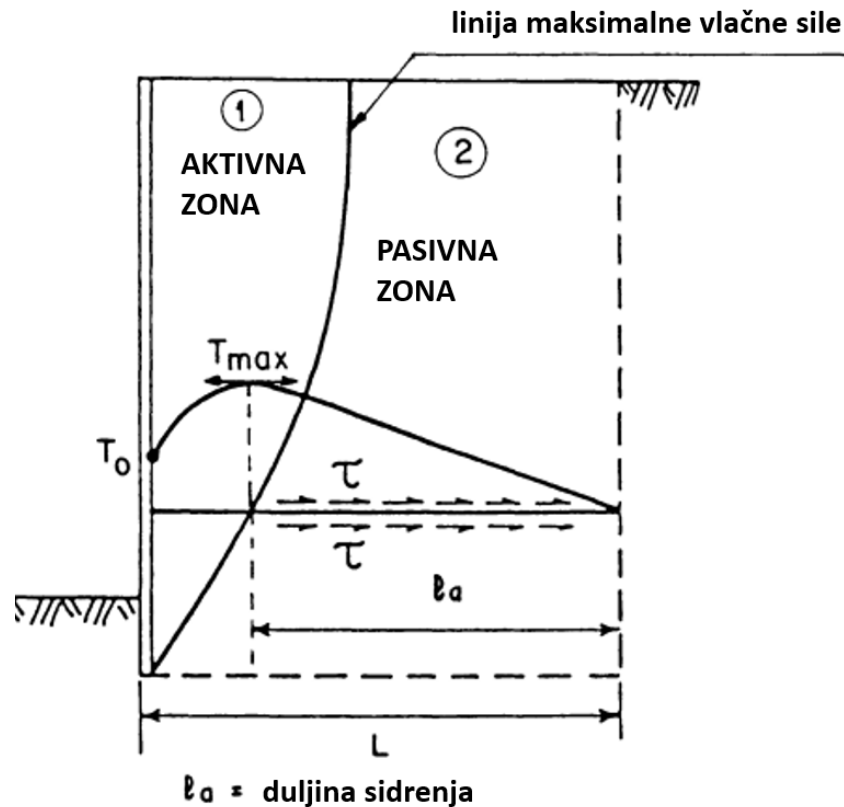
unutarnje stabilnosti utjecat na određivanje potrebnog razmak armaturnih elemenata, Clayton i drugi (2013). Proračun vanjske stabilnosti sličan je proračunima stabilnosti koji se provode za gravitacijske zidove, dok je provjera unutarnje stabilnosti jedinstvena za ovaj tip konstrukcija i predmet je istraživanja ovog rada.



**Slika 2-9** Tipovi vanjskog sloma konstrukcije od armiranog tla (Clayton et al. 2013)

Unutarnja stabilnost AT konstrukcije ovisi o vrsti armaturnih elemenata, te njihovom broju i rasporedu. Kako bi se napravio najbolji odabir potrebno je poznavati raspodjelu opterećenja duž elemenata armature, te mehanizam interakcije armature i tla. Mjerenja koja su provedena na stvarnim konstrukcijama, modelima i numeričkim simulacijama pokazala su da se maksimalno vlačno naprezanje u elementu armature postiže na određenoj udaljenosti od lica zida. Linija koja se dobije spajanjem točaka maksimalnog vlačnog naprezanja zove se linija maksimalnog vlaka, slika 2-10. Ova linija dijeli armirano tlo u dvije zone aktivnu i pasivnu zonu (NF P 94-220). Bez armaturnih elemenata aktivna zona je nestabilna i teži se pomicati prema van i dolje u odnosu na pasivnu zonu. Međutim u konstrukcijama od AT pomaci su spriječeni posmičnim silama koje se javljaju između elemenata armature i tla u zoni pasivnog otpora.





**Slika 2-10** Linija maksimalne vlačne sile i aktivna i pasivna zona kod ojačanog tla (Schlosser & Bastick 1991)

Mehanizam djelovanja armature u tlu ovisi o svojstvima armature. Kod fleksibilne armature stabilnost konstrukcije postiže se prijenosom destabilizirajućih sila iz aktivne zone u zonu pasivnog otpora, pri čemu dolazi do apsorpiranja ili disipiranja čistih vlačnih naprezanja. Armatura treba imati dovoljnu aksijalnu krutost i hrapavost da bi se omogućio taj prijenos. Kako bi se povećala vlačna nosivost fleksibilne armature ona se ugrađuje horizontalno u zidove, nasipe i sl. i to tako da se podudara s glavnim osima vlačnih deformacija unutar neojačanog tla (BS 8006-1 2010). O vlačnoj čvrstoći armature i interakciji koja se javlja između tla i armature ovisi unutarnja stabilnost AT konstrukcija, a koja podrazumijeva sigurnost protiv pucanja i sigurnost protiv izvlačenja armature iz tla.

Proračun sigurnosti protiv pucanja armature za zidove od armiranog tla podrazumijeva proračun maksimalne vlačne sile za svaki sloj ugrađenih armaturnih elemenata. U proračunu se u obzir uzima težina tla, dodatno opterećenje na vrhu zida i povećanje vertikalnog opterećenja u blizini lica zida uzrokovano horizontalnim tlakom od tla. Vlačna sila u armaturnim

elementima kontinuirano varira duž elementa armature, a njena promjena proporcionalna je posmičnom naprezanju koje se računa prema sljedećoj relaciji:

$$\tau = \frac{1}{2b} \frac{dT}{dl} \quad (2-2)$$

gdje je:

$\tau$  – posmično naprezanje na kontaktu armature i tla

$T$  – vlačna sila u armaturi

$l$  – položaj duž armature

$b$  – širina elementa armature.

Maksimalna vlačna sila  $T_{max}$  za svaki sloj ojačanja (po metru dužnom) računa se prema relaciji (AASHTO 2002 2010):

$$T_{max} = K_r \sigma_v S_v \quad (2-3)$$

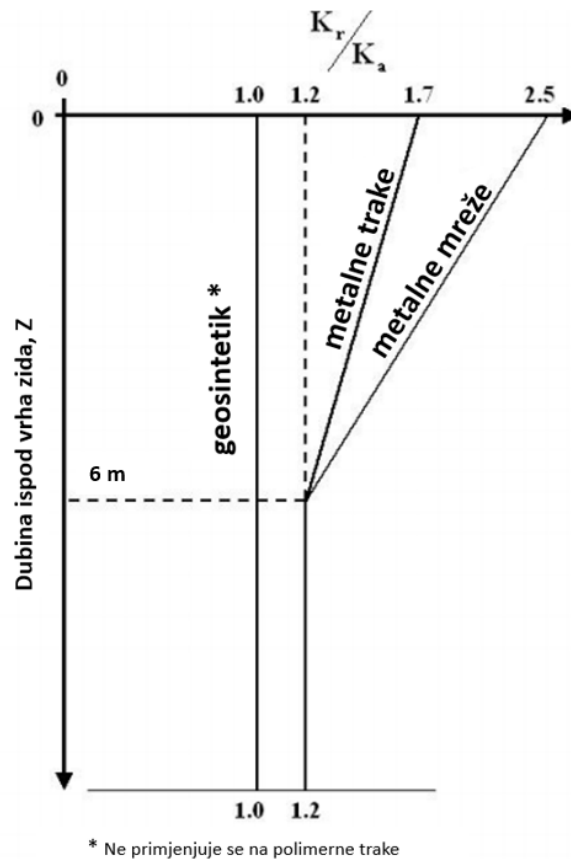
gdje je:

$\sigma_v$  – vertikalno naprezanje

$K_r$  – koeficijent bočnog tlaka

$S_v$  – vertikalni razmak slojeva armature.

Koeficijent bočnog tlaka,  $K_r$  se u zidovima od armiranog tla smanjuje od vrha zida prema dnu. Na vrhu zida se uzima da je  $K$  jednak  $K_o$ , a zatim se linearno smanjuje s dubinom do 6 m, gdje je jednak  $K_a$ , slika 2-11.



**Slika 2-11** Promjena koeficijenta bočnog naprezanja ( $K_r/K_a$ ) s dubinom kod AT zidova (FHWA-NHI-10-024 2009)

Kad se odredi maksimalna vlačna sila po sloju, minimalni broj elemenata armature ( $n$ ) po metru dužnom, računa se prema relaciji (2-4) (Schlosser i Bastick 1991):

$$T_{max} = \frac{1}{FS_b} nR_T \quad (2-4)$$

gdje je:

$R_T$  – otpornost na vlak za svaku pojedinu traku

$FS_b$  – faktor sigurnosti protiv pucanja za svaku pojedinu traku, a ovisno o konstrukciji i propisima pojedine države može varirati od 1,5 do 1,65 ili više.

Kod provjere proračuna sigurnosti na izvlačenje armature iz tla, standardna praksa je da se sigurnost na izvlačenje armature provjerava za svaki sloj (lokalno) i generalno za cijelu

konstrukciju (Clayton et al. 2013). Kod provjere lokalne sigurnosti za izvlačenje provjerava se otpornost na izvlačenje za svaki pojedini sloj armaturnih elemenata. Maksimalna vlačna sila koja će se razviti na određenoj udaljenosti od lica zida ovisi o visini/dubini sloja za koji se računa, slika 2-10. U točki maksimalne vlačne sile otpornost na izvlačenje po metru dužnom ( $P_p$ ) računa se preko relacije (Clayton et al. 2013)

$$P_p = P_f + P_b \quad (2-5)$$

gdje je:

$P_f$  – otpor koji je generiran trenjem na gornjoj i donjoj površini armaturnih elemenata u smjeru izvlačenja armature

$P_b$  – je otpor generiran poprečnim elementima armature okomitim na smjer izvlačenja armature.

U širem smislu relacija 2-5 može se izraziti:

$$P_p = A_f \sigma'_n \mu_p + A_b \sigma'_b \quad (2-6)$$

gdje je:

$A_f$  – površina armature na kojoj se može razviti trenje

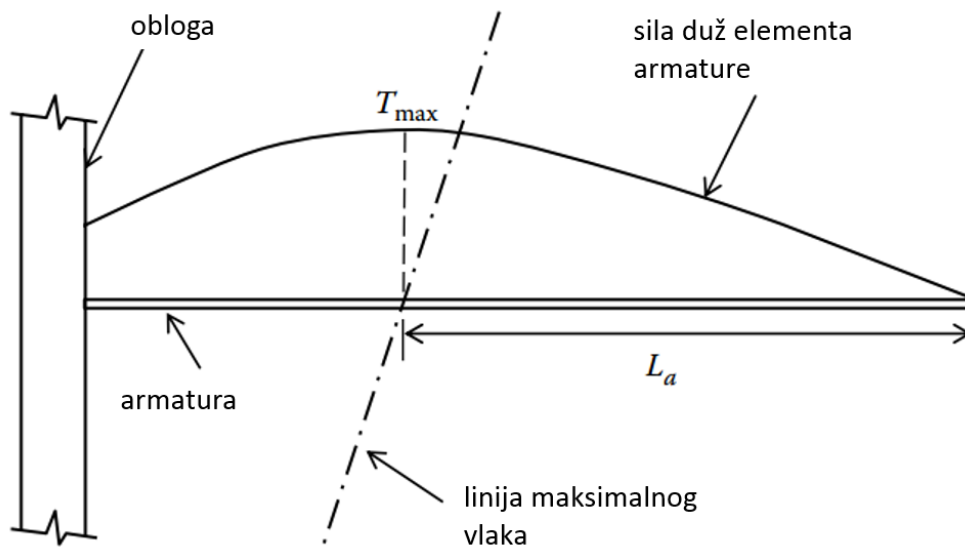
$\sigma'_n$  – efektivno vertikalno naprezanje

$\mu_p$  – koeficijent trenja kod izvlačenja

$A_b$  – površina na kojoj se razvija pasivni otpor

$\sigma'_b$  – efektivno (horizontalno) naprezanje uslijed djelovanja poprečnih rebara.

Površine  $A_f$  i  $A_b$  temelje se na duljini sidrenja  $L_a$ , udaljenost od točke maksimalne vlačne sile do kraja armaturne trake (slika 2-12).



**Slika 2-12** Raspodjela vlačne sile duž elementa ojačanja (Clayton et al. 2013)

Za slučaj kad se kao armaturni elementi koriste trake ili geotekstil javlja se samo trenje na gornjoj i donjoj strani elementa armature pa se za armaturne trake mobilizirano trenje po metru širine ( $r_f$ ) za svaki sloj armaturnih elemenata računa preko izraza (Abdelouhab 2010):

$$r_f = 2NbL_a f_{(z)}^* \sigma_v \quad (2-7)$$

gdje je:

$N$  – broj armaturnih elemenata (traka) za širinu obloge zida (1 m za geotekstile)

$b$  – širina armaturnih elemenat (1 u slučaju geotekstila)

$L_a$  – duljina elemenata armature u pasivnoj zoni (duljina sidrenja)

$\sigma_v$  – prosječno vertikalno naprezanje na dubini na kojoj se računa mobilizirano trenje

$f^*$  - prividni koeficijent interakcije (trenja) za pojedini sloj, opisan u nastavku.

Koeficijent interakcije na kontaktu tla i armature,  $f$  je koeficijent kojim se kvantificira prianjanje između elemenata armature i tla i vrlo je važan parametar u proračunu stabilnosti konstrukcija od armiranog tla.

$$f = \frac{\tau_{max}}{\sigma_v} \quad (2-8)$$

Gdje je  $\sigma_v$  prosječno vertikalno naprezanje koje djeluje na element armature i  $\tau_{max}$  prosječno maksimalno posmično naprezanje uz element armature. Maksimalno posmično naprezanje između armature i tla određuje se ispitivanjem izvlačenja armature iz tla, pri čemu je  $\tau_{max}$  jednako maksimalnoj vlačnoj sili koja je postignuta pri izvlačenju armature po površini uzorka. Maksimalno posmično naprezanje određuje se preko izraza 2-9:

$$\tau_{max} = \frac{T_{max}}{2bl} \quad (2-9)$$

gdje je:

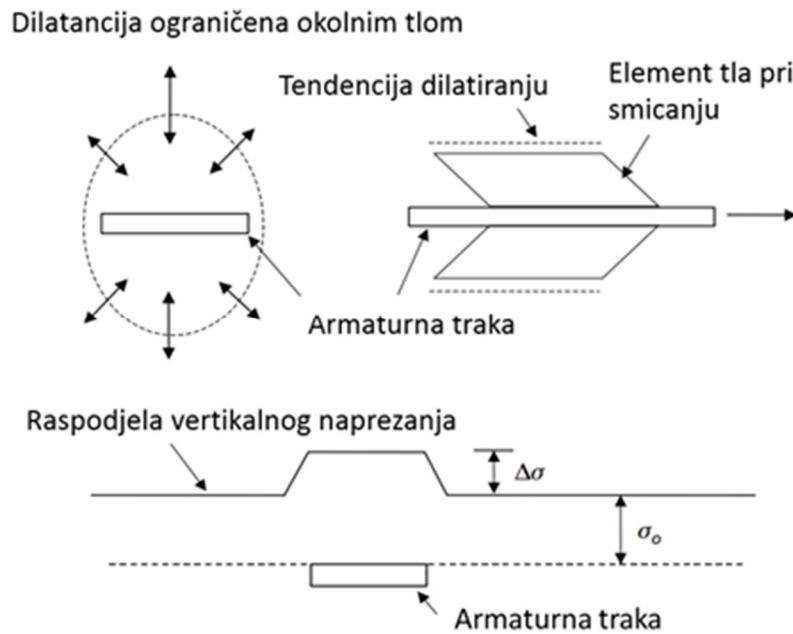
$T_{max}$  – maksimalna vlačna sila koja je mjerena na početku trake u pokusu izvlačenja

$b$  – širina trake

$l$  – duljina trake u pokusu izvlačenja.

U gusto zbijenom krupnozrnatom (dilatativnom) tlu uslijed posmičnog naprezanja ( $\tau$ ) uzrokovanog djelovanjem armature dolazi do tendencije povećanja volumena tla (dilatancije) oko elemenata armature (Schlosser & Elias 1978). Međutim ovaj efekt dilatancije je ograničen djelovanjem okolnog tla i to dovodi do povećanja ( $\Delta\sigma_v$ ) lokalnog vertikalnog naprezanja  $\sigma_{v0}$ , slika 2-13. Stoga vertikalno naprezanje na armaturu  $\sigma_v$  postaje jednako (Abdelouhab 2009):

$$\sigma_v = \sigma_{v0} + \Delta\sigma_v \quad (2-10)$$



**Slika 2-13** Ograničena dilatancija (Lo 1998)

Ovaj efekt naziva se ograničena dilatancija i stvarni koeficijent interakcije  $f$  izražava se preko relacije 2-11.

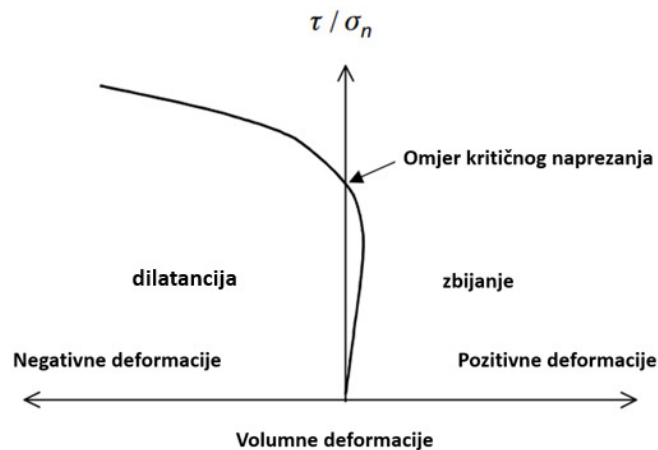
$$f = \frac{\tau_{max}}{\sigma_{v0} + \Delta\sigma_v} \quad (2-11)$$

Trodimenzionalni karakter ove pojave i utjecaj dilatancije je vrlo teško uzeti u obzir u proračunskim modelima pa su Schlosser i Elias (1978) definirali prividni koeficijent interakcije,  $f^*$  koji je jednak:

$$f^* = \frac{\tau_{max}}{\sigma_{v0}} \quad (2-12)$$

Lo (1998) navodi da je prividni koeficijent interakcije ovisan o tri različita uvjeta. Prvi uvjet uzima u obzir nejednoliku mobilizaciju posmičnog napreznja duž elemenata armature i stoga progresivan slom duž elementa armature. Drugi uvjet uključuje povećanje koeficijenta trenja kod malih vertikalnih napreznja uslijed efekta spriječene dilatancije i treći uvjet koji uključuje osnovne karakteristike interakcije (trenje na kontaktu trake i tla). Povećanje faktora trenja na

kontaktu trake i tla uslijed djelovanja spriječene dilatancije značajno je za manja vertikalna opterećenja, ali je neznatno kod većih vertikalnih opterećenja. Ovaj mehanizam interakcije može se primijeniti i za metalne rebraste trake, dok se kod geosintetičkih traka javljaju dva dodatna faktora. Prvi je: Može li se efekt ograničene dilatancije generirati izravnim posmičnim naprezanjem duž kontakta tla i armature? Drugi je faktor povezan s kritičnim odnosom naprezanja prije početka dilatancije. Čak i kod dobro zbijenog materijala, mobilizirani omjer naprezanja mora prijeći kritičnu vrijednost prije početka dilatancije, slika 2-14. To znači da će se dodatno vertikalno naprezanje  $\Delta\sigma$  generirati samo ako omjer naprezanja prijeđe kritičnu vrijednost, što znači da površina trake mora imati dovoljnu hrapavost kako bi se osiguralo da omjer lokalnog posmičnog naprezanja na kontaktu trake i tla  $\tau/\sigma_n$  prijeđe kritičnu vrijednost.



**Slika 2-14** Volumne deformacije u gusto zbijenom pijesku (Lo 1998)

## 2.5 Interakcija tla i elemenata armature

Kod proračuna konstrukcija od armiranog tla interakcija između tla i armature je jedan od ključnih faktora. Kvalitetnija interakcija znači sigurniju i ekonomičniju konstrukciju, a podrazumijeva bolju prionjivost između tla i armature te povećanje krutosti i čvrstoće kompozitnog materijala. Ovisi o mehaničkim svojstvima tla (gustoća, granulometrija, orijentacija čestica) i o svojstvima različitih vrsta armature (geotekstil, geomreže, trake). Način na koji se ostvaruje interakcija tla i armature varira ovisno o vrsti armature koja se koristi, ali određene značajke su bitne, neovisno o vrsti armature (BS 8006-1 2010):



- Kako se opterećenja prenose s tla na armaturu preko relativnog pomaka između tih dviju komponenata, bitno je da armatura ima značajno veću radijalnu krutost u odnosu na tlo.
- Mehanizam prijenosa opterećenja s tla na armaturu ili s armature na tlo ostvaruje se preko veze tlo/armatura. Kod nekoherentnih tala ta veza je ostvarena preko trenja i ovisi o tlu, armaturi i o hrapavosti površine armature. Kod koherentnih tala ta veza ovisi o adheziji između tla i armature.

Kako bi se odredio koeficijent interakcije na kontaktu tla i armature najčešće se provodi jedno od sljedećih ispitivanja: izravni posmik ili otpornost na izvlačenje (eng. Pullout test). Kod uređaja za izravni posmik armatura je fiksirana, a tlo se pomiče u odnosu na armaturu, dok se kod otpornosti na izvlačenje armatura izvlači iz nepomičnog sloja tla. Imajući u vidu relativne pomake tla i ojačanja preporuča se da se prividni koeficijent trenja  $f^*$ , koji se određuje ispitivanjem izvlačenja, koristi kod projektiranja zidova ad armiranog tla jer u slučaju sloma dolazi do izvlačenja armature iz tla (Saran 2010).

Kod ispitivanja izvlačenjem, armatura se ugrađuje u kutiju uređaja između dva sloja tla, te se horizontalno izvlači kroz otvor na kutiji. Izvlačenje armature iz tla najčešće se izvodi konstantnom brzinom izvlačenja, te se pri tome događa relativni pomak armature u odnosu na tlo koje se nalazi u kutiji. Ispitivanje traje dok ne dođe do izvlačenja armature iz tla ili dok ne dođe do puknuća armature uslijed prekoračenja vlačne čvrstoće armature. Za vrijeme izvlačenja armature iz tla mjeri se sila izvlačenja,  $T$ .

Izvlačenje armature iz tla inducira posmični pomak u zoni okolnog tla, a volumen ove zone značajno se povećava kad se na armaturi nalaze rebra. U zbijenom krupnozrnatom tlu ta zona teži dilatanciji. Međutim, zbog činjenice da je volumen tla koji može dilatirati spriječen zbog okolnog tla, to rezultira povećanjem normalnog naprezanja na traku  $\Delta\sigma_v$ . Važnost efekta dilatancije dovodi do potrebe za proučavanjem prividnog koeficijenta trenja,  $f^*$  (ponekad je označen i s  $\mu^*$ ). Definira se kao omjer maksimalnog posmičnog naprezanja  $\tau_{max}$  duž armature i inicijalnog normalnog naprezanja  $\sigma_0$ . Ovaj koeficijent trenja ovisan je o dilatativnom ponašanju materijala tla, a može postići vrijednosti koje su značajno veće od trenja koje se javlja na kontaktu tlo – metal,  $\tan \psi$  ili čak veće i od trenja koje se javlja unutar tla,  $\tan \varphi$  (Schlosser i Bastick 1991).

Za određenu kombinaciju tla – elemenata ojačanja u većini provedenih studija pokazalo se da je vrijednost koeficijenta interakcije  $f^*$  konstantna za dubine 6 m ispod vrha zida (Studelein et al. 2014). Prema Christopher i drugi (1990) raspodjela faktora  $f^*$  može se odrediti na dva načina.

Primjenom ispitivanja otpornosti na izvlačenje s elementima ojačanja i materijalom koji će se koristiti u gradnji stvarne konstrukcije ili proračunom faktora  $f^*$  na vrhu zida upotrebom koeficijenta nejednoličnosti  $C_u$  za materijal koji će se koristiti u izgradnji prema relaciji:

$$f^* = 1,2 + \log C_u \quad (2-13)$$

Vrijednost koeficijenta interakcije  $f^*$  linearno se smanjuje od vrha zida do dubine 6 m gdje je jednaka:

$$f^* = \tan\varphi \quad (2-14)$$

pri čemu je  $f^* \leq 2$  za sve dubine.

Ovaj postupak rezultira bilinearnom ili trilinearnom projektnom krivuljom, ovisno o karakteristikama materijala ispune. Ovaj model kalibriran je upotrebom podataka za različite vrste tala i zbog toga model podcjenjuje  $f^*$  za slučaj kad se u izgradnji koristi dilatativni materijal ispune, kao što je gusto zbijeni šljunak (Stuedlein et al. 2014).

### 2.5.1 Interakcija tla i geosintetičke trake

Metalne trake se vrlo često koriste u konstrukcijama od armiranog tla međutim u kemijski agresivnim sredinama gdje može doći do korozije metalnih traka koriste se sintetičke trake. Zbog istežljivosti sintetičkih traka ponašanje tih traka u tlu je kompleksnije u odnosu na metalne trake. Abdelouhab i drugi (2010) navode da se metode za modeliranje konstrukcija armiranih geosintetičkim (istežljivim) trakama temelje na klasičnom modelu sidrenja (modelu linearne krutosti za trake i elastoplastičnom modelu za interakciju tla i armature) koji je razvijen za metalne (neistežljive) trake. Autori navode da je ekstrapolacija modela koji je razvijen za metalne trake moguća samo za proračun stabilnosti konstrukcije, dok je za proračun deformacije konstrukcije potrebno razviti nove modele kojima bi se bolje opisalo ponašanje tih konstrukcija. Također ističu da su Schlosser i Guilloux <sup>1</sup> (1981) i Segrestin i Bastick (1996) zadržali isti model, dok su Bordeau i drugi<sup>2</sup> (1990), Ling i drugi<sup>3</sup> (1992) modificirali model

<sup>1</sup> Preuzeto Abdelouhab 2010

<sup>2</sup> Preuzeto Abdelouhab 2010

<sup>3</sup> Preuzeto Abdelouhab 2010

krutosti ili poboljšali model trenja Sobhi i Wu (1996), Gurung i drugi (1999), Racana i drugi (2003).

Bourdeau i drugi (1990) razvili su modificirani model koji uzima u obzir  $\varepsilon_0$  na početku, koji odgovara inicijalnoj deformaciji trake prije primjene vlačnog naprezanja. Uzima u obzir produljenje fleksibilnih umetaka.

Ling i drugi (1992) formulirali su modul istezanja geosintetika kao nelinearnu funkciju koja ovisi o primijenjenom naprezanju. Autori su ispitivanja proveli za tri različita uzorka geosintetika pri čemu su promatrali istezanje uzoraka u ispitivanju vlačne čvrstoće za slučaj kada je uzorak u zraku, pritisnut membranom ili pritisnut slojem tla.

Sobhi i Wu (1996) predložili su analitički model u kojem svaki segment ojačanja prolazi kroz tri stanja: stacionarnog stanja, stanja u kojem dolazi do mobilizacije trenja na kontaktu tlo/armatura i stanja kumulativnih deformacija. Na temelju eksperimentalnih i numerički rezultata predložili su jednadžbu kojom se opisuje veza između naprezanja i deformacija za istezljivu armaturu (geotekstil) u pokusu izvlačenja (korišten je pijesak kao materijal ispune) pod određenim uvjetima ispitivanja.

Madhav i drugi (1998) predložili su bilinearni model kojim su opisali ponašanje istezljive armature. Autori su rezultate novog razvijenog modela usporedili s terenskim i laboratorijskim ispitivanjem izvlačenja. Od terenskih ispitivanja koristili su rezultate Konami i drugi (1997) koji su proveli ispitivanja na poliesternim trakama, te rezultate laboratorijskih ispitivanja na uzorcima geotekstila (Sobhi & Wu 1996) i uzorcima najlona (Abramento i Whittle 1995).

Gurung i drugi (1999) izrazili su rezultate odnosa vlačno opterećenje – pomaka duž elemenata istezljivih ojačanja u obliku diferencijalnih jednadžbi. Autori su rezultate modela usporedili s eksperimentalnim rezultatima za poliesterne trake, geotekstil i najlon.

Abdelouhab i drugi (2010) proveli su ispitivanje otpornosti na izvlačenje na dvije vrste traka (metalnim i sintetičkim) za različita vertikalna naprezanja i za materijal ispune pijesak. Uz provedena ispitivanja otpornosti na izvlačenje autori su proveli i modeliranje ispitivanja s tri različita modela. Prvi model je određen prema klasičnom modelu za proračun sidrenja, u drugom modelu poboljšan je model trenja za analizu rezultata i u trećem modelu je uz poboljšan model trenja dodano i realno ponašanje sintetičkog ojačanja. Na temelju provedenih analiza autori su zaključili sljedeće:

- ponašanje metalnih i sintetičkih traka se značajno razlikuje
- mobiliziranje trenja kod metalnih traka je trenutno, neovisno o opterećenju
- ponašanje sintetičkih traka je kompleksnije, vlačna sila i pomak postupno se mobiliziraju od početka do kraja trake.

Lo (1998) navodi da su provedena brojna ispitivanja kojima je cilj bio utvrditi mehanizam interakcije između geotekstila i tla ili geomreža i tla, ali da je ograničen broj ispitivanja proveden s ciljem utvrđivanja mehanizma interakcije između geosintetičke trake i tla.

### 2.5.2 Parametri koji utječu na koeficijent interakcije tla i elemenata armature

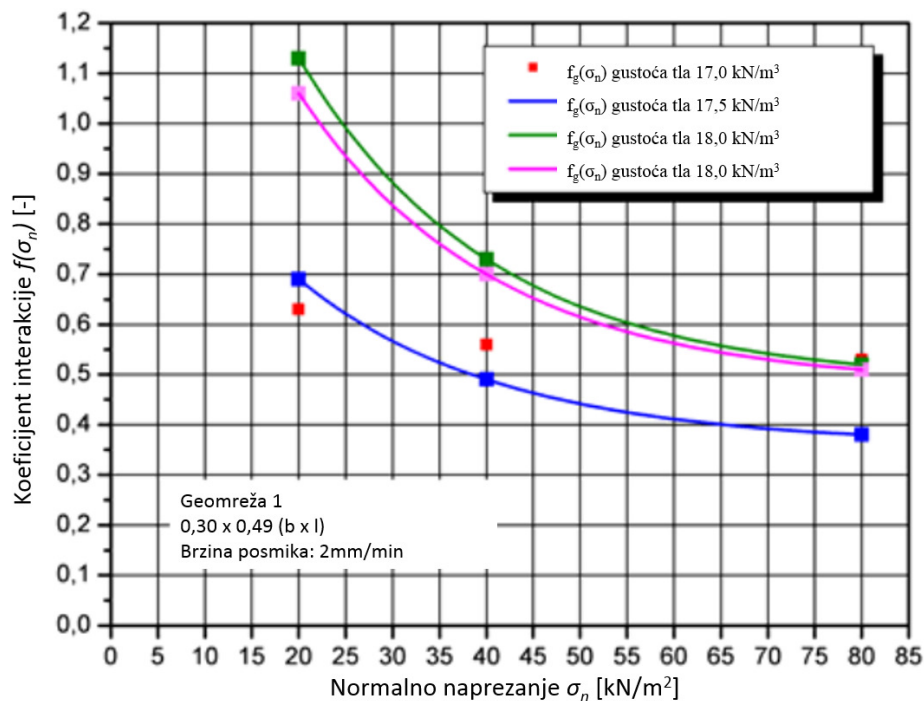
Koeficijent interakcije je kompleksna funkcija velikog broja parametara kao što su: visina tla iznad armature, duljina i širina armaturnog elementa, hrapavost površine armature, dimenzije otvora mreže, debljina poprečnih rebara kod mreža, karakteristike produljenja armature. Uz parametre armature na koeficijent interakcije utječu i karakteristike tla: veličina zrna, granulometrijski sastav, oblik zrna, gustoća, vlažnost, kohezija i krutost. Schlosser i Bastick (1991) izdvajaju pet najznačajnijih parametara koji utječu na koeficijent interakcije. To su:

- gustoća nasipanog materijala (zasipa)
- utjecaj površine armature (glatka, rebrasta, hrapava)
- dodatno vertikalno naprezanje
- vrsta materijala ispune
- vlažnost tla.

#### 2.5.2.1 Utjecaj gustoće tla

Rezultati ispitivanja pokazuju velik utjecaj dilatancije u krupnozrnom materijalu. Bacot i drugi (1978) objasnili su efekt ojačanja tla uz pomoć fotometrijske tehnike: sila izvlačenja djeluje na armaturnu traku i inducira posmično naprezanje u okolnom tlu. Karakteristike površine trake značajno utječu na volumen zone koja dilatira. U zbijenom krupnozrnom tlu u okolini trake posmična zona ima tendenciju dilatiranja, ali ta volumna promjena je spriječena zbog djelovanja okolnog tla. Ovaj efekt rezultira povećanjem normalnog naprezanja na element armature i značajan je samo u gusto zbijenom krupnozrnom tlu. Utjecaj različite gustoće materijala na rezultate ispitivanja otpornosti na izvlačenje prikazan je na slici 2-15.

Utjecaj gustoće tla na koeficijent interakcije između tla (pijeska) i geomreže proučavali su i Meyer i drugi (2003). Autori su proveli ispitivanja za tri različite geomreže kod tri različita vertikalna naprezanja (30,2; 45,3 i 60,4 kN/m<sup>2</sup>) i tri različite gustoće (17, 17,5 i 18 kN/m<sup>3</sup>). Rezultati ispitivanja pokazali su da s porastom gustoće raste i koeficijent interakcije, slika 2.15. Na dijagramu su prikazani koeficijenti interakcije za istu gustoću 18 kN/m<sup>3</sup>, ali za dva različita proračuna koeficijenta interakcije. Zelena linija za koeficijent interakcije određen za slučaj bez kohezije i roza linija za slučaj s kohezijom.



**Slika 2-15** Utjecaj gustoće materijala na rezultate ispitivanja otpornosti na izvlačenje (Meyer et al. 2003)

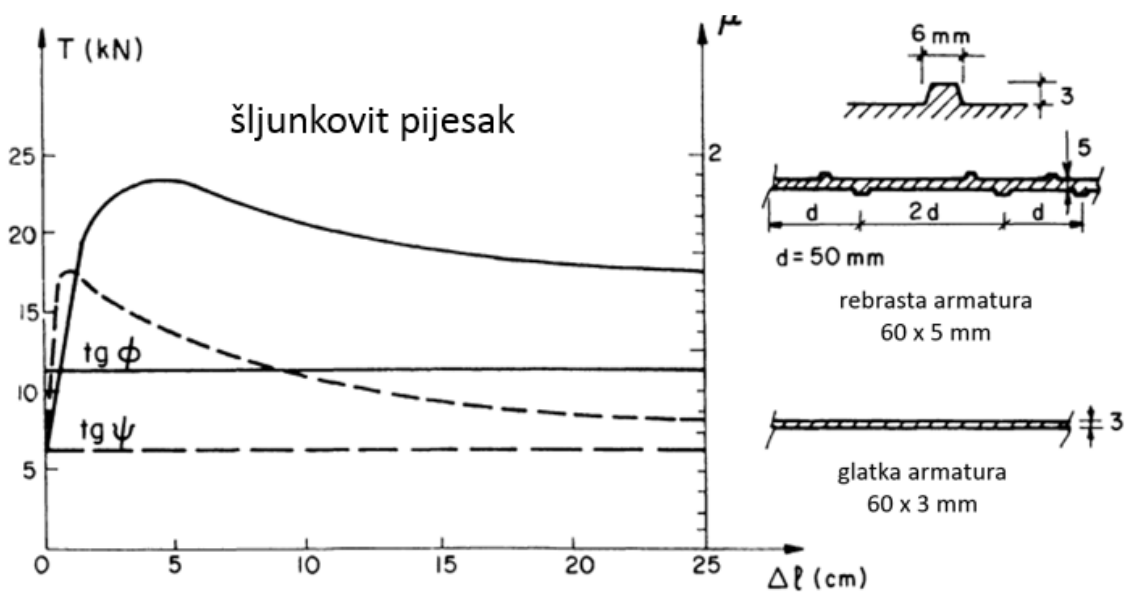
### 2.5.2.2 Utjecaj površine armature

Na temelju rezultata pokusa otpornosti na izvlačenje Schlosser i dr.<sup>4</sup> (1979) zaključili su da je koeficijent trenja puno veći (25%) kod hrapave armature, ali uz veće deformacije. Kod glatkih armatura vršna čvrstoća je jako naglašena i pada na rezidualnu vrijednost za 50% manju od vršne, dok je kod hrapavih armatura rezidualna vrijednost 80% vršne čvrstoće, slika 2-16. Ova

<sup>4</sup> Preuzeto Kvasnička 1979

razlika objašnjava se mobilizacijom mnogo većeg volumena materijala kod hrapavih armatura, a time i većeg efekta promjene volumena pri smicanju i povećanju  $\sigma_v$ .

McKittrick<sup>5</sup> (1978) je u svojim ispitivanjima pokazao da se kod korištenja glatke armature postiže vršna vrijednost posmičnog otpora izvlačenju koja kod većih vrijednosti deformacija pada na rezidualnu vrijednost i iznosi 50% ili manje vršne vrijednosti. McKittrick (1978) je zaključio da će u slučaju glatkih traka na ponašanje konstrukcije utjecati trenje na kontaktu trake i tla, dok će kod rebrastih ili hrapavih traka na ponašanje najviše utjecati kontakt tlo – tlo.



**Slika 2-16** Ispitivanje otpornosti na izvlačenje glatkih (isprekidana linija) i rebrastih traka (puna linija) (Schlosser & Bastick 1991)

### 2.5.2.3 Dodatno vertikalno naprezanje

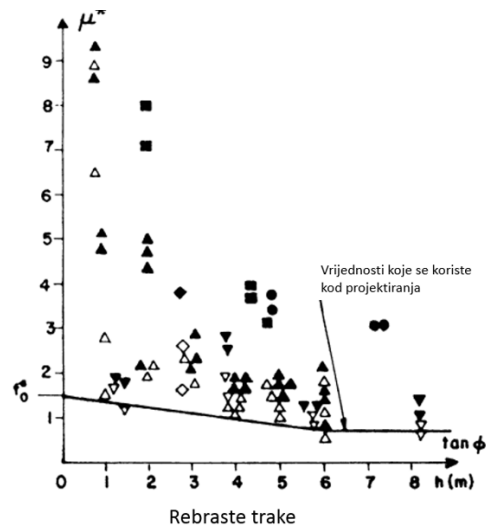
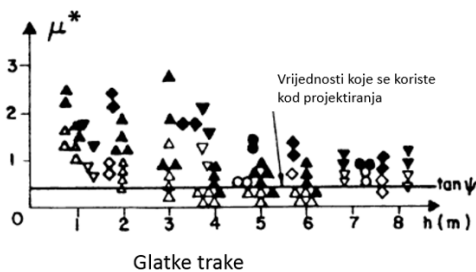
Za određenu gustoću, tlo će biti manje dilatativno ako je normalno naprezanje veće. To objašnjava činjenicu da se povoljan koeficijent dilatancije umanjuje s povećanjem dodatnog naprezanja. Schlosser i Bastick (1991) u svom radu prikazali su utjecaj vertikalnog opterećenja na koeficijent interakcije za glatke i rebraste trake, slika 2-17. U svim slučajevima koeficijent interakcije pada s povećanjem vertikalnog naprezanja na element armature, što je izraženije za

<sup>5</sup> Preuzeto Saran 2010

rebraste armature. Za veće dubine koeficijent interakcije određen ispitivanjem otpornosti na izvlačenje približava se vrijednostima koje su dobivene izravnim posmikom. Koeficijent interakcije se za male visine kreće u rasponu od 1 do 2,5 za glatke trake i od 1,5 do 10 za rebraste trake (Kvasnička 1979).

$f^*$ vršno	●	▲	▼	◆	■
$f^*$ rezid.	○	△	▽	◇	□
Tlo	Šljunak	Šljunak	Sitni pijesak	Šljunak	Pjeskovit šljunak
$\psi$ (°)	30	27,5	24		22
$\phi$ (°)	47	46	35		37

Klasična vrijednost za  $\phi = 36^\circ$   
Klasična vrijednost za  $\psi = 22^\circ$



**Slika 2-17** Promjena koeficijenta trenja ovisno o dodatnom opterećenju (Schlosser i Bastick 1991)

#### 2.5.2.4 Vrsta materijala ispune

Schlosser i Bastick (1991) u svom radu navode da je na temelju ispitivanja koja su provedena u troosnom ispitivanju, u Laboratoire Central des Pontes et Chaussées u Parizu (1970 – 1974), na uzorcima pijeska armiranim s postavljenom horizontalnom armaturom od aluminijskih folija zaključeno da najveći utjecaj na koeficijent interakcije ima sadržaj sitnih čestica u krupnozrnatom materijalu. Kvasnička (1979) navodi da su provedena ispitivanja na zaglinjenom šljunku s 30% čestica manjih od  $80 \mu\text{m}$ , koje su bile djelomično zasićene vodom. Koeficijent trenja bio je kod hrapave i glatke armature znatno ispod uobičajenih vrijednosti, a rezidualne vrijednosti težile su nuli. To se objašnjava time što vršnu čvrstoću uzrokuje isključivo preraspodjela zrna, koja je vrlo osjetljiva na prisutnost finih čestica. Rezidualna čvrstoća ovisi o trenju između čestica, a u zaglinjenom šljunku, čestice su obavijene glinom, gotovo zasićene, u kojoj je trenje vrlo malo.

### 2.5.2.5 *Vlažnost tla*

Vlažnost tla ima mali utjecaj na trenje kada se koristi krupnozrnati materijal, ali s povećanjem sadržaja sitnozrnatog materijala voda ima značajan utjecaj na koeficijent trenja. Schlosser i Bastick (1991) u svom radu navode da je maksimalna sila izvlačenja u saturiranom tlu za približno trećinu manja u odnosu na tlo s optimalnom vlagom.

### 2.5.2.6 *Utjecaj krutosti armature*

Ako je armatura kruta, uzdužna sila je raspoređena linearno duž armature te se dobiva stvarni koeficijent interakcije. Kod deformabilne armature, najveća vrijednost  $T$  ( $T$  – uzdužna sila u armaturi) je na početku i koja zatim naglo pada na nulu. U tom slučaju koeficijent interakcije je raspodijeljen nejednoliko i dobiva se samo srednja vrijednost (Kvasnička 1979). Mulabdić i dr. (2006) analizirali su razvoj deformacija i sile po duljini mreže Tensar SS 30 u šljunku veličine zrna 4-8 mm za dvije različite duljine uzoraka kod naprezanja 8 kPa i 30 kPa. Autori su zaključili sljedeće:

- deformacija u mreži drastično opada s udaljenošću od početka mreže (hvatište sile) za obje mreže
- kod veće duljine mreže i kod većeg vertikalnog naprezanja dolazi do pucanja mreže u vlaku
- deformacija po duljini mreže brže opada kod većeg vertikalnog naprezanja
- sila u mreži drastično opada s udaljenošću od početka mreže za obje mreže
- porast vertikalnog naprezanja smanjuje iznos sile po duljini mreže, što dalje od hvatišta sile
- sila u prvom dijelu mreže jednaka je vlačnoj čvrstoći mreže (mreža se ne izvlači nego se razvlači i puca)
- kod dulje mreže vrijednost sile u drugoj polovici je ispod 10% maksimalne sile i na kraju pada na 0%.

Minažek (2010) je u svom radu ova istraživanja dalje proširio za ispitivanja pri većim vertikalnim naprezanjima 40 i 60 kPa, te za šljunak 8-16 mm. Autor je potvrdio rezultate prijašnjih istraživanja (Mulabdić et al. 2006). Abdelouhab i dr. (2010) proveli su ispitivanja izvlačenja poliesterskih i metalnih traka za ispunu od pijeska. Autori su zaključili da je ponašanje metalnih i geosintetičkih traka različito. Kod metalnih traka trenje se trenutno



mobilizira duž trake za bilo koje vertikalno naprezanje. Kod poliesterskih traka je to ponašanje kompleksnije. Vlačno naprezanje i pomak se postepeno mobiliziraju od početka trake (hvatišta sile izvlačenja) do kraja trake.

### 3 PREGLED PROBLEMATIKE DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Posljednjih dvadesetak godina provedena su brojna eksperimentalna (Yoo & Kim 2008, Won & Kim 2007) i teoretska istraživanja (Leshchinsky 2009, Ling et al. 2005, Koerner & Song 2001, Yoo & Jung 2006) s ciljem proučavanja konstrukcija od armiranog tla. Većina tih istraživanja bila je usmjerena na globalnu stabilnost ovih konstrukcija.

Kako bi se odredilo stvarno ponašanje konstrukcija ojačanih istezljivim armaturnim elementima potrebno je imati informacije o (Abdelouhab et al. 2010):

- Mehaničkim svojstvima materijala koji se koristi kao armatura: ispitivanje vlačne čvrstoće sintetičkih traka daje podatke o materijalu.
- Parametrima čvrstoće tla koji se određuju klasičnim laboratorijskim ispitivanjima.
- Interakciji između elemenata armature i tla: vlačna naprezanja koja nastaju uslijed izvlačenja armature generiraju posmična naprezanja na kontaktu armature i tla. Deformacija tla i armature ima važan utjecaj na raspodjelu posmičnih naprezanja duž elemenata ojačanja. Stoga se trenje na kontaktu ne može smatrati lokalnom pojavom (Shlosser i Guillox 1981<sup>6</sup>). Ispitivanje otpornosti na izvlačenje omogućava simuliranje vlačnog naprezanja primijenjenog na ojačanje i definiranje interakcije koja se razvija između tla i armature (Sierra et al. 2009, Khedkar & Mandal 2009, Su et al. 2008, Palmeira 2009). Ispitivanjem otpornosti na izvlačenje mogu se proučavati sljedeći parametri: posmično naprezanje i trenje na kontaktu tlo/armatura, dilatancija tla i deformacija armature. Ovi parametri uzimaju se u obzir u nekoliko metoda za proračun zidova od armiranog tla (Abdelouhab et al. 2009).

---

<sup>6</sup> Citirano u Abdelouhab et al. (2010)

### 3.1 Dosadašnja ispitivanja parametra čvrstoće lomljenog kamena pokusom izravnog posmika

Lomljeni kamen ima široku primjenu u geotehničkom inženjerstvu, te je zbog toga neophodno proučavati ponašanje ovog materijala i određivanje parametara čvrstoće. Međutim, zbog poteškoća koje se javljaju prilikom provođenja pokusa izravnog posmika, ograničen je broj provedenih ispitivanja.

Ispitivanje parametra čvrstoće izravnim posmikom standardizirano je metodama ASTM D3080/D3080M-11 i BS 1377-7:1990. Međutim te metode su ograničene po pitanju maksimalnog promjera zrna u odnosu na dimenzije uređaja u kojem se provodi ispitivanje. Norma ASTM D3080/D3080M-11 propisuje da širina kutije mora biti minimalno deset puta veća od maksimalnog promjera zrna, a visina kutije mora biti šest puta veća od maksimalnog promjera zrna. Kako se u praksi standardno koriste mali uređaji za izravni posmik čiji su promjer ili širina oko 60 mm a visina oko 20 mm, ispitivanja su ograničena na uzorke pijeska i sitnog šljunka. Za uzorke koji imaju veći promjer maksimalnog zrna kao što je šljunak i drobljeni kamen potrebno je ispitivanja provoditi u velikom uređaju za izravni posmik. Ova ispitivanja su vrlo zahtjevna i skupa te se ispitivanja na materijalima s velikim promjerom zrna vrlo rijetko provode, umjesto toga, ispitivanja se provode na uzorcima manjeg promjera tako na način da se granulometrijska krivulja materijala prilagodi upotrebom metode paralelne gradacije ili metodom skalpiranja i zamjene materijala (Kim & Ha 2014). Metoda skalpiranja uzorka podrazumijeva da se iz uzorka metodom sijanja uklone zrna većeg promjera, dok se kod metode paralelne gradacije skalira materijal na željenu granulaciju tako da je granulometrijska krivulja skaliranog uzorka paralelna s originalnom krivuljom. Usprkos čestoj primjeni krupnozrnatih materijala (šljunka i drobljenog kamena), njihovi parametri čvrstoće nisu sistematično određeni, već se umjesto stvarnih izmjerenih podataka vrlo često koristi kut trenja od 34° što dovodi do konzervativnog projektiranja konstrukcija (Nicks 2013).

### 3.1.1 Izravni posmik

Uređaj za izravni posmik, u kojem je uzorak između dva okvira koji se mogu međusobno tangencijalno pomicati prvi je osmislio Coulomb 1777. godine, a dalje ga je razvio Terzaghi (Nonveiller 1979). Skica uređaja prikazana je na slici 3-1. Uzorak se u kutiji najprije optereti vertikalnom silom koja izaziva željeno normalno naprezanje. Zatim se jedan okvir vodoravno pomiče i tako se u uzorku postepeno razvijaju sve veća naprezanja na smicanje sve dok se u ravnini između okvira ne izazove slom uzorka. Za vrijeme pokusa mjeri se iznos posmične sile kao funkcije pomaka, a uz to se uobičajeno mjere i promjene visine uzorka. Rezultati ispitivanja interpretiraju se tako da se odredi normalno i posmično naprezanje koje je djelovalo na ravninu u uzorku između dva okvira uređaja u početku stanja sloma. Na taj način se definira jedna točka u Mohr-Coulombovom ( $\sigma - \tau$ ) dijagramu. Potrebna su najmanje dva ispitivanja kako bi se odredila anvelopa sloma i parametri čvrstoće prema Coulombovoj jednadžbi (3-1):

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (3-1)$$

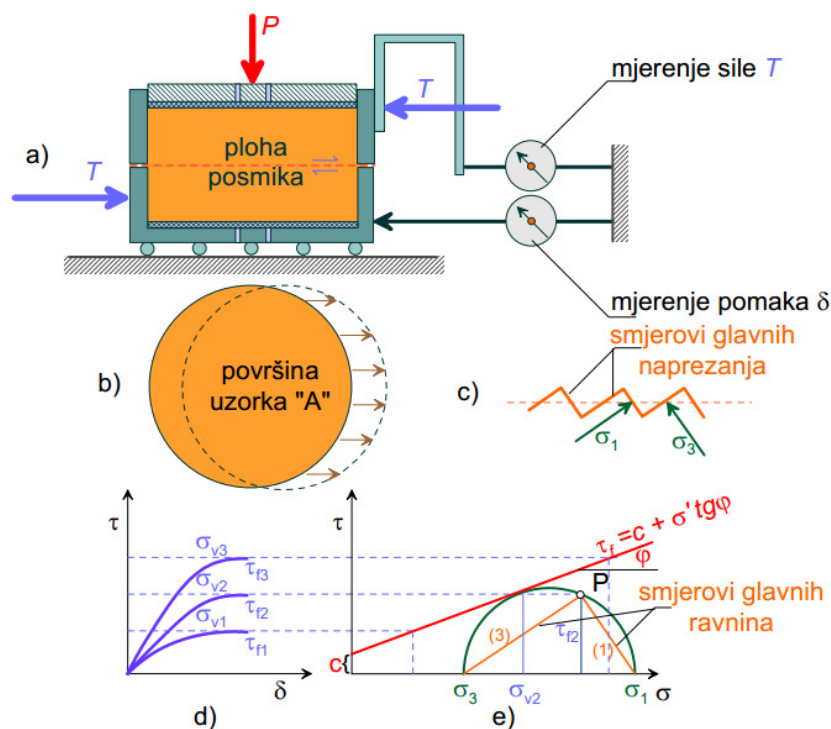
gdje je:

$\tau_f$  – posmično naprezanje na plohi sloma

$\sigma$  – normalno naprezanje na plohi sloma

$c$  – kohezija, odsječak na ordinati

$\varphi$  – kut trenja materijala.



**Slika 3-1** Presjek uređaja za izravni posmik i prikaz rezultata ispitivanja (Kvasnička i Domitrović 2007)

Ploha na kojoj nastaje slom u uzorku rijetko se poklapa s ravninama između gornjeg i donjeg okvira kutije uređaja. Obično je ta ravnina valovita, a parametri čvrstoće koji su određeni na temelju ispitivanja u uređaju za izravni posmik odgovaraju nekim srednjim vrijednostima stvarnog stanja naprezanja na plohi sloma (Nonveiller 1983).

Ovisno o načinu opterećenja uzorka u uređaju, razlikuju se uređaji s kontroliranim prirastom sile i uređaji s kontroliranim prirastom deformacije. U suvremenim izvedbama uređaja češće se koristi opterećenje uzorka kontroliranim prirastom deformacije gdje se može regulirati brzina smicanja od veoma male do one od više milimetara u minuti. Uzorci koji se ispituju u uređaju za izravni posmik moraju biti neporemećeni ili zbijeni u laboratoriju po Proctorovom postupku za materijale koji će se ugrađivati na terenu. Ovakav način ugradnje moguć je za koherentna tla ili tla u kojima je veći udio sitnozrnatog materijala, dok se problem ugradnje uzorka za ispitivanje javlja kod ugradnje krupnozrnatog tla, a posebice nasutog kamenog materijala. Ispitivanja čvrstoće i deformabilnosti nasutog kamenog materijala s krupnim komadima složeno je i vrlo skupo te se rijetko provodi. Ovakva ispitivanja su se najčešće provodila za potrebe izgradnje visokih brana. Nonveiller (1983) navodi da se u našoj praksi kameni materijal

za nasipanje brana ispituje u uređajima za izravni posmik dimenzija presjeka od 1,0 do 1,5 m<sup>2</sup>, a uzorci su debljine oko 80 cm. U tim uređajima je naprezanje u uzorku vrlo nehomogeno, a ploha sloma je valovita i deformacije nisu jednolične. Zbog tih nedovoljno određenih rubnih uvjeta interpretacija rezultata nije pouzdana.

### 3.1.2 Otpornost na smicanje nekoherentnih tala

Otpornost na smicanje sastoji se od dva dijela: onog koji je posljedica trenja u međusobnom kretanju zrna pri smicanju i onog kojim se svladava uklještenje među zrnima koje se suprotstavlja njihovom slobodnom pomicanju i premještanju (Nonveiller 1979). Otpor uklještenja ovisi o obliku i gustoći rasporeda zrna, dakle o porozitetu  $n$ , odnosno o koeficijentu pora  $e$  i o naprezanju. Kod većeg naprezanja pojedina zrna se u sve većem broju lome čime se povećava međusobna pokretljivost i smanjuje utjecaj uklještenja među zrnima.

Douglas (2002) u svom radu navodi da je Marshal (1973) na temelju istraživanja parametara čvrstoće lomljenog kamena pokazao da se čvrstoća mijenja u ovisnosti o:

- normalnom efektivnom naprezanju
- relativnoj gustoći materijala
- granulometrijskom sastav (hrapavosti površine čestica, čvrstoći čestica povezanoj s veličinom čestica, koeficijentom nejednoličnosti i oblikom čestica).

Kim i Ha (2014) navode da istraživanje i evaluacija parametra čvrstoće za krupnozrnate materijale s velikim promjerom čestica (šljunak i veće) još u potpunosti nije razvijeno, te da su potrebna daljnja istraživanja.

### 3.1.2.1 Utjecaj normalnog naprezanja na parametre čvrstoće krupnozrnatog tla

Sredinom 50-ih i 60-ih godina prošlog stoljeća bilo je povećano zanimanje za ispitivanje ponašanja krupnozrnatih materijala kod velikih naprezanja (Studelein et al. 2014). Rezultati provedenih ispitivanja pokazali su da je kod manjih vertikalnih naprezanja Mohr-Coulombova anvelopa čvrstoće strmija, dok se s povećanjem inkrementa naprezanja vršni kut trenja smanjuje na relativno konstantnu vrijednost. Douglas (2002) navodi da su brojni autori pokazali da je anvelopa čvrstoće nelinearna kod manjih naprezanja. Autor navodi da su tu tvrdnju istraživali u uređaju za troosni posmik: Leslie (1963), Marachi i drugi (1969), Leps (1970), Bertacchi i Bellotti (1970), Penman i drugi (1982) i Indraratna i drugi (1993), dok su istraživanje utjecaja vertikalnog opterećenja na parametre čvrstoće u uređaju za izravni posmik istraživali Dobry i Rozsypal (1974) i Anagnosti i Popovic (1982).

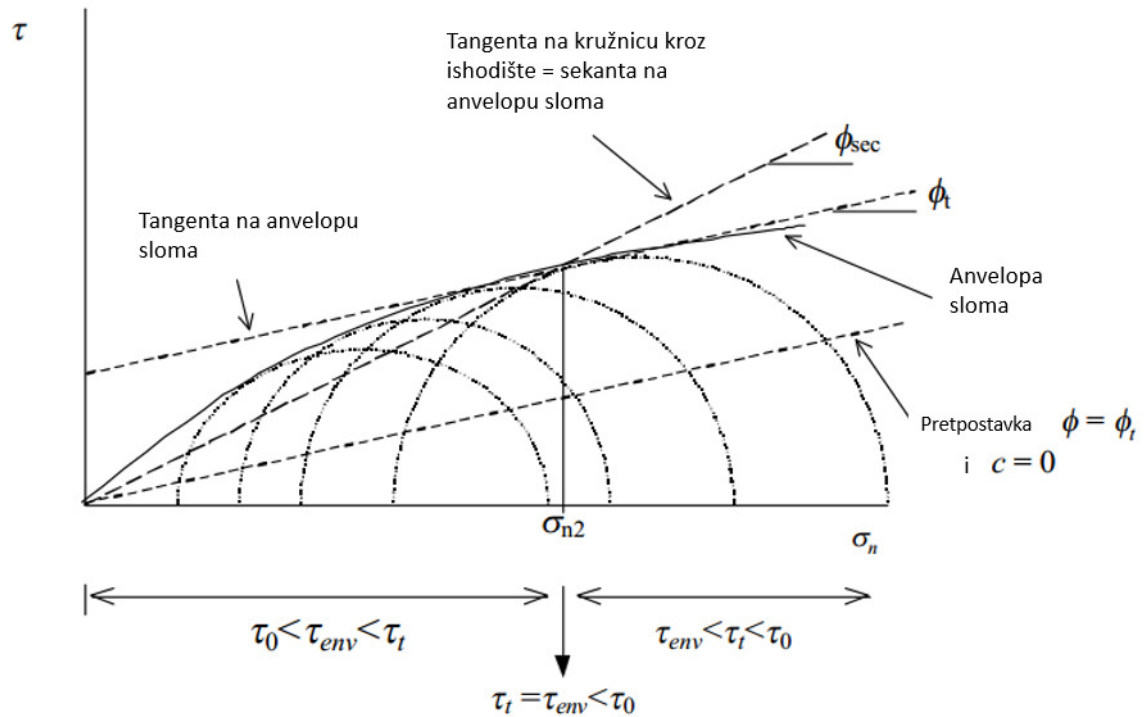
Smanjenje kuta trenja kod porasta vertikalnog naprezanja pripisuje se smanjivanju dilatancije, s porastom opterećenja čestice teže reorijentaciji i smanjenju poroziteta a ne dilatanciji. Kod ekstremno velikih naprezanja, naprezanja koja se javljaju u česticama prelaze njihovu čvrstoću i dolazi do sloma čestica i popunjavanja pora. Slom čestica rezultira povećanjem gustoće i promjenom površinske hrapavosti i uglatosti čestica što ima složen utjecaj na anvelopu sloma. S obzirom na to da je za slom čestica tla potrebno vrlo veliko vertikalno opterećenje, koje se ne javlja ni kod najviših zidova, ovaj efekt se ne proučava za potrebe projektiranja konstrukcija od armiranog tla. Na slici 3-2. prikazan je utjecaj dilatancije, kuta trenja, sloma i reorijentacije čestica na posmičnu čvrstoću pijeska (Lee i Seed<sup>7</sup> 1967). Rowe (1962) je proveo ispitivanja izravnog posmika za čestice kvarca pri čemu je donji dio kutije bio zamijenjen kvarcnim blokom. Ovo ispitivanje omogućilo je da Rowe (1962) odredi kut trenja između čestica kvarca,  $\varphi_{\mu}$ . Autor je na temelju tog ispitivanja zaključio da se kut trenja sastoji od tri komponente: trenja na kontaktu čestica, dilatancije i komponente povezane s radom potrebnim za preraspodjelu i reorijentaciju čestica. Autor je definirao kut trenja u kojem je uklonjen efekt dilatancije  $\varphi_f$ , a razlika vršnog kuta trenja  $\varphi_d$  i  $\varphi_f$  daje kut dilatancije  $\psi$ . Razlika između kuta  $\varphi_f$  i  $\varphi_{\mu}$  pripisuje se efektu reorijentacije čestica. Ekstrapolacija rezultat ispitivanja kuta trenja kod malih vertikalnih opterećenja rezultira nekonzervativnom procjenom trenja (Stuedlein 2014).

---

<sup>7</sup> Citirano u Stuedlein et al. 2014

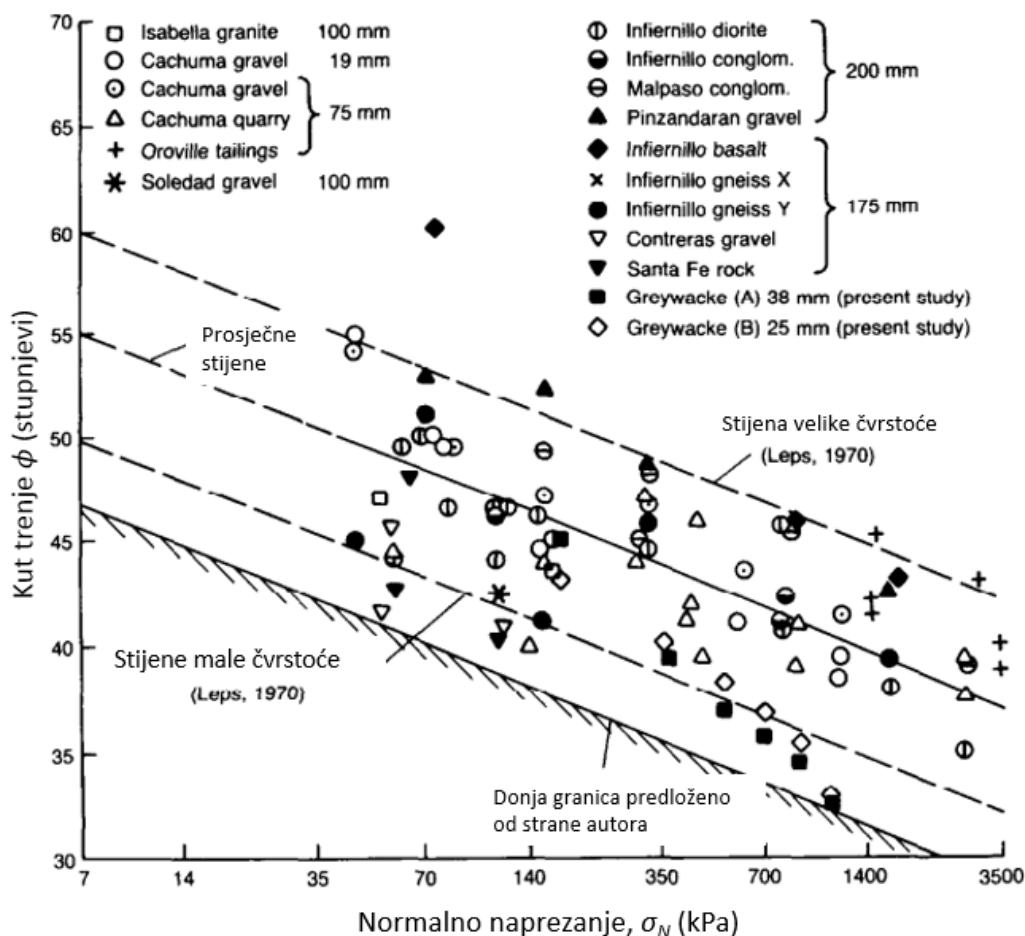






**Slika 3-3** Metode za prikazivanje anvelope čvrstoće (Douglas 2002)

Indraratna i dr. (1993) je pokazao da je anvelopa posmične čvrstoće znano zakrivljena za naprezanja manja od 500 kPa. Autor je u svom radu pokazao promjenu sekantnog kuta trenja  $\phi_{sec}$  s promjenom vertikalnog naprezanja  $\sigma_n$ , za drobljeni materijal različite veličine zrna i različitog mineraloškog sastava, slika 3-4.



Slika 3-4 Promjena sekantnog kuta trenja s normalnim naprezanjem (Indraratna et al. 1993)

### 3.1.2.2 Utjecaj relativne gustoće na čvrstoću materijala

Prethodna istraživanja o posmičnom ponašanju krupnozrnatog materijala pokazuju da gusto zbijeni pijesci imaju tendenciju povećanja volumena, dok se kod slabo zbijenih pijesaka taj volumen smanjuje (Reynolds 1885<sup>8</sup>, Cassagrande 1938<sup>9</sup>, 1940<sup>10</sup>). Cassagrande (1940) je opisao opaženo ponašanje pijeska kao:

- Uzorci s inicijalnim volumenom pora manjim od kritičnog volumena pora imaju tendenciju dilatirati za vrijeme posmika. Za vrijeme ispitivanja postiže se vršni kut trenja  $\phi_d$ , koji pada na rezidualnu vrijednost  $\phi_r$  kad posmična čvrstoća padne na rezidualnu vrijednost.

<sup>8</sup> Citirano u Stuedlein et al. 2014

<sup>9</sup> Citirano u Stuedlein et al. 2014

<sup>10</sup> Citirano u Stuedlein et al. 2014

- Uzorci s volumenom pora većim od kritičnog volumena pora, pri kojem se u fazi sloma volumen ne mijenja, (slabo zbijeni uzorci) imaju tendenciju smanjenja volumena, a posmična čvrstoća se polako povećava, bez postizanja vršne vrijednosti, do rezidualne vrijednosti kuta trenja  $\varphi_r$ .
- Uzorci koji imaju volumen pora jednak kritičnom volumenu pora ne mijenjaju volumen za vrijeme posmika.

Prema Bishop (1954)<sup>11</sup> promjena volumena je kvantificirana kao energija potrebna da se prevlada zadan tlak za vrijeme ekspanzije. Bishop je predložio da se dio devijatorskog naprezanja potreban za proizvodnju energije za širenje uzorka računa prema relaciji:

$$\sigma_e = \sigma_3 \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1} \quad (3-1)$$

gdje je:

$\sigma_e$  – dio devijatorskog naprezanja potrebno za proizvodnju energije za širenje uzorka

$d\varepsilon_v$  – inkrementalna promjena volumnih deformacija

$d\varepsilon_1$  – inkrementalno povećanje aksijalnih deformacija.

Bishop (1954) je izveo izraz za kut trenja ( $\varphi_B$ ) pri čemu je uklonjen dio koji je induciran dilatancijom:

$$\varphi_B = \sin^{-1} \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_e) - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_e) + \sigma_3} \right] \quad (3-2)$$

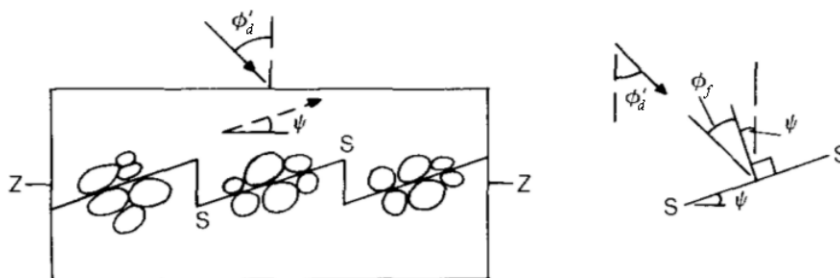
Ovo ukazuje na to da je razlika između kuta  $\varphi_B$  i vršnog kuta  $\varphi_d$  jednaka kutu dilatancije. Rowe (1962) je dao izraz za određivanje vršnog kuta trenja bez komponente dilatancije:

$$\varphi_f = 2 \left[ \tan^{-1} \sqrt{\frac{\sigma_1}{\sigma_3 \left(1 + \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}\right)}} - 45 \right] \quad (3-3)$$

Razlika između vršnog kuta trenja  $\varphi_d$  i kuta trenja bez utjecaja dilatancije  $\varphi_f$  jednaka je kutu dilatancije,  $\psi$  kao što je prikazano na slici 3-5. Razlika između vršnog kuta trenja dobivenog

<sup>11</sup> Citirano u Stuedlein et al. 2014

izrazom (3-3) i izmjerenog kuta trenja pripisuje se efektu reorijentacije, slika 3-5. Kod velikog koeficijenta pora, vršni kut trenja,  $\phi_d$  sastoji se od posmika i efekta reorijentacije, kako se volumen pora smanjuje, komponenta dilatancije raste i to brzinom većom od smanjenja utjecaja reorijentacije čestica. U konačnici to rezultira povećanjem ukupnog kuta trenja.



**Slika 3-5** Model zuba pile za dilatanciju (Stuedlein et al. 2014)

Douglas (2002) navodi da gustoća materijala utječe i na oblik Mohr-Coulomb-ove anvelope sloma. Gusto zbijeni materijali imaju značajno zaobljenje krivulje čvrstoće, što ukazuje na pad kuta trenja, dok slabo zbijeni materijali imaju minimalno zaobljenje i minimalan pad kuta trenja, zato jer je manja dilatancija u slabo zbijenom materijalu u kojem čestice imaju mogućnost pomaka ili reorijentacije za vrijeme posmika.

### 3.1.2.3 Utjecaj granulometrijskog sastava materijala na parametre čvrstoće

Pod granulometrijskim sastavom može se promatrati utjecaj veličine maksimalnog zrna na parametre čvrstoće, te utjecaj koeficijenta nejednoličnosti. Utjecaj veličine maksimalnog zrna na parametre čvrstoće proučavali su brojni istraživači, ali mišljenja oko utjecaja maksimalnog promjera zrna na parametre čvrstoće su podijeljena. Honkanadavar i drugi (2012) navode da su Marshal (1967), Marachi et al. (1969), Venkatachalam (1993), Gupta (2000), Abbas (2003), Honkanadavar (2010) i Varadarajan i drugi (1997, 1999, 2002, 2003, 2006) provodili laboratorijska ispitivanja parametra čvrstoće za različite krupnozrnate materijale pri različitim vertikalnim opterećenjima. Autori su zaključili da se kut unutarnjeg trenja mijenja ovisno o veličini čestica. Također su uočili da kod krupnozrnatog materijala dobivenog miniranjem kut unutarnjeg trenja opada s povećanjem maksimalnog promjera zrna, dok kod aluvijalnog šljunka

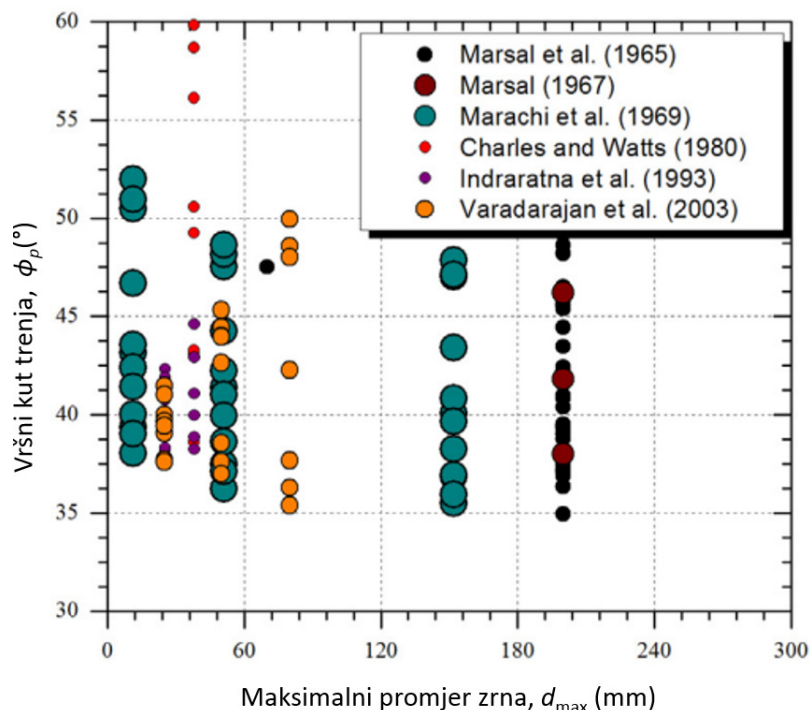
kut trenja raste s povećanjem maksimalnog zrna. Važno je napomenuti da su ovi autori promatrali utjecaj povećanja maksimalnog promjera zrna u velikom uređaju za troosni posmik. Liu i dr. (2014) na temelju ispitivanja izravnog posmika na jednoliko graduiranom materijalu zaključuju da se kut trenja smanjuje s povećanjem maksimalnog promjera zrna.

S druge strane su Charles i Watts (1980), Nako i Fityus (2008), Nicks (2013), Wang i drugi (2013), Hsieh i drugi (2011), Kim i Ha (2014) zaključili da s porastom promjera veličine čestica raste i kut unutarnjeg trenja materijala. Rezultati novijih istraživanja određivanja kuta trenja ovisno o veličini čestica prikazani su u tablici 3-1. Iz tablice se vidi da je kut trenja najmanji za pijesak, a najveći za lomljeni kamen. Također se jasno vidi da kod šljunka s porastom maksimalnog promjera zrna raste i kut unutarnjeg trenja materijala, dok za lomljeni kamen kut trenja pada s porastom maksimalnog promjera zrna za slučaj jednoliko graduiranog materijala.

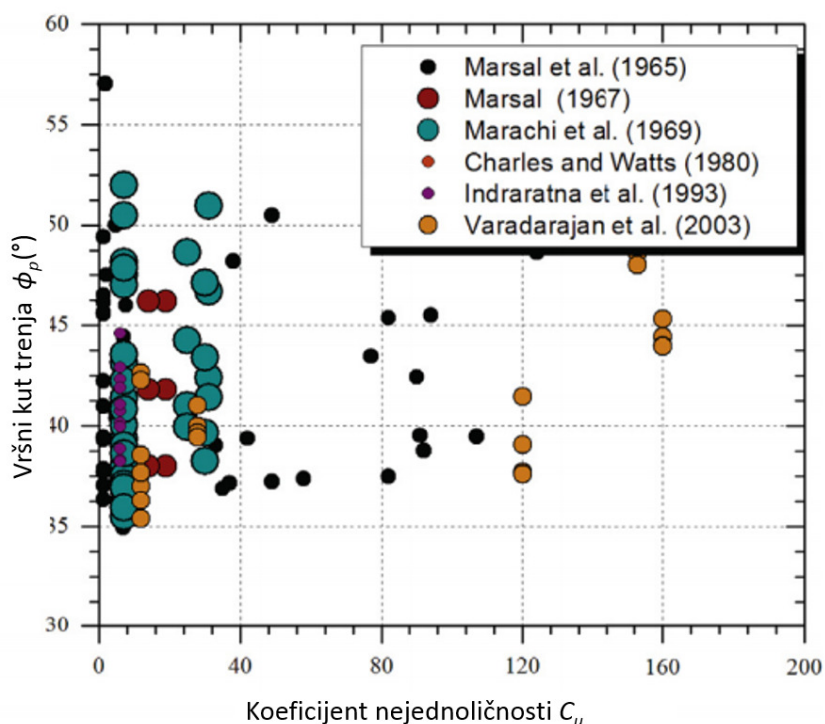
Xiao i dr. (2016) na temelju pregleda istraživanja provedenih u uređaju za troosni posmik zaključuju da nema očigledne varijacije kuta trenja u ovisnosti o maksimalnom promjeru zrna, slika 3-6. Autori također navode da veći koeficijent nejednoličnosti ( $c_u$ ) u nekim ispitivanjima dovodi do većeg kuta trenja, dok u nekim drugim ispitivanjima s povećanjem koeficijenta nejednoličnosti kut trenja pada, slika 3-2. Nonveiller (1979) navodi da će s povećanjem koeficijenta nejednoličnosti ( $c_u$ ) koeficijent pora pri jednakom utrošku rada za zbijanje biti manji, a s time raste utjecaj uklještenja pa je kut unutarnjeg trenja  $\varphi$  veći.

**Tablica 3-1** Novija istraživanja provedena s ciljem određivanja kuta unutarnjeg trenja materijala

Literatura		Opis ispitivanja			Karakteristike korištenog tla					
Autor	god.	Izravni - dimenzije (mm)	Norma	Vertikalno opterećenje (kP)	Tip	Opis	$c_u$	$c$	$\varphi^\circ$	$\psi^\circ$
Hsieh et al.	2011.	300 x 300	ASTM D 5321	49,05 , 98,10 , 147,15	kvarcni pijesak	slabo graduirani	1,46	No	37,5	No
		300 x 300	ASTM D 5321	49,05 , 98,10 , 147,15	riječni šljunak	slabo graduirani	1,43	No	42,21	No
		300 x 300	ASTM D 5321	49,05 , 98,10 , 147,15	lomljeni kamen	slabo graduirani	1,85	No	58,14	No
Nicks	2013	304 x 304 x 203	ASTM D 3080	35,0, 68,95 , 137,89 , 206,84	No.5	Frakcija (37,5 – 9,5 mm)	No	No	51	No
		304 x 304 x 203	ASTM D 3080	35,0, 68,95, 137,89, 206,84	No.56	Frakcija (37,5 – 4,75 mm)	No	No	59	No
		304 x 304 x 203	ASTM D 3080	35,0, 68,95, 137,89, 206,84	No.57	Frakcija (37,5 – 2,36 mm)	No	No	52	No
		304 x 304 x 203	ASTM D 3080	35,0 68,95, 137,89, 206,84	No.6	Frakcija (25 – 4,75 mm)	No	No	59	No
		304 x 304 x 203	ASTM D 3080	35,0, 68,95, 137,89, 206,84	No.67	Frakcija (25 – 2,36 mm)	No	No	55	No
		304 x 304 x 203	ASTM D 3080	35,0, 68,95, 137,89, 206,84	No.68	Frakcija (25 – 1,18 mm)	No	No	50	No
		304 x 304 x 203	ASTM D 3080	35,0, 68,9, 137,89, 206,84	No.7	Frakcija (19 – 2,36 mm)	No	No	57	No
		304 x 304 x 203	ASTM D 3080	35,0, 68,95, 137,89, 206,84	No.78	Frakcija (19 – 1,18 mm)	No	No	53	No
		304 x 304 x 203	ASTM D 3080	35,0, 68,95, 137,89, 206,84	No.8	Frakcija (12,5 – 1,18 mm)	No	No	54	No
		304 x 304 x 203	ASTM D 3080	35,0, 68,95, 137,89, 206,84	No.89	Frakcija (12,5 – 0,3 mm)	No	No	47	No
		304 x 304 x 203	ASTM D 3080	35,0, 68,95, 137,89, 206,84	No.9	Frakcija (9,5 – 0,3 mm)	No	No	53	No
304 x 304 x 203	ASTM D 3080	35,0, 68,95, 137,89, 206,84	No.10	Frakcija (9,5 – 0,15 mm)	No	No	46	No		
Kim & Ha	2014	300 x 300		98, 196 , 294	riječni šljunak	Max. promjer zrna 4,75 mm	11,17	No	40,56	No
		300 x 300		98, 196, 294	riječni šljunak	Max. promjer zrna 7,9 mm	11,2	No	47,97	No
		300 x 300		98, 196, 294	riječni šljunak	Max. promjer zrna 15,9 mm	11,18	No	54,04	No
Liu et al.	2014	300 x 300x 10		50, 100, 150 i 200	lomljeni kamen - granit	A (25 - 35 mm)	No	No	(71, 67, 66, 65) ovisno	No
		300 x 300x 10		50, 100 , 150 200	lomljeni kamen - granit	B (35 - 45 mm)	No	No	(64, 62, 61, 57) ovisno	No
		300 x 300x 10		50 , 100, 150 200	lomljeni kamen - granit	C (45 - 55 mm)	No	No	(64, 59, 57, 55) ovisno	No
Alias et al.	2014	60 x 60 x 24	BS 1337:Part 7:1990	100, 200 , 300	lomljeni kamen (GW)	Max. promjer zrna 2,36 mm	No	No	35	No
		300 x 300 x 200	BS 1337:Part 7:1990	100, 200, 300	lomljeni kamen (GW)	Max. promjer zrna 20 mm	No	No	40	No

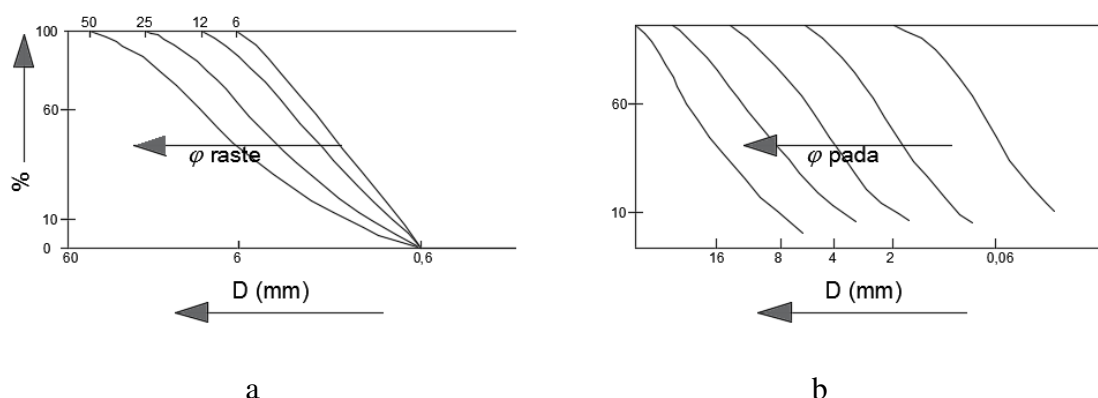


**Slika 3-6** Promjena unutarnjeg kuta trenja ovisno o maksimalnom promjeru zrna (Xiao et al 2016)



**Slika 3-7** Utjecaj koefijenta nejednoličnosti na parametre čvrstoće lomljenog kamena (Xiao et al. 2016)

Nonveiller (1979) u svom radu opisuje ovisnost kuta trenja o maksimalnom promjeru zrna i koeficijentu nejednoličnosti, slika 3-8. Autor navodi da što je blaža granulometrijska krivulja materijal ima više točaka na kojima se dodiruju zrna u jedinici volumena, a sile su na kontaktima manje pri jednakom naprežanju. Pri tome se manje čestica usitnjava i strukturni otpor je relativno veći. Obratno je pri istom koeficijentu nejednoličnosti,  $c_u$  (paralelne krivulje) gdje s porastom maksimalnog zrna kut trenja pada. Povećava li se prosječno zrno, smanjuje se broj čestica u jedinici volumena, sile na dodirnim mjestima postaju veće pri istom naprežanju, veći se broj zrna lomi i strukturni otpor je manji.



**Slika 3-8** Promjena kuta  $\phi$  s granulometrijskim sastavom: a) povećan  $D$  i  $c_u$ ,  $\phi$  raste sa  $D_{max}$ , b) povećan  $D_{max}$  sa  $c_u = \text{konst.}$ ,  $\phi$  se smanjuje uz  $D_{max}$  (Nonveiller 1979)

Nonveiller (1979) navodi da oblik zrna ima znatan utjecaj na otpor na smicanje jer o tome ovisi pokretljivost čestica pri inače približno jednakoj zbijenosti. Dio otpornosti koji zavisi o uklještenju raste ako su zrna uglata, a smanjuje se kad su zaobljena. U tablici 3-2 dan je prikaz utjecaja oblika zrna na promjenu otpora smicanja.



**Tablica 3-2** Utjecaj oblika zrna i granulacije na kut trenja (Nonveiller 1979)

Oblik zrna i granulacija	Kut $\varphi$ (°)	
	Rahlo	Zbijeno
Zaobljen, jednolična (U)	30	37
Uglast, jednolična (U)	35	43
Zaobljen, dobra (W)	34	40
Uglasto, dobra (W)	39	45

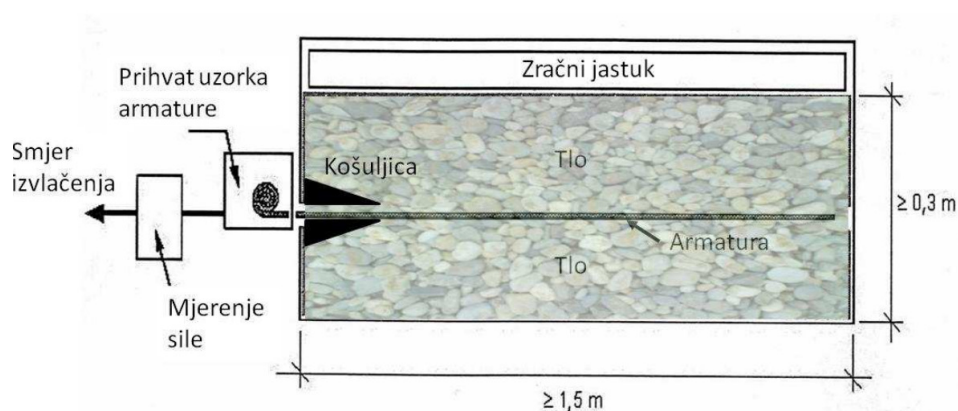
Na temelju pregleda literature može se utvrditi da je kut trenja za lomljeni kamen koji je određen u velikom uređaju za izravni posmik ili u troosnom uređaju, znatno veći od kuta trenja koji je određen za pijesak ili sitni šljunak. Iz pregleda literature može se utvrditi da su sva istraživanja pokazala da kut trenja s povećanjem opterećenja pada, što je objašnjeno manjim kutom dilatancije kod većih naprezanja, tj. kod većih naprezanja dolazi do predrobljavanja čestica. Također se može zaključiti da nema očigledne varijacije kuta trenja u ovisnosti o maksimalnom promjeru zrna. Mišljenja oko utjecaja koeficijenta nejednoličnosti su također podijeljena pa tako neki autori navode da veći koeficijent nejednoličnosti ( $c_u$ ) dovodi do većeg kuta trenja, dok neki drugi autori povećanjem koeficijenta nejednoličnosti kut trenja pada.

## 3.2 Dosadašnja ispitivanja međusobnog odnosa geosintetičke trake i nekoherentnog materijala pokusom izvlačenja armature iz tla

### 3.2.1 Pokus izvlačenja

Ispitivanje izvlačenja razvijeno je za potrebe proučavanja mehanizma interakcije između armaturnih elemenata i tla. Ispitivanja se mogu provoditi u uređaju za ispitivanje otpornosti na izvlačenje, prototipu ili stvarnoj konstrukciji od armiranog tla, od čega se najčešće provode ispitivanja u uređaju za ispitivanje otpornosti na izvlačenje, slika 3-9. Ispitivanje se provodi tako da se uzorak armature ugrađuje u metalnu kutiju između dva sloja tla, a zatim se uzorak izvlači iz kutije pri čemu se mjere brzina izvlačenja, sila izvlačenja, te pomak pojedinih točaka duž uzorka. Ispitivanje traje dok ne dođe do izvlačenja armature iz tla ili do pucanja elemenata armature, a otpor izvlačenju armature iz tla dobije se tako da se sila izvlačenja podijeli sa širinom uzorka. Minažek (2010) navodi uobičajene dimenzije uređaja za izvlačenje: duljina oko 1,5 m, širina od 0,6 do 0,98 m i visina od 0,6 do 0,9 m. Autor navodi da prema normi GRI Test Method GG5 (1991) postoje četiri načina provedbe pokusa izvlačenja:

- kratkotrajni postupak s kontroliranim prirastom deformacija max. 1 mm/min
- kratkotrajni postupak s kontroliranim prirastom naprezanja – prirast sile mora biti  $\pm 2$  kN/m/min
- kratkotrajni postupak s inkrementalnim nanošenjem sile
- dugotrajni postupak s konstantnom silom (puzanje) – 50 do 10000 sati.



**Slika 3-9** Shematski prikaz presjeka uređaja za izvlačenje (Minažek 2010)

Ispitivanje izvlačenja koristi se kako bi se objasnilo međudjelovanje geosintetika i tla, međutim kako bi se rezultati ispitivanja mogli uspoređivati i koristiti za slične projekte potrebno je da se ispitivanja provode pod jednakim uvjetima. Kako bi se to osiguralo razvijene su norme kojima se određuju uvjeti ispitivanja. Minažek (2010) navodi da se za ispitivanje izvlačenja koriste postojeće norme: ASTM D6706-01, GRI Test Method GG5, te europska norma EN 13738. Autor u svom radu opisuje opremu te način ispitivanja za ove tri navedene norme, tablica 3-3.

**Tablica 3-3** Usporedba normi prema kojima se vrši pokus izvlačenja (Minažek 2010)

	ASTM	GRI	EN
Vertikalna naprezanja	- osigurati 250 kPa - točnost $\pm 2\%$	- osigurati 200 kPa	- osigurati 200kPa - točnost $\pm 2\%$ - osigurati tlakove 25,50 i 100 kPa
Veličina uređaja i uzorka	- min. širina kutije je veća od $20 \times D_{85}$  - min. 150 mm tla iznad i ispod geosintetika  - najmanja duljina uzorka 610 mm  - uzorak L:B $\geq 2$  - min. 610 x 305 mm - min. širina 305 mm i barem 5 rebara - min. udaljenost od bočnih stranica 75 mm, ako je smanjeno trenje inače 150mm	- min. 100 mm od ruba kutije  - sprijeda i straga min 50 mm slobodno - duljina uzorka mora biti tako izabrana da uz predviđeni vertikalni tlak sila izvlačenja iznosi 80-90% vlačne čvrstoće geosintetika  - dimenzije kutije $20 \times D_{85}$ - min. debljina tla ispod i iznad geosintetika 30 cm	- uzorak: duljina 3 puta veća od širine - uređaj: 1,5 m duljina, 0,6 m širina 0,3 m dubina $6 \times D_{max}$  - minimalna duljina košuljice 200 mm - postavljanje uzorka: min. 100 mm udaljenost uzorka od uzdužnih stjenki uređaja - mjeriti relativnu udaljenost ekstenzometra u odnosu na uređaj
Inkrement sile	- inkrement sile 2 kN/m/min -jednostruki ili dvostruki inkrementi određenog vremena trajanja	- inkrement sile 2 kN/m/min -jednostruki ili dvostruki inkrementi određenog vremena trajanja	osigurati silu za zadani konstantni pomak - za slobodno drenirana tla, bez dodatnog pornog pritiska - primijeniti silu da se dobiva pomak $2 \pm 0,2$ mm/min
Točnost mjerenja sile	- osjetilo za silu mora imati točnost $\pm 0,5\%$ max. sile	- nema zahtjeva	- točnost sile izvlačenja 2%
Točnost mjerenja pomaka	- $\pm 0,1$ mm	- 0,03 mm	- 0,05 mm
Ukupni pomak	- min. 50 mm	- min. 50 mm	- min. 50 mm

U proteklih tridesetak godina velik broj istraživača (Palmeira i Milligan, 1989, Chang i dr., 1977, Farrag, 1991, Fannini i Raju 1993, Bergado i dr. 1994, Alfaro i dr. 1995, Lopes i Ladeira, 1996, Ochiai i dr. 1996, Cuelho 1998, Meyer i dr. 2003, Moraci i Gioffrè, 2006, Abdelouhab, 2010, Minažek 2010, Studelein i dr. 2014) razvijalo je uređaje za izvlačenje armature iz tla. Minažek i Mulabdić (2013) navode da se u literaturi može pronaći više od trideset različitih uređaja, a obzirom na dimenzije kutije radi se o malim uređajima (npr.  $L \times B \times H = 0,25 \times 0,15 \times 0,15$  m), srednjim (npr.  $L \times B \times H = 0,6 \times 0,4 \times 0,4$  m) i velikim ( $L \times B \times H = 1,3 \times 0,8 \times 0,5$  m). Autori ističu da je najviše velikih uređaja, kod kojih volumen kutije iznosi 1 – 2 m<sup>3</sup>. Prema Palmeira (1987) prednost upotrebe velikih uređaja je u sljedećem:

- kod velikog uređaja armatura se nalazi u velikom volumenu tla, te se može odmaknuti od rubova kako bi se umanjio njihov utjecaj
- u velikom uređaju rezultati ispitivanja bolje predstavljaju ponašanje u stvarnim konstrukcijama
- mogu se koristiti instrumenti koji se zakapaju u tlo (npr. pressure cells) bez ozbiljnih posljedica na rezultate ispitivanja, troškovi takvih postojećih uređaja manji su od troškova koji bi nastali da je potrebno razvijati posebne uređaje manjih dimenzija
- upotreba velikih uređaja omogućuje da se ispitivanja provode sa stvarnim materijalima koji će se koristiti u izgradnji konstrukcijama pa nema potreba za posebnim modeliranjem.

S druge strane kod upotrebe velikih uređaja veliki su i troškovi provedbe ispitivanja, postupak ugradnje i izgradnje uzorka je dugotrajan i zahtjevan, a razine naprezanja u velikom uređaju su često male i zbog toga utjecaj težine tla nije zanemariv. Ovo znači da se uzorak ne može smatrati homogenim, bar što se tiče naprezanja, jer se naprezanje povećava s dubinom.

Nepovoljni utjecaji su ipak puno manji od pozitivnih rezultata koji se mogu dobiti ispitivanjem u velikom uređaju te se najčešće ispitivanja provode u velikim uređajima.

### ***3.2.1.1 Materijali u pokusu izvlačenja armature iz tla***

Kada se govori o materijalima na kojima su provedena laboratorijska ispitivanja izvlačenja armature iz tla potrebno je razlikovati materijale ispune i armaturu.

### ***Materijali ispune***

Ponašanje konstrukcija od armiranog tla ovisi o svojstvima tla koja se koriste u izgradnji, a najčešće su to nekoherentna tla s dobrim geomehaničkim svojstvima i visokim kapacitetom dreniranja. Vrlo rijetko se u izgradnji konstrukcija od armiranog tla koriste koherentna tla s visokim udjelom sitnih čestica zbog male čvrstoće tla, velike deformabilnosti i slabih filtarskih svojstava takvog tla. Kako se u izgradnji uglavnom koriste nekoherentna tla i laboratorijska ispitivanja interakcije tla i elemenata armature provode se uglavnom za nekoherentna tla i to uglavnom pijeske (Ingold 1983, Lopes i Ladeira 1996, Palmeira, 2004, Sieira et al. 2009, Abdelouhab et al. 2008), dok je manji broj ispitivanja proveden kada je kao materijal ispune korišten šljunak (Cuelho, 1998, Alfaro et al. 1995, Lopes i Lopes 1999, Minažek 2010) ili vrlo rijetko kada je kao materijal ispune korišten lomljeni kamen (Perkins & Edens, 2003). Detaljan pregled istraživanja pokusa izvlačenja po materijalima koji su korišteni u ispitivanju dao je Minažek (2010). Tablica preuzeta iz njegovog rada nadopunjena je pregledom novijih ispitivanja, tablica 3-4. Iz pregleda ispitivanja može se zaključiti da je najveći dio do sada provedenih istraživanja proveden za slučajeve kada je materijal ispune pijesak iako se u gradnji konstrukcija od armiranog tla često koriste i krupniji materijali kao šljunak ili lomljeni kamen. Parametri materijala koji su određeni za slučajeve kada je kao materijal ispune korišten pijesak podcjenjuju vrijednosti koje bi se dobile za slučajeve kada se kao materijal ispune koristi šljunak (Abdelouhab i dr. 2010).

### ***Armaturni elementi***

Ispitivanja izvlačenja armature iz tla započela su s geotekstilima, a u novije vrijeme najviše istraživanja je na geomrežama (Minažek i Mulabdić 2013). Istraživanja na geomrežama provodili su Minažek (2010), Moraci i Recalcatti (2006), Ochiai i drugi (1996), Alfaro i drugi (1995), Lopes i Ladeira (1996), Meyer i drugi (2003), Moraci i Gioffre (2006), na metalnim mrežama Palmeira (2008), Minažek (2010), Bergado i Teerawattanasuk (2001), geotekstilima Cuelho (1998), Ochiai i drugi (1996), Yuan i Chua (1991), Kharchafi i Dysli (1993) Bernal i drugi (1997), metalnim trakama (Chang et al. 1977, Lee & Bobet 2005, Studelein et al. 2014), geosintetičkim trakama Lo (1998), Abdelouhab (2009, 2010).

**Tablica 3-4** Pregled istraživanja pokusa izvlačenja po materijalima korištenim u ispitivanju (nadopunjeno na Minažek 2010)

Ispitivanje		Tlo		Armatura	Napon
Autor	God	Vrsta tla	$\varphi$ (°)	Tip	Vertikalno naprezanje (kPa)
Chang et al.	1977	šljunkovit pijesak		metalna traka	69
Ingold	1983	pijesak	34	geomreža	30 - 200
Rowe et al.	1985	pijesak	31-32	geomreža	
Dyer	1985	drobljeno staklo		mjedena mreža metalna mreža metalna ploča	
Koerner	1986	pijesak	44	geomreža geotekstil geomembrana	0 - 70 0 - 40 0 - 40
Juran & Chen	1988	pijesak	42 - 48	geotekstil	
Yuan & Chua	1991	pijesak pijesak šljunkovit	42	geotekstil geomreža	21,4; 48,41; 94,04; 122,8; 21,4; 48,41,; 94,04; 122,8
Farrag	1991	pijesak	34		
Abramento	1993	pijesak	53 - 55	lim najlon	49; 73,5; 98, 168
Bergado	1994	glinovito pjeskovit glina	40,2 30,7	metalna mreža geomreža	
Min et al.	1995	pijesak	38 - 40	geomreža	17,2; 34,5; 51,7; 69; 103,4
Xu et al.	1995	pijesak		geomreža	12,25; 24,5; 49,73
Alfaro et al.	1995	pjeskoviti šljunak	45	geomreža	12,25; 24,5; 49, 73
Lopes & Ladeira	1996	pijesak		geomreža	46,7
Shuwang et al.	1998	pijesak		geomreža	12,25; 24,5; 49; 73
Cuelho	1998	pijesak		geomreža geotekstil	5, 15, 35
Bakeer et al.	1998	lakozrni agregat		geomreža	34, 48, 96, 145
Lo	1998	pjeskovit šljunak šljunkovit pijesak dobro graduiran pijesak		geosintetička traka	15, 100

Ispitivanje		Tlo		Armatura	Napon
Autor	God	Vrsta tla	$\varphi$ (°)	Tip	Vertikalno naprezanje (kPa)
Lopes i Ladeira	1999	pijesak šljunak		geomreža geomreža geotekstil geokompozit	38
Alagyawanna	2001	pijesak	23,2 - 29,9	geomreža	
Moguiuddin	2001		24	geomreža geotekstil	
Goudhue et al.	2001	pijesak	39 - 50	geotekstil geomreža geomembrana	10, 30, 50
Perkins i Edens	2003	drobljeni kamen	48	geomreža geotekstil	5, 15, 35
Sieira	2003	pijesak glina prašinsta	37 21	geomreža geomreža	5, 12,5, 25, 50, 75, 100
Texeira	2003	8 vrsta tla: glina do jednoliki pijesak	27,2 - 33,5	geomreža	25, 50, 100
Meyer et al.	2003	pijesak	36 - 43	geomreža	30,2; 45,3; 60,4
Palmeira	2004	jednoliki pijesak	51	metalna mreža geomreža geotekstil	25 - 75
Le & Bobet	2005	pijesak i prahovit pijesak		čelična traka	30, 100, 200
Moraci et al.	2006	jednoliki pijesak	42 - 48	geomreža	10, 25, 50, 100
Abdelrahman et al.	2007	pijesak pijesak	32 37	geomembrana s otvorima geomreža	49
Hossain i Sakai	2007	glina prašinsta	32,8	geomreža	48, 96, 144, 192
Abdelouhab et al.	2008	jednoliki pijesak	28	geosintetičke trake	8,6, 100
Feng et al.	2008	glina		geomreža	30,6
Abdelouhab et al.	2009	pijesak šljunak	36 36	geosintetička traka: jedna i dvije paralelno	20,45,80
Sieira et al.	2009	prahovit pijesak glinovit prah		geomreže	5, 12,5, 25,50
Khedkar i Mandal	2009	kvarcni pijesak		čelijska mreža	75, 100

Ispitivanje		Tlo		Armatura	Napon
Autor	God	Vrsta tla	$\varphi$ (°)	Tip	Vertikalno naprezanje (kPa)
Abdelouhab et al.	2010	pijesak		geosintetične trake metalne trake	7, 22, 40, 60, 80
Abdi i Arjomad	2011	glina - geomreža pijesak - geomreža glina - pijesak - geomreža	10 33,7	geomreža	25, 50, 75
Esfandiari i Selmat	2012	pijesak	39 - 45	metalne trake s poprečnim rebrima	50, 60, 65, 75, 100
Suk siripattanapong et al.	2013	šljunak (GW) pijesak (SW) lomljeni kamen (GP) pijesak (SP)	45 42 40 40	"bearing reinforcement" (uzdužna traka s poprečnim L profilom)	30, 50, 90
Lawson et al.	2013	šljunak i pijesak		rebraste čelične trake	26 do 270
Ezzein & Bathurst	2014	pijesak		geomreža	
Sukmak et al.	2015	miks prahovite gline i pijeska u različitim omjerima	5.5 - 40	"bearing reinforcement" (uzdužna traka s poprečnim L profilom)	30,50, 90
Mosallanezhad et al.	2016	pijesak	44,4	geomreža s pričvršćenim kockama	



### **3.2.1.2 Parametri koji utječu na rezultate pokusa izvlačenja armature iz tla**

Ispitivanje izvlačenja koristi se za potrebe proučavanja mehanizma interakcije koji se javlja između tla i elemenata armature. Glavni dijelovi uređaja za izvlačenje su čelična kutija, sustav za nanošenje vertikalnog opterećenja, uređaj za nanošenje horizontalne sile, sustav za pričvršćivanje armature i svi kontrolni i dodatni uređaji potrebni za provedbu ispitivanja. Ispitivanje interakcije tla i armature pokusom izvlačenja sastoji se od sljedećih koraka: pripreme unutarnjih stjenki kutije, ugradnje i zbijanja tla u donjem dijelu kutije, postavljanja armature na zbijeno tlo i instalacije potrebnih uređaja za praćenje ispitivanja (ekstenzometara), ugradnja i zbijanje tla u gornji dio kutije, zatvaranje kutije s poklopcem na kojem se nalaze zračni jastuci, spajanja uređaja potrebnih za provođenje ispitivanja. Na rezultate izvlačenja mogu utjecati brojni parametri koji uključuju karakteristike uređaja za ispitivanje, postupak ispitivanja, geotehničke karakteristike tla i karakteristike armature. U tablici 3-5 prikazani su najvažniji čimbenici koji utječu na rezultate pokusa izvlačenja. Minažek (2010) navodi da ispitivanja izvlačenja nisu usklađena, te da je zbog velikog broja parametra koji utječu na rezultat teško usporediti rezultate različitih ispitivanja.

U posljednja tri desetljeća provedena su brojna ispitivanja s ciljem utvrđivanja utjecaja rubnih uvjeta i veličine uređaja na rezultate pokusa izvlačenja (Chang et al., 2000, Farrag & Morvant 2004, Johnston & Romstad 1989, Palmeira 2009, Palmeira & Miligan 1989, Moraci & Recalcati 2006, Lopes & Ladeira 1996). Na temelju prijašnjih ispitivanja mogu se izdvojiti najvažniji parametri koji utječu na rezultate pokusa izvlačenja:

- utjecaj sustava za nanošenje vertikalnog opterećenja
- utjecaj prednje stjenke
- utjecaj bočnih stjenki i veličine kutije, osobito visine sloja materijala ispod i iznad armature
- utjecaj stezaljke za prihvat armature
- utjecaj širine elementa armature
- način opterećivanja (brzina prirasta deformacija)
- utjecaj zbijenosti i tehnike zbijanja.

**Tablica 3-5** Glavni čimbenici koji utječu na rezultate ispitivanja izvlačenja (Moraci et al. 2016)

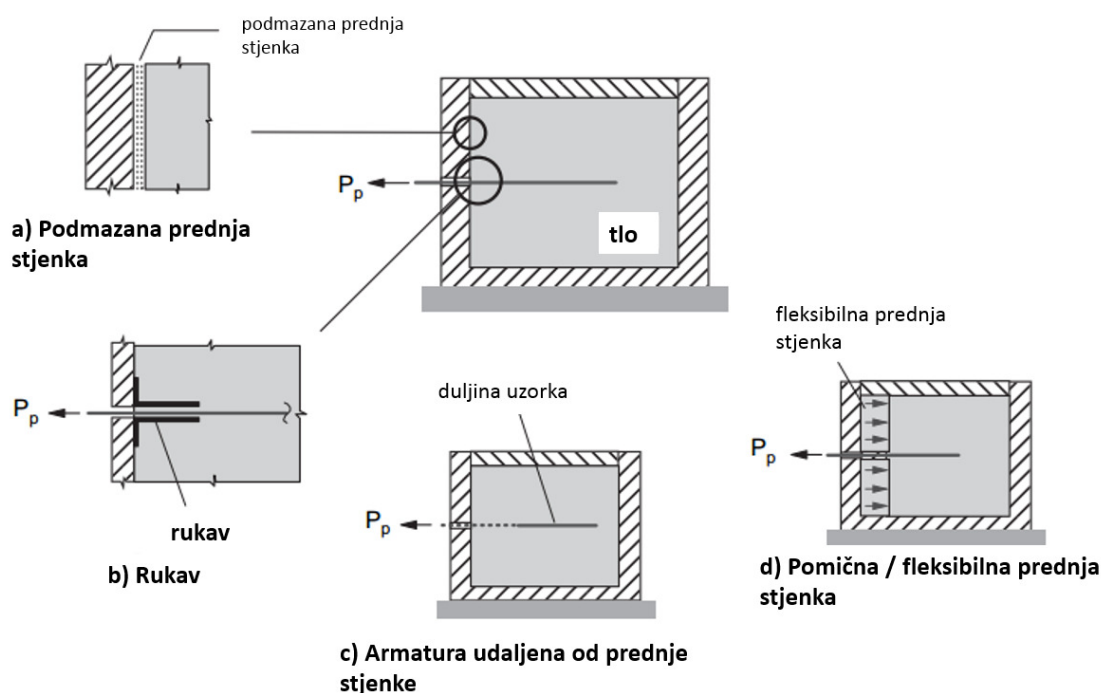
Uređaj za izvlačenje	Utjecaj sustava za nanošenje vertikalnog opterećenja Utjecaj prednje stjenke Trenje bočnih stjenki i tla Dimenzija kutije Stezaljka za prihvat armature
Postupak provedbe ispitivanja	Brzina pomaka Priprema uzorka Primijenjeno vertikalno opterećenje Karakteristike i instalacija uređaja za praćenje pokusa
Tlo	Vrsta tla Granulometrijski sastav Stupanj zbijenosti Posmična čvrstoća
Armatura	Vrsta armature Širina i duljina Vlačna čvrstoća Geometrija i struktura armature

***Sustav za nanošenje vertikalnog opterećenja***

Sustav za nanošenje opterećenja važan je kako bi se osigurala jednolika raspodjela naprezanja po površini uzorka. Abdelouhab (2010) navodi da su rezultati numeričkih analiza pokazali da krutost gornjeg dijela ruba kutije znatno utječe na rezultate ispitivanja, posebno za uzorke kod kojih je manja debljina materijala iznad armature. Vertikalno opterećenje na uzorak može se nanijeti preko krute ploče koja je u kontaktu s tлом ili preko fleksibilne membrane koja je ispunjena tekućinom ili zrakom (zračni jastuci). Upotreba fleksibilne membrane omogućuje primjenu konstantnog normalnog naprezanja i mogućnost slobodnog vertikalnog pomaka. Palmeira i Milligan (1989) istraživali su utjecaj sustava za nanošenje vertikalnog opterećenja krutom pločom i fleksibilnim vodenim jastukom. Autori su ispitivanja proveli na uzorku metalne geomreže položene u sloj pijeska, a zaključili su da je kod upotrebe fleksibilnog sustava za nanošenje vertikalnog opterećenja maksimalna sila izvlačenja manja nego za slučajeve kada se koristi kruta ploča.

### Uvjeti prednje stjenke – utjecaj rukava (košuljice)

Rubni uvjeti na prednjoj stjenki kutije uređaja mogu dovesti do lokalnog povećanja relativne gustoće tla u blizini prednje stjenke. Prema literaturi Minažek (2010) izdvaja metode kojima je moguće smanjiti utjecaj prednje stjenke kutije, a koje uključuju: smanjenje trenja koristeći slojeve plastičnih folija ili ulja ili masti, korištenje košuljice, ugradnja armature tako da je efektivni početak mreže udaljen od prednje stjenke, ili izvedba pomične prednje stjenke načinjene kao zračni jastuk ili tako da je prednja stjenka pomična. Na slici 3-10 prikazani su tipični rubni uvjeti prednje stjenke kod uređaja za ispitivanje izvlačenja.



Slika 3-10 Tipični rubni uvjeti za ispitivanje izvlačenjem (Palmeira 2009)

### Utjecaj bočnih stjenki i dimenzije kutije

Kutija za ispitivanje izvlačenja treba biti dovoljno velika da se omogući ispitivanje na reprezentativnom uzorku armature. Veličina kutije može utjecati na mehanizam interakcije između tla i armature. Pozivajući se na ASTM standard (ASTM D 6706-01 2013) širina kutije za glatke bočne stjenke treba biti minimalno 460 mm i veća od 20 puta  $D_{85}$  ili 6 puta veća od maksimalnog promjera zrna ( $D_{max}$ ). Minimalna duljina kutije treba biti najmanje 610 mm ili 5 puta veća od maksimalne veličine otvora geosintetika. Debljina sloja tla ispod i iznad armature treba biti minimalno 150 mm i najmanje 6 puta  $D_{85}$  ili 3 puta  $D_{max}$ . Odabir visine kutije trebao bi biti povezan s dimenzijama materijala koji se aktivirao na poprečnim rebrima mreže pri čemu

se za maksimalnu veličinu pasivnog klina materijala može uzeti 40 puta debljina poprečnog rebra. Visina kutije trebala bi biti minimalno 600 mm (Moraci et al. 2016).

Kod ispitivanja izvlačenja na armaturu djeluje vertikalno naprezanje koje je posljedica nanošenja vertikalnog opterećenja i težine tla iznad armature. Zbog trenja koje se javlja na kontaktu tla i bočnih stjenki kutije vertikalna efektivna naprezanja na kontaktu tla i armature mogu biti manja od očekivanog. Kako bi se umanjio utjecaj trenja, na bočne stjenke se mogu lijepiti materijali niskog trenja kao što su teflon, glatki aluminij, staklo, podmazane gumene membrane (Moraci & Recalcati 2006).

### ***Stezaljke za prihvat armature***

Moraci i Recalcati (2006) navode da sustav čeljusti koji se koristi za prihvat armature može biti izvan kutije uređaja za izvlačenje ili unutar kutije. Autori ističu da je kod primjene čeljusti umetnute u kutiju duljina armature konstantna za vrijeme cijelog ispitivanja i da je pomak koji se mjeri kod stezaljke za prihvat armature zapravo pomak prve točke armature te se ti rezultati mogu direktno koristiti u interpretaciji rezultata. Kada se koristi vanjski sustav čeljusti duljina sidrenja se mijenja za vrijeme ispitivanja, a pomak koji je izmjeren na čeljusti nije pomak jednak pomaku prve točke elementa armature. Moraci et al. (2016) preporučuju da se koristi sustav čeljusti koji se nalazi unutar kutije, ali da se prije primjene tog sustava odredi otpornost na izvlačenje sustava čeljusti i okolnog tla kod istih uvjeta koji će se koristiti i za ispitivanje izvlačenja armature.

### ***Širina armature***

Prema ASTM D6706-01 širina uzorka armature treba biti takva da je minimalna udaljenost armature od bočnih stranica 75 mm ako je smanjeno trenje ili 150 mm ako nije smanjeno trenje. Kod ispitivanja traka ovaj uvjet je zadovoljen zato jer je širina trake znatno manja od širine velikih uređaja za ispitivanje izvlačenja armature iz tla.

### ***Način opterećivanja (brzina prirasta deformacija)***

Izvlačenje uzorka iz tla moguće je ostvariti izvlačenjem s kontroliranom brzinom pomaka (deformacija) ili izvlačenjem s kontroliranom silom (Chuelo 1998). ASTM norma (ASTM D6706-01 2007) predlaže da se koristi brzina smicanja od 1 mm/min za izvlačenje uzorka iz tla.

### ***Utjecaj zbijenosti i tehnike zbijanja tla***

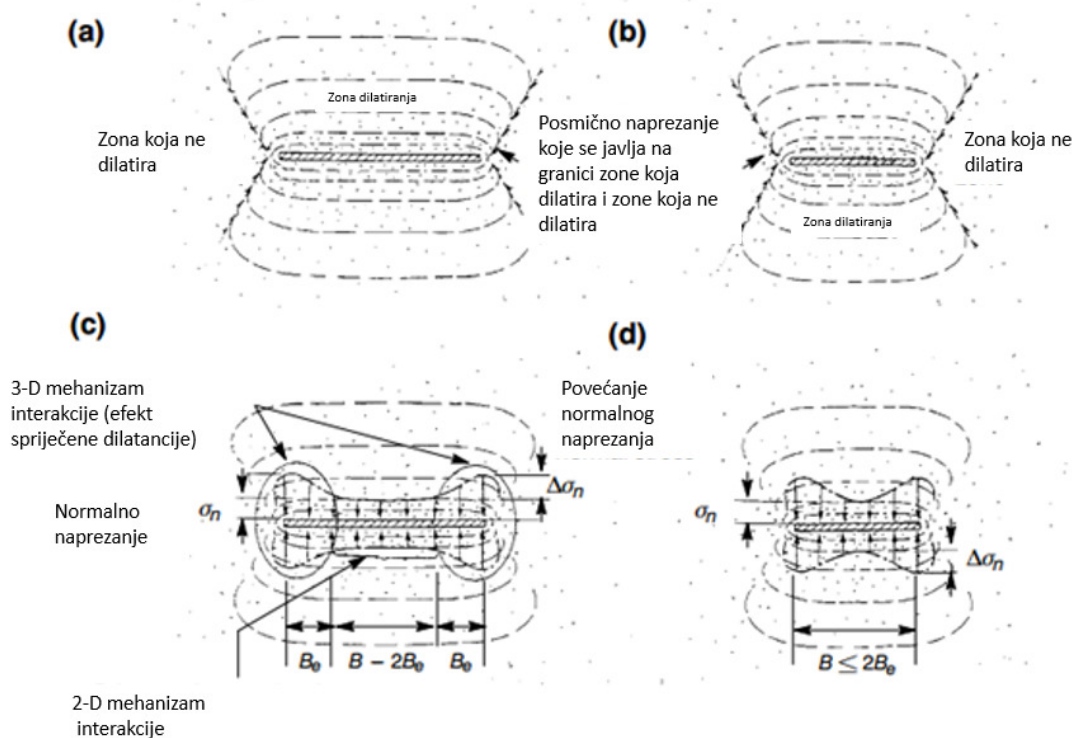
Minažek (2010) navodi da se za ugradnju i zbijanje tla mogu koristiti razne tehnike, s ciljem da se postigne jednoliko zbijeno tlo. Zbijanje tla može se postići električnim vibrozbijačima, standardnim utegom za Proctor, ručnim zbijačima ili mehaničkim zbijačima. Postupak zbijanja trebao bi biti takav da se osigura da je tlo jednoliko zbijeno do željene gustoće zbijenosti po cijeloj kutiji uređaja. Otpornost armature na posmik ovisi o relativnoj gustoći tla. Minažek (2010) navodi da slabo zbijeni slojevi tla i nepravilna ugradnja geomreža mogu rezultirati diferencijalnim slijeganjima geomreže što može voditi do netočnog mjerenja otpornosti na izvlačenje.

#### **3.2.2 Dosadašnja ispitivanja izvlačenja geosintetičke trake i tla**

Kako je već spomenuto, koeficijent interakcije između elemenata armature i tla važan je parametar koji se koristi u proračunu unutarnje stabilnosti konstrukcija od armiranog tla, a određuje se ispitivanjem izvlačenja armature iz tla. U posljednja tri desetljeća proveden je velik broj ispitivanja izvlačenja s ciljem utvrđivanja koeficijenta interakcije između armaturnih elemenata i tla, od čega je najveći dio ispitivanja bio usmjeren na određivanje koeficijenta interakcije između geomreža i tla i geotekstila i tla, dok je manji broj istraživanja bio usmjeren na određivanje koeficijenta interakcije između geosintetičkih traka i tla (Lo 1998, Abdelouhab 2009, 2010).

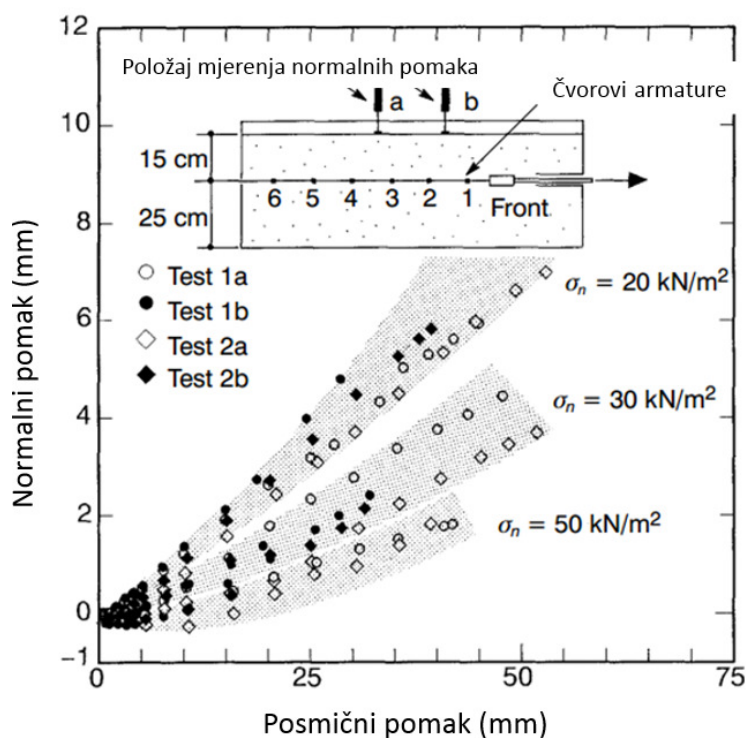
Alfaro i drugi (1995) istraživali su mehanizam interakcije jednoosne geomreže različite širine i tla u pokusu izvlačenja. Autori su predložili kombinaciju dvodimenzionalnog i trodimenzionalnog mehanizma interakcije za mreže različite širine. Dvodimenzionalni mehanizam interakcije odnosi se na trenje koje se javlja na kontaktu geomreže i tla, dok se trodimenzionalni mehanizam interakcije javlja kao posljedica djelovanja ograničene dilatancije na rubovima armature. Trodimenzionalni mehanizam interakcije izražen je kod armature manje širine (trake). Kada se traka izvlači iz tla na kontaktu trake i tla dolazi do posmičnog pomaka i zona tla koja se nalazi uz traku ima tendenciju dilatirati. Međutim, dilatancija je spriječena zbog djelovanja okolnog tla, što uzrokuje povećanje normalnog naprezanja na kontaktu trake i tla. Alfaro i drugi (1995) ističu da su kod izgradnje prvih konstrukcija od armiranog tla korištene uske metalne trake na koje se može primijeniti idealizirani 3D mehanizam interakcije. Upotrebom drugih geosintetičkih armaturnih elemenata (geomreža) širina armaturnih

elemenata se kreće od 0,2 m do 1 m. U ovim slučajevima mehanizam interakcije je kombinacija 2D mehanizma po sredini armaturnog elementa i 3D mehanizma na rubovima, slika 3-11. Kao što je prikazano na slici 3-12 a, c i 3-12 b, d zona tla koja se nalazi oko elementa armature djeluje kao ograničenije dijelu tla koje ima tendenciju dilatirati. To generira posmična naprezanja na rubovima između dilatirajuće i nedilatirajuće zone i kao rezultat dolazi do povećanja naprezanja na rubovima armature. Alfaro i drugi (1995) ističu još jedan važan aspekt mehanizma interakcije koji je potrebno uzeti u obzir, a to je da će se samo dio duljine armaturnog elementa mobilizirati kada se koristi istezljiva armatura. Autori ističu da je ovaj efekt dominantan kod velikih normalnih naprezanja gdje pomak čvorova ima tendenciju da se lokalizira u blizini primijenjenog opterećenja izvlačenja, što rezultira manjom mobiliziranom duljinom. Prema tome bi procjena maksimalne otpornosti na izvlačenje trebala uzeti u obzir samo efektivnu/mobiliziranu duljinu.

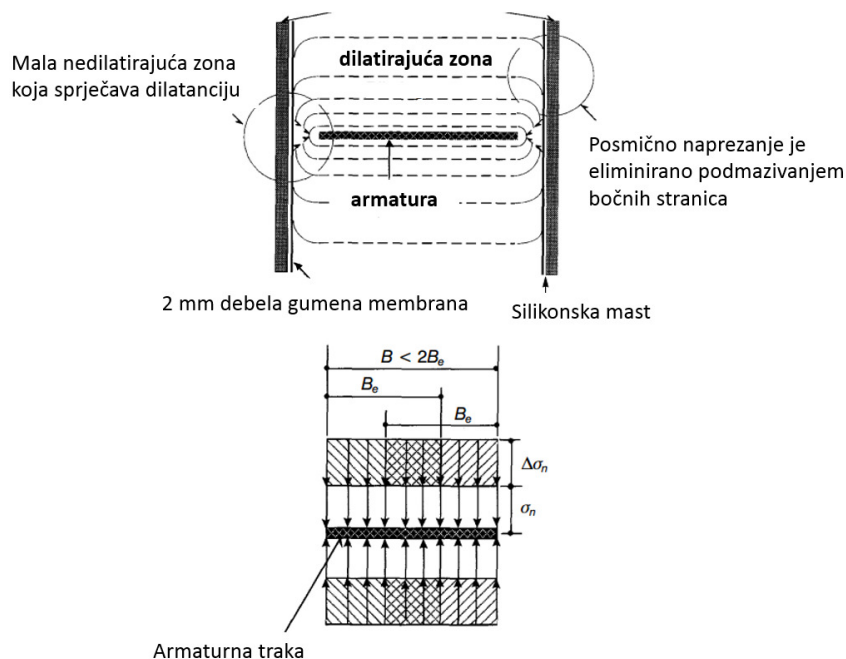


**Slika 3-11** Koncipiran mehanizam interakcije armature (trake) (Alfaro et al. 1995)

Alfaro i drugi (1995) proveli su ispitivanje izvlačenja geomreže različite širine u velikom uređaju za ispitivanje izvlačenjem. Proveli su ukupno 24 ispitivanja za šest različitih širina geomreže ( $B = 10, 15, 20, 30, 45$  i  $50$  cm) kod četiri različita vertikalna naprezanja ( $\sigma_n = 20, 30, 40$  i  $50$  kN/m<sup>2</sup>). Tlo korišteno u ispitivanju bio je dobro graduirani pjeskoviti šljunak. Na temelju provedenih ispitivanja autori su zaključili da se kod mreža širih od 20 cm javlja kombinirani 2D i 3D mehanizam interakcije, dok kod armaturnih elemenata užih od 20 cm dominira 3D mehanizam interakcije. Izračunato povećanje normalnog naprezanja na rubovima elemenata armature uslijed efekta ograničene dilatancije iznosi 85% i 33% za normalna naprezanja od 20 kN/m<sup>2</sup> i 30 kN/m<sup>2</sup>. Kod povećanja normalnih naprezanja 3D mehanizam interakcije nestaje, što potvrđuje činjenicu da je 3D mehanizam posljedica djelovanja ograničene dilatancije. Dilatancija se smanjuje s povećanjem normalnog naprezanja, slika 3-12. Minimalni 3D efekt je određen za uzorke širine manje od 20 cm. Pretpostavlja se da je to zbog toga što se obujam ( $B_e$ ) od oba ruba preklapa, slika 3-13. Utjecaj 3D efekta smanjuje se s povećanjem normalnog naprezanja; kod normalnih naprezanja od 50 kN/m<sup>2</sup> povećanje normalnih naprezanja je minimalno. To u konačnici znači da se 3D efekt kod upotrebe traka u konstrukcijama od armiranog tla može zanemariti za visine nasipa veće od 2,5 m.



**Slika 3-12** Mjerena dilatancija za vrijeme ispitivanja izvlačenja geomreže (Alfaro et al. 1995)



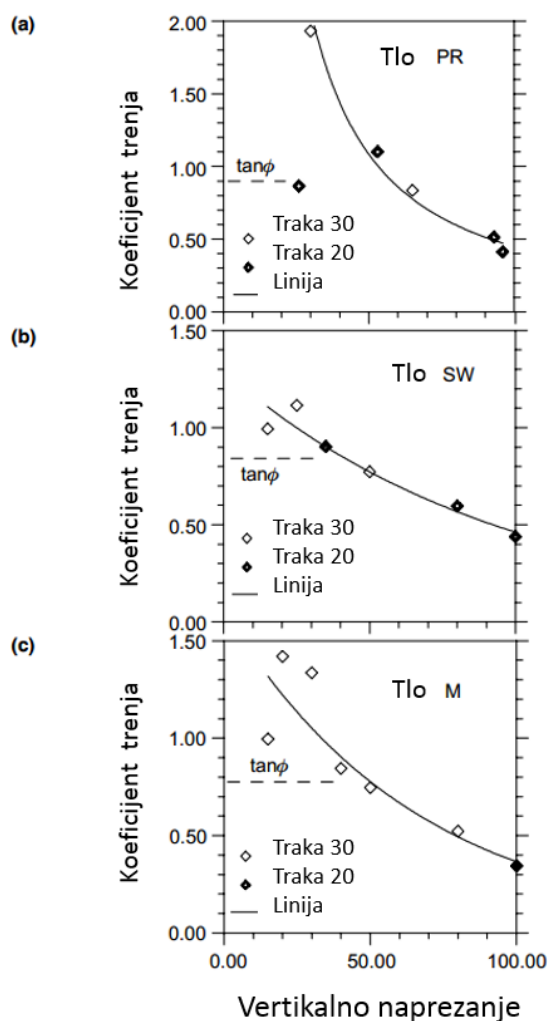
**Slika 3-13** Interakcija tla i armature: a) geomreža malo uža od kutije i b) uski uzorak geomreže (Alfaro et al. 1995)

Lo (1998) je proveo ispitivanje izvlačenja geosintetičke trake i nekoherentnog tla u velikom uređaju za ispitivanje izvlačenja. Autor je u ispitivanju koristio geosintetičke trake nosivosti 20 i 30 kN i tri različite vrste nekoherentnog tla. Tlo korišteno u ispitivanju bio je dobro graduiran pjeskoviti šljunak (oznaka PR) s manje od 15% sitnih čestica (manjih od 75  $\mu\text{m}$ ), dobro graduiran šljunkovit pijesak (oznaka SW) i dobro graduiran pijesak s nešto šljunka (oznaka M). Uzorak je ispitivan u kutiji dimenzija 1x1 m s konstantnim prirastom deformacija od 1 mm/min. Ispitivanja su provedena za vertikalna opterećenja od 15 do 100 kPa. Rezultati ispitivanja su pokazali da je kod malih vertikalnih opterećenja koeficijent interakcije veći od  $\tan\phi$ , slika 3-14. Ovo je objašnjeno efektom spriječene dilatancije i hrapavom površinom polieterske trake. Kod naprezanja većih od 100 kPa, izmjereni faktor trenja je manji od onog koji se dobije empirijskom relacijom za kut trenja na kontaktu armature i tla  $\tan\delta$ , gdje je  $\tan\delta$  vršni kut trenja na kontaktu armature i tla izmjeren izravnim posmikom.

$$\tan\delta = 0,7 \tan\phi \quad (3-4)$$

Kod većih vertikalnih opterećenja efekt spriječene dilatancije je mali i zato je koeficijent interakcije manji.

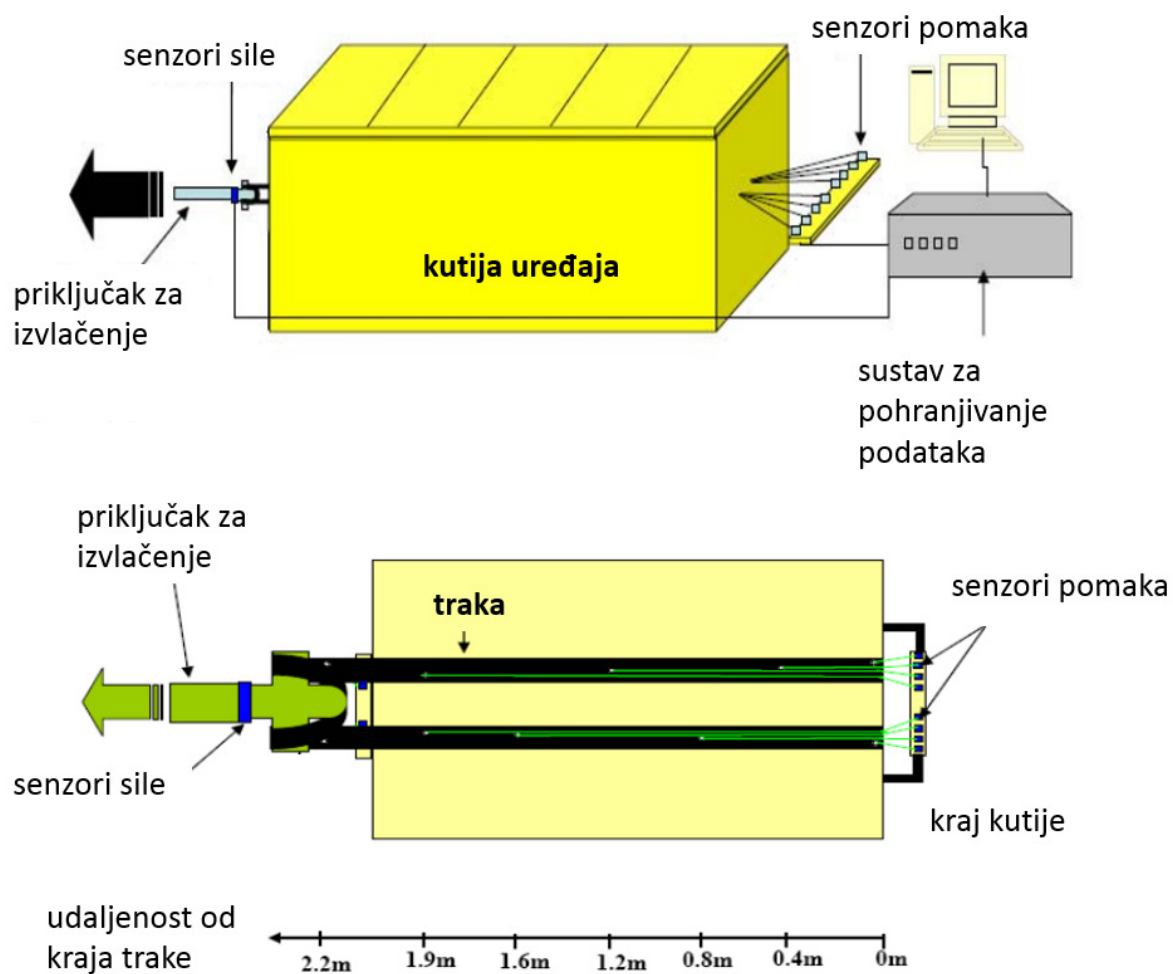




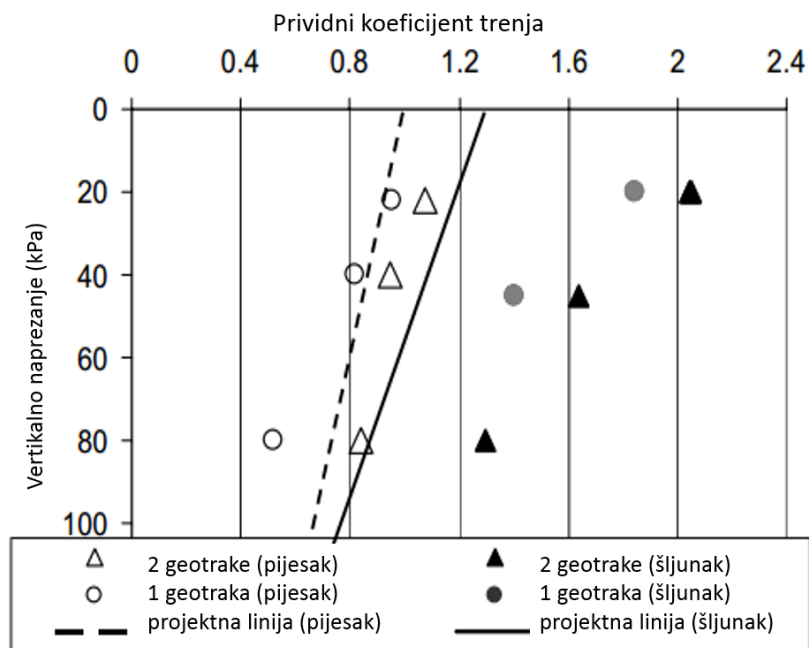
**Slika 3-14** Koefficient interakcije za različita vertikalna opterećenja (Lo 1998)

Abdelouhab i dr. (2009) proveli su ispitivanja otpornosti na izvlačenje sintetičkih traka kako bi objasnili ponašanje tih traka u tlu i odredili parametre interakcije na kontaktu trake i tla (pijeska i šljunka). Autori su provodili ispitivanja za slučaj s izvlačenjem jedne trake i izvlačenjem dvije trake (slika 3-15), za tri različita vertikalna opterećenja (20 kPa, 45 kPa, 80 kPa) kojima je simulirana različita dubina ugradnje traka. Rezultati provedenih ispitivanja pokazuju da je trenje na kontaktu trake i tla veće kad je materijal ispune šljunak. Ova razlika povezana je s većom gustoćom i koefficientom nejednoličnosti  $C_u$  što dovodi do većeg kuta dilatancije i kuta trenja. Također provedenim ispitivanjima je pokazano da se kod ispitivanja s dvije trake dobiva veći koefficient trenja, slika 3-16. Autori navode da je mogući uzrok većeg koefficienta trenja kod ispitivanja dviju paralelnih traka efekt svodnog djelovanja ili dilatancija tla između traka. Također ističu da je koefficient interakcije 10% veći od onog koji se koristi u praksi za slučaj

kada se kao materijal ispune koristi pijesak, dok je za slučaj kada se koristi materijal ispune šljunak, koeficijent trenja veći i do 50% u odnosu na koeficijent koji se koristi u praksi. Usporedba rezultata izvlačenja za isto vertikalno naprezanje, a u različitoj vrsti tla pokazuje da je ponašanje traka različito ovisno o vrsti tla. Veće trenje na kontaktu trake i tla uzrokuje veće vlačne sile u traci, a samim time i veće produljenje (Abdelouhab et al. 2009).

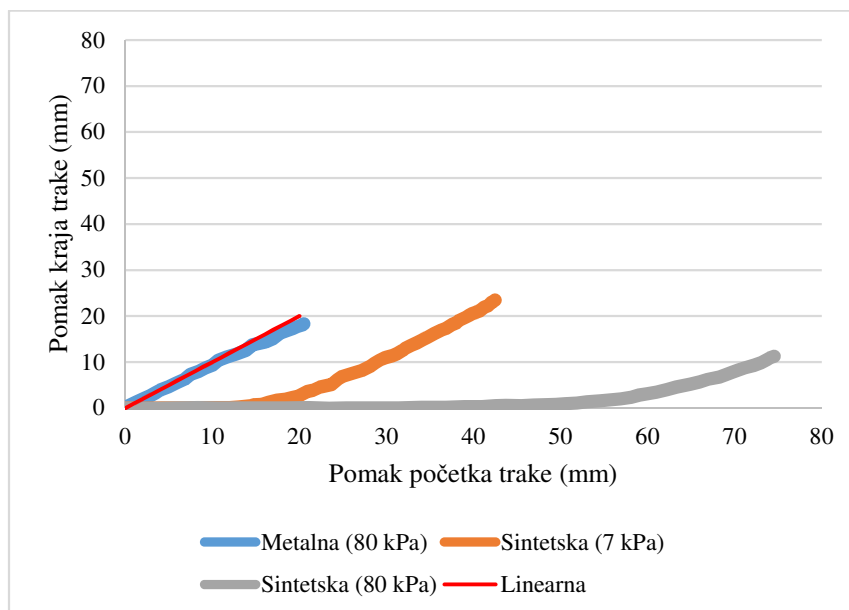


**Slika 3-15** Geosintetičke trake ugrađene u uređaju za izvlačenje armature iz tla (Abdelouhab et al. 2009)



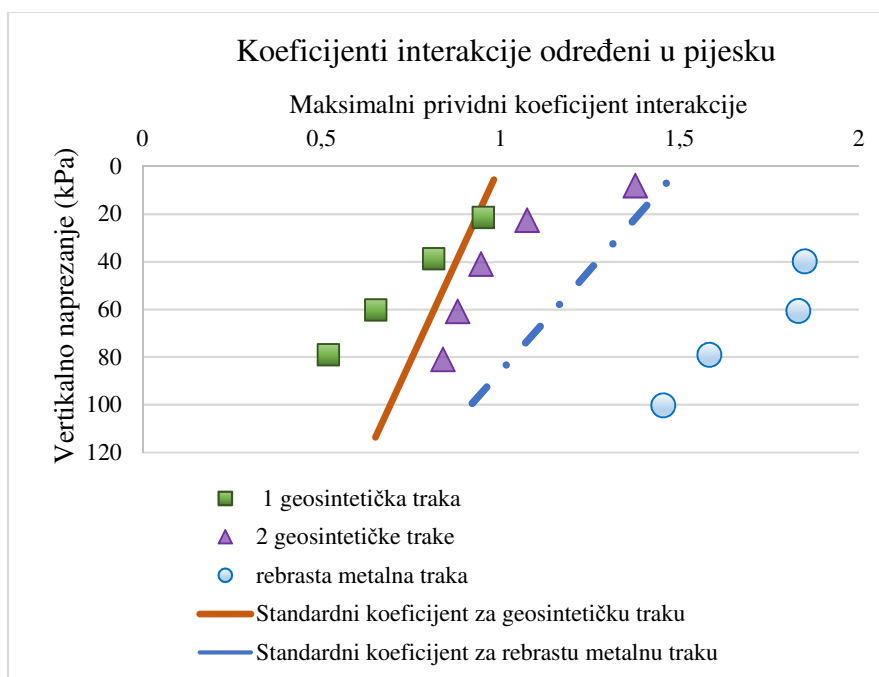
**Slika 3-16** Utjecaj normalnog napreznja na koeficijent interakcije geosintetičke trake i tla (Abdelouhab et al. 2009)

Abdelouhab et al. (2010) istraživali su koeficijent trenja koji se javlja na kontaktu istežljivih sintetičkih traka (GeoStrap 37,5) i tla (pijeska) i metalnih rebrastih traka i tla. Autori su proveli ukupno 26 ispitivanja: 5 s metalnim rebrastim trakama, 8 s jednom geosintetičkom trakom i 13 s dvije paralelne geosintetičke trake. Ispitivanja su provedena za pet različitih vertikalnih opterećenja (7 kPa, 22 kPa, 40 kPa, 60 kPa i 80 kPa) čime je simulirana različita dubina ugradnje traka u konstrukcijama od armiranog tla. Na temelju provedenih istraživanja Abdelouhab et al. (2010) zaključili su da se ponašanje metalnih i sintetičkih traka znatno razlikuje. Kod metalnih traka trenje se mobilizira duž trake trenutno, dok se kod sintetičkih traka vlačno napreznja i pomak postupno mobiliziraju od početka do kraja trake, slika 3-17.



**Slika 3-17** Pomak kraja trake i početka trake (Abdelouhab et al. 2010)

Autori su zaključili da se koeficijent interakcije smanjuje s povećanjem vertikalnog opterećenja za oba tipa traka, slika 3-18.



**Slika 3-18** Promjena koeficijenta interakcije s povećanjem vertikalnog opterećenja (Abdelouhab et al. 2010)

## 4 ODREĐIVANJE PARAMETARA ČVRSTOĆE KAMENE ISPUNE

Određivanje parametara čvrstoće kamene ispune provedeno je na velikom uređaju za izravni posmik koji je razvijen na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

### 4.1 Opis uređaja

U sklopu projekta provedena je nadogradnja postojećeg uređaja za izravno smicanje koji je bio namijenjen za ispitivanje stjenovitih materijala. Nadogradnja je uključivala izradu kutije za smicanje s odstoynim ležajevima kojima se osigurava razmak između kutija za vrijeme ispitivanja, nabavku tri mjerila pomaka (Linearni varijabilni diferencijalni transformator, LVDT) i nosača mjerila pomaka te razvoj novog računalnog programa kojim se automatski vodi postupak ispitivanja i provodi prikupljanje svih mjerenih veličina.

Glavni dijelovi novog velikog uređaja za izravni posmik su: okvir cijelog uređaja, kutija za smicanje, donje i gornje čeljusti preko kojih se nanosi normalno i posmično opterećenje, hidraulički potisni cilindri, hidrauličke pumpe, ležajevi po kojima se pomiče donji dio kutije, mjerila opterećenja, polukuglični ležajevi kojima se osigurava ravnomjeran prijenos sile s cilindra na uzorak, mjerila horizontalnih i vertikalnih pomaka, računalo kojim se prati ispitivanje. Okvir uređaja izrađen je od osam U-profila koji su međusobno spojeni varom. On se sastoji od gornjeg i donjeg nosača okvira, od kojih se svaki sastoji od dva U-profila zavarena po dužini, te četiri U-profila koji ih povezuju, a koji ujedno služe i kao uporište na podu. Okvir je dimenzioniran za horizontalne i vertikalne sile do 400 kN (Petzel 1992). Na donji nosač postavlja se čelična ploča na koju se stavljaju ležajevi po kojima se pomiče donja čeljust s donjim dijelom kutije. Na ležajeve se dakle postavlja donja čeljust na koju se postavlja kutija uređaja za izravni posmik. Kutija ima unutarnje dimenzije 300 × 300 × 300 mm, a sastoji se od dva dijela, donjeg pomičnog i gornjeg nepomičnog dijela. Kod donjeg dijela dno kutije je zavareno za okvir kutije, dok se kod gornjeg dijela poklopac preko vijaka spaja na okvir kutije. Između poklopca kutije i materijala koji je ugrađen u kutiji stavlja se aluminijska ploča preko koje se nanosi opterećenje na materijal ugrađen u kutiji. Ploča je dimenzija 300 × 300 × 300

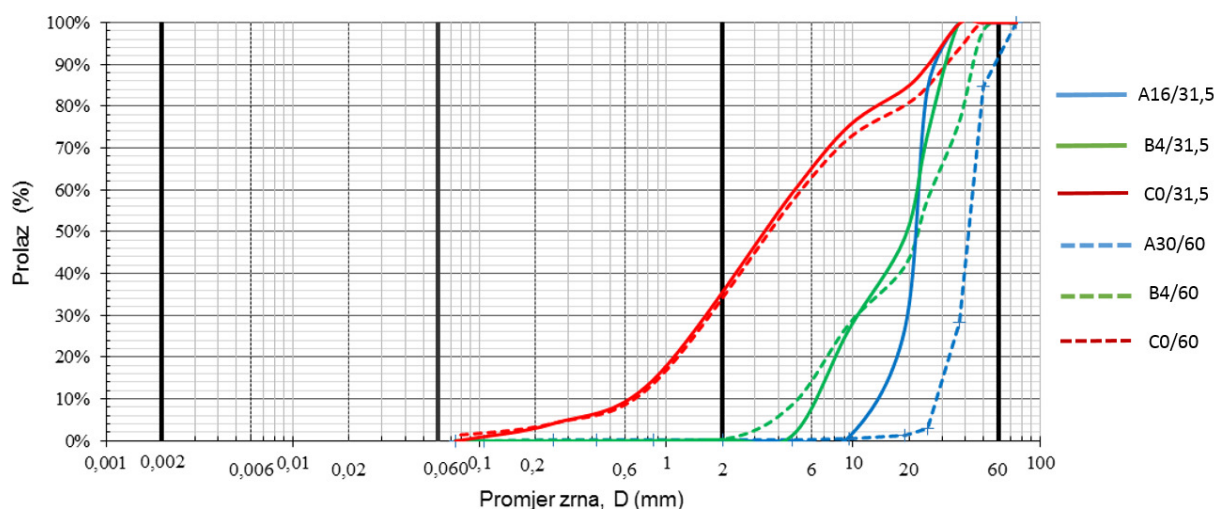
mm i debljine 30 mm. Na ploču se postavlja poklopac kutije na kojeg se postavlja gornja čeljust. Za postizanje vertikalne i horizontalne sile koriste se hidraulički potisni cilindri koji su smješteni unutar okvira uređaja za izravni posmik. Ravnomjieran prijenos sile s hidrauličkih cilindara na uzorak osiguran je upotrebom polukugličnih ležajeva koji se nalaze na gornjoj i donjoj čeljusti i na ploči koja je smještena na poklopcu kutije uređaja. Hidrauličkim cilindrima može se ostvariti maksimalna sila od 400 kN. Na slici 4-1 prikazan je uređaj za izravni posmik koji je razvijen na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu.



**Slika 4-1** Veliki uređaj za izravni posmik

## 4.2 Materijal korišten u ispitivanju

Ispitivanja parametara čvrstoće provedena su za tri uzorka drobljenog kamena različitog granulometrijskog sastava kod tri različita vertikalna naprezanja. Ukupno je provedeno 9 ispitivanja. Materijal korišten u ispitivanjima je lomljeni kamen, dolomit, koji je dopremljen iz kamenoloma Radlovac. Iz kamenoloma je dopremljen materijal s frakcijama od 0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm i 16 - 31,5 mm. Ispitivanja su provedena za tri različita granulometrijska sastava materijala, označena kao materijal A16/31,5, B4/31,5 i C0/31,5. Granulometrijski sastav materijala određen je tako da zadovolji zahtjev norme (max zrno je 10 puta manje od dimenzije kutije) i da se ujedno može provesti usporedba parametara čvrstoće s parametrima čvrstoće materijala koji je korišten u ispitivanju otpornosti na izvlačenje (A0/60, B4/60 i C0/60). Na dijagramu na slici 4-2 isprekidanom linijom prikazan je granulometrijski sastav materijala koji je korišten u ispitivanjima izvlačenja trake iz lomljenog kamena, dok je punom linijom prikazan granulometrijski sastav materijala koji je korišten u ispitivanjima izravnog smicanja. Materijal korišten u ispitivanju prikazan je slikom 4-3.



**Slika 4-2** Granulometrijski sastav materijala korišten u ispitivanju izravnog smicanja





**Slika 4-3** Materijal korišten u ispitivanju A16/31,5, B4/31,5 i C0/31,5

### 4.3 Ugradnja materijala i provedba ispitivanja

Probna ispitivanja ugradnje materijala provedena su za frakciju s promjerom zrna od 0 – 31,5 mm upotrebom ručnog modificiranog Proctorovog uređaja. Materijal je u kutiju uređaja ugrađen u pet slojeva, a za svaki sloj je uzeta jednaka masa materijala koja je iznosila približno 10 kg. Za zbijanje je korišten Proctorov uređaj s masom bata od 4,5 kg koji je padao s visine od 42,5 cm. Nakon ugradnje uzorka iz poznate mase ugrađenog materijala i poznatog volumena određena je gustoća ugrađenog materijala koja je bila manja od željene gustoće. Kako bi se postigla veća gustoća, odlučeno je da će se materijal zbijati pomoću udarnog čekića koji na sebi ima nastavak sa zavarenom metalnom pločom dimenzija 150 × 150 mm, slika 4-4. Na rubove kutije postavljen je sloj najlona kako bi se smanjilo trenje između materijala i stjenki kutije. Materijal je u kutiju ugrađen u pet slojeva koji su zbijani pomoću udarnog čekića, a za svaki sloj je uzeta približno jednaka masa materijala. Nakon ugradnje zadnjeg sloja na sloj se postavlja aluminijska ploča i mjeri se visina od kutije do vrha aluminijske ploče. Iz poznate mase ugrađenog materijala i poznatog volumena kutije, određena je gustoća za svaki ugrađeni uzorak materijala, a rezultati izmjerenih gustoća prikazani su tablicom 4-1. Najmanja gustoća materijala postigla se za jednoliko graduirani materijal s rasponom frakcija od 16 do 31,5 mm,



dok je najveća gustoća postignuta za dobro graduirani materijal s rasponom frakcija od 0 do 31,5 mm.



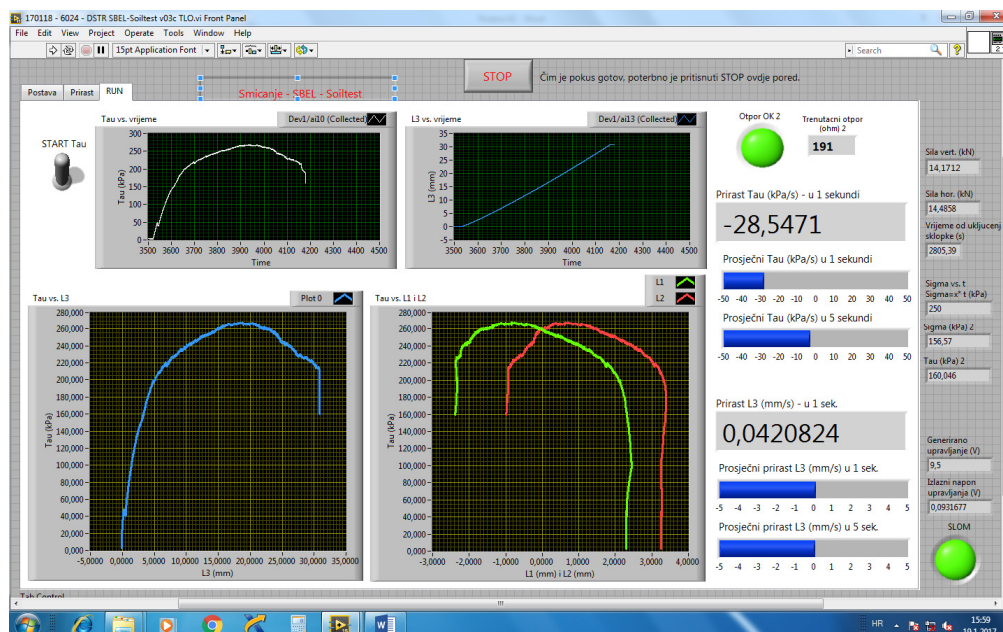
**Slika 4-4** Ugradnja uzorka u kutiju

**Tablica 4-1** Gustoća materijala ugrađenog u kutiju

Oznaka uzorka		Gustoća	Srednja
		$\text{g/cm}^3$	vrijednost
		$\text{g/cm}^3$	$\text{g/cm}^3$
A16/31,5	17-001-001	1,82	1,76
	17-001-002	1,76	
	17-001-003	1,70	
B4/31,5	17-001-004	1,89	1,91
	17-001-005	1,96	
	17-001-006	1,89	
C0/31,5	17-001-007	2,16	2,15
	17-001-008	2,14	
	17-001-009	2,15	

Ispitivanje u uređaju za izravni posmik odvija se u dvije faze. Prva faza predstavlja fazu konsolidacije, a druga fazu smicanja. U prvoj fazi se preko gornjeg hidrauličkog cilindra nanosi vertikalno opterećenje na uzorak. Ravnomjerno nanošenje vertikalnog opterećenja na uzorak osigurano je upotrebom polukugličnog ležaja. Vertikalni pomaci uslijed konsolidacije materijala prate se preko dva LVDT mjerila pomaka koji su dijametralno smješteni na gornjoj ploči okvira kutije. Proces konsolidacije je kod ovih materijala praktično trenutno s nanošenjem opterećenja. Ova faza ispitivanja završava kad se postigne željeno vertikalno naprezanje i kad se kod njega završi slijeganje materijala uzorka. Da je završena faza konsolidacije vidi se po grafičkom i brojčanom prikazu vrijednosti vertikalnih pomaka unutar računalnog programa kojim se vodi postupak ispitivanja.

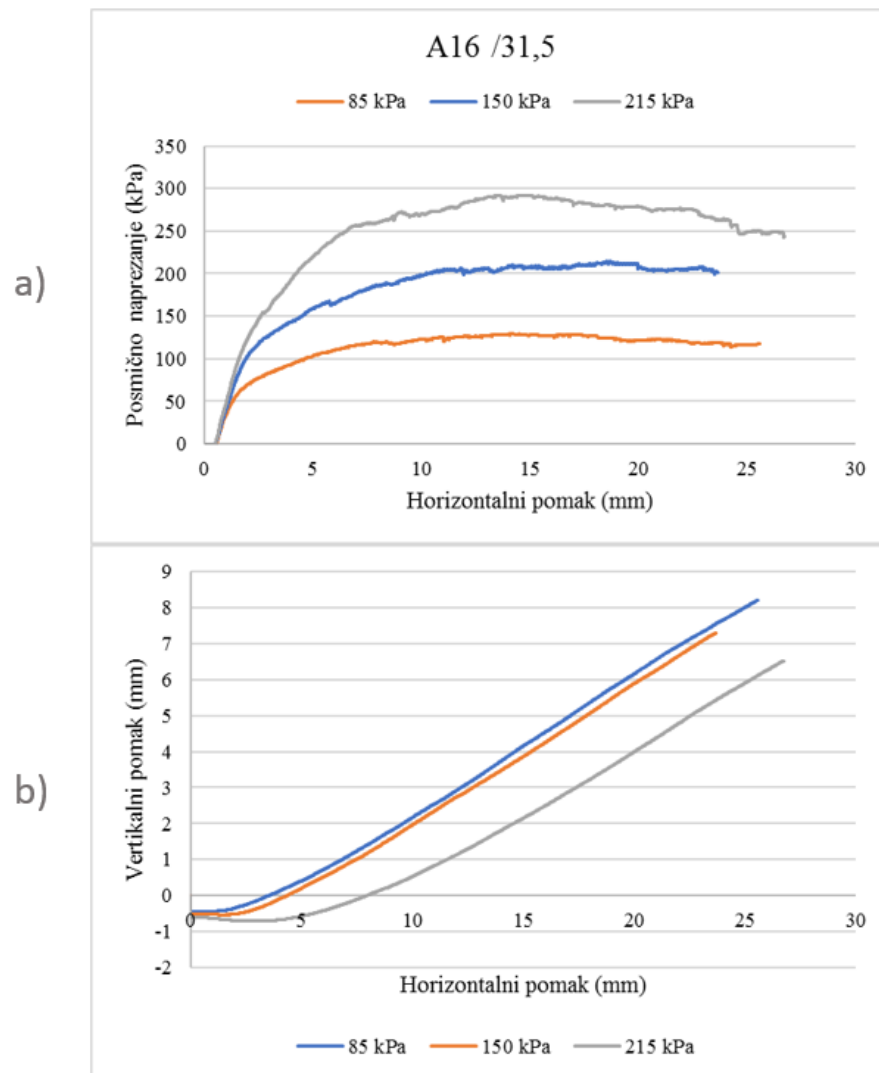
Druga faza kod izravnog posmika uključuje nanošenje horizontalnog pomaka donjeg dijela kutije i praćenje vertikalnih i horizontalnih pomaka, te praćenje razvoja posmičnog naprezanja. Prije početka ispitivanja potrebno je razdvojiti gornji i donji okvir kutije pomoću četiri za to namijenjena vijka. Kako bi se osigurao konstantan razmak između okvira za vrijeme ispitivanja, u prostor između okvira postavljaju se četiri odstojna ležaja. Ispitivanje je ovom trenutku moguće provesti za tri različita vertikalna razmaka okvira (7,5; 10 i 15 mm). Prema normi ASTM D 3080-03, koja se zapravo većim dijelom odnosi na ispitivanje parametra čvrstoće u malom uređaju za izravni posmik, navodi se da je ponekad potrebno povećati razmak između okvira, ali da nema dovoljno dostupnih informacija kako bi se odredio potreban razmak okvira ovisno o granulometrijskom sastavu materijala. Uglavnom se predlaže razmak u vrijednosti od pola promjera najvećeg zrna. Utjecaj veličine razmaka okvira kutije za ispitivanje drobljenog kamena predviđeno je u daljnjim ispitivanjima, ali nije moglo biti obuhvaćeno ovim radom. Nakon što se osigura potreban razmak između gornje i donje kutije može se krenuti s nanošenjem horizontalnog (posmičnog) opterećenja. Ono se nanosi uz pomoć horizontalnog hidrauličkog cilindra preko polukugličnog ležaja na donju čeljust i donji dio kutije. Za vrijeme ispitivanja kontinuirano se mjere i pohranjuju sve veličine, odnosno sile potisnih cilindara, vertikalni pomaci ploče gornjeg dijela kutije te horizontalni pomak donjeg dijela kutije. Ovo se provodi pomoću aplikacije koja je razvijena u računalnom programu LabVIEW kojom se, uz navedeno, istovremeno i prikazuju mjereni podaci u numeričkom i grafičkom obliku te provodi upravljanje sustavom na temelju zadanih parametara, slika 4-5.



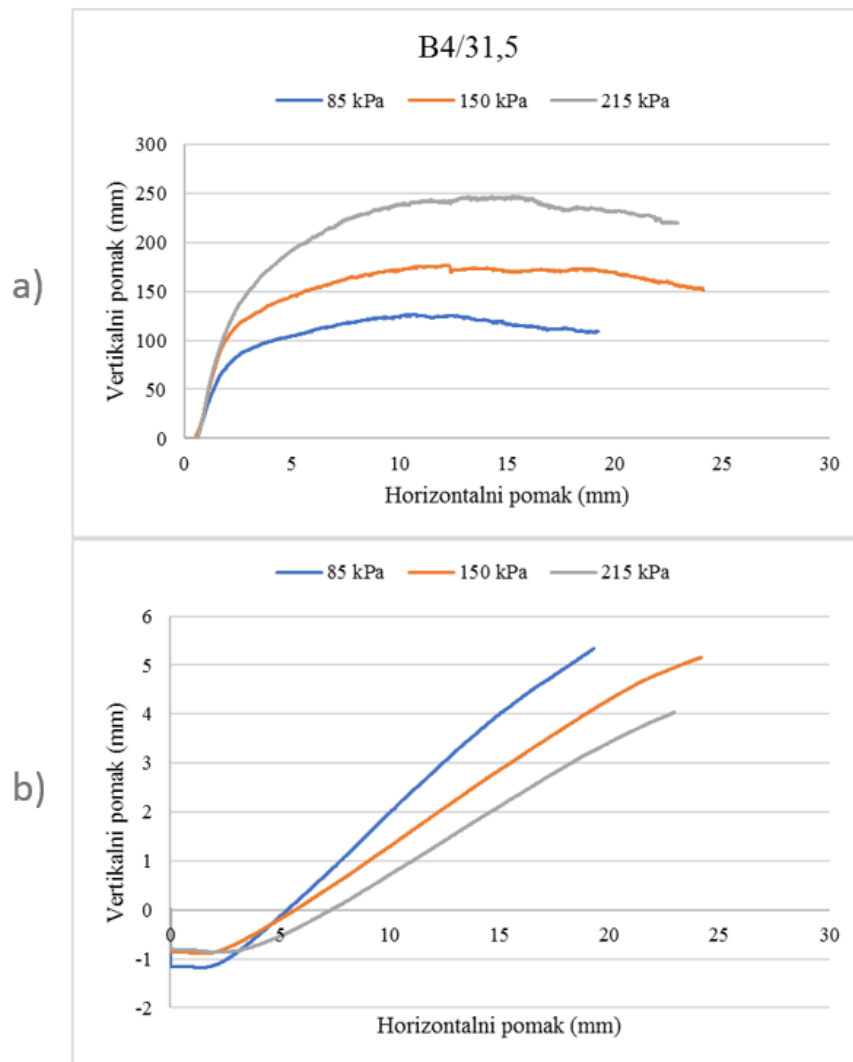
Slika 4-5 Praćenje ispitivanja preko posebno razvijenog programa

#### 4.4 Prikaz i analiza rezultata

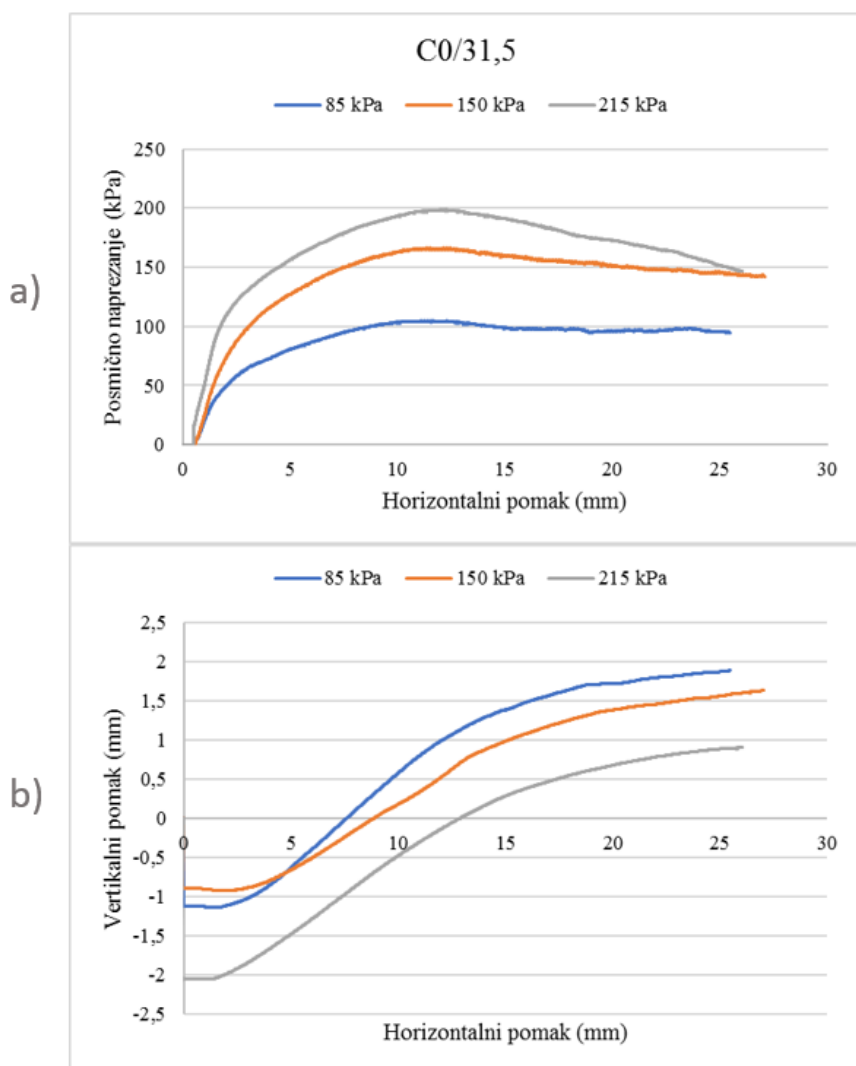
Ukupno je provedeno devet ispitivanja, a parametri čvrstoće određeni su za svaku frakciju posebno. Rezultati ispitivanja prikazani su dijagramima horizontalnog pomaka i posmičnog naprezanja i dijagramima horizontalnog i vertikalnog pomaka za sva tri granulometrijska sastava materijala (slika 4-6 do 4-8). Iz dijagrama se vidi da s porastom normalnog naprezanja raste i posmično naprezanje, te da je za isto normalno naprezanje najveće posmično naprezanje kod sloma postignuto za jednoliko graduirani materijal s rasponom frakcija od 16-31,5 mm, dok je najmanje posmično naprezanje postignuto kod dobro graduiranog materijala s rasponom frakcija od 0-31,5 mm. Također se može uočiti da je za sva tri uzorka u početnoj fazi smicanja došlo do slijeganja uzorka, koje je najizraženije kod frakcije C0/31,5 dok je najmanje slijeganje bilo za frakciju A16/31,5. Nakon početne faze slijeganja kod sva tri uzorka došlo je do faze izdizanja (dilatancije) koja je najizraženija za frakciju A16/31,5 dok je najmanje izražena za frakciju C0/31,5. Iz dijagrama vertikalnog pomaka može se vidjeti da je kod frakcije A16/31,5 dilatancija bila prisutna do kraja ispitivanja dok kod frakcije 0/31,5 krivulja vertikalnog pomaka pokazuje tendenciju postizanja konstantnog vertikalnog pomaka.



**Slika 4-6** Dijagrami a) Horizontalnog pomaka i posmičnog naprezanja i b) Horizontalnog pomaka i vertikalnog pomaka za frakciju A16/31,5



**Slika 4-7** Dijagrami a) Horizontalnog pomaka i posmičnog naprezanja i b) Horizontalnog pomaka i vertikalnog pomaka za frakciju B4/31,5



**Slika 4-8** Dijagrami a) Horizontalnog pomaka i posmičnog naprezanja i b) Horizontalnog pomaka i vertikalnog pomaka za frakciju C0/31,5

Parametri čvrstoće lomljenog kamena određeni su na temelju pravca čvrstoće koji odgovara Mohr-Coulombovom zakonu čvrstoće. Ovaj model opisuje linearnu vezu između normalnog i posmičnog naprezanja kod sloma. Mohr-Coulombov model opisan je relacijom 4-1.

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (4-1)$$

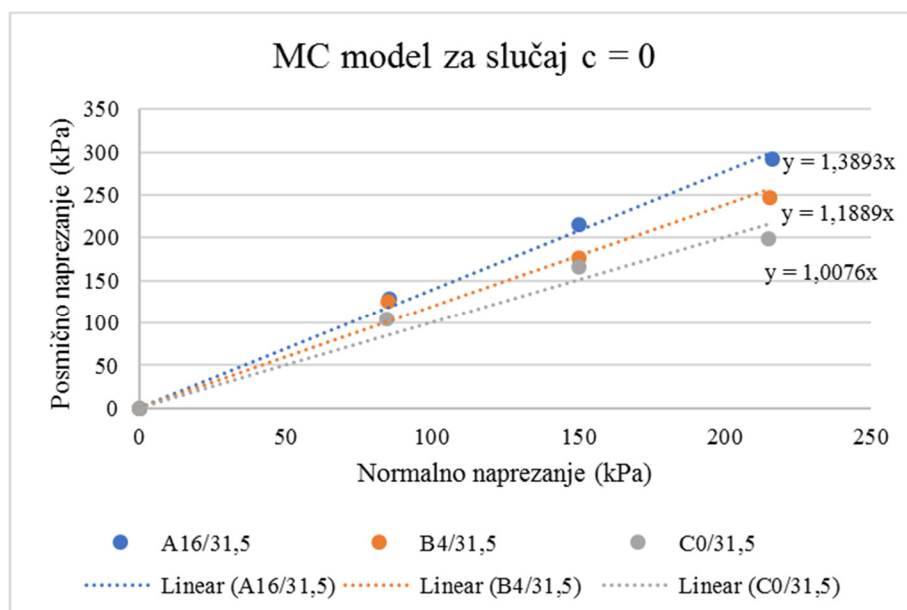
gdje je:

- $\tau$  – vršno posmično naprezanje
- $\sigma_n$  – vršno normalno naprezanje
- $\varphi$  – kut unutarnjeg trenja
- $c$  – kohezija.

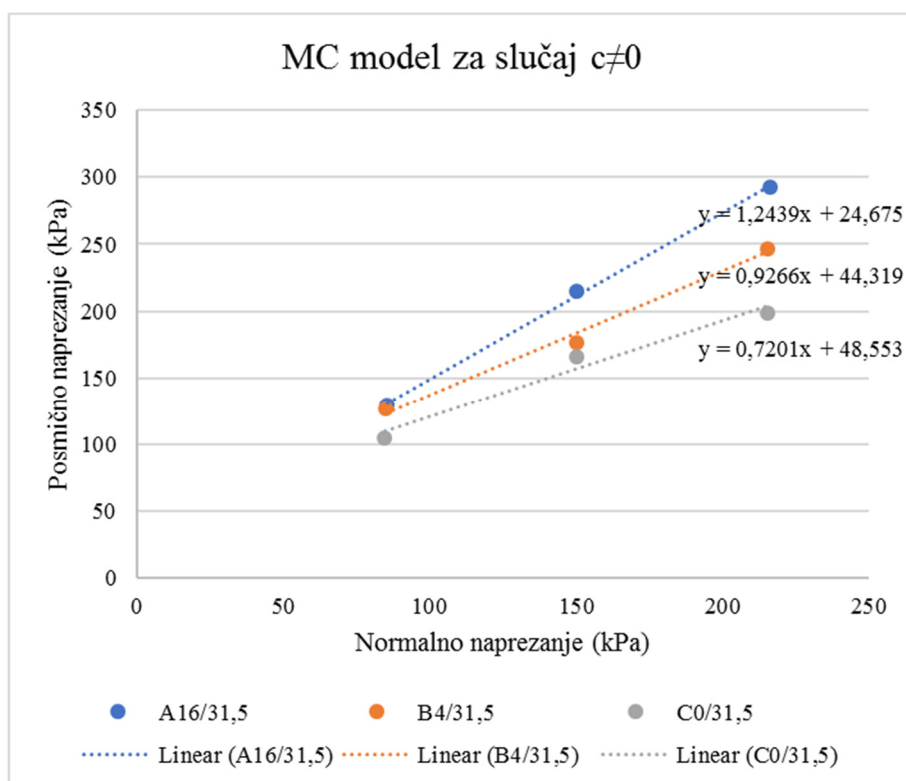
Parametri čvrstoće određeni su Mohr-Coulombovim modelom za dvije različite hipoteze. U prvoj hipotezi je pretpostavljeno da je kohezija jednaka nuli, dok je u drugoj hipotezi pretpostavljeno da je kohezija različita od nule, odnosno da postoji prividna kohezija. Za obje hipoteze dobiveno je da su kutovi unutarnjeg trenja najveći za frakciju A16/31,5 dok su najmanji kutovi dobiveni za frakciju C0/60. Najveća razlika u kutovima unutarnjeg trenja određenim prema hipotezi 1 i 2 je za materijal C0/31,5 i iznosi  $9,5^\circ$ , dok je kod materijala A16/31,5 ta razlika manja i iznosi  $3^\circ$ . Kutovi unutarnjeg trenja određeni prema hipotezi 1 i 2 prikazani su u tablicom 4-2 i dijagramima na slikama 4-9 i 4-10. Ovi rezultati u skladu su s rezultatima Douglas (2002) da slabo graduirani materijali imaju veći kut trenja od dobro graduiranih materijala, zato jer će kod dobro graduiranog materijala doći do reduciranja dilatancije uslijed činjenice da su pore kod dobro graduiranog materijala ispunjene manjim česticama.

**Tablica 4-2** Kutovi trenja i kohezija prema hipotezi 1 i 2

	Hipoteza 1 ( $c = 0$ )	Hipoteza 2 ( $c \neq 0$ )	
	Kut unutarnjeg trenja ( $^\circ$ )	Kut unutarnjeg trenja ( $^\circ$ )	Kohezija (kPa)
A16/31,5	54,3	51,2	24,7
B4/31,5	49,9	42,8	44,3
C0/31,5	45,2	35,7	48,6



**Slika 4-9** Linearna MC anvelopa sloma za slučaj kad je  $c=0$



**Slika 4-10** Linearna MC anvelopa sloma za slučaj kad je  $c \neq 0$

Douglas (2002) navodi da je sekantni kut unutarnjeg trenja taj koji se najčešće navodi kada se provodi ispitivanje na krupnozrnatom materijalu pa je i kod ovih ispitivanja uz kut trenja određen MC modelom dodatno određen i sekantni kut unutarnjeg trenja. Sekantni kut unutarnjeg trenja ( $\varphi_{sec}$ ) kod sloma određen je preko relacije (4-2):

$$\varphi_{sec} = \tan^{-1} \left( \frac{\tau_{vršno}}{\sigma_{vršno}} \right) \quad (4-2)$$

Gdje je:

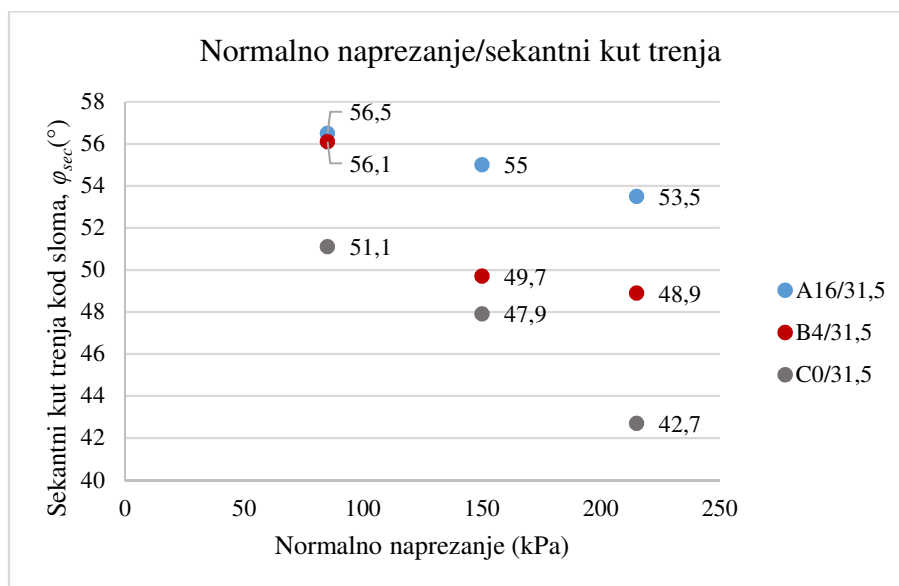
$\tau_{vršno}$  – posmično naprežanje kod sloma

$\sigma_{vršno}$  – normalno naprežanje kod sloma.

Dijagramom na slici 4-11 prikazani su sekantni kutovi unutarnjeg trenja za sva tri materijala kod tri različita normalna naprežanja. Iz dijagrama se vidi da su najveći kutovi unutarnjeg trenja za materijal A16/31,5 dok su najmanji kutovi unutarnjeg trenja za materijal A0/31,5. Također se može uočiti da s porastom vertikalnog naprežanja pada kut unutarnjeg trenja. Sekantni kutovi unutarnjeg trenja kod naprežanja 50 kPa i 150 kPa veći su od kutova unutarnjeg trenja određenih MC modelom (hipoteza 1 i 2), dok su kod naprežanja od 215 kPa dobiveni manji



kutovi unutarnjeg trenja u odnosu na model MC (hipoteza 1) i veći u odnosu na MC model (hipoteza 2).



**Slika 4-11** Sekantni kut trenja i normalno naprezanje za sve tri frakcije materijala

Još jedan važan parametra kod krupnozrnatog materijala je kut dilatancije materijala. Xiao i drugi (2016) navode da postojeće relacije za određivanje dilatancije i konstitutivni modeli nisu pogodni za opisivanje kompleksnog ponašanja kamenog agregata te da je potrebno predložiti jedinstven konstitutivni model za lomljeni kamen uzimajući u obzir naprezanje i slom zrna. Nicks (2013) i Simoni i Houlsby (2006) navode da je kut dilatancije ( $\psi$ ) jednak inkrementalnom vertikalnom pomaku uzorka ( $\Delta y$ ) prema inkrementalnom horizontalnom pomaku ( $\Delta x$ ).

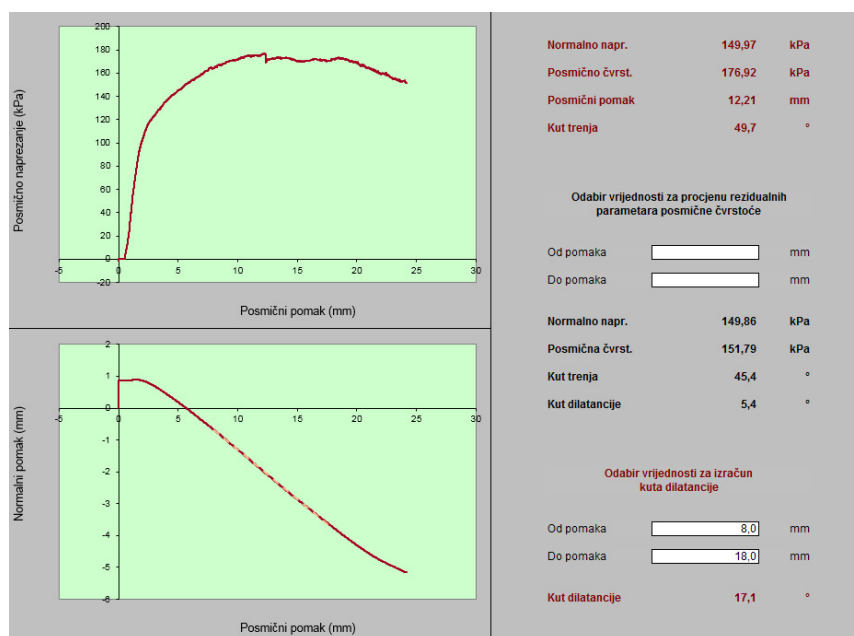
$$\tan\psi = \frac{dy}{dx} \quad (4-3)$$

Ova relacija korištena je za određivanje kuta dilatancije lomljenog kamena različitog granulometrijskog sastava. Kod ispitivanja na velikom uređaju za izravni posmik koji je razvijen na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu vertikalni pomak pratio se s dva LVDT mjerila pomaka smještena na dijametralnim stranama na poklopcu kutije, dok je horizontalni pomak praćen preko jednog LVDT mjerila pomaka koji je namješten da mjeri pomak donje čeljusti i donji okvir kutije, slika 4-12. Kod proračuna kuta dilatancije uzeta je srednja vrijednost pomaka od dvije izmjerene vertikalne vrijednosti i izmjerena vrijednost horizontalnog pomaka na temelju koje je određena krivulja odnosa horizontalnog i vertikalnog pomaka. Iz linearnog dijela krivulje metodom najmanjih kvadrata određen je kut dilatancije, na slici 4-13 prikazan je dijagram za odabir vrijednosti kojima je određen kut dilatancije za materijal B4/31,5 kod 150

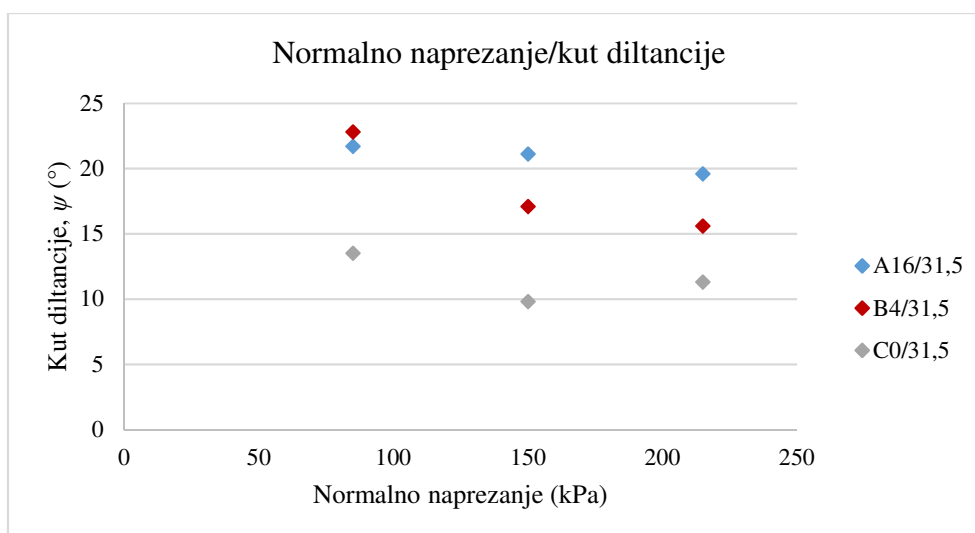
kPa. Metoda najmanjih kvadrata za odabrano područje horizontalnih pomaka korištena je u obradi svih provedenih ispitivanja. Kutovi dilatancije određeni ovom metodom prikazani su dijagramom na slici 4-14 u odnosu na normalno naprezanje. Iz dijagrama se vidi da je najveći kut dilatancije za materijal B4/31,5, dok je najmanji kut dilatancije određen za materijal C0/31,5, također se može uočiti da kut dilatancije pada s porastom normalnog naprezanja.



Slika 4-12 LVDT mjerila kojima se prate vertikalni pomaci i horizontalni pomak



Slika 4-13 Program za obradu podataka kod ispitivanja na velikom uređaju za izravni posmik

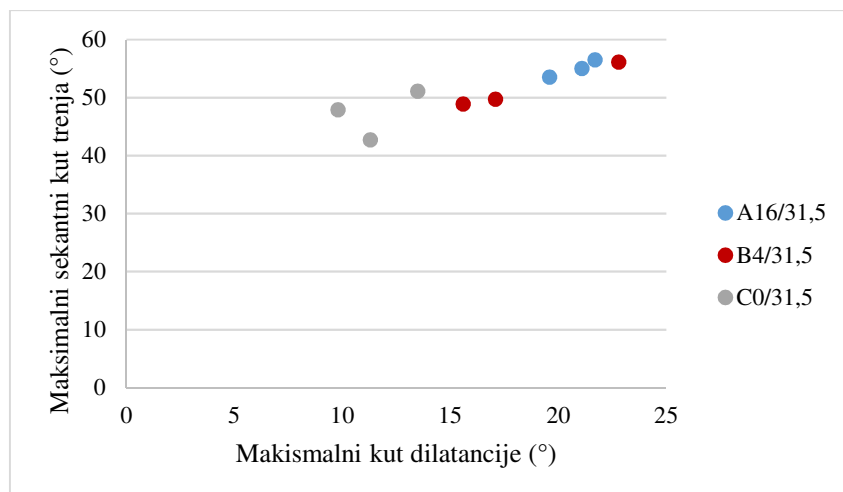


**Slika 4-14** Dijagram normalnog naprezanja i kuta dilatancije za lomljeni kamen različitog granulometrijskog sastava

Sekantni kutovi trenja i kutovi dilatancije za lomljeni kamen različitog granulometrijskog sastava prikazani su u tablici 4-3 i dijagramom na slici 4-15. Iz dijagrama se vidi da su najmanji kutovi trenja i dilatancije određeni za frakciju C0/31,5, dok su najveći kutovi trenja i dilatancije određeni za jednoliko graduirani materijal A0/31,5. Generalno se može zaključiti da kutovi trenja i dilatancije padaju s porastom normalnog naprezanja, te da su veći kod jednoliko graduiranog materijala koji ima manji postotak sitnih čestica. Ovi rezultati u skladu su s rezultatima Douglas (2002).

**Tablica 4-3** Sekantni kutovi trenja i kutovi dilatancije određeni ispitivanjima u velikom uređaju za izravni posmik

	Normalno naprezanje (kPa)	Sekantni kut trenja (°)	Kut dilatancije (°)	Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )
A16/31,5	85	56,5	21,7	1,760
A16/31,5	150	55	21,1	1,820
A16/31,5	215	53,5	19,6	1,703
B4/31,5	85	56,1	22,8	1,960
B4/31,5	150	49,7	17,1	1,893
B4/31,5	215	48,9	15,6	1,892
C0/31,5	85	51,1	13,5	2,140
C0/31,5	150	47,9	9,8	2,163
C0/31,5	215	42,7	11,3	2,156



**Slika 4-15** Odnos između sekantnog kuta trenja i kuta dilatancije

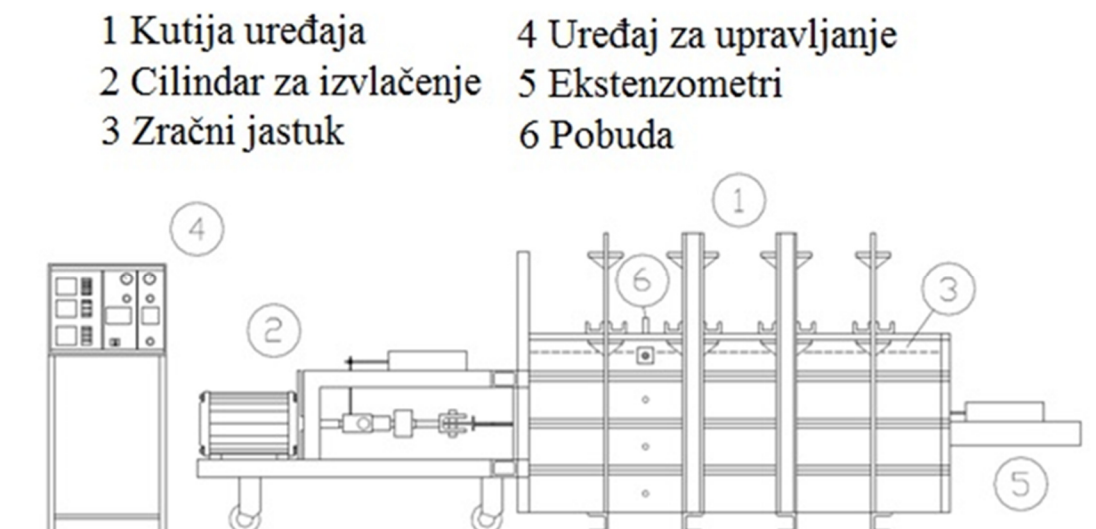
Nicks (2013) navodi da se kod projektiranja zidova od armiranog tla i temeljnog sloja koristi kut trenja od  $34^\circ$  što je prema autoru dosta konzervativni pristup te predlaže, na temelju laboratorijskih ispitivanja na krupnozrnatom materijalu, da se kod projektiranja koristi kut trenja od  $39^\circ$ . Kutovi trenja i dilatancije koji su određeni za lomljeni kamen A16/31,5, B4/31,5 i C0/31,5 također potvrđuju da su kutovi unutarnjeg trenja za lomljeni kamen veći od  $34^\circ$  za naprezanja do 215 kPa. Za kutove unutarnjeg trenja kod većih normalnih naprezanja potrebno je provesti dodatna ispitivanja. Analiza ispitivanja pokazala je da se, ovisno o modelu kojim se određuju kutovi unutarnjeg trenja (MC sa i bez kohezije) i određivanje sekantnog kuta unutarnjeg trenja, dobiju različiti kutovi unutarnjeg trenja i ta razlika je najveća za slučaj kada se uspoređuje sekantni kut unutarnjeg trenja i kut unutarnjeg trenja određen MC pravcem čvrstoće za slučaj s kohezijom. Ispitivanja su također potvrdila da s porastom normalnog naprezanja i porastom udjela sitnijih čestica pada kut unutarnjeg trenja i kut dilatancije.

## 5 ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA INTERAKCIJE GEOSINTETIČKE TRAKE I KAMENE ISPUNE

Istraživanje interakcije geosintetičke trake i kamene ispune provedeno je na Građevinskom fakultetu u Osijeku u velikom uređaju za ispitivanje otpornosti na izvlačenje, tip GFOS.

### 5.1 Opis uređaja GFOS za ispitivanje otpornosti na izvlačenje

Uređaj za ispitivanje otpornosti na izvlačenje, tip GFOS, sastoji se od kutije uređaja u koju se ugrađuje tlo i armatura koja se želi ispitivati (1), sustava za izvlačenje armature (2), sustava za nametanje vertikalnog pritiska pomoću zračnih jastuka (3), sustava za mjerenje i vođenje pokusa (4 i 5), mehaničke pobude za generiranje seizmičkih valova (6) (Minažek 2010). Uređaj je shematski prikazan na slici 5-1.



**Slika 5-1** Elementi velikog uređaja za izvlačenje (Minažek 2010)

Kutija uređaja je modularna i sastoji se od čeličnih okvira visine 20 cm unutarnjih dimenzija 90 × 190 cm. Visina kutije može se varirati postavljanjem određenog broja okvira pri čemu je najmanji broj okvira četiri, a najveći šest. Četiri okvira imaju na prednjoj strani ugrađenu

košuljicu (skošeni metalni rub) širine 25 cm kojom se smanjuje utjecaj prednje stjenke na rezultate ispitivanja. Okviri su izvedeni tako da na prednjoj strani postoji otvor kroz koji se izvlači uzorak armature, dok otvor na stražnjoj strani okvira služi za priključivanje uređaja za mjerenje pomaka. Kutija uređaja zatvara se poklopcem na kojem se nalaze tri zračna jastuka koja omogućuju prenošenje vertikalnog opterećenja na tlo s maksimalnim tlakovima do 200 kPa (slika 5-2). Zračni jastuci su za poklopac pričvršćeni putem spojnicama čiji izvodi izlaze na gornju stranu poklopca i ujedno su mjesta priključka cijevi za punjenje zrakom. Nakon postavljanja poklopca cijela kutija uređaja za izvlačenje učvršćuje se posebnim nosačima koji se vijcima pričvršćuju za okvire i poklopac uređaja. Ispitivanja se provode kontroliranom brzinom pomaka od 1 mm/min, a sila izvlačenja (max 80 kN) mjeri se osjetilom za silu (Minažek i Mulabdić 2013). Sastavni dijelovi sustava za izvlačenje su: posebno razvijeni pričvršćni sustav za prihvat geosintetičke trake (slika 5-3a), osjetilo za silu, sustav za centriranje sile izvlačenja i elektromotorni sustav izvlačenja s reduktorom i pužnim prijenosom (slika 5-3 b). Mjerenje sile provodi se pomoću osjetila za silu najveće mjerne vrijednosti 100 kN, preciznosti 0,1%. Važno je da je sila centrična jer ekscentricitet ili inklinacija mogu dovesti do pogrešaka u mjerenju. Osjetilo za mjerenje sile izvlačenja povezano je preko kontrolnog panela na računalo na kojem se bilježe podaci za vrijeme ispitivanja. Pomak trake mjeri se ekstenzometrima u pet točaka: na cilindru za izvlačenje, te u još četiri točke na samoj traci. Svi ekstenzometri su međusobno povezani te spojeni na kontrolni panel i računalo, a očitavanja se bilježe automatski za vrijeme izvođenja pokusa.



**Slika 5-2** Veliki uređaj za ispitivanje otpornosti na izvlačenje (Minažek 2010)



**Slika 5-3** a) Posebno razvijen sustav prihвата trake b) Pričvršćenje trake na sustav za izvlačenje

Minažek (2010) u svom radu navodi da je uređaj, GFOS razvijen prema parametrima koje propisuju norme, a karakteristike uređaja uspoređuje s normama i zaključuje da po svojim svojstvima uređaj zadovoljava kriterije prema europskoj normi EN 13738, te da u dijelu inkrementalnog porasta sile odstupa od ASTM i GRI normi, tablica 5-1.

**Tablica 5-1** Usporedba GFOS uređaja za izvlačenje i postupaka ispitivanja s normama (Minažek 2010)

Parametar	Veliki uređaj za izvlačenje, tip GFOS	Sukladnost / odstupanje od normi
Vertikalna naprezanja	- osigurano 250 kPa - točnost $\pm 2\%$	- sukladno
Veličina uređaja i uzorka	- širina kutije 90 cm - duljina kutije: min/max 150/200 cm - dubina kutije min/max 80/120 - mogućnost ugradnje uzorka duljine: max 150 cm - mogućnost max širine uzorka 60 cm (uz 20 cm slobodno sa svake strane)	- sukladno
Inkrement sile	- osigurana sila za zadani konstantni pomak $1-2 \pm 0,1 - 0,2\%$	- sukladno EN, odstupa od ASTM i GRI
Točnost sile	- max. očitavanje 100 kN, točnost 0,1% max sile	- sukladno
Točnost pomaka	- $\pm 0,1$ mm – utvrditi mjerenjem	- sukladno
Ukupni pomak	- max 200 mm	- sukladno



## 5.2 Materijal korišten u ispitivanju

Određivanje interakcije geosintetičke trake i kamene ispune provedeno je za geosintetičke trake sastavljene od sintetičkih vlakana ukalupljenih u čvrstu polimernu ovojnicu, deklarirane nosivosti 100 kN i kamene ispune različitog granulometrijskog sastava. Dosadašnja istraživanja mehanizma interakcije geosintetičke trake i tla provedena su za slučajeve kada je materijal ispune bio pijesak ili šljunak, a rezultati istraživanja pokazali su da su ti parametri veći za slučaj kada je materijal ispune šljunak (Abdelouhab et al. 2009). Kako je u Republici Hrvatskoj u izgradnji visokih zidova od armiranog tla (Strikići i Sveta Trojica) kao materijal ispune korišten lomljeni kamen, ispitivanja interakcije geosintetičke trake i tla provedena su upravo za slučaj kada je materijala ispune lomljeni kamen s ciljem određivanja što realnijih koeficijenata interakcije. Studelein et al. (2014) navode da će potreba za izgradnjom visokih zidova od armiranog tla u budućnosti rasti te navode važnost određivanja koeficijenta interakcije armature i tla. Kako su u izgradnji visokih zidova od armiranog tla u Republici Hrvatskoj kao armaturni elementi korištene geosintetičke trake, istraživanja su provedena upravo za ovu vrstu armaturnih elemenata. Dosadašnja istraživanja provedena su za geosintetičke trake deklarirane nosivosti 50 kN (Lo 1998, Abdelouhab et al., 2009, 2010) kod maksimalnih vertikalnih opterećenja od 100 kPa. U ovom radu istraživanja su provedena za traku deklarirane nosivosti 100 kN i maksimalna vertikalna opterećenja od 150 kPa. Detaljan opis materijala (trake i tla) dan je poglavljima koja slijede.

### 5.2.1 Polietilenske (*Paraweb*) trake

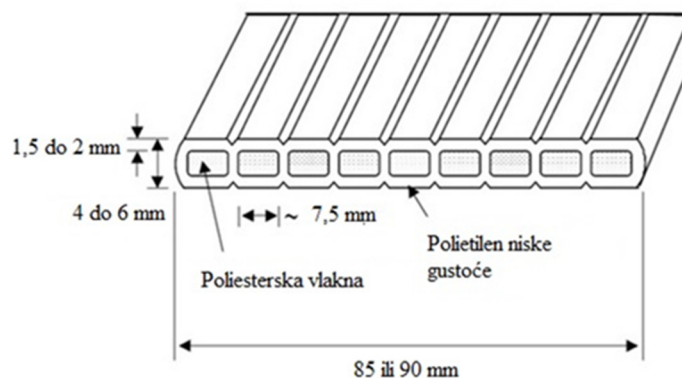
Istraživanja interakcije geosintetičke trake i kamene ispune provedeno je za geosintetičke trake tvrtke Linear Composites Ltd, slika 5-4. Geosintetičke trake sastoje se od gusto pakiranih sintetičkih vlakana velike čvrstoće položenih paralelno jedni uz druge, ukalupljene u čvrstu polimernu ovojnicu, slika 5-5. Ekskluzivno se proizvode za tvrtku TAI (*Terra Arme International*) i poznate su pod nazivom *ParaWeb* trake. Postoje dva tipa traka 2S i 2D koji se razlikuju po debljini obloge i čvrstoći koja ovisi o broju poliesterskih vlakana. U procesu proizvodnje trake prolaze kroz valjke kako bi dobile utore na površini polimerne ovojnice koji povećavaju trenje na površini trake. Njihova prednost u odnosu na čelične trake je što su poliesterska vlakna otporna na koroziju, visoki salinitet i lutajuće struje, naročito kada su



spojena sintetskim vezama te se zbog toga smatraju prikladnom zamjenom za čelik. Masa jednog metra *Paraweb* trake iznosi od 0,15-0,40 kg, što u odnosu na čelične trake predstavlja značajnu prednost pri transportu.



**Slika 5-4** Polietilenska – *ParaWeb* traka korištena u ispitivanju



**Slika 5-5** Poprečni presjek polietilenskih traka (Lo 1998)

Ispitivanje vlačne čvrstoće *ParaWeb* traka provedeno je na Građevinskom fakultetu u Zagrebu (Rak 2006). Ispitane su trake s deklariranim nosivostima 50 kN, 75 kN i 100 kN s kontroliranim pomakom pri čemu su ispitana po tri uzorka od svakog tipa. Ispitivanje je provedeno na univerzalnom uređaju kapaciteta 600 kN s kontroliranim pomakom. Rak (2006) navodi da je sila mjerena na uređaju ugrađenim osjetilom klasificiranim u klasu 1 prema EN ISO 7500-1 u području od 1,2 – 600 kN, a pomaci su mjereni ekstenzometrom klase 0,5 prema EN ISO 9513. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 5-2.

Na temelju provedenih ispitivanja zaključeno je da *ParaWeb* trake zadovoljavaju deklarirane nosivosti. Ispitivanja otpornosti na izvlačenje u velikom uređaju tip GFOS provedena su za traku deklarirane nosivosti 100 kN.

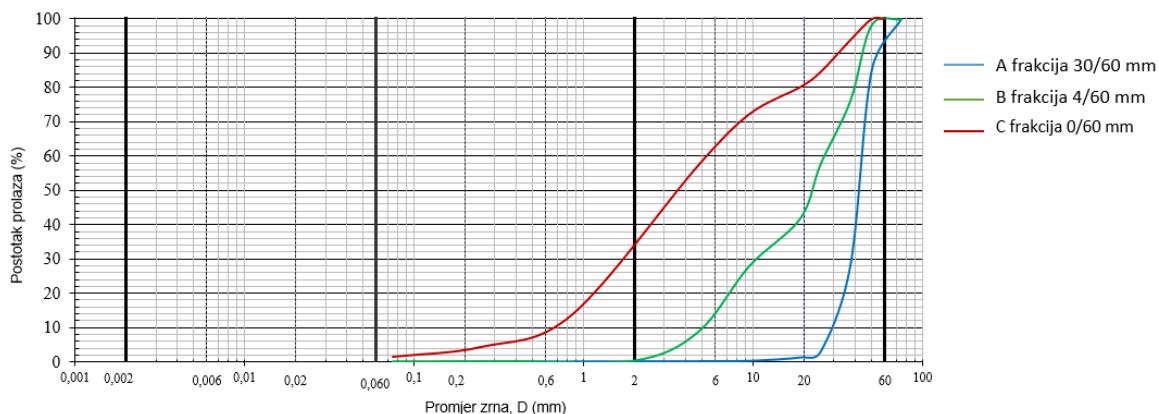
**Tablica 5-2** Rezultati ispitivanja polietilenskih traka s poliesterskim vlaknima (Herceg 2006)

Deklarirana nosivost	Oznaka uzorka	Širina trake (mm)	$F_{max}$ (kN)	$\overline{F}_{max}$ (kN)	Standardna devijacija
50 kN	50/1	90	56,09	56,14	0,45
	50/2	90	55,72		
	50/3	90	56,62		
75 kN	75/1	90	76,29	77,77	1,81
	75/2	90	77,23		
	75/3	90	79,79		
100 kN	100/1	90	111,06	110,66	2,40
	100/2	90	112,84		
	100/3	90	108,09		

### 5.2.2 Materijal ispune – lomljeni kamen

Materijal ispune korišten u ispitivanju je lomljeni kamen – dolomit. Kamen je dopremljen iz kamenoloma „Radlovac“ u vrećama pakiranim po 1500 kg i to tako da je u svakoj vreći određena frakcija materijala. Ukupno je dopremljeno 5 vreća sa sljedećim frakcijama: 30/60 mm, 16/31,5 mm, 8/16 mm, 4/8 mm i 0/4 mm. Ispitivanja su provedena za različite granulometrijske sastave materijala kako bi se mogao odrediti utjecaj granulometrijskog sastava materijala na koeficijent interakcije trake i tla. Granulometrijski sastav materijala označen je oznakama od A do C. Prvi materijal, označen oznakom A30/60 karakterizira uzak spektar zrna promjera od 30-60 mm, drugi, označen oznakom B4/60 karakterizira nešto širi spektar zrna promjera 4-60 mm i treći materijal C0/60, ima najširi raspon frakcija od 0 do 60 mm. Ovakav granulometrijski sastav materijala određen je na temelju frakcija koje se mogu dobiti proizvodnim procesima u kamenolomu, a s ciljem da se olakša ugradnja uzorka u kutiju. Za frakciju A30/60 korišten je materijal iz vreće s frakcijom 30/60, dok je za ostale dvije frakcije korištena potrebna količina materijala iz svake pojedine vreće kako bi se dobila odgovarajuća granulometrijska krivulja, slika 5-6. Za svaku frakciju određen je koeficijent nejednoličnosti koji za frakciju A30/60 iznosi oko 1,5, frakciju B4/60 oko 5 i frakciju C0/60 oko 7. Na temelju granulometrijskog sastava, materijal A30/60 klasificiran je kao jednoliko

graduiran materijal, materijal B4/60 dobro graduirani lomljeni kamen i materijal C0/60 dobro graduirani lomljeni kamen.



**Slika 5-6** Granulometrijski sastav materijala korišten u ispitivanju

### 5.3 Ugradnja uzorka i provedba ispitivanja

Ugradnja uzorka i provedba ispitivanja jednaka je za ispitivane jedne trake i za ispitivanje dviju traka. Razlika u provedbi ovih ispitivanja je u sustavu za prihvatanje trake i u rasporedu ekstenzometara za praćenje pomaka duž trake. U nastavku je opisan postupak ugradnje i ispitivanja za jednu i za dvije trake.

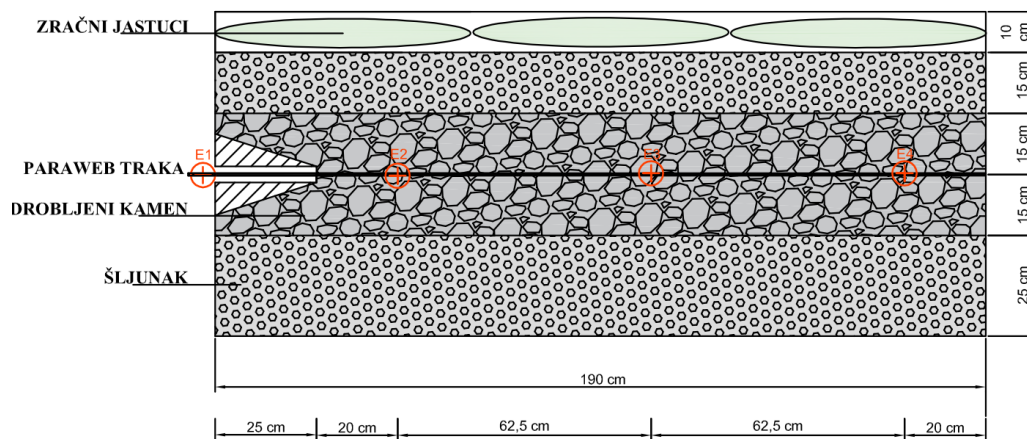
#### 5.3.1 Ispitivanje izvlačenja jedne trake

U velikom uređaju za ispitivanje otpornosti na izvlačenje, tip GFOS provedeno je ukupno 12 ispitivanja izvlačenja jedne *ParaWeb* trake. Početna ispitivanja provedena su za materijal A30/60. Ova frakcija odabrana je zato jer je bila najlakša ugradnja, nije bilo potrebe za miješanjem materijala iz više vreća, i zato jer je za tu frakciju bila očekivana najmanja sila izvlačenja. Druga skupina ispitivanja provedena je za frakciju B4/60 i treća za frakciju C0/60.

U ispitivanju otpornosti na izvlačenje korištena su četiri metalna okvira visine 20 cm, te je ukupna visina kutije iznosila 80 cm. Lomljeni kamen je u kutiju ugrađen u slojevima i zbijan je pomoću vibro nabijača. Kako bi se ubrzao proces ugradnje i razgradnje materijala, prvih 25 cm visine kutije ispunjeno je šljunkom na koji je postavljena geomembrana. Ovaj prvi sloj je ostao u kutiji za vrijeme provedbe ispitivanja, dok su se slojevi iznad ovog razgrađivali i

ugrađivali za svako ispitivanje. Na sloj šljunka stavljen je sloj drobljenog kamena debljine 15 cm koji se također zbijao vibro nabijačem. Nakon što je materijal zbijen do visine 40 cm, na tlo se postavila traka na koju se pričvrstio sustav za mjerenje pomaka. Pomaci su mjereni pomoću ekstenzometara koji su se nalazili izvan kutije uređaja, a za traku su bili pričvršćeni pomoću žica provučenih kroz tanke metalne cjevčice, kako bi se spriječilo pucanje žica za vrijeme ispitivanja. Pomaci trake pratili su se u ukupno pet točaka od kojih su dvije bile izvan kutije (pomak klipa i ulaz trake u kutiju) i tri unutar kutije (na prvih 20 cm od ruba košuljice kroz koju se izvlači traka, na sredini kutije i 20 cm od stražnjeg okvira kutije). Raspored ekstenzometara na traci i skica ugrađenog materijala u kutiju prikazani su na slici 5-7 i 5-8. Ovakav raspored ekstenzometara omogućio je praćenje pomaka i deformacija trake. Na mjesto gdje traka ulazi u košuljicu bio je postavljen sloj pijeska kako bi se dodatno umanjio utjecaj prednje stjenke na rezultate ispitivanja i kako bi se smanjilo trenje na kontaktu gdje traka ulazi u košuljicu. Nakon postavljanja trake u kutiju je bio ugrađen sloj drobljenog kamena visine 15 cm i na kraju sloj šljunka visine 15 cm. Na završni zbijeni sloj šljunka bio je postavljen sloj debelog geotekstila pri čemu su sloj šljunka i geotekstil služili za zaštitu zračnih jastuka od oštećenja. Po završetku ugradnje kutija je bila zatvorena poklopcem na kojem se nalaze tri zračna jastuka te su okviri kutije i zračni jastuci međusobno učvršćeni posebnim nosačima, pritezanjem vijaka na nosače. Po zatvaranju kutije na kutiju su bili priključeni sustavi za mjerenje, te se nakon toga moglo pristupiti ispitivanju. Ispitivanje je bilo završeno kada se ostvarilo jedno od sljedećeg:

- dođe do izvlačenja uzorka, a to se očituje time što svi ekstenzometri pokazuju porast u očitavanju, dok je vrijednost sile približno konstantna ili opada
- dođe do vlačnog sloma armature (pomaci na ekstenzometrima na uzorku su stali dok pomaci klipa rastu, sila naglo opada)
- dođe do izvlačenja žice iz uzorka (pomaci jednog ili više ekstenzometara su stali, sila i pomaci klipa i rastu).



E - oznaka za ekstenzometara (bilježenje pomaka na traci)

Slika 5-7 Skica ugradnje materijala i praćenja pomaka po točkama



Slika 5-8 Postavljanje ekstenzometara na traku

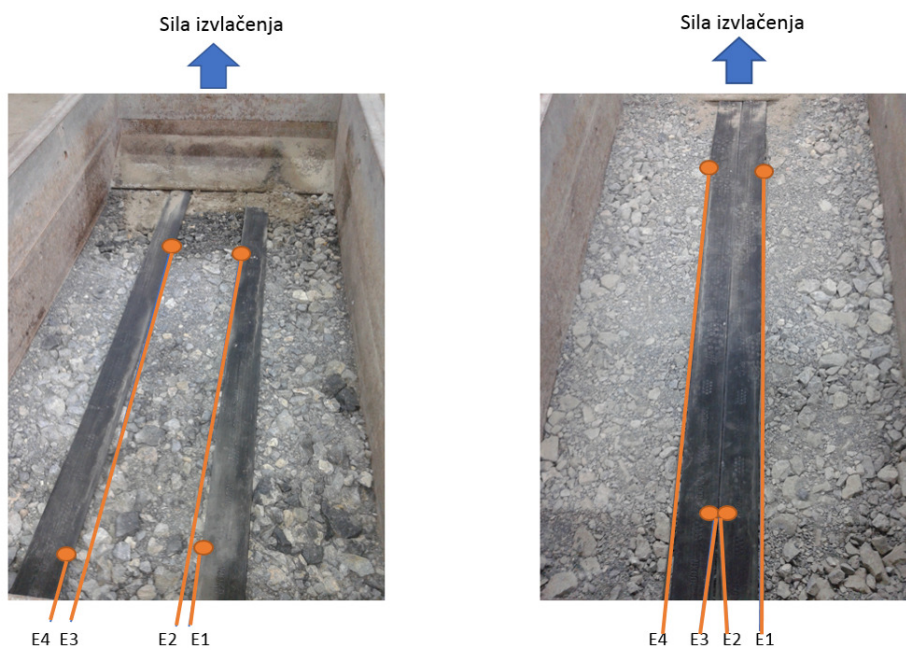
### 5.3.2 Ispitivanje izvlačenja dviju traka

Ispitivanje izvlačenja dviju traka provedeno je za slučaj kad su dvije trake položene jedna uz drugu i slučaj kad su dvije trake međusobno razmaknute za 20 cm. Ispitivanja su provedena korištenjem dobro graduiranog materijala C0/60 s rasponom frakcija od 0 do 60 mm, te za jedno vertikalno naprezanje od 50 kPa. Ispitivanja su ograničena na samo jedno vertikalno naprezanje zbog ograničenja opreme na kojoj se izvodi ispitivanje, maksimalna sila izvlačenja je 80 kN. Postupak ugradnje i razgradnje uzorka bio je jednak kao i za slučaj ispitivanja jedne trake. Prvih 25 cm je ispunjeno šljunkom na koji je postavljena geomembrana na koju se kasnije ugrađivao sloj drobljenog kamena visine 15 cm. Materijal se zbijao vibro nabijačem, a na pripremljeni sloj materijala postavljene su geosintetičke trake. Ispitivanja su provedena za dva slučaja s trakama položenim jedne do druge bez razmaka između traka i za slučaj kada su trake razmaknute 20 cm. Kako bi se omogućilo ovakvo ispitivanje, bilo je potrebno razviti posebni pričvrсни sustav kojim se prihvaćaju trake i koji je spojen na klip za izvlačenje trake. Pričvrсни sustav sastoji se od pet čeličnih ploča i od cijevi koja je zavarena za jednu ploču s razmakom između ploče i cijevi da se omogući provlačenje trake. Cijev je obrađena tako da ima hrapavu površinu kako bi se povećalo trenje na kontaktu trake i pričvrsnog sustava i podijeljena je na tri dijela, dva bočna koji odgovaraju širini jedne trake (90 mm) i jedan središnji dio koji je širine dvije trake (180 mm), slika 5-9. Ovakav sustav za prihvat trake omogućio je ispitivanja odvojenih i spojenih traka. Nakon što je traka postavljena na pripremljeni sloj materijala, na traku je spojen sustav za praćenje pomaka. Sustav se sastoji od ekstenzometara koji su smješteni izvan kutije, a za traku su pričvršćeni pomoću žice provučene kroz metalnu cijev. Na slici 5-10 prikazan je raspored ekstenzometara s položajem točaka u kojima su praćeni pomaci. Položaj točaka u kojima se prate pomaci dvije trake, različit je od položaja točaka u kojima je praćen pomak jedne trake. Kod ispitivanja s dvije trake pomaci su na dvije točke na trakama, na 20 cm od ruba košuljice i na 20 cm od kraja kutije. Ovakvim rasporedom ispitivanja praćen je pomak na početku i na kraju traka. Nakon postavljanja trake i sustava za praćenje pomaka, postavlja se gornji sloj drobljenog kamena i na njega sloj šljunka koji služi za zaštitu zračnog jastuka od oštećenja. Po završetku ugradnje materijala kutija se zatvara poklopcem na kojem se nalaze zračni jastuci i može se početi s ispitivanjima. Prvi korak u ispitivanju je nanošenje vertikalnog opterećenja preko zračnih jastuka, a drugi dio ispitivanja uključuje izvlačenje trake iz kutije. Postupak ispitivanja traje dok svi ekstenzometri ne pokažu pomak trake, a sva ispitivanja su provedena za vertikalna opterećenja od 50 kPa.





Slika 5-9 Pričvrstni sustav za prihvat dviju razmaknutih i dviju spojenih traka



Slika 5-10 Prikaz traka s postavljenim ekstenzometrima

## 5.4 Prikaz i analiza rezultata ispitivanja

Prikaz i analiza rezultata podijeljeni su u tri dijela. Prvi dio se odnosi na prikaz i analizu rezultata za ispitivanje izvlačenja jedne trake, dok se drugi dio ispitivanja odnosi na prikaz i analizu rezultata za ispitivanje dvije trake. U trećem dijelu su rezultati provedenih ispitivanja za jednu i dvije trake uspoređeni s podacima ispitivanja geosintetičke trake dostupnim iz literature.

### 5.4.1 Rezultati ispitivanja izvlačenja jedne geosintetičke trake

Ukupno je provedeno 12 ispitivanja izvlačenja za tri različita granulometrijska sastava materijala kod dva različita vertikalna napreznja od 50 kPa i 150 kPa za materijal A30/60 i B4/60 i kod tri vertikalna napreznja (50 kPa, 100 kPa i 150 kPa) za materijal C0/60. Ova ispitivanja omogućuju:

- analizu utjecaja vertikalnog napreznja na silu izvlačenja i mehanizam interakcije tla i armature
- analizu utjecaja granulometrijskog sastava na silu izvlačenja i mehanizam interakcije tla i armature
- analizu posmičnih napreznja na kontaktu geosintetičke trake i tla
- određivanje koeficijenta interakcije geosintetičke trake i lomljenog kamena.

#### 5.4.1.1 Utjecaj vertikalnog napreznja na rezultate ispitivanja

Rezultati ispitivanja izvlačenja geosintetičke trake i lomljenog kamena pokazali su da primijenjeno vertikalno napreznje znatno utječe na maksimalnu silu koja se postiže prilikom izvlačenja armature iz tla i na koeficijente interakcije.

#### *Utjecaj vertikalnog napreznja na silu izvlačenja*

Kako bi se odredio utjecaj vertikalnog napreznja na silu izvlačenja provedena su ispitivanja kod dva različita vertikalna napreznja (50 kPa i 150 kPa) za materijal A30/60 i B4/60 te tri različita vertikalna napreznja (50 kPa, 100 kPa i 150 kPa) za materijal C0/60. Odabrane vrijednosti vertikalnog napreznja odgovarale bi visini zida od 2,5 m i 7,5 m, a odabrane su na



temelju ograničenja kapaciteta sustava za izvlačenje i maksimalnog kapaciteta zračnih jastuka od 200 kPa. Dosadašnja istraživanja (Lo 1998, Abdelouhab 2010) bila su usmjerena na određivanje koeficijenta interakcije kod manjih naprezanja (do 100 kPa) zato jer je pretpostavljeno da je koeficijent interakcije kod većih naprezanja, koja bi odgovarala visini nadsloja od 6 m, konstantan.

Za sva tri materijala provedena je analiza sile izvlačenja i prve točke u kutiji u kojoj su praćeni pomaci, a rezultati su prikazani dijagramima na slikama 5-11 do 5-13. Prva točka unutar kutije (ekstenzometar E2 na slici 5-7) u kojoj su praćeni pomaci, nalazi se na 20 cm od skošenog ruba košuljice. Odmak od ruba košuljice osigurao je da se točka u kojoj su praćeni pomaci cijelo vrijeme nalazi unutar kutije.

Rezultati ispitivanja prikazani su tablicom 5-3 gdje su prikazane vršne sile izvlačenja za svako ispitivanje, te srednje vrijednosti sile izvlačenja za ponovljena ispitivanja.

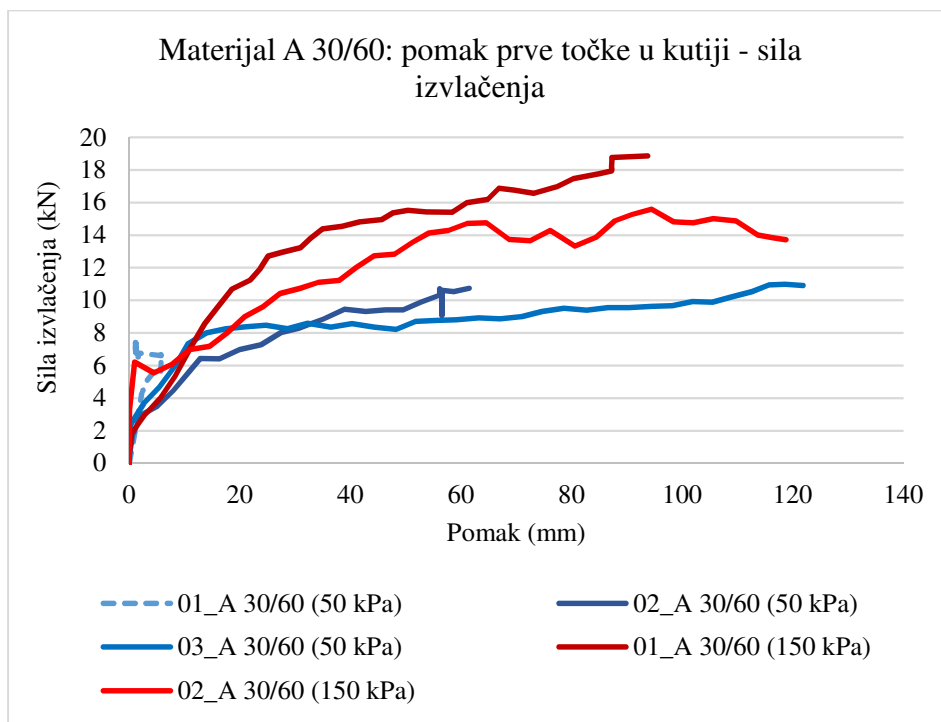
Za frakciju A30/60 provedena su tri ispitivanja kod vertikalnog naprezanja od 50 kPa (01 - 03) i dva ispitivanja kod vertikalnog naprezanja od 150 kPa (01 i 02). Na temelju provedenih ispitivanja određena je srednja vrijednost sile izvlačenja kod naprezanja od 50 kPa i 150 kPa. Sila izvlačenja s porastom naprezanja od 50 kPa na 150 kPa raste za 77%. Kod ispitivanja 01 pri 50 kPa došlo je do izvlačenja ekstenzometra te je prestalo praćenje u toj točki.

Za frakciju B4/60 provedeno je jedno ispitivanje kod vertikalnog naprezanja od 50 kPa (01) i tri kod vertikalnog naprezanja od 150 kPa (01 - 03). Usporedba srednje vrijednosti sila izvlačenja kod 50 kPa i 150 kPa prikazana je tablicom 5-3. Sila izvlačenja kod vertikalnog naprezanja od 150 kPa je veća za 30% u odnosu na silu izvlačenja kod 50 kPa.

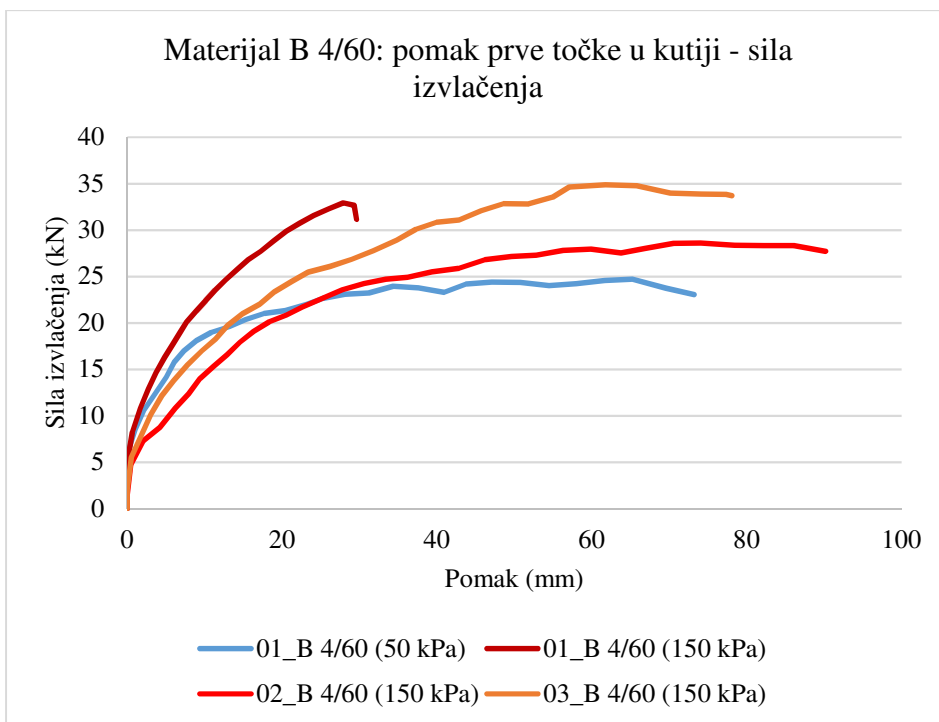
Za frakciju C 0/60 provedeno je po jedno ispitivanje kod tri različita vertikalna naprezanja od 50 kPa, 100 kPa i 150 kPa. Iz dijagrama na slici 5-13 vidi se da s porastom vertikalnog naprezanja raste sila izvlačenja, a razlika u porastu sile je veća za manja naprezanja kod 50 kPa i 100 kPa. Sila izvlačenja je za 35% veća kada se promatra povećanje naprezanja s 50 kPa na 100 kPa, dok je kod povećanja naprezanja sa 100 kPa na 150 kPa ta razlika manja i iznosi 16%. Kada se promatra porast sile izvlačenja za slučaj vertikalnog naprezanja od 50 kPa i 150 kPa, sila izvlačenja je za 57% veća kod 150 kPa, tablica 5-3.

Kada se usporede sve sile izvlačenja jasno se vidi da su kod manjeg naprezanja i manje sile izvlačenja za sva tri granulometrijska sastava materijala, dok s porastom naprezanja rastu i sile izvlačenja, slika 5-14. Kada se promatra porast naprezanja za 100 kPa dobiva se da je najveća

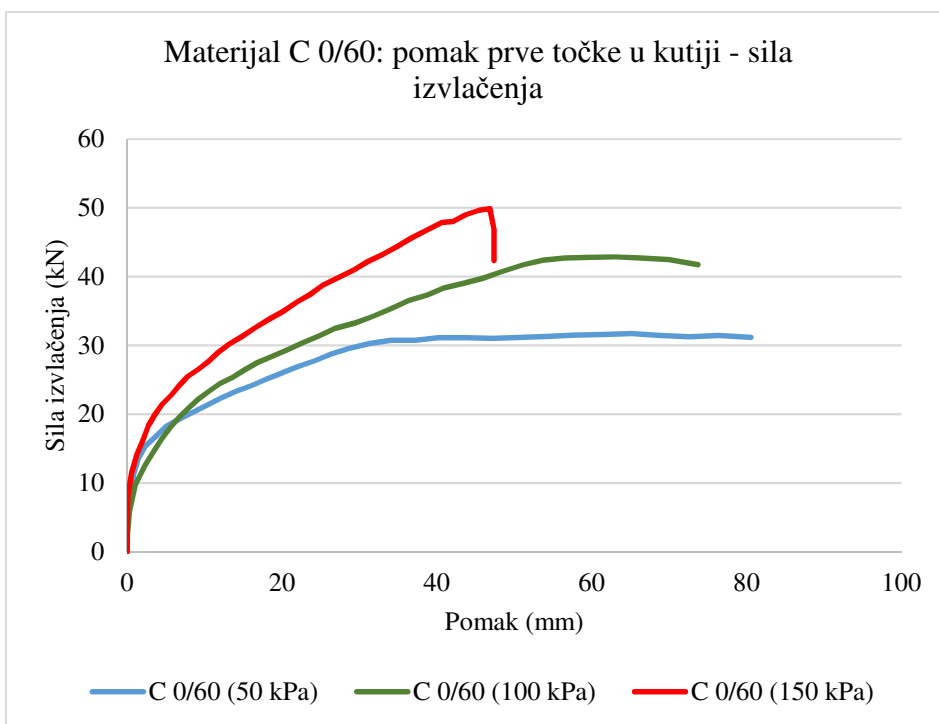
razlika u povećanju sile izvlačenja za frakciju A 30/60 i iznosi 77%, dok je za frakciju B 4/60 to povećanje najmanje i iznosi 30%. Utjecaj povećanja naprezanja za 50 kPa može se promatrati samo za frakciju C 0/60 i u tom slučaju je razlika u sili izvlačenja veća za manja naprezanja, porast sile za povećanje s 50 kPa na 100 kPa iznosi 35%, dok je porast sile s 100 kPa na 150 kPa 16%.



**Slika 5-11** Dijagram pomak prve točke u kutiji i sila izvlačenja za frakciju A3 30/60



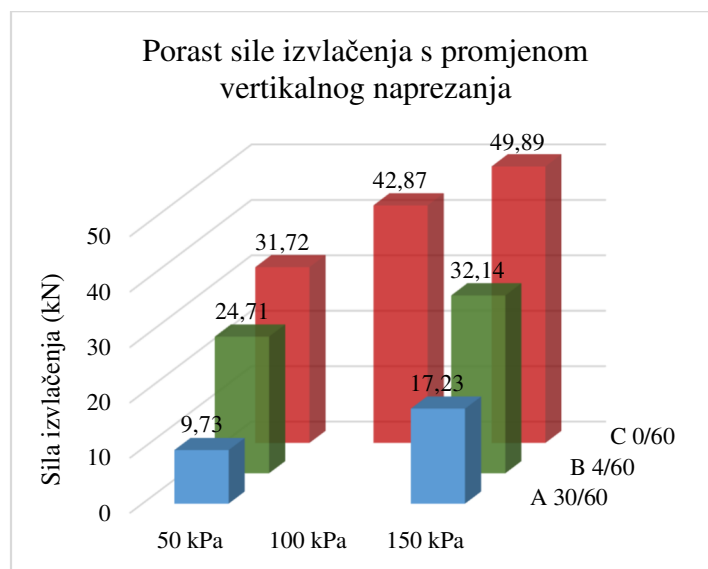
Slika 5-12 Dijagram pomak prve točke u kutiji i sila izvlačenja za frakciju B 4/60



Slika 5-13 Dijagram pomak prve točke u kutiji i sila izvlačenja za frakciju C 0/60

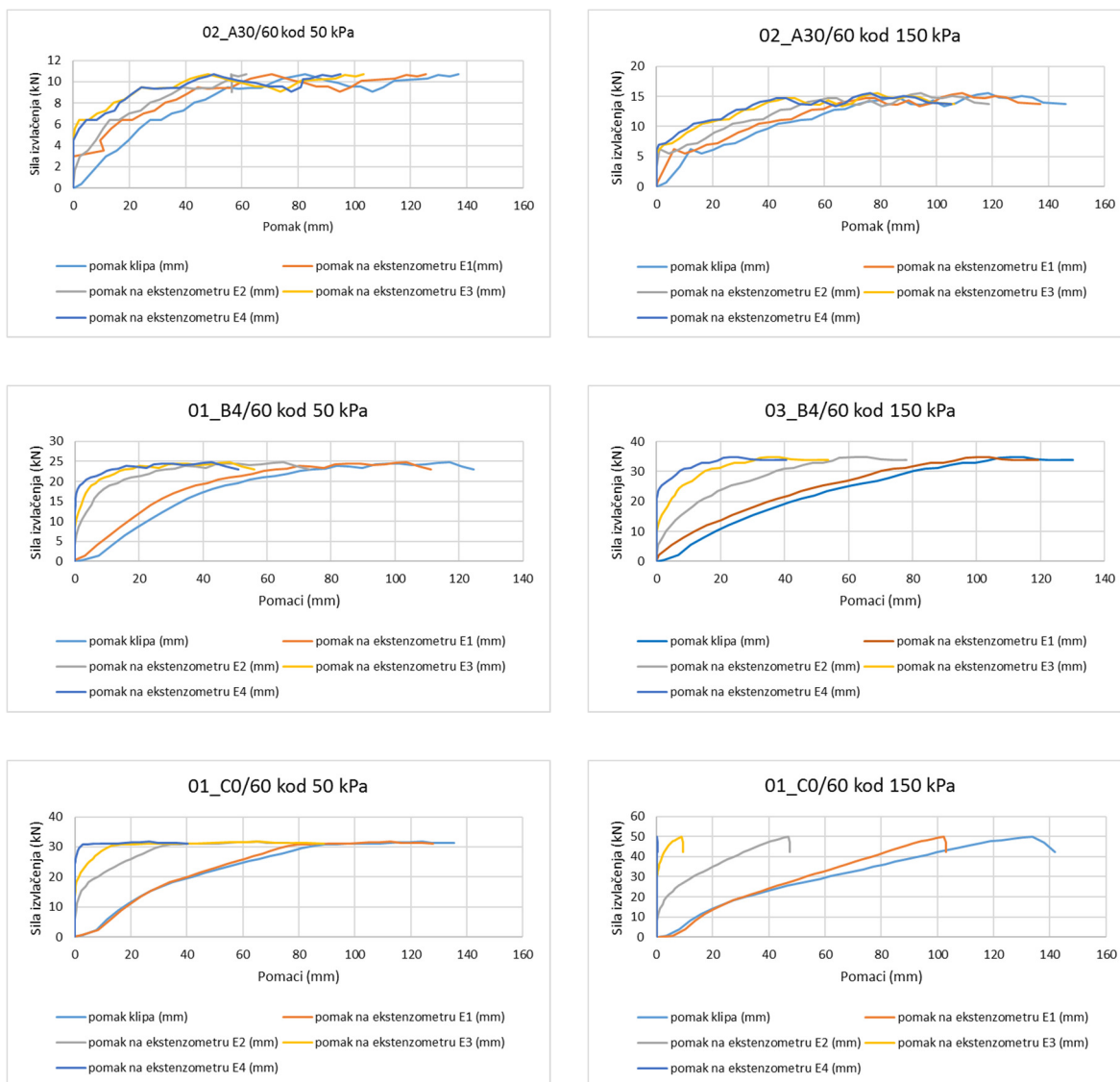
**Tablica 5-3** Vršne vrijednosti sile izvlačenja za svaki pokus s prikazom srednjih vrijednosti za ponovljena ispitivanja

Mješavina	Vert. naprezanje	Sila izvlačenja (kN)	Srednja vrijednost sile izvlačenja (kN)
A (30-60 mm)	50 kPa	7,48	9,73
A (30-60 mm)	50 kPa	10,74	
A (30-60 mm)	50 kPa	10,98	
A (30-60 mm)	150 kPa	18,86	17,23
A (30-60 mm)	150 kPa	15,59	
B (4-60 mm)	50 kPa	24,71	32,14
B (4-60 mm)	150 kPa	32,93	
B (4-60 mm)	150 kPa	28,6	
B (4-60 mm)	150 kPa	34,88	
C (0-60 mm)	50 kPa	31,72	
C (0-60 mm)	100 kPa	42,87	
C (0-60 mm)	150 kPa	49,89	

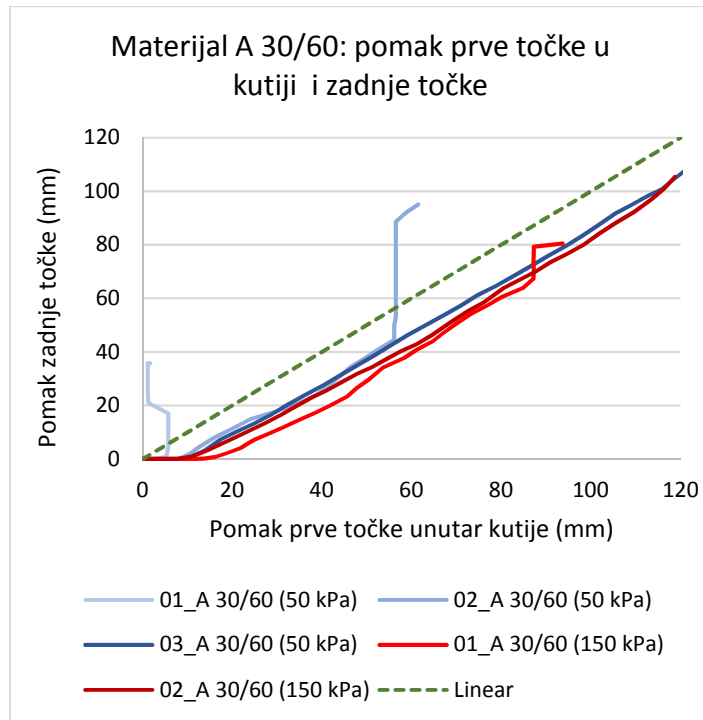
**Slika 5-14** Dijagram odnosa sile izvlačenja i vertikalnog naprezanja***Utjecaj vertikalnog naprezanja na mobiliziranje geosintetičke trake***

Utjecaj vertikalnog naprezanja na mobiliziranje geosintetičke trake može se jasno uočiti na dijagramima na slici 5-15, gdje su prikazane krivulje odnosa sile izvlačenja - pomaka klipa i pomak po točkama u kojima su praćeni pomaci. Mobiliziranje geosintetičke trake praćeno je na ukupno pet točaka po duljini trake. Prva točka u kojoj su praćeni pomaci odgovara pomaku klipa, dok su druge četiri točke smještene na početku ulaska trake u kutiju, na 20 cm od ruba

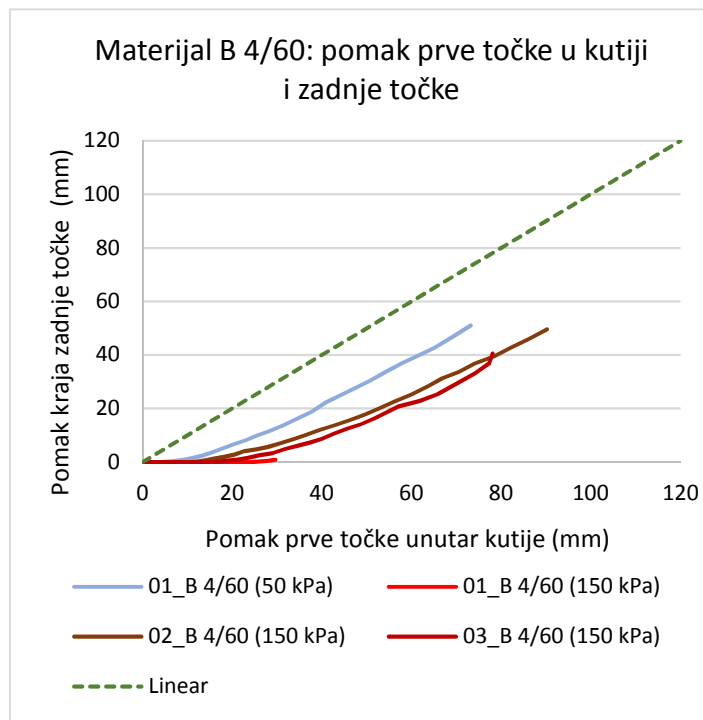
košuljice, na sredini trake i na 20 cm od stražnjeg ruba kutije uređaja, slika 5-7. Iz dijagrama na slici 5-15 može se uočiti da se pomaci po duljini trake postepeno mobiliziraju s porastom sile izvlačenja. Također se može uočiti da s promjenom granulometrijskog sastava i vertikalnog napreznja raste i razlika u mobiliziranju početnog dijela trake koji je izvan kutije i dijela trake koji je unutar kutije. Kod frakcije A30/60 ta razlika je mala, dok se kod frakcije B4/60 i C0/60 može uočiti da je došlo do istežanja dijela trake koji se nalazi izvan kutije, što je jače izraženo kod većih vertikalnih napreznja. Ako se promatra mobiliziranje prve točke koja se nalazi unutar kutije i kraja trake može se uočiti da je za frakciju A30/60 kod vertikalnog napreznja od 50 kPa najmanja razlika u mobiliziranju prve točke i kraja trake. Pomak kraja trake mobilizira se kada je pomak prve točke unutar kutije između 4 do 10 mm. Kod napreznja od 150 kPa pomak kraja trake mobilizira se kada je pomak prve točke između 10 do 15 mm. Za materijal B4/60 također se može uočiti da je došlo do istežanja trake i to većeg istežanja trake kod većeg vertikalnog napreznja, slika 5-17. Kod napreznja od 50 kPa pomak kraja trake počinje kada se postigne pomak prve točke unutar kutije od približno 7 mm, dok kod 150 kPa mobiliziranje kraja trake počinje kod pomaka početka trake od približno 10 do 25 mm. Za frakciju C0/60 ispitivanja su provedena za tri različita vertikalna napreznja (50 kPa, 100 kPa i 150 kPa), a iz rezultata provedenih ispitivanja može se zaključiti da je došlo do istežanja trake kod sva tri vertikalna napreznja, slika 5-18 pri čemu je kod napreznja od 150 kPa došlo do minimalnog pomaka kraja trake prije popuštanja trake, slika 5-18.



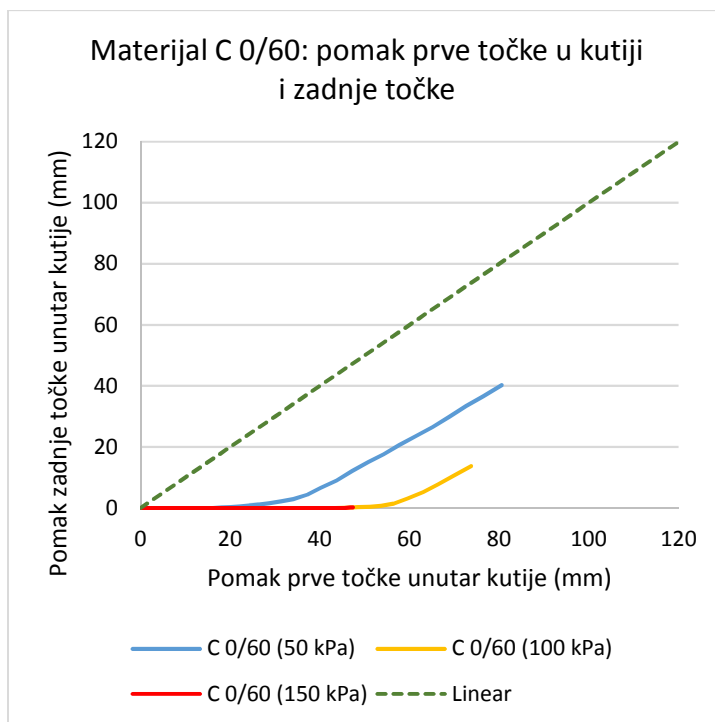
**Slika 5-15** Pomaci ekstenzometara za sva tri materijala kod normalnog naprezanja od 50 kPa i 150 kPa



**Slika 5-16** Dijagram pomaka prve točke unutar kutije i zadnje točke unutar kutije za frakciju A30/60



**Slika 5-17** Dijagram pomaka prve točke unutar kutije i zadnje točke unutar kutije za frakciju B4/60



**Slika 5-18** Dijagram pomaka prve točke unutar kutije i zadnje točke unutar kutije za frakciju C0/60

#### 5.4.1.2 Utjecaj granulometrijskog sastava materijala na silu izvlačenja jedne trake

Utjecaj granulometrijskog sastava na silu izvlačenja proučavan je za isti materijal (lomljeni kamen), ali različitog granulometrijskog sastava. Prva ispitivanja provedena su za jednoliko graduirani lomljeni kamen s rasponom frakcija od 30 do 60 mm. Ova frakcija odabrana je za početna ispitivanja zbog jednostavnosti ugradnje materijala. Materijal je dopremljen u vrećama raspoređen po različitim frakcijama, a 30 do 60 mm je bila frakcija u jednoj vreći. Za postizanje predviđene granulometrijske krivulje za frakciju B 4/60 i C 0/60 bilo je potrebno iz svake vreće uzeti određenu masu materijala i homogenizirati materijal, te nakon toga ugrađivati materijal. Koeficijenti nejednoličnosti određeni su na temelju predviđene granulometrijske krivulje, te nije bilo potrebe za granulometrijskom analizom za svako ispitivanje posebno. Postupak određivanja gustoće proveden je za svako ispitivanje posebno, nakon što je ispitivanje završeno, u postupku razgradnje materijala. Gustoća se određivala na tri mjesta u ravnini ugradnje trake i to na način da se izvadila određena masa materijala, te se nakon toga u taj prostor položio najlon i ulila se poznata količina vode. Na temelju mase vode određen je volumen izvađenog materijala. Iz poznatog volumena i mase materijala određena je gustoća ugrađenog materijala.



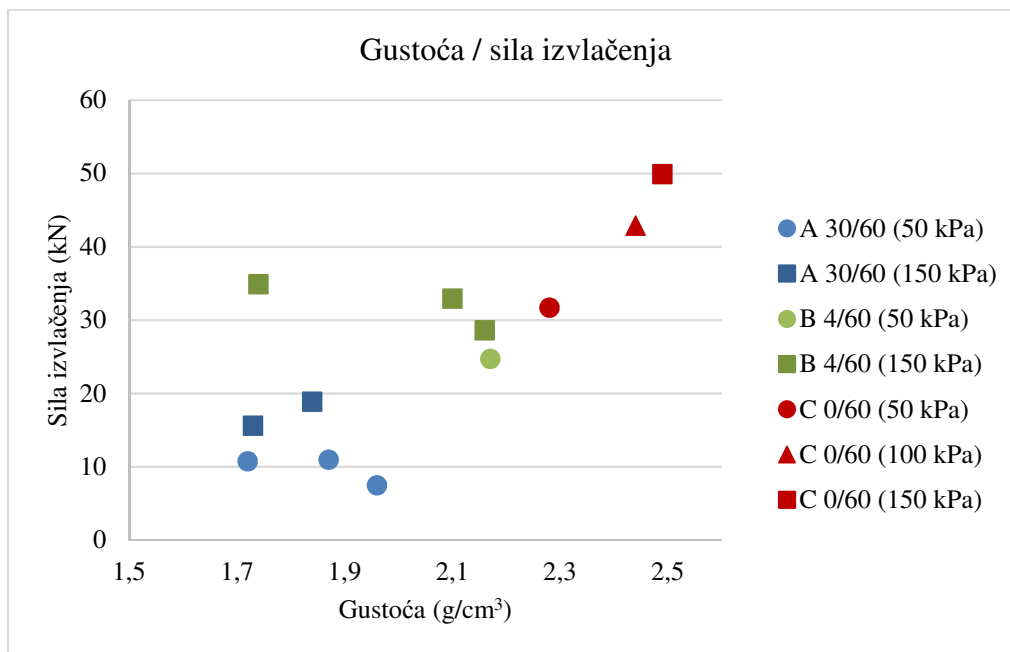
Na temelju rezultata određivanja gustoće vidi se da je najveća gustoća za frakciju C 0/60, dok je najmanja kod frakcije A 30/60. Gustoća za materijal A30/60 kretala se od 1,72 do 1,96 g/cm<sup>3</sup>, za materijal B4/60 od 1,74 do 2,17 g/cm<sup>3</sup> i materijal C 0/60 od 2,28 do 2,49 g/cm<sup>3</sup>. Vrlo velike vrijednosti gustoće za materijal C0/60 ukazuju na moguću pogrešku prilikom mjerenja gustoće korištenjem opisane metode te je za daljnje analize usvojena gustoća 2,28 g/cm<sup>3</sup>. Preporuka je da se za buduća ispitivanja materijala koristi metoda kojom bi se preciznije određivala gustoća. U tablici 5-4. prikazane su gustoće određene za svako ispitivanje.

**Tablica 5-4** Gustoće zbirnih uzoraka

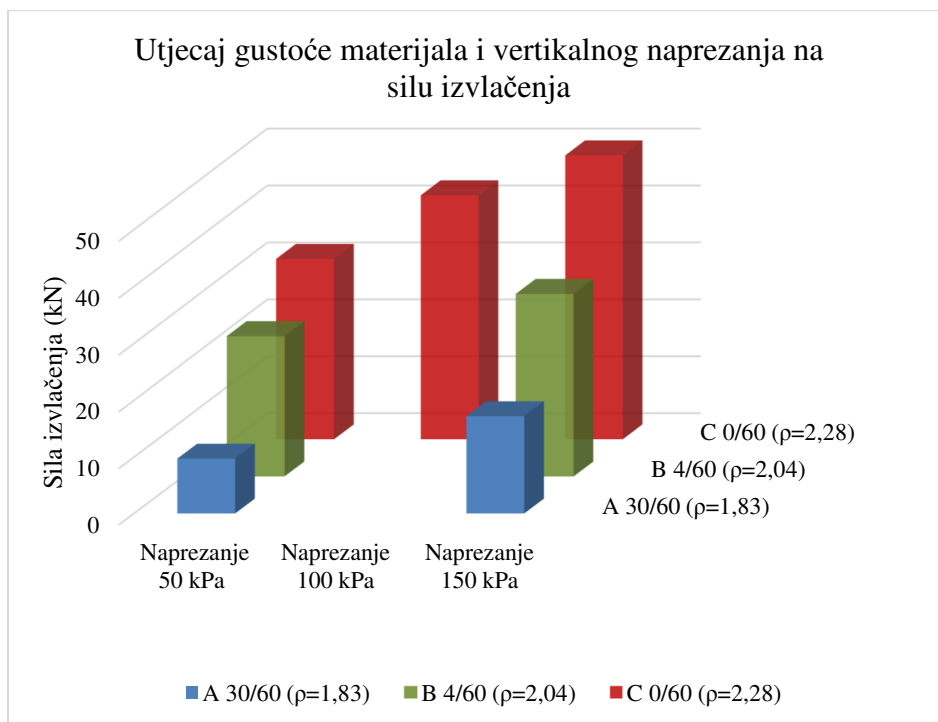
Tlo	Frakcija (mm)	Naprezanje (kPa)	sila (kN)	$\rho_{av}$ (g/cm <sup>3</sup> )	stdev	koef var	$\rho_{av}$ frakcije (g/cm <sup>3</sup> )
A	30/60	50	7,48	1,96	0,076	0,038	1,82
	30-60	50	10,74	1,72	0,067	0,039	
	30-60	50	10,98	1,87	0,083	0,045	
	30-60	150	18,86	1,84	0,177	0,096	
	30-60	150	15,59	1,73	0,032	0,019	
B	4-60	50	24,71	2,17	0,171	0,079	2,04
	4-60	150	32,93	2,10	0,071	0,034	
	4-60	150	28,6	2,16	0,171	0,079	
	4-60	150	34,88	1,74	0,185	0,106	
C	0-60	50	31,72	2,28	0,130	0,057	2,28
	0-60	100	42,87	2,44	0,071	0,029	
	0-60	150	49,89	2,49	0,072	0,029	

Za frakciju A30/60 provedeno je ukupno pet ispitivanja, tri kod vertikalnog naprezanja od 50 kPa i dva kod vertikalnog naprezanja od 150 kPa. Kod ispitivanja koja su provedena s vertikalnim naprezanjem od 50 kPa, najmanja sila izvlačenja postignuta je kod najveće gustoće, dok je kod ispitivanja provedenih kod 150 kPa veća sila izvlačenja postignuta kod veće gustoće. Za materijal B4/60 provedeno je ukupno 4 ispitivanja, jedno kod vertikalnog naprezanja od 50 kPa i tri kod vertikalnog naprezanja od 150 kPa. Najveća sila izvlačenja kod vertikalnog naprezanja od 150 kPa za frakciju B4/60 postignuta je kod najmanje izmjerene gustoće, dok je najmanja sila izvlačenja izmjerena za uzorak s najvećom gustoćom. Za frakciju C0/60 provedeno je po jedno ispitivanje kod 50 kPa, 100 kPa i 150 kPa. Izmjerene gustoće su vrlo visoke za frakciju C0/60 što ukazuje da je došlo do pogreške prilikom mjerenja gustoće, za buduća ispitivanja potrebno je koristiti drugu metodu mjerenja gustoće. Usvojena gustoća za frakciju C0/60 je 2,28 g/cm<sup>3</sup>. Usporedbom sila izvlačenja za jednaka vertikalna naprezanja, a

različiti granulometrijski sastav materijala može se zaključiti da s porastom gustoće i koeficijenta nejednoličnosti raste i sila izvlačenja. Najmanje izmjerene sile izvlačenja su za frakciju A30/60 koja ima i najmanju gustoću i najmanji koeficijent nejednoličnosti dok su najveće sile izvlačenja izmjerene za frakciju C0/60. Rezultati izmjerenih sila izvlačenja i gustoća po frakcijama prikazani su dijagramom na slici 5-19 i 5-20. Na temelju provedenih ispitivanja može se zaključiti da s porastom koeficijenta nejednoličnosti raste i sila izvlačenja za jednako vertikalno naprezanje. Manja odstupanja koja se javljaju kod frakcije A30/60 i B4/60 mogu se prepisati mogućim pogreškama pri mjerenju gustoće.



**Slika 5-19** Dijagram maksimalne sile izvlačenja i izmjerene gustoće kod različitog vertikalnog napreznja



**Slika 5-20** Dijagram: Utjecaj granulometrijskog sastava i vertikalnog naprezanja na silu izvlačenja

#### 5.4.1.3 Analiza posmičnih naprezanja na kontaktu lomljenog kamena i geosintetičke trake

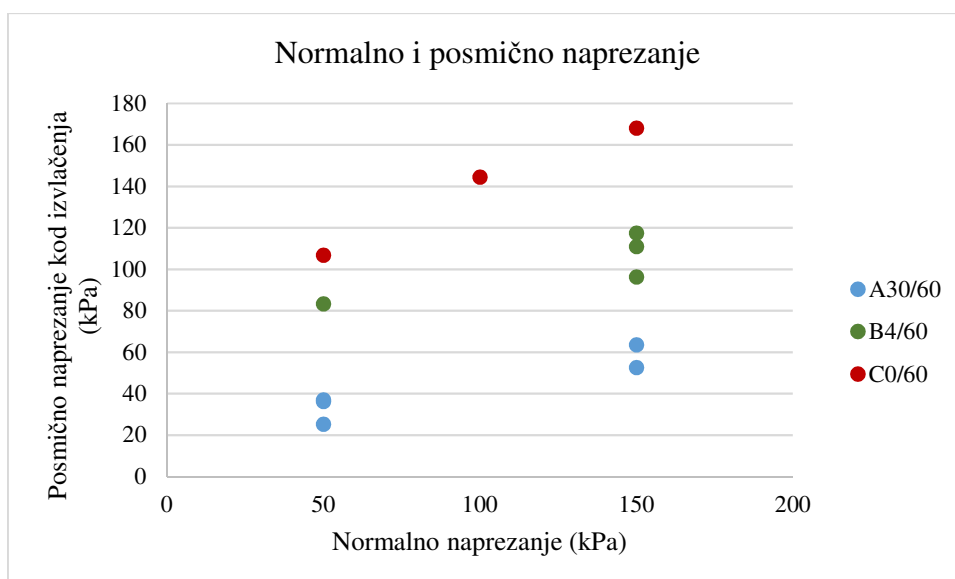
Posmična naprezanja na kontaktu lomljenog kamena i geosintetičke trake pri izvlačenju proračunavaju se iz sile izvlačenja dobivene pokusom izvlačenja i posmične površine uzorka prema:

$$\tau = \frac{P}{2lb} \quad (5-1)$$

gdje je:  $P$  – sila izvlačenja (kN)

$l, b$  – dimenzije uzorka (m), ovdje  $l=1,65$  m,  $b=0,09$  m.

Vrijednosti posmičnih naprezanja za različite frakcije prikazane su dijagramom na slici 5-21. Iz dijagrama se vidi da je posmično naprezanje za dobro graduiran materijala C0/60 s većim koeficijentom nejednoličnosti veći u odnosu na slabo graduiran materijal. Iz dijagrama se također može uočiti i povećanje posmičnog naprezanja s povećanjem normalnog naprezanja. Za sve tri frakcije materijala s povećanjem normalnog naprezanja dolazi i do povećanja posmičnog naprezanja.

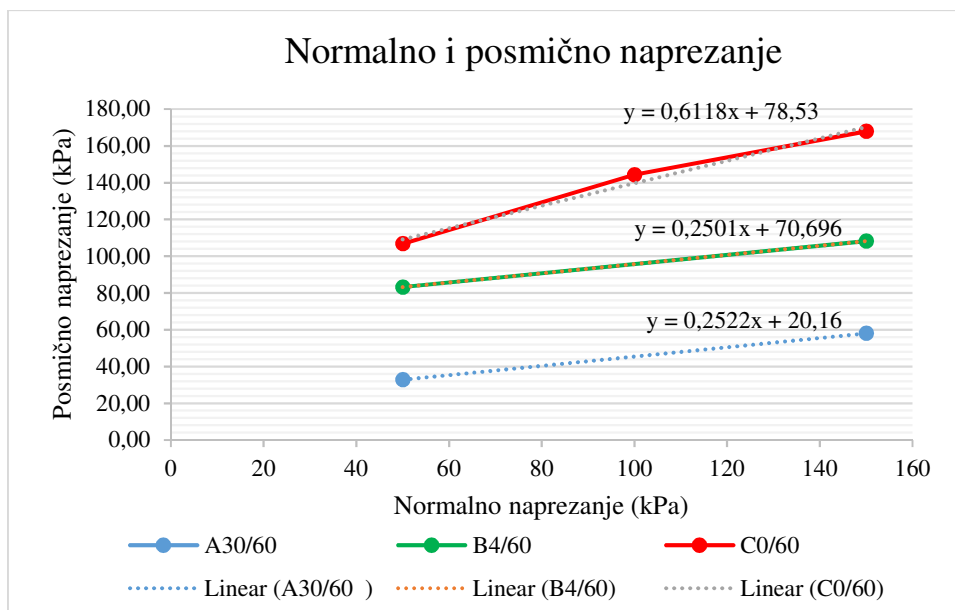


**Slika 5-21** Dijagram odnosa normalnog i posmičnog naprezanja za sve tri frakcije

Vrijednosti maksimalnih posmičnih naprezanja i srednje vrijednosti maksimalnih posmičnih naprezanja za ponovljena ispitivanja prikazani su u tablici 5-5. Srednje vrijednosti posmičnog naprezanja iz svakog tipa pokusa korištene su kod usporedbe pravca posmične čvrstoće pri izvlačenju što je prikazano na slici 5-22.

**Tablica 5-5** Maksimalna posmična naprezanja i srednje vrijednosti posmičnih naprezanja za sve tri frakcije

Frakcija	Vertikalno naprezanje (kPa)	Posmično naprezanje (kPa)	Srednja vrijednost posmičnog naprezanja (kPa)
A30/60	50	25,19	32,77
	50	36,16	
	50	36,97	
	150	63,50	58,00
	150	52,49	
B4/60	50	83,20	83,20
	150	110,88	108,20
	150	96,30	
	150	117,44	
C0/60	50	106,80	106,80
	100	144,34	144,34
	150	167,98	167,98



**Slika 5-22** Usporedba pravaca posmične čvrstoće za frakcije A30/60, B4/60 i C0/60 pri vertikalnom naprezanju 50 - 150 kPa

Koristeći oblik pravca kao krivulju trenda mogu se odrediti ekvivalentni parametri čvrstoće  $c$  i  $\varphi$  koji za frakcije A, B i C iznose:

- Frakcija A30/60  $c = 20.16$  kPa,  $\varphi = 14.16^\circ$
- Frakcija B4/60  $c = 70.67$  kPa,  $\varphi = 14.04^\circ$
- Frakcija C0/60  $c = 78.53$  kPa,  $\varphi = 31.38^\circ$

Kako se radi o nekoherentnoj ispuni parametri čvrstoće analiziraju se za  $c = 0$  i sekantni kut trenja na kontaktu  $\delta$  gdje je:

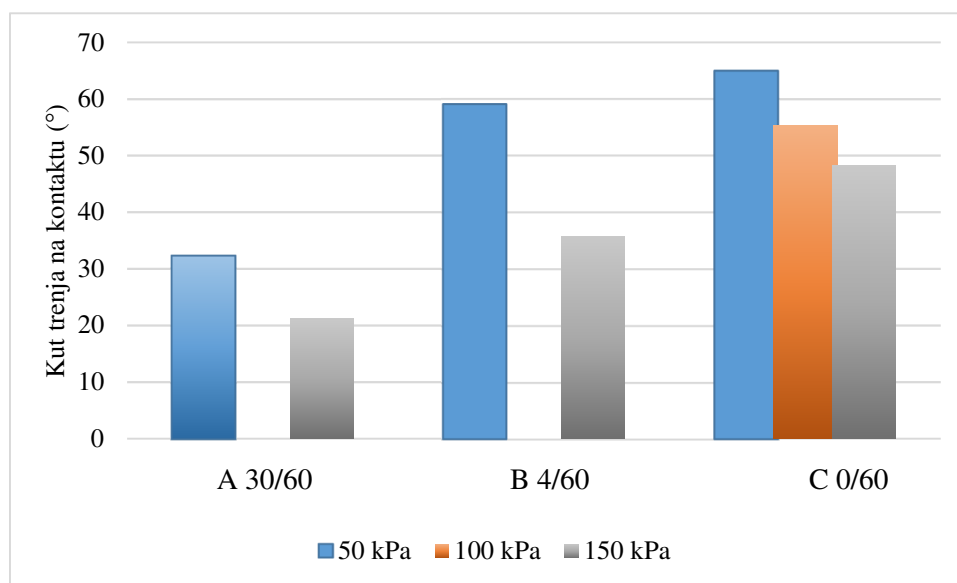
$$\delta = \arctan \frac{P}{2lb\sigma_v} \quad (5-2)$$

S obzirom na zakrivljenu anvelopu sloma pri manjim naprezanjima kut trenja na kontaktu  $\delta$  izračunava se za svaku vrijednost normalnog naprezanja pri ispitivanju te iznosi:

- Frakciju A30/60,  $\sigma_v = 50$  kPa,  $\delta = 33.23^\circ$
- Frakciju A30/60,  $\sigma_v = 150$  kPa,  $\delta = 21.14^\circ$
- Frakciju B4/60,  $\sigma_v = 50$  kPa,  $\delta = 59.00^\circ$
- Frakciju B4/60,  $\sigma_v = 150$  kPa,  $\delta = 35.81^\circ$
- Frakciju C0/60,  $\sigma_v = 50$  kPa,  $\delta = 64.92^\circ$
- Frakciju C0/60,  $\sigma_v = 100$  kPa,  $\delta = 55.29^\circ$
- Frakciju C0/60,  $\sigma_v = 150$  kPa,  $\delta = 48.24^\circ$

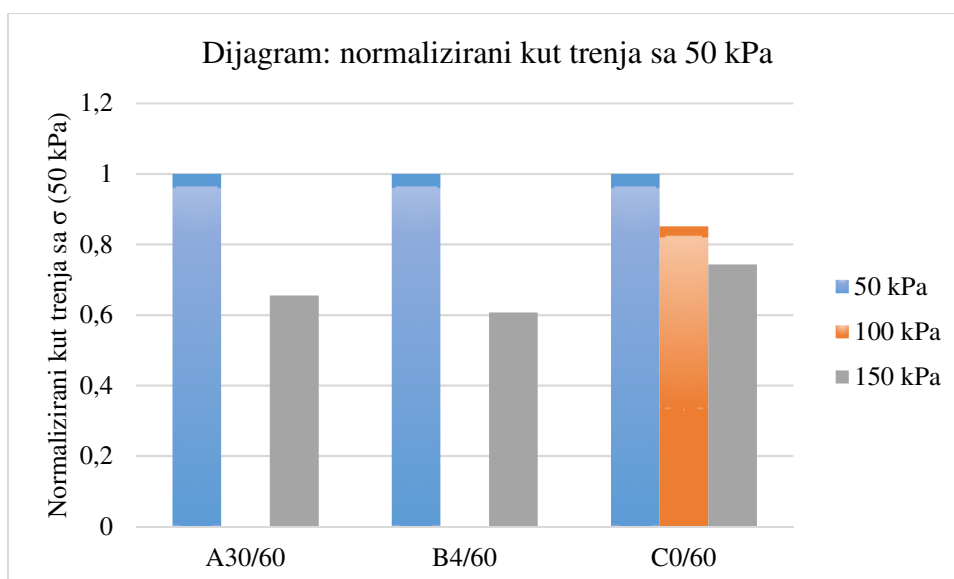
Grafički prikaz usporedbe odnosa vrijednosti kuta trenja na kontaktu pri izvlačenju za frakcije A30/60, B4/60 i C0/60 pri 50 i 150 kPa dan je na slici 5-23. Iz dijagrama se vidi da je najveći

kut trenja za frakciju C0/60 kod normalnog naprezanja od 50 kPa, dok je najmanji kut trenja za frakciju A30/60 kod normalnog naprezanja od 150 kPa. Kada se usporede kutovi trenja za sve tri frakcije kod jednakog normalnog naprezanja može se uočiti da kut trenja raste s boljom gradacijom materijala. Također se može uočiti da je kut trenja za frakciju C0/60 kod vertikalnog naprezanja od 150 kPa za 1,45 puta veći od kuta trenja za frakciju A30/60 pri normalnom naprezanju od 50 kPa. Rezultati ovih ispitivanja pokazuju da se za dobro graduiran materijal mogu postići veći kutovi trenja kod većih naprezanja (150 kPa) od onih koji se postižu za jednoliko graduiran materijal kod manjih vertikalnih naprezanja (50 kPa).



**Slika 5-23** Usporedba odnosa vrijednosti kuta trenja na kontaktu pri izvlačenju za A30/60, B4/60 i C0/60

Usporedba promjene sekantnog kuta trenja za sva tri granulometrijska sastava s vertikalnim naprezanjem pokazuje da su najmanje promjene sekantnog kuta za najbolje graduirani materijal, materijal s najvećom gustoćom C0/60. Najveće promjene sekantnog kuta trenja s vertikalnim naprezanjem određene su za frakciju B4/60. Kako je kod ove frakcije (B4/60) i najveći rasap gustoća ugrađenog materijala može se zaključiti da to utječe na veću razliku sekantnog kuta trenja s promjenom vertikalnog naprezanja. Dijagramom na slici 5-24 prikazane su vrijednosti sekantnog kuta trenja za svaki materijal s promjenom vertikalnog naprezanja, pri čemu je dijagram normaliziran s 50 kPa.



**Slika 5-24** Usporedba sekantnog kuta trenja za sva tri granulometrijska sastava pri vrijednosti ustanovljenoj pri vertikalnom naprezanju od 50 kPa

#### 5.4.1.4 Koeficijent interakcije lomljenog kamena i geosintetičke trake

Koeficijent interakcije je parametar kojim se karakterizira posmična čvrstoća, a važan je za proračun unutarnje stabilnosti konstrukcija od armiranog tla. Određuje se preko relacije 5-3.

$$f^* = \frac{\tau_{max}}{\sigma_{max}} \quad (5-3)$$

gdje je:

$$\tau_{max} = \frac{P}{2lb} \quad (5-4)$$

gdje je:

$P$  = maksimalna sila izvlačenja (kN)

$l$  = duljina trake (1,65 m)

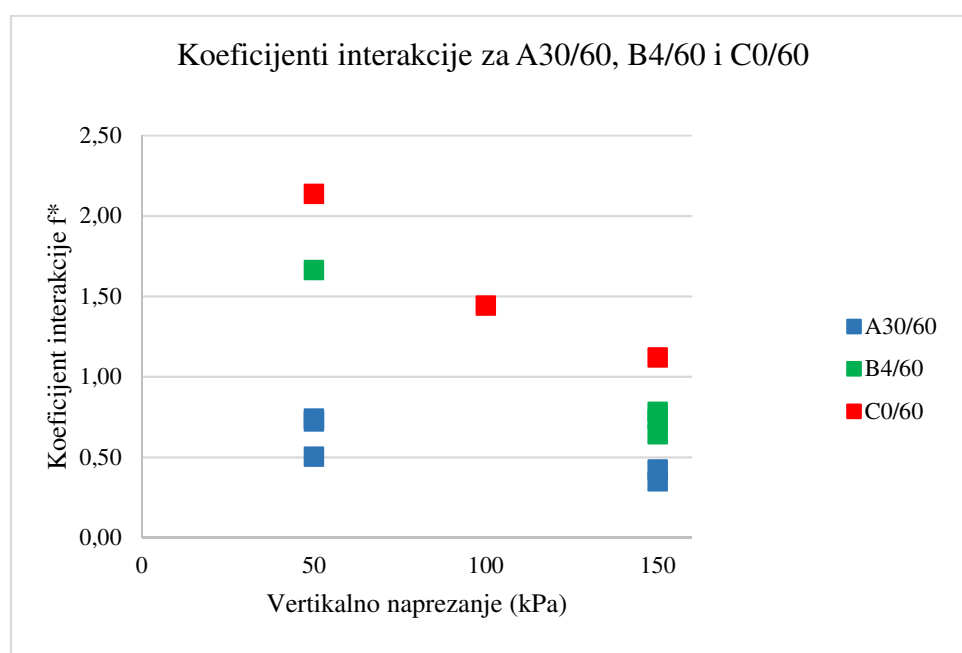
$b$  = širina trake (0,09 m).

Koeficijenti interakcije određeni su za svako ispitivanje prema jednadžbi 5-3. Najveći koeficijenti interakcije određeni su za frakciju C0/60 kod vertikalnog naprezanja od 50 kPa, dok su najmanji koeficijenti interakcije određeni za frakciju A30/60 kod vertikalnog naprezanja od 150 kPa. Za sve tri frakcije se vidi da koeficijent interakcije opada s porastom vertikalnog

naprezanja. To se može objasniti manjim kutom trenja materijala kod većih naprezanja i manjim kutom dilatancije. Koeficijenti interakcije određeni za sva ispitivanja prikazani su tablicom 5-6. i dijagramom na slici 5-25.

**Tablica 5-6** Koeficijenti interakcije geosintetičke trake i lomljenog kamena

Frakcija	Vertikalno naprezanje (kPa)	Koeficijent interakcije, $f^*$	Koeficijent interakcije $f^*$ (sred)
A30/60	50	0,50	0,66
	50	0,72	
	50	0,74	
	150	0,42	0,39
	150	0,35	
B4/60	50	1,66	1,66
	150	0,74	0,72
	150	0,64	
	150	0,78	
C0/60	50	2,14	2,14
	100	1,44	1,44
	150	1,12	1,12



**Slika 5-25** Dijagram koeficijenata interakcije za sve tri frakcije materijala za ispitivanje jedne trake

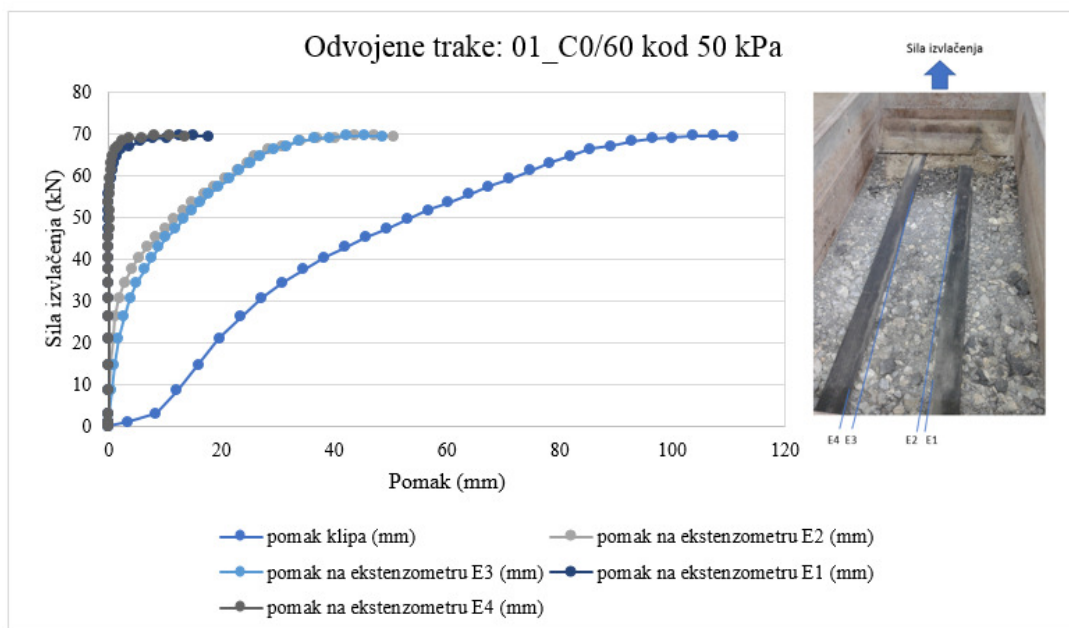


Usporedbom koeficijenata interakcije za iste frakcije kod različitog vertikalnog napreznja može se zaključiti da je koeficijent interakcije 1,5 do 2 puta manji kod napreznja od 150 kPa. Na temelju provedenih istraživanja može se zaključiti da granulometrijski sastav materijala ima također veliki utjecaj na koeficijent interakcije. Za isto vertikalno napreznje od 50 kPa koeficijent interakcije u materijalu C0/60 je 3,2 puta veći u odnosu na materijal A30/60 kod istog vertikalnog napreznja od 50 kPa. Ta razlika je malo manja kod većeg vertikalnog napreznja, gdje je koeficijent interakcije za materijal C0/60 2,8 puta veći od koeficijenta interakcije za materijal A30/60.

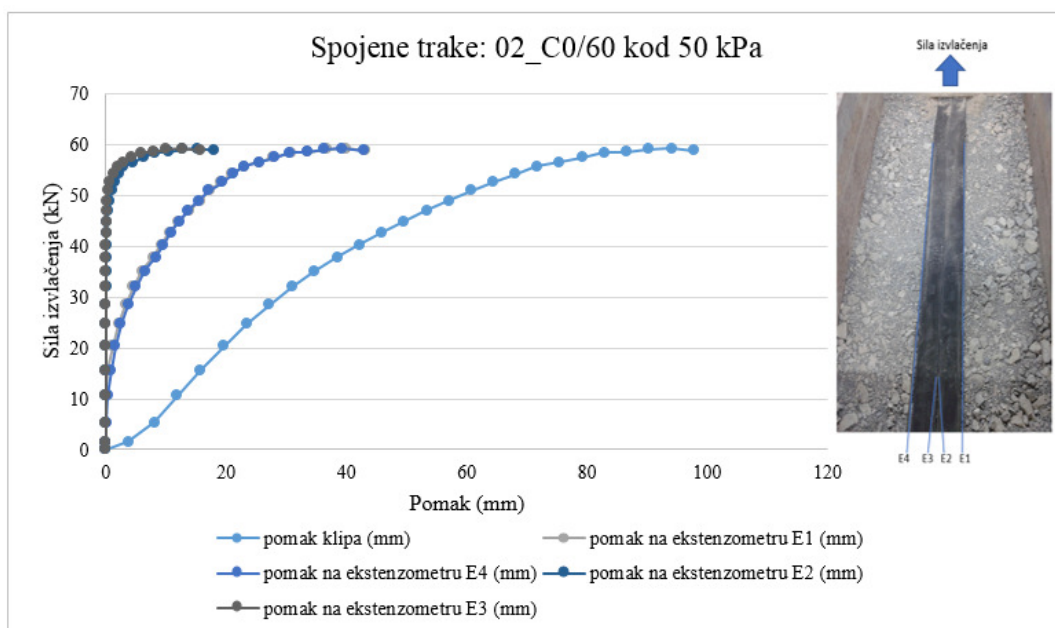
#### 5.4.2 Rezultati ispitivanja izvlačenja dvije geosintetičke trake

Ispitivanja izvlačenja dvije geosintetičke trake provedena su za samo jedan granulometrijski sastav materijala C0/60 i to kod jednog vertikalnog napreznja od 50 kPa. Za ispitivanje je odabran granulometrijski sastav u kojem su postignuti najveći koeficijenti interakcije za jednu traku, a vertikalno napreznje je ograničeno na samo jedno napreznje od 50 kPa zbog ograničenja uređaja za izvlačenja. Abdelouhab i drugi (2009) proveli su slična ispitivanja u kojima su usporedili koeficijente interakcije dobivene ispitivanjem jedne trake i dvije odvojene trake za slučaj kada je materijal ispune bio pijesak i šljunak. Autori su zaključili da su koeficijenti interakcije veći za slučaj ispitivanja provedenih s dvije odvojene trake i da su koeficijenti interakcije znatno veći od onih koji se koriste u praksi, za ispitivanja s pijeskom do 10% veći i ispitivanja sa šljunkom do 50% veći. Autori su pripisali veći koeficijent trenja za ispitivanja s dvije trake lučnom efektu i dilatanciji koja se javlja između dvije trake. Kako bi se potvrdila ova pretpostavka i kako bi se ocijenio utjecaj bočnog trenja trake s tlom ispitivanja u uređaju tip GFOS provedena su za dvije trake koje su na međusobnom razmaku 20 cm i dvije trake koje su položene jedna uz drugu. Razmak između traka je odabran tako da ne postoji utjecaj jedne trake na drugu. Ukupno je provedeno četiri ispitivanja izvlačenja, od čega su tri ispitivanja provedena za razmaknute trake i jedno s trakama položenim jedne uz drugu. Rezultati ispitivanja pokazali su da je sila izvlačenja veća za slučaj kada se izvlače dvije trake te da je sila izvlačenja veća za dvije razmaknute trake. Iz rezultata se vidi da je za dva ispitivanja s razmaknutim trakama postignuta približno ista sila izvlačenja, dok je za jedno ispitivanje, označeno oznakom 03\_C0/60 (50 kPa) postignuta manja sila izvlačenja. Mjerenje gustoće pokazalo je da je ovaj materijal imao manju gustoću ( $1,808 \text{ g/cm}^3$ ) u odnosu na materijal 01\_C0/60 s gustoćom  $2,29 \text{ g/cm}^3$  i 02\_C0/60 s gustoćom  $2,262 \text{ g/cm}^3$ . Uz izmjerenu manju

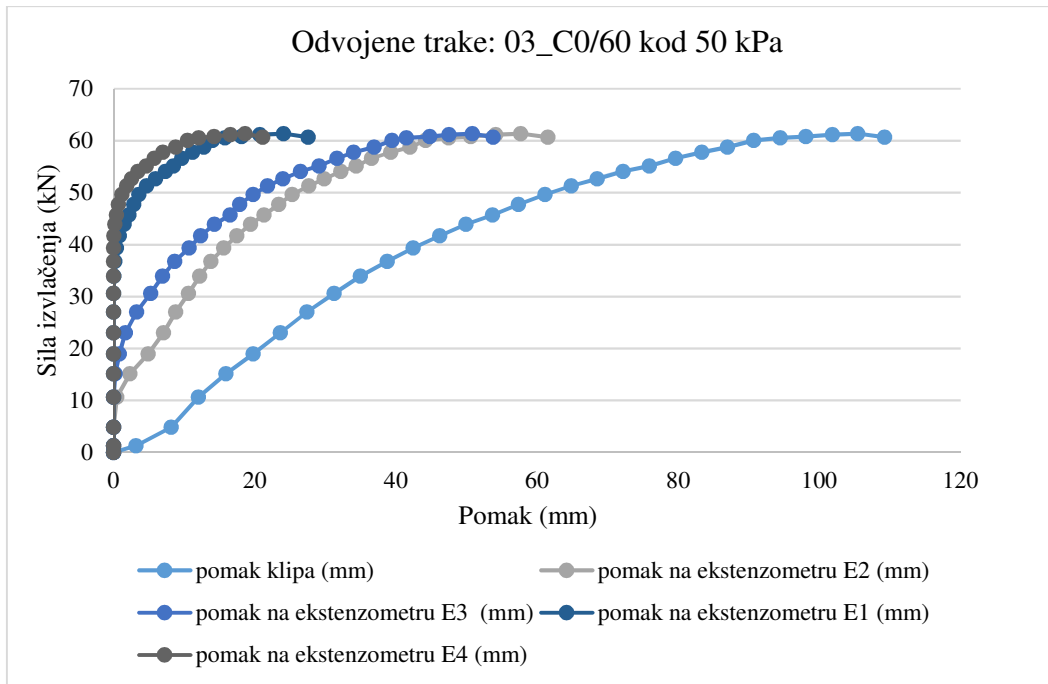
gustoću pregledom materijala nakon ispitivanja uočeno je da je uz traku bio dosta sitan materijal, tj. da je zbog upotrebe istog materijala došlo do drobljenja materijala, te to također može biti razlog manjoj sili izvlačenja. Kako bi se utvrdilo da li je stvarno veća sila izvlačenja za dvije odvojene trake provedeno je ispitivanje 04\_C0/60, te je kod ovog ispitivanja dodana krupnija frakcija materijala, materijal se homogenizirao i pažljivo ugrađivao da ne dođe do segregacije materijala te se zbijao na jednak način kao i prethodna ispitivanja. Ovim ispitivanjem potvrdila se veća sila izvlačenja za dvije odvojene trake. Rezultati svih ispitivanja prikazani su dijagramima na slikama od 5-26 do 5-29. Dijagramima na slikama 5-30 A i B, prikazana je usporedba sila izvlačenja i pomaka klipa i pomaka prvih točaka u kutiji i sile izvlačenja. Iz dijagrama na slici 5-30 A vidi se da sve krivulje na početku imaju jednak nagib, te da kod pomaka klipa od približno 60 mm dolazi do promjene nagiba u krivuljama, pri čemu se krivulje za dvije razmaknute trake kod dobro zbijenog materijala poklapaju. Na dijagramu na slici 5-30 B koja prikazuje pomak prvih točaka u kutiji i sile izvlačenja može se uočiti da se za ispitivanje dvije spojene trake krivulje pomaka točaka u kojima su praćeni pomaci poklapaju, dok se za ispitivanje 03\_C0/60 vidi da je najveća razlika u krivuljama pomak i sile za dvije točke na početku traka u kojima su praćeni pomaci. Ove razlike u aktiviranju početka jedne i druge trake u kutiji samo potvrđuju nehomogenost ugrađenog materijala, te se iz tog razloga rezultati tih ispitivanja ne promatraju u daljnjim analizama.



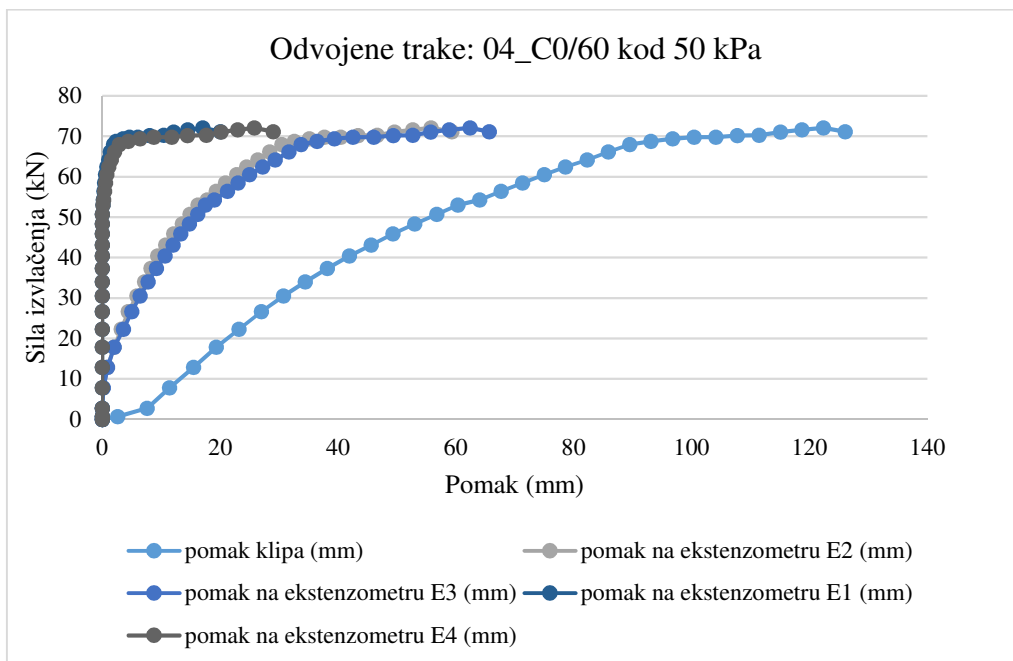
**Slika 5-26** Dijagram sile izvlačenja i pomaka trake za frakciju C0/60 kod 50 kPa za dvije odvojene trake



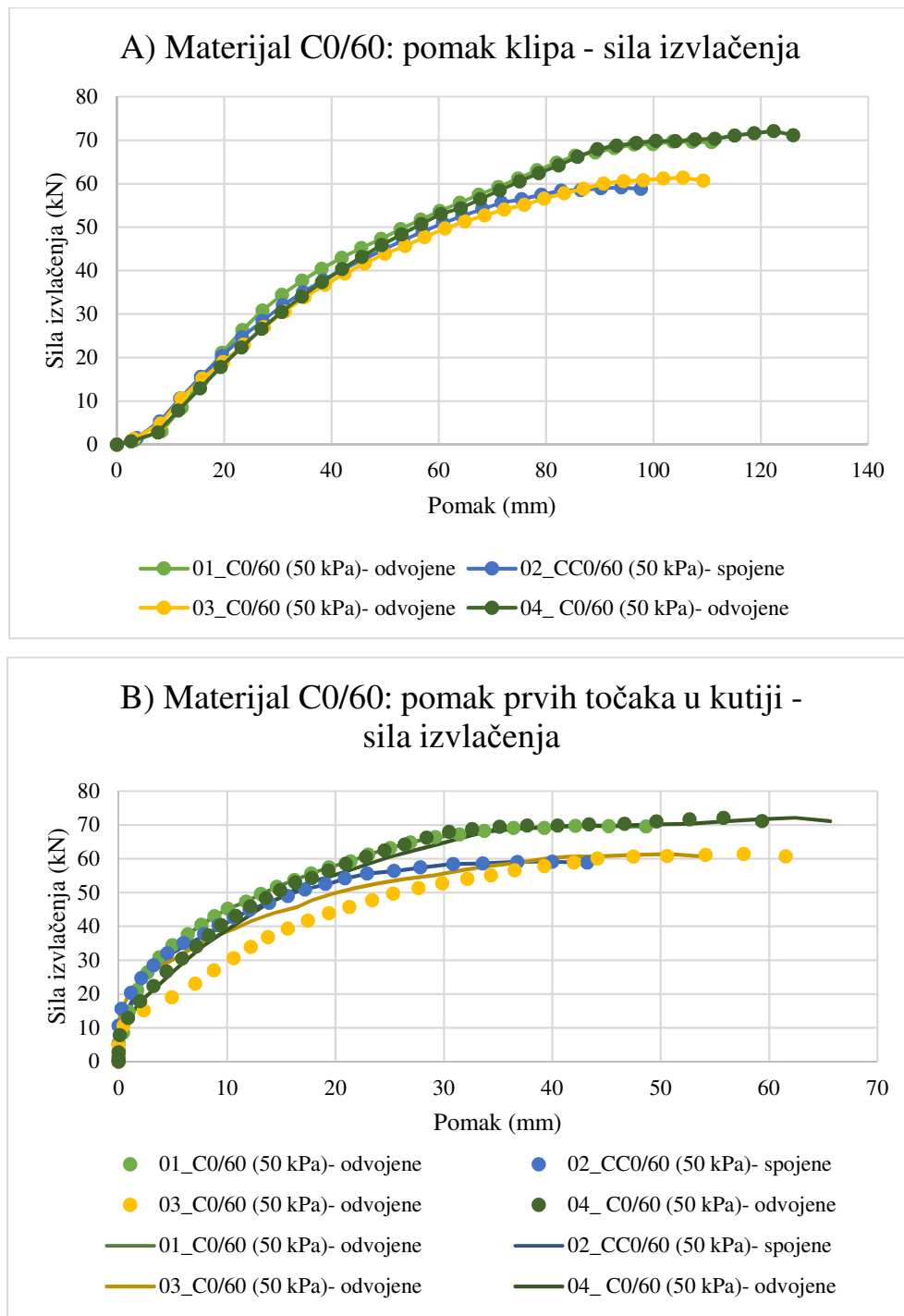
**Slika 5-27** Dijagram sile izvlačenja i pomaka trake za frakciju C0/60 kod 50 kPa za dvije spojene trake



**Slika 5-28** Dijagram sile izvlačenja i pomaka trake za frakciju C0/60 kod 50 kPa za dvije odvojene trake



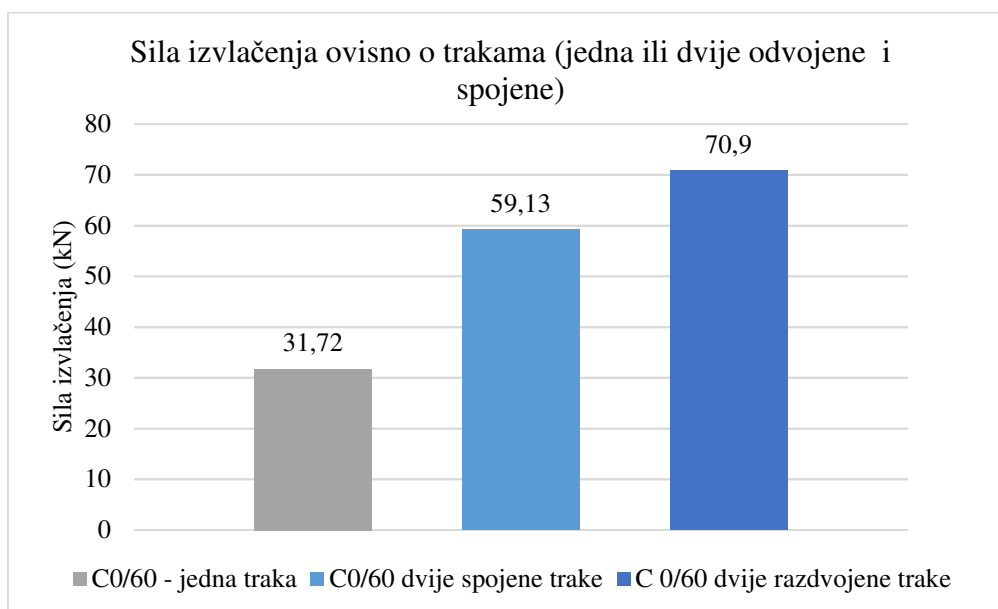
**Slika 5-29** Dijagram sile izvlačenja i pomaka trake za frakciju C0/60 kod 50 kPa za dvije odvojene trake



**Slika 5-30** Dijagram A) Sile izvlačenja i pomaka klipa i B) Pomaka prvih točaka u kutiji i sila izvlačenja

Na dijagramu na slici 5-31 prikazana je usporedba sila izvlačenja za frakciju C0/60 kod 50 kPa za ispitivanje jedne trake, dvije spojene i dvije odvojene trake. U prikazu rezultata za dvije odvojene trake uzeta je srednja vrijednost za dva ispitivanja, dok su rezultati ispitivanja 03\_C0/60 zanemareni jer je uzorak ugrađen s manjom gustoćom. Sila izvlačenja kod ispitivanja

s dvije trake položene jedne uz drugu je 1,87 puta veća od sile izvlačenja za jednu traku, dok je sila izvlačenja za dvije razmaknute trake 2,24 puta veća od sile izvlačenja za jednu traku. Iz ovih rezultata može se zaključiti da se na rubovima traka javlja efekt spriječene dilatancije koji dovodi do povećanja sile izvlačenja.



**Slika 5-31** Usporedba maksimalnih sila izvlačenja za frakciju C0/60 kod naprezanja od 50 kPa za slučaj jedne trake, dvije spojene i dvije odvojene trake

Alfaro i drugi (1995) provodili su istraživanje mehanizma interakcije za jednoosne mreže širine 10, 15, 20, 30, 45, 58 cm. Ispitivanja su proveli pri četiri vertikalna opterećenja 20 kPa, 30 kPa, 40 kPa i 50 kPa, a materijal ispune korišten u ispitivanju je dobro graduirani pjeskovit šljunak. Na temelju provedenih istraživanja zaključili su da se kod širih mreža javlja dvodimenzionalni mehanizam interakcije dok je kod užih mreža uočena pojava trodimenzionalnog mehanizma interakcije ili kombinacija dvodimenzionalnog i trodimenzionalnog mehanizma interakcije. Autori ističu da se dvodimenzionalan mehanizam interakcije odnosi na trenje koje se javlja na kontaktu geomreže i tla, dok se trodimenzionalni mehanizam javlja kao posljedica djelovanja ograničene dilatancije na rubovima armature, pri čemu je trodimenzionalni mehanizam izraženiji kod armature manje širine. Autori ističu da kod izvlačenja armature zona tla koja se nalazi oko elemenata armature djeluje kao ograničenje na djelu tla koje ima tendenciju dilatirati te to generira posmična naprezanja na rubovima između dilatirajuće i nedilatirajuće zone i kao rezultat dolazi do povećanja naprezanja na rubovima armature. Međutim autori ističu da je

minimalni 3D efekt uočen kod uzoraka manjih od 20 cm širine te to objašnjavaju preklapanjem zona koje teže povećanju normalnog naprezanja (detalniji opis sa slikama dan je u prethodnom poglavlju 3.2.2). Također ističu da je taj 3D efekt izraženiji kod manjih vertikalnih naprezanja, dok kod većih naprezanja od 50 kPa tog efekta više nema. Kod ispitivanja geosintetičkih traka koja su provedena na Građevinskom fakultetu u Osijeku efekt trodimenzionalnog otpora kod traka može se promatrati ispitivanjem u kojem se mijenjala širina trake. Ispitivanja su provedena tako da su se koristile dvije trake, spojene ili razdvojene s horizontalnim razmakom između traka od 20 cm, slika 5-32. Na taj način se iz razlike sila izvlačenja za dvije spojene i dvije razdvojene trake može ocijeniti utjecaj bočnog trenja tla na rubovima traka. Kod ispitivanja dviju razdvojenih traka postignuta je sila izvlačenja od 70,9 kN dok je kod izvlačenja dviju spojenih traka postignuta sila izvlačenja od 59,13 što čini 20% veću silu izvlačenja za dvije razdvojene trake. Ovo povećanje sile izvlačenja može se pripisati trodimenzionalnom otporu koji se javlja na rubovima traka. Usporedba rezultata izvlačenja jedne i dvije razdvojene trake te dvije spojene trake je moguća zato jer je gustoća materijala u kojem su provedena ispitivanja za sva tri ispitivanja oko 2,3 g/cm<sup>3</sup> te se ispitivanja mogu uspoređivati.

Bočno trenje na rubu trake može se odrediti iz odnosa maksimalnih sila izvlačenja za jednu traku ( $T_1$ ), dvije spojene trake ( $T_{2S}$ ) i dvije razdvojene trake ( $T_{2R}$ ). Ispitivanje otpornosti na izvlačenje u ova tri oblika obavljeno je na materijalu C0/60 pri vertikalnom naprežanju od 50 kPa. U tim pokusima izmjerene su maksimalne sile izvlačenja kako slijedi: maksimalna sila izvlačenja za  $T_1=31,72$  kN za  $T_{2S}=59,13$  kN i  $T_{2R}=70,9$  kN. Uzevši u obzir ove vrijednosti može se uspostaviti odnos između izmjerenih sila :

$$\frac{T_{2R}}{T_1} = \frac{70,9 \text{ kN}}{31,72 \text{ kN}} = 2,24 \quad (5-5)$$

$$\frac{T_{2R}}{T_{2S}} = \frac{70,9 \text{ kN}}{59,13 \text{ kN}} = 1,19 \quad (5-6)$$

$$\frac{T_{2S}}{T_1} = \frac{59,13 \text{ kN}}{31,72 \text{ kN}} = 1,86 \quad (5-7)$$

Vidljivo je da dvije odvojene trake daju veći otpor (za 11%) od dvostruke vrijednosti za otpor jedne trake, a da dvije spojene trake daju otpor manji od dvostruke vrijednosti otpora izvlačenju jedne trake (za oko 7%). Očito je da se pojavljuje utjecaj bočnog trenja trake i tla koji se različito odražava na spojene i razdvojene duple trake.

Bočno trenje na jednoj traci  $T_{tr}$  može se odrediti na dva načina:

- iz razlike maksimalne sile izvlačenja za dvije razdvojene i dvije spojene trake
- iz razlike sila za dvije razdvojene trake i samostalne trake prema relaciji 5-9.

a) bočno trenje iz razlike sila za spojene i razdvojene trake :

$$T_{tr} = \frac{T_{2R} - T_{2S}}{2} = \frac{70,9 - 59,13}{2} = 5,86 \text{ kN} \quad (5-8)$$

Dakle, bočno trenje na jednoj traci iznosi  $T_{tra} = 5,86 \text{ kN}$  (u spojenim trakama dva unutarnja ruba nemaju trenje, pa se sva razlika u silama može pripisati nedostatku trenja u toj zoni, a to znači da se računa s dva ruba i da ta razlika predstavlja trenje koje se javlja na jednoj traci).

Ako je bočno trenje  $T_{tra} = 5,86 \text{ kN}$ , a ukupna sila izvlačenja jedne trake je  $T_l = 31,72 \text{ kN}$  iz odnosa bočnog trenja za jednu traku ( $T_{tr}$ ) i maksimalne sile izvlačenja za jednu traku ( $T_l$ ) dobije se da bočno trenje iznosi 18,47% ukupne sile izvlačenja.

b) bočno trenje iz razlike sila za dvije spojene trake i za jednu traku

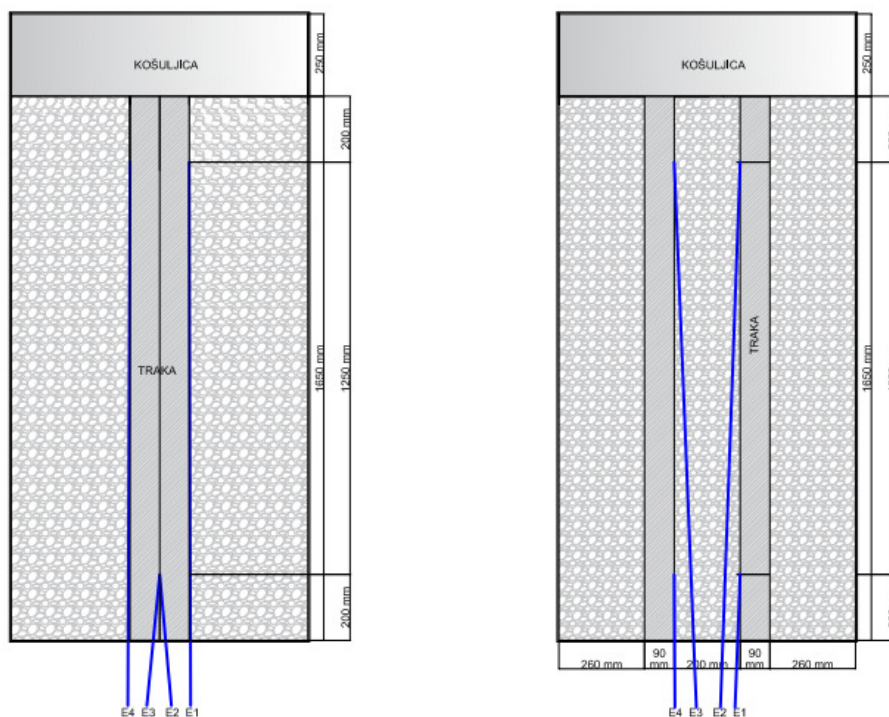
Polovina sile za spojene trake odnosi se na jednu traku, a ta ima samo jednu stranu izloženu bočnom trenju, pa se dvostruka vrijednost razlike  $T_l - T_{2S}/2$  može shvatiti kao ukupno trenje na jednoj traci:

$$T_{trb} = 2 \times (T_l - T_{2S}/2) = 2 \times (31,72 - 59,13/2) = 4,31 \text{ kN} \quad (5-9)$$

Očigledno postoji razlika u iznosu sile bočnog trenja jedne trake pri izvlačenju kada se računa po ova dva pristupa. Razdvojene trake imaju veću vrijednost otpornosti od dvostruke otpornosti jedne trake, što se možda može pripisati nedovoljnoj udaljenosti traka ili promjeni smjera traka tijekom smicanja, čime se aktiviraju dodatni mehanizmi interakcije traka prema tlu na boku trake, drugačiji nego za slučaj jedne trake. Moguće je i da spojene trake izazivaju drugačiju međusobnu interakciju bočnih strana tla nego što je slučaj kod jedne trake. Osim toga, ova mjerenja odnose se na jedan pokus svake vrste, i možda bi ponovljena mjerenja dala nešto drugačije rezultate. Imajući to u vidu, čini se razumnim da se u dalje razmatranje uzme srednja vrijednost bočnog trenja iz oba načina izračuna, pa bi prema tome sila bočnog trenja na jednoj traci iznosila 5,1 kN što znači da je doprinos bočnog trenja trake u ukupnoj nosivosti trake (otporu izvlačenja) oko 16 %.

$$T_{tr} = (T_{tra} + T_{trb}) / 2 = (5,86 + 4,31) / 2 = 5,1 \text{ kN} \quad (5-10)$$





**Slika 5-32** Skica spojenih i razdvojenih traka u pokusu izvlačenja

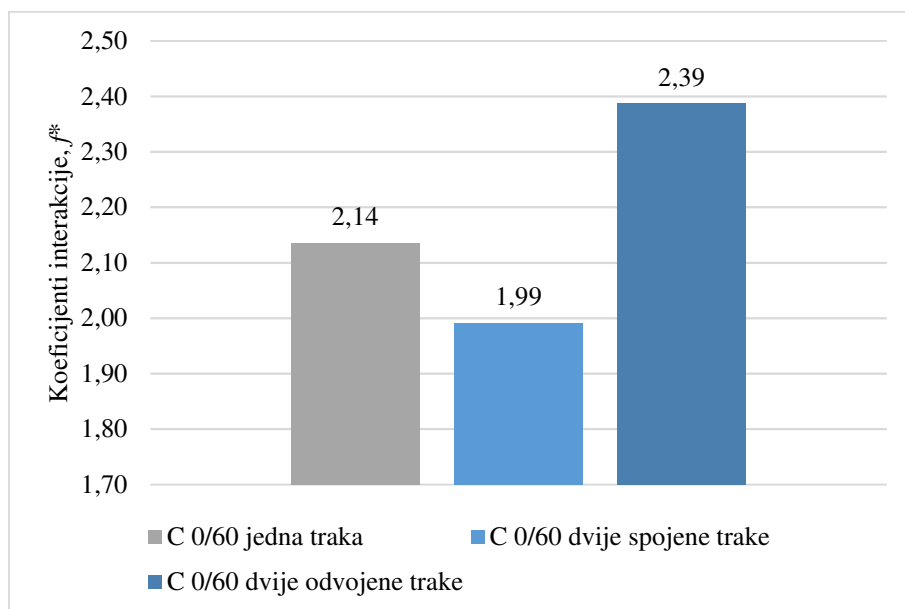
#### 5.4.2.1 Koeficijent interakcije za dvije spojene trake

Koeficijent interakcije za dvije trake određen je za slučaj kada su dvije trake položene jedna uz drugu i dvije razdvojene trake, a određen je preko relacije 5-1 i 5-2 pri čemu je širina trake za ispitivanje s dvije trake jednaka  $2b$  ( $2 \times 0,09$  m). Za slučaj dvije razdvojene trake određeni su veći koeficijenti interakcije nego za dvije spojene trake, tablica 5-7. Takvi rezultati su i očekivani zato jer dvije odvojene trake imaju četiri ruba na kojima dolazi do bočnog trenja, dok kod dvije spojene trake postoje samo dva ruba na kojima dolazi do bočnog trenja. Koeficijenti interakcije uspoređeni su s koeficijentima interakcije koji su određeni za jednu traku u istom materijalu i pri istom normalnom naprezanju, slika 5-33. Najviši koeficijenti interakcije određeni su za dvije odvojene trake, zatim za jednu traku, te za dvije spojene trake. Ovi rezultati pokazuju da bočno trenje na rubovima geosintetičke trake doprinosi povećanju koeficijenta interakcije te da se kod dvije spojene trake javlja kombinacija 2D mehanizma interakcije (trenja) i 3D mehanizma, dok je kod jedne trake dominantan 3D mehanizam interakcije. Za dvije odvojene trake dobiveni su veći koeficijenti interakcije u odnosu na jednu traku. Razlog većeg koeficijenta interakcije može biti svodno djelovanje dvije trake ili mobiliziranje većeg volumena materijala između traka. Kako bi se utvrdilo koji volumen materijala se mobilizira

prilikom izvlačenja trake potrebno je provesti dodatna ispitivanja kojima bi se mjerilo pomicanje materijala u okolici traka uz različite razmake između traka u ovisnosti o širini trake i granulaciji tla. Takva ispitivanja u okviru ovog rada nije bilo moguće provesti već se to planira u daljnjim istraživanjima.

**Tablica 5-7** Koeficijenti interakcije geosintetičke trake i lomljenog kamena

Frakcija	Vertikalno naprezanje 50 kPa	Koeficijent interakcije, $f^*$	Koeficijent interakcije $f^*$ (sred)
C0/60	spojene	1,99	2,39
	odvojene (1. pokus)	2,35	
	odvojene (2. pokus)	2,43	

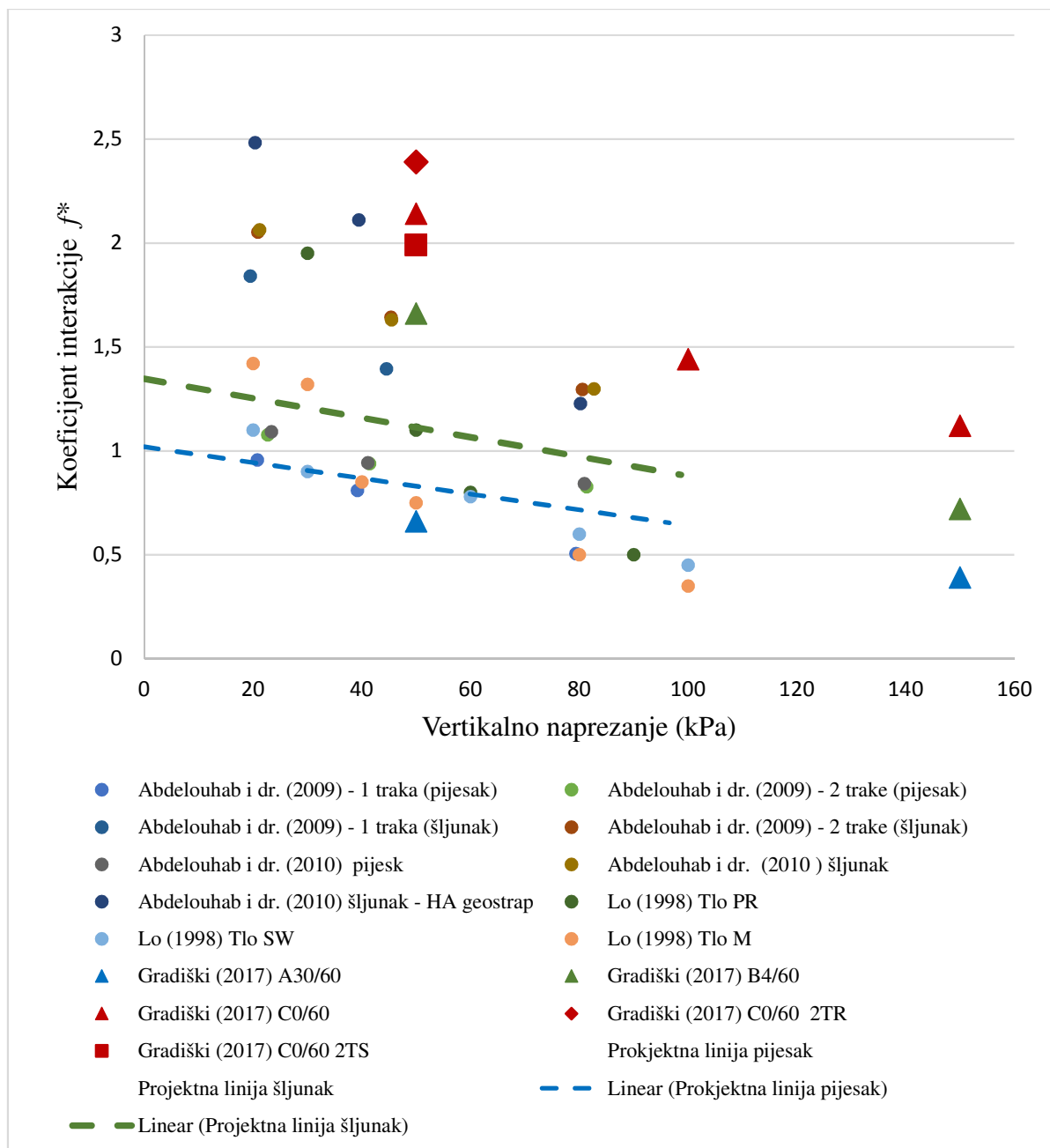


**Slika 5-33** Usporedba koeficijenata interakcije za ispitivanje jedne trake, dvije spojene i dvije odvojene trake pri vertikalnom naprezanju od 50 kPa

#### 5.4.3 Usporedba koeficijenata interakcije za jednu i dvije trake s podacima iz literature

Rezultati provedenih ispitivanja uspoređeni su s dostupnim podacima iz literature za ispitivanja koja su provedena na sličnim armaturnim elementima (geosintetičkim trakama), ali s različitim materijalom ispune. Abdelouhab (2010) je provodio ispitivanja izvlačenja za geosintetičke trake i materijal ispune pijesak i šljunak, dok je Lo (1998) proveo ispitivanja u dobro građiranom pjeskovitom šljunku (oznaka PR) s manje od 15% sitnih čestica (manjih od 75

μm), dobro graduiranom šljunkovitom pijesku (oznaka SW) i dobro graduiranom pijesku s nešto šljunka (oznaka M). Iz usporedbe koeficijenata interakcije vidljivo je da su koeficijenti interakcije geosintetičke trake i lomljenog kamena za frakcije B4/60 i C0/60 s jednom trakom, dvije spojene trake i dvije razdvojene trake veći od koeficijenta koji su određeni za pijesak i šljunak. Također se vidi da su koeficijenti interakcije za jednoliko graduirani lomljeni kamen A30/60 manji od koeficijenata za pijesak i šljunak. Iz dijagrama na slici 5-34 može se uočiti da su koeficijenti interakcije koji se koriste u praksi (projektne linije za pijesak i šljunak) znatno podcijenjeni u odnosu na vrijednosti koeficijenata interakcije kada se koristi lomljeni kamen kao materijal ispune. Iz provedenih ispitivanja i usporedbe s rezultatima iz literature može se zaključiti da granulometrijski sastav materijala i oblik zrna znatno utječu na interakciju geosintetičke trake i tla. Ispitivanja su pokazala da su koeficijenti interakcije lomljenog kamena i geosintetičke trake znatno veći od koeficijenta koji su određeni u pijesku i/ili šljunku. Ispitivanjima s dvije trake pokazalo se da se na rubovima traka javlja 3D mehanizam interakcije, koji je očito jače izražen u lomljenom kamenu koji ima veće kutove trenja i dilatancije od pijeska i šljunka. S druge strane za jednoliko graduirani lomljeni kamen ispitivanjima izravnog smicanja određeni su najveći kutovi trenja i kutovi dilatancije dok su za taj materijal pokusom izvlačenja dobiveni vrlo mali koeficijenti interakcije. Ovi rezultati ukazuju na činjenicu da je kod interakcije trake i tla bitan i koeficijent nejednoličnosti. Što je veći koeficijent jednoličnosti može se postići i veća zbijenost materijala što znači da je veći broj čestica tla u kontaktu s trakom, te prilikom interakcije trake i tla dolazi do povećanja bočnog trenja na rubovima trake.



Slika 5-34 Usporedba koeficijenta interakcije s dostupnim podacima iz literature

## 6 POVRATNE ANALIZE IZVLAČENJA GEOSINTETIČKE TRAKE

Numerička analiza izvlačenja geosintetičke trake provedena je upotrebom programa Plaxis 2D 2016 koji se temelji na metodi konačnih elemenata. Povratne analize provedene su kako bi se odredila mogućnost simulacije pokusa izvlačenja geosintetičke trake i lomljenog kamena programom Plaxis 2D te kako bi se odredilo koji parametri materijala znatno utječu na rezultate izvlačenja.

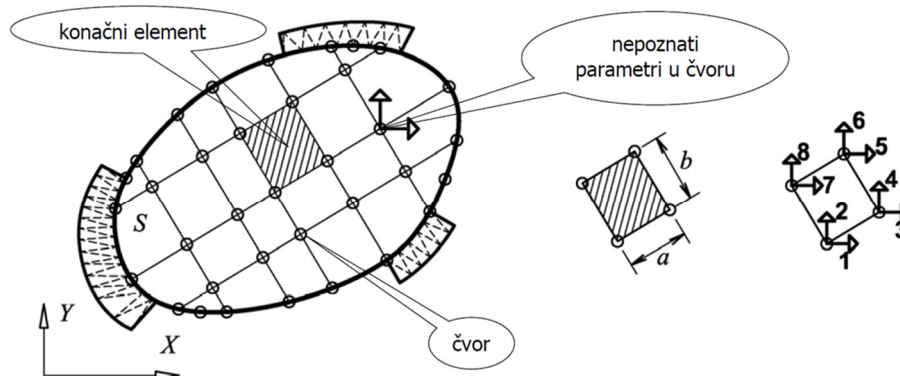
### 6.1 Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata (MKE) temelji se na diskretizaciji područja proračuna, pri čemu element diferencijalno malih dimenzija zamjenjujemo elementom konačnih dimenzija. Diskretizacijom, osnovne jednačbe pomoću kojih opisujemo stanje u pojedinim elementima, prelaze iz diferencijalnih odnosno integralnih, u obične algebarske. Pri tome razmatrano područje (proračunski model) nije više kontinuum s beskonačno mnogo stupnjeva slobode, nego model međusobno povezanih konačnih elemenata s konačnim brojem stupnjeva slobode.

Karakteristike metode konačnih elemenata su sljedeće:

- Razmatrano područje kontinuuma, pomoću zamišljenih linija ili površina, dijeli se na određeni broj manjih područja konačnih dimenzija. Manji broj područja naziva se konačni element, a njihov skup za cijelo područje sustav ili mreža konačnih elemenata.
- Konačni elementi međusobno su povezani konačnim brojem točaka i bridova. Točke nazivamo čvornim točkama ili čvorovima.
- Stanje u svakom konačnom elementu (npr. polje pomaka, deformacija, naprezanja...) opisuje se pomoću interpolacijskih funkcija i konačnog broja parametara u čvorovima koji predstavljaju osnovne nepoznate veličine u MKE.
- Za analizu i proračun sustava konačnih elemenata važe svi principi i postupci koji važe za klasične diskretne sustave.

Podjela kontinuuma na određeni broj manjih područja konačnih dimenzija prikazana je na slici 6-1.



**Slika 6-1** Metoda konačnih elemenata (Salatić 2016)

### 6.1.1 Program Plaxis 2D

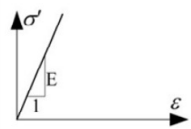
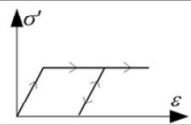
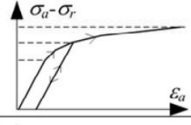
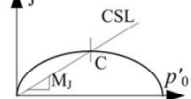
Program Plaxis 2D je dvodimenzionalni program koji se temelji na metodi konačnih elemenata. Razvoj programa započeo je 1987. g. u Nizozemskoj na *Delft University of Technology*, a inicijalna svrha je bila da se razvije jednostavan 2D program koji će se koristiti za analizu riječnih nasipa na mekom tlu. Danas se Plaxis koristi za rješavanje brojnih geotehničkih problema koji uključuju proračune deformacija, stabilnosti, konsolidacije, procjeđivanja, te dinamičkog opterećenje. Program je jednostavan za korištenje i omogućuje brzo i jednostavno kreiranje numeričkog modela, a može se podijeliti u tri ključna dijela:

- definiranje geometrije modela i parametara materijala
- definiranje proračunskih faza
- analizu rezultata.

Prvi dio numeričkog modela uključuje definiranje geometrije modela, definiranje parametara materijala, strukturnih elemenata, definiranje zadanih opterećenja ili pomaka, te definiranje rubnih uvjeta.

U programu je moguće definirati kompleksnu geologiju, a parametri materijala koje je potrebno definirati u programu ovise o konstitucijskom modelu kojim se opisuje ponašanje materijala. Konstitucijskim modelima se opisuje odnos naprezanja i deformacija za element tla, a model

predstavlja idealizirano ponašanja. Konstitucijski model može se definirati kao skup matematičkih jednažbi koje definiraju odnose komponenti naprezanja i komponenti deformacija. Zbog izrazito nelinearnog i plastičnog ponašanja tla te pojave dilatancije karakteristične za zrnate materijale, do danas još uvijek nije razvijen konstitucijski model koji bi opisivao sve elemente realnog ponašanja tla (Sokolić & Szavits-Nossan 2011). Konstitucijski modeli biraju se ovisno o problemu koji je potrebno riješiti jer nisu svi modeli za sve inženjerske probleme. Svaki konstitucijski model tla temelji se na opisivanju krivulje posmično naprezanje – deformacija koja određuje čvrstoću i krutost tla za proizvoljno stanje naprezanja i deformacija. Sokolić i Szavits-Nossan (2011) daju prikaz konstitucijskih modela tla koji se često koriste u geotehničkoj praksi s osnovnim elementima opisivanja realnog ponašanja tla te s pripadnim područjem primjene, slika 6-2.

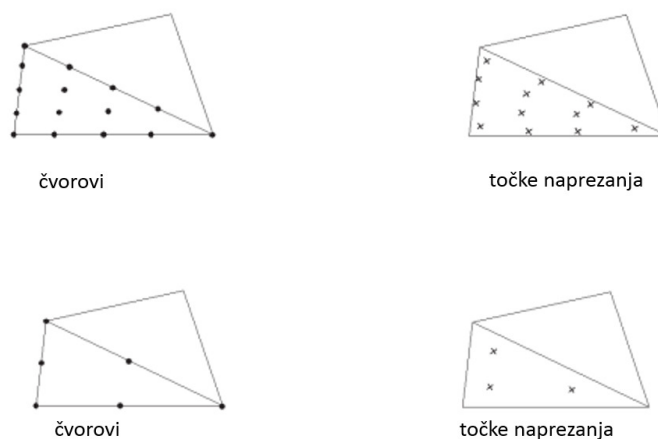
MODEL	temeljna krivulja	elementi ponašanja tla	nedostatci	vrsta modela (primjena)
LINEARNO ELASTIČNI		- linearno elastično ponašanje	- neograničena čvrstoća - nema pojave dilatancije - jedinstvena krutost za opterećenje / rasterećenje - zavisnost volumenske i posmične krutosti	- LE model (Plaxis) - Hooke <b>(gruba kontrola uporabivosti) (monolitne stijene)</b>
IDEALNO ELASTO-PLASTIČNI		- linearno elastično ponašanje do sloma - jedinstvena ploha sloma - jedinstvena dilatancija pri slomu	- jedinstvena krutost za opterećenje / rasterećenje - jedinstvena krutost ovisno o stanju naprezanja i deformacija	- Mohr-Coulomb MC (Plaxis) - Von Mises - Druker-Prager <b>(gruba kontrola nosivosti)</b>
OČVRŠĆA-VAJUĆI		- posmično očvršćivanje - redukcija krutosti ovisno o stanju deformacija - ovisnost početne krutosti o stanju naprezanja	- nedostaje redukcija vršne čvrstoće - nedostaje kritično stanje - dodatna pravila za ponašanje pri rasterećenju	- Hardening soil HS (Plaxis) - BRICK model - NOVA model <b>(pijesci, šljunci, krute gline)</b>
MODEL KRITIČNOG STANJA		- kritično stanje - izotropno očvršćivanje - redukcija vršne čvrstoće	- kritično stanje	- Cam-Clay (Plaxis) <b>(meke gline)</b>

Slika 6-2 Konstitucijski modeli tla (Sokolić & Szavits-Nossan 2011)

U programu Plaxis 2D moguće je odabrati 8 različitih modela: *Linear elastic* (LE), *Mohr-Coulomb* (MC), *Hardening soil* (HS), *Hardening Soil model with small stiffness* (HSsmall), *Soft Soil model* (SS), *Soft Soil Creep model* (SSC), *Jointed Rock model* (JR). Kod korištenja VIP licence programa moguće je koristiti još dodatnih pet modela: *NGI-ADP model*, *Hoek-Brown model* (HB), *Sekiguchi-Ohta model* (Inviscid), *Sekiguchi-Ohta model* (Viscid) i *User-defined soil model* (USSM). U nastavku će biti detaljnije opisani MC model koji je korišten za provedbu povratnih analiza.

Strukturni elementi koje je moguće definirati u modelu uključuju sljedeće elemente: ploče (*Plate*), geomreže (*Geogrid*), tuneli (*Tunnels*), sidra (*Node – to node anchors* i *Fixed-end anchors*), bunari (*Wells*), drenovi (*Drains*). Interakcija između strukturnih elemenata i elemenata tla definira se kontaktnim elementima (*Interface*). Generiranje modela završava generiranjem mreže konačnih elemenata. U programu Plaxis 2D mreža konačnih elemenata sastoji se od trokutnih elemenata pri čemu se može birati mreža u kojoj trokutni element ima 15 čvorova ili trokutni element sa 6 čvorova, slika 6-3. Kod definiranja mreže potrebno je gustoću mreže konačnih elemenata prilagoditi modelu na način da je mreža gušća na mjestima koncentracije naprezanja, a da je u ostalim područjima gustoća mreže manja kako bi se smanjilo vrijeme proračuna. Nakon generiranja mreže potrebno je definirati faze proračuna. Broj faza ovisi o složenosti problema koji je potrebno riješiti, a svi modeli imaju početnu inicijalnu fazu u kojoj se računaju početna stanja naprezanja. Svaka faza u proračunu odgovara posebnom opterećenju ili fazi izgradnje.

Treći dio programa uključuje pregled i analizu rezultata proračuna.



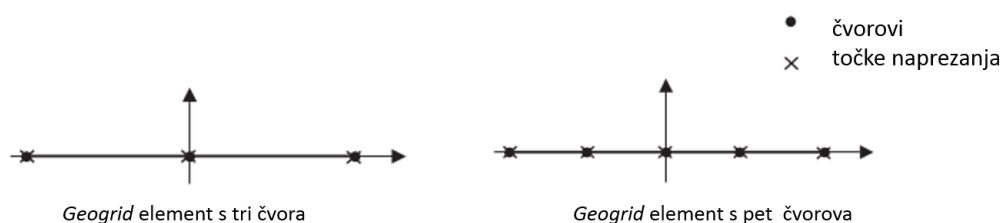
**Slika 6-3** Položaj čvorova i točaka naprezanja u elementu tla (Plaxis 2016)

Program Plaxis 2D pokazao se i kao dobar program za provedbu parametarskih analiza pokusa izvlačenja za različite vrste elemenata armature (Khedkar & Mandal 2009, Abdi & Zandieh 2014, Sukmak et al. 2016). Abdi i Zandieh (2014) koristili su program Plaxis v8 za numeričku analizu izvlačenja geomreže iz tla (gline i pijeska) pri čemu su definirali geometrijske karakteristike modela tako da odgovaraju stvarnim dimenzijama uređaja za izvlačenje. Parametre tla odredili su na temelju laboratorijskih ispitivanja, a geomrežu su definirali preko *Geogrid* i *Plate* elemenata pri čemu su *Geogrid* elementima definirali uzdužna rebra, a *Plate* elementima poprečna rebra. Kako kod modeliranja trake nema poprečnih rebara, za modeliranje



geosintetičke trake mogu se koristiti samo *Geogrid* elementi. Interakciju između tla i geomreže su definirali preko kontaktnih elemenata (engl. *Interface*) elementa. U nastavku su detaljnije opisani ovi elementi.

*Geogrid* elementi u programu Plaxis 2D su vitke strukture koje imaju aksijalnu krutost, ali nemaju krutost na svijanje pa stoga mogu izdržati samo vlačne sile, ali ne i tlačne. Koriste se za modeliranje elemenata ojačanja (armature) u tlu. Ovi elementi u programu Plaxis 2D predstavljaju linijske elemente s dva translacijska stupnja slobode u svakom čvoru ( $u_x$ ,  $u_y$ ). Kad se koriste modeli tla s 15 čvorova tada je svaki *Geogrid* element definiran s pet čvorova dok je kod modela tla sa šest čvorova svaki *Geogrid* element definiran s tri čvora. Aksijalne sile određuju se u Newton-Cotes točkama naprezanja, a ove točke naprezanja podudaraju se s čvorovima (Plaxis 2016). Položaj čvorova i točaka naprezanja za *Geogrid* element prikazan je na slici 6-4. Osnovni parametar materijala koji je potrebno unijeti za definiranje *Geogrid* elementa je aksijalna krutost  $EA$ , a dodatno se može zadati ograničenje vlačne sile kako bi se simulirao vlačni slom (Plaxis 2016).



**Slika 6-4** Položaj čvorova i točaka naprezanja u *Geogrid* elementima (Plaxis 2016)

Kontaktne elementi su elementi koji se dodaju strukturnim elementima kako bi se modelirala interakcija između ovih elementa i okolnog tla. Ovi elementi mogu se primjerice koristiti za modeliranje tanke zone intenzivnog posmika materijala na kontaktu *Plate* ili *Geogrid* elemenata i okolnog tla. Kontaktne elementi se sastoje od elemenata koji su spojeni s elementima tla. Kada se koristi mreža s 15 čvorova kontaktne elementi su za element tla spojeni preko 5 para čvorova, dok su kod korištenja mreže s 6 čvorova spojeni preko tri para čvorova. Na slici 6-5 prikazano je kako su kontaktne elementi spojeni za element tla. Na slici je kontaktne element prikazan kao element koji ima određenu debljinu, međutim u formulaciji konačnog elementa koordinate para točaka su jednake, tako da u stvarnosti element nema debljinu. Svaki kontaktne element ima „virtualnu debljinu“ koja je imaginarna dimenzija koja se koristi da se definiraju parametri materijala kontaktnog elementa. Što je veća „virtualna debljina“ elementa generira se više elastičnih deformacija. Općenito, kontaktne elementi bi trebali generirati vrlo male elastične

deformacije, te stoga i virtualna debljina treba biti mala. Virtualna debljina kontaktnog elementa računa se kao faktor virtualne debljine pomnožen s globalnom veličinom konačnog elementa, pri čemu je globalna veličina konačnog elementa određena generiranom mrežom (Plaxis 2016). Parametri kontaktnog elementa ovise o parametrima tla koji su definirani u modelu tla koji se koristi. Za Linearno elastičan mode, Mohr-Coulombov, Hardening soil, Hardening soil small, Soft soil model, Soft Soil Creep model, Jointed Rock, Hoek-Brown model parametri čvrstoće kontaktnog elementa definirani su preko parametra  $R_{int}$ . Kada je  $R_{int}$  jednak jedan, onda su parametri materijala kontaktnog elementa jednaki parametrima tla. Međutim, kontaktni elementi mogu imati i vrijednost  $R_{int}$  manju od jedan kada se želi reducirati čvrstoću i krutost na kontaktu, dok se vrijednosti veće od jedan u pravilu ne koriste (Plaxis 2016). Parametri čvrstoće kontaktnog elementa povezani su s parametrima čvrstoće koji su definirani u modelu preko sljedećih relacija (Plaxis 2016):

$$c_i = R_{int} c_{soil} \quad (6-1)$$

$$\tan\varphi_i = R_{int} \tan\varphi_{soil} \leq \tan\varphi_{soil} \quad (6-2)$$

$$\psi_i = 0^\circ \text{ za } R_{int} < 1 \text{ inače } \psi_i = \psi_{soil} \quad (6-3)$$

gdje je:

$R_{int}$  – faktor redukcije parametara materijal

$c_i$  – kohezija kontaktnog elementa

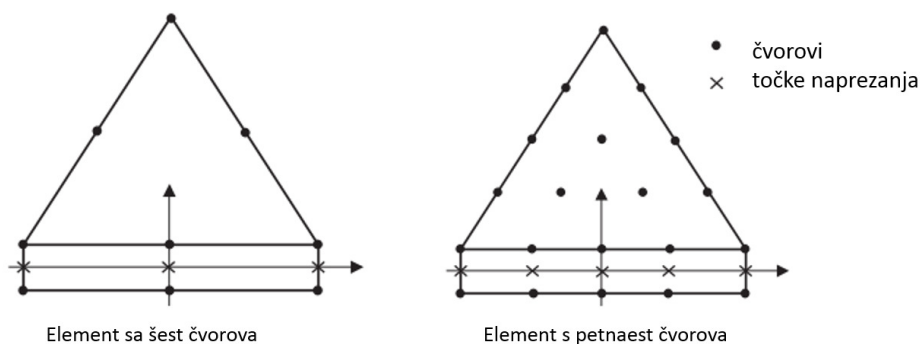
$c_{soil}$  – kohezija materijala – definirana u modelu tla

$\tan\varphi_i$  – tanges kut trenja kontaktnog elementa

$\tan\varphi_{soil}$  – tanges kuta trenja materijala

$\psi_i$  – kut dilatancije kontaktnog elementa

$\psi_{soil}$  – kut dilatancije materijal definiran u modelu tla



**Slika 6-5** Distribucija čvorova i točaka naprezanja kontaktnog elementa i njihova veza s elementom tla (Plaxis 2016)

## 6.2 Definiranje modela

Definiranje numeričkog modela kojim se simulira provođenje laboratorijskog ispitivanja izvlačenja geosintetičke trake iz lomljenog kamenog agregata uključuje definiranje:

- geometrijske karakteristike modela (elementa tla, elemenata geosintetičke trake, rubnih uvjeta)
- parametara materijala
- interakcije tla i geosintetičke trake, kontaktnog elementa
- rubnih uvjeta.

Numeričke analize simulacije izvlačenja trake iz tla provedene su za parametre tla koji su određeni laboratorijskim ispitivanjima u velikom uređaju za izravni posmik i ispitivanjima izvlačenja geosintetičke trake iz lomljenog kamena.

### 6.2.1 Geometrijske karakteristike modela

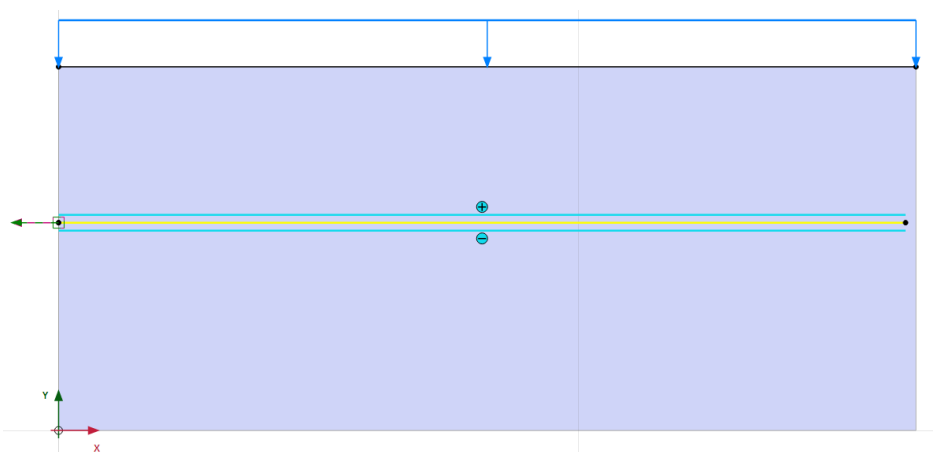
Početni dio svake numeričke analize je generiranje modela kojim se što realnije, a s druge strane dosta idealizirano, nastoji opisati stvarni problem koji je potrebno numerički riješiti. U modelu se realan trodimenzionalni problem svodi na reprezentativni dvodimenzionalni model koji se sastoji od točaka, linija i regija, te potrebnih strukturnih elemenata i zadanih rubnih uvjeta. Za generiranje modela kojim se simulira pokus izvlačenja potrebno je modelirati: kutiju uređaja,

geosintetičku traku, definirati rubne uvjete, te zadati vertikalno opterećenje i pomak geosintetičke trake.

U numeričkom modelu nije modelirana košuljica koja se nalazi na uređaju za ispitivanje otpornosti na izvlačenje GFOS te je model smanjen za duljinu košuljice (0,25 m). Duljina modela je umjesto 1,9 m, koliko je stvarna duljina kutije, umanjena i iznosi 1,65 m. Ovo smanjenje duljine modela je opravdano zato jer kad se oduzme duljina košuljice u kojoj traka nije između materijala već je slobodna ispada da je duljina trake koja se nalazi u kutiji između dva sloja materijala 1,65 m. Model definiran u Plaxisu 2D prikazan je na slici 6-6.

U pokusu izvlačenja kutija uređaja je visine 0,8 m pri čemu je kutija do visine 0,7 m ispunjena materijalom, dok je 0,1 m na vrhu kutije slobodan i služi za nanošenje opterećenja zračnim jastucima. Kako bi se modelirala stvarna visina materijala model u Plaxisu 2D je visine 0,7 m. U programu Plaxis 2D trodimenzionalni problem (kutija i geotehnička traka) svode se na dvodimenzionalni problem u kojem je moguće definirati duljinu i visinu kutije, dok širinu kutije program uzima da je jednaka 1,0 m. Tako da su dimenzije kutije u programu Plaxis 2D jednake  $1,65 \times 0,7 \times 1,0$  m. Geosintetička traka modelirana je po cijeloj dužini kutije na visini od 0,4 m što odgovara visini na kojoj je ugrađena traka u provedbi laboratorijskih ispitivanja. U modelu je traka definirana kao *Geogrid* element. Osnovni parametar materijala koji je potrebno unijeti za definiranje *Geogrid* elementa je aksijalna krutost *EA*, a dodatno se može zadati ograničenje vlačne sile kako bi se simulirao vlačni slom (Plaxis 2016).

Definiranje rubnih uvjeta uključuje definiranje spriječenih ili nametnutih pomaka, te uvjete vanjskog opterećenja (opterećenje od zračnog jastuka). Kod definiranja rubnih uvjeta na bočnim stranicama spriječeni su horizontalni pomaci dok su na dnu modela spriječeni horizontalni i vertikalni pomaci. Na vrhu modela definirano je kontinuirano opterećenje kojim se simulira nanošenje vertikalnog opterećenja putem zračnih jastuka. Vertikalno opterećenje definira se komponentom i magnitudom sile, a odgovara opterećenju koje je korišteno u ispitivanju izvlačenja (50 kPa, 100 kPa i 150 kPa). Simuliranje izvlačenja trake može se u modelu definirati pomoću zadanog pomaka ili pomoću zadanog naprezanja. Kako je u laboratorijskom ispitivanju bio definiran pomak, dok se pratio razvoj sile, tako je i u numeričkom modelu zadan pomak u prvom čvoru *Geogrid* elementa, a pratio se razvoj sile. Interakcija između geosintetičke trake i tla modelirana je preko kontaktnih elemenata (*Interface* elemenata).



**Slika 6-6** Geometrijske karakteristike modela uređaja GFOS za simuliranje pokusa izvlačenja

## 6.2.2 Definiranje parametra materijala

Definiranje parametara materijala uključuje odabir odgovarajućeg konstitutivnog modela kojim se opisuje ponašanje materijala (lomljenog kamena), te odabir odgovarajućih parametara modela. Kod simulacije pokusa izvlačenja potrebno je odrediti parametre modela za lomljeni kamen i parametre modela za geosintetičku traku.

### 6.2.2.1 Definiranje parametara lomljenog kamena

Za definiranje parametara tla u programu Plaxis 2D 2016 moguće je odabrati 13 različitih modela, a u ovom radu korišten je elasto-plastični Mohr-Coulombov model (MC model). MC model je jednostavan linearno elasto-plastičan model tla koji se najčešće koristi za prve jednostavne analize ponašanja tla. Linearno elastični dio modela temelji se na Hook-ovom zakonu linearne elastičnosti, dok se plastični dio modela temelji na Mohr-Coulombovom kriteriju sloma. Definiranje Mohr-Coulombovog modela uključuje definiranje pet parametara materijala, a to su: Youngov modul ( $E$ ), Poissonov koeficijent ( $\nu$ ), kohezija ( $c$ ), kut unutarnjeg trenja ( $\varphi$ ) i kut dilatancije ( $\psi$ ). Parametri materijala određeni su laboratorijskim ispitivanjima u velikom uređaju za izravni posmik koji je razvijen na RGN fakultetu. U analizama su korišteni sekantni kutovi trenja i kutovi dilatancije koji su određeni ispitivanjima kod 85 kPa i 150 kPa. Ispitivanja parametra čvrstoće nisu provedena za opterećenja kod 50 kPa i 100 kPa, te su kutovi trenja za ta naprezanja određeni iz jednadžbe pravca čvrstoće. Youngov modul za lomljeni kamen određen je kao najmanja vrijednost modula tla koja je određena mjerenjima probnom pločom za vrijeme ispitivanja zbijenosti slojeva pri gradnji zida od armiranog tla, Sveta Trojica.

Lomljeni kamen korišten u ovim analizama je sličan materijalu koji je korišten kod izgradnje zida od armiranog tla Sveta Trojica, a modul koji je korišten u analizi uzet je kao najmanji modul koji je izmjeren u fazi izgradnje zida. U tablici 6-1 prikazani su parametri materijala koji su korišteni u numeričkim analizama. U analizama su korišteni koeficijenti interakcije koji su određeni laboratorijskim ispitivanjima izvlačenja trake iz tla, a u tablici su prikazani kao vrijednosti  $R_{int}$ . U modelu nije moguće definirati parametre na kontaktu veće od 1,0, pa je za modeliranje ovih vrijednosti korištena opcija da se kontaktnom elementu dodijele posebni parametri materijala. Numeričke analize provedene su za dva slučaja kada je koeficijent interakcije definiran preko  $R_{int}$  i kada su kontaktnom elementu dodijeljeni posebni parametri materijala.

**Tablica 6-1** Parametri materijala korišteni u numeričkim analizama za sve frakcije određeni izravnim smicanjem i ispitivanjem izvlačenjem

		Materijal (lomljeni kamen)							
		Oznaka	Mjer. Jed	A 30/60		B 4/60		C 0/60	
			50 kPa	150 kPa	50 kPa	150 kPa	50 kPa	100 kPa	150 kPa
Parametri materijala - MC model	$\gamma_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	19	19	20	20	21	21	21
	$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	19	19	20	20	21	21	21
	$E'$	kN/m <sup>2</sup>	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000
	$\nu'$	-	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
	$c'$	kPa	1	1	1	1	1	1	1
	$\varphi'$	°	60	55	61	50	59	50	48
	$\psi$	°	23	21	24	17	15	12	10
	$f^*$	-	<b>0,66</b>	<b>0,39</b>	<b>1,66</b>	<b>0,72</b>	<b>2,14</b>	<b>1,44</b>	<b>1,12</b>
	$R_{int}$		0,47	0,27	1,0	0,60	1,0	1,0	1,0

### 6.2.2.2 *Definiranje parametara geosintetičke trake*

U modelu je *ParaWeb* traka definirana preko „*Geogrid*“ elemenata, koji predstavljaju vitke strukture s normalnom krutošću, ali bez krutosti na savijanje pa stoga mogu izdržati samo vlačne sile, a ne i tlačne. Jedini parametar koji je potrebno zadati za definiranje elastičnog modela je aksijalna krutost  $EA$ . Prema Plaxis (2016) aksijalna krutost je omjer aksijalne sile po jediničnoj širini i aksijalne deformacije.

$$EA = \frac{F}{\Delta l/l} \quad (6-7)$$

gdje je:

$F$  – aksijalna sila za jediničnu širinu trake

$\Delta l$  – produljenje trake

$l$  – duljina trake.

Za *ParaWeb* trake provedena su ispitivanja vlačne čvrstoće na Građevinskom fakultetu u Zagrebu. Iz dijagrama relativne deformacije trake i sile izvlačenja za traku nosivosti 100 kN određena je aksijalna krutost  $EA = 1200$  kN/m. Program Plaxis 2D generira ravninski model, te se najčešće koristi za probleme kod kojih je po dimenzijama manje-više uniformni poprečni presjek i odgovarajuće stanje naprezanja i opterećenja duž određene duljine koja je okomita na poprečni presjek. Izvlačenje trake je trodimenzionalan problem koji se zbog male širine trake 90 mm teško može modelirati u 2D modelu. Kod modeliranja trake postavlja se pitanje koju krutost trake uzeti kako bi se rješenja u 2D modelu približila stvarnom ponašanju trake u tlu. S ciljem utvrđivanja utjecaja krutosti trake na rezultate numeričke analize provedene su analize za dvije različite krutosti trake. U prvom slučaju je određeno da je krutost trake  $EA$  jednaka 1200 kN/m, dok je u drugom slučaju pretpostavljeno da postoji 10 traka položenih jedne uz drugu kako bi se postigla jednolika geometrija u ravnini okomitoj na poprečni presjek. Ekvivalentna aksijalna krutost 10 traka položenih jedne uz drugu određena je množenjem aksijalne krutosti jedne trake puta 10 pa je tako aksijalna krutost u modelu 12000 kN/m. Kako je aksijalna krutost povećana za 10 puta, sila izvlačenja koja se dobije u modelu odgovara sili izvlačenja za 10 traka. Kako bi se odredila sila izvlačenja jedne trake, sila izvlačenja se treba podijeliti sa 10.

### 6.2.3 Definiranje kontaktnih elemenata

Interakcija između tla i armature definirana je kontaktnim elementima. Parametri kontaktnog elementa zadaju se preko naredbe  $R_{int}$  koja je objašnjena u prethodnom poglavlju. Za koeficijente interakcije manje od jedan korištena je naredba  $R_{int}$ , gdje su parametri na kontaktnom elementu smanjeni u odnosu na parametre okolnog tla. Za koeficijente interakcije veće od jedan, koeficijent interakcije je definiran tako što su se kontaktnom elementu dodijelili parametri tla s boljim karakteristikama od okolnog tla. Parametarske analize provele su se za dva slučaja:

- Za koeficijente interakcije manje od 1,0 kontaktni elementi su definirani preko parametra  $R_{int}$  kako je definirano u tablici 6-1.
- kontaktni elementi su definirani tako da su se kontaktnom elementu dodijelili posebni parametri materijala, koji su definirani u tablici 6-2. Kutovi trenja  $\varphi$  određeni su iz ispitivanja izvlačenja, dok su kutovi dilatancije,  $\psi$  određeni preko relacije 6-8.

$$\psi = \varphi - 30^\circ \quad (6-8)$$

**Tablica 6-2** Parametri materijala kontaktnih elemenata

Parametri materijala - MC model za kontaktne elemente		Materijal (lomljeni kamen)							
				A 30/60		B 4/60		C 0/60	
		Vertikalno opterećenje		50 kPa	150 kPa	50 kPa	150 kPa	50 kPa	100 kPa
Oznaka	Mjer. jed.								
$\gamma_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	19	19	20	20	21	21	21	
$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	19	19	20	20	21	21	21	
$E'$	kN/m <sup>2</sup>	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000	
$\nu'$	-	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	
$c'$	kPa	1	1	1	1	1	1	1	
$\varphi'$	°	33	21	59	35	65	55	49	
$\psi$	°	3	0	29	5	35	25	19	
$R_{int}$	-	1	1	1	1	1	1	1	



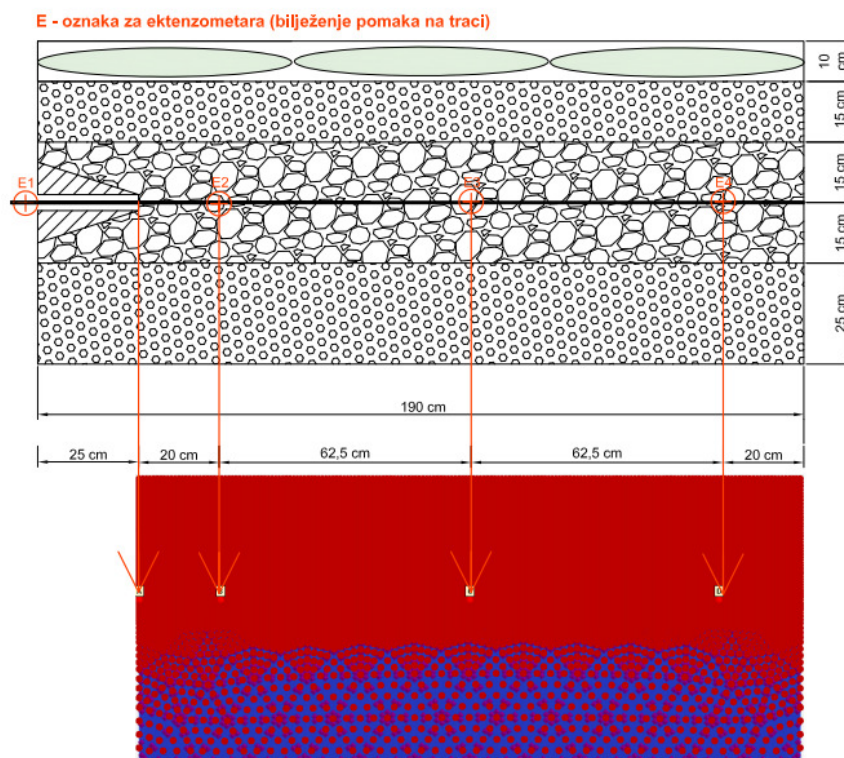
## 6.3 Rezultati numeričkih analiza

Povratne numeričke analize izvlačenja trake provedene su za geometrijske karakteristike modela koje odgovaraju dimenzija kutije s umanjenom duljinom modela za duljinu košuljice. Parametri materijala korišteni u povratnim analizama određeni su na temelju provedenih laboratorijskih ispitivanja izravnog smicanja i izvlačenja trake iz tla. Povratne analize u programu Plaxis 2D provedene su za ispitivanja sva tri granulometrijska sastava materijala i za različita opterećenja. U modelu je traka modelirana kao *Geogrid* element, dok je interakcija trake i tla modelirana kontaktnim elementima. Parametri kontaktnog elementa za koeficijente interakcije manje od 1,0 definirani su preko parametra  $R_{int}$  i kao posebni kontaktni elementi s parametrima materijala koji su definirani u tablici 6-2 za koeficijente interakcije veće od 1,0. Provedene povratne analize mogu se podijeliti na analize u kojima je promatran utjecaj krutosti trake na silu izvlačenja i pomake trake, analize u kojima je definiran kontaktni element na način da su materijalu tla umanjeni parametri za vrijednost  $R_{int}$  i na način da su kontaktnom elementu dodijeljeni posebni parametri materijala. Na kraju su provedene analize za slučaj kada je za cijeli sloj materijala definiran kut trenja koji odgovara kutu trenja na kontaktu trake i tla.

### 6.3.1 Određivanje ekvivalentne krutosti trake u modelu

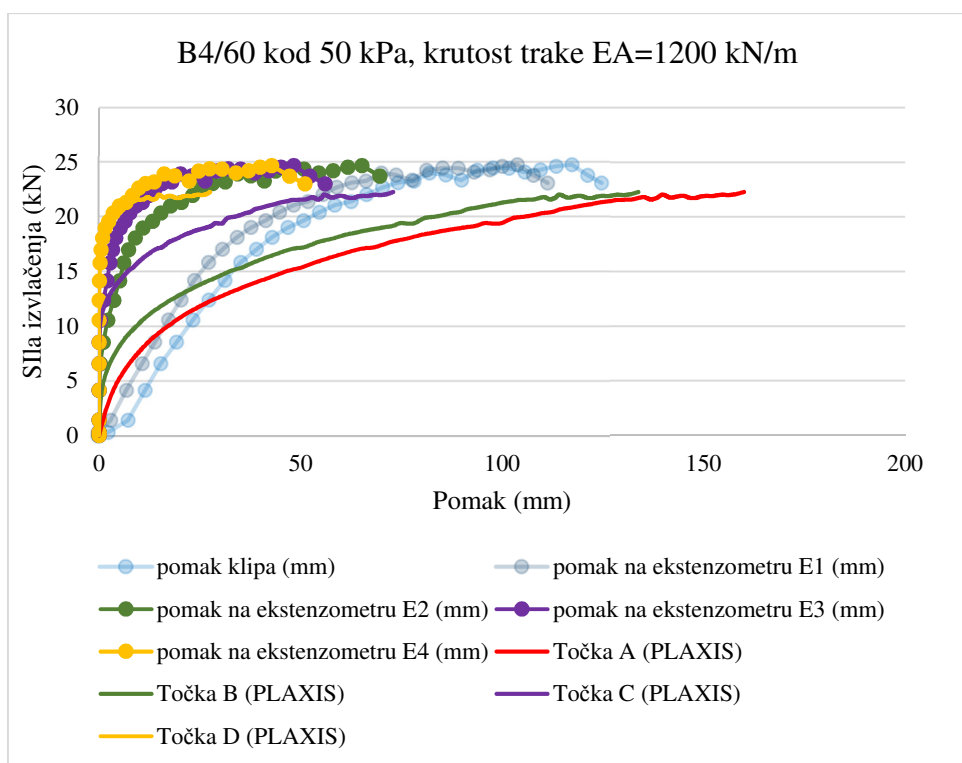
U numeričkim 2D analizama se pretpostavlja da su geometrijske karakteristike u ravnini okomitoj na poprečni presjek manje-više jednake, što nije slučaj kod izvlačenja geosintetičke trake. Numeričke analize izvlačenja geosintetičke trake pokazale su do 10 puta veće vrijednosti sile izvlačenja u odnosu na izmjerene, što se može smatrati opravdano zato jer model uzima da je traka široka 1 m, dok je stvarana širina trake 90 mm. Postavlja se pitanje koju krutost trake odabrati kako bi se numerički model približio stvarnom modelu, da li odabrati krutost jedne trake ili znatno veću krutost koja bi odgovarala krutosti više traka. Kako bi se to utvrdilo provedene su parametarske analize u kojima je krutost trake jednaka krutosti jedne trake 1200 kN/m i analize u kojima je krutost trake uvećana 10 puta. Numeričke analize provedene su za parametre materijala B4/60 kod 50 i 150 kPa (tablica 6-1) dok su parametri kontaktnog elementa jednaki parametrima za B4/60 kod 50 i 150 kPa (tablica 6-2). Ukupno su provedene četiri analize, a u analizama su se promatrale krivulje pomaka i sila izvlačenja po točkama A, B, C, D koje odgovaraju položaju točaka (ekstenzometara) u kojima su praćeni pomaci u modelu korištenom u laboratoriju. Točka A i B odgovaraju pomaku prve točke unutar kutije,

ekstenzometru E2, dok točka C odgovara pomaku sredine trake (E3) i točka D odgovara pomaku kraja trake (E4), slika 6-7.

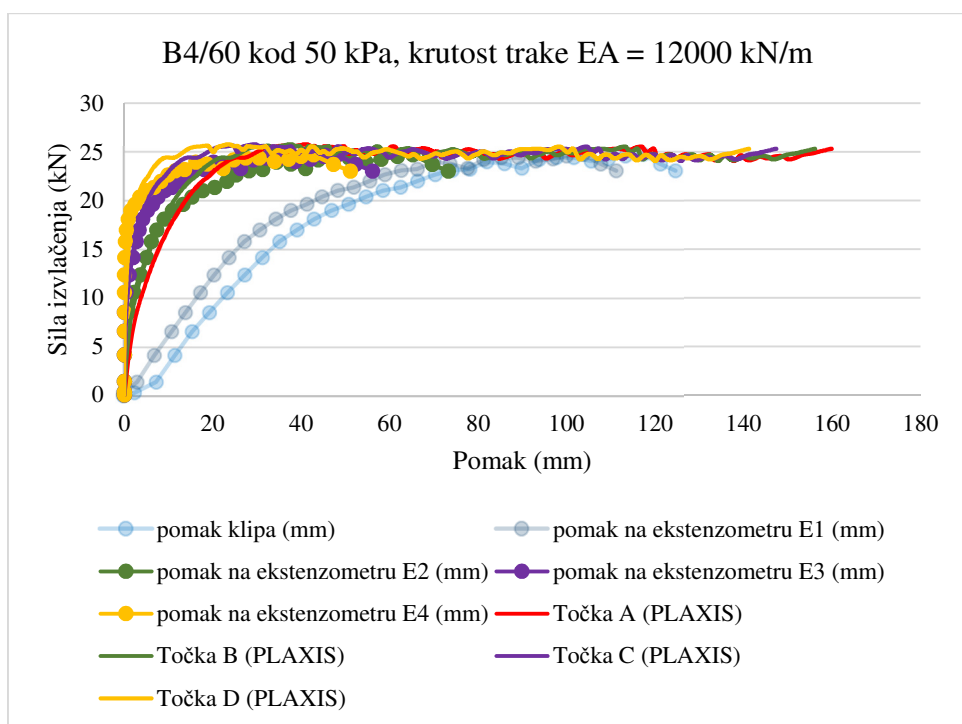


**Slika 6-7** Položaj točaka u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i numeričkim analizama

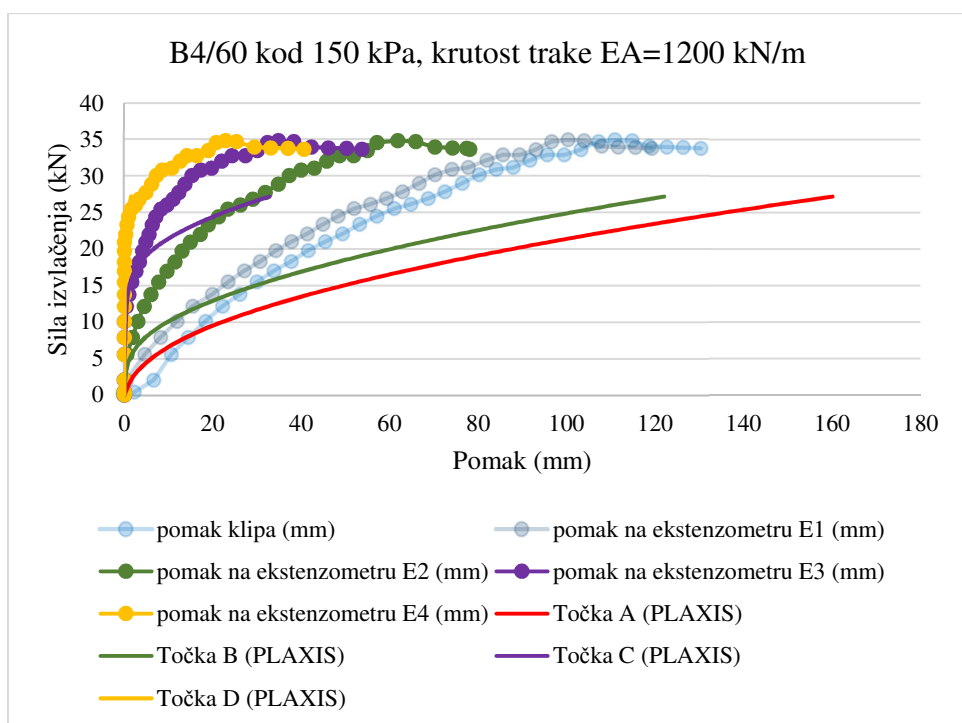
Rezultati provedenih numeričkih analiza prikazani su dijagramima na slikama od 6-8 do 6-11. Na dijagramima plava i crvena krivulja označene točkama predstavljaju pomak klipa i pomak prvog ekstenzometra (E1). Ove dvije krivulje predstavljaju pomake na traci koji se nalazi u zraku, tj. pomake dijela trake koji nije pritisnut materijalom dok su zelenom, ljubičastom i žutom linijom prikazani pomaci dijela trake unutar kutije, tj. dijela trake koji je pritisnut materijalom. S druge strane u numeričkim analizama nije modelirana košuljica i dio trake koji je produljen do klipa već je modeliran samo dio trake koji se nalazi u kutiji između dva sloja materijala. Kada se promatraju krivulje pomaka i razvoja sile za laboratorijska ispitivanja i za numeričke analize, mogu se promatrati samo točke koje se nalaze unutar kutije (zeleno, ljubičasto i žuto). Iz dijagrama na slikama od 6-7 do 6-10 može se uočiti da je puno bolje podudaranje krivulja pomak/sila izvlačenja za veće krutosti trake.



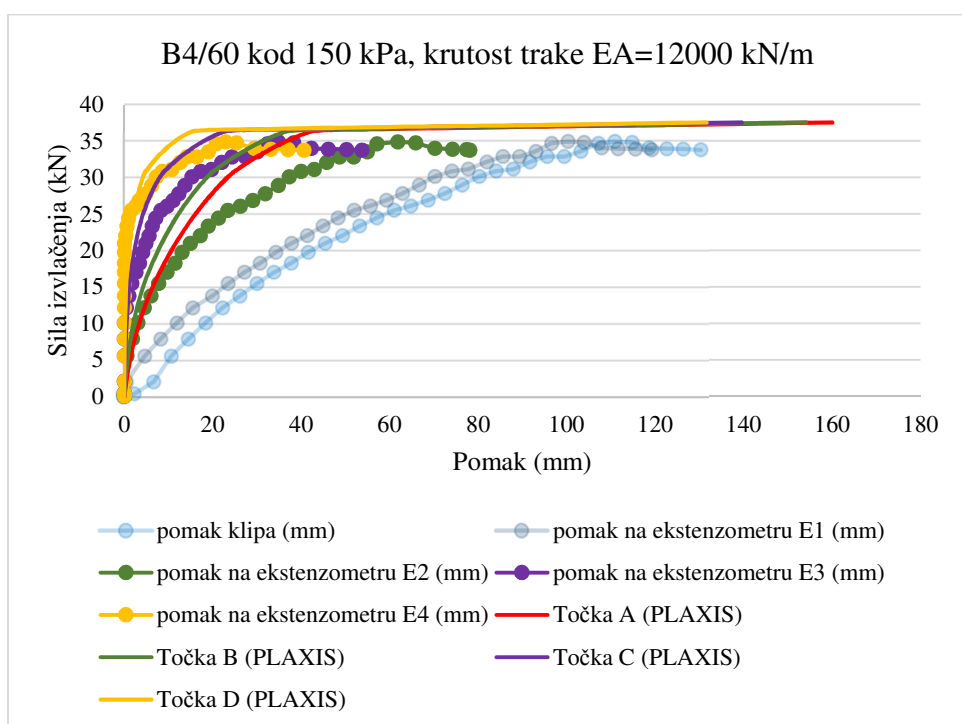
**Slika 6-8** Dijagram pomak/sila izvlačenja za krutost trake  $EA = 1200$  kN/m kod opterećenja 50 kPa



**Slika 6-9** Dijagram pomak/sila izvlačenja za krutost trake  $EA = 12000$  kN/m kod opterećenja 50 kPa

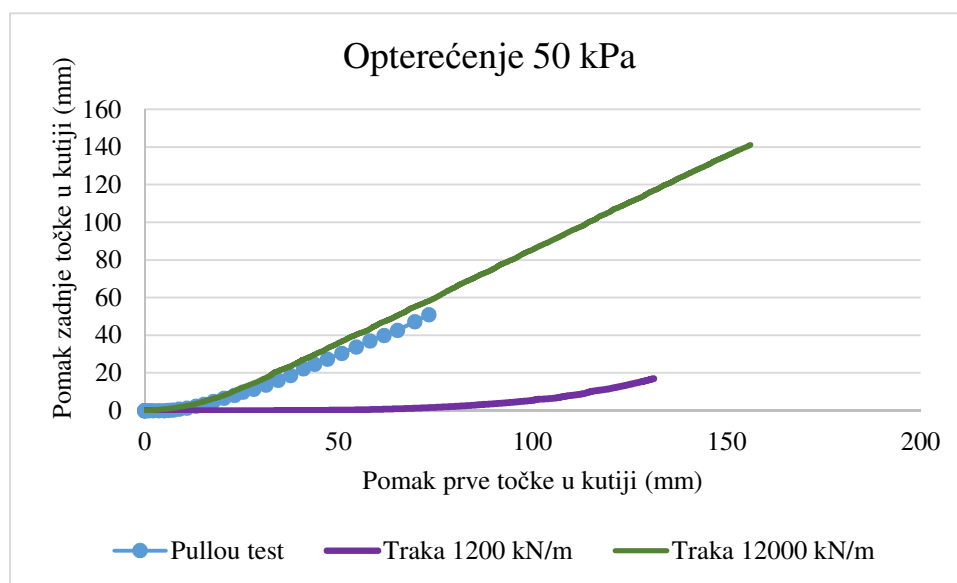


**Slika 6-10** Dijagram pomak/sila izvlačenja za krutost trake  $EA = 1200$  kN/m kod opterećenja 150 kPa

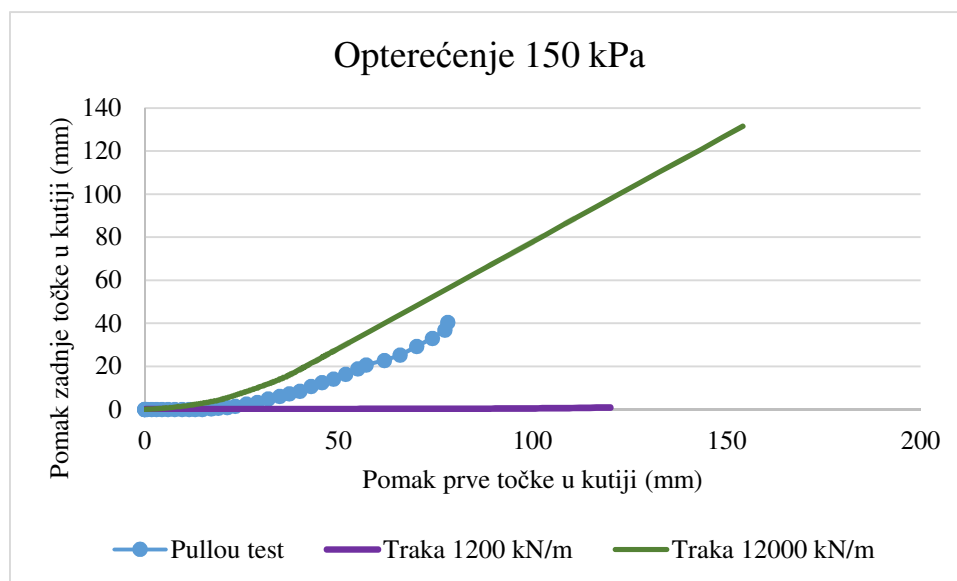


**Slika 6-11** Dijagram pomak/sila izvlačenja za krutost trake  $EA = 12000$  kN/m kod opterećenja 150 kPa

Uz usporedbu dijagrama pomaka i razvoja sile izvlačenja za različite krutosti trake provedena je i usporedba aktiviranja početnog dijela trake i kraja trake, tj. promatran je odnos pomak prve točke unutar kutije i pomak zadnje točke unutar kutije za krutost 1200 kN/m i 12000 kN/m. Usporedba aktiviranja početnog i krajnjeg dijela trake prikazana je dijagramima na slikama 6-12 i 6-13. Iz dijagrama se vidi da veća krutost trake ( $EA = 12000$  kN/m) odgovara rezultatima laboratorijskih ispitivanja, dok kod trake manje krutosti dolazi do značajnog istežanja trake. Iz ovih rezultata jasno se vidi da je opravdano u 2D numeričkoj analizi koristiti znatno veću krutost trake.



**Slika 6-12** Pomak početka trake (prva točka u kutiji) i kraja trake kod opterećenja od 50 kPa



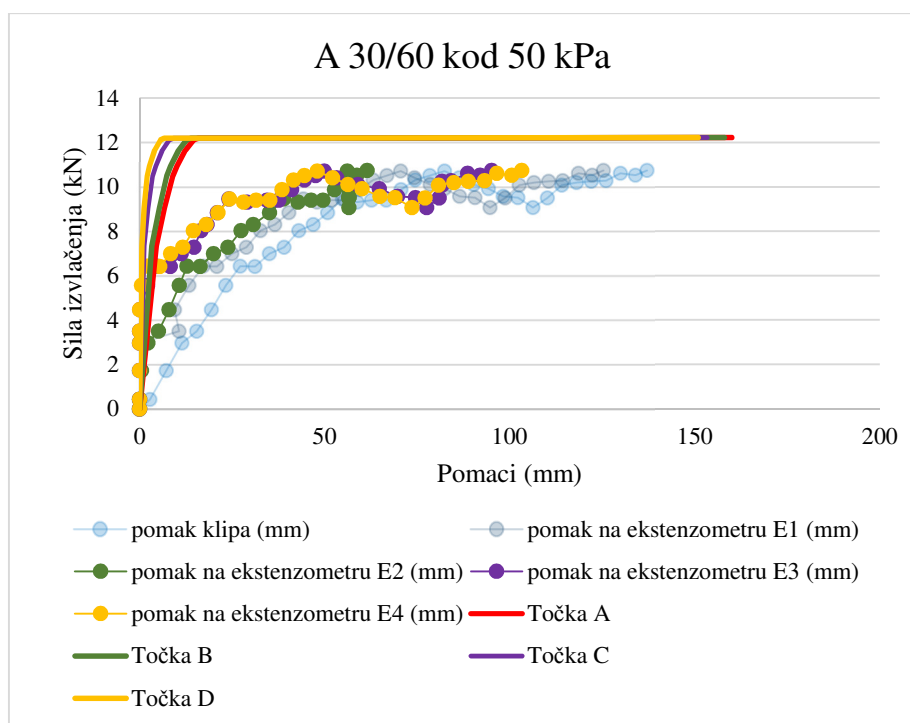
**Slika 6-13** Pomak početka trake (prva točka u kutiji) i kraja trake kod opterećenja od 150 kPa

### 6.3.2 Povratne analize za koeficijente interakcije manje od 1,0 definirane preko $R_{int}$

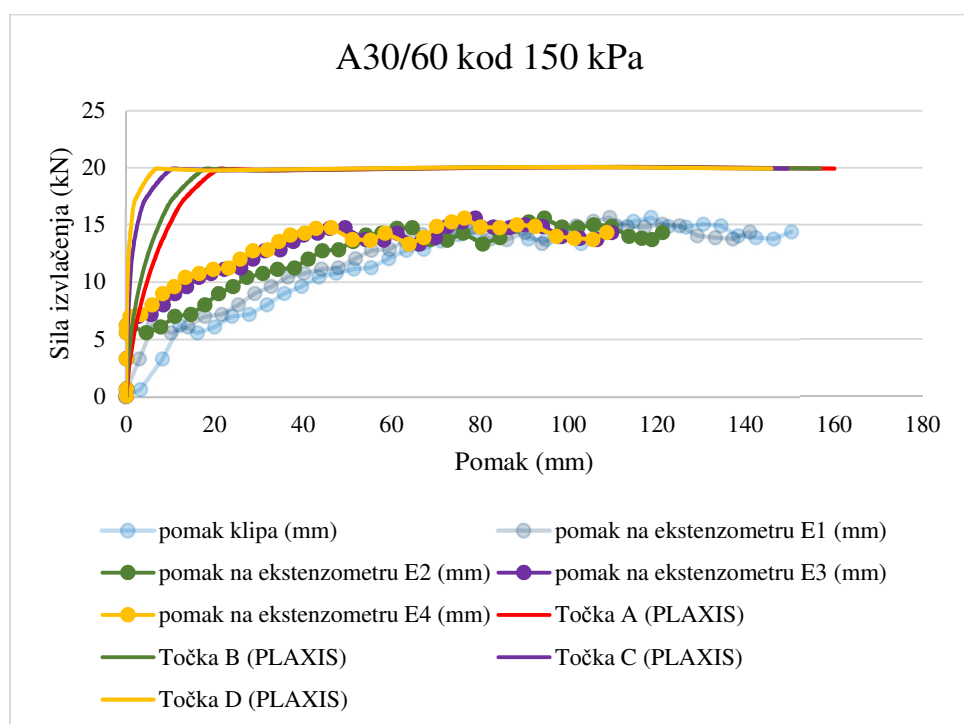
Povratne analize u kojima je kontakt između trake i tla definiran preko koeficijenta  $R_{int}$  proveden je za materijale A 30/60 kod 50 kPa i 150 kPa i materijal B 4/60 kod 150 kPa. Kod ovih materijala je ispitivanjima određeno da je koeficijent interakcije između trake i tla manji od 1,0 te su parametri kontaktnog elementa definirani preko  $R_{int}$  parametra. Parametri materijala korišteni u analizama prikazani su u tablici 6-1, dok je za traku definirana krutost od 12000 kN/m, što je određeno povratnim analizama utjecaja krutosti trake. U numeričkim analizama pratila se maksimalna sila izvlačenja u četiri točke koje odgovaraju položajima ekstenzometra u laboratorijskim ispitivanjima. Rezultati provedenih numeričkih analiza prikazani su dijagramima na slikama od 6-14 do 6-16. Iz dijagrama se vidi da su maksimalne sile dobivene numeričkim proračunom veće od maksimalnih sila koje su dobivene laboratorijskim ispitivanjima. Ovo povećanje sile može se objasniti većim kutom trenja na kontaktu trake i tla u odnosu na kut trenja koji je određen laboratorijskim ispitivanjima. U tablici 6-3 prikazane su maksimalne sile određene laboratorijskim ispitivanjima i numeričkim proračunom. Iz tablice se vidi da je za frakciju A30/60 kod opterećenja od 50 kPa sila izvlačenja veća za 13,78% dok je za frakciju A30/60 kod 150 kPa i frakciju B4/60 kod 150 kPa sila izvlačenja veća za 27,3% i 5,79%. Ako se usporede sekantni kutovi trenja koji su određeni za frakcije A30/60 kod 50 kPa i 150 kPa i frakciju B4/60 kod 150 kPa vidi se da su kutovi trenja kod izravnog posmika znatno veći od kutova trenja određenih u ispitivanju izvlačenja. Međutim u Plaxisu je kut trenja na kontaktu trake i tla umanjen za vrijednost  $R_{int}$  te su dobivene vrijednosti koje odgovaraju kutu trenja određenom ispitivanjem izvlačenjem, tablica 6-4.

**Tablica 6-3** Maksimalne sile izvlačenja ispitivanje i Plaxis

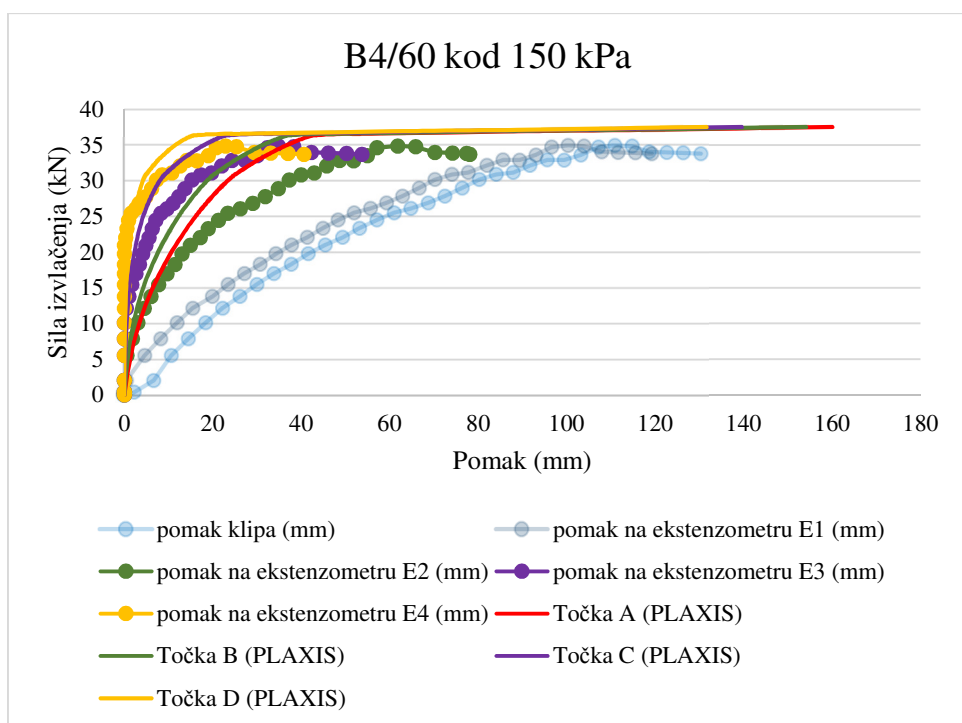
Frakcija	Naprezanje (kPa)	Sila izvlačenja – ispitivanje (kN)	Sila izvlačenja – Plaxis (kN)	% veća sila u Plaxisu od lab. ispitivanja
A30/60	50	10,74	12,22	13,78
A30/60	150	15,59	19,85	27,33
B4/60	150	34,88	36,9	5,79



**Slika 6-14** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa za A30/60 kod 50 kPa



**Slika 6-15** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa A30/60 kod 150 kPa



**Slika 6-16** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa B4/60 kod 150 kPa

**Tablica 6-4** Kutovi trenja izmjereni i definirani u Plaxisu

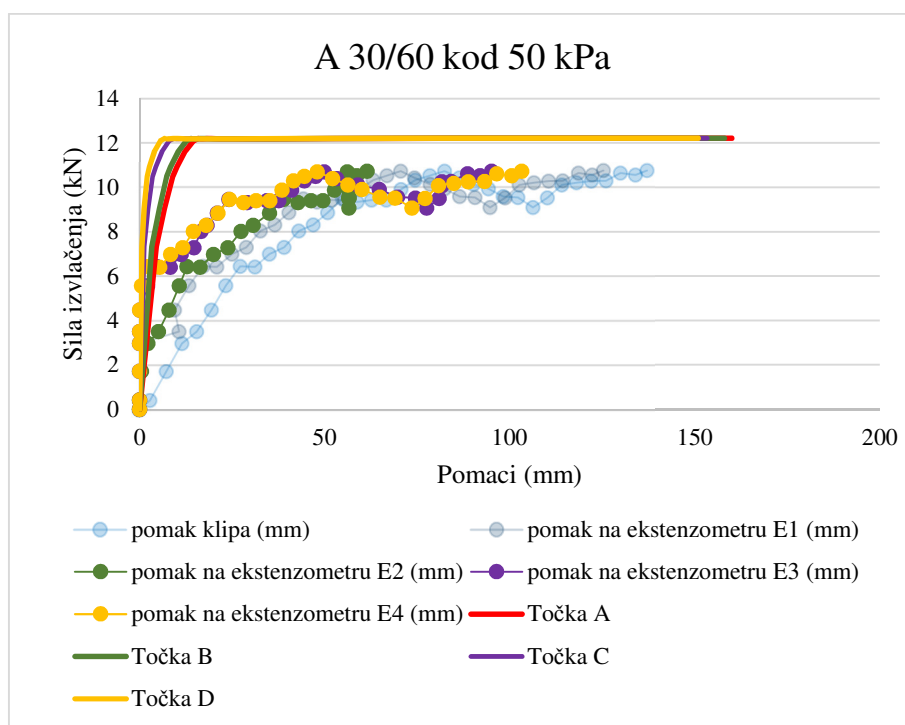
Frakcija	Naprezanje (kPa)	Kut trenja materijala (°) – izravni posmik	Kut trenja na kontaktu trake i tla (°) (pullout test)	Kut trenja na kontaktu trake i tla (°) – Plaxis ( $R_{int}$ )
A30/60	50	60	33	33,42
A30/60	150	55	21	21,3
B4/60	150	50	35	36

### 6.3.3 Povratne analize za kontaktne elemente definirane kao poseban materijal

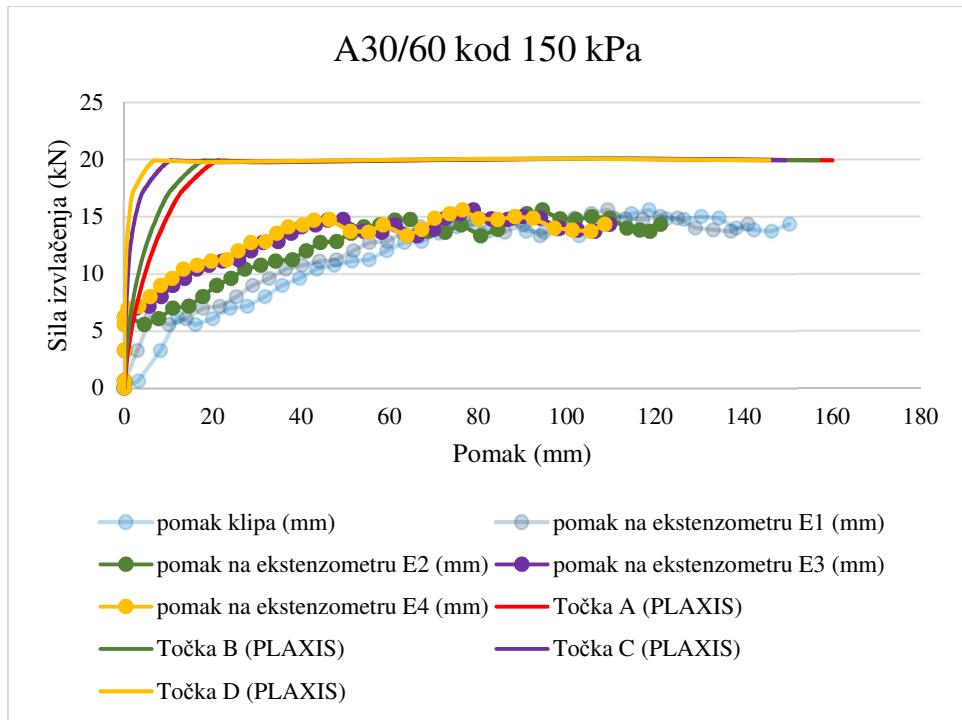
Kod drugog slučaja provođenja povratnih analiza kontaktnim elementima dodijeljeni su parametri materijala koji odgovaraju parametrima koji su određeni ispitivanjem izvlačenja armature iz tla, tablica 6-2. Ukupno je provedeno sedam numeričkih analiza za sve tri granulacije materijala kod različitih naprezanja. Rezultati provedenih povratnih analiza



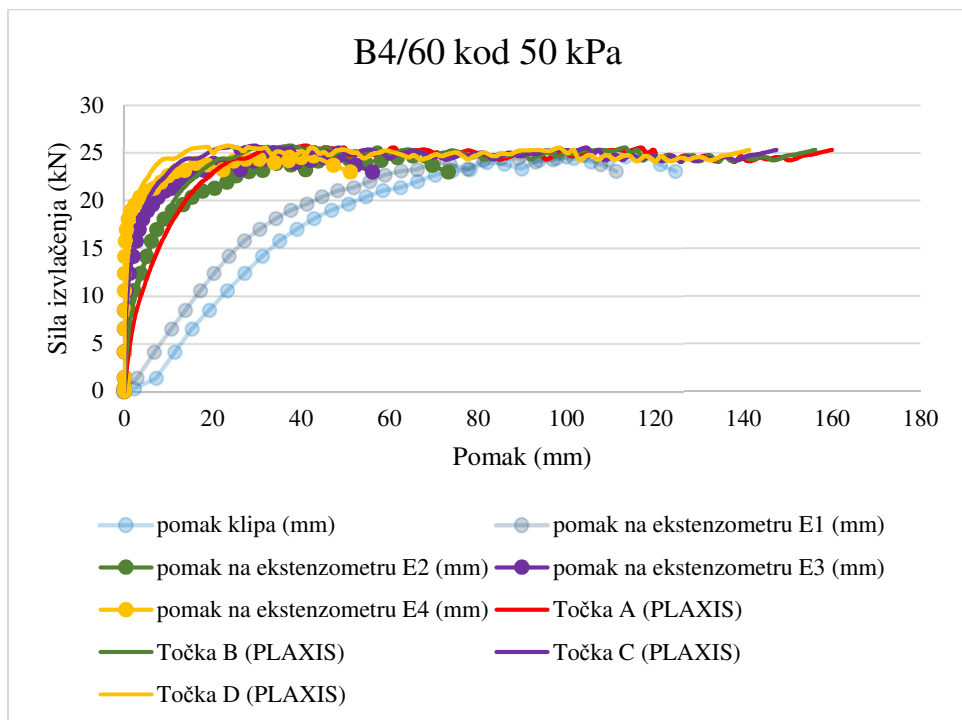
prikazani su dijagramima u kojima je prikazan razvoj sile izvlačenja s razvojem pomaka. Dijagramima na slikama od 6-17 do 6-23 prikazani su rezultati provedenih povratnih analiza. Za materijal A30/60 kod 50 kPa i 150 kPa sile izvlačenja određene numerički veće su od izmjerenih sila izvlačenja, za materijal B4/60 sile izvlačenja određene numeričkim proračunom odgovaraju izmjerenim silama izvlačenja dok su kod materijala C0/60 numeričkim proračunom dobivene manje sile izvlačenja. Odnos maksimalnih sila izvlačenja određenih u ispitivanju izvlačenjem i u numeričkim analizama prikazani su dijagramom na slici 6-24.



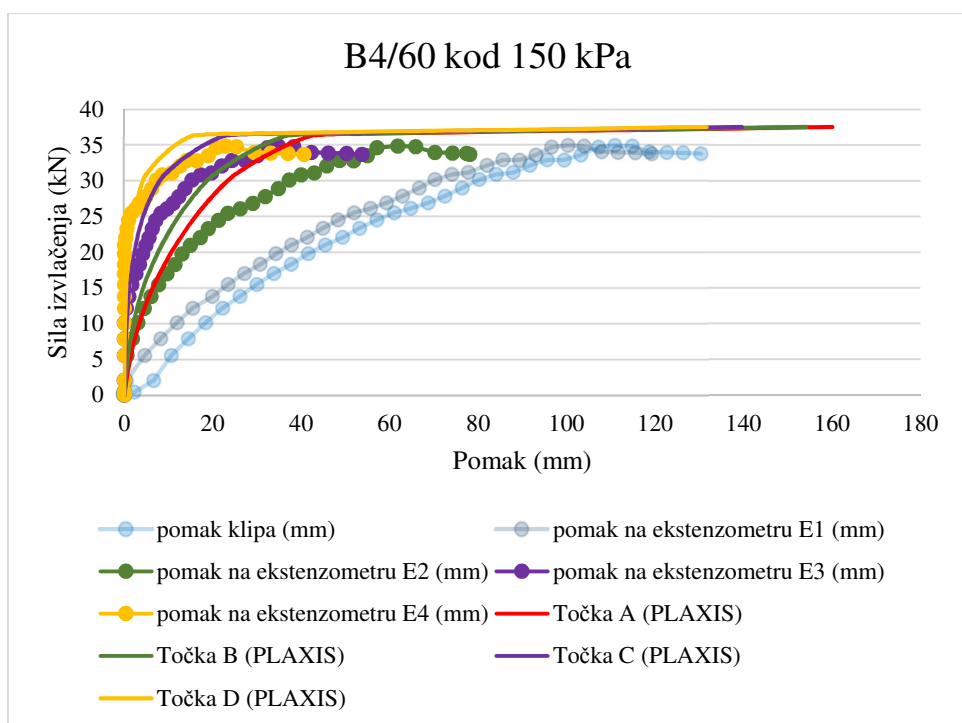
**Slika 6-17** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa A30/60 kod 50 kPa



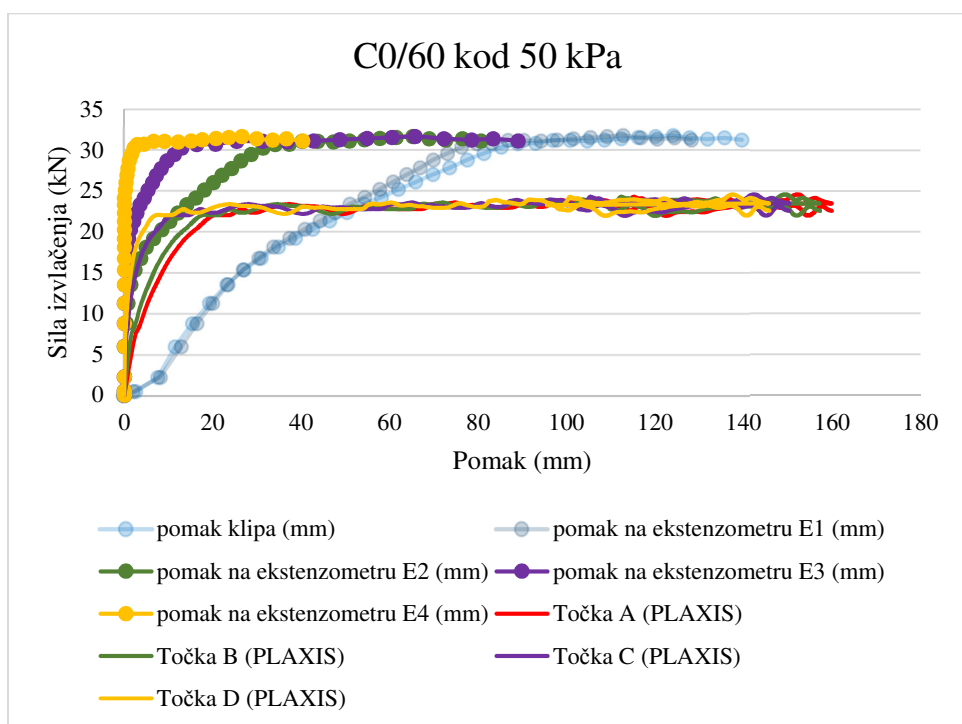
**Slika 6-18** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa za A30/60 kod 150 kPa



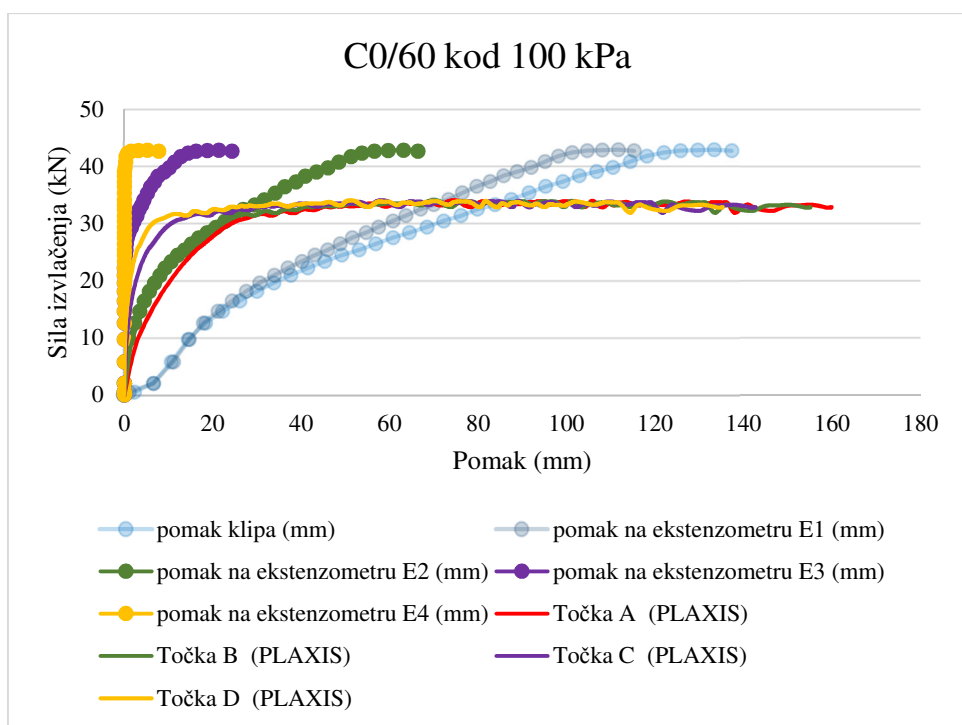
**Slika 6-19** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa za B4/60 kod 50 kPa



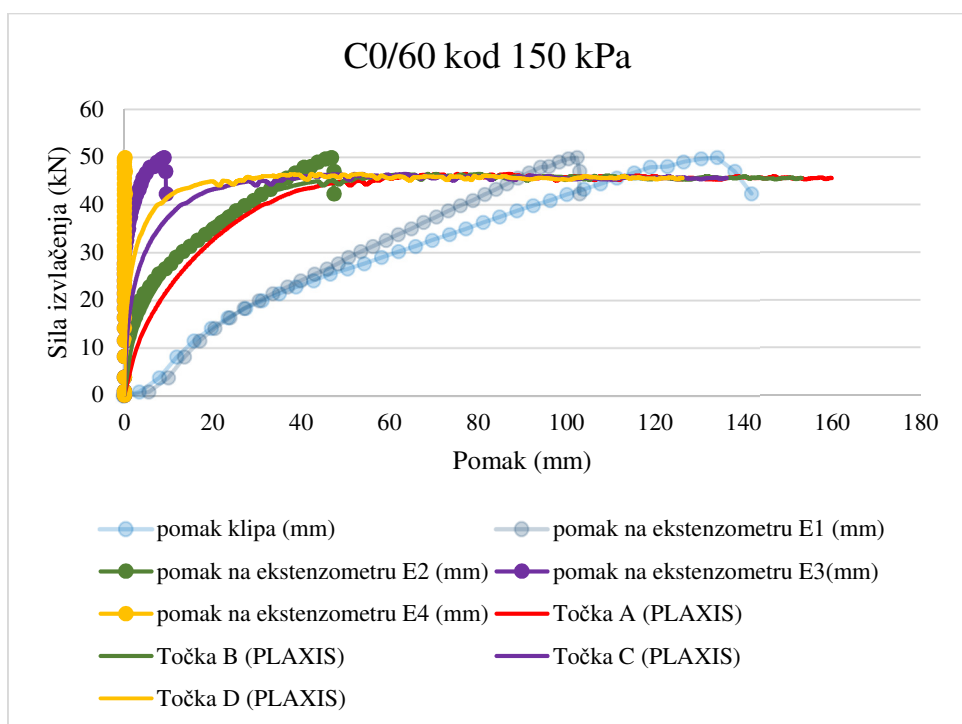
**Slika 6-20** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa za B4/60 kod 150 kPa



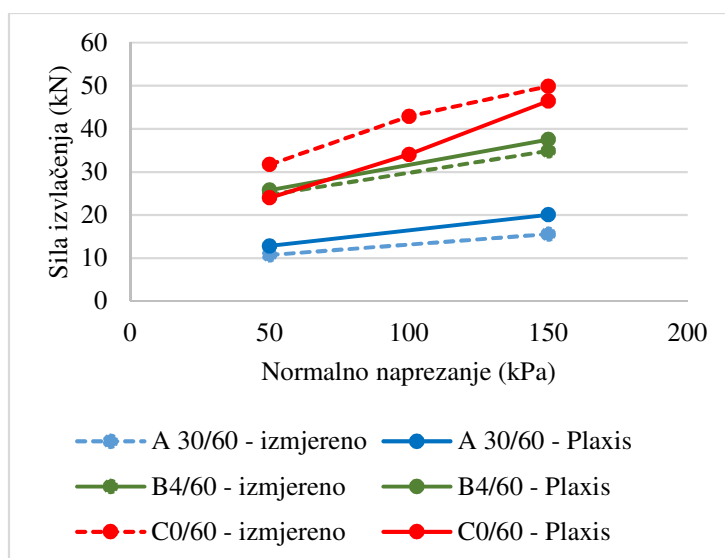
**Slika 6-21** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa C0/60 kod 50 kPa



**Slika 6-22** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa C0/60 kod 100 kPa



**Slika 6-23** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa C0/60 kod 150 kPa



**Slika 6-24** Odnos maksimalnih sila izvlačenja izmjerenih i određenih numerički

Iz provedenih numeričkih analiza za frakcije A30/60 kod 50 i 150 kPa i frakciju B4/60 kod 150 kPa dobivene sile izvlačenja i krivulje pomaka i razvoja sile odgovaraju dijagramima za slučaj kada je koeficijent interakcije definiran preko  $R_{int}$ . Ovim se potvrdilo da je ispravan i jedan i drugi način definiranja parametara kontaktnog elementa za vrijednosti koeficijenata manje od 1,0. Za frakciju A30/60 sile izvlačenja određene u Plaxisu veće su od sila izvlačenja izmjerenih u laboratoriju i to za 20% kod naprezanja od 50 kPa i 29% kod naprezanja od 150 kPa. Za frakciju B4/60 razlika između izmjerenih i proračunatih sila izvlačenja iznosi manje od 10%. Za B4/60 kod 50 kPa sila izvlačenja u programu je 4,4% veća od izmjerene, dok je za naprezanje od 150 kPa ta razlika 7,6%. Kod frakcije C0/60 sila izvlačenja u programu Plaxis je manja od izmjerene, a ta razlika je značajnija kod manjih naprezanja od 50 kPa i 100 kPa. Za C0/60 kod 50 kPa numeričkim proračunom dobivena je 24,3% manja sila od izmjerene, kod naprezanja od 100 kPa sila izvlačenja je manja za 20,5%, dok je kod naprezanja od 150 kPa sila izvlačenja manja za 6,9%.

Kutovi trenja i dilatancije korišteni u numeričkim analizama određeni su laboratorijskim ispitivanjima izravnog smicanja, dok je kontakt trake i tla definiran kontaktnim elementom koji je definiran kao poseban materijal s kutom trenja koji odgovara kutu na kontaktu trake i tla, a koji je određen ispitivanjem izvlačenjem. Ako se usporede kutovi trenja tla i kontaktnog elementa za materijal A30/60 (tablica 6-5) kutovi trenja određeni na kontaktu trake i tla su znatno manji od kuta trenja materijala. Kako je kut trenja i dilatancije materijala znatno veći dobivena je i veća sila izvlačenja. Za frakciju B4/60 najmanja je razlika između kuta trenja

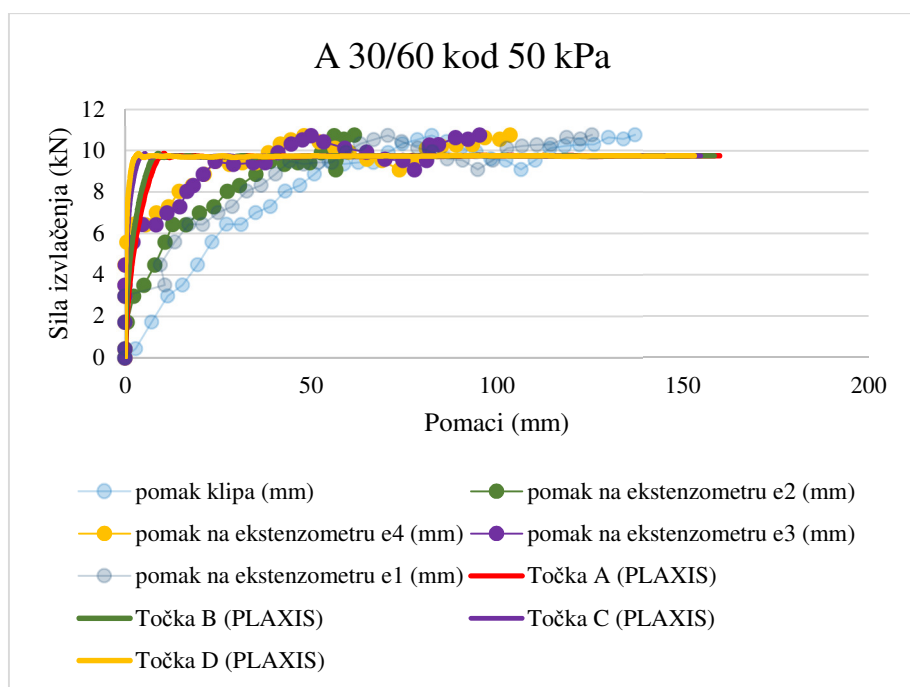
određenog izravnim smicanjem i kuta trenja određenog ispitivanjem izvlačenjem. Za ovaj materijal je dobivena i najmanja razlika između izmjerene sile izvlačenja i sile izvlačenja određene numeričkim proračunom. Kod frakcije C0/60 kut trenja na kontaktu je veći od kuta trenja tla, a sile izvlačenja određene numerički manje su od sila izvlačenja koje su određene eksperimentalno. Ovi rezultati ukazuju na to da se definiranjem parametra materijala i definiranjem posebnih parametara materijala za kontaktne elemente ne opisuje stvarno ponašanje elemenata armature i tla. Može se zaključiti da je veći volumen tla u interakciji od onog koji se uzima kada se interakcija tla i elemenata armature definira preko kontaktnih elemenata. U tablici 6-5 uspoređeni su kutovi trenja za frakcije A, B i C koji su određeni izravnim smicanjem (frakcije A16/31,5, B4/31,5 i C0/31,5) i ispitivanjem izvlačenjem (A30/60, B4/60 i C0/60).

**Tablica 6-5** Kutovi trenja i dilatancije iz ispitivanja izravnog smicanja i ispitivanja izvlačenja

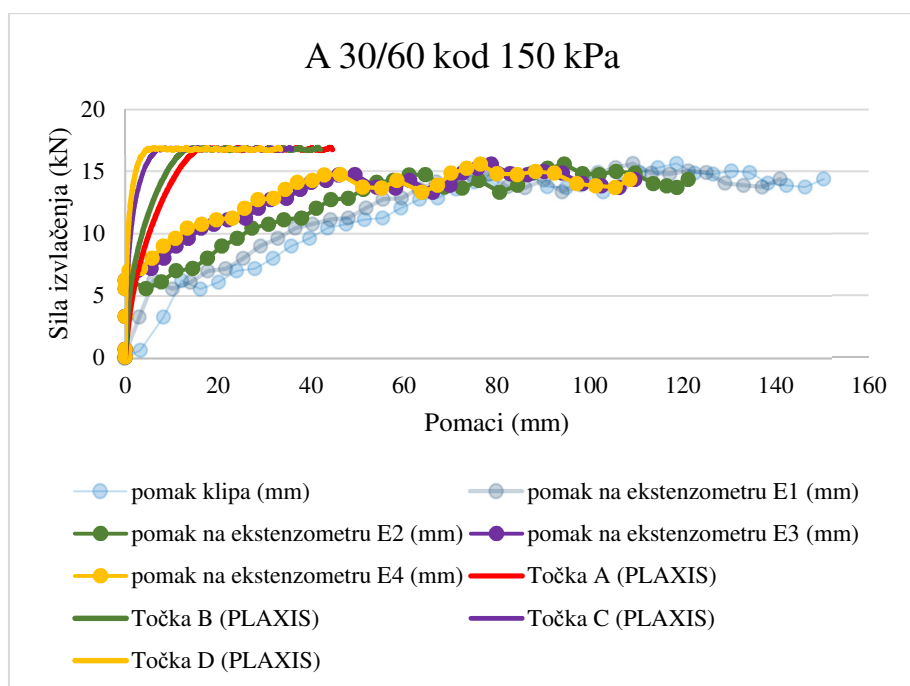
Materijal	50 kPa		100 kPa		150 kPa	
	Kut trenja $\varphi$ (°)	Kut dilatancije $\psi$ (°)	Kut trenja $\varphi$ (°)	Kut dilatancije $\psi$ (°)	Kut trenja $\varphi$ (°)	Kut dilatancije $\psi$ (°)
A30/60	33	3			21	0
A16/31,5	60	23			55	21
B4/60	59	29			35	5
B4/31,5	61	24			50	17
C0/60	65	35	55	25	49	19
C0/31,5	59	15	50	12	48	10

Kako bi se ocijenilo da li je bolje definirati cijeli sloj materijala s parametrima koji su određeni ispitivanjem izvlačenja provedene su numeričke analize u kojima su cijelom sloju materijala dodijeljeni parametri kontaktnog elementa, tj. kut trenja određen ispitivanjem izvlačenja armature iz tla. Parametri materijala korišteni u ovim analizama odgovaraju parametrima za kontaktne elemente iz tablice 6-2. Rezultati numeričkih analiza prikazani su dijagramima pomaka i sile izvlačenja po točkama A, B, C i D, koje odgovaraju položaju ekstenzometara u eksperimentu (slika 6-25 do 6-31). Iz provedenih numeričkih analiza u kojima je materijalu dodijeljeni kut trenja određen iz ispitivanja izvlačenja dobivene su sile izvlačenja koje više odgovaraju silama izvlačenja određenim eksperimentalno. Iz ovih ispitivanja može se zaključiti

da je za definiranje parametara materijala bolje odabrati kut trenja koji se javlja na kontaktu trake i tla umjesto kuta trenja koji je određen ispitivanjem izravnog smicanja. Također se na temelju provedenih numeričkih analiza može zaključiti da se prilikom projektiranja konstrukcija od armiranog tla u kojima se kao materijal ispune koristi dobro graduirani lomljeni kamen mogu koristiti kutovi trenja koji su znatno veći od kuta  $34^\circ$  koji se najčešće uzima kod projektiranja ovih konstrukcija. Dijagramom na slici 6-32 prikazane su maksimalne sile izvlačenja za svaki materijal određene eksperimentalno, te numeričkim analizama kada su definirani posebno parametri tla i posebno parametri kontaktnog elementa (oznaka NUM 1), te kada su korišteni kutovi trenja određeni na kontaktu trake i tla za cijeli sloj tla (NUM 2). Maksimalne sile izvlačenja određene su kao srednja vrijednost za ispitivanja koja su ponovljena, dok je za ispitivanja koja nisu bila ponavljana eksperimentalno uzeta maksimalna sila za samo jedno mjerenje. Iz dijagrama se vidi da je najmanja razlika između sile izvlačenja određene eksperimentalno i sile izvlačenja za NUM 2, kada su cijelom sloju tla dodijeljeni parametri kontaktnog elementa. U tablici 6-6 prikazane su maksimalne sile izvlačenja određene eksperimentalno i numerički, te je prikazano u postocima koliko se razlikuju izmjerene sile izvlačenja od maksimalnih sila izvlačenja određenih numeričkih. Iz tablice se vidi da se za slučaj NUM 1 u kojem su parametri tla određeni ispitivanjem izravnog smicanja, a parametri na kontaktu trake i tla pokusom izvlačenja sile izvlačenja dobivene numerički razlikuju i do 32% u odnosu na izmjerene vrijednosti. S druge strane kada su cijelom sloju tla definirani kutovi trenja jednaki kutu trenja na kontaktu trake i tla i kada je kut dilatancije jednak  $\psi = \varphi - 30^\circ$  maksimalna razlika izmjerene sile izvlačenja i numerički određene sile izvlačenja je ispod 10% za sva ispitivanja.

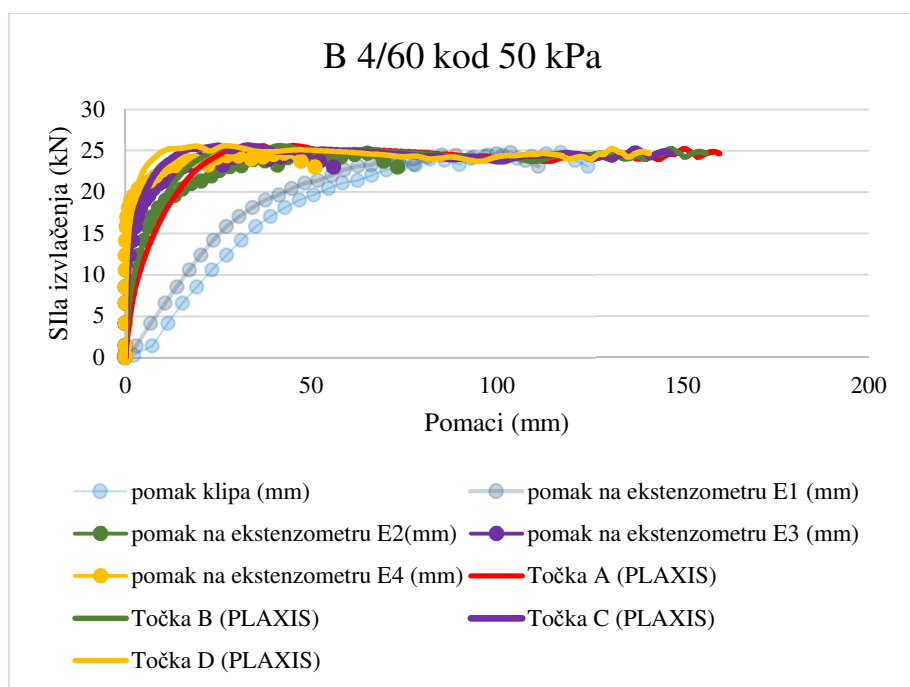


**Slika 6-25** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u laboratoriju i numerički za A30/60 kod 50 kPa

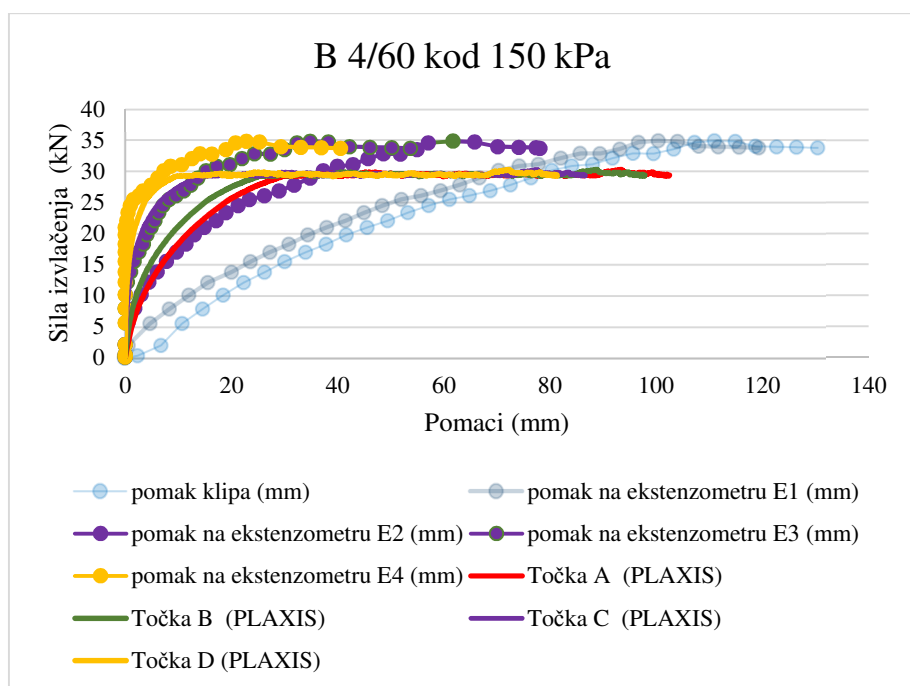


**Slika 6-26** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u laboratoriju i numerički za A30/60 kod 150 kPa

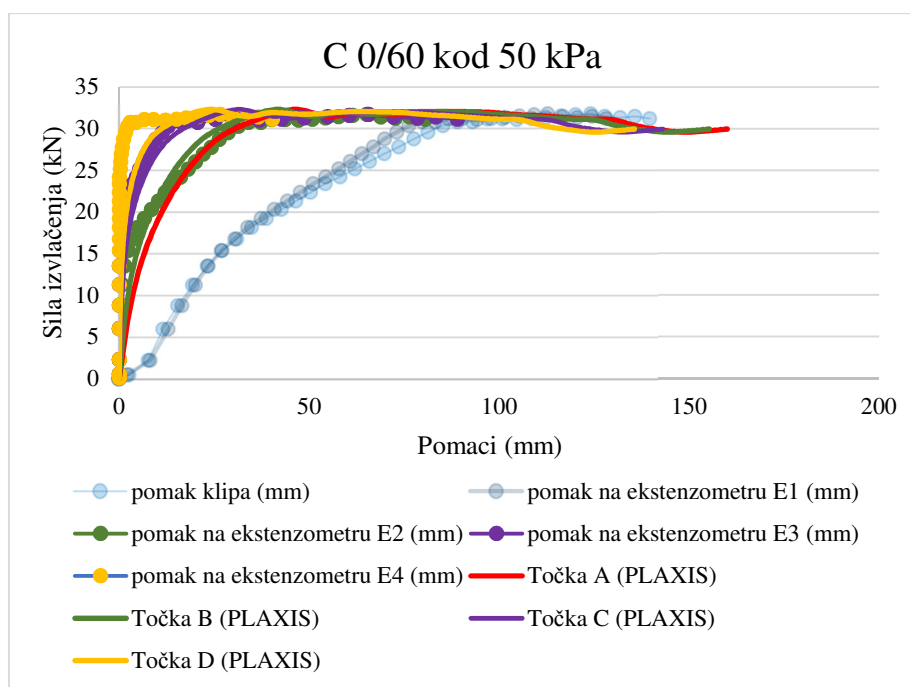




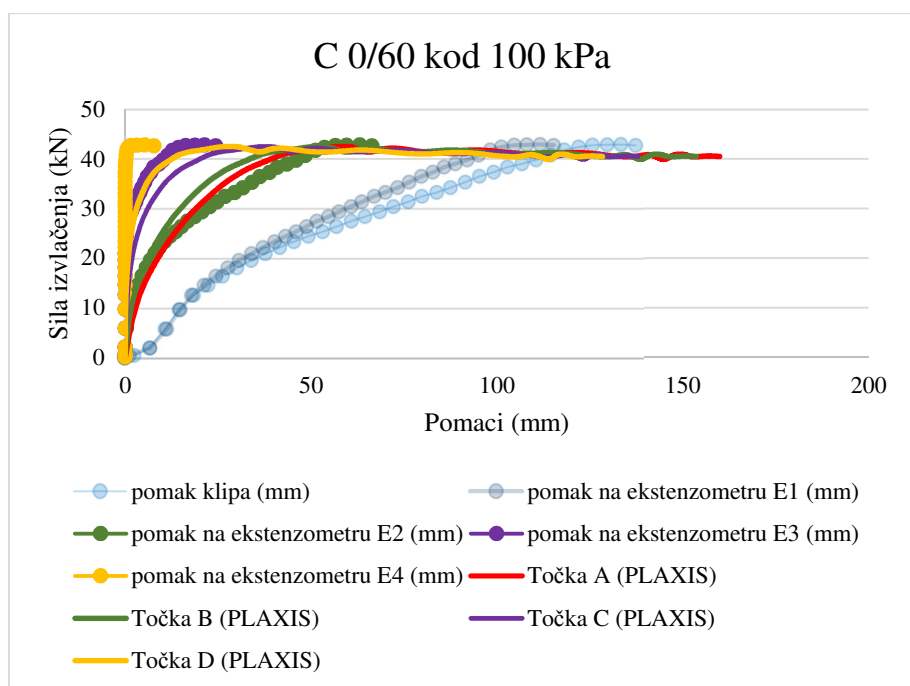
**Slika 6-27** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u laboratoriju i numerički za B4/60 kod 50 kPa



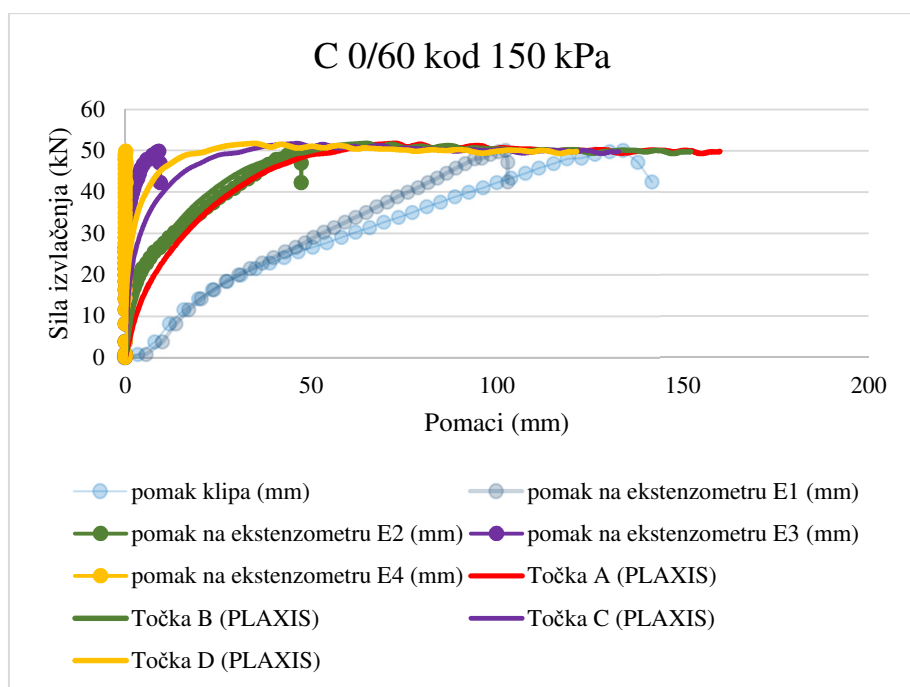
**Slika 6-28** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u laboratoriju i numerički za B4/60 kod 150 kPa



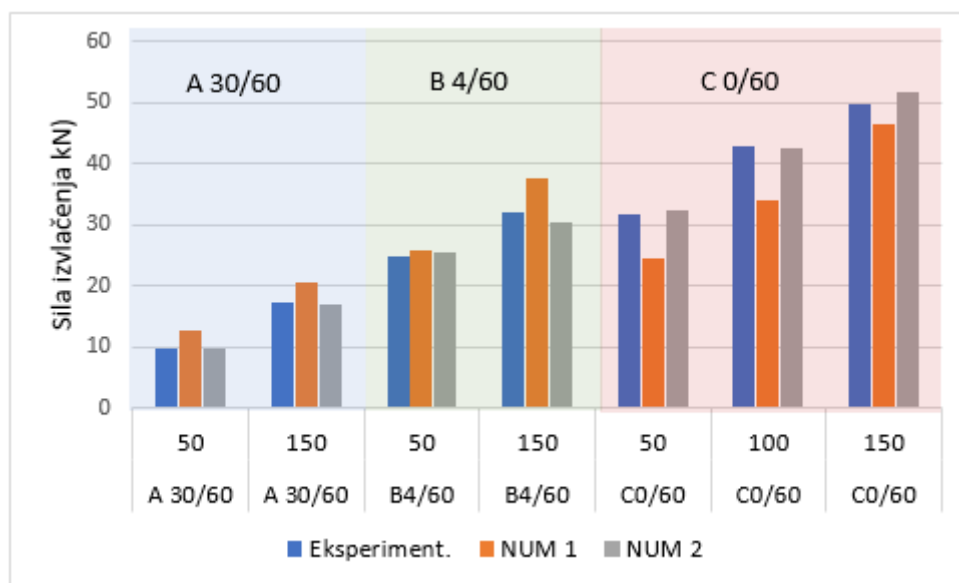
**Slika 6-29** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u laboratoriju i numerički za C0/60 kod 50 kPa



**Slika 6-30** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u laboratoriju i numerički za C0/60 kod 100 kPa



**Slika 6-31** Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u laboratoriju i numerički za C0/60 kod 150 kPa



**Slika 6-32** Dijagram maksimalnih sila izvlačenja za sva tri granulometrijska sastava određen eksperimentalno, s parametrima NUM 1 i parametrima NUM 2

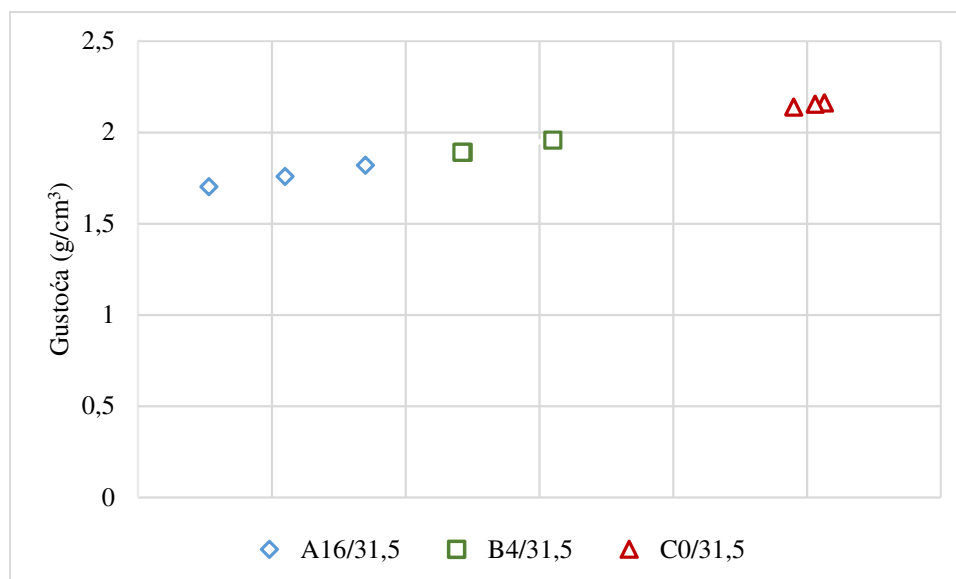
**Tablica 6-6** Izmjerene i numerički određene maksimalne sile izvlačenja

Materijal	Opterećenje (kPa)	Eksperiment. (kN)	NUM 1 (kN)	NUM 2 (kN)	Eksp. i NUM1 %	Eksp. i NUM2 %
A 30/60	50	9,73	12,85	9,87	32,1	1,4
A 30/60	150	17,23	20,7	16,94	20,1	-1,7
B4/60	50	24,71	25,79	25,61	4,4	3,5
B4/60	150	32,14	37,53	30,29	16,8	-6,1
C0/60	50	31,72	24,59	32,32	-22,5	1,9
C0/60	100	42,87	34,07	42,53	-20,5	-0,8
C0/60	150	49,89	46,45	51,78	-6,9	3,7

Na temelju provedenih numeričkih analiza može se zaključiti da se programom Plaxis 2D može dobro simulirati pokus izvlačenja trake iz tla, ali pri simulaciji je potrebno uzeti znatno veću krutost trake zato jer program uzima da je geometrija modela u ravnini okomitoj na poprečni presjek manje-više jednaka, tj. program uzima da je traka širine 1 m. Povratnim analizama pokazalo se da ta krutost može biti i do 10 puta veća od krutosti jedne trake određene ispitivanjem vlačne čvrstoće trake. Što se tiče definiranja parametra materijala povratne analize pokazale su da je bolje definirati cijeli sloj materijala s parametrima (kutom trenja) koji su određeni ispitivanjem izvlačenja nego definirati kontaktne elemente s različitim parametrima materijala. Iz provedenih numeričkih analiza slijedi da se za dobro graduirani lomljeni kamen mogu koristiti kutovi trenja znatno viši od 34° koliko se najčešće koristi u projektiranju zidova od armiranog tla.

## 7 DISKUSIJA REZULTATA

Ispitivanja parametra čvrstoće provedena su u velikom uređaju za izravni posmik dimenzija  $300 \times 300 \times 300$  mm za jednoliko graduirani i dobro graduirani lomljeni kamen. Granulacija lomljenog kamena određena je tako da odgovara granulometrijskom sastavu lomljenog kamena koji je korišten u ispitivanju izvlačenja, a da s druge strane zadovolji kriterij norme ASTM D3080/D3080M-11 koja pripisuje da dimenzija kutije (širina) mora biti minimalno deset puta veća od maksimalnog promjera zrna. Kako bi se zadovoljili kriteriji propisani normom ispitivanja su provedena za lomljeni kamen s maksimalnim promjerom zrna 31,5 mm. U ispitivanju je korišten jednoliko graduirani materijal s rasponom frakcija od 16 do 31,5 mm označen kao materijal A16/31,5, i dobro graduirani materijal s rasponom frakcija od 4 do 31,5 mm, označen kao materijal B4/31,5 i dobro graduirani materijal s rasponom frakcija od 0 do 31,5 mm, označen oznakom C0/31,5. Materijal je u kutiju uređaja ugrađen u pet slojeva s jednakom masom, a svaki sloj se zbijao udarnim čekićem koji je na sebi imao metalnu pločicu. Nakon ugradnje iz poznate mase i volumena određena je gustoća svakog pojedinog uzorka. Najmanja gustoća materijala postignuta je za jednoliko graduirani materijal A16/31,5 dok je najveća gustoća postignuta za materijal C0/31,5. Iz dijagrama na slici 7-1 može se vidjeti porast gustoće s porastom sadržaja sitnijih čestica, što je i očekivano zato jer sitnije čestice popunjavaju pore između krupnijih zrna. Također može se uočiti da je za materijal s većim sadržajem sitnih čestica postignuta ujednačenija gustoća za sva ispitivanja.



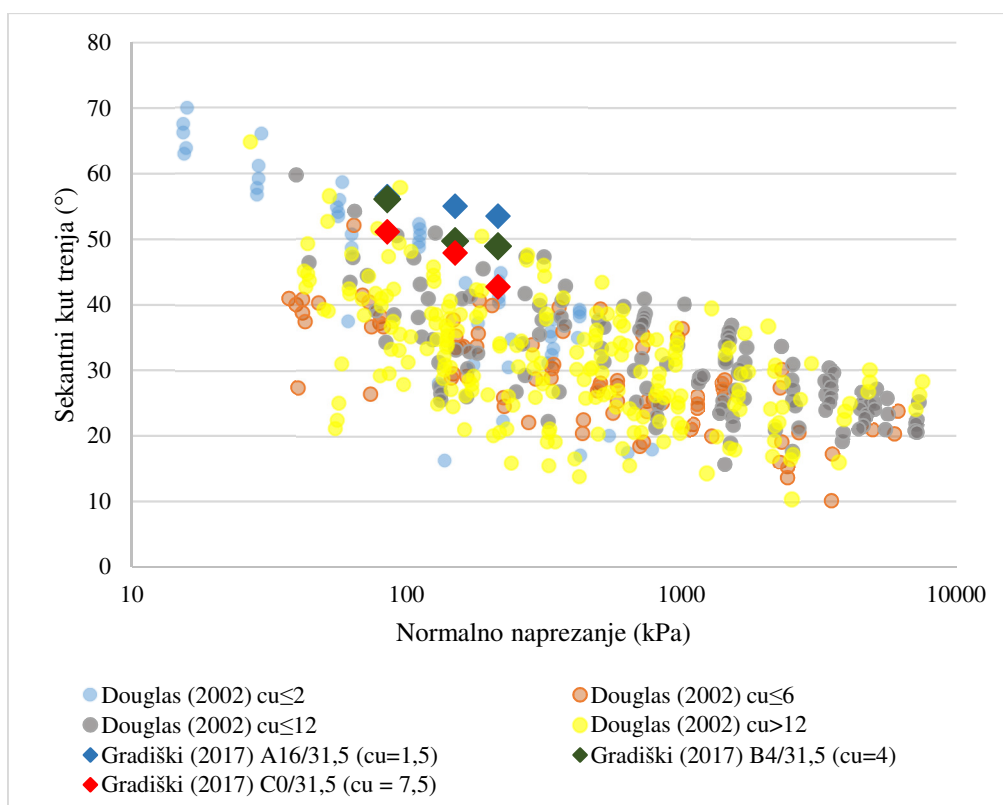
**Slika 7-1** Gustoća ugrađenog materijala za ispitivanje parametra čvrstoće

Ispitivanja su provedena za tri različita vertikalna naprezanja od 85 kPa, 150 kPa i 215 kPa s konstantnom brzinom smicanja od 3 mm/min, dok ispitivanja kod opterećenja od 50 kPa nisu provedena zato jer je najmanje naprezanje kod upotrebe hidrauličkih cilindara 85 kPa. U fazi smicanja preko četiri odstojna ležaja osiguran je razmak od 15 mm između gornjeg i donjeg okvira kutije. Norma ASTM D 3080-03 navodi da je potreban razmak potrebno povećati kod ispitivanja većih frakcija, ali nije strogo definirano koliko već je samo preporuka da taj razmak bude pola promjera najvećeg zrna. Kako je u ispitivanjima maksimalni promjer zrna 31,5 mm odlučeno je da razmak kod ovih ispitivanja bude 15 mm, a preporuka je da se utjecaj razmaka kutija utvrdi u daljnjim ispitivanjima koja nisu obuhvaćena ovim radom. Ukupno je provedeno devet ispitivanja izravnog smicanja na lomljenom kamenu, a rezultati ispitivanja prikazani su pravcem čvrstoće koji odgovara Mohr-Coulombovom zakonu čvrstoće za dvije različite hipoteze o koheziji. U prvom slučaju je pretpostavljeno da je kohezija jednaka nuli, dok je u drugom slučaju pretpostavljeno da je kohezija različita od nule. Douglas (2002) u svom radu navodi da je sekantni kut trenja taj koji se najčešće koristi kada se provodi ispitivanje na krupnozrnatom materijalu te je uz kut trenja određen prema Mohr-Coulombovom zakonu određen i sekantni kut trenja. Najniži kutovi trenja određeni su prema MC kriteriju čvrstoće za slučaj kad je kohezija različita od nule, dok su najveći kutovi trenja određeni za sekantni kut trenja kod najmanjeg naprezanja od 85 kPa. Iz rezultata ispitivanja može se zaključiti da su parametri čvrstoće podcijenjeni u odnosu na stvarne parametre čvrstoće za slučaj kada se u Mohr – Coulombovom modelu uzima da je kohezija različita od nule. S druge strane kada se u Mohr-Coulombovom modelu uzme da je kohezija jednaka nuli vrijednosti unutarnjeg kuta trenja slične su vrijednostima sekantnog kuta trenja s tim da su kod manjih naprezanja dobivene veće vrijednosti sekantnog kuta trenja, dok su kod većih naprezanja vrijednosti sekantnog kuta trenja manje, tablica 7-1. Ovi rezultati potvrđuju da su kutovi trenja određeni MC pravcem čvrstoće podcijenjeni za manja naprezanja i precijenjeni za veća normalna naprezanja, što potvrđuje teoriju o zakrivljenoj anvelopi čvrstoće za lomljeni kamen. Uz sekantni kut trenja određen je i kut dilatancije za odabrano područje krivulje odnosa horizontalnog i vertikalnog pomaka. Najveći kutovi dilatancije određeni su za jednoliko građuirani lomljeni kamen, dok su najmanje vrijednosti kuta dilatancije određene za dobro građuirani lomljeni kamen s rasponom frakcija od 0 do 31,5 mm. Rezultati ispitivanja u skladu su s rezultatima Douglas (2002) da su kutovi trenja veći kod jednoliko građuiranog materijala nego kod dobro građuiranog materijala pod pretpostavkom konstantnog volumena pora za oba uzorka. Autor ističe da će kod dobro građuiranog materijala doći do redukcije iznosa dilatancije jer će sitnije čestice ispuniti pore

između krupnijih zrna. Još jedan od razloga koji mogu dovesti do toga da je manji kut trenja određen kod jednoliko graduiranog materijala je i razmak između kutija. Razmak između kutija kod jednoliko graduiranog materijala i dobro graduiranog materijala je 15 mm. Kad se kod ispitivanja odiže gornji okvir kutije od donjeg okvira u zoni između kutija dolazi do relaksacije materijala, tj. materijal koji je pritisnut određenim vertikalnim naprežanjem teži da popuni prostor između kutija. Kod jednoliko graduiranog materijala s veličinom zrna od 16 do 31,5 mm, zrna su veća od razmaka između kutija, te je ta relaksacija minimalna. S druge strane kod dobro graduiranog materijala s rasponom frakcija od 0 do 31,5 mm dio materijala se istiskuje u slobodan prostor između kutija te tu dolazi do oslabljenja materijala. Kako bi se utvrdio utjecaj razmaka kutija na rezultate ispitivanja preporuka je da se u daljnjim istraživanjima provedu ispitivanja s različitim razmakom između kutija u fazi posmika. Međutim kad se usporede kutovi trenja određeni ovim ispitivanjima vidi se da su kutovi trenja lomljenog kamena viši od kuta trenja koji se najčešće koristi kod projektiranja konstrukcija od armiranog tla (kuta od 34° do 36°). Douglas (2002) je skupio bazu s više od 989 individualnih ispitivanja parametra čvrstoće u troosnom uređaju, te je analizirao utjecaj koeficijenta nejednoličnosti na sekantni kut trenja. Rezultati Douglas (2002) za troosni uređaj uspoređeni su s rezultatima koji su određeni u izravnom posmiku za različite koeficijente nejednoličnosti, slika 7-2. Ispitivanja su uspoređena iako se kod ispitivanja u troosnom uređaju dobiju nešto niže vrijednosti kuta trenja. Iz dijagrama na slici 7-2 vidi se da su za ispitivanja dobivene vrijednosti kuta trenja nešto više od ispitivanja koja su određena troosnim uređajem.

**Tablica 7-1** Usporedba kutova trenja ovisno o modelu kojim se određuje kut trenja

Materijal	Normalno naprežanje (kPa)	Sekantni kut trenja (°)	Kut trenja MC kriterij čvrstoće ( $c=0$ )	Kut trenja MC kriterij čvrstoće ( $c\neq 0$ )
A16/31,5	85	56,5	54,3	51,2
A16/31,5	150	55		
A16/31,5	215	53,5		
B4/31,5	85	56,1	49,9	42,8
B4/31,5	150	49,7		
B4/31,5	215	48,9		
C0/31,5	85	51,1	45,2	35,7
C0/31,5	150	47,9		
C0/31,5	215	42,7		



**Slika 7-2** Usporedba izmjerenih sekantnih kutova trenja s rezultatima Douglas (2002) za troosna ispitivanja

Određivanje koeficijenta interakcije između geosintetičke trake i tla provedeno je ispitivanjem izvlačenja trake iz sloja lomljenog kamena u velikom uređaju za ispitivanje izvlačenja, tip GFOS koji je razvijena na Građevinskom fakultetu u Osijeku. Dimenzije kutije uređaja koji je korišten u ispitivanju su  $L \times B \times H = 1,9 \times 0,9 \times 0,8$  m. Ispitivanja su provedena za jednu vrstu geosintetičke trake poznate pod komercijalnim nazivom *ParaWeb* deklarirane nosivosti 100 kN. Širina trake korištene u ispitivanju je 90 mm, dok je debljina trake 6 mm. Ispitivanja su provedena za lomljeni kamen različitog granulometrijskog sastava: jednoliko graduirani lomljeni kamen s rasponom frakcija od 30 do 60 mm, označen kao materijal A30/60, dobro graduirani lomljeni kamen s rasponom frakcija od 4 do 60 mm, označen kao materijal B4/60 i dobro graduirani lomljeni kamen s rasponom frakcija 0 do 60 mm, označen kao materijal C0/60. Ispitivanja su provedena kod dva različita vertikalna naprezanja od 50 kPa i 150 kPa za materijal A30/60 i B4/60 i kod tri različita vertikalna naprezanja 50 kPa, 100 kPa i 150 kPa za materijal C0/60. Glavna svrha provedbe ispitivanja izvlačenja bila je da se odredi utjecaj granulometrijskog sastava materijala na silu izvlačenja i koeficijent interakcije, te da se odredi utjecaj bočnog trenja na kontaktu trake i tla na silu izvlačenja. Kako bi se ostvarili ovi ciljevi

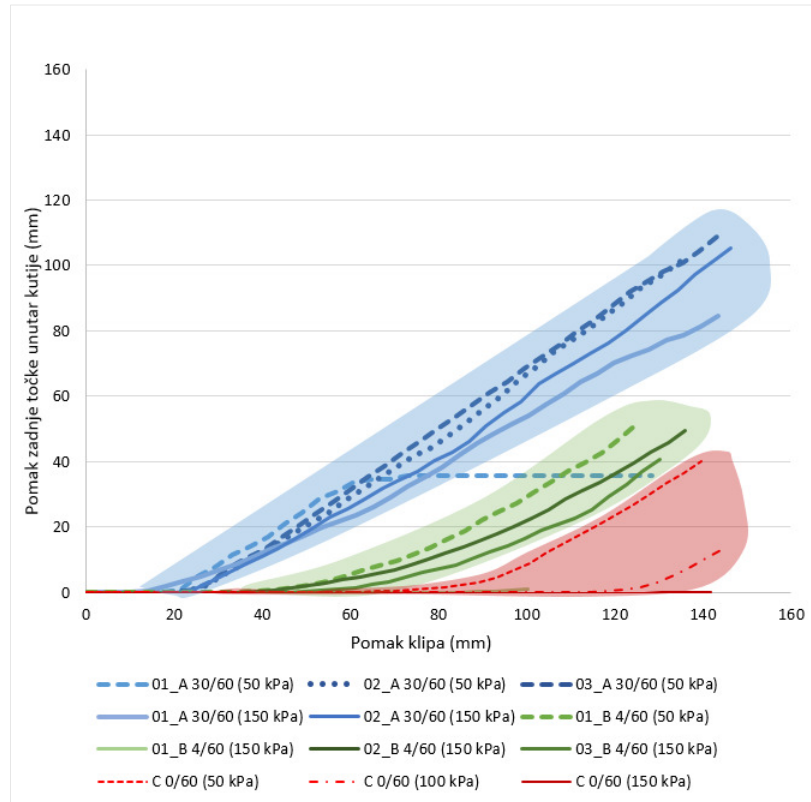


ispitivanja su provedena za slučaj izvlačenja jedne trake te za slučaj izvlačenja dvije spojene trake i dvije razmaknute trake. Ispitivanje izvlačenja jedne trake provedeno je za tri različita granulometrijska sastava materijala kod dva/tri različita vertikalna naprezanja, a ovim ispitivanjima želio se utvrditi utjecaj granulometrijskog sastava na silu izvlačenja i koeficijent interakcije. AASHTO (2012) propisuje referentne vrijednosti koeficijenta interakcije za različite materijale armature, ali uvjet je da je koeficijent nejednoličnosti materijala,  $C_u \geq 4$ . Kako se u gradnji konstrukcija od armiranog tla često koristi i lomljeni kamen koji se dobije miniranjem, a koji je potrebno drobiti kako bi se dobila odgovarajuća granulometrija materijala. Upotreba materijala s manjim koeficijentom nejednoličnosti omogućila bi jeftiniju izgradnju konstrukcija od armiranog tla za slučajeve kada se kao materijal ispune koristi lomljeni kamen. Kako bi se odredio utjecaj granulometrijskog sastava materijala ispitivanja su provedena za materijale s tri različita granulometrijska sastava.

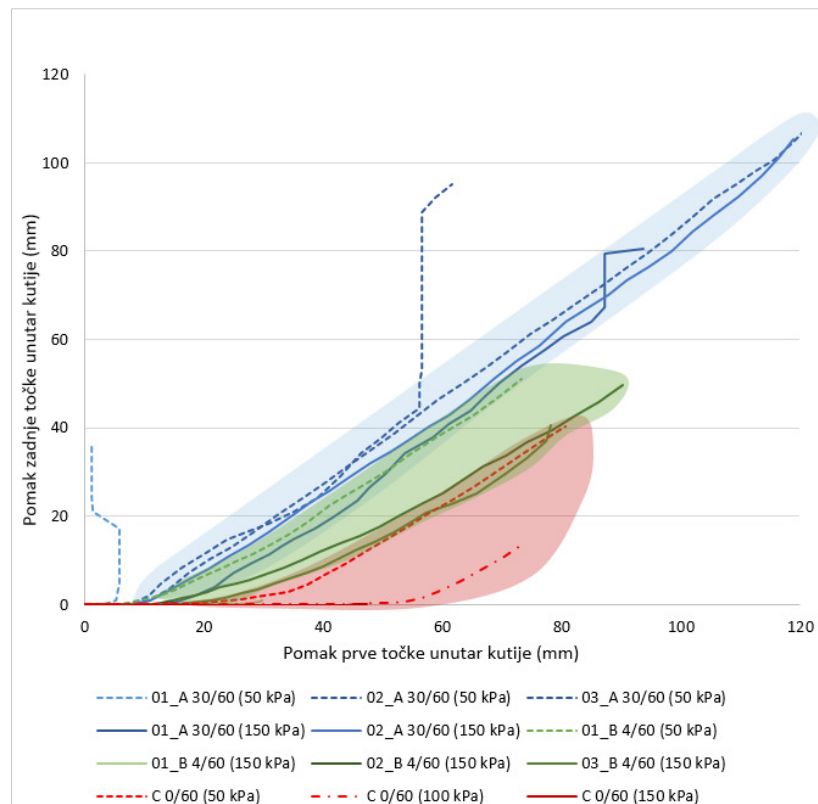
Drugi dio ispitivanja proveden je kako bi se odredio utjecaj bočnog trenja kod izvlačenja trake, a kako bi se to ostvarilo ispitivanja su provedena za slučaj izvlačenja dvije trake na međusobnom razmaku 20 cm i dvije trake koje su spojene (položene jedna uz drugu). Ova ispitivanja provedena su za samo jedan granulometrijski sastava materijala C0/60 i kod jednog vertikalnog naprezanja od 50 kPa. Kod ovog ispitivanja razmak trake je odabran tako da se osigura da trake ne utječu jedna na drugu, a ispitivanja su provedena kod samo jednog vertikalnog naprezanja zbog ograničenja uređaja gdje je maksimalna sila izvlačenja 80 kN.

Za vrijeme ispitivanja praćeni su pomaci po duljini trake i sila izvlačenja. Pomaci su praćeni ekstenzometrima u pet točaka i to za ispitivanje jedne trake: na klipu, na ulasku trake u kutiju, na prvih 20 cm od ruba košuljice, na sredini trake i na 20 cm od kraja trake. Kod ispitivanja dviju traka pomaci su praćeni na klipu, te na prvih 20 cm od ruba košuljice i na zadnjih 20 cm od kraja kutije. Utjecaj prednje stjenke na rezultate ispitivanja umanjen je korištenjem košuljice (metalnog skošenog ruba) duljine 25 cm kroz koju je provučena traka. Kako bi se dodatno smanjilo trenje na mjestu gdje traka ulazi u košuljicu i kako bi se spriječilo zaglavljivanje zrna lomljenog kamena u otvoru košuljice za vrijeme izvlačenja trake, na mjestu gdje traka ulazi u košuljicu stavljen je tanki sloj pijeska. Kad se oduzme duljina košuljice od 25 cm, dobije se da je efektivna duljina trake koja se nalazi između slojeva lomljenog kamena 1,65 m. Traka je kroz otvor na stražnjoj strani provučena van iz kutije pa tako za vrijeme izvlačenja taj dio trake koji je izvan kutije ulazi u kutiju i time se osigurava da je efektivna duljina trake tokom cijelog ispitivanja jednaka 1,65 m. Ispitivanje izvlačenja traje sve dok se ne ostvari ukupni pomak trake, tj. dok ne dođe do aktiviranja cijele duljine trake, a što se očituje ostvarenim pomakom

na zadnjem ekstenzometru. Ukupno je provedeno 16 ispitivanja izvlačenja geosintetičke trake iz tla od čega je 12 ispitivanja provedeno za izvlačenje jedne trak i 4 ispitivanja za izvlačenje dvije trake. Za materijal A30/60 provedeno je pet ispitivanja od čega tri kod 50 kPa i dva kod 150 kPa. Za materijal B4/60 provedena su četiri ispitivanja od čega je jedno ispitivanje provedeno kod napreznja od 50 kPa i tri kod napreznja od 150 kPa. Za materijal C0/60 provedeno je po jedno ispitivanje kod svakog opterećenja od 50 kPa, 100 kPa i 150 kPa. Ispitivanja izvlačenja za dvije trake provedeno je kod jednog vertikalnog napreznja od 50 kPa. Rezultati ispitivanja prikazani su u poglavlju 5.4.1 i 5.4.2 dijagramima pomaka i sile izvlačenja za vertikalna napreznja od 50 kPa i 150 kPa. Na temelju dijagrama na slici 5-15 uočeno je da kod ispitivanja izvlačenja u jednoliko graduiranom materijalu pomaci kraja trake malo zaostaju za pomacima početka trake što bi značilo da je manje trenje između trake i tla. Kod jednoliko graduiranog materijala manji broj zrna je u kontaktu s trakom i pretpostavlja se da je i manje bočno trenje te se traka ponaša kruće. Za razliku od jednoliko graduiranog materijala kod dobro graduiranog materijala uočeno je da kod izvlačenja trake dolazi do istežanja trake pri čemu je istežanje trake najveće između pomaka klipa i prve točke u kutiji. Ovakvo ponašanje trake je i očekivano zato jer se traka s jedne strane povlači (pomak klipa) dok je s druge strane ukliještena između lomljenog kamena te u tom slobodnom dijelu trake, dijelu koji nije unutar materijala dolazi do najvećeg istežanja. S druge strane ako se promatraju samo točke unutar kutije onda je ta razlika u aktiviranju pomaka prve točke unutar kutije i krajnje točke manja, što bi značilo da se traka unutar materijala manje isteže. Kada se promatra dobro graduirani materijal B4/60 i C0/60 može se uočiti da je istežanje trake veće kod bolje graduiranog materijala C0/60. Iz analize ovih pomaka početka i kraja trake može se zaključiti da su kod jednoliko graduiranog materijala otpori pri izvlačenju trake, tj. trenje na kontaktu trake i tla znatno manji nego kod dobro graduiranog materijala. Dijagramima na slikama 7-3 i 7-4 prikazano je aktiviranje pomaka klip i zadnje točke u kutiji (kraja trake) te pomak prve točke unutar kutije i zadnje točke unutar kutije. Iz dijagrama se vidi da se traka kod jednolikog materijala ponaša kao kruća, dok je kod dobro graduiranog materijala uočeno istežanje trake. Na dijagramima su isprekidanim linijama prikazani pomaci kod napreznja od 50 kPa dok su punim linijama prikazani pomaci kod 150 kPa.

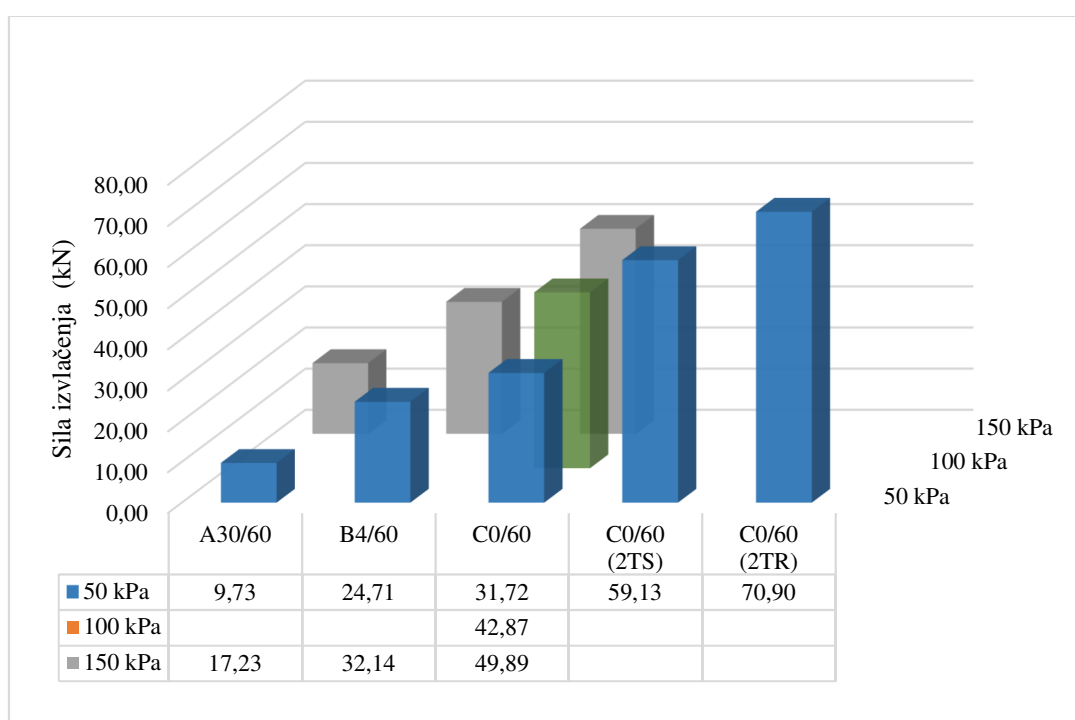


**Slika 7-3** Pomak klipa i zadnje točke unutar kutije za sva tri materijala kod različitog napreznja



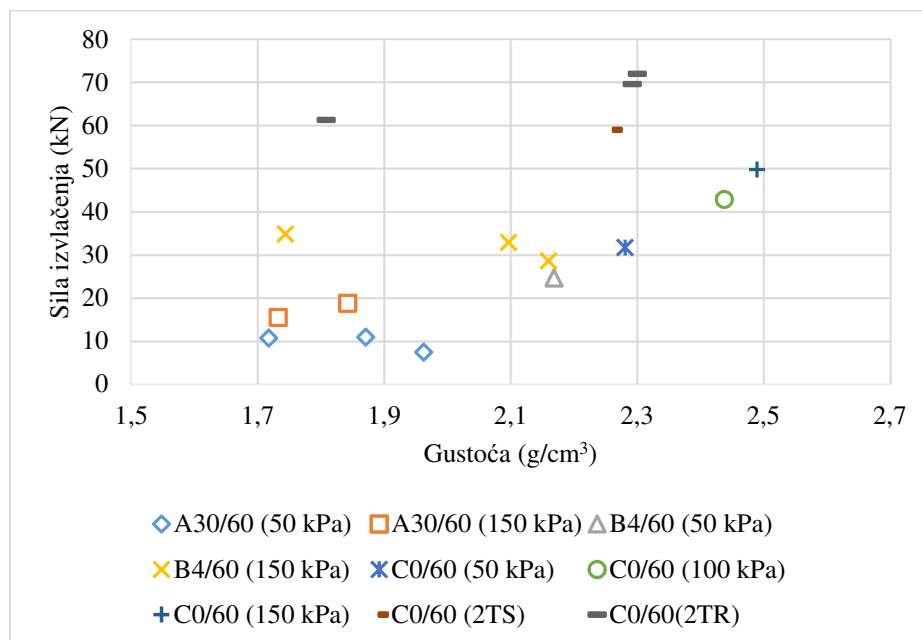
**Slika 7-4** Pomak prve točke unutar kutije i zadnje točke unutar kutije za sva tri materijala

U ispitivanju izvlačenja, maksimalne sile izvlačenja postignute su za najbolje građurani materijal C0/60 dok su najmanje sile izvlačenja postignute kod materijala A30/60. Ovi rezultati potvrđuju da granulometrijski sastav materijala znatno doprinosi maksimalnoj sili izvlačenja kao i ponašanju traka u materijalu. Kod dobro građuranog materijala više čestica je u kontaktu s trakom pa je i otpor izvlačenju veći. Može se pretpostaviti da je i efekt povećanog bočnog naprezanja izraženiji kod dobro građuranog materijala, ali kako bi se izmjerilo porast naprezanja uz traku potrebno je provesti dodatna mjerenja što u okviru ovih ispitivanja nije moguće provesti. Kada se promatra sila izvlačenja jedne trake i dvije spojene trake može se uočiti da je sila izvlačenja za dvije spojene trake veća za 86% od sile izvlačenja za jednu traku. Kada se promatra sila izvlačenja za dvije razdvojene trake i jednu traku, sila izvlačenja razdvojenih traka je za 113% veća od sile izvlačenja za jednu traku. Ovim ispitivanjima pokazalo se da bočno trenje na kontaktu trake i tla doprinosi porastu sile izvlačenja. Zanimljivo je da kod izvlačenja jedne i dvije spojene trake sila izvlačenja za spojene trake nije duplo veća od sile izvlačenja jedne trake, što bi značilo da je kod jedne trake koja je široka 90 mm efekt spriječene dilatancije izraženiji nego kod dvije trake, koje čine jednu traku širine 180 mm. Dijagramom na slici 7-5 prikazane su maksimalne sile izvlačenja za sva ispitivanja kod vertikalnih naprezanja kod kojih su provedena ispitivanja. Na dijagramu su prikazane srednje vrijednosti sile izvlačenja za pokuse koji su bili ponovljeni više puta.



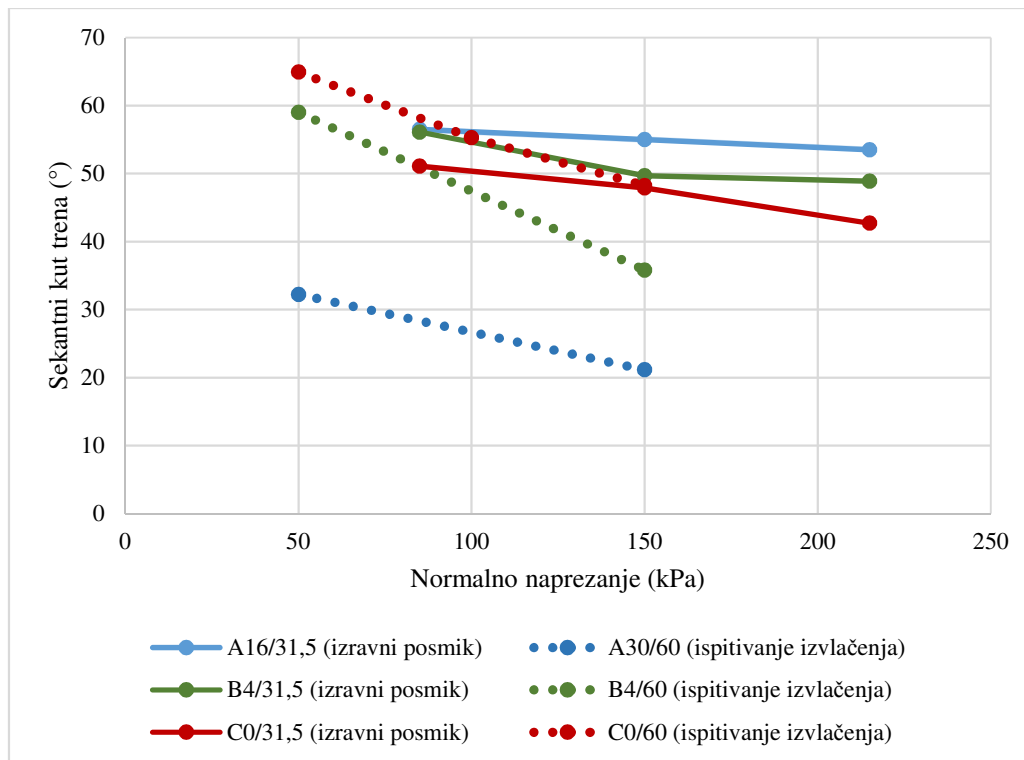
**Slika 7-5** Dijagram maksimalne sile izvlačenja za sva provedena ispitivanja

Nakon svakog provedenog ispitivanja u postupku izgradnje uzorka iz kutije mjerena je gustoća materijala ispune (lomljenog kamena). Iz dijagrama na slici 7-6 može se uočiti da su najmanje postignute gustoće kod materijala A30/60 dok su najveće gustoće postignute kod materijala C0/60. Na dijagramu je prikazan odnos maksimalne sile izvlačenja u odnosu na određene gustoće i može se uočiti da s porastom gustoće raste i sila izvlačenja, uz jednu iznimku kod materijala B4/60 kod 150 kPa što se može pripisati eventualnoj pogrešci pri određivanju gustoće. Naime gustoća je određivana na način da se uzme određena masa materijala te se zatim taj prostor ispuni vodom, a zatim se iz poznate mase izvađenog tla i određenog volumena izračuna gustoća. Moguće je da je pri mjerenju gustoće ovom metodom došlo do pogreške pri utvrđivanju gustoće za taj uzorak B4/60, međutim generalno se može zaključiti da s porastom gustoće raste i sila izvlačenja. Utjecaj gustoće na maksimalnu silu izvlačenja za jednak granulometrijski sastav materijala i pri jednakom vertikalnom naprežanju može se promatrati samo za ispitivanja u kojima su ponovljeni rezultati ispitivanja, a to su za frakciju A30/60 kod 50 kPa i 150 kPa i frakciju B4/60 kod 150 kPa te za frakciju C0/60 kod ispitivanja dvije odvojene trake. Ako se promatra utjecaj gustoće na silu izvlačenja za frakciju A30/60 kod 50 kPa i B4/60 kod 150 kPa može se uočiti da s porastom gustoće pada sila izvlačenja, dok kod frakcije A30/60 kod 150 kPa s porastom gustoće raste i sila izvlačenja. Kod frakcije C0/60 za dvije razdvojene trake kod jednog ispitivanja je gustoća ugrađenog materijala bila znatno niža od ciljane gustoće, te su ta ispitivanja odbačena u daljnjim analizama.



**Slika 7-6** Odnos gustoće i sile izvlačenja za sva provedena ispitivanja

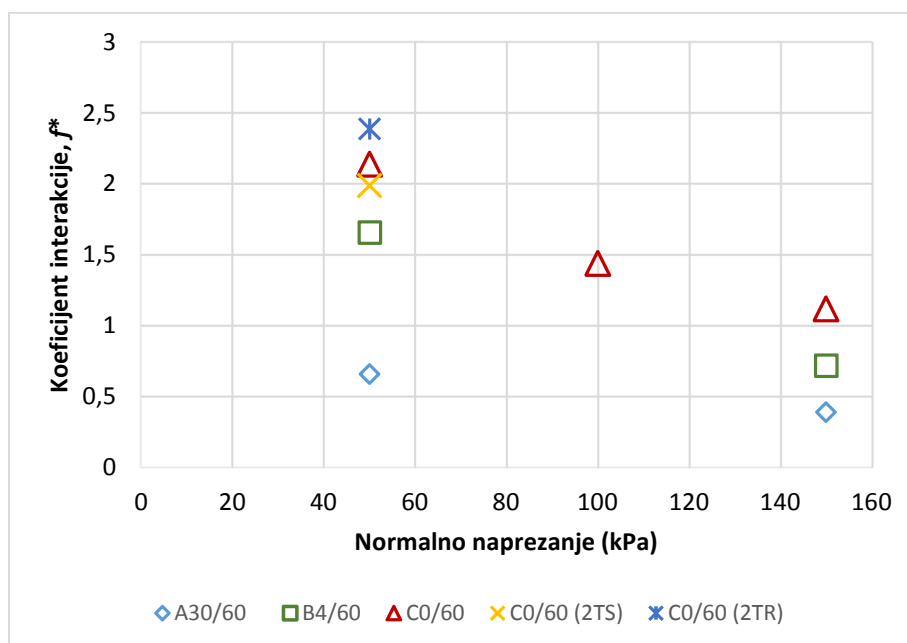
Iz sile izvlačenja dobivene pokusom i posmične površine uzorka određeno je posmično naprezanje na kontaktu geosintetičke trake i lomljenog kamena. Najveće vrijednosti posmičnog naprezanja određene su za dobro graduirani lomljeni kamen C0/60 dok su najmanje vrijednosti određene za materijal A30/60, a također se pokazalo da posmično naprezanje raste s porastom normalnog naprezanja. Iz odnosa posmičnog naprezanja i normalnog naprezanja određen je sekantni kut trenja na kontaktu trake i lomljenog kamena. Iz ispitivanja izravnog smicanja određen je kut trenja materijala, dok je kod ispitivanja izvlačenja određen kut trenja na kontaktu trake i tla. Ako se usporede sekantni kutovi trenja iz oba ispitivanja može se zaključiti da s porastom normalnog naprezanja kod oba ispitivanja kut trenja pada. Također se može uočiti obrnuti trend sekantnog kuta trenja, kod ispitivanja izravnog posmika najveći kut trenja postignut je za jednoliko graduirani materijal, dok je kod ispitivanja izvlačenja najveći kut trenja postignut kod materijala C0/60. Ovi rezultati mogu ukazivati na sljedeće: da materijal C0/31,5 nije bio zbijen na maksimalnu gustoću, da je razmak između kutija od 15 mm prevelik te je došlo do relaksiranja materijala u zoni razmaka, tj. oslobodio se prostor za reorijentaciju čestica što se može i zaključiti na temelju manjeg kuta dilatancije u ovom materijalu. Razlika u kutu trenja može se objasniti i većim brojem čestica u kontaktu s hrapavom armaturom i dodatnim bočnim opterećenjem koje se javlja uslijed spriječene dilatancije, a koje znatno doprinosi trenju na kontaktu trake i tla. Dijagramom na slici 7-7 prikazani su kutovi trenja određeni kod ispitivanja izravnog smicanja i kod ispitivanja izvlačenja armature. Iz dijagrama je vidljivo da je razlika u kutu trenja mala kod ispitivanja izravnog smicanja za sve tri granulacije, dok je kod ispitivanja izvlačenja kod materijala A30/60 kut trenja na kontaktu trake i tla znatno manji od samog kuta trenja materijala.



**Slika 7-7** Dijagram sekantnih kutova trenja za materijale ispitane u izravnom posmiku i ispitivanju izvlačenjem

Na temelju provedenih ispitivanja izvlačenja armature iz tla određeni su koeficijenti interakcije na kontaktu trake i lomljenog kamena. Koeficijent interakcije određen je za svako ispitivanje iz jednadžbe odnosa posmičnog napreznja i vertikalnog napreznja. Rezultati ispitivanja pokazali su da s porastom vertikalnog napreznja pada koeficijent interakcije između lomljenog kamena i trake. Za frakciju A30/60 koeficijenti interakcije su manji od 1,0, dok je kod frakcije B4/60 kod normalnog napreznja od 50 kPa koeficijent interakcije veći od 1 (1,66), ali kod napreznja od 150 kPa koeficijent interakcije pada na 0,72. Za materijal C0/60 određeni su koeficijenti interakcije veći od 1,0 kod sva tri vertikalna napreznja. Ispitivanja s jednom i s dvije spojene i dvije odvojene trake pokazala su da su koeficijenti interakcije najveći za dvije odvojene trake, dok su najmanji za dvije spojene trake. Za dvije odvojene trake koeficijent interakcije je 11,6% veći od koeficijenta interakcije za jednu traku i 20% veći od koeficijenta interakcije za dvije spojene trake. Ovi rezultati ukazuju na to da bočno trenje doprinosi povećanju trenja na kontaktu trake i tla, te da je taj efekt bočnog trenja izraženiji kod užih traka. Dijagramom na slici 7-8 prikazane su srednje vrijednosti koeficijenata interakcije za sva ispitivanja. Usporedbom koeficijenata interakcije s podacima dostupnim iz literature dobiveno je da su koeficijenti interakcije za jednoliko graduirani lomljeni kamen manji od koeficijenata

interakcije koji su određeni ispitivanjima u pijesku i šljunku, dok su s druge strane za dobro graduirani materijal dobiveni koeficijenti interakcije koji su veći od koeficijenata interakcije određenih za pijesak i šljunak. Ispitivanja su pokazala da su koeficijenti interakcije određeni za geosintetičku traku i lomljeni kamen veći od koeficijenata koji su određeni za dvije geosintetičke trake u šljunku, te da su koeficijenti veći i od koeficijenata interakcije koji su određeni za traku HA geostrap koja ima nepravilne bočne rubove koji povećavaju trenje na kontaktu trake i tla.

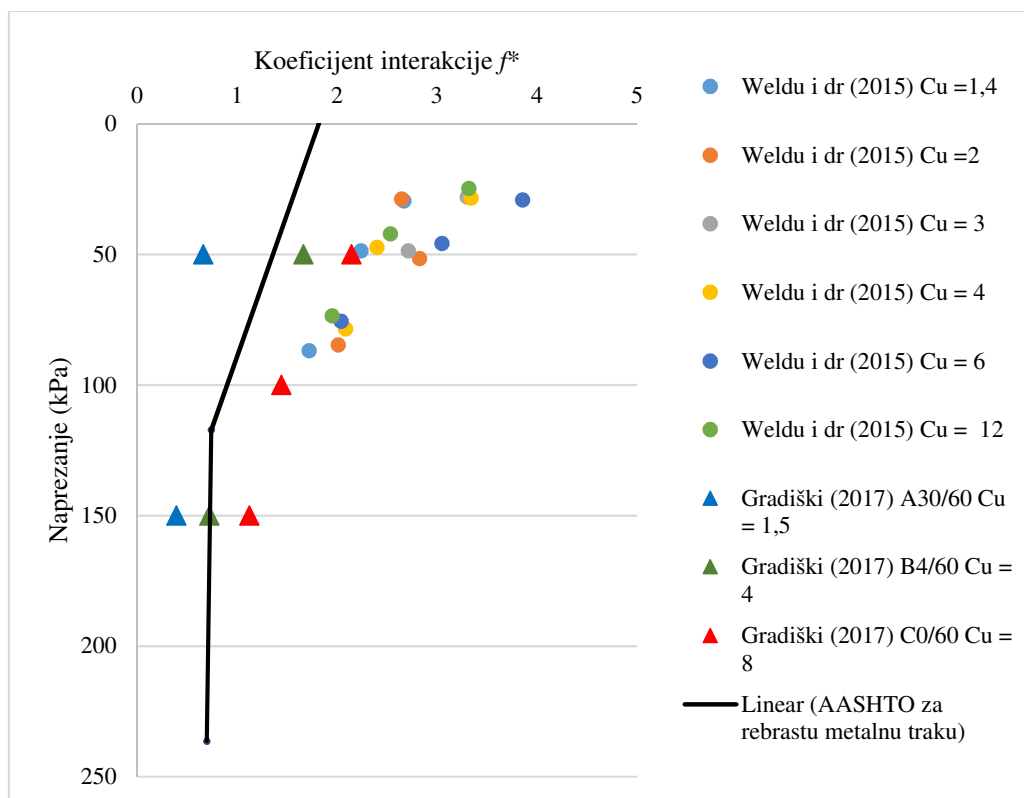


**Slika 7-8** Dijagram koeficijenata interakcije i normalnog napreznja

Utjecaj koeficijenta nejednoličnosti na koeficijent interakcije promatran je za tri različita granulometrijska sastava materijala s različitim koeficijentima nejednoličnosti. Za materijal A30/60 ( $C_u = 1,5$ ), materijal B4/60 ( $C_u = 4$ ) i materijal C0/60 ( $C_u = 8$ ), a rezultati ovih ispitivanja uspoređeni su s rezultatima Weldu i dr. (2015) za rebraste metalne trake. Rezultati su pokazali da su koeficijenti interakcije za jednoliko graduirani materijal znatno ispod projektne linije koja se koristi za rebraste trake, dok su za frakcije B4/60 kod manjih vertikalnih napreznja koeficijenti interakcije veći od projektne linije za metalne rebraste trake, a kod većih napreznja odgovaraju projektnoj liniji. Za materijal C0/60 određeni su koeficijenti interakcije kod svih ispitivanja veći od projektne linije za metalne rebraste trake. Ako se rezultati ovih ispitivanja usporede s rezultatima Weldu i dr. (2015) može se uočiti da koeficijenti interakcije određeni za geosintetičku traku i lomljeni kamen za materijal s najvećim koeficijentom nejednoličnosti C0/60 odgovaraju koeficijentima s najmanjim koeficijentom nejednoličnosti za ispitivanja s



metalnim trakama, slika 7-9. Iz ovih ispitivanja može se zaključiti da bi za projektiranje konstrukcija armiranih geosintetičkim trakama bilo poželjno da se koristi materijal s koeficijentom nejednoličnosti većim od 4.



**Slika 7-9** Usporedba koeficijena interakcije geosintetičke trake za različite koeficijente nejednoličnosti s podacima za rebrastu metalnu traku

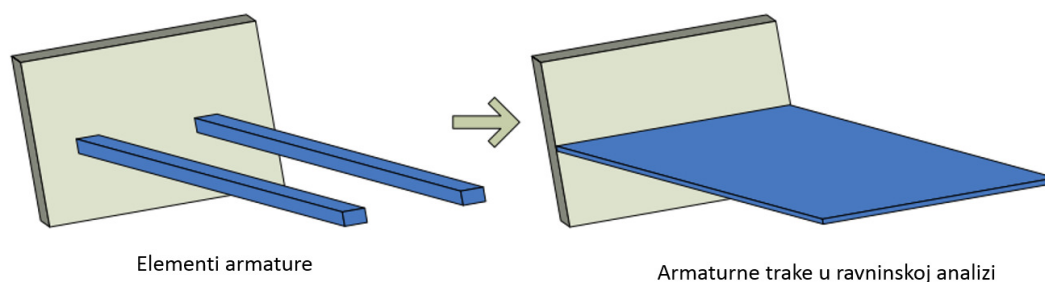
Uz laboratorijska ispitivanja izvlačenja geosintetičke trake i ispitivanja parametara čvrstoće lomljenog kamena provedene su i povratne analize u programu Plaxis 2D. U povratnim analizama korišteni su parametri materijala određeni ispitivanjem izravnog smicanja i ispitivanja izvlačenja trake iz tla. U modelu je definirana kutija uređaja s duljinom 1,65 m i visinom 0,7 m. Ove dimenzije odgovaraju dimenzijama kutije kad se oduzme duljina košuljice 25 cm i kad se na vrhu oduzme 0,1 m koji je ostavljen za zračne jastuke. Traka je u modelu definirana kao *Geogrid* element, to su elementi koji predstavljaju linijske elemente u modelu s dva translacijska stupnja slobode u svakom čvoru. Oko *Geogrid* elemenata definirani su kontaktni (*Interface*) elementi, ovim elementima simulirana je interakcija između trake i okolnog tla. Provedene parametarske analize mogu se podijeliti u tri dijela:

- analize određivanja ekvivalentne krutosti armaturne trake u modelu

- analize u kojima je definirano tlo i kontaktni elementi
- analize u kojima je definiran cijeli sloj tla parametrima koji odgovaraju kontaktnom elementu.

U svim provedenim analizama korišten je Mohr – Coulombov model tla za koji je potrebno definirati 5 parametara materijala: Youngov modul ( $E$ ), Poissonov koeficijent ( $\nu$ ), kohezija ( $c$ ), kut unutarnjeg trenja ( $\varphi$ ) i kut dilatancije ( $\psi$ ). Parametri materijala određeni su na temelju rezultata ispitivanja izravnog smicanja, dok je za Youngov modul tla određen modul krutosti od 40 MPa. Ovaj modul krutosti je pretpostavljen na temelju terenskih ispitivanja probnom pločom na sličnim materijalima. Za potrebe daljnjih istraživanja preporuča da se prilikom ispitivanja izvlačenja armature iz tla provede ispitivanje probnom pločom kako bi se odredili pravi parametri krutosti za tlo koje je ugrađeno u kutiju.

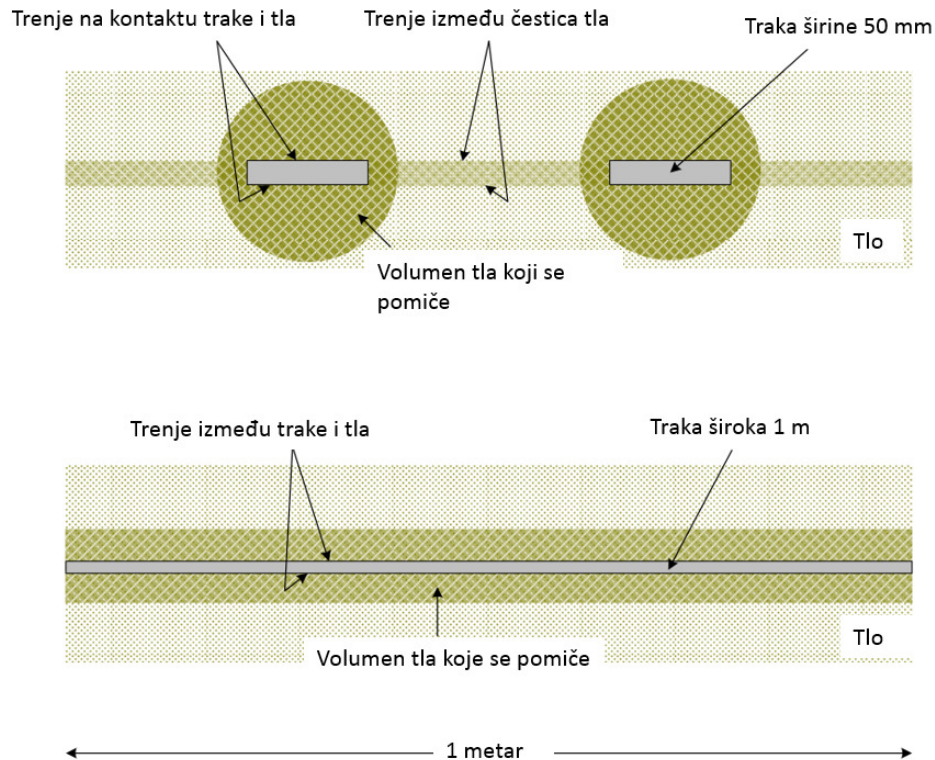
Početne numeričke analize provedene su s ciljem određivanja ekvivalentne krutosti geosintetičke trake u numeričkom modelu. Numeričke analize provedene su u 2D ravninskom modelu koji pretpostavlja da je geometrija modela okomito na poprečni presjek jednaka, a što nije slučaj kod geosintetičkih traka. U ispitivanjima je korištena traka širine 90 mm koja se nalazi unutar sloja tla, dok program uzima da je traka širine 1 m, slika 7-10. Jedini parametar koji je potrebno definirati je aksijalna krutost trake. Aksijalna krutost jedne trake određena je iz ispitivanja vlačne čvrstoće trake, a ispitivanjima je utvrđeno da aksijalna krutost jedne trake iznosi približno 1200 kN/m. Kada se proveo proračun s krutošću trake od 1200 kN/m krivulje horizontalnog pomaka i razvoja sile pokazale su da je u numeričkom modelu znatno veće istežanje trake od onog koje je dobiveno ispitivanjima u laboratoriju. Nakon tih početnih rezultata krutost trake se povećala deset puta pod pretpostavkom da 1 traka čini 10 posto ukupne širine u kutiji od 90 cm. Rezultati s 10 puta većom krutošću u modelu pokazali su da se za 10 puta veću krutost trake dijagram pomaka prve točke unutar kutije i krajnje točke kutije poklapaju. Na temelju tih rezultata krenulo se u daljnje proračune s krutošću 10 puta većom od krutosti za jednu traku iako se u literaturi nije naišlo na tako značajno povećanje krutosti armaturnog elementa. S druge strane većina dosadašnjih numeričkih analiza je provedena za slučajeve kada se u modelu koristi metalna traka, koja ima znatno veću krutost ili su analize provedene za geomreže i geotekstile koji imaju značajnu širinu u odnosu na geosintetičku traku.



**Slika 7-10** Prikaz 3D i 2D modela trake (Zevgolis & Bordeau 2007)

U drugom dijelu provedenih numeričkih analiza promatrao se utjecaj parametara tla i parametara kontaktnog elementa kojim se definirala interakcija između tla i elemenata armature. Kontaktne elemente u programu Plaxis 2D moguće je definirati preko parametra  $R_{int}$  ili na način da se kontaktnom elementu dodijele posebni parametri tla. S tim da je preko parametra  $R_{int}$  moguće definirati samo parametre čvrstoće kontaktnog elementa koji su manji od parametara čvrstoće okolnog tla. Dok je druga mogućnost da se kontaktnom elementu dodijele posebni parametri tla te je korištenjem te opcije moguće definirati parametre kontaktnog elementa s boljim karakteristikama od okolnog tla. Parametri čvrstoće materijala (lomljenog kamena) određeni su ispitivanjima izravnog smicanja na velikom uređaju za izravni posmik, dok su parametri čvrstoće kontaktnog elementa određeni ispitivanjem izvlačenja trake iz tla. U prvom slučaju za materijale koji imaju koeficijent interakcije manji od 1,0 korištene su obje opcije definiranja kontaktnog elementa, a rezultati su pokazali da nema značajne razlike u rezultatima ispitivanja. Za materijale za koje je utvrđeno da je koeficijent interakcije veći od 1,0 korištena je samo opcija da se kontaktnom elementu dodijele veći parametri čvrstoće od okolnog tla. Rezultati provedenih numeričkih analiza pokazali su da je za slučaj gdje su parametri čvrstoće tla znatno veći od parametra čvrstoće kontaktnog elementa sile izvlačenja određene numeričkim proračunom veće od 5 do 30% u odnosu na sile izvlačenja određene numeričkim proračunom. S druge strane za slučaj gdje su parametri čvrstoće kontaktnog elementa veći od parametra čvrstoće okolnog tla dobivene su u proračunu sile manje za 7 do 23% od izmjerenih sila.

Kako je u 2D modelu nemoguće modelirati stvarnu interakciju koja se odvija između trake i tla zato jer u stvarnom materijalu postoji interakcija između tla i trake u zoni oko trake i interakcija samog tla u području između traka. S druge strane model uzima za je traka široka 1 m, te je i kontaktni element u modelu širok 1 m, slika 7-11.



**Slika 7-11** Prikaz 3D mehanizma interakcije i 2D mehanizma interakcije u ravninskoj analizi (Zevgolis & Bordeau 2007)

Rezultati numeričkih analiza u kojima su definirani posebni parametri čvrstoće materijala za kontaktne elemente pokazali su da su za materijale s manjim kutom trenja na kontaktu dobivene veće sile, dok su za parametre s većim kutom trenja dobivene manje sile. Kako je u modelu virtualna debljina kontaktnog elementa 0,11 mm dok se u stvarnosti uzima da je zona interakcije znatno deblja. Provedene su dodatne analize u kojima je definirano da sloj tla ima kut trenja jednak kutu trenja na kontaktu trake i tla, dok je kut dilatancije određen kao kut trenja materijala minus  $30^\circ$ , što je preporuka Plaxisa (2016) za definiranje kut dilatancije. Rezultati ovih numeričkih analiza pokazali su da su razlike između sila izvlačenja koje su određene eksperimentalno i sila izvlačenja određenih numerički manje od 7%

## 8 ZAKLJUČAK

Armirano tlo predstavlja kompozitni materijal koji se sastoji od tla i elemenata armature. Razvoj geosintetika u posljednjih 40 godina omogućio je široku primjenu armiranog tla prilikom izgradnje objekata poput nasipa, ojačanja temeljnog tla, sanacije kosina ili izgradnje potpornih zidova. Kod izgradnje konstrukcija od armiranog tla, nekoherentni ili rjeđe koherentni materijali, predstavljaju ispunu objekta koja u biti ne posjeduje vlačnu čvrstoću, dok armatura kao element ojačanja, zbog svoje značajno veće krutosti prilikom interakcije s tlom, na sebe preuzima vlačna naprezanja i na taj način povećava čvrstoću tla. Osnovno je dakle polazište pritom da stabilnost kao i deformacije konstrukcija ovise o interakciji između tla i elemenata armature. Suvremena praksa u projektiranju konstrukcija od armiranog tla oslanja se na odabir empirijskih parametara kojima se u proračunu modelira interakcija tla i elemenata armature, pri čemu se različit stupanj interakcije iskazuje kroz koeficijent interakcije koji se određuje laboratorijskim ispitivanjem izvlačenja armature iz tla ili pokusom izravnog smicanja. Mehanizam interakcije između armaturnog elementa i tla ovisi o vrsti i karakteristikama armature te o karakteristikama tla. Većina dosadašnjih istraživanja bila je usmjerena na određivanje koeficijenta interakcije između tla i geotekstila, geomreža i metalnih traka, dok je vrlo mali broj ispitivanja proveden za određivanje koeficijenta interakcije između geosintetičke trake i tla. Ispitivanja koja su pritom provedena u određivanju koeficijenata interakcije između geosintetičke trake i tla provedena su za slučaj kada je materijal ispune pijesak ili šljunak čime se, kako se pretpostavlja, podcjenjuju koeficijenti interakcije između trake i lomljenog kamena. Temeljem navedenog, osnovni cilj ovog rada je bio određivanje koeficijenata interakcije između geosintetičke trake i lomljenog kamena, a koji bi se mogao koristiti u projektiranju zidova od armiranog tla te dodatno utvrđivanje utjecaja granulometrijskog sastava na koeficijent interakcije. Kako bi se to postiglo, istraživanja su provedena za jednoliko graduirani materijal s rasponom frakcija 30 do 60 mm, dobro graduirani materijal s rasponom frakcija 4 do 60 mm i dobro graduirani materijal s rasponom frakcija od 0 do 60 mm.

Hipoteze koje su pritom postavljene bile su da je koeficijent interakcije geosintetičke trake i lomljenog kamena veći od koeficijenata interakcije koji su određeni za pijesak i šljunak te da on ovisi o vertikalnom naprezanju i granulometrijskom sastavu (karakteristikama) lomljenog kamena. Također pretpostavljeno je da koeficijent nejednoličnosti materijala znatno utječe na koeficijente interakcije te da postoji značajan utjecaj dilatancije i bočnog trenja na koeficijent

interakcije. Kako bi se potvrdile pretpostavljene hipoteze provedeno istraživanje uključivalo je tri glavna segmenta :

- određivanje kuta trenja i kuta dilatancije lomljenog kamena pokusom izravnog smicanja
- određivanje koeficijenta interakcije i utjecaja bočnog trenja na koeficijent interakcije ispitivanjem izvlačenja armature iz tla
- te numeričku simulaciju pokusa izvlačenja.

Na temelju analize rezultata provedenih ispitivanja lomljenog kamena pokusom izravnog smicanja zaključeno je kao prvo da se sekantnim kutovima trenja najbolje opisuje ponašanje materijala te je preporuka da se ti kutovi trenja koriste u daljnjim analizama. Ispitivanjem se dobilo da su najveći sekantni kutovi trenja određeni za jednoliko graduirani materijal s rasponom frakcija od 16 do 31,5 mm dok su najmanji sekantni kutovi trenja određeni za dobro graduirani materijal s rasponom frakcija od 0 do 31,5. Ispitivanja su također pokazala da sekantni kut trenja pada s porastom vertikalnog naprezanja te da je taj pad izraženiji za dobro graduirani materijal C16/31,5. Uz sekantne kutove trenja određeni su i kutovi dilatancije za koje je uočen jednak trend kao kod sekantnog kuta trenja, a to je da su najveći kutovi dilatancije određeni za jednoliko graduirani materijal pri najmanjem vertikalnom naprezanju, dok su najmanji kutovi dilatancije određeni za dobro graduirani materijal C0/60 kod 215 kPa.

Kod ispitivanja izvlačenja armature iz tla, odnosno kamene ispune, koeficijenti interakcije su najveći za dobro graduirani materijal (C0/60), dok su najmanji za jednoliko graduirani materijal (A30/60). Usporedba koeficijenata interakcije geosintetičke trake i lomljenog kamena s podacima dostupnima iz literature pokazala je da su koeficijenti interakcije određeni u jednoliko graduiranom materijalu manji od koeficijenata interakcije određenih u pijesku i šljunku. S druge strane za dobro graduirani lomljeni kamen B4/60 i C0/60 dobiveni su koeficijenti interakcije veći od onih koji su određeni za pijesak i šljunak. Veći koeficijent interakcije može se objasniti većim brojem zrna koja su u kontaktu s trakom, što je samim time i veća interakcija između tla i trake. Također kod dobro graduiranog materijala postigla se znatno veća gustoća nego kod jednoliko graduiranog materijala pa je pretpostavka da je bočno trenje, te povećanje naprezanja uz traku uslijed sprječene dilatancije, znatno izraženije kod dobro graduiranog materijala. Utjecaj bočnog trenja na silu izvlačenja promatran je u ispitivanjima s dvije spojene trake i dvije trake na razmaku od 20 cm. Rezultati ispitivanja pokazali su da je doprinos bočnog trenja u ukupnoj nosivosti trake (otporu izvlačenja) oko 16%.

Prema tome su rezultati ispitivanja pokazali da je koeficijent interakcije najveći kod ispitivanja dvije odvojene trake. Usporedbom koeficijenata interakcije za jednu traku, dvije spojene i dvije odvojene trake određeno je da je koeficijent interakcije određen za dvije odvojene trake veći za 11,6% u odnosu na koeficijent interakcije određen za jednu traku i 20% veći od koeficijenta određenog za dvije spojene trake. Rezultati ovih ispitivanja pokazali su da efekt bočnog trenja doprinosi povećanju koeficijenta interakcije. Još je i dokazano da je taj efekt izraženiji kod uskih traka u odnosu na šire trake (dvije spojene trake).

U pogledu utjecaja normalnog napreznja, rezultati ovih istraživanja potvrdili su rezultate istraživanja iz literature, a to je da koeficijent interakcije s porastom normalnog napreznja pada. Taj pad koeficijenta interakcije izraženiji je kod dobro graduiranih materijala u odnosu na jednoliko graduirani materijal.

Uz koeficijent interakcije promatralo se i deformacije trake po duljini. Uočeno je da se u jednoliko graduiranom materijalu traka ponaša kao kruta traka što pokazuje krivulja pomaka početka i kraja trake koja je gotovo linearna. Kod dobro graduiranog materijala dolazi do istežanja trake što se očituje krivuljama pomaka početka i kraja trake gdje se vidi da pomak kraja trake znatno zaostaje za početkom trake. Također je uočeno da efekt istežanja trake raste s porastom normalnog napreznja i koeficijenta nejednoličnosti materijala. Iz toga se može zaključiti da je efekt uklještenja trake znatno izraženiji kod dobro graduiranog materijala.

Uz laboratorijska ispitivanja mehanizma interakcije armaturnih elemenata i tla provedena je i povratna analiza programom Plaxis 2D. U programu je tlo modelirano MC modelom, dok je traka modelirana kao linijski element s aksijalnom krutošću, ali bez krutosti na savijanje. Parametri materijala korišteni u povratnim analizama određeni su laboratorijskim ispitivanjem izravnog smicanja, parametri trake određeni su na temelju ispitivanja vlačne čvrstoće, a parametri kontakta trake i tla određeni su na temelju laboratorijskih ispitivanja izvlačenja trake iz tla. Pritom je u numeričkom modelu potrebno definirati kontaktne elemente između trake i tla, a to se može postići na način da se definira kontaktni element preko parametra  $R_{int}$ , kojim se mogu definirati parametri čvrstoće kontaktnog elementa koji mogu biti manji ili jednaki parametrima tla. Druga metoda definiranja kontaktnog elementa je da se kontaktnom elementu dodijele posebni parametri materijala. Numerička analiza je pokazala da se za oba načina definiranja parametra kontaktnog elementa dobiju isti rezultati te da je svejedno koja se metoda koristi. U numeričkim analizama uspoređena je sila izvlačenja određena numerički sa silom izvlačenja koja je dobivena eksperimentalno. Za materijal A30/60 dobivena je veća sila

izvlačenja, dok je za materijal C0/60 dobivena manja sila izvlačenja. Ovi rezultati pokazuju da su parametri materijala precijenjeni za materijal A30/60 dok su za materijal C0/60 parametri na kontaktu podcijenjeni. Analize u kojima su za cijeli sloj tla definirani parametri čvrstoće koji odgovaraju parametrima kontaktnog elementa pokazali su najbolje slaganje između numeričke analize i eksperimentalnih ispitivanja, razlika u sili izvlačenja je bila manja od 10%.

Uz analizu sile izvlačenja provedena je i analiza deformacije trake u pokusu izvlačenja. Rezultati ove analize pokazali su da je u 2D modelu potrebno povećati krutost trake, zato jer model pretpostavlja da je traka kontinuirana u smjeru okomitom na poprečni presjek. Rezultati provedenih analiza pokazali su da se programom Plaxis 2D s jednostavnim MC modelom tla i definiranjem trake kao linijskog elementa može dobro simulirati pokus izvlačenja trake iz tla.

Ključni rezultati ovog rada mogu se podijeliti na četiri glavna dijela. Prvo je unapređenje uređaja za izravno smicanje za potrebe određivanja parametra čvrstoće lomljenog kamena. Izradom veće kutije uređaja i razvojem programa kojim se prati provedba pokusa omogućena je provedba ispitivanja na lomljenom kamenu s većim promjerom zrna i pri većim normalnim naprezanjima.

Drugo je određivanje koeficijenta interakcije između lomljenog kamena i geosintetičke trake. Ispitivanjima je utvrđeno da je koeficijent interakcije lomljenog kamena i geosintetičke trake znatno veći od onog koji se koristi u praksi, a također je utvrđeno da on znatno ovisi o granulometrijskom sastavu materijala i koeficijentu nejednoličnosti.

Treće, ispitivanjem je utvrđeno da je doprinos bočnog trenja u ukupnoj nosivosti trake oko 16%. Četvrti segment rada odnosi se na provedbu numeričkih analiza izvlačenja trake u programu Plaxis 2D. Povratnim analizama je pokazano da se primjenom jednostavnog MC modela tla i definiranja trake kao linearnog modela može simulirati pokus izvlačenja i to i za slučajeve kada se definirana kontaktni element i bez definiranja kontaktnog elementa. Numeričkim analizama je utvrđeno da je kod modeliranja u 2D numeričkom modelu potrebno definirati znatno veću aksijalnu krutost trake s obzirom na stvarni trodimenzionalni efekt prilikom ispitivanja, a to može biti i smjernica za numeričku analizu deformacija konstrukcija od armiranog tla.

Što se tiče preporuka za daljnja istraživanja može se istaknuti slijedeće.

Kod pokusa izravnog smicanja bilo bi dobro da se istraži utjecaj vertikalnog razmaka između kutija na rezultate ispitivanja, pretpostavka je da će se kod manjeg razmaka kutija dobiti veći kutovi unutarnjeg trenja i dilatancije za dobro graduirani materijal, dok bi kod jednoliko



graduiranog materijala taj utjecaj trebao biti manji. Također preporuka je da se istraži i utjecaj brzine smicanja na rezultate ispitivanja. Kod pokusa izvlačenja trake iz tla bilo bi dobro da se ispitivanja izvlačenja s dvije spojene trake i dvije odvojene trake provedu i za druge materijale (jednoliko graduirani lomljeni kamen) te da se provedu kod većih vertikalnih naprezanja, da se odredi kod kojeg vertikalnog naprezanja nestaje utjecaj dodatnog bočnog trenja na koeficijente interakcije. Također je preporuka da se ispitivanja s dvije odvojene trake provedu kod različitih razmaka traka te da se pokuša odrediti zona materijala koja se mobilizira pri izvlačenju materijala iz kutije. Što se tiče poboljšanja numeričkog modela za simulaciju pokusa izvlačenja preporuka je da se analiza provode u 3D programu, osobito za simulaciju izvlačenja dvije trake. Ovim analizama mogla bi se odrediti zona materijala koja se mobilizira između traka prilikom njihovog izvlačenja. Za moguće preciznije rezultate numeričke analize, preporuka je da se simulacija pokusa izvede u numeričkom programu koji se temelji na metodi diskretnih elemenata, na taj način bi možda bilo moguće odrediti utjecaj granulometrije i oblika zrna na bočno trenje koje se javlja kod traka, što u programu Plaxis 2D nije moguće.

## 9 LITERATURA

AASHTO (2002): Standard specification for highway bridges, 17<sup>th</sup> Ed. Washington, D.C.

Abbas, S.M. (2003): Testing and Modeling the Behaviour of Riverbed and Quarried Rockfill Materials. Ph.D. Thesis, I.I.T., Delhi.

Abdelouhab, A., Dias, D., Freitag, N., Bennani, Y. (2008): Pull-out tests analytical modelling to deduce the constitutive soil. EuroGeo4, Edinburgh, United Kingdom, 7-10 September 2008.

Abdelouhab A., Dias D., Freitag N. (2009): Pull-out behaviour of geosynthetic strip reinforcements in coarse fill physical and analytical modelling. GIGSA GeoAfrica 2009 Conference 2 - 5 September 2009, 1-9. Cape Town.

Abdelouhab, A. (2010): Comportement des murs en terre armee. Modelisation physique, analytique et numerique des reinforcements extensible. These. L'institut national des sciences appliquees de Lyon, 196 str., Lyon.

Abdelouhab, A., Dias, D., Freitag, N. (2010). Pull-out behaviour of geosynthetic strip reinforcement in gravel – developement of new reinforcement type. 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010, str 645-648.

Abdelouhab, A., Dias, D., Freitag, N. (2010a). Physical and analytical modelling of geosynthetic strip pull-out behaviour. Geotextiles and Geomembranes 28, str. 44-53

Abdi, M.R., Arjomand, M.A. (2011): Pullout tests conducted on clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layer of sand. Geotextiles and Geomembranes 29, str 585-595

Abdi, M.R., Zandieh, A.R. (2014): Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material. Geotextile and Geomembranes 42, str. 494-504.

Abramanto, M. (1993): Analysis and measurement of stresses in planar soil reinforcements. PhD. Thesis. *Massachusetts Institute of Technology, USA.*

Abramento, M., Whittle, A. J. (1995): Experimental evaluation of pullout analysis for planar reinforcement. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 121(6), pp. 486-492

Alfaro, M.C., Hayashi, S., Miura, N., Watanabe, K. (1995): Pullout interaction mechanism of geogrid strip reinforcement. *Geosynthetic International*, Vol. 2, No. 4, str. 679 – 698.

Anagnosti, P. and Popovic, M. (1982): Evaluation of shear strength for coarse-grained granular materials. *Fourteenth Congress on Large Dams, Rio de Janeiro, ICOLD*. Vol. Q55 str. 753-767

ASTM D 3080-03 (2003): Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. ASTM International

ASTM D 6706-01 (2007): Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil. ASTM International

Bacot, J., Itlis, M., Lareal, P., Paumier, T., Sanglert, G. (1978): Study of the Soil Reinforcement Friction Coefficient. *Proc. Symposium on Earth Reinforcement, ASCE, Pittsburgh*, str. 157-185

Bakeer, R.M., Sayed, M.S., Cates, P. (1998): Pullout and shear tests on geogrid reinforced lightweight aggregate. *Geotextiles and Geomembranes 16 (1998)*, str.119-133

Bassett, R.H. & Last, H.C. (1978): Reinforced earth below footings and embankments, *Symposium on Earth Reinforcement, ASCE*, str. 202-231., Pittsburgh.

Bishop, A.W. (1954): Correspondence on “Characteristics of saturated silt, measures in triaxial compression”, *Geotechnique 4*, str. 43-45

Berg, R.R., Christopher, B.R., Samtani, N. C. (2009): Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, Report No. FHWA-NHI-10-024, str. 332

Bergado, D. T., Chai, J.C. (1994): Pullout/Force displacement Relationship of Extensible Grid Reinforcements. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 1., str. 295 -316.

Bergado, D.T., Teerawattanasuk, C. (2001): Analytical Models for Predicting the Pullout Capacity and Interaction Between Hexagonal Wire Mesh and Silty Sand Backfill. *Tamakang Journal of Science and Engineering*, Vol. 4. No. 4, str. 227-238

Bertacchi, P. and Bellotti, R. (1970): Experimental research on materials for rockfill dams. *Tenth Congress on Large Dams*, Montreal, ICOLD. Vol. Q36 str. 511-529

Bonaparte, R. & Berg, R. (1987): Long Term Allowable Tension for Geosynthetic Reinforcement. Proc. Geosynthetics '87, New Orleans, LA, IFAI Publication, 181-192, LA.

Bourdeau, Y., Kastner, R., Bollo-Kamara, N., Bahloul, F., 1990. Comportement en ancrage d'un géosynthétique enfoui dans un matériau bidimensionnel. 5<sup>e</sup>me colloque Franco-Polonais de Mécanique des sols Appliquée, 4-7 septembre.

BS 1377-7:1990 (1990): Methods of test for soils for civil engineering purposes. Shear strength tests.

BS 13738:2004 (2004): Geotextiles and geotextile-related products. Determination of pullout resistance in soil.

BS 8006-1 2010. (2010): Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. BSI Standard Publication, 260 str.

Cassagrande, A. (1938): The shearing resistance of soils and its relation to the stability of earth dams. Proceedings of the Soils and Foundation Conference of the US Engineer Department.

Cassagrande, A. (1940): Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills. Contributions to Soil Mechanics, 1925-1940, Boston Society of Civil Engineers.

Clayton, C.R.I., Woods, R.I., Bond, A.J. Milititsky, J. (2013): Earth Pressure and Earth-retaining Structures. Third Edition. Taylor & Francis Group, 608 str., Boca Raton.

Chang, J.C., Hannon, J.B., Forsyth, R.A. (1977): Pull Resistance and Interaction of Earthwork Reinforcement and Soil. Transportation Research Board 56<sup>th</sup> Annual Meeting 10.

Chang, D.T.T., Chang, F.C., Yang, G.S., Yan, C.Y. (2000): The influence factors study for geogrid pullout test. Grips, Clamps, Clamping Techniques, and Strain Measurement for Testing of Geosynthetics. *ASTM STP 1379. American Society for Testing and Materials*, pp. 129 – 142

Christopher, B.R., Gill, S:A., Giroud, J.P., Juran, I., Mitchell, J.K., Schlosser, F., Dunnclif, J. (1990): Reinforced soil structures Volume I. Design and construction guidelines. Federal Highway Administration, Washington DC.

Cuelho, E.V. (1998): Determination of Geosynthetic Constitutive Parameters and Soil/Geosynthetic Interaction by In-Air and In-Soil Experiments. A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science.

Douglas, K.J. (2002): The shear strength of rock masses. Doktorski rad. School of Civil and Environmental Engineering. The University of New South Wales, Sydney, Australia

Dyer, M.R. (1985). Observation of the stress distribution in crushed glass with applications to soil reinforcement. *PhD. Thesis, University of Oxford, UK*

Esfandiari, J., Selmat, M.R. (2012): Laboratory investigation on the effect of transverse member on pull out capacity of metal strip reinforcement in sand. *Geotextile and Geomembranes* 35, str. 41-49

Fannini R.J. & Raju D.M. (1993): On the pull-out resistance of geosynthetics. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 30, No. 3, str 409-417

Farrag, K. (1991): Pull-out testing facility for geosynthetics. LTRC Project No. 87-1GT, Louisiana Transportation Research Center, U.S. Departement of Transportation, Federal Highway Administration.

Farrag, K., Morvant, M. (2000): Effect of clamping mechanism on pullout and confined extension tests. *ASTM STP1379-EB Grips, Clampyng Techniques and Strain Measurement for Testing of Geosynthetics*, str. 89 – 96

FHWA-NHI-10-024 (2009): Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soils Slope – Volume I. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, str. 332

Gurung, N., Iwao, Y., Madhav, M.R., (1999): Pullout test model for extensible reinforcement. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 23, str. 1337–1348

Gupta, A.K. (2000): Constitutive Modeling of Rockfill Materials. Ph.D Thesis, I.I.T. Delhi

Hausmann, M.R. (1976): Strength of reinforced soil. *Australian Road Research Board*, Session 13 (8), str. 1-8.

Honkavandar, N.P. (2010): Testing and Modeling the Behaviour of Modeled and Prototype Rockfill Materials. Ph.D. Thesis, I.I.T. Delhi

Honkavandar, N.P., Gupta, S.L., Ratnam, M. (2012): Effect of particle size and confining pressure on shear strength parameters of rockfill materials. *International Journal of Advances in Civil Engineering and Architecture* 1(1), str. 49-63

Hsieh, C.W., Chen, G.H., Wu, J.H. (2011): The shear behaviour obtained from direct shear and pullout test from different poor graded soil-geosynthetic systems. *Journal of GeoEngineering* vol. 6 (1), str. 15-26

Indraratna, B., Wijewardena, L.S.S. and Balasubramaniam, A.S. (1993): Large-scale triaxial testing of greywacke rockfill. *Geotechnique*, 43 (1), pp. 37-51

Ingold, T.S. (1983): Laboratory Pull-out Testing of Grid Reinforcement in Sand. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 6, No. 3, pp. 101-111.

John, N. W. M., Ritson, R., Johnson, P. B., and Petley, D. J. (1983): Instrumentation of reinforced soil walls, *Proceedings, 8th ECSMFE*, 2, str. 509-512. Helsinki.

Johnston, R.S., Romstad, K.M., (1989): Dilation and boundary effects in large scale pull-out tests, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio De Janeiro, Brasil, str. 1263-1266.

Jones, C.J.F.P. (1985): *Earth Reinforcement and Soil Structures*. University of Newcastle upon Tyne, UK: Butterworth-Heinemann., 210 str.

Juran I., Chen C.L. (1988): Soil-Geotextile Pull-Out Interaction Properties: Testing and Interpretation. *Comitee on Soil and Rock properties, Transportation Research record 1188*, pp. 37-47

Kharchafi, M., Dysli, M. (1993): Study of Soil-Geotextile Interaction by an X-Ray Method. *Geotextiles and Geomembranes*, str. 307-325

Khedkar, M.S., Mandal, J.N. (2009): Pullout behaviour of cellular reinforcements. *Geotextiles and Geomembranes* 27 (4), str. 262–271.

Kim, D., Ha, S. (2014): Effects of Particle Size on the Shear Behaviour of Coarse Grained Soils Reinforced with Geogrids. *Materials* (7), str. 963-979

Konami, T., Imaizumi, S., Takahashi, S. (1997): Elastic Consideration of Field Pull-out Tests of Polymer Strip. *Earth Reinforcement*, ur. Ochiai, H., Yaufuku, N. Omine, K. Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement, Vol I, Fukuoka, Kyushu, Japan, str. 57-62

Koerner, R.M., Soong, T.Y., (2001): Geosynthetic reinforced segmental retaining walls. *Geotextiles and Geomembranes* 19 (6), str. 359–386

Kvasnička, P. (1979): *Armirano tlo*. Magistarski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

Kvasnička, P. (2009): *Suvremeni načini gradnje željezničkih nasipa i usjeka*. U: Lakušić, S. (ur): *Gospodarenje prometnom infrastrukturom*, Sveučilište u Zagrebu, 529 – 563, Zagreb.

Kvasnička, P., Domitrović, D. (2007): *Mehanika tla – interna skripta*. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Larèal, P. & Bacot, J. (1973): *Etude sur modèles réduits bidimensionnels da la rupture de massifs en terre armée*, Travaux, No.463.

---

Lawson, W., Jayawickrama, P., Wood, T., Surles, J. (2013): Pullout Resistance Factors for Steel Reinforcements Used in TxDOT MSE Walls. Geo-Congress 2013. ASCE, str. 44-53.

Le, K. L., Seed, H.B. (1967): Drained Strength Characteristics of Sand. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, 93 (6), str. 117-141.

Lee, H.S., Bobet, A. (2005): Laboratory Evaluation of Pullout Capacity of Reinforced Silty Sands in Drained and Undrained Conditions. *Geotechnical Testing Journal*, 28(4), str. 370-379

Leshchinsky, D. (2009): On global equilibrium in design of geosynthetic reinforced walls. *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg* 135, str309.

Ling, H.I., Wu, J.T.H., Tatsuoka, F.(1992): Short-term strength and deformation characteristics of Geotextiles under typical operational conditions. *Geotextiles and Geomembranes* 11 (2), str. 185–219.

Ling, H.I., Liu, H., Mohri, Y., 2005. Parametric studies on the behavior of reinforced soil retaining walls under earthquake loading. *Journal of Engineering Mechanics* 131, str. 1056 - 1065.

Liu, J., Wang, P., Liu, J. (2014): Macro and micro mechanical characteristics of crushed rock aggregate subjected to direct shearing. *Transportation Geotechnics*

Leps, T.M. (1970): Review of shearing strength of rockfill. *A. S. C. E., Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96 (SM4), pp. 1159–1170.

Lo, S.C.R. (1998): Pull-out resistance of polyester straps at low overburden stress. *Geosynthetics International* 5(4), str. 361-382

Lopes, M.L. & Ladeira, M. (1996): Role of specimen geometry, soil height and sleeve length on the pull-out behaviour of geogrids. *Geosynthetics International* 3 (6), str. 701 – 719

Lopes, M.J. & Lopes M.L. (1999): Soil-Geosynthetic Interaction Influence of Soil Particle Size and Geosynthetic Structure. *Geosynthetics international*, 1999. Vol. 6, No. 4, pp. 261-282



- Madhav, M.R., Gurung, N., Iwao, Y. (1998): A Theoretical Model for the Pull-out Response of Geosynthetic Reinforcement. *Geosynthetics International*, Vol. 5, No 4. str. 339-424.
- Marachi, N.D., Chan, C.K., Seed, H.B. and Duncan, J.M. (1969) *Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials*. TE-69-5, Department of Civil Engineering, University of California.
- Marshal, R.J. (1973) Mechanical properties of rockfill. In *Embankment Dam Engineering J*. Willey & Sons, N.Y.,, str. 109-201
- Marshal, R.J. (1967): Large Scale Testing of Rockfill Materials, *J. of Soil Mech. And Foundations Division, ASCE*, 93(2), str. 27-43
- Mckittrick, D. (1978): Design, Construction, Technology and Performance of Reinforced Earth Structures, Proc. Symposium on Earth Reinforcement, ASCE, Pittsburgh, str. 596-617.
- McGown, A., Andrews, K.Z., Al-Hasani, M.M. (1978): Effect of Inclusion Properties on the Behaviour of Sand. *Geotechnique*, 28(3), 327-346.
- Meyer, N., Nernheim, A., Emersleben, A. (2003): Influence of confining pressure, soil density and types of geogrids on Soil-Geogrid interaction coefficient. Intenational e-Conference "Modern Trends in Foundation Engineering: Geotechnical Challenges and Solutions", IITM, India
- Min Y., Leschinsky D., Ling H.J., Kaliakin V.N. (1995): Effects of Sustained and Repeated Tensile Loads on Geogrid Embedded in Sand. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 18, No. 2, str. 204-225
- Minažek, K. (2010): modelsko ispitivanje interakcije geomreže i tla. Doktorski rad. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet. Zagreb, 2010.
- Minažek, K., Mulabdić, M. (2013): Pregled ispitivanja interakcije tla I armature u armiranom tlu pokusom izvlačenja. *Građevinar* 65 (3), str. 235-250
- Moraci, N. & Giofrè, D. (2006): A simple method to evaluate the pullout resistance of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil. *Geotextiles and Geomembranes* 24 (2), str. 116-128.

Moraci, N., Recalcati, P., (2006): Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in compacted granular soil. *Geotextiles and Geomembranes* 24, 220-242.

Moraci, N., Cardile, G., Pisano, M., Carrubba, P. (2016): Geosynthetics Interface Properties under Static, Cyclic or Dynamic Loads. 6<sup>th</sup> European Geosynthetics Congress. 25 – 28 September, Ljubljana, Slovenia str. 108 -172

Mosallanezhad, M., Tagvahi, S.H., Hataf, N., Alfaro, M.C. (2016): Experimental and numerical studies of the performance of the new reinforcement system under pull-out conditions. *Geotextile and Geomembranes* 44, str. 70-80

Nicks, J. (2013): Friction Angles of Open-Graded Aggregates From Large – Scale Direct Shear Testing. FHWA-HRT-13-068.

NF P 94-220 (1992): French Standard. Soil Reinforcement: Backfilled structures with inextensible and flexible reinforcing strips or sheets

Nonveiller, E. (1979): *Mehanika tla i temeljenje građevina*. Školska knjiga, Zagreb

Nonveiller, E. (1983): *Nasute brane – projektiranje i građenje*. Školska knjiga, Zagreb

Ochiai, H., Otani, J., Hayasic, S., Hirai, T. (1996): The Pull-out Resistance of Geogrids in Reinforced Soil. *Geotextiles and Geomembranes* 14, str. 19-42.

Palmeira, E.M. (1987): *The study of Soil-Reinforcement Interaction by Means of Large Scale Laboratory tests*. Doktorski rad. Magdalen College, University of Oxford, Oxford.

Palmeira E.M. (2004). Bearing force mobilisation in pull-out tests on geogrids. *Geotextiles and Geomembranes* Vol 22. pp. 481-509.

Palmeira, E.M. (2008): Soil-geosynthetic interaction: modelling and analysis (*Mercer lecture 2007-2008*). *Proceedings of The 4th European Geosynthetics Conference Edinburgh Conference Centre, HeriotWatt University, Scotland 7th September to 10th September 2008*

- Palmeira, E.M., (2009): Soil–geosynthetic interaction: Modelling and analysis. *Geotextiles and Geomembranes* 27, str. 368-390
- Palmeira, E.M., Milligan, G.W.E., (1989): Scale and other factors affening the results of pullout tests of grid buried in sand. *Geotechnique* 39 (3), 511-524.
- Penman, A.D.M., Charles, J.A. and Humphreys, J.D. (1982): Sandstone rockfill in two dams. Fourteenth Congres on Large Dams, Rio de Janeiro, ICOLD. Vol. Q55 pp. 279-291
- Perkins, S.W., Edens M.Q. (2003): Finite-element modelling of geosynthetic pullout test. *Geotechnical and Geological Engineering* 21, str. 357-375.
- Petzel, M. (1992): Razvoj i ispitivanje uređaja za smicanje na primjeni srednje čvrstih stijena. Magistarski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- Pokharel G. (1995): Deformation and ultimate load of reinforced soil structures, Theory and Experiment. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Engineering. Civil Engineering Special Program, Department of Civil Engineering Nagoya University Japan, 167 str., Nagoya.
- Racana, N., Grédiac, M., Gourvès, R., (2003): Pull-out response of corrugated geotextile strips. *Geotextiles and Geomembranes*, 21, str. 265-288.
- Rak, M. (2006): Izvješće o ispitivanju čvrstoće Polietilenskih traka s poliesterskim vlaknima (Paraweb) tvrtke Linear Composites. Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- Reynolds, O (1885): On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact. *Philosophical Magazine Series* 5, 20(127), str. 469-481.
- Romstad, K. M., Al-Yassin, Z., Herrman, L. R., and Shen, C. K. (1978): Stability analysis of Reinforced Earth retaining structures. *Symposium on Earth Reinforcement*, ASCE, str. 685-713, Pittsburgh

Rowe, P.W. (1962): The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 269 (1339), str. 500-527

Salatić, R. (2016): Metoda konačnih elemenata, predavanje

URL:

[https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=13&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj50qXb-YXUAhUDlxQKHWc4CJIQFghTMAw&url=http%3A%2F%2Fwww.grf.bg.ac.rs%2Fp%2Flearning%2Fpredavanja\\_sk\\_04\\_05\\_1457261603604.ppsx&usg=AFQjCNG1vMCCII4OvQ8lF7rhJBH9KRvC2A](https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=13&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj50qXb-YXUAhUDlxQKHWc4CJIQFghTMAw&url=http%3A%2F%2Fwww.grf.bg.ac.rs%2Fp%2Flearning%2Fpredavanja_sk_04_05_1457261603604.ppsx&usg=AFQjCNG1vMCCII4OvQ8lF7rhJBH9KRvC2A)

Saran, S. (2010): Reinforced Soil and its Engineering Applications. Second Edition. I.K. International Publishing House Pvt. Ltd. 440 str., New Delhi.

Schlosser, F. & Elias, V. (1978): Friction in Reinforced Earth, Symposium on Earth Reinforcement, A.S.C.E. Pittsburgh, April 24-28., str. 735 – 763.

Schlosser, F., Guilloux, A., 1981. Le frottement dans le renforcement des sols", Revue française de géotechnique, 16, 65-77.

Schlosser, F., Bastick, M. (1991). Reinforced Earth. U: Fang, H-Y. (ur.): Foundation Engineering Handbook Second Edition: Reinforced Earth. Springer Science + Business Media 778 – 795, New York.

Shuwang, Y., Shouzhong, F., Barr, B. (1998). Finite-element modelling of soil-geogrid interaction dealing with the pullout behaviour of geogrids. *Acta Mechanica Sinica (English Series)*, Vol. 14, No.4. Chinese Journal of Mechanics Press, Beijing, China, pp. 371-382.

Segrestin, P., Bastick, M., (1996): Comparative Study and Measurement of Pull-out Capacity of Extensible and Inextensible Reinforcement. Ed (Ochia). Earth Reinforcement. Balkema, Rotterdam, pp. 81-87

Sieira, A.C.C.F., Gersovich, D.M.S., Sayao, A.S.F.J. (2009): Displacement load transfer mechanisms of geogrids under pullout condition. *Geotextiles and Geomembranes* 27, str. 241-253.

Simoni, A., Houlsby, G.T. (2006): The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering* 24, str. 523-549

Sobhi, S., Wu, J.T.H., (1996): An interface pullout formula for extensible sheet reinforcement. *Geosynthetics International Journal* 3 (5), str. 565–582.

Sokolić, I., Szavits-Nossan. (2011): Suvremeni pristup numeričkom modeliranju sidrenih zaštitnih konstrukcija. *Građevinar* 63 9/10, str 847-857

Studelein, A.W., Walters, J.J., Strahler, A.W. (2014): Characterization of frictional interference in closely-spaced reinforcement in MSE walls. Final project report. USDOT University Transportation Center for Federal Region 10, University of Washington, 120 str. Seattle

Su, L.J., Chan, T.C.F., Yin, J.H., Shiu, Y.K., Chiu, S.L., (2008): Influence of Overburden Pressure on Soil–Nail Pullout: Resistance in a Compacted Fill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental. Engineering* 134, 1339.

Sukmak, K., Sukmak, P., Horpibulsuk, S., Han, J., Shen, S-L., Arulrajah, A. (2015): Effect of fine content on the pullout resistance mechanism of bearing reinforcement embedded in cohesive frictional soils. *Geotextile and Geomembranes* 43, str. 107-117

Sukmak, K. Han, J. Sukmak, P., Horpibulsuk (2016): Numerical parametric study on behaviour of bearing reinforcement earth walls with different backfill material properties. *Geosynthetics International*

Tehnickal Comitee CEN/TC 189 (2004). EN 13738: Geotextiles and geotextile-related products Determination of pullout resistance in soil. European committee for standardization, Tehnickal Comitee CEN/TC 189, Brussels, Belgium

Varadarajan, A., Sharma, K.G., Venkatachalam, K., Gupta, A.K. (1997): Constitutive Modeling of Rockfill Material Using HISS model. *Proc. IGC-97, Vadadara, Vol 1*, str 153-156.

Varadarajan, A., Sharma, K.G., Venkatachalam, K., Gupta, A.K. (2003): Testing and Modeling Two Rockfill Materials. *J. Geotech. And Geoenv. Eng., ASCE*, 129(3), str. 206-218.

Vardarajan, A., Sharma, K.G., Abbas, S.M. (2006): Constitutive Model for Rockfill Materials and Determination of Material Constants. *International Journal of Geomechanis, ASCE*, str. 226-237.

Venkatachalam, K. (1993): Prediction of Mechanical Behaviour of Rockfill Materials. PhD Thesis, I.I.T. Delhi

Wang, J.J., Zhang, H.P., Tang, S.C., Liang, Y. (2013): Effects of Particle Size Distribution on Shear Strength of Accumulation Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139 (11)

Weldu, M.T. (2015): Pullout resistance of MSE Wall Steel Strip Reinforcement in Uniform Aggregate. Master, Faculty of the University of Kansas, Departement of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, str. 66.

Won, M.S., Kim, Y.S., (2007): Internal deformation behavior of geosynthetic-reinforced soil walls. *Geotextiles and Geomembranes* 25 (1), str10–22

Xiao, Y., Liu, H., Zhang, W., Liu, H., Yin, F., Wang, Y. (2016): Testing and modelling of rockfill materials: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8, str.415-422

Xu, G-L., Ochiai, H., Yasufuku, N., Omine H., Yamaji, T. (1995): Estimation of pullout resistance of soil reinforced geogrids. *Memoirs of the faculty of Engineering, Kyusu University, Vol. 55, No. 4., str. 443-451*

Yang, Z. (1972): Strength and deformation characteristics of reinforced sand. Doktorska disertacija, University of California, LA

Yako, M.A., Christopher, B.R. (1988): Polymerically Reinforced Retaining Walls and Slopes in North America. In: Jarrett, P.M., McGown, A. (Eds.), *The Application of Polymeric Reinforcement in Soil Retaining Structures*. Kluwer Academic Publishers, Dordicht, str. 239–283.

Yoo, C. & Kim, S.B., (2008): Performance of a two-tier geosynthetic reinforced segmental retaining wall under a surcharge load: Full-scale load test and 3D finite element analysis. *Geotextiles and Geomembranes* 26 (6), str. 460–472.

Yoo, C., Jung, H.Y. (2006): Case History of Geosynthetic Reinforced Segmental Retaining Wall Failure. *Jurnal of Geotechnical and Geoenvironmental. Engineering* 132, str. 1538-1548

Yuan Z., Chua K.M. (1991). Numerical Evaluation of the Pullout Box Method for Studying Soil Reinforcement Interaction. *Transportation research record 1278, Transportation Research Board, Washington, D.C., str. 116-124*

Zevgolis, I., Bourdeau, P.L. (2007): Mechanically Stabilized Earth Wall Abutments for Bridge Support. Joint transportation research program, Final Report. FHWA/IN/JTRP-2006/38, str. 146

.

## POPIS SLIKA

Slika 2-1 Glavni dijelovi konstrukcija od armiranog tla ( <a href="http://www.terre-armee.com/ta/wterrearmee_en.nsf">http://www.terre-armee.com/ta/wterrearmee_en.nsf</a> ) .....	7
Slika 2-2 Primjeri primjene armiranog tla ( <a href="http://www.reinforcedearth.com/sites/default/files/reinforced_earth_brochure.pdf">http://www.reinforcedearth.com/sites/default/files/reinforced_earth_brochure.pdf</a> ) .....	10
Slika 2-3 Deformacijska svojstva materijala koja se koriste kao armaturni elementi (Pokharel 1995).....	13
Slika 2-4 Vrsta armature i mehanizam interakcije armature i tla (Palmeira 1987).....	14
Slika 2-5 Mehanizam interakcije tla i armature (Berg et al. 2009) .....	16
Slika 2-6 Utjecaj armature na element tla: a) nearmirano tlo i b) armirano tlo (BS 8006 2010) .....	17
Slika 2-7 Armirani i nearmirani uzorci u triaksnom ispitivanju (Schlosser & Bastick 1991) .....	19
Slika 2-8 Linija nultog izduženja i potencijalne ravnine sloma za armirano i nearmirano tlo (Schlosser & Bastick 1991).....	20
Slika 2-9 Tipovi vanjskog sloma konstrukcije od armiranog tla (Clayton et al. 2013) .....	21
Slika 2-10 Linija maksimalne vlačne sile i aktivna i pasivna zona kod ojačanog tla (Schlosser & Bastick 1991) .....	22
Slika 2-11 Promjena koeficijenta bočnog naprezanja ( $K_r/K_a$ ) s dubinom kod AT zidova (FHWA-NHI-10-024 2009) .....	24
Slika 2-12 Raspodjela vlačne sile duž elementa ojačanja (Clayton et al. 2013).....	26
Slika 2-13 Ograničena dilatancija (Lo 1998) .....	28
Slika 2-14 Volumne deformacije u gusto zbijenom pijesku (Lo 1998).....	29
Slika 2-15 Utjecaj gustoće materijala na rezultate ispitivanja otpornosti na izvlačenje (Meyer et al. 2003).....	34
Slika 2-16 Ispitivanje otpornosti na izvlačenje glatkih (isprekidana linija) i rebrastih traka (puna linija) (Schlosser & Bastick 1991) .....	35



---

Slika 3-1 Presjek uređaja za izravni posmik i prikaz rezultata ispitivanja (Kvasnička i Domitrović 2007) .....	42
Slika 3-2 Komponente kuta trenja kod različitih relativnih gustoća (Stuedlein et al. 2014) ...	45
Slika 3-3 Metode za prikazivanje anvelope čvrstoće (Douglas 2002) .....	46
Slika 3-4 Promjena sekantnog kuta trenja s normalnim naprežanjem (Indraratna et al. 1993)	47
Slika 3-5 Model zuba pile za dilatanciju (Stuedlein et al. 2014) .....	49
Slika 3-6 Promjena unutarnjeg kuta trenja ovisno o maksimalnom promjeru zrna (Xiao et al 2016).....	52
Slika 3-7 Utjecaj koeficijenta nejednoličnosti na parametre čvrstoće lomljenog kamena (Xiao et al. 2016).....	52
Slika 3-8 Promjena kuta $\phi$ s granulometrijskim sastavom: a) povećan $D$ i $c_u$ , $\phi$ raste sa $D_{max}$ , b) povećan $D_{max}$ sa $c_u = konst.$ , $\phi$ se smanjuje uz $D_{max}$ (Nonveiller 1979).....	53
Slika 3-9 Shematski prikaz presjeka uređaja za izvlačenje (Minažek 2010) .....	55
Slika 3-10 Tipični rubni uvjeti za ispitivanje izvlačenjem (Palmeira 2009).....	64
Slika 3-11 Koncipiran mehanizam interakcije armature (trake) (Alfaro et al. 1995) .....	67
Slika 3-12 Mjerena dilatancija za vrijeme ispitivanja izvlačenja geomreže (Alfaro et al. 1995) .....	68
Slika 3-13 Interakcija tla i armature: a) geomreža malo uža od kutije i b) uski uzorak geomreže (Alfaro et al. 1995) .....	69
Slika 3-14 Koeficijent interakcije za različita vertikalna opterećenja (Lo 1998).....	70
Slika 3-15 Geosintetičke trake ugrađene u uređaju za izvlačenje armature iz tla (Abdelouhab et al. 2009).....	71
Slika 3-16 Utjecaj normalnog naprežanja na koeficijent interakcije geosintetičke trake i tla (Abdelouhab et al. 2009).....	72
Slika 3-17 Pomak kraja trake i početka trake (Abdelouhab et al. 2010).....	73
Slika 3-18 Promjena koeficijenta interakcije s povećanjem vertikalnog opterećenja (Abdelouhab et al. 2010).....	73
Slika 4-1 Veliki uređaj za izravni posmik .....	75

---

Slika 4-2 Granulometrijski sastav materijala korišten u ispitivanju izravnog smicanja .....	76
Slika 4-3 Materijal korišten u ispitivanju A16/31,5, B4/31,5 i C0/31,5 .....	77
Slika 4-4 Ugradnja uzorka u kutiju .....	78
Slika 4-5 Praćenje ispitivanja preko posebno razvijenog programa .....	80
Slika 4-6 Dijagrami a) Horizontalnog pomaka i posmičnog naprezanja i b) Horizontalnog pomaka i vertikalnog pomaka za frakciju A16/31,5 .....	81
Slika 4-7 Dijagrami a) Horizontalnog pomaka i posmičnog naprezanja i b) Horizontalnog pomaka i vertikalnog pomaka za frakciju B4/31,5 .....	82
Slika 4-8 Dijagrami a) Horizontalnog pomaka i posmičnog naprezanja i b) Horizontalnog pomaka i vertikalnog pomaka za frakciju C0/31,5 .....	83
Slika 4-9 Linearna MC anvelopa sloma za slučaj kad je $c=0$ .....	84
Slika 4-10 Linearna MC anvelopa sloma za slučaj kad je $c\neq 0$ .....	85
Slika 4-11 Sekantni kut trenja i normalno naprezanje za sve tri frakcije materijala.....	86
Slika 4-12 LVDT mjerila kojima se prate vertikalni pomaci i horizontalni pomak .....	87
Slika 4-13 Program za obradu podataka kod ispitivanja na velikom uređaju za izravni posmik .....	87
Slika 4-14 Dijagram normalnog naprezanja i kuta dilatancije za lomljeni kamen različitog granulometrijskog sastava .....	88
Slika 4-15 Odnos između sekantnog kuta trenja i kuta dilatancije .....	89
Slika 5-1 Elementi velikog uređaja za izvlačenje (Minažek 2010).....	90
Slika 5-2 Veliki uređaj za ispitivanje otpornosti na izvlačenje (Minažek 2010) .....	91
Slika 5-3 a) Posebno razvijen sustav prihvata trake b) Pričvršćenje trake na sustav za izvlačenje .....	92
Slika 5-4 Polietilenska – ParaWeb traka korištena u ispitivanju .....	94
Slika 5-5 Poprečni presjek polietilenskih traka (Lo 1998).....	94
Slika 5-6 Granulometrijski sastav materijala korišten u ispitivanju .....	96
Slika 5-7 Skica ugradnje materijala i praćenja pomaka po točkama.....	98

---

Slika 5-8 Postavljanje ekstenzometara na traku .....	98
Slika 5-9 Pričvrstni sustav za prihvat dviju razmaknutih i dviju spojenih traka.....	100
Slika 5-10 Prikaz traka s postavljenim ekstenzometrima.....	100
Slika 5-11 Dijagram: pomak prve točke u kutiji i sila izvlačenja za frakciju A3 30/60 .....	103
Slika 5-12 Dijagram: pomak prve točke u kutiji i sila izvlačenja za frakciju B 4/60 .....	104
Slika 5-13 Dijagram: pomak prve točke u kutiji i sila izvlačenja za frakciju C 0/60 .....	104
Slika 5-14 Dijagram odnosa sile izvlačenja i vertikalnog naprezanja .....	105
Slika 5-15 Pomaci ekstenzometara za sva tri materijala kod normalnog naprezanja od 50 kPa i 150 kPa.....	107
Slika 5-16 Dijagram pomaka prve točke unutar kutije i zadnje točke unutar kutije za frakciju A30/60.....	108
Slika 5-17 Dijagram pomaka prve točke unutar kutije i zadnje točke unutar kutije za frakciju B4/60 .....	108
Slika 5-18 Dijagram pomaka prve točke unutar kutije i zadnje točke unutar kutije za frakciju C0/60 .....	109
Slika 5-19 Dijagram maksimalne sile izvlačenja i izmjerene gustoće kod različitog vertikalnog naprezanja.....	111
Slika 5-20 Dijagram: Utjecaj granulometrijskog sastava i vertikalnog naprezanja na silu izvlačenja.....	112
Slika 5-21 Dijagram odnosa normalnog i posmičnog naprezanja za sve tri frakcije.....	113
Slika 5-22 Usporedba pravaca posmične čvrstoće za frakcije A30/60, B4/60 i C0/60 pri vertikalnom naprezanju 50 - 150 kPa.....	114
Slika 5-23 Usporedba odnosa vrijednosti kuta trenja na kontaktu pri izvlačenju za A30/60, B4/60 i C0/60 .....	115
Slika 5-24 Usporedba sekantnog kuta trenja za sva tri granulometrijska sastava pri vrijednosti ustanovljenoj pri vertikalnom naprezanju od 50 kPa .....	116
Slika 5-25 Dijagram koeficijenta interakcije za sve tri frakcije materijala za ispitivanje jedne trake .....	117

---

Slika 5-26 Dijagram sile izvlačenja i pomaka trake za frakciju C0/60 kod 50 kPa za dvije odvojene trake .....	120
Slika 5-27 Dijagram sile izvlačenja i pomaka trake za frakciju C0/60 kod 50 kPa za dvije spojene trake.....	120
Slika 5-28 Dijagram sile izvlačenja i pomaka trake za frakciju C0/60 kod 50 kPa za dvije odvojene trake .....	121
Slika 5-29 Dijagram sile izvlačenja i pomaka trake za frakciju C0/60 kod 50 kPa za dvije odvojene trake .....	121
Slika 5-30 Dijagram A) Sile izvlačenja i pomaka klipa i B) Pomaka prvih točaka u kutiji i sila izvlačenja.....	122
Slika 5-31 Usporedba maksimalnih sila izvlačenja za frakciju C0/60 kod naprezanja od 50 kPa za slučaj jedne trake, dvije spojene i dvije odvojene trake .....	123
Slika 5-32 Skica spojenih i razdvojenih traka u pokusu izvlačenja .....	126
Slika 5-33 Usporedba koeficijenta interakcije za ispitivanje jedne trake, dvije spojene i dvije odvojene trake pri vertikalnom naprezanju od 50 kPa.....	127
Slika 5-34 Usporedba koeficijenta interakcije s dostupnim podacima iz literature .....	129
Slika 6-1 Metoda konačnih elemenata (Salatić 2016).....	131
Slika 6-2 Konstitucijski modeli tla (Sokolić & Szavits-Nossan 2011) .....	132
Slika 6-3 Položaj čvorova i točaka naprezanja u elementu tla (Plaxis 2016) .....	133
Slika 6-4 Položaj čvorova i točaka naprezanja u Geogrid elementima (Plaxis 2016) .....	134
Slika 6-5 Distribucija čvorova i točaka naprezanja kontaktnog elementa i njihova veza s elementom tla (Plaxis 2016).....	136
Slika 6-6 Geometrijske karakteristike modela uređaja GFOS za simuliranje pokusa izvlačenja .....	138
Slika 6-7 Položaj točaka u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i numeričkim analizama.....	143
Slika 6-8 Dijagram pomak/sila izvlačenja za krutost trake $EA = 1200 \text{ kN/m}$ kod opterećenja 50 kPa.....	144

---

Slika 6-9 Dijagram pomak/sila izvlačenja za krutost trake $EA = 12000$ kN/m kod opterećenja 50 kPa.....	144
Slika 6-10 Dijagram pomak/sila izvlačenja za krutost trake $EA = 1200$ kN/m kod opterećenja 150 kPa.....	145
Slika 6-11 Dijagram pomak/sila izvlačenja za krutost trake $EA = 12000$ kN/m kod opterećenja 150 kPa.....	145
Slika 6-12 Pomak početka trake (prva točka u kutiji) i kraja trake kod opterećenja od 50 kPa .....	146
Slika 6-13 Pomak početka trake (prva točka u kutiji) i kraja trake kod opterećenja od 150 kPa .....	146
Slika 6-14 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa za A30/60 kod 50 kPa .....	148
Slika 6-15 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa A30/60 kod 150 kPa.....	148
Slika 6-16 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa B4/60 kod 150 kPa .....	149
Slika 6-17 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa A30/60 kod 50 kPa.....	150
Slika 6-18 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa za A30/60 kod 150 kPa .....	151
Slika 6-19 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa za B4/60 kod 50 kPa.....	151
Slika 6-20 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa za B4/60 kod 150 kPa.....	152
Slika 6-21 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa C0/60 kod 50 kPa.....	152
Slika 6-22 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa C0/60 kod 100 kPa.....	153
Slika 6-23 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u modelskom ispitivanju i u numeričkim simulacijama pokusa C0/60 kod 150 kPa.....	153

---

Slika 6-24 Odnos maksimalnih sila izvlačenja izmjerenih i određenih numerički .....	154
Slika 6-25 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u laboratoriju i numerički za A30/60 kod 50 kPa .....	157
Slika 6-26 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u laboratoriju i numerički za A30/60 kod 150 kPa .....	157
Slika 6-27 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u laboratoriju i numerički za B4/60 kod 50 kPa .....	158
Slika 6-28 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u laboratoriju i numerički za B4/60 kod 150 kPa .....	158
Slika 6-29 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u laboratoriju i numerički za C0/60 kod 50 kPa .....	159
Slika 6-30 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u laboratoriju i numerički za C0/60 kod 100 kPa .....	159
Slika 6-31 Razvoj sile izvlačenja po točkama u kojima su praćeni pomaci u laboratoriju i numerički za C0/60 kod 150 kPa .....	160
Slika 6-32 Dijagram maksimalnih sila izvlačenja za sva tri granulometrijska sastava određen eksperimentalno, s parametrima NUM 1 i parametrima NUM 2.....	160
Slika 7-1 Gustoća ugrađenog materijala za ispitivanje parametra čvrstoće.....	162
Slika 7-2 Usporedba izmjerenih sekantnih kutova trenja s rezultatima Douglas (2002) za troosna ispitivanja .....	165
Slika 7-3 Pomak klipa i zadnje točke unutar kutije za sva tri materijala kod različitog naprezanja .....	168
Slika 7-4 Pomak prve točke unutar kutije i zadnje točke unutar kutije za sva tri materijala .	168
Slika 7-5 Dijagram maksimalne sile izvlačenja za sva provedena ispitivanja.....	169
Slika 7-6 Odnos gustoće i sile izvlačenja za sva provedena ispitivanja.....	170
Slika 7-7 Dijagram sekantnih kutova trenja za materijale ispitane u izravnom posmiku i ispitivanju izvlačenjem.....	172
Slika 7-8 Dijagram koeficijenta interakcije i normalnog naprezanja.....	173

---

Slika 7-9 Usporedba koeficijenata interakcije geosintetičke trake za različite koeficijente nejednoličnosti s podacima za rebrastu metalnu traku.....	174
Slika 7-10 Prikaz 3D i 2D modela trake (Zevgolis & Bordeaux 2007).....	176
Slika 7-11 Prikaz 3D mehanizma interakcije i 2D mehanizma interakcije u ravninskoj analizi (Zevgolis & Bordeaux 2007).....	177

**POPIS TABLICA**

Tablica 3-1 Novija istraživanja provedena s ciljem određivanja kuta unutarnjeg trenja materijala .....	51
Tablica 3-2 Utjecaj oblika zrna i granulacije na kut trenja (Nonveiller 1979).....	54
Tablica 3-3 Usporedba normi prema kojima se vrši pokus izvlačenja (Minažek 2010).....	56
Tablica 3-4 Pregled istraživanja pokusa izvlačenja po materijalima korištenim u ispitivanju (nadopunjeno na Minažek 2010).....	59
Tablica 3-5 Glavni čimbenici koji utječu na rezultate ispitivanja izvlačenja (Moraci et al. 2016) .....	63
Tablica 4-1 Gustoća materijala ugrađenog u kutiju .....	78
Tablica 4-2 Kutovi trenja i kohezija prema hipotezi 1 i 2.....	84
Tablica 4-3 Sekantni kutovi trenja i kutovi dilatancije određeni ispitivanjima u velikom uređaju za izravni posmik .....	88
Tablica 5-1 Usporedba GFOS uređaja za izvlačenje i postupaka ispitivanja s normama (Minažek 2010) .....	92
Tablica 5-2 Rezultati ispitivanja polietilenskih traka s poliesterskim vlaknima (Herceg 2006) .....	95
Tablica 5-3 Vršne vrijednosti sile izvlačenja za svaki pokus s prikazom srednjih vrijednosti za ponovljena ispitivanja .....	105
Tablica 5-4 Gustoće zbirnih uzoraka .....	110
Tablica 5-5 Maksimalna posmična naprezanja i srednje vrijednosti posmičnih naprezanja za sve tri frakcije .....	113
Tablica 5-6 Koeficijenti interakcije geosintetičke trake i lomljenog kamena.....	117
Tablica 5-7 Koeficijenti interakcije geosintetičke trake i lomljenog kamena.....	127
Tablica 6-1 Parametri materijala korišteni u numeričkim analizama za sve frakcije određeni izravnim smicanjem i ispitivanjem izvlačenjem .....	139
Tablica 6-2 Parametri materijala kontaktnih elemenata.....	141
Tablica 6-3 Maksimalne sile izvlačenja ispitivanje i Plaxis .....	147
Tablica 6-4 Kutovi trenja izmjereni i definirani u Plaxisu.....	149



---

Tablica 6-5 Kutovi trenja i dilatancije iz ispitivanja izravnog smicanja i ispitivanja izvlačenja .....	155
Tablica 6-6 Izmjerene i numerički određene maksimalne sile izvlačenja .....	161
Tablica 7-1 Usporedba kutova trenja ovisno o modelu kojim se određuje kut trenja.....	164

**KAZALO OZNAKA**

$\sigma_l$  – tlačno naprezanje (kPa)

$\sigma_3$  – bočno naprezanje (kPa)

$\delta_{vr}$  – aksijalne deformacije (mm)

$\delta_{hr}$  – bočne deformacije (mm)

$\tau$  – posmično naprezanje (kN/m<sup>2</sup>)

$T$  – vlačna sila u armaturi (kN)

$l$  – duljina elementa armature (m)

$b$  – širina elementa armature (m)

$T_{max}$  – maksimalna vlačna sila za svaki sloj ojačanja (po metru dužnom) (kN)

$K_r$  – koeficijent bočnog tlaka

$S_v$  – vertikalni razmak slojeva armature (m)

$\sigma_v$  – vertikalno naprezanje (kN/m<sup>2</sup>)

$n$  – minimalni broj elemenata armature po metru dužnom

$R_T$  – otpornost na vlak za svaku pojedinu lamelu (kN)

$FS_b$  – faktor sigurnosti protiv pucanja za svaku pojedinu traku

$P_p$  – otpornost na izvlačenja po metru dužnom (kN)

$P_f$  – otpor koji je generiran trenjem na gornjoj i donjoj površini armaturnih elemenata u smjeru izvlačenja armature (kN)

$P_b$  – otpor koji je generiran poprečnim elementima armature okomito na smjer izvlačenja armature (kN)

$A_f$  – površina armature na kojoj se može razviti trenje ( $m^2$ )

$\sigma'_n$  – efektivno vertikalno naprezanje ( $kN/m^2$ )

$\mu_p$  – koeficijent trenja kod izvlačenja

$A_b$  – površina na kojoj se razvija pasivni otpor ( $m^2$ )

$\sigma'_b$  – efektivno naprezanje uslijed djelovanja poprečnih rebara ( $kN/m^2$ )

$r_f$  – mobilizirano trenje po metru širine za svaki sloj armaturnih traka

$N$  – broj armaturnih elemenata (traka) za širinu obloge zida

$b$  – širina armaturnih elemenata (m)

$L_a$  – duljina elemenata armature u pasivnoj zoni (m)

$f^*$  – prividni koeficijent interakcije trake i tla za pojedini sloj

$f$  – koeficijent interakcije

$\tau_{max}$  – maksimalno posmično naprezanje ( $kN/m^2$ )

$\Delta\sigma_v$  – povećanje normalnog naprezanja ( $kN/m^2$ )

$C_u$  – koeficijent nejednoličnosti materijala

$\varphi$  – kut unutarnjeg trenja materijala ( $^\circ$ )

$c$  – kohezija ( $kN/m^2$ )

$\sigma_e$  – devijatorsko naprezanje potrebno za proizvodnju energije za širenje uzorka ( $kN/m^2$ )

$d_{ev}$  – inkrementalna promjena volumnih deformacija

$d_{el}$  – inkrementalno povećanje aksijalnih deformacija

$\varphi_B$  – kut unutarnjeg trenja bez dilatancije ( $^\circ$ )

$\varphi_{sec}$  – sekantni kut unutarnjeg trenja (°)

$\psi$  – kut dilatancije (°)

$P$  – sila izvlačenja (kN)

$\delta$  – kut trenja na kontaktu trake i lomljenog kamena (°)

$T_1$  – oznaka za jednu traku

$T_{2S}$  – oznaka za dvije spojene trake

$T_{2R}$  – oznaka za dvije razdvojene trake

$T_{tr}$  – bočno trenje na rubu trake (kN)

$R_{int}$  – faktor redukcije parametra materijala u numeričkom modelu

$c_i$  – kohezija kontaktnog elementa u programu Plaxis

$c_{soil}$  – kohezija tla u programu Plaxis

$\tan\varphi_i$  – tangens kuta trenja kontaktnog elementa u programu Plaxis

$\tan\varphi_{soil}$  – tangens kuta trenja materijala u programu Plaxis

$\psi_i$  – kut dilatancije kontaktnog elementa u programu Plaxis

$\psi_{soil}$  – kut dilatancije tla u programu Plaxis

$EA$  – aksijalna krutost trake definirana po metru širine u programu Plaxis (kN/m<sup>2</sup>)

$F$  – aksijalna sila za jediničnu širinu trake (kN)

$\Delta l$  – produljenje trake

$l$  – duljina trake (m)

A16/31,5 – materijal lomljeni kamen s frakcijama od 16 do 31,5 mm

B4/31,5 – material lomljeni kamen s frakcijama od 4 do 31,5 mm

C0/31,5 – material lomljeni kamen s rasponom frakcija od 0 do 31,5 mm

A30/60– material lomljeni kamen s frakcijama od 30 do 60 mm

B4/60 – material lomljeni kamen s frakcijama od 4 do 60 mm

C0/60 – material lomljeni kamen s rasponom frakcija od 0 do 60 mm

## ŽIVOTOPIS

Rođena 5. ožujka 1986. godine u Zagrebu. Osnovnu školu završila u Krapinskim Toplicama, a srednju u Zaboku. Diplomirala na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu u Zagrebu, smjer Geotehniku. Od 11. srpnja 2011. godine zaposlena kao znanstveni novak na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, a od iste godine je upisana i na Poslijediplomski doktorski studij na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Tijekom poslijediplomskog studija sudjelovala je na Hrvatsko-japanskom projektu, te je u sklopu projekta boravila mjesec i pol na sveučilištu u Kyotu na usavršavanju.

Tijekom poslijediplomskog studija i rada kao znanstveni novak sudjelovala je u izvođenju vježbi iz kolegija: Geotehnički objekti, Poboljšanje tla i stijena, Tunelogradnja, Geotehničko projektiranje, Dinamika tla, Geotehnička ispitivanja i opažanja.

Trenutno sudjeluje u izvođenju nastave iz kolegija Mehanika tla 1, Mehanika tla, Mehanika tla 2, Tunelogradnje, Geotehnička ispitivanja i opažanja, Geotehničko projektiranje i Dinamika tla.

Do sada je sudjelovala na Hrvatsko-japanskom projektu: "Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia" u periodu od srpnja 2011 do kraja projekta 30.3.2014.

Sudjelovala je na projektima Sveučilišne potpore: „Razvoj postupka ispitivanja posmične čvrstoće i krutosti materijala ispune“.

Članica je Hrvatskog geotehničkog društva (HGD) i Udruge hrvatskih rudarskih inženjera (UHRI).

## POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

1. Gradiški, Karolina; Mulabdić, Mensur; Minažek Krunoslav (2017): Selected results of determining the friction interaction coefficient between crushed stone and polyester strip. Rudarsko-geološko-naftni zbornik 38 (4) (prihvaćen za objavu)
2. Veinović, Želimir; Kovačević Zelić, Biljana; Gradiški, Karolina (2012): Potreba za osnivanjem podzemnog istraživačkog laboratorija u Hrvatskoj. Rudarsko-geološko-naftni zbornik 24; 113-119 (pregledni rad, znanstveni).
3. Gradiški, Karolina; Sassa, Kyoji; He, Bin; Nagai, Osamu (2013): PDF-tool 3.081-1.2.5 3.4 Past Landslides: Example 4 – The Kostanjek Landslide in Croatia. Sassa, Kyoji ; He, Bin ; McSaveney, Mauri ; Osamu Nagai (ur.).  
Kyoto : International Consortium on Landslides, 2013. Str. 1-21.
4. He, Bin; Sassa, Kyoji; Nagai Osamu; Gradiški, Karolina (2013): PDF-tool 3.081-1.2.2 3.2. Past Landslides: Example 1 - The Leyte Landslide // ICL Landslide Teaching Tools / Sassa, Kyoji ; He, Bin ; McSaveney, Mauri ; Osamu Nagai (ur.).  
Kyoto : International Consortium on Landslides, 2013. Str. 1-16.
5. He, Bin; Sassa, Kyoji; Nagai Osamu; Gradiški, Karolina (2013): PDF-tool 3.081-1.2.4 3.4 Past Landslides: Example 3 – The Grohovo Landslide in Croatia // ICL Landslide Teaching Tools / Sassa, Kyoji ; He, Bin ; McSaveney, Mauri ; Osamu Nagai (ur.).  
Kyoto : International Consortium on Landslides, 2013. Str. 1-17
6. Gradiški, Karolina; Minažek, Kruno; Mulabdić, Mensur; Kvasnička, Predrag (2016): Preliminary results of soil - geosynthetic strip interaction in pullout // 6th European Geosynthetics Congress / Guler, Erol (ur.). Ljubljana : IGS Turkish Chapter, 1052-1060

7. Gradiški, Karolina; Sassa, Kyoji; He, Bin; Krkač, Martin; Mihalić Arbanas, Snježana; Arbanas, Željko; Kvasnička, Predrag; Oštrić, Maja (2014): Application of integrated landslide simulation model using LS-Rapid software to the Kostanjek Landslide, Zagreb, Croatia // Landslide and Flood Hazard Assessment, Proceedings of the 1st Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region. Mihalić Arbanas, Snježana ; Arbanas, Željko (ur.). - Zagreb, Rijeka : Hrvatska grupa za klizišta , 91-96
  
8. Kvasnička, Predrag; Sorić, Luka; Gradiški, Karolina; Marohnić, Marinko (2014): Mechanically stabilized earth wall - a case history // Geotechnics of Roads and Railways / Brandl, Heinz ; Adam, Dietmar (ur.). Beč : Osterreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein, 941-946
  
9. Gradiški, Karolina; Krkač, Martin; Mihalić Arbanas, Snježana; Bernat, Sanja (2013): Slope stability analyses of the Kostanjek Landslide for extreme rainfalls in the winter of 2013. Book of abstracts, 4th workshop of the Japanese -Croatian project on Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia. Vlastelica, Goran ; Andrić, Ivo ; Salvezani, Daša (ur.). Split : University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy 17-18
  
10. Sorić, Luka; Kvasnička, Predrag; Marohnić, Marinko; Gradiški, Karolina. (2013): Zid od armiranog tla Sv. Trojica - povratna analiza za stanje neposredno nakon izgradnje. Sanacija, tehničko praćenje i održavanje u geotecnici. Matešić, Leo ; Sokolić, Igor (ur.). Zagreb : Hrvatsko geotehnčko društvo, 68-69



