Geotehničko zoniranje pomoću GIS tehnologije

Plazonić, Davor

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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:169:332296

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij geološkog inženjerstva

GEOTEHNIČKO ZONIRANJE POMOĆU GIS TEHNOLOGIJE

Diplomski rad

Davor Plazonić

GI 297

Zagreb, 2018.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko naftni fakultet

Diplomski rad

GEOTEHNIČKO ZONIRANJE POMOĆU GIS TEHNOLOGIJE

DAVOR PLAZONIĆ

Završni rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Rad prikazuje mogućnosti obrade podataka dobivenih klasifikacijskim pokusima i terenskom krilnom sondom. Kreirana je baza podataka u GIS okruženju i izrađene su karte zona po određenim geomehaničkim parametrima. Karte zona uspoređene su s geološkom građom terena, odnosno provjerena je potencijalna veza zona s geološkim jedinicama na listovima Osnovne geološke karte koje su obuhvaćene istraživanim područjem.

Ključne riječi: indeksna svojstva, nedrenirana posmična čvrstoća, GIS, kriging, zoniranje

Diplomski rad sadrži: 50 stranica, 26 slika, 6 tablica i 28 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, red. prof., RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, red. prof., RGNF

Dr. sc. Dario Perković, docent, RGNF

Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent, RGNF

Datum obrane: 20. rujna 2018.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and
Petroleum Engineering

Master's Thesis

GEOTEHNICAL ZONING WITH GIS TEHNOLOGY

DAVOR PLAZONIĆ

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering
Department of Mining Engineering and Geotechnics
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

The thesis presents the processing possibilities for the data obtained by classification experiments and field vane shear test. A database in GIS environment and zone maps per specific geomechanical parameters were created. The zone maps were compared to the geological constitution of the terrain, i.e. the potential connection of the zones and the geological units of the Basic Geological Map covered by the study area was verified.

Keywords: index properties, undrained shear strength, GIS, kriging, zoning

Thesis contains: 50 pages, 26 figures, 6 tables and 28 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, Full Professor

Reviewers: Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, Full Professor

Dr. sc. Dario Perković, Assistant Professor

Dr. sc. Dubravko Domitrović, Assistant Professor

Date of defense: September 20, 2018

Zahvala:

Zahvaljujem svim članovima komisije na velikoj angažiranosti i pristupačnosti prilikom izrade rada.

Posebno zahvaljujem mentorici dr. sc. Biljani Kovačević Zelić red. prof. na ukazanom povjerenju, znanju, komentarima, uloženom vremenu te podršci u svim fazama izrade ovoga rada.

Zahvaljujem doc. dr. sc. Dariu Perkoviću na usmjerenju prilikom koncipiranja rada, stručnim savjetima i uloženom vremenu.

Zahvaljujem dipl. ing. Evelini Oršulić na pomoći i na ugodnoj atmosferi prilikom laboratorijskog rada.

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Geološke značajke istraživane lokacije 2
3. Pojmovi i njihovo fizikalno značenje 6
3.1. Tlo 6
3.2. Vrste tla – klasifikacija 6
3.3. Indeksni pokazatelji 8
3.4. Granice plastičnih stanja 8
3.5. Granica tečenja 10
3.6. Granica plastičnosti 10
3.7. Granica stezanja 10
3.8. Dijagram plastičnosti 12
3.9. Krilna sonda 14
4. Geografski informacijski sustav (GIS) 16
4.1. Osnove 16
4.2. Povijest 16
4.3. Dijelovi i tipovi podataka 18
5. Zoniranje – metoda interpolacije 21
5.1. Kriging 21
5.2. Svojstva 22
5.3. Matematičke osnove 23
6. Zoniranje – vizualizacija podataka 24
6.1. Zoniranje prirodne vlažnosti 26
6.2. Zone po granicama plastičnih stanja i indeksu plastičnosti 28
6.3. Zone indeksa konzistencije i indeksa tečenja 34
6.4. Zone vršne i rezidualne nedrenirane posmične čvrstoće 38
6.5. Zone osjetljivosti tla 44

7. Zaključak 47
8. Literatura 49

Popis tablica

Tablica 3-1 Klasificiranje koherentnih materijala prema plastičnosti (Kvasnička et al., 2007) 9
Tablica 3-2 Indeks konzistencije za prahove i gline (Kvasnička et al., 2007) 11
Tablica 6-1 Deskriptivna statistika obrađenih podataka..... 25
Tablica 6-2 Karakteristične vrijednosti granica plastičnih stanja i indeksa plastičnosti (Zlatović, 2006) 28
Tablica 6-3 Nedrenirana posmična čvrstoća glina (ISO 14688, 2006) 38
Tablica 6-4 Klasifikacija glina prema osjetljivosti (prilagođeno iz Smith, 2014)..... 44

Popis slika

Slika 2.1 Prostorni položaj stijena i tala u Hrvatskoj (prilagođeno iz Velić, 2007) 2
Slika 2.2 Položaj istraživane lokacije (prilagođeno iz Velić, 2007) 3
Slika 2.3 Lokacije bušotina prikazane na isječcima OGK Našice (Korolija et al., 1989) i Slavonski Brod (Šparica et al., 1986), M 1:100000 4
Slika 3.1 Vrste materijala prema veličini čestica (Kvasnička et al., 2007) 7
Slika 3.2 Granice plastičnih stanja (Kvasnička et al., 2007) 8
Slika 3.3 Dijagram plastičnosti (prilagođeno iz Nonveiller, 1979) 12
Slika 3.4 Dijagram plastičnosti ispitivanih uzoraka 13
Slika 3.6 Prikaz krilne sonde i rezultata ispitivanja (Kvasnička et al., 2007) 14
Slika 4.1 Razlika između vektorskih podataka i rasterskih podataka 20
Slika 6.1 Raspodjela uzoraka prema ASTM klasifikaciji 24
Slika 6.2 Karta zona prirodne vlažnosti 27
Slika 6.3 Karta zona granice tečenja klasificirane prema tablici 3-1 29
Slika 6.4 Karta zona indeksa plastičnosti klasificirane prema tablici 3-1 29
Slika 6.5 Karta zona granice plastičnosti 31
Slika 6.6 Karta zona granice tečenja 32
Slika 6.7 Karta zona indeksa plastičnosti 33
Slika 6.8 Karta zona indeksa konzistencije prema klasifikaciji iz tablice 3-2 35
Slika 6.9 Karta zona indeksa konzistencije 36
Slika 6.10 Karta zona indeksa tečenja 37
Slika 6.11 Karta zona vršne nedrenirane čvrstoće na dubini od 0,15 m 40
Slika 6.12 Karta zona rezidualne nedrenirane čvrstoće na dubini od 0,15 m 41
Slika 6.13 Karta zona vršne nedrenirane čvrstoće na dubini od 0,30 m 42
Slika 6.14 Karta zona rezidualne nedrenirane čvrstoće na dubini od 0,30 m 43
Slika 6.15 Karta zona osjetljivosti tla na dubini od 0,15 m 45
Slika 6.16 Karta zona osjetljivosti tla na dubini od 0,30 m 46

Popis korištenih oznaka i jedinica

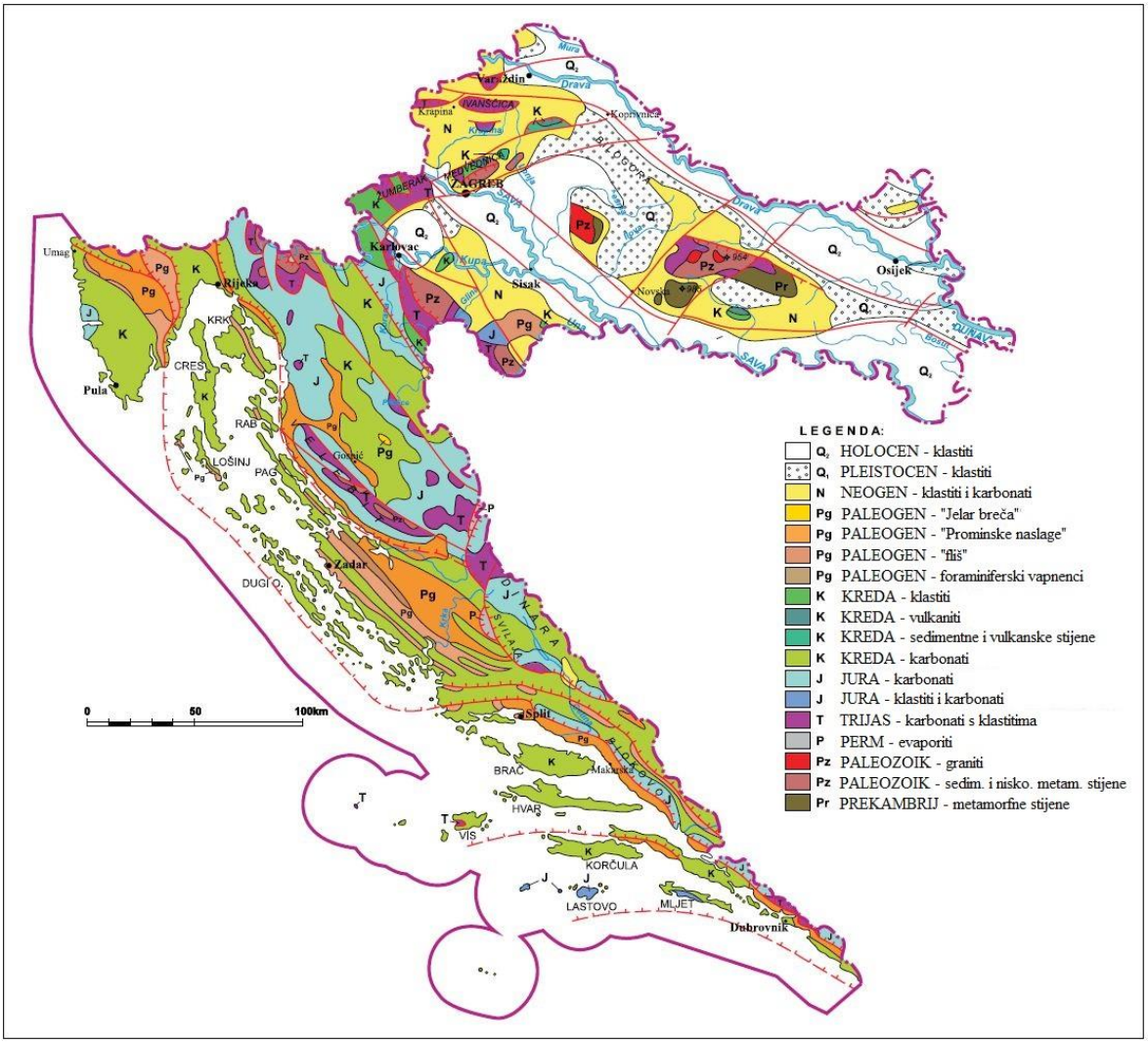
Oznaka	Jedinica	Opis
w_0	%	prirodna vlažnost
w_S	%	granica stezanja
w_P	%	granica plastičnosti
w_L	%	granica tečenja
I_P	%	indeks plastičnosti
I_C	–	indeks konzistencije
I_L	–	indeks tečenja
c_u	kPa	nedrenirana posmična čvrstoća
S_t	–	osjetljivost

1. Uvod

Geotehnička praksa koristi se normiranim postupcima opisa tla da bi okarakterizirala njegova fizikalna i mehanička svojstva. Takvi postupci temelje se na opisu tla (primjerice terenska identifikacija i klasifikacija tla) ili na procjenama, odnosno korelacijama svojstava na osnovi nekog mjerenja. Kod sitnozrnatih, odnosno koherentnih tala važni su podaci o konzistentnom stanju tla, odnosno o odnosu prirodne vlažnosti tla s granicom tečenja i granicom plastičnosti. Na osnovi procijenjenoga konzistentnog stanja tla može se steći dojam o njegovoj krutosti i čvrstoći. Isto tako, važna je i nedrenirana posmična čvrstoća kod gradnje i projektiranja u mekim tlima jer se dobiva relativno brzo i na ekonomski prihvatljiv način, jednostavnim ispitivanjem pomoću terenske krilne sonde.

Cilj ovoga rada bio je, nakon laboratorijskih ispitivanja, obraditi sve rezultate dobivene mjerenjem na terenu i u laboratoriju te zonirati odabrano područje istraživanja po određenim geotehničkim parametrima. U prvom dijelu rada prikazan je pregled pojmova iz mehanike tla vezane uz indeksna svojstva tla te nedreniranu posmičnu čvrstoću. Napravljen je pregled geološke situacije područja na temelju listova Osnovne geološke karte i pripadajućih tumača. Osim toga, u radu je opisan i geografski informacijski sustav (GIS). Odabrana je obrada podataka kojom se podaci vizualiziraju u prostoru pomoću interpolacijskih karata pojedinih rezultata ispitivanja tla koje su izrađene u softveru *Surfer* pomoću *kriging* metode koja je u radu detaljnije opisana. Sve karte prikazane u radu izrađene su pomoću GIS softvera *ArcGIS Desktop 10.1*. Na kraju rada prikazane su karte zona s istraživanim područjem koje se nalazi na području Đakova. Istraživano je područje određenim alatima u GIS-u suženo na dva kilometra oko svake lokacije da bi se smanjila višeznačnost interpretacije uzorkovanja, a ukupno prekriva površinu od 525 km^2. Za svaku kartu zona napravljena je usporedba prema dostupnim klasifikacijama iz literature te je napravljena detaljnija raščlamba da bi se bolje vidjele značajke istraživane lokacije. U zaključku su opisani cilj rada i metode ispitivanja, a dani su i komentari o dobivenim rezultatima s prijedlozima daljnjih istraživanja.

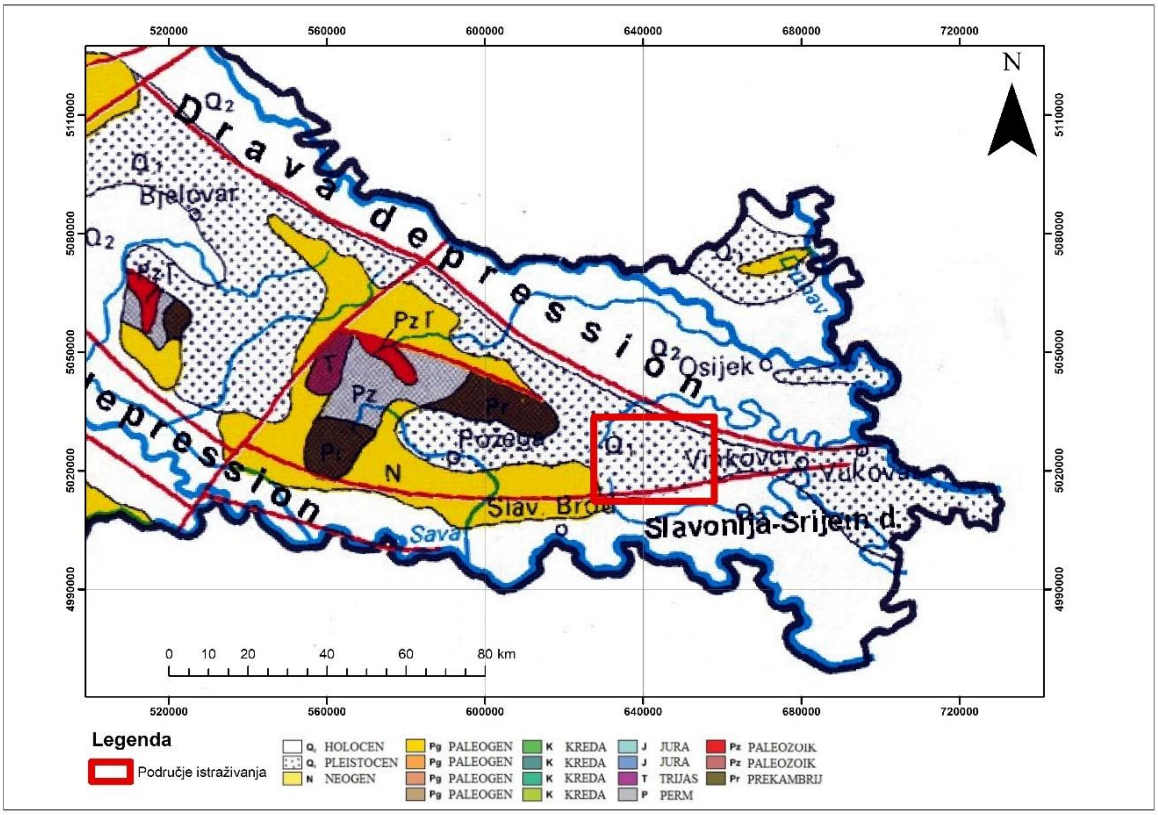
2. Geološke značajke istraživane lokacije



Slika 2.1 Prostorni položaj stijena i tala u Hrvatskoj (prilagođeno iz Velić, 2007)

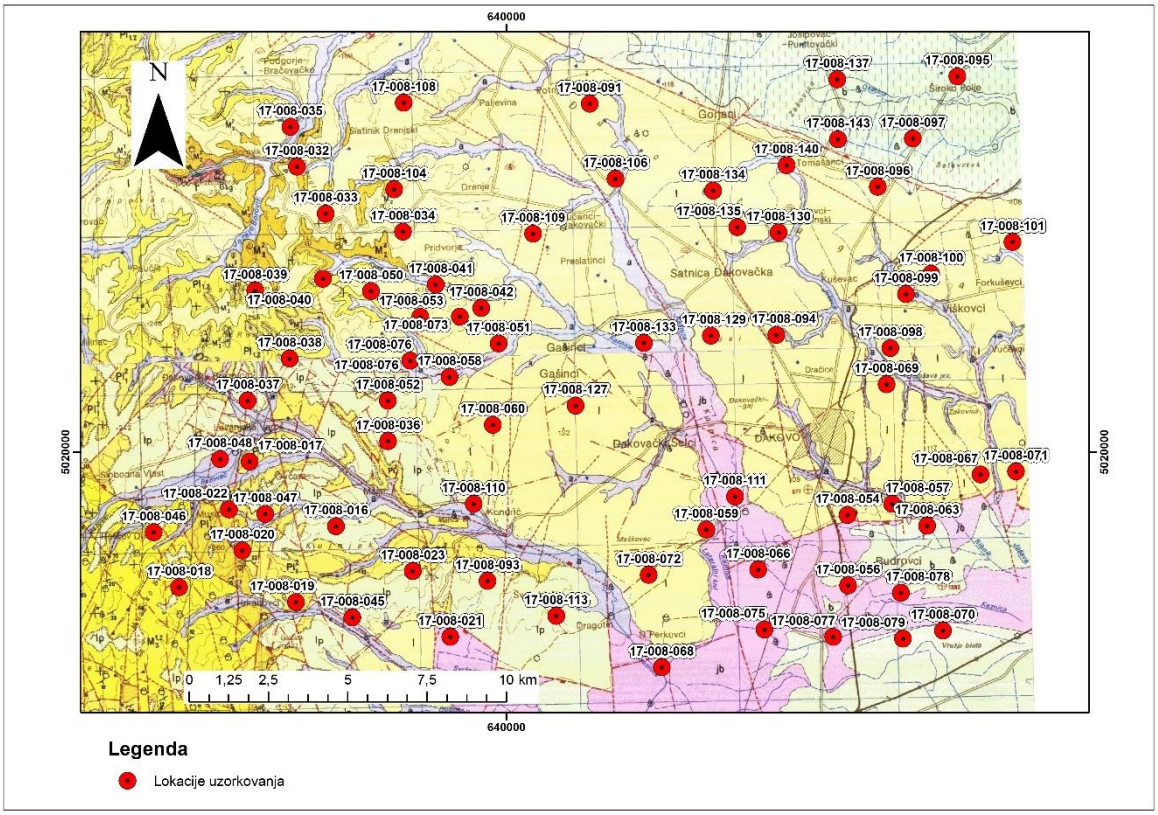
Na slici 2.1. prikazan je prostorni položaj stijena i tala u Hrvatskoj. Inženjersko tlo predstavljaju sedimenti kvartarne starosti (aluvijalne, koluvijalne, jezerske, obalne i eluvijalne naslage) te sedimenti i meke stijene neogenske starosti. Na generaliziranoj geološkoj karti prikazani su samo sedimenti kvartarne starosti veće debljine, a većina stijena neogenske i predneogenske starosti prekrivena je eluvijalnim i koluvijalnim naslagama.

Precizniji položaj istraživane lokacije prikazan je na karti (slika 2.2). Lokacija se nalazi na području koje je pokriveno Osnovnom geološkom kartom, listovima Našice i Slavonski Brod, koji su prikazani na slici 2.3.



Slika 2.2 Položaj istraživane lokacije (prilagođeno iz Velić, 2007)

S obzirom na to da je dubina uzorkovanja u rasponu od 0,00 – 0,30 i 0,30 – 0,60 metara, opisane litološke jedinice koje su navedene na kartama ishodišni su materijal uzorkovanog tla te su opisane radi pojašnjenja geneze samog tla.



Slika 2.3 Lokacije bušotina prikazane na isječcima OGK Našice (Korolija et al., 1989) i Slavonski Brod (Šparica et al., 1986), M 1:100000

Na sjeverozapadu istraživane lokacije, tj. na padinama Krndije, ishodišni su materijal miocenske naslage, lapori i pjeskoviti lapori donjopontske starosti, koji su prekriveni pijescima donjeg i srednjeg pliocena. Dominiraju sivi i smeđi pijesci s proslojcima vapnenačkih pješčenjaka koji uklapaju tanje leće šljunaka i organskih glina. Sastav slojeva sačinjen je od zrnaca kvarca i feldspata listića muskovita, čestica stijena i akcesornih teških minerala. Kvarc se pojavljuje u nepravilnim zaobljenim zrnima presvučenima željeznim hidroksidom. Osim toga, oko jezera Borovik nalaze se neogenske marinske naslage, odnosno foraminiferski vapnenci (Korolija et al., 1989).

Na jugozapadu istraživane lokacije nalazi se gora Dilj na kojoj su taloženi slatkovodni sedimenti panona, vapnenački lapori, vapnenci i lapori, a izgrađuju glavni greben Dilja. Pliocenske naslage prekrivaju obronke gore Dilj, a radi se o sivim laporima koji su dosta

glinoviti s rijetkim proslojcima pješčenjaka i pijesaka. Veći dio gore Dilj prekriven je laporovitim i pješčanim facijesom (Šparica et al., 1986).

Najveći, odnosno središnji dio istraživanog područja prekriva kopneni prapor ili les (l). Naslage lesa pleistocenske starosti sačuvane su na prostranom đakovačkom platou. Litološki jednoličan sediment predstavljen je više ili manje čvrstim siltoznim glinama, nepravilnog i ponegdje poligonalnog loma, raznih nijansi smeđe boje a posljedica su postsedimentacijskih promjena kojima su bile izložene ove naslage. Ovi su sedimenti bili više ili manje pod utjecajem cirkulacije voda, obogaćenih mineralnim talozima (mangan, željezoviti minerali), koji su mjestimično odlagani u formi konkrecija mangana i limonita. Osim toga, bili su pod utjecajem klimatskih promjena i temperaturnih oscilacija, što je rezultiralo stvaranjem pukotina kojima su cirkulirale mineralne otopine s izraženom aktivnošću kapilarne i atmosferske vode (Šparica et al., 1986).

Na sjeveroistoku istraživane lokacije nalazi se barski prapor ili les pleistocenske starosti. Vezan je uz široko nizinsko područje dravske depresije čije nadmorske visine ne prelaze 100 metara. Građen je od pjeskovitog silta s brojnim nakupinama Fe i Mn oksida i hidroksida. Uz postepeno opadanje oksida i hidroksida sediment postaje svjetliji i pri vrhu prelazi u sive siltove s vapnenim konkrecijama i faunom heterogenog sastava. Geneza sedimenta vezana je uz donos čestica koje su se, za razliku od kopnenog lesa, taložile u tadašnjim močvarnim područjima, odnosno slabo pokretnim vodenim površinama, periodičnim močvarama, koje su se postepeno zapunjavale sitnozrnatim materijalom u hladnim periodima mlađeg pleistocena (Korolija et al., 1989).

Središnjica područja istraživanja ispresijecana je vodenim tokovima, stoga se razlikuju i aluvijalni nanosi potoka holocenske starosti. Aluvijalni sedimenti izdvojeni su pretežno u gornjim tokovima potoka jer im ulaskom u nizinske dijelove terena opada transportna i akumulacijska snaga. Sastoje se od pjeskovitog i glinovitog silta te rijetko od sedimenata krupnije frakcije. Genetski su vezani uz ispiranje i transportiranje pliocenskih, odnosno pleistocenskih sedimenata (Korolija et al., 1989).

Na jugu i jugoistoku pri ulasku potoka u nizine izdvajaju se jezersko-barski sedimenti starosti između Pleistocena i Holocena. Litološki sastav ovih sedimenata čine nepravilne izmjene sivo-smeđih zaglinjenih siltova s nepravilnim vapnenačkim konkrecijama, siltozne gline i gline, a mjestimično i proslojci i leće sivo-smeđeg sitnozrnatog pijeska (Šparica et al., 1986).

3. Pojmovi i njihovo fizikalno značenje

3.1. Tlo

Tlo nastaje dezintegracijom matične stijenske mase fizičkim, kemijskim i biološkim procesima, a neke od definicije tla u inženjerskoj geologiji i mehanici tla su sljedeće:

- Tlo je nakupina mineralnih čestica i/ili organske tvari u obliku naslaga koje se mogu razdvojiti blagim mehaničkim djelovanjem i koji sadrži različite količine vode i zraka (ponekad i drugih plinova) (ISO, 14688-1:2002)

- Tlo je agregat neokamenjenih ili slabo okamenjenih materijala, sa slabim vezama među česticama, koje je moguće odvojiti mehaničkim djelovanjem (primjenom slabe sile) ili otapanjem u vodi (González de Vallejo et al., 2011)

- Tlo je materijal koji se sastoji od tri komponente (faze): čvrstih čestica te tekuće i plinovite faze u porama između čestica. Čestice tla su zrna i pločice vrlo različitih veličina, oblika i mineraloškog sastava. U ponašanju tla odražavaju se svojstva svih triju faza, kao i njihove interakcije. Ponašanje takvog materijala veoma je kompleksno, zbog čega je i neophodno proučiti karakteristike svake faze, a zatim i njihovu interakciju (Kvasnička et al., 2007).

3.2. Vrste tla – klasifikacija

Vrste tla veoma su raznolike, pa je potreban sustav za njihovo opisivanje i razvrstavanje u kategorije i grupe sličnih svojstava. Klasifikacijom se karakteristična obilježja tla uspoređuju s onima u tipičnim grupama koje već postoje u sustavu, pa se uzorci mogu rasporediti u klasifikacijske grupe (Nonveiller, 1979).

U Hrvatskoj je uobičajena klasifikacija koja materijale dijeli prema veličini čestica (slika 3.1), a razlikuju se sljedeće glavne grupe tala:

Šljunak (G): veličine čestica šljunka u rasponu su od 60 do 2 mm i vidljive su golim okom. Karakterizira ih manja sposobnost zadržavanja vode zbog površinske neaktivnosti i velikog međuzrnskog prostora.

Pijesak (S): čestice su veličine između 2 i 0,060 mm te su prepoznatljive golim okom. Ne tvore agregate kada se miješaju s vodom te se brzo odvajaju od nje.

Prah (M): čestice su veličine od 0,060 do 0,002 mm, što je ujedno i granica između koherentnih i nekoherentih tala koja više nisu vidljiva golim okom. Odlikuje ih bolje zadržavanje vode nego što je slučaj kod čestica većih veličina.

Glina (C): tvore ih čestice manje od 0,002 mm. Većinom nastaju iz silikatnih minerala koji su izgrađeni od tetraedarskih i oktaedarskih lanaca sa silikatnim ionom u sredini strukture, a spojeni su slabim kovalentnim vezama koje omogućuju ulaz molekula vode u strukturu. Upravo zbog toga ponekad dolazi do povećanja volumena bubrenjem i do smanjivanja kada voda napusti strukturu. Glina ima veliku sposobnost zadržavanja vode s malim međuzrnskim prostorom i veliku površinsku sorpciju. Rezultat toga jest činjenica da je glina u inženjerstvu problematičan materijal jer joj je potrebno dugo razdoblje za konsolidaciju ili ispuštanje vode pod opterećenjem (González de Vallejo et al., 2011).

VRSTA MATERIJALA		ISO/DIS 14688
DROBINA (OBLUTCI)		60 mm
ŠLJUNAK	krupni	20 mm
	srednji	6 mm
	sitni	2 mm
PIJESAK	krupni	0,6 mm
	srednji	0,2 mm
	sitni	0,06 mm
PRAH	krupni	0,02 mm
	srednji	0,006 mm
	sitni	0,002 mm
GLINA		

Slika 3.1 Vrste materijala prema veličini čestica (Kvasnička et al., 2007)

3.3. Indeksni pokazatelji

Indeksni su pokazatelji vrijednosti koje uz granulometrijski sastav daju dodatne informacije o svojstvima tla koja su povezana s njegovim porozitetom i vlažnošću. Važnost indeksnih pokazatelja ističe se kod sitnozrnatih materijala, kod kojih svojstva tla ne ovise toliko o granulometrijskom sastavu koliko o međusobnoj interakciji između čestica tla i pornog fluida.

Podaci kojima se detaljnije opisuju svojstva tla, ovisno o porozitetu i vlažnosti obuhvaćaju sljedeće:

- indeks relativne gustoće – za nekoherentne materijale

- granice plastičnih stanja – za koherentne materijale.

S obzirom na to da se u radu analiziraju koherentni materijali, opisane su granice plastičnih stanja.

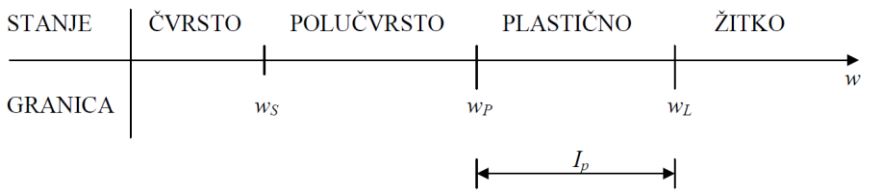
3.4. Granice plastičnih stanja

Fizikalne osobine glinovita tla mijenjaju se sa sadržajem vode. Suho glinovito tlo može biti potpuno kruto i čvrsto. Porastom vode u glinovitom tlu ono postaje najprije plastično i podatljivo, a zatim meko te naposljetku prelazi u žitko tekuće stanje. Vlažnost pri kojoj se odražavaju te promjene u glini ovisi o granulometrijskom sastavu, sadržaju koloidnih čestica i o vrstama minerala gline što ih tlo sadrži.

Na temelju rezultata dugotrajnih opažanja i empirijskih pokusa švedski geokemičar Albert Atterberg početkom dvadesetog stoljeća definirao je stanje plastičnosti glinovitih materijala i granice između tih stanja određene vlažnosti u trenutku kada materijal ima granična svojstva, koje se zovu Atterbergove granice ili granice plastičnih stanja.

Granice se određuju na temelju jednostavnih laboratorijskih ispitivanja.

Na slici 3.2 prikazana su stanja kroz koja prolazi koherentno tlo s povećanjem vlažnosti.



Slika 3.2 Granice plastičnih stanja (Kvasnička et al., 2007)

Granice plastičnih stanja obuhvaćaju sljedeće:

- w_S – granica stezanja

- w_P – granica plastičnosti

- w_L – granica tečenja

Razlika vlažnosti između granice tečenja i granice plastičnosti naziva se indeks plastičnosti i označava se na sljedeći način:

$$I_P = w_L - w_P \qquad (3-1)$$

Glinovit materijal velike vlažnosti u žitkom je stanju i čvrstoća na smicanje jednaka je onoj u tekućini, $\tau_f=0$. Smanjenjem vlažnosti povećava se viskozitet i pri određenoj vlažnosti pojavljuje se sasvim mala čvrstoća na smicanje; tada je postignuta granica tečenja w_L. Smanjuje li se vlažnost i dalje, dolazi do granice plastičnosti w_P pri kojoj se oblik mase ne može mijenjati bez narušavanja kontinuiteta materijala (nastaju pukotine). Uz daljnje smanjenje vlažnosti uzorak je sve čvršći, a njegov volumen smanjuje se sve dok se voda u porama počne povlačiti u unutrašnjost uzorka, kada je postignuta granica stezanja w_S. Suši li se dalje materijal, raste njegova čvrstoća, no volumen se ne mijenja.

Iskustvo od više od pola stoljeća pokazalo je da granice plastičnih stanja vrlo dobro karakteriziraju svojstva glinovitih materijala. Njihova primjena dragocjena je za međusobnu usporedbu raznih vrsta koherentnih tala i za približno utvrđivanje drugih svojstava tla na temelju jednostavnih klasifikacijskih pokusa.

Pomoću granice tečenja i indeksa plastičnosti razvrstavaju se (klasificiraju) koherentna tla prema plastičnosti (tablica 3-1).

Tablica 3-1 Klasificiranje koherentnih materijala prema plastičnosti (Kvasnička et al., 2007)

stupanj plastičnosti	granica tečenja u [%]	indeks plastičnosti, I_P
neplastično	-	< 12,0
nisko plastično	< 12,0	12,0 do 25,0
srednje plastično	30,0-50,0	25,0 do 40,0
visoko plastično	>50,0	>40,0

3.5. Granica tečenja

Granica tečenja određuje se pomoću uređaja s pokretnom mjedenom zdjelicom standardiziranog oblika – tzv. Casagrandeovog uređaja. Pomoću ekscentra na osovini zdjelica se podiže na visinu od 1 cm s koje slobodno pada na podlogu. Na uzorku se načini standardizirani žlijeb posebnim nožem. Pokretana ručno ili automatski, zdjelica brzinom od 2 udarca u sekundi udara o podlogu dok se žlijeb ne sastavi na duljini od 12 mm, te se zabilježi potrebni broj udaraca, N. Broj udaraca ne smije biti manji od 10 ni veći od 50. Pokus se ponavlja na više uzoraka (od 4 do 5) istog materijala kojima se postepeno povećava vlažnost. Za svaki se uzorak odredi vlažnost, w na uzorku izvađenom iz sredine mjedene zdjelice, odnosno spojenog žlijeba. Rezultati se prikazuju u dijagramu koji na apscisi ima broj udaraca, N, a na ordinati odgovarajuću vlažnost tla, te se granica tečenja, w_L dogovorno određuje kao ona vlažnost koja odgovara broju udaraca 25 (Kvasnička et al., 2007).

3.6. Granica plastičnosti

Za određivanje granice plastičnosti ne treba poseban uređaj. Uzorak se priprema u mekoplastičnom stanju. Grumeni materijala valjaju se na neupijajućoj podlozi (primjerice, staklenoj ploči) u valjčiće promjera 3 mm. Valjčići bi se kod te debljine trebali početi kidati ili pucati. Ako se to ne događa, valjčići se ponovno stišću u grumenčiće i pokus se ponavlja. Tim se postupkom uzorku pomalo smanjuje vlažnost. Valjčići koji su počeli pucati na 3 mm spremaju se u zatvorenu posudu, a zatim se važu i suše radi određivanja vlažnosti. Granica plastičnosti dobiva se kao srednja vrijednost dva mjerenja – w_P (Kvasnička et al., 2007).

3.7. Granica stezanja

Granica stezanja jest vlažnost kod koje se sušenjem volumen uzorka više ne smanjuje. Naime, u postupku sušenja, zbog povećavanja kapilarnih sila vode u porama uzorka, uzorak se steže sve dok čestice ne dođu u tako zbijenu strukturu da ih te sile više ne mogu zbijati. Granica stezanja u laboratoriju određuje se tako da se uzorak suši u posudi pravilnog oblika (da se može lako odrediti početni volumen uzorka), a povremeno mu se određuju vlažnost i volumen sve dok se daljnjim sušenjem volumen više ne smanjuje. Vrijednost granice stezanja interesantna je uglavnom kad se radi s nesaturiranim materijalima, pa se kod uobičajenih laboratorijskih ispitivanja rijetko traži (Kvasnička et al. 2007).

Osim granica plastičnosti i indeksa plastičnosti, sitnozrnati materijali, odnosno koherentni materijali, definiraju se još i indeksima:

Indeks konzistencije –

$$I_C = \frac{w_L - w_0}{I_P} \qquad (3-2)$$

gdje je w_0 je prirodna vlažnost.

Indeks konzistencije s povećanjem vlažnosti kreće se u rasponu od nule do jedinice, tj. od stanja u kojemu je uzorak tekuć, sve do polučvrstog stanja. Također, što je indeks konzistencije veći, materijal je manje deformabilan.

Nasuprot tome, indeks tečenja definiran je izrazom:

$$I_L = \frac{w_0 - w_P}{I_P} \qquad (3-3)$$

tj. vrijedi:

$$I_L = 1 - I_C \qquad (3-4)$$

Procjena konzistentnog stanja prema vrijednosti indeksa konzistencije dana je u tablici 3-2. U tablici su navedeni hrvatski termini koje je predložio Nonveiller (1979).

Tablica 3-2 Indeks konzistencije za prahove i gline (Kvasnička et al., 2007)

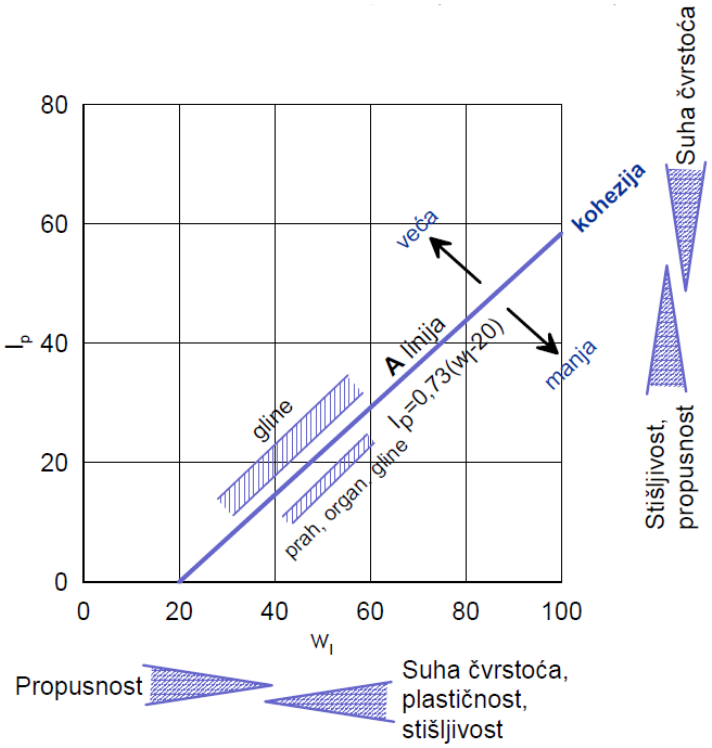
konzistencije prahova i glina	indeks konzistencije, I_C
žitko (very soft)	<0,25
lako gnječivo (soft)	0,25 do 0,50
teško gnječivo (firm)	0,50 do 0,75
polučvrsto (stiff)	0,75 do 1,00
čvrsto (very stiff)	>1,00

3.8. Dijagram plastičnosti

Prikazom točaka u koordinatnom sustavu s indeksom plastičnosti na apscisi i granicom tečenja na ordinati dobiva se dijagram plastičnosti koji je predložio A. Casagrande za prikaz karakteristika plastičnosti raznih uzoraka koherentnih tala. Proučavanjem velikog broja takvih prikaza ustanovljen je pravac, nazvan A-linija, čija jednadžba glasi:

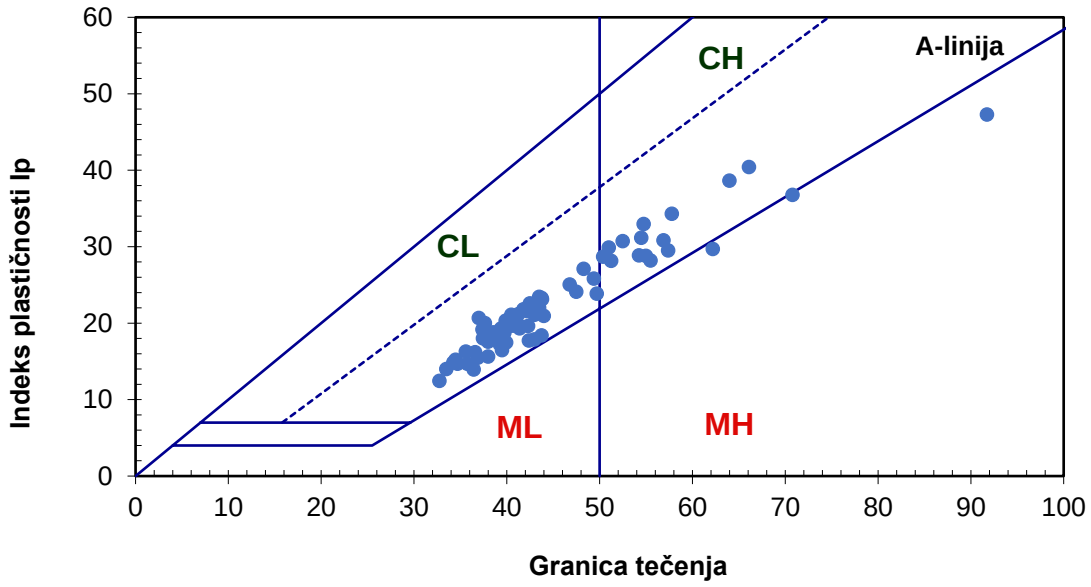
$$I_P = 0{,}73 \cdot (w_L - 20) \qquad (3-5)$$

A-linija dijeli područje dijagrama na dvije zone: iznad linije nalaze se glinovita tla, a ispod nje prahovita tla i organske gline. Opaženo je da tla prikupljena na različitim lokacijama koji se u dijagramu nalaze u približno istoj točki imaju vrlo slična svojstva, kao što su stišljivost, čvrstoća na smicanje pri jednakoj vlažnosti, propusnost i dr. Upravo je zato dijagram plastičnosti prikladan za komparaciju uzoraka tla s istog ili različitih područja i za svrstavanje uzoraka u skupine sličnih svojstava. Na slici 3.3. prikazan je dijagram plastičnosti te je prikazan shematski trend promjene svojstava tla prema položaju točke u dijagramu.



Slika 3.3 Dijagram plastičnosti (prilagođeno iz Nonveiller, 1979)

Granica tečenja jest mjera potencijalne kohezivnosti materijala. Što su čestice tla sitnije, potrebno je više vode da se postigne određena međusobna pokretljivost pa i vlažnost što definira granicu tečenja. Visoka je granica tečenja pokazatelj sitnozrnosti tla. Dodaje li se glinovitom materijalu fini pijesak ili prah, puno se više snižava granica tečenja nego granica plastičnosti, pa se smanjuje i indeks plastičnosti. Vrlo sitan pijesak ima gotovo identičnu vlažnost u granici tečenja i u granici plastičnosti (indeks plastičnosti IP = 0), pa takav materijal nema interval plastičnosti. Granica plastičnosti, s druge strane, znatno raste s povećanjem udjela organskih tvari, što ne utječe na granicu tečenja, pa se indeks plastičnosti smanjuje povećanjem količine organskih sastojaka (Nonveiller, 1979).



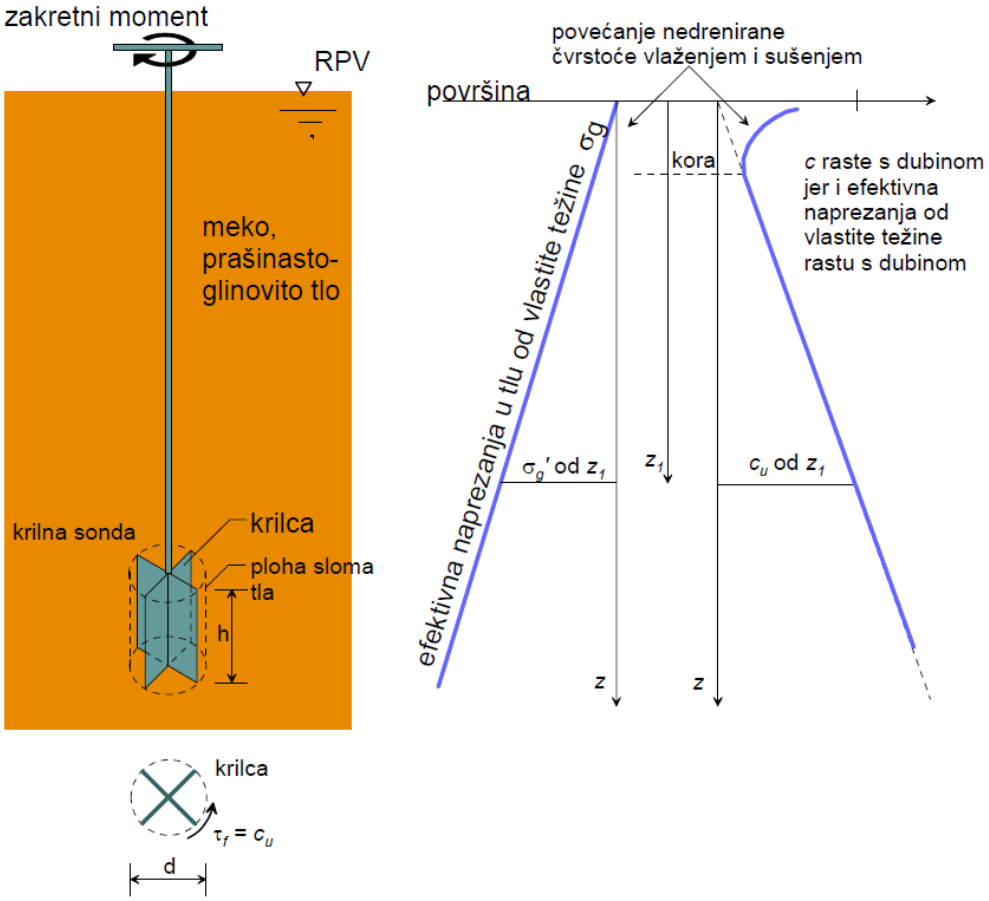
Slika 3.4 Dijagram plastičnosti ispitivanih uzoraka

Na slici 3.4. prikazani su rezultati dobiveni ispitivanjem 74 uzorka koherentnog tla koji su obrađeni u ovom radu. Većina prikupljenih uzoraka pripada skupini glina niske i visoke plastičnosti (oznake CL i CH). Dva su uzorka prahovi visoke plastičnosti MH, a jedan je klasificiran kao glinoviti prah visoke plastičnosti, odnosno MH/CH.

3.9. Krilna sonda

Iz pojedinih slojeva koherentnog tla vrlo je teško dobiti neporemećene uzorke, pa rezultati ispitivanja u laboratoriju nisu dovoljno pouzdani. U Švedskoj je zbog toga razvijena metoda mjerenja čvrstoće tla na smicanje ispod dna bušotine koja je danas opće prihvaćena u cijelom svijetu. Uzastopnim mjerenjem na raznim dubinama moguće je dobiti vertikalnu distribuciju posmične čvrstoće tla na nekoj lokaciji (Nonveiler, 1979).

Uređaj za terensko mjerenje posmične čvrstoće tla naziva se krilna sonda, a sastoji se od četiri ploče (krilca) međusobno učvršćenih pod kutom od 90°. Pokus se izvodi tako da se krilna sonda utiskuje do zadane dubine (bilo da je riječ o utiskivanju izravno u tlo ili sa dna bušotine), a zatim se zakreće momentom, tako da do sloma tla dođe u nedreniranim uvjetima. Krilnu sondu treba okretati stalnom brzinom. Da bi se ostvarili nedrenirani uvjeti, brzina okretanja u koherentom tlu treba biti od 0,1 °/s do 0,2 °/s (od 6 °/min do 12 °/min). U mekom koherentnom tlu male osjetljivosti brzina okretanja može biti i do 0,5 °/s.



Slika 3.5 Prikaz krilne sonde i rezultata ispitivanja (Kvasnička et al., 2007)

Tlo koje se nađe na obodu krilca odupire se zakretnom momentu M. Izraz za c_u (jednadžba 3-6) dobije se uravnoteženjem momenata aktivnih sila, M, i momenata sila otpora po oplošju valjka od tla koji nastaje rotacijom krilaca. Pretpostavka je da se zbog rotacije krilaca tlo slama pa su posmična naprezanja na plaštu i na bazama valjka jednaka čvrstoći tla, odnosno c_u. Krak sila na dvjema bazama jednak je 2·(d/2)/3, a po oplošju d/2, stoga jednadžba ravnoteže momenata glasi:

$$M = c_u \cdot \left(2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} + d \cdot h \cdot \pi \cdot \frac{d}{2}\right) \qquad (3-6)$$

odnosno:

$$\tau_f = c_u = \frac{2M}{\pi d^2 \left(h + \frac{d}{3}\right)} = 0{,}273 \cdot \frac{M}{d^3} \qquad (3-7)$$

Izraz s krajnje desne strane dobije se samo ako je odnos h = 2d (propisano EC 7/3). Nedrenirana čvrstoća c_u raste s dubinom (slika 3.5) jer rastu i početna efektivna naprezanja od vlastite težine tla (Kvasnička 2007.).

Metoda mjerenja krilnom sondom dala je vrlo korisne rezultate u nekim materijalima i u tlu koje je osjetljivo na poremećaje. Čvrstoća na smicanje izmjerena krilnom sondom mjerodavna je za dimenzioniranje temelja na stišljivom materijalu kad opterećenje brzo raste, pa nema vremena za disipaciju pornih pritisaka (Nonveiler, 1979.).

Osim toga, krilnom sondom može se uz nedreniranu posmičnu čvrstoću odrediti i osjetljivost tla koja je definirana kao omjer vršne i rezidualne nedrenirane posmične čvrstoće.

$$osjetljivost = S_t = \frac{vršna\ nedrenirana\ posmična\ čvrstoća}{rezidualna\ nedrenirana\ posmična\ čvrstoća} \qquad (3-8)$$

4. Geografski informacijski sustav (GIS)

4.1. Osnove

Neovisno o tome o kakvim je podacima, objektima i aktivnostima riječ, najlakši je način upravljanja i organizacije onaj pomoću sustava. U slučaju ovakvog ispitivanja najkorisniji je geografski informacijski sustav, odnosno GIS (engl. geographic information system). Iako svi sustavi podrazumijevaju povezivanje objekata i aktivnosti koje služe određenoj zajedničkoj namjeni, u slučaju GIS-a riječ je o sustavu za „prikupljanje, spremanje, provjeru, integraciju, upravljanje, analiziranje i prikaz podataka koji su prostorno povezani sa Zemljom. U taj sustav obično je uključena baza prostornih podataka i odgovarajući programi" (Rhind & Mounsey, 1989).

Budući da su takvi sustavi izuzetno kompleksni, u današnje se vrijeme smatraju jednim od najsloženijih i najopsežnijih područja primjene računala, odnosno multidisciplinarnih informatičkih tehnologija. Nastali su zbog potrebe obuhvaćanja cjelokupnog prostora Zemlje i uspješnijeg gospodarenja svim njezinim aspektima, objedinjujući pri tome geologiju, poljoprivredu, šumarstvo, vodoprivredu, promet, ekologiju, oceanografiju, meteorologiju i mnoge druge discipline s informatičkim tehnologijama, kao što su baze podataka, projektiranje i automatsko prikupljanje podataka. Upravo se zbog svoje sveobuhvatne prirode GIS može uspješno koristiti u različite namjene, od kojih su neke vojna istraživanja, proučavanja nafte, prostorno planiranje i zaštita okoliša (Perković, 1998).

4.2. Povijest

Iako mu, naravno, nedostaje računalna komponenta, jednim od prvih geografskih informacijskih sustava može se smatrati i „Atlas zbivanja" koji je nastao u Irskoj davne 1838. godine, i to upravo zbog činjenice da je prikazivao podatke o populaciji, prometu, geologiji i topografiji područja (Fabijanović, 2013.).

Prvi stvarni početak razvoja GIS-a u obliku nalik onome koji nam je danas poznat datira iz 1963. godine kada je Roger Tomlinson utemeljio kanadski GIS, odnosno CGIS. Tomlinson je ostao zapamćen i po tome što je predlagao računalne metode pri analiziranju velikog broja zemljovida radi pronalaska lokacija koje bi bile povoljne za izradu plantaža na području istočne Afrike, ali i zbog inventarizacije zemljišta Kanade. (Perković, 1998) Drugi je projekt prihvaćen, a njegova su istraživanja dovela do mnogih izuma, od kojih je jedan rotacijski skener za brzu digitalizaciju zemljovida i topološko kodiranje u skladu s konceptom čvorova

i linija. Osim navedenog, Tomlinson je bio i prvi predsjednik Komisije za prikupljanje i obradu geografskih podataka koju je 1968. godine osnovala Međunarodna geografska unija.

Arhitekt Howard Fisher sa sveučilišta Harvard osnovao je 1965. godine Laboratorij za računalnu grafiku i prostornu analizu, što je pomoglo razvoju programskog paketa SYMAP za izradu tematskih zemljovida pomoću brzih pisača. Nedugo nakon toga, 1967. godine Zavod za statistiku počeo je obrađivati prostorne podatke te su ubrzo stvorene i baze podataka TIGER i GBF. Druga je baza podataka bila jedna od topološki strukturiranih baza podataka o prostoru te je obuhvaćala prikaz cestovnih mreža velikih gradskih područja. Nakon pilot-područja nije trebalo puno vremena da se krene s digitalizacijom drugih geografskih zemljovida SAD-a, pri čemu su digitalizirani ili skenirani sadržaji kao što su ceste, željeznice, vodovodne i ostale linije. Taj je posao dovršen 1987. godine, a sama je baza podataka Digital Line Graph (DLG) i danas jedna od najvećih civilnih GIS projekata (Perković, 1998).

Osim njih, za razvoj GIS-a zaslužan je i Jack Dangermond koji je 1969. osnovao tvrtku ESRI čije je područje djelovanja bilo digitalna grafika i savjetovanje u okviru zaštite okoliša. Prva verzija programa ARC/INFO pojavila se na tržištu 1982. godine. Tvrtka INTERGRAPH, osnovana 1969. godine, sa svojim je osnivačem Jimom Medlockom pomogla pri oblikovanju GIS-a razvojem rješenja za računalne grafike za gospodarstvo, infrastrukturne sustave i sva ona područja gdje se koriste kartografska rješenja izrađena na računalu.

Kada je riječ o našem području, prva organizirana primjena GIS-a zabilježena je 1988. godine kada je nekoliko hrvatskih i slovenskih institucija koordiniranih sektorom INA-INFO-a započelo s radom na zajedničkom projektu (Perković, 1998).

GIS se u današnje vrijeme koristi u brojnim institucijama različitih profila, a Rudarsko-geološko-naftni fakultet s njegovom je primjenom počeo 1992. godine.

4.3. Dijelovi i tipovi podataka

Kao što je već spomenuto, GIS obrađuje prostorne podatke, odnosno podatke povezane s položajem u određenom prostoru. Osim objedinjavanja takvih podataka, GIS integrira i druge vrste informacija te pruža dosljednu i sveobuhvatnu platformu za obradu i analizu prostora pomoću računalne tehnologije.

Osnovnim se dijelovima GIS-a smatraju **korisnici, računalna podrška, programska podrška i podaci,** a prema Longley et al. (2015) opisani su u nastavku.

GIS je bez pravih **korisnika** zapravo iznimno ograničen jer nema osoba koje će upravljati sustavom i razvijati planove za različite realne probleme. Korisnici mogu biti različitih profesija i zanimanja, bilo da su stručnjaci koji ga dizajniraju ili „obične" osobe koje se njime služe radi pomoći pri izvršavanju svakodnevnih obaveza. Nerijetko se u tvrtkama i ustanovama pri razvoju GIS-a zaboravi na činjenicu da „G" ne znači „geodetski" već „geografski", kao i da „I" ne znači „informatički" već „informacijski", zbog čega se razvoj dodjeljuje geodetu i informatičkoj službi koji nisu nužno idealan odabir za korisnike zadužene za razvoj GIS-a. Pravilan je razvoj moguć samo ako će sustav razvijati korisnici koji upravljaju prostornim podacima te tako omogućuju unos, pohranu i analizu podataka te upravljanje njima, kao i konačan ispis rezultata.

Računalna podrška je zapravo računalo na kojem je instaliran programski paket za GIS. U današnje je vrijeme tehnologija napredna, pa su ti paketi kompatibilni s različitim konfiguracijama hardvera. U tu se skupinu ubrajaju oprema za prikupljanje podataka (GPS prijemnik, totalne stanice, sateliti,…), oprema za unos podataka (skeneri, digitalizatori, računala, kamere) te oprema za ispis (pisači i ploteri).

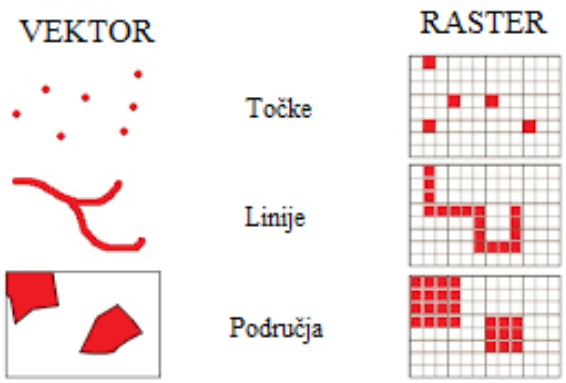
Programska podrška obuhvaća softver sustava GIS koji pruža funkcije i alate potrebne za prikupljanje, analiziranje i prikaz prostornih podataka. Najvažnije su softverske komponente alati za unos i obradu prostornih podataka, sustavi za upravljanje bazama podataka, alati koji podržavaju prostorne upite, analizu i vizualizacije, kao i grafičko sučelje koje na praktičan način omogućuje jednostavan pristup svim potrebnim alatima. Neki su od poznatijih softvera za GIS: *ArcGIS, AutoCAD Map, MapInfo* i *GeoMedia*. U ovom je radu korišten *ArcGIS Desktop 10.1*.

Podaci su najvažniji element GIS-a, a svaka od vrsta podataka ima svoje posebne karakteristike. Ako podaci izravno i neizravno opisuju položaj, nazivaju se prostornim podacima te se prikazuju u grafičkom ili negrafičkom obliku. Karte su najčešći izvori takvih podataka. Sama prostorna komponenta podrazumijeva prostorne atribute, odnosno geografsku širinu i dužinu, visinu i druge podatke koji definiraju lokaciju objekta. Osim prostorne komponente iznimno je važna i informacijska komponenta (nazivi, opisi, dubine, funkcije i ostale karakteristike objekta na određenoj lokaciji) jer se podatak bez te dvije komponente zbog nepotpunosti ne može upotrijebiti.

Svi se prostorni podaci mogu reducirati na tri osnovna elementa, odnosno točke, linije i poligone, a iako se mogu nalaziti u različitim oblicima, osnovna su dva oblika raster i vektor (slika 4.1).

Vektorski su podaci informacije o točkama, linijama i područjima koje su kodirane i pohranjene u digitalni sustav u obliku koordinata (Longley et al., 2015). Tako je, primjerice, izvor rijeke na karti označen točkom (u vektorskom obliku kao x, y koordinata točke), a njezin tok linijom (u vektorskom obliku kao krivulja od niza točaka s koordinatama x, y). Jezero je pak na karti prikazano kao područje omeđeno zatvorenom linijom, dok je u vektorskom obliku to zatvoreni poligon točaka s koordinatama x, y. Takvim je podacima potrebno dodati i topologiju, tj. odrediti odnose između geometrija, a sam se oblik koristi za spremanje podataka o geodetskim izmjerama, odnosno za digitalizaciju već postojećih.

Rasterski su podaci informacije o pikselima ili slikovnim elementima određene dvodimenzionalne slikovne matrice. Raster je površina podijeljena na manje površine, odnosno kvadratiće, koje imaju vlastite atribute (Longley et al., 2015). Položaj se u tom slučaju određuje kao položaj ruba kvadratića u odnosu na ishodište rastera. Tipičan je primjer slika sastavljena od piksela, nositelja informacija, odnosno najmanjih slikovnih elemenata na dvodimenzionalnoj matrici, od kojih svaki ima svoj atribut, tj. boju. Piksel je definiran položajem na matrici, svojim retkom i stupcem, ali i rezolucijom navedenom u milimetrima ili broju piksela koji se u vodoravnom i okomitom smjeru mogu postaviti na određenu udaljenost. Rasterski je koordinatni sustav smješten tako da je 90 stupnjeva zarotiran u odnosu na vektorski, a ishodište je iz lijevog gornjeg kuta pomaknuto dijagonalno za pola piksela izvan matrice. Budući da je rasterski model pravilna mreža, prostorni su odnosi između elemenata riješeni te nije potrebno posebno spremanje topologije. Taj je oblik naročito koristan za satelitske i zračne snimke, ali i skenirane karte i planove.



Slika 4.1 Razlika između vektorskih podataka i rasterskih podataka

5. Zoniranje – metoda interpolacije

5.1. Kriging

Postupak zoniranja napravljen je interpolacijom metodom *kriginga*. Postupak *kriginga* napredna je interpolacijska metoda za procjenu vrijednosti regionalizirane varijable u točkama odabrane mreže. Mreža kao pojam najčešće se u praksi zamjenjuje izrazom *grid*, pa je tako i korišten u daljnjem tekstu. Pojam regionalizirane varijable podrazumijeva vrijednost distribuiranu u prostoru poput debljine sedimenata, poroziteta, tlaka u ležištu itd. Regionalizirana varijabla često je i slučajna varijabla, barem u geologiji. Pod pojmom „slučajna“ misli se na to da su vrijednosti te varijable dobivene prema nekoj funkciji razdiobe poput normalne ili uniformne razdiobe.

Kriging kao statistička metoda procjene ime je dobila prema južnoafričkom inženjeru Krigeu koji ju je prvi put upotrijebio i opisao prilikom procjene koncentracije rudače u ležištima zlata. Kasnije je vremenom uslijedio i danji teorijski razvoj metode, najvećim dijelom kod francuskih znanstvenika.

Procjena *krigingom* temelji se na upotrebi postojećih tzv. kontrolnih točaka čiji je utjecaj na procjenu izražen odgovarajućim težinskim koeficijentima. Izraz „kontrolne točke“ uglavnom u naftnoj geologiji podrazumijeva lokacije bušotina s pripadajućim vrijednostima (Malvić, 2005), što će u slučaju promatrane lokacije Đakovo biti istražne bušotine s pripadajućim određenim vrijednostima indeksnih svojstava tla i rezultata ispitivanja terenskom krilnom sondom.

Procjena izrađena *krigingom* podrazumijeva da su zadovoljeni određeni kriteriji. Procjena mora biti nepristrana te načinjena tako da varijanca razlike između stvarnih i procijenjenih vrijednosti u odabranim točkama najmanja moguća, što se još i varijanca *kriginga*. Nakon završetka procjene na odabranom *gridu* algoritam *kriginga* računa i predviđenu i stvarnu grešku procjene. Izračunate vrijednosti mogu se usporediti s mjerenom vrijednošću na kontrolnoj točki koja je upotrijebljena kao ulazni podatak. Na taj se način određuje pouzdanost procjene te kvaliteta odabranog prostornog modela.

5.2. Svojstva

Prilikom procjene vrijednosti *krigingom* svakome podatku u postupku dodijeljen je određeni težinski koeficijent (λ) kojim je procijenjen njegov utjecaj na ukupni proračun. Odnosi između postojećih vrijednosti i točke u kojoj se ona procjenjuje izražavaju se vrijednostima kovarijance ili variograma. Na taj su način određene zavisnosti i utjecaji pojedine lokacije s obzirom na njezinu udaljenost od točke čija se vrijednost procjenjuje. Osnovna su pravila jednadžbe *kriginga* sljedeća:

Veličina i oblik područja (broj točaka *grida*) za koje se radi procjena vrijednosti određeni su izrazom $C(Z_k Z_k)$ odnosno kovarijancom između vrijednosti izračunate *krigingom* sa samom sobom;

Udaljenost između točke koja se procjenjuje („k“) te kontrolne točke „i“ određena je kovarijancom $C(Z_k Zi)$;

Raspored i međusobna udaljenost između dviju kontrolnih točaka „i“ i „j“ predstavljena je vrijednošću kovarijance $C (Z_i Z_j)$;

Kvaliteta procjene težinskih koeficijenata ovisi o načinjenom variogramskom modelu. U pravilu model s većim brojem kontrolnih točaka, većim dosegom, manjim odstupanjem i bez anizotropije imat će puno veću pouzdanost kod procjene težinskih koeficijenata.

Iz navedenih odnosa proizlazi nekoliko elementarnih pravila koja se vežu uz algoritam *kriginga*. Međusobni odnosi između kontrolnih i točaka procjene definiraju se preko kovarijanci. Uz kovarijance moguće je upotrijebiti semivariogramske krivulje kojima se također definira prostorna zavisnost podataka. U oba slučaja težinski koeficijent vezan uz pojedinu lokaciju postaje samo mjera njezine udaljenosti od točke procjene, a ne i stvarne vrijednosti podatka na toj lokaciji. Porast vrijednosti kovarijance ili semivariograma upućuje na porast „reda“ ili pouzdanost procjene; odnosno veća vrijednost dobivena za neki par pokazuje da je i međusobno utjecaj tih točaka veći. Dodatnu kvalitetu procjeni daje što pravilniji raspored kontrolnih točaka.

Metoda *kriginga* svrstana je među statističke interpolacijske tehnike označene kao „*BLUE-Best Linear Unbiased Estimators*“ što bi značilo da je riječ o najboljem linearnom nepristranom procjenitelju.

5.3. Matematičke osnove

Princip rada *kriginga* najjednostavnije je prikazati nizom jednadžbi kojima je definiran. *Krigingom* se procjenjuju vrijednosti regionalizirane varijable na odabranoj lokaciji (Zk), a na temelju postojećih okolnih vrijednosti (Z_i). Svakoj od tih postojećih vrijednosti pridružen je odgovarajući težinski koeficijent (λ_i), a način njihova proračuna najzahtjevniji je dio algoritma *kriginga*.

Vrijednost regionalizirane i slučajne geološke varijable može se definirati kao:

$$Z_i = Z(x_i) \qquad (5-1)$$

gdje je x_i točka u kojoj je očitana vrijednost.

Vrijednost je varijable procijenjene *krigingom* na temelju n okolnih kontrolnih točaka sljedeća:

$$Z_k = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \times Z_i \qquad (5-2)$$

gdje su:

λ_i - težinski koeficijenti (engl. *weights*) za svaku lokaciju

Z_i - okolne poznate vrijednosti, tzv. kontrolne točke (engl. *control points*)

Z_k - vrijednost procijenjena *krigingom.*

Sljedeći korak izračuna *kriginga* usmjeren je na procjenu odgovarajućih težinskih koeficijenata te na kraju na procjenu same vrijednosti Z_k. Do tih se vrijednosti dolazi *rješavanjem sustava linearnih jednadžbi kriginga*. Takvo je znanje neophodno za razumijevanje metode *kriging*, odnosno najučinkovitiju primjenu različitih tehnika te metode što je dobro objašnjeno u velikom broju literature (Malvić, 2005).

6. Zoniranje – vizualizacija podataka

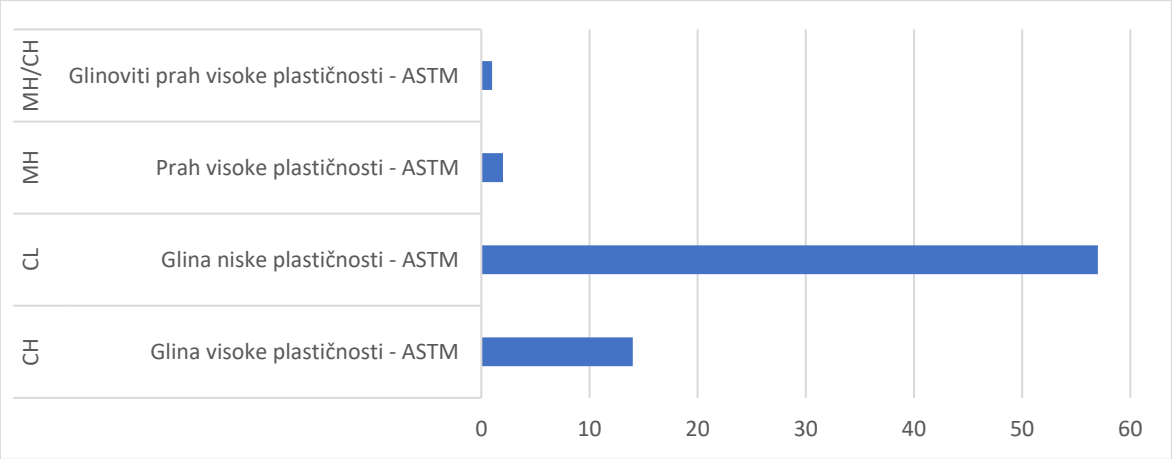
Cilj ovog poglavlja jest provjeriti postoji li povezanost geologije istražne lokacije s interpolacijama načinjenima na temelju dobivenih laboratorijskih ispitivanja te ispitivanja na terenu krilnom sondom.

U tablici 6-1 prikazana je deskriptivna statistika svih podataka, koja je generirana u programu *Rstudio* (RStudio Team, 2016) pomoću paketa „*summarytools*“(Comtois, 2014).

U nastavku su prikazani i *gridovi* vrijednosti pojedinih indeksnih svojstava uzoraka, odnosno čvrstoće dobivene terenskom krilnom sondom, načinjeni *kriging* metodom koji su uvezeni u *ArcMap* (glavni modul softvera *ArcGIS Desktop*) te dodatno obrađeni različitim alatima programa. Kao podloga za izradu karata korištene su Osnovne geološke karte list Našice i Slavonski Brod.

Područje interpolacije dodatno je suženo alatom „*buffer*“ kojim je kreirana zona oko svake bušotine polumjera 2 kilometra radi ograničavanja područja interpolacije, a vanjski su dijelovi uklonjeni alatom „*clip*“.

Na slici 6.1 prikazana je raspodjela uzoraka prema ASTM klasifikaciji.



Slika 6.1 Raspodjela uzoraka prema ASTM klasifikaciji

Tablica 6-1 Deskriptivna statistika obrađenih podataka

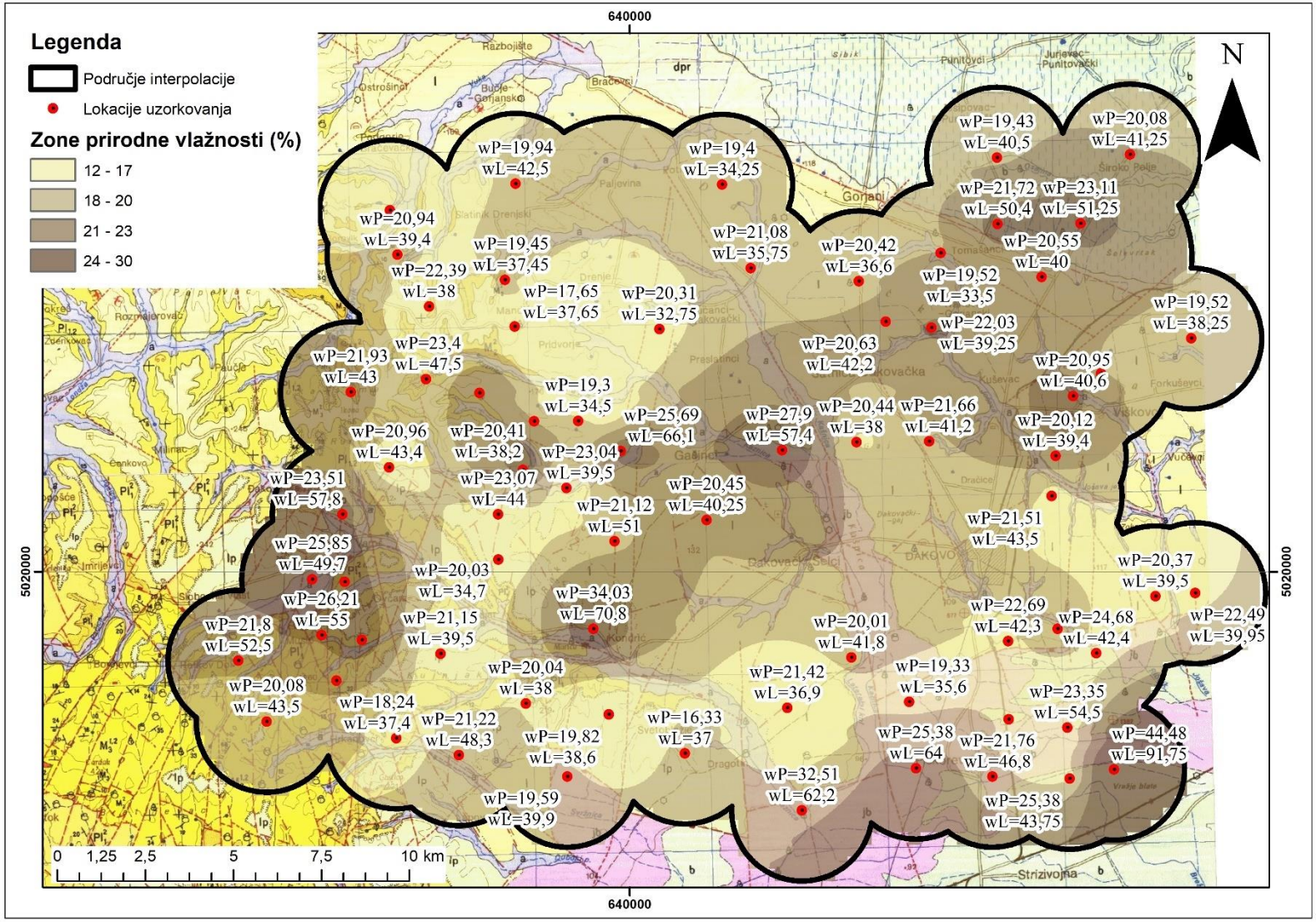
	Prirodna vlažnost	Granica plastičnosti	Granica tečenja	Indeks plastičnosti	Indeks konzistencije	Indeks tečenja	Vršna čvrstoća 0,15 m	Rezidualna čvrstoća 0,15 m	Vršna čvrstoća 0,30 m	Rezidualna čvrstoća 0,30 m
Srednja vrijednost	18,76	22,31	44,63	22,32	1,17	-0,17	57,17	15,42	65,76	24,54
Standardna devijacija	4,01	3,93	9,87	6,76	0,19	0,19	34,28	7,87	38,64	9,95
Min	10,46	16,33	32,75	12,44	0,87	-0,78	5,00	2,00	16,00	8,00
Q1	16,14	20,12	38,25	17,96	1,05	-0,28	30,00	9,00	38,00	19,00
Medijan	18,39	21,19	41,43	19,90	1,10	-0,10	51,00	15,00	48,00	25,00
Q3	21,73	23,11	49,40	25,82	1,28	-0,05	84,00	20,00	92,00	31,00
Max	30,76	44,48	91,75	47,27	1,78	0,13	136,00	43,00	158,00	51,00
Srednje apsolutno odstupanje	3,84	1,82	5,08	4,37	0,14	0,14	34,10	7,41	32,62	8,90
Interkvartilni raspon	5,39	2,93	10,79	7,66	0,23	0,23	53,50	10,75	54,00	12,00
Koeficijent Varijacije	0,21	0,18	0,22	0,30	0,16	-1,09	0,60	0,51	0,59	0,41
N bušotina	74,00	74,00	74,00	74,00	74,00	74,00	74,00	74,00	74,00	74,00
N podataka	74,00	74,00	74,00	74,00	74,00	74,00	66,00	62,00	29,00	26,00
N podataka %	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	89,19	83,78	39,19	35,14

6.1. Zoniranje prirodne vlažnosti

Na slici 6.2. prikazana je karta raspodjele prirodne vlažnosti u prostoru s prikazanom granicom plastičnosti i granicom tečenja za pojedinu bušotinu. Prema interpoliranoj karti može se procijeniti stanje konzistencije tla na terenu:

- **polučvrsto** stanje za koje je vlažnost manja od granice plastičnosti w_P,
- **plastično** stanje za koje je vlažnost između granice plastičnosti w_P i granice tečenja w_L.

S obzirom na to da se radi o prirodnoj vlažnosti koja uvelike ovisi o vanjskim faktorima, takva karta ima kratkoročnu primjenu. Vrijednosti prirodne vlažnosti za istraživanu lokaciju kreću se u rasponu od 10,46 do 30,76 %.



Slika 6.2 Karta zona prirodne vlažnosti

6.2. Zone po granicama plastičnih stanja i indeksu plastičnosti

Mnoga svojstva tla mogu se usporediti s razlikom između granice tečenja i granice plastičnosti, odnosno indeksom plastičnosti (tj. mjerom količine vode potrebne da bi tlo prešlo iz polučvrstog u tekuće stanje).

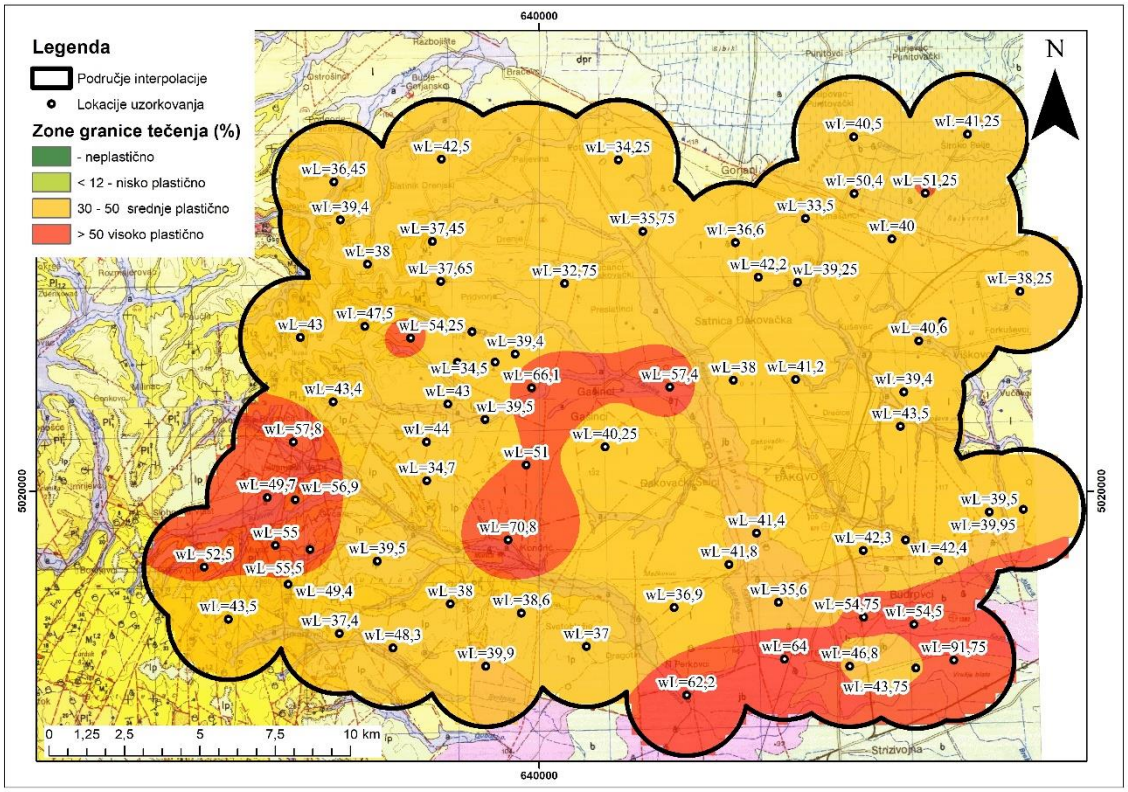
Čvrstoća i druga svojstva tla vezana su uz granice plastičnih stanja (w_S, w_P, w_L), pa se mnoga bitna svojstva tla vrlo dobro mogu usporediti s odnosom između ovih graničnih vrijednosti vlažnosti za neko tlo te stvarnom prirodnom vlažnosti odnosno indeksnim pokazateljima (I_P, I_c, I_L). Po nekim autorima na granici tečenja tlo ima čvrstoću od oko 1 do 2 kPa, a na granici plastičnosti oko 100 do 200 kPa (Zlatović, 2006).

U tablici 6-2 prikazane su karakteristične vrijednosti granica plastičnih stanja i indeksa plastičnosti uobičajene za minerale glina.

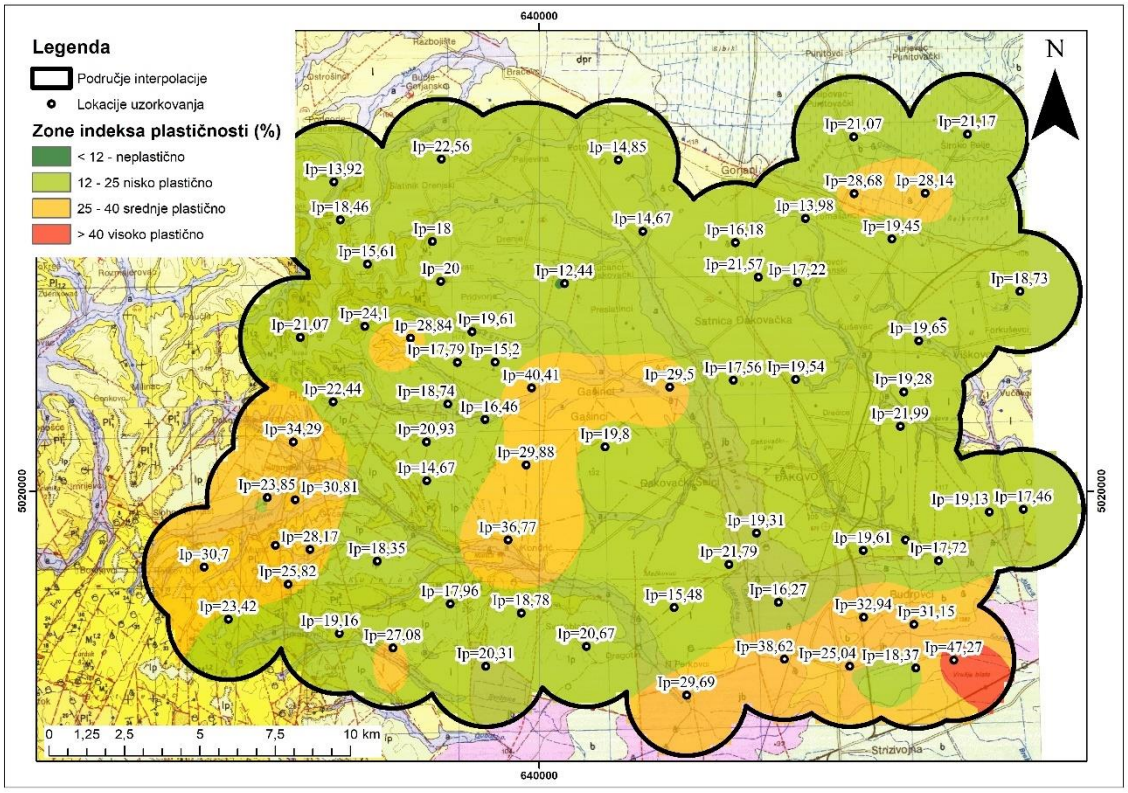
Tablica 6-2 Karakteristične vrijednosti granica plastičnih stanja i indeksa plastičnosti (Zlatović, 2006)

	Granica plastičnosti	Granica tečenja	Indeks plastičnosti
Kaolinit	oko 30 %	oko 50 %	oko 20 %
Ilit	oko 50 %	oko 100 %	oko 50 %
Montmorilonit	oko 70 %	oko 140 % do 700 %	oko 70 % do 600 %

Tlo se može klasificirati na način prikazan na slikama 6.3 i 6.4 u skladu s granicom tečenja i indeksom plastičnosti prema tablici 3-1. prema kojoj su uzorci srednje do visoko plastični.

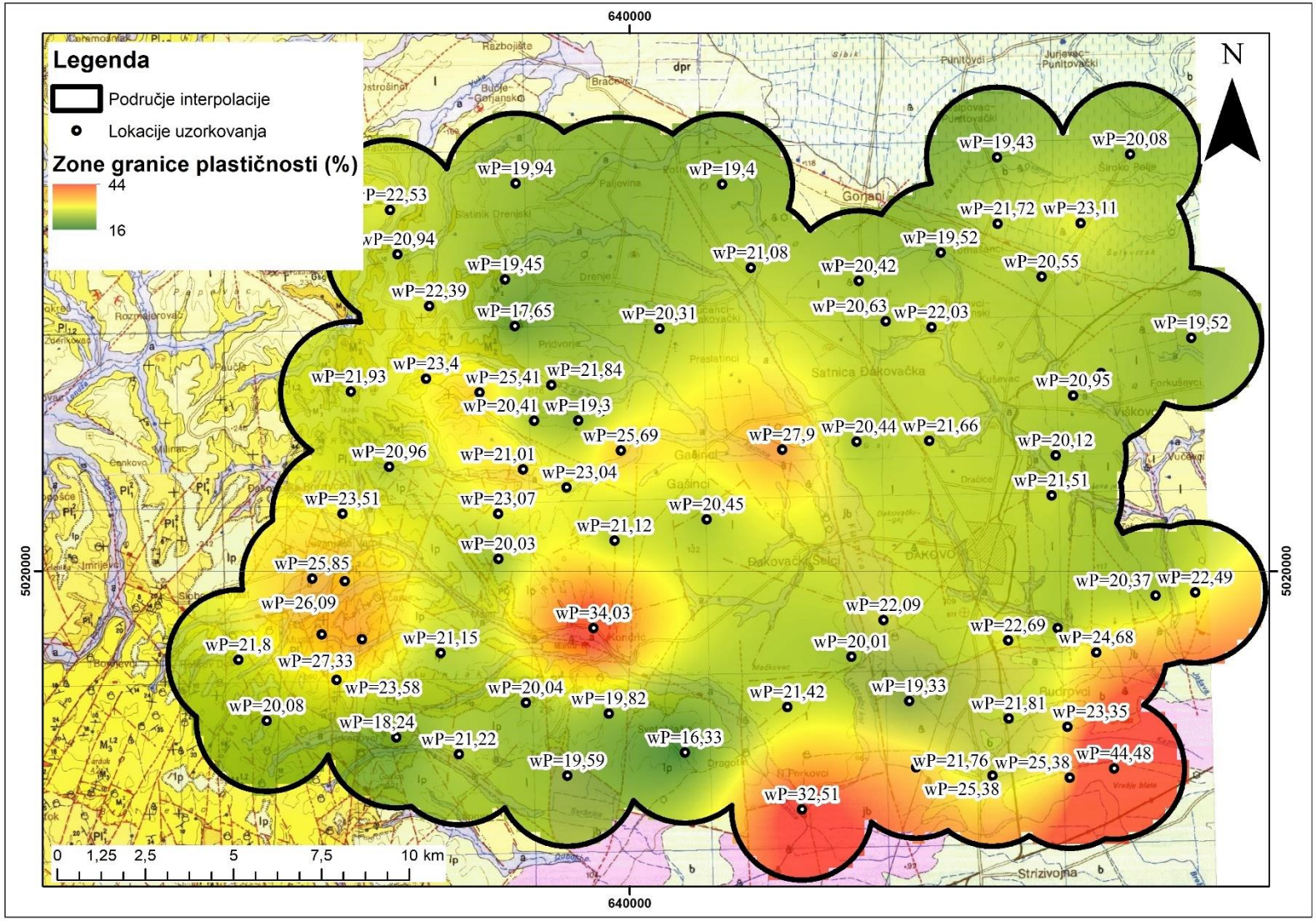


Slika 6.3 Karta zona granice tečenja klasificirane prema tablici 3-1

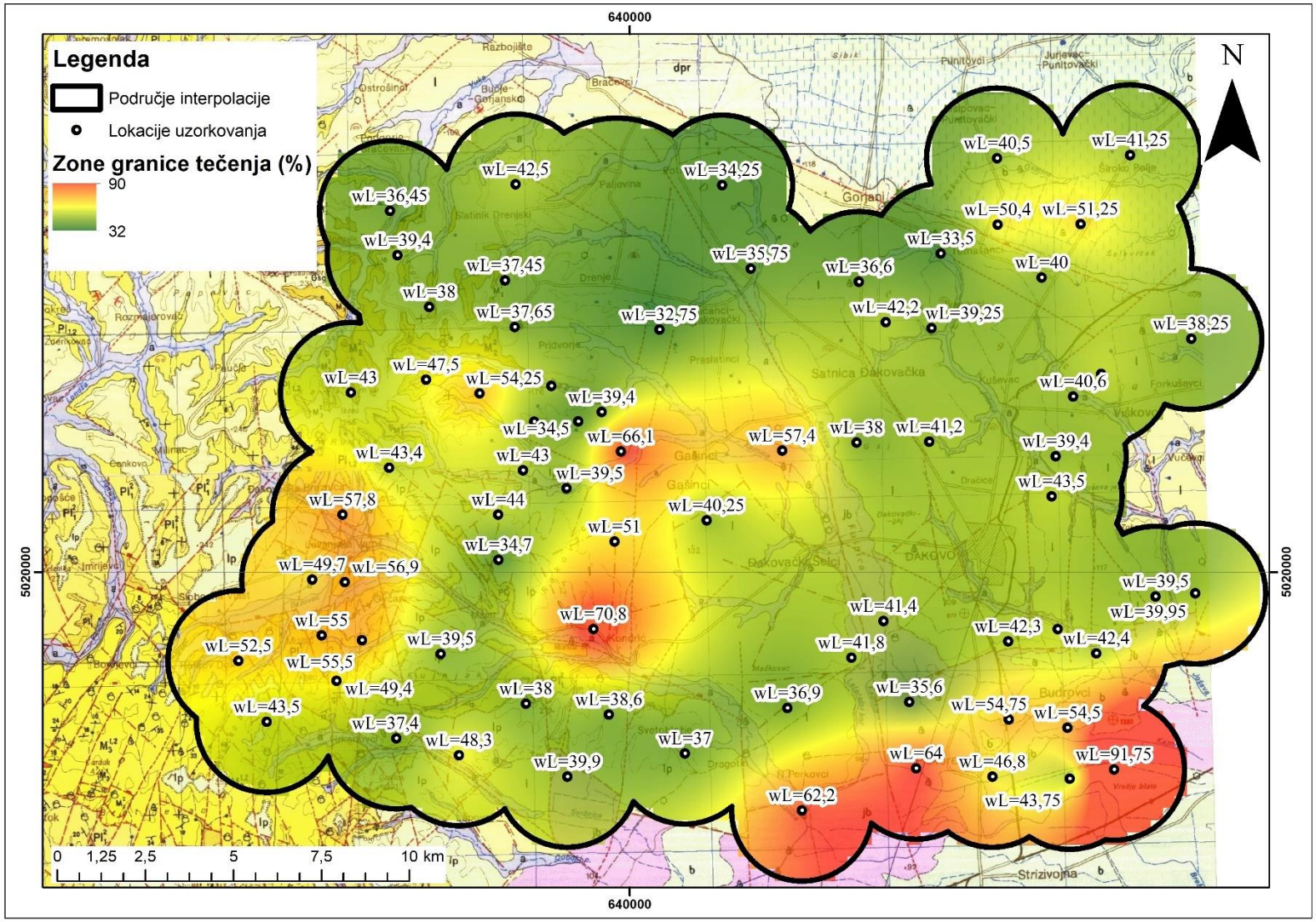


Slika 6.4 Karta zona indeksa plastičnosti klasificirane prema tablici 3-1

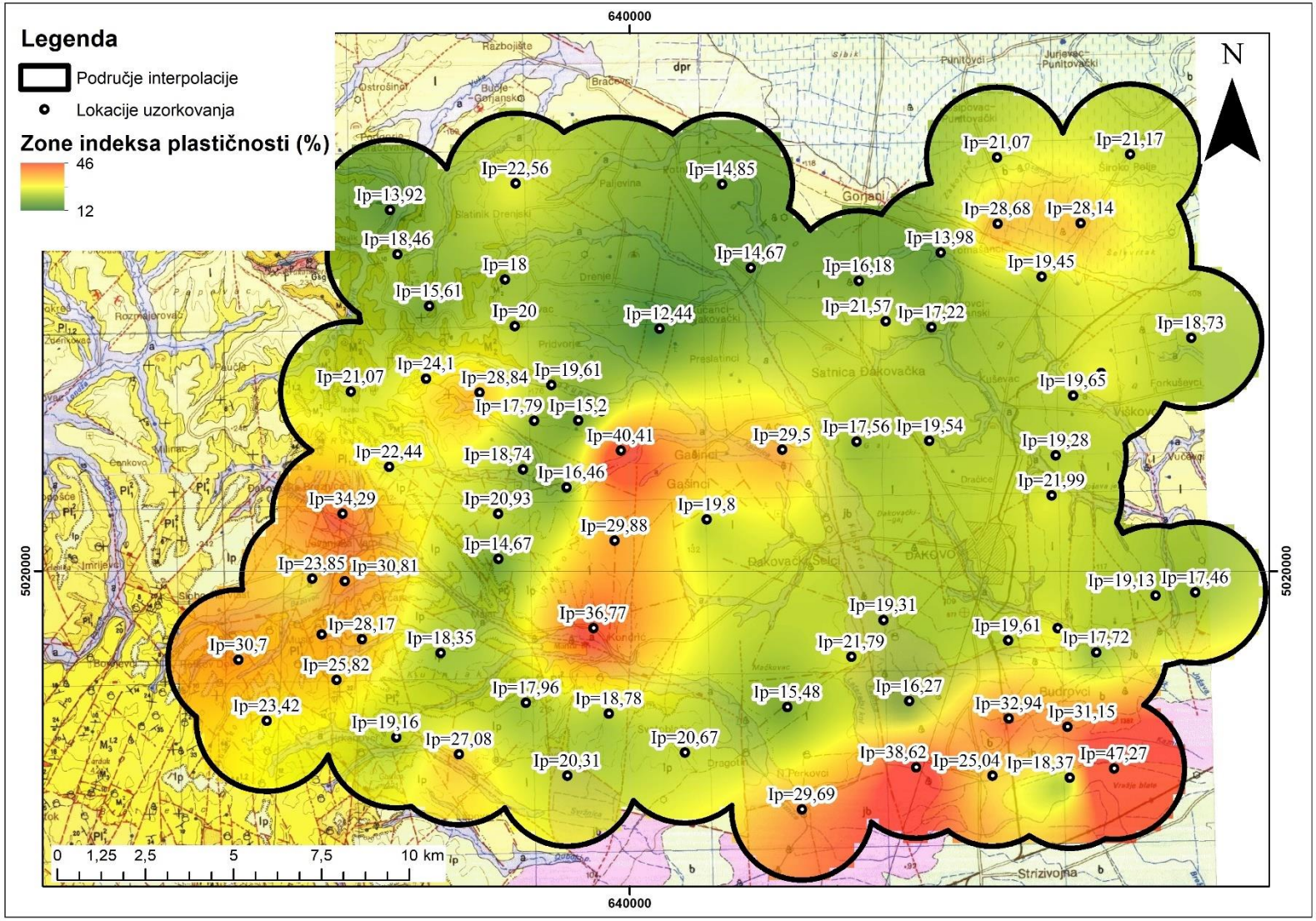
Detaljnijom podjelom na karti zona granice plastičnosti (slika 6.5) raspon vrijednosti kreće se od 16,33 do 44,48 %, raspon vrijednosti na karti granice tečenja (slika 6.6) je od 32,75 do 91,75, a vrijednosti indeksa plastičnosti (slikaa 6.7) kreću se u rasponu od 12,44 do 47,27 (slike 6.5 – 6.7). Prema kartama se može pretpostaviti da na području istraživane lokacije prevladava kaolinitska glina, a na zapadu i u središnjem te jugoistočnom dijelu opaža se pojava ilita. S obzirom na to da u zapadnom dijelu istraživanog područja imamo pojavu lapora, meke stijene sastavljene od različitog omjera kalcita i gline, može se pretpostaviti da dezintegracijom takvih naslaga nastaje ilitična glina koja je vjerojatno transportirana glavnim tokovima rijeka na jugoistok lokacije gdje se ponovno opažaju veće vrijednosti granica plastičnih stanja i indeksa plastičnosti. Na ostatku područja prevladava kaolinska glina koja odgovara genskom tipu pleistocenskih i holocenskih taložina, odnosno prapora (sastavljenog od kvarca i feldspata koji se troši u gline) i ekvivalenata iz vodenog okoliša.



Slika 6.5 Karta zona granice plastičnosti



Slika 6.6 Karta zona granice tečenja



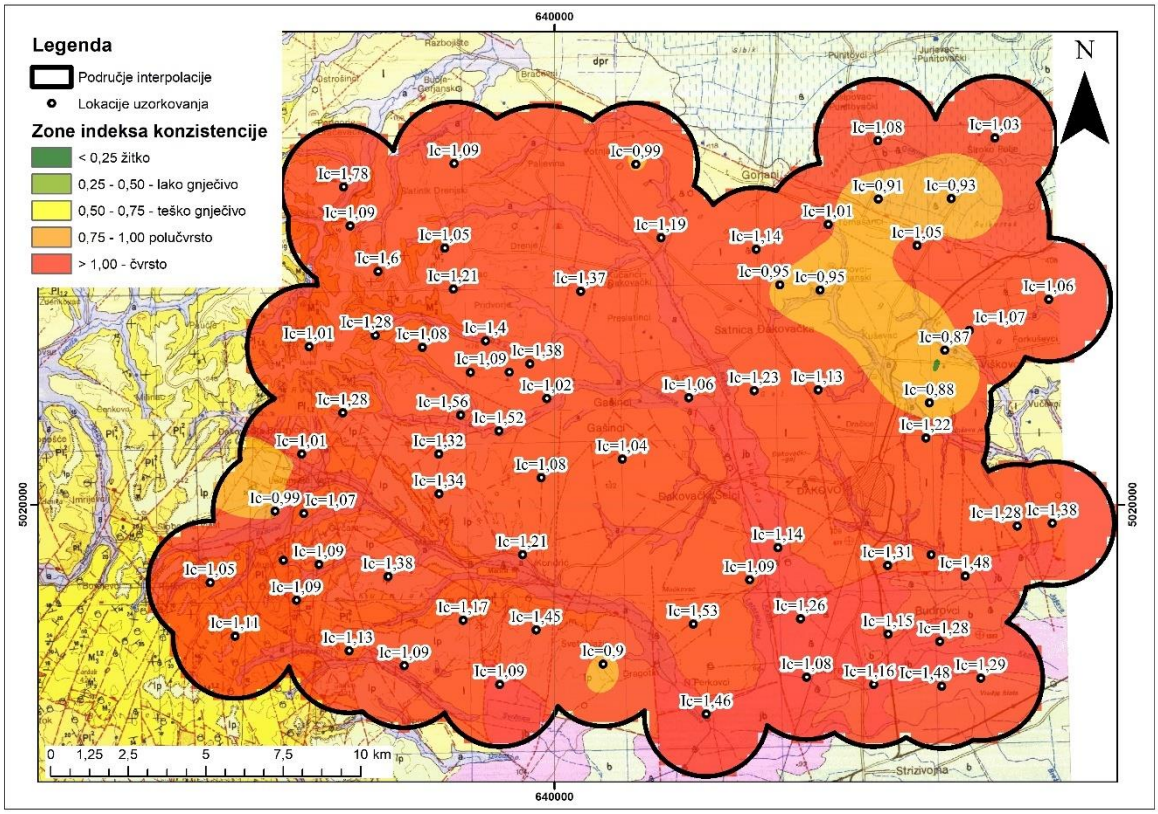
Slika 6.7 Karta zona indeksa plastičnosti

6.3. Zone indeksa konzistencije i indeksa tečenja

Indeks konzistencije I_c kvocijent je razlike granice tečenja i prirodne vlažnosti s indeksom plastičnosti, a definiran je u 3. poglavlju. Što je veća vrijednost I_c, to je tlo čvršće. Modelom Cam-Clay i teorijom kritičnog stanja pojedini su autori utvrdili da je nedrenirana čvrstoća pri granici plastičnosti veća otprilike sto puta od nedrenirane čvrstoće pri granici tečenja. Kako na granici tečenja ona iznosi oko 2 kPa, proizlazi da je nedrenirana čvrstoća na granici plastičnosti oko 200 kPa za sva tla. Rezultati istraživanja odnose se na tlo u kritičnom stanju, to jest za trajnu, a ne vršnu čvrstoću. Prema Woodu (1990) navodi se da je analizama za kritična stanja tla ustanovljena približna korelacija $c_u = 2 \cdot 100^{Ic}$. Za normalno konsolidirana i neosjetljiva tla takav se rezultat može očekivati. Budući da su u prirodi gotovo sva tla prekonsolidirana, neovisno o tome je li uzrok prekonsolidacije bio mehaničke, kemijske ili neke druge vrste, ta korelacijska veza nije nužno primjenjiva (Mulabdić et al., 2000).

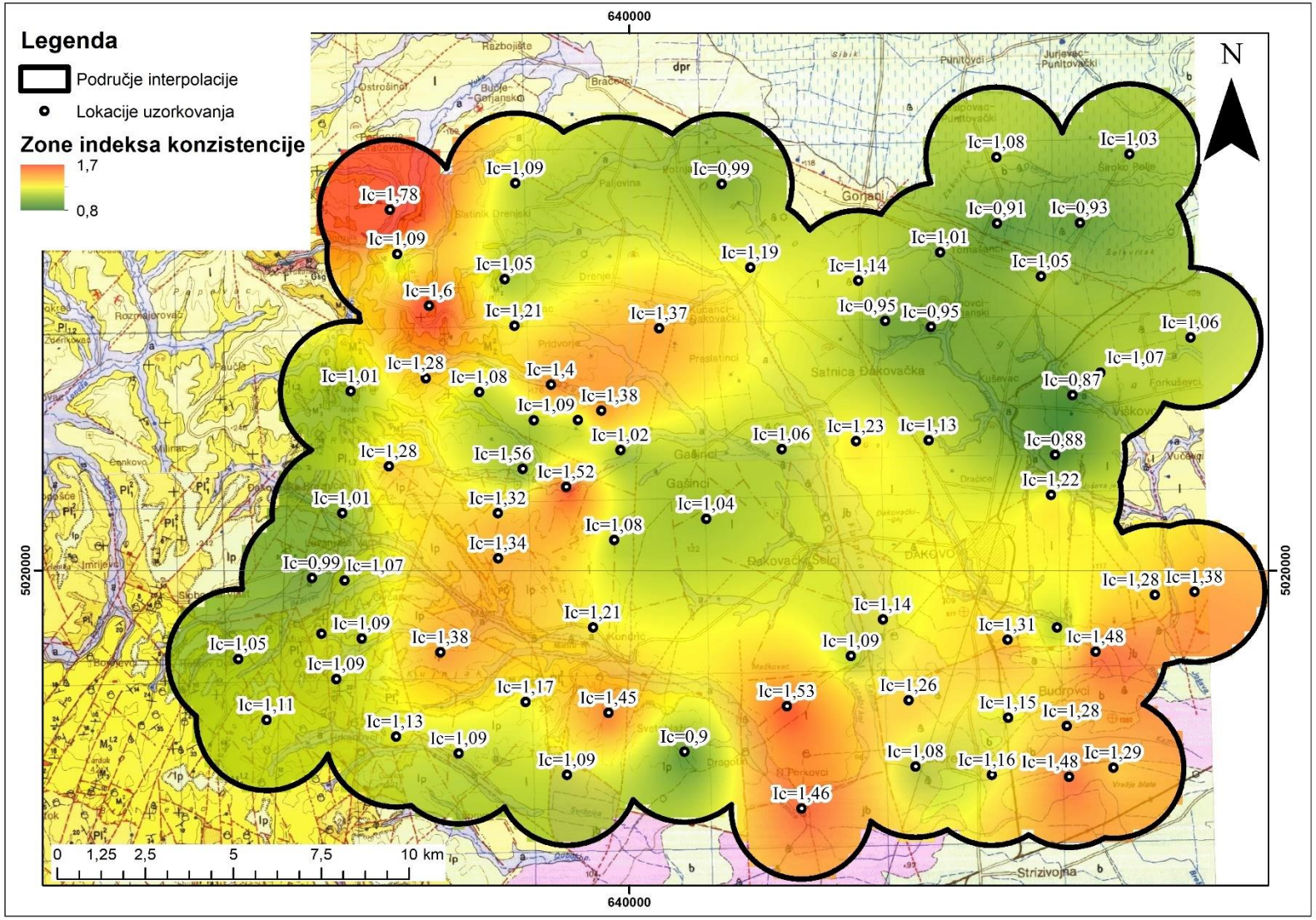
Indeks tečenja vjerojatno bolje opisuje svojstva plastičnog tla nego granice plastičnih stanja, odnosno granica plastičnosti i granica tečenja. Vrijednosti granica tečenja i plastičnosti dobivaju se iz rezultata poremećenog tla u laboratoriju, ali isto tlo može imati drugačiju *in situ* konzistenciju. Ako je prirodna vlažnost veća od vrijednosti granice tečenja, tada je indeks tečenja veći od 1,0 i evidentno je da će se takvo tlo pri poremećaju pretvoriti u žitku masu. U takvim slučajevima pretpostavlja se da je tlo nekonsolidirano s nedreniranom posmičnom čvrstoćom u rasponu između 15 i 50 kPa. Većina koherentnih tala ima vrijednosti indeksa tečenja u rasponu od 1,0 do 0,0. Niže vrijednosti prirodne vlažnosti koherentnih tala pokazuju da je tlo bilo pod većim pritiskom, pa je vrijednost indeksa tečenja bliža nuli. Ako je vrijednost prirodne vlažnosti manja od vrijednosti granice plastičnosti, tada je indeks tečenja manji od 0,0 i tlo se ne može preoblikovati. U tom se slučaju najvjerojatnije radi o prekonsolidiranom tlu. U takvom stanju tlo će imati nedreniranu posmičnu čvrstoću u rasponu od 50 do 250 kPa (Smith, 2014).

Prema općenitoj klasifikaciji indeksa konzistencije za tlo (tablica 3-2) može se zaključiti da je većina područja prekrivena glinom u čvrstom stanju konzistencije, a manji dio u polučvrstom što je i prikazano kartom na slici 6.8.

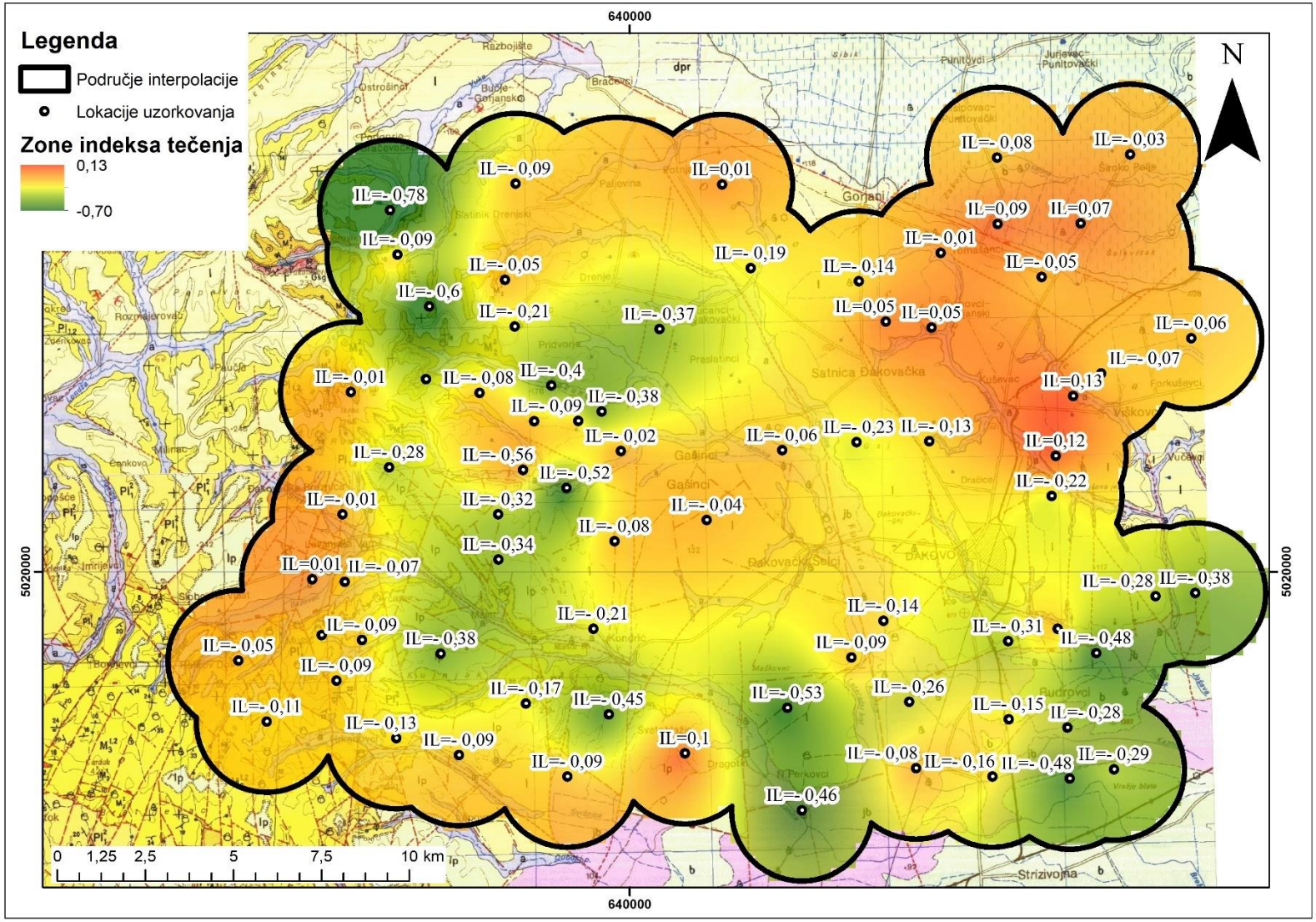


Slika 6.8 Karta zona indeksa konzistencije prema klasifikaciji iz tablice 3-2

U slučaju detaljnije podjele (slike 6.9 i 6.10) izdvajaju se područja povišenih indeksa konzistencije. Detaljnijom provjerom nekih od lokacija, primjerice lokacije s oznakom laboratorijskog uzorka 17-008-035 (I_C = 1,78), uočava se da je uzorkovano u području gdje je ishodišni materijal riječni sediment koji je bio podvrgnut višestrukim procesima taloženja, odnosno prekonsolidiran. Sličan se trend primjećuje i na još nekim lokacijama, pa se može zaključiti da takvo tlo ima povišen indeks konzistencije, odnosno niži indeks tečenja.



Slika 6.9 Karta zona indeksa konzistencije



Slika 6.10 Karta zona indeksa tečenja

6.4. Zone vršne i rezidualne nedrenirane posmične čvrstoće

Nedrenirana je čvrstoća maksimalno posmično naprezanje u tlu pri nedreniranim uvjetima koja se postižu kod brzog smicanja. Njezina vrijednost ovisi o postupku ispitivanja.

Nedrenirana čvrstoća (c_u) mjeri se na neporemećenom uzorku tla (na razne načine), a koristi se vrlo često kao kriterij za klasifikaciju tla po krutosti. Kategorije tla prema c_u kreću se od (vrlo) mekog do (vrlo) krutog. Norma ISO 14688 (2006) definira da je nedrenirana čvrstoća polovina jednoosne čvrstoće. Nedrenirana čvrstoća određena na neki drugi način može imati drugačiju vrijednost (npr. u pokusu krilnom sondom). U rasponu vrijednosti c_u kojima se određuju kategorije krutosti tla utjecaj načina određivanja c_u na izbor kategorije krutosti tla ne bi trebao biti značajan.

Norma ISO 14688 (2006) govori o vrijednosti nedrenirane čvrstoće (mala do velika), a prikazana je u tablici 6-3.

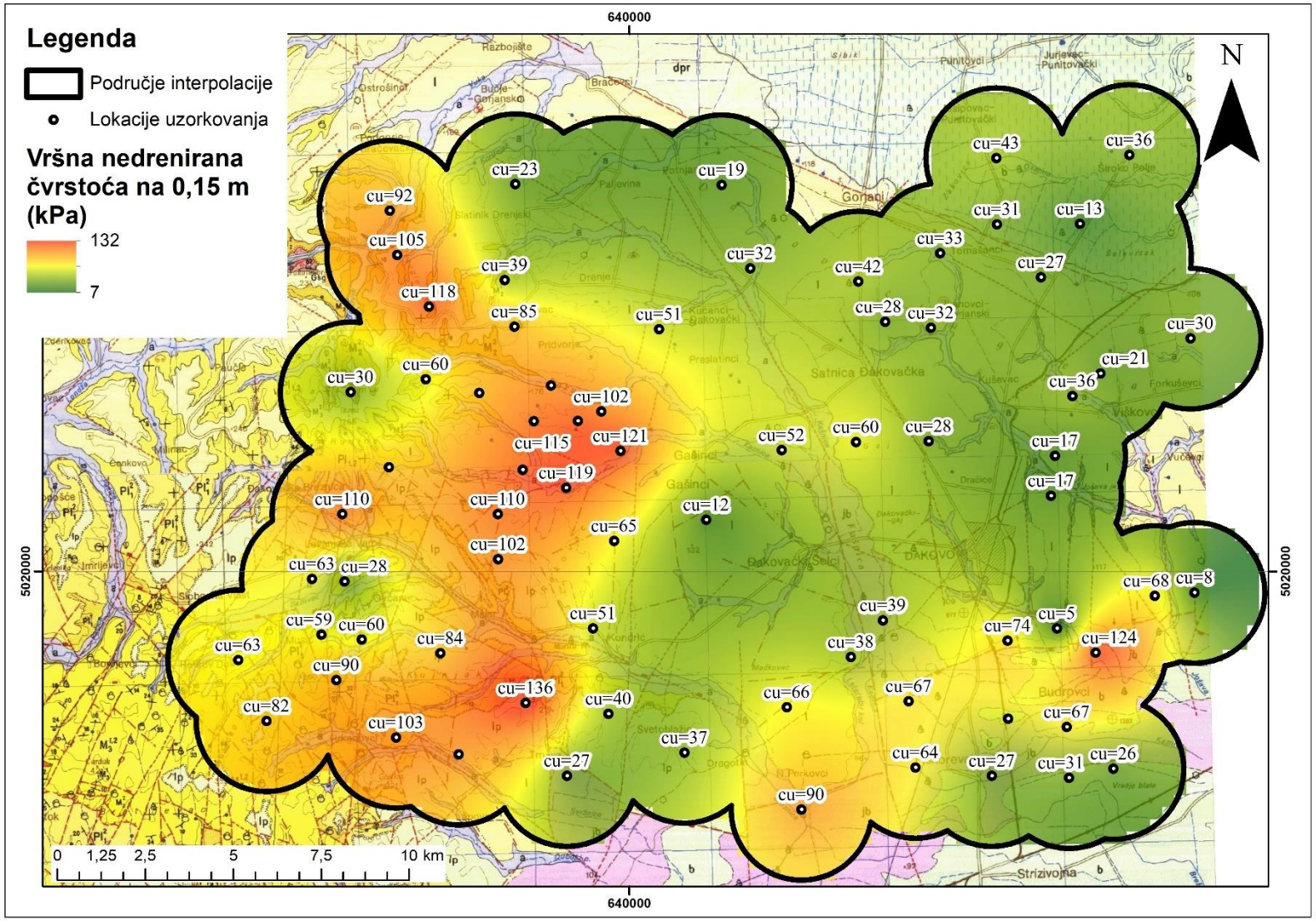
Tablica 6-3 Nedrenirana posmična čvrstoća glina (ISO 14688, 2006)

Nedrenirana posmična čvrstoća glina	**Nedrenirana posmična čvrstoća c_u (kPa)**
Izrazito niska	< 10
Jako niska	10 to 20
Niska	20 to 40
Srednja	40 to 75
Visoka	75 to 150
Jako visoka	150 to 300
Izrazito visoka[a]	> 300
[a] Materijali s nedreniranom posmičnom čvrstoćom većom od 300 kPa mogu se ponašati kao meka stijena i treba ih opisivati prema normi ISO 14689-1.	

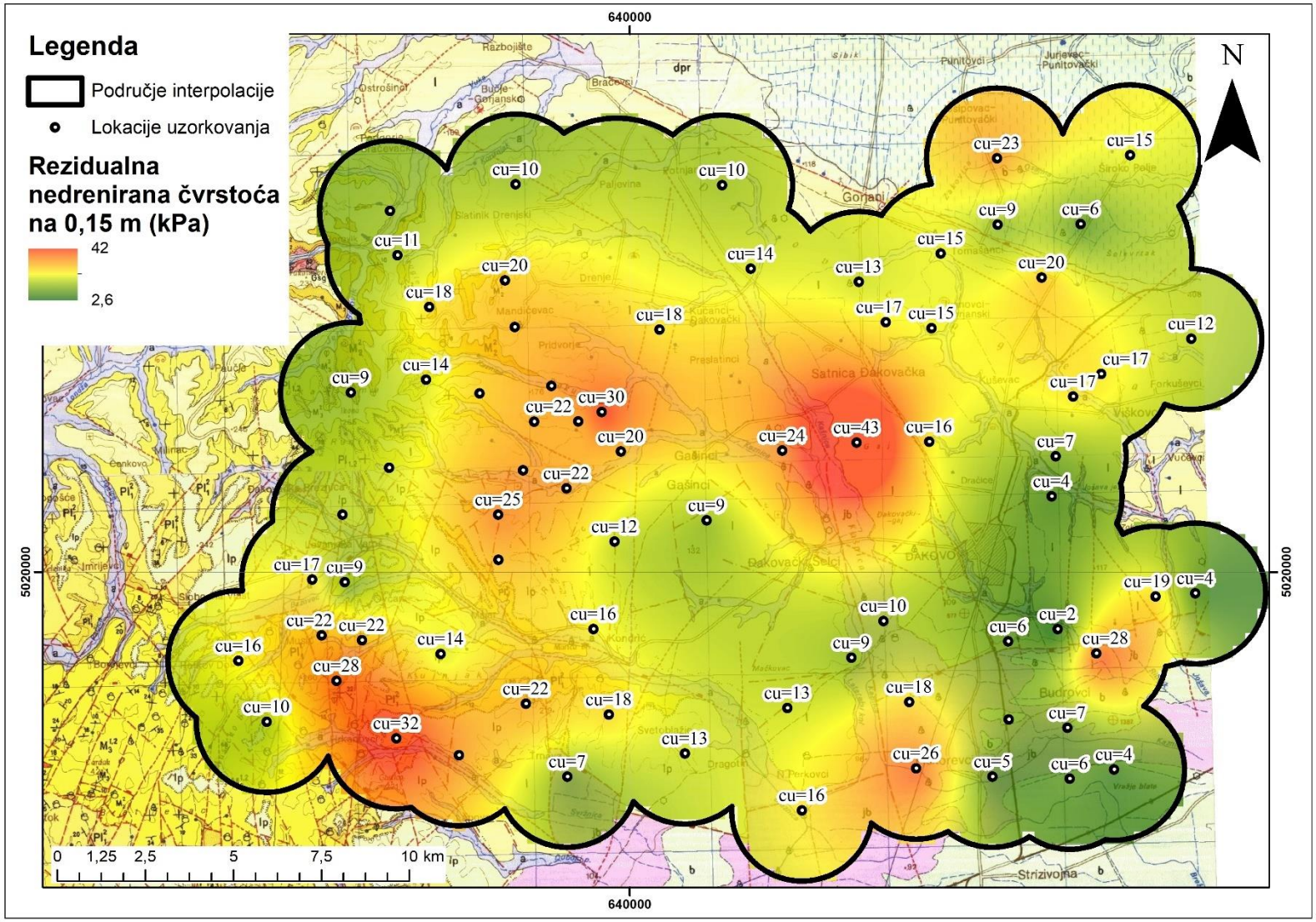
Karte zona nedrenirane posmične čvrstoće (slike od 6.11 do 6.14) napravljene su za dvije dubine uzorkovanja od 0,15 m i 0,30 m. Vrijednosti vršne čvrstoće za ispitivanja na dubini od 0,15 m nalaze se u rasponima od 5 do 136 kPa, a za rezidualnu čvrstoću od 2 do 43 kPa. Nedrenirana posmična čvrstoća nije mjerena na svim lokacijama, kao što je slučaj kod indeksnih svojstava tla; vršna je čvrstoća mjerena na 66 lokacija od 74, a rezidualna na 62 lokacije od 74 moguće. Na dubini od 0,30 m vrijednosti nedrenirane čvrstoće kreću se u rasponu od 16 do 158 kPa, a rezidualne u rasponu od 8 do 51 kPa. Uočava se očekivani trend rasta čvrstoće s dubinom, što je i prikazano na slici 3.5. Potrebno je istaknuti da je na dubini od 0,30 m napravljeno znatno manje mjerenja, točnije na 29 lokacija od 74 za vršnu, a za rezidualnu 26 lokacija od 74 moguće.

Prema tablici 6-3 nedrenirana se čvrstoća može klasificirati kao visoka u zapadnom i jugoistočnom dijelu, dok je prema sjeveroistočnom dijelu nižih vrijednosti.

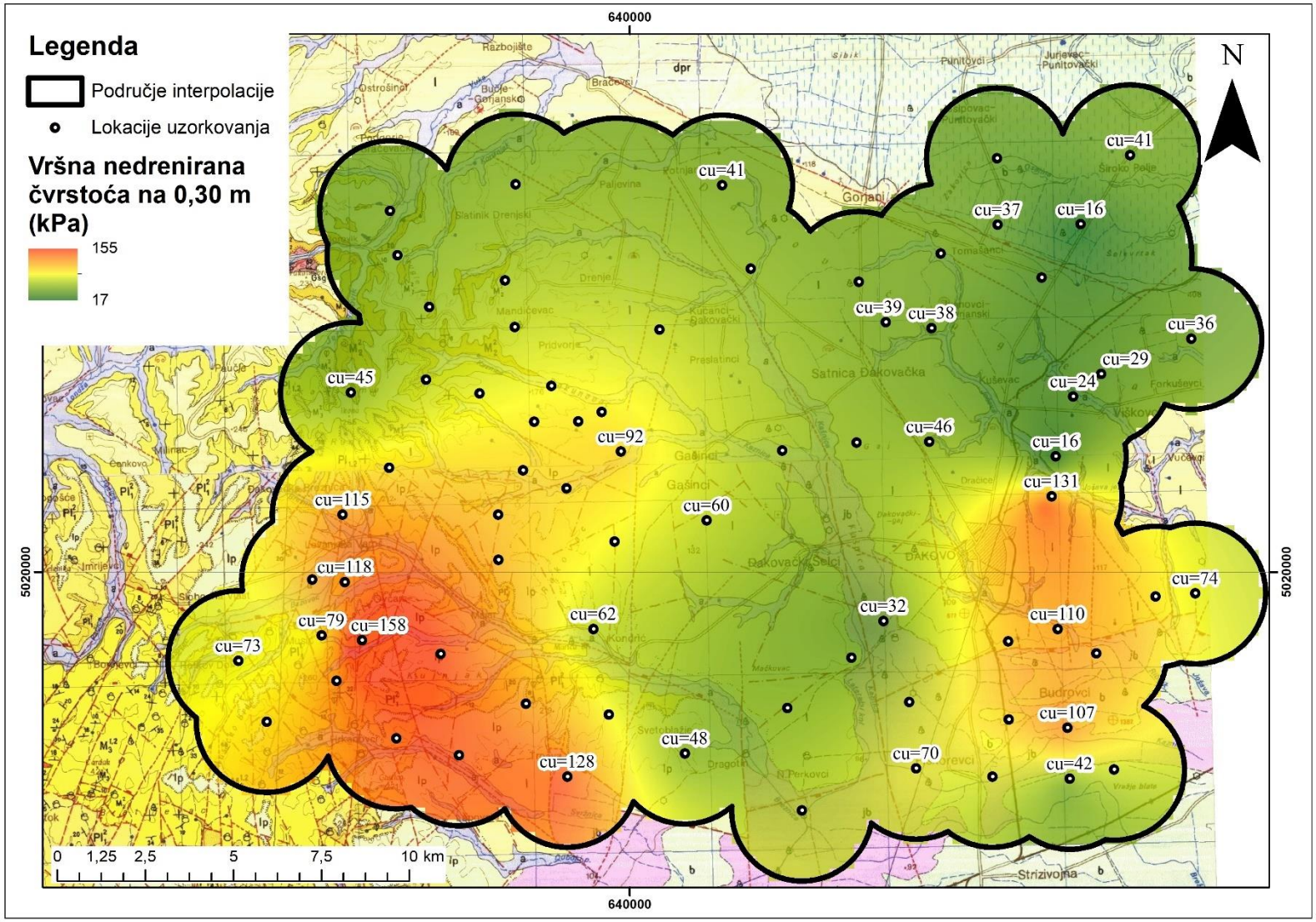
Na kartama (slika 6.11 – 6.12) ponovno se uočava izdvajanje područja različitih geoloških građa na kartama za dubinu 0,15 m kao što se uočava i na prethodnim kartama. Takav trend ponavlja se i na kartama (slika 6.13 – 6.14) za dubinu 0,30 m, no ipak treba uzeti u obzir znatno manji broj podataka, pa su te karte manje pouzdane, odnosno njihova interpretacija može biti višeznačna.



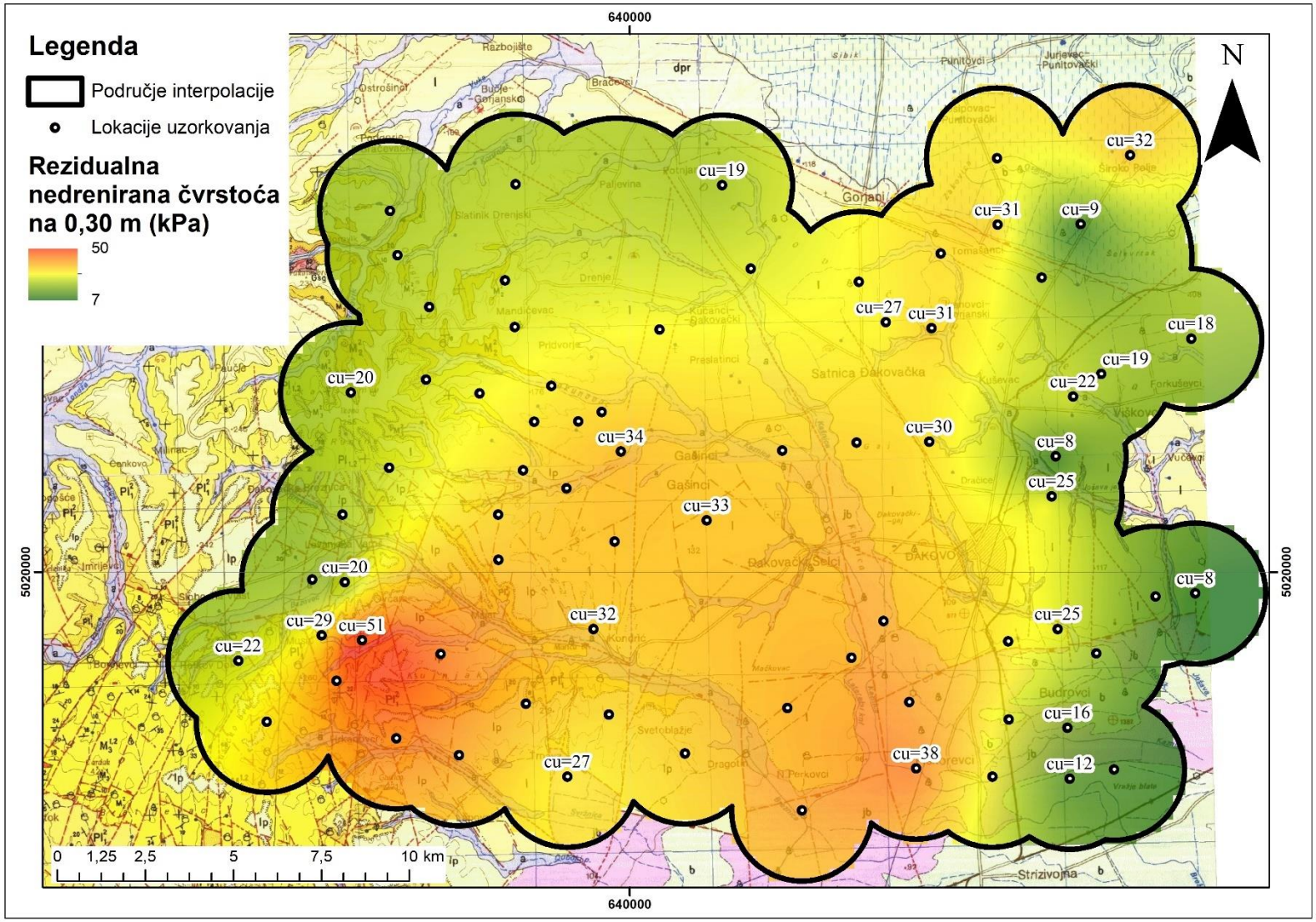
Slika 6.11 Karta zona vršne nedrenirane čvrstoće na dubini od 0,15 m



Slika 6.12 Karta zona rezidualne nedrenirane čvrstoće na dubini od 0,15 m



Slika 6.13 Karta zona vršne nedrenirane čvrstoće na dubini od 0,30 m



Slika 6.14 Karta zona rezidualne nedrenirane čvrstoće na dubini od 0,30 m

6.5. Zone osjetljivosti tla

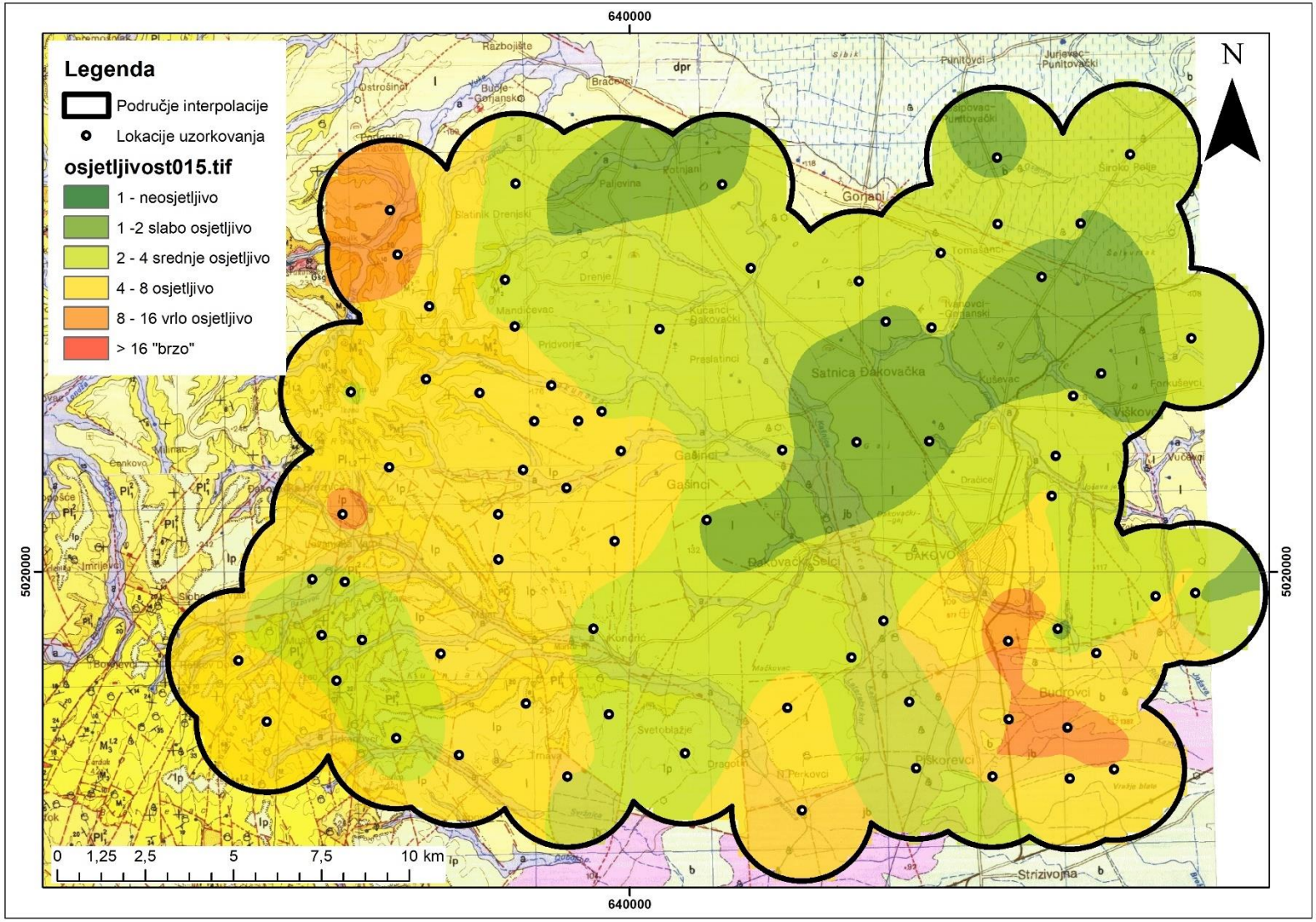
Normalno konsolidirane gline najčešće imaju osjetljivost u rasponu od 5 do 10, no postoje, primjerice, gline u Kanadi i Skandinaviji s osjetljivošću od 100 do 150 i poznate su pod nazivom brze gline. Osjetljivost može varirati prema vlažnosti gline. U tablici 6-4 prikazana je klasifikacija glina prema osjetljivosti.

Tablica 6-4 Klasifikacija glina prema osjetljivosti (prilagođeno iz Smith, 2014)

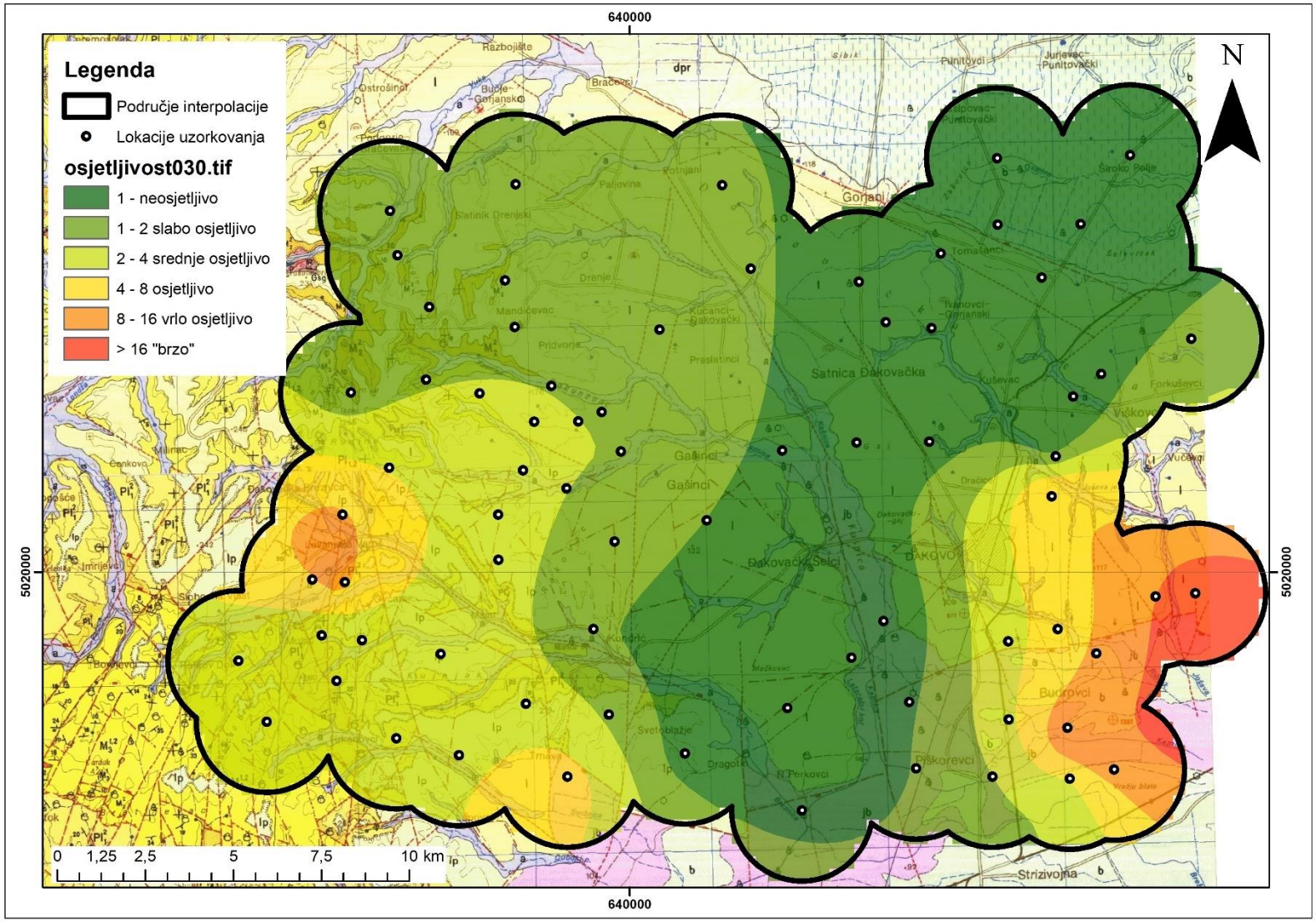
S_t	Klasifikacija
1	neosjetljive
1 – 2	slabo osjetljive
2 – 4	srednje osjetljive
4 – 8	osjetljive
8 – 16	jako osjetljive
> 16	brze (mogu biti do 150)

Karta osjetljivosti dobivena je tako da su podijeljeni *gridovi* interpoliranih vrijednosti vršne i rezidualne čvrstoće za dubinu 0,15 m i 0,30 m.

Prema kartama (slika 6.15 i 6.16) uočava se da osjetljivost opada s dubinom. S obzirom na manju količinu podataka o rezidualnoj čvrstoći na dubinama od 0,15 m i 0,30 m, obje su karte kreirane samo da bi se demonstrirala njihova potencijalna upotrebljivost u svrhu procjene osjetljivosti te se bez dodatnih podataka ne mogu primjenjivati.



Slika 6.15 Karta zona osjetljivosti tla na dubini od 0,15 m



Slika 6.16 Karta zona osjetljivosti tla na dubini od 0,30 m

7. Zaključak

Ciljevi rada bili su prikupiti rezultate dobivenih klasifikacijskim pokusima u geomehaničkom laboratoriju i rezultate ispitivanja terenskom krilnom sondom. Osim toga, pomoću njih kreirati bazu podataka u GIS okruženju i izraditi karte zona po određenim geomehaničkim parametrima, a zatim usporediti zone s geološkom građom terena, odnosno utvrditi potencijalnu vezu zona s geološkim jedinicama na listovima OGK koje su obuhvaćene istraživanim područjem.

Indeksna svojstva tla određena su u laboratoriju obradom uzoraka koji su prikupljeni ručnim uzorkivačem iz dva raspona dubine 0,0 – 0,30 m i 0,30 – 0,60 m na način opisan u 3. poglavlju. Vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće određene su na terenu, odnosno terenskom krilnom sondom na dubinama od 0,15 m i 0,30 m. Podaci su obrađeni statistički (tablica 6-1) te su interpolirani u softveru *Surfer*, nakon čega su dobiveni *gridovi* uvezeni u *ArcGIS Desktop* (*ArcMap*). Alatima koji su dostupni u *ArcMapu* obrađeni su *gridovi* i kreirano je suženo područje interpolacije te je ostatak izvan zone uklonjen zbog vjerojatnosti da za veću udaljenost od dva kilometra interpretacija nije jednoznačna.

Kartama zona plastičnih stanja i indeksa plastičnosti izrađenih na temelju terenskih i laboratorijskih pokusa prikazano je da se vrijednost granice plastičnosti kreće u rasponu od 16 do 44 %, granice tečenja od 33 do 92 %, a indeksa plastičnosti od 12 do 47 %. U tablici 3-1 prikazana je općenita podjela tla prema granici tečenja i indeksu plastičnosti, što pokazuje da je tlo na istraživanom području srednje do visoko plastično. Na slikama 6.3 – 6.5 prikazana je preciznija podjela unutar navedenih raspona te je uočeno da se određena područja izdvajaju, a ona u određenoj mjeri odgovaraju geologiji područja. Tako se, primjerice, izdvaja jugozapadno područje, odnosno padine gore Dilj, a ishodišni materijal gline koja se ondje nalazi jest lapor.

Kartama zona indeksa konzistencije i indeksa tečenja izrađenih na temelju dobivenih podataka prikazano je da su vrijednosti indeksa u rasponu od 0,87 do 1,78 % (za I_C) i od -0,78 do 0,13 % (za I_L). Prema općenitoj klasifikaciji indeksa konzistencije za tlo (tablica 3-2) može se zaključiti da je većina područja prekrivena glinom u čvrstom stanju, a manji dio u polučvrstom. U slučaju detaljnije podjele (slika 6.8 i 6.9) izdvajaju se područja povišenih indeksa konzistencije. Može se uočiti da su to upravo područja gdje je ishodišni materijal, odnosno riječni sediment bio podvrgnut višestrukim procesima taloženja.

Takav trend uočljiv je i na drugim lokacija gdje je uzorkovano tlo od sličnog ishodišnog materijala, pa se zaključuje da takvo tlo ima povišen indeks konzistencije, odnosno niži indeks tečenja.

Karte zona nedrenirane posmične čvrstoće napravljene su za dvije dubine uzorkovanja od 0,15 m i 0,30 m. Vrijednosti vršne čvrstoće za ispitivanja na dubini od 0,15 m nalaze se u rasponima od 5 do 136 kPa, a za rezidualnu čvrstoću od 2 do 43 kPa. Nedrenirana posmična čvrstoća nije mjerena na svim lokacijama, kao što je slučaj kod indeksnih svojstava tla; vršna je čvrstoća mjerena na 66 lokacija od 74, a rezidualna na 62 lokacije od 74 moguće. Prema tablici 6-3 nedrenirana se čvrstoća može klasificirati kao visoka u zapadnom i jugoistočnom dijelu, dok je na ostalim lokacijama prema sjeveroistoku nižih vrijednosti. Na dubini od 0,30 m vrijednosti nedrenirane čvrstoće kreću se u rasponu od 16 do 158 kPa, a rezidualne u rasponu od 8 do 51 kPa. Uočava se očekivani trend rasta čvrstoće s dubinom, što je i prikazano na slici 3.5. Potrebno je istaknuti da je na dubini od 0,30 m napravljeno znatno manje mjerenja, točnije na 29 lokacija od 74 za vršnu, a za rezidualnu 26 lokacija od 74 moguće. Na tim se kartama ponovno uočava izdvajanje istih područja kao i karata za manju dubinu, no ipak treba uzeti u obzir znatno manji broj podataka, pa je zaključak da rezultati te karte mogu biti višeznačni.

Karta zona osjetljivosti kvocijent je karte zona vršne nedrenirane čvrstoće i karte zona rezidualne nedrenirane čvrstoće. S obzirom na to da je ovakva karta nastala interpolacijom već interpoliranih podataka, ona je isključivo informativnog karaktera.

U daljnjim fazama istraživanja za inženjerske potrebe trebalo bi se odrediti namjenu istraživane lokacije, odnosno radi li se o utjecaju građevine na okoliš, radi li se projektiranje i građenje objekta ili podloga za projektiranje ležišta mineralnih sirovina. Prema tome, uz postojeće podatke trebalo bi izvršiti daljinska istraživanja i inženjerskogeološko kartiranje na specifičnim lokacijama, a po potrebi geofizičke istražne radove te dodatne geotehničke radove. Konačni rezultat je interpretacija u obliku inženjerskogeološkog modela koji objedinjuje sve geološke, geofizičke i geotehničke parametre te služi geotehničkim inženjerima ili inženjerima rudarstva kao podloga za projektiranje.

8. Literatura

BS EN ISO 14688-2:2004 (2006), Geotechnical investigation and testing — Identification and classification of soil — Part 2: Principles for a classification, 11 str.

Fabijanović, S. (2013) Razvoj baze podataka o klizištima u Hrvatskoj, diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 61 str.

González de Vallejo, L.I., Ferrer, M. (2011) Geological engineering. CRC Press/Balkema, Leiden., 678 str.

Korolija, B. i Jamičić, D. (1989) Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, List Našice L 34–85. Geološki zavod Zagreb (1988. – 1989.), Savezni geološki zavod Beograd.

Korolija, B. i Jamičić, D. (1989) Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, Tumač za list Našice L 34–85. Geološki zavod Zagreb (1988.), Savezni geološki zavod Beograd, 36 str.

Kvasnička, P. i Domitrović, D., (2007) Mehanika tla: interna skripta. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 261 str.

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., Rhind, D. W. (2015): Geographic information science and systems, 4nd Edition, 461 str.

Malvić, T. (2005) Kriging, geostatistička interpolacijska metoda. Zagreb: Hrvatsko geološko društvo, 18 str.

Mulabdić, M. i Glavaš, T. (2000) Određivanje konzistentnog stanja tla. Građevinar, 52(12), str. 719-725.

Nonveiller, E. (1979) Mehanika tla i temeljenje građevina. Školska knjiga, Zagreb, 775 str.

Perković, D. (1998) Hidrogeološki katastar kao dio geografskog informacijskog sustava, magistarski rad, Poslijediplomski studij geologije, Zagreb, 106 str.

Rhind, D.W., Mounsey, H.M. (1989) Research Policy and Review 29: The Chorley Committee and "Handling Geographic Information". Environment and Planning A 21, str. 571–585.

Smith, I. (2014) Smith's elements of soil mechanics, Ninth edition. ed. Wiley/Blackwell, Chichester, West Sussex, 664 str.

Šparica, M., Buzaljko, R., Mojićević, M. (1986) Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, List Slavonski Brod L 34–97. „Geoinženjering“ OOUR institut za geologiju Sarajevo (1986.), Savezni geološki zavod Beograd.

Šparica, M., Buzaljko, R., Pavelić, D. (1986) Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, Tumač za list Slavonski Brod L 34–97. „Geoinženjering“ OOUR institut za geologiju Sarajevo (1986.), Savezni geološki zavod Beograd, 52 str.

Velić, I. (2007): An outline of the geology of Croatia. Field Trip guidebook and Abstracts. 9th International Symposium on Fossil Algae. Grgasović T. & Vlahović, I. (Ed.). Zagreb: Croatian Geological Survey, str. 5-7.

Wood, D. M. (1990) Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics Cambridge University Press, Cambridge. 462 str.

Zlatović, S. (2006) Uvod u mehaniku tla: udžbenik Tehničkog veleučilišta u Zagrebu. Zagreb: Tehničko veleučilište u Zagrebu, 110 str.

Web izvori:

Comtois, D. (2014) summarytools: Tools to Quickly and Neatly Summarize Data. URL: https://github.com/dcomtois/summarytools (1.9.2018)

RStudio Team (2016) RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, URL: http://www.rstudio.com/ (1.9.2018)