Utjecaj povećanja vlažnosti tla na stabilnost urbanih stabala hrasta kitnjaka u park-šumama grada Zagreba

Tumpa, Katarina

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry / Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:035279

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

Repository / Repozitorij:

University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

ŠUMARSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

ŠUMARSKI ODSJEK

DIPLOMSKI STUDIJ

URBANO ŠUMARSTVO, ZAŠTITA PRIRODE I OKOLIŠA

KATARINA TUMPA

UTJECAJ POVEĆANJA VLAŽNOSTI TLA NA STABILNOST URBANIH STABALA HRASTA KITNJAKA U PARK-ŠUMAMA GRADA ZAGREBA

DIPLOMSKI RAD

ZAGREB, RUJAN, 2018.

ŠUMARSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

ŠUMARSKI ODSJEK

UTJECAJ POVEĆANJA VLAŽNOSTI TLA NA STABILNOST URBANIH STABALA HRASTA KITNJAKA U PARK-ŠUMAMA GRADA ZAGREBA

DIPLOMSKI RAD

Diplomski studij: Urbano šumarstvo, zaštita prirode i okoliša

Predmet: Rasadnička proizvodnja ukrasnog bilja

Ispitno povjerenstvo:
1. Doc. dr. sc. Vinko Paulić
2. Doc. dr. sc. Damir Drvodelić
3. Izv. prof. dr. sc. Damir Ugarković

Student: Katarina Tumpa

JMBAG: 0178091171

Broj indeksa: 781/2016

Datum odobrenja teme: 20.04.2018

Datum predaje rada: 21.09.2018

Datum obrane rada: 28.09.2018

Zagreb, rujan 2018.

Dokumentacijska kartica

Naslov	Utjecaj povećanja vlažnosti tla na stabilnost urbanih stabala hrasta kitnjaka u park-šumama grada Zagreba
Title	Effects of increased soil moisture on stability of urban sessile oak trees in the City of Zagreb park-forests
Autor	Katarina Tumpa
Adresa autora	Gračanska cesta 14a, 10 000 Zagreb
Mjesto izrade	Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Vrsta objave	Diplomski rad
Mentor	Doc. dr. sc. Vinko Paulić
Izradu rada pomogao	Vedran Zec, mag. ing. silv., Luka Prša mag. ing. silv., Marko Telar mag. ing. silv.,Hrvoje Barać, dipl.ing.šum.
Godina objave	2018.
Obujam	Broj stranica: 44 tablica: 6 slika: 16 navoda literature: 49
Ključne riječi	Hrast kitnjak, vlažnost tla, stabilnost urbanih stabala, potezni test
Key words	Sessile oak, soil moisture, urban tree stability, pulling test
Sažetak	Urbane šume predstavljaju posebno vrijedne i često posjećivane prostore u gradskim područjima. Time je opasnost od ozbiljnih šteta i ozljeda u slučaju loma ili izvale stabala u takvim prostorima velika. Veliki dio izvala i lomova stabala događa se tijekom i nakon olujnog nevremena koje je praćeno s obilnim padalinama. Cilj ovog istraživanja je utvrditi utjecaj povećanja sadržaja vlage u tlu, nakon obilnih padalina, na stabilnost urbanih stabala hrasta kitnjaka u park-šumama grada Zagreba pomoću metode poteznog testa. Na obje lokacije istraživanja utvrđene su statistički značajne razlike u vlažnosti tla između mjerenja u suhim i vlažnim uvjetima. Ponavljana potezanja stabala utječu na povećanje kuta nagiba korijenove ploče. Nije utvrđena statistički značajna razlika u faktorima sigurnosti od izvale stabala u vlažnim i suhim uvjetima tla.

	IZJAVA O IZVORNOSTI RADA	**OB ŠF 05 07**
		Revizija: 1
		Datum: 28.6.2017.

„Izjavljujem da je moj *diplomski rad* izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam *koristila* drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

_____

vlastoručni potpis

Katarina Tumpa

U Zagrebu, *21.09.2018*

SADRŽAJ

str.

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA IV
1. UVOD 1
1.1. Urbane šume 1
1.2. Stabilnost stabala 2
1.2.1. Trokut stabilnosti stabla 2
1.2.1.1. Opterećenje 3
1.2.1.2. Oblik (forma) 4
1.2.1.3. Materijal 4
1.2.2. Čimbenici smanjenja stabilnosti 5
1.2.2.1. Individualne karakteristike stabla 5
1.2.2.2. Karakteristike sastojine 5
1.2.2.3. Karakteristike tla u zoni korijena 5
1.2.2.4. Karakteristike topografije terena 6
1.2.2.5. Meteorološki uvjeti 7
1.3. Korijenski sustav stabala 7
1.3.1. Sustav korijen - tlo 8
1.3.2. Korijen hrasta kitnjaka 9
1.3.2. Korijen hrasta kitnjaka 9
1.4. Tlo kao čimbenik stabilnosti stabala 10
1.5. Potezni test 11
2. CILJ ISTRAŽIVANJA 14
3. MATERIJAL I METODE ISTRAŽIVANJA 15
3.1. Područje istraživanja 15
3.1.1. Klimatska obilježja park-šuma grada Zagreba 16
3.1.2. Geološka podloga i tla park-šuma grada Zagreba 16
3.2. Odabir lokacije istraživanja 17
3.2.1. Park-šuma Granešina 17
3.2.2. Park-šuma Zelengaj 17

3.3. Vlažnost tla 18
3.3.1. Opis izmjere vlažnosti tla 19
3.4. Potezni test 20
3.4.1. Opis izmjere sa poteznim testom 21
3.4. Istraživana stabla 23
4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA 25
4.1. Vlažnost tla 25
4.2. Utjecaj ponavljanih povlačenja stabala na kut nagiba korijenove ploče 28
4.3. Faktor sigurnosti od izvale pri vlažnim i suhim uvjetima tla 31
5. RASPRAVA 35
6. ZAKLJUČAK 39
LITERATURA 40

POPIS SLIKA

str.

Slika 1. Shematski prikaz trokuta stabilnosti (Paulić, 2015)..... 3
Slika 2. Odnos sila u sustavu korijen – tlo. F, horizontalna sila vjetra ili vitla; W, slom korijenove ploče na privjetrenoj strani; T, središte debla; L, sila poluge na zavjetrenoj strani (prilagođeno prema Coutts, 1983)..... 8
Slika 3. Osnovni oblici korijenskog sustava: A) korijenski sustav sa žilom srčanicom. B) čupav korijenski sustav. C) plitki korijenski sustav sa poniručim korijenjem (prilagođeno prema Thomas, 2018)..... 9
Slika 4. Mohr – Koulombov zakon sloma (Pandur, 2013)..... 11
Slika 5. Položaj GJ 'Park šume grada Zagreba' (Paulić, 2015) 15
Slika 6. Klima dijagrami prema Walteru za meteorološke postaje na području grada Zagreba za razdoblje 1960. – 2004. (Seletković i sur., 2010)..... 16
Slika 7. Prikaz izmjere vlažnosti tla TDR sondama..... 19
Slika 8. Shematski prikaz poteznog testa TreeQinetic (Paulić, 2015) 21
Slika 9. Postavljenje poteznog testa za izmjeru stabilnosti stabla..... 22
Slika 10. Istraživana stabla na lokaciji Granešina..... 23
Slika 11. Istraživana stabla na lokaciji Zelengaj 23
Slika 12. Dnevna količina oborina za meteorološku postaju Zagreb-Grič od 1860 do 2014. godine (KNMI Climate explorer)..... 26
Slika 13. Razlika nagiba korijenove ploče između opetovanih potezanja stabala u Granešini pri uvjetima suhog tla..... 28
Slika 14. Razlika nagiba korijenove ploče između opetovanih potezanja stabala u Granešini pri uvjetima vlažnog tla..... 29
Slika 15. Razlika nagiba korijenove ploče između opetovanih potezanja stabala u Zelengaju pri uvjetima suhog tla..... 29
Slika 16. Razlika nagiba korijenove ploče između opetovanih potezanja stabala u Zelengaju pri uvjetima vlažnog tla..... 30
Slika 14. 95 % interval pouzdanosti za faktor sigurnosti od izvale na lokaciji Granešina pri vlažnim i suhim uvjetima testiranja 32
Slika 16. 95 % interval pouzdanosti za faktor sigurnosti od izvale na lokaciji Zelengaj pri vlažnim i suhim uvjetima testiranja 33

POPIS TABLICA

str.

Tablica 1. Deskriptivni podaci o istraživanim stablima 24
Tablica 2. Deskriptivna statistika volumetrijske vlage tla (%) na dubini od 0 – 20 cm i 21–50 cm prema lokacijama istraživanja 25
Tablica 3. T-test nezavisnih uzoraka usporedbe volumetrijske vlažnosti tla u vlažnim i suhim uvjetima ispitivanja stabilnosti stabla poteznim testom na istraživanim lokacijama 27
Tablica 5. Wilcoxon test usporedbe parova faktora sigurnosti od izvale na lokaciji Granešina pri vlažnim i suhim uvjetima testiranja 32
Tablica 6. Wilcoxon test usporedbe parova faktora sigurnosti od izvale na lokaciji Zelengaj pri vlažnim i suhim uvjetima testiranja 33

1. UVOD

Šume u gradskome okruženju predstavljaju oaze značajno kvalitetnijih životnih uvjeta od ostalih gradskih prostora (Matić i sur., 2010). Glavni nosioci strukture svake šume su stabla. U urbanim sredinama, stabla pružaju mnogostruke okolišne i društvene koristi. Ipak, uvjeti života u gradu značajno se razlikuju od onih u prirodnome okruženju, stoga urbana stabla zahtijevaju specifičnu brigu (Konijnendijk van den Bosch i sur., 2017).

1.1. Urbane šume

Urbane šume predstavljaju posebno vrijedne prostore u gradskim područjima. U širemu smislu, riječ je o pojedinačnim stablima (soliterima), drvoredima, alejama, parkovima te park-šumama. Park-šume, kao površinom najveći oblik urbanih šuma, imaju velik utjecaj na poboljšanje uvjeta života stanovnika gradova, posebice uzme li se u obzir procjena UN-a o porastu broja gradskog stanovništva. Prema njoj, 60% svjetske populacije živjet će u gradovima do 2030. godine (Konijnendijk van den Bosch i sur., 2017).

Urbana zelena područja imaju veliku ulogu u održavanju biološke raznolikosti te stabilnosti okoliša tih područja; predstavljaju stanište mnogim divljim vrstama, umanjuju nepovoljne utjecaje obilnih oborina na sustave odvodnje, osiguravaju povoljniju mikroklimu, opskrbljuju područje kisikom, ali i podižu estetsku vrijednost okruženja te omogućavaju bolju povezanost ljudi s prirodom i njihovim neposrednim okruženjem.

Financijski gledano, koristi od urbanih šuma veće su od troškova njihova održavanja. Prema studiji iz 1994. godine, koristi od posađenih stabala tri su puta veće od troškova sadnje i održavanja. Vrijednost stambenih objekata u blizini šumovitih područja, ili čak samo drvoreda, veća je od onih koja u blizini nemaju zasađena stabla (Batchelder i Batchelder, 2011).

Posljednjih godina, kao posljedica povećane brige o ljudskome zdravlju, urbane šume dobivaju na važnosti kao objekti za rekreaciju i opuštanje, dok stabla svojom sposobnošću vezivanja ugljika (*sekvestracija*) te pozitivnim utjecajem na vodni režim tla postaju sve zanimljivija kao važan element borbe protiv klimatskih promjena (Matić i sur., 2010).

Urbana stabla, iako se trebaju sagledavati kao dio s njima povezane vegetacije, grmljem i travnjacima, čine najvažniji dio urbanih zelenih površina. Pri tome se različite vrste sade u različitim oblicima urbanih šuma. Budući da park-šume najčešće predstavljaju fragmente autohtone vegetacije, odnosno prirodnih šuma nekog područja, u njima prisutne vrste stabala izložene su značajno promijenjenim uvjetima, u odnosu na prirodne. Za sama stabla to prije svega znači da su podložnija bolestima, oštećenjima te sušenju desetljećima ranije u usporedbi sa stablima iste vrste u prirodnim šumama, neutjecanima urbanim okolišem. Velik broj negativnih čimbenika, kao što su duga razdoblja suše, odumiranje korijena radi stagnirajuće vode u tlu, zaslanjivanje tla zimi, atmosferski polutanti te visoke temperature pojedinačno ili pak u sinergiji s drugim čimbenicima mogu negativno utjecati na rast, razvoj i preživljenje urbanih stabala (Konijnendijk van den Bosch i sur., 2017).

Negativnim utjecajima oslabljeno stablo, posebice njegov korijenski sustav, podložnije je djelovanju ekstremnih vremenskih uvjeta, kao što su olujni udari vjetra. Time je njihova stabilnost umanjena, a opasnost od vjetroizvale ili vjetroloma je veća (Jim i Liu, 1997).

1.2. Stabilnost stabala

Statika je grana mehanike koja proučava stanja mirovanja tijela u trenutku kada su sile koje na ta tijela djeluju u ravnoteži. Pri tome se statika stabala prije svega odnosi na njihovu sigurnost, odnosno otpornost na vjetroizvalu ili vjetrolom. Sigurnost od vjetroizvale ili vjetroloma ovisi o međudjelovanju vanjskih sila koje utječu na stablo i njegove unutarnje čvrstoće, kao i unaprijed definiranome faktoru sigurnosti (Paulić, 2015).

Stablo, kao sustav pod djelovanjem različitih sila, definirano je svojom stabilnošću. Stabilnost se može opisati kao svojstvo sustava da, nakon prestanka djelovanja čimbenika koji je uzrokovao gubitak ravnoteže, samostalno uspostavlja i/ili održava ravnotežno stanje. Stabilnošću stabala bavi se biomehanika – grana mehanike koja proučava načine na koje stabla rastu u posebnim okolišnim uvjetima te održavaju statičku stabilnost stabla bez smanjenja fizioloških (bioloških) funkcija svojeg organizma (Matheny i Clark, 2009).

1.2.1. Trokut stabilnosti stabla

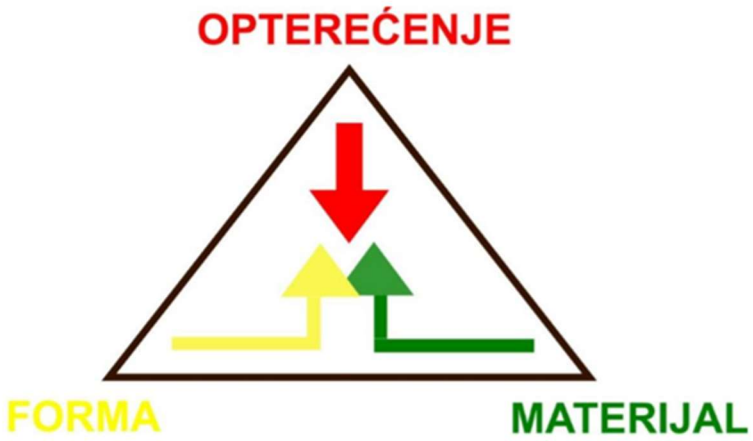
Stablo je, gledano s aspekta stabilnosti, tijelo pod utjecajem fizikalnih zakona. Njegov oblik i građa definiraju maksimalno opterećenje koje stablo može podnijeti prije pojave oštećenja. Statiku stabla opisuje tzv. *trokut stabilnosti*, koji se sastoji od triju sastavnica:

⇒ Opterećenje – olujni vjetrovi, površina i težina krošnje

⇒ Oblik (forma) – promjer debla i grana, oblik poprečnog presjeka, stupanj šupljine u deblu, oblik korijenskog sustava

⇒ Materijal - Naprezanja, čvrtoća, krutost, elastičnost, granica elastičnosti, plastičnost.

Ove tri sastavnice utječu na statiku svakoga stabla (Wessolly i Erb, 2014).



Slika 1. Shematski prikaz trokuta stabilnosti (Paulić, 2015)

1.2.1.1. Opterećenje

Opterećenje stabla možemo podijeliti na opterećenje samoga stabla te dodatna opterećenja iz okoliša. Samo stablo utječe na opterećenje svojim uspravnim rastom. Zbog uspravnoga rasta postoji konstantan moment opterećenja, odnosno rastom se pohranjuje potencijalna energija. U slučaju vjetroizvale ili vjetroloma, potencijal za oštećenjem okoline ovisi o pohranjenoj potencijalnoj energiji prije samoga pada (Wessoly i Erb, 2014).

Horizontalno, odnosno bočno opterećenje na stablo predstavlja sila vjetra. Vjetar je najrazornija prirodna sila koja opterećuje pojedinačna stabla ili ona u sastojini (Kenneth i sur., 2006). Veličina ovoga opterećenja ovisi o veličini i obliku krošnje, gustoći sklopa grana te samoj snazi (pritisku) vjetra (Wessoly i Erb, 2014). Kao posljedica udara vjetra velike snage dolazi do vjetroizvala i vjetrolomova. Kada sila vjetra koja opterećuje stablo savlada silu kojom je stablo usidreno dolazi do vjetroizvala. One su najčešće u tlima u kojima je vertikalan korijenski sustav

slabo razvijen ili ograničen, kada je prisutna trulež korijena ili je tlo prezasićeno vodom (Quine i Gardiner, 2007).

1.2.1.2. Oblik (forma)

Sile, koje na različite načine djeluju na krošnju stabla, prikupljaju se na dnu svake rašlje grana te naposlijetku bivaju prenesene deblom na korijenski sustav u tlu. Punodrvnost ili postojeće šupljine u drvu pritom ne igraju značajniju ulogu, kao niti oblik poprečnog presjeka, budući da se opterećenja prenose vanjskim dijelom stabla, a svi dijelovi stabla nose opterećenja zajedno.

Posebnost rasta stabala očituje se u sposobnosti da stablo, pod opetovanim utjecajem sile istoga smjera, zadeblja dijelove koji su pod najvećim opterećenjem. Pri tome se kod listača zadebljanje javlja na strani djelovanja vlačne sile (strana udara vjetra), a kod četinjača na strani djelovanja tlačne sile. Poprečni će presjek pod djelovanjem opetovane sile istoga smjera poprimiti ovalan oblik, koji bolje podnosi naprezanja (Wessoly i Erb, 2014).

Visinskim rastom krošnja je sve izloženija udarima vjetra te je sve veća površina na koju sila vjetra djeluje. Posljedica toga je povećanje momenta savijanja pri žilištu stabla, čineći ga podložnijim vjetrolomu ili vjetroizvali (Niklas i Spatz, 2000).

1.2.1.3. Materijal

Otpornost stabla na lom izravno je vezana na stukturu njegova drva. Drvo je anizotropan i heterogen materijal. Kada je u statičkoj ravnoteži, drvo podnosi naprezanja. Mehanička svojstva drva ovise o intenzitetu različitih sila koje na njega djeluju – kompresiji, tenziji, smicanju, savijanju (torziji) – kao i o smjeru djelovanja tih sila s gledišta smjera rasta drvnih vlakanaca (radijalno, longitudinalno ili tangecijalno) (Paulić, 2015). Na stabilnost stabala, posebice kada je riječ o lomovima, utjecaj imaju i patogeni organizmi, ponajviše lignikolne gljive. Rastom micelija gljive te njezinim metabolizmom dolazi do razgradnje i slabljenja strukture drva, čime ono postaje podložnije drugim negativnim utjecajima iz okoliša (Nicolotti i sur., 2009).

Opterećenje na materijal djeluje tako da se on elastično deformira do granice proporcionalnosti. U slučaju drva korijena, granica se nalazi na 2-4% naprezanja prilikom primjene opterećenja (Coutts, 1983). Nakon toga, korijen se plastično deformira te naposlijetku popušta.

1.2.2. Čimbenici smanjenja stabilnosti

Čimbenici koji dovode do vjetroizvala smanjenjem stabilnosti stabla utječu na učinkovitost korijena kao sidrišta, čvrstoću i aerodinamička svojstva stabla te smjer i karakteristike vjetra unutar te iznad sastojine. Prema Horáčeku (2005) mogu se podijeliti na:

⇒ individualne karakteristike stabla,

⇒ karakteristike sastojine,

⇒ karakteristike tla u zoni korijena,

⇒ karakteristike topografije terena te

⇒ meteorološke uvjete.

1.2.2.1. Individualne karakteristike stabla

Individualne karakteristike stabla odnose se na habitus, odnosno oblik stabla, koji može biti modificiran većim brojem čimbenika u okolišu. Oblik debla posebice je dobro prilagođen podnošenju sila vjetra. Riječ je u valjku koji se sužava pri vrhu, čime je prijenos sila uvijek u povoljnome mjeru – prema debljemu kraju valjka, odnosno tlu (Horáček, 2005).

Stablo, pod opetovanim utjecajem sile istoga smjera, odebljava dijelove koji su pod najvećim opterećenjem. Kao rezultat ovoga dodatnoga rasta nastaje tenzijsko drvo (Wessoly i Erb, 2014).

1.2.2.2. Karakteristike sastojine

Sastojina, odnosno njezin sklop, utječe na mogućnost pojave vjetroizvala, prije svega gustoćom. Gušći sklop uvjetovat će manje brzine vjetra unutar sastojine te zanemariv utjecaj vjetra na stabla unutar sastojine. U slučaju većih progala, sila vjetra može negativno utjecati i na stabla unutar sastojine. Također, gušći prizemni sloj omogućava sporije prodiranje oborinske vode u tlo te time štiti sastojinu od naglog zasićenja tla vodom, koje može dovesti do pojave vjetroizvala (Kenneth i sur., 2006).

1.2.2.3. Karakteristike tla u zoni korijena

Prorastanjem tla korijen učvršćuje biljku te tvori prepoznatljiv sloj, rizosferu (Pernar, 2017). Pri tome odlučujuću ulogu igraju tip tla te karakteristike tla na kojemu stablo raste, odnosno

tekstura, gustoća te sadržaj vlage u tlu. Veća gustoća tla uvjetovat će slabiji rast korijena te će time utjecati i na smanjenu stabilnost tla (Drexhage i sur., 2011).

S druge strane, prorastanje tla korijenom dovodi do tzv. armiranosti šumskog tla (eng. *root reinforcement*). Tako proraslo tlo otpornije je na deformacije zbijanjem, a ujedno se lakše regenerira u odnosu na tlo s oskudnom rizosferom (Pernar, 2017). Armiranost tla od posebne je važnosti na nagnutome terenu, gdje ima značajan utjecaj na tvrdoću i čvrstoću tla, čineći tlo manje podložno odronima i klizišta (Schwarz i sur., 2015).

Korijenski sustav i njegova distribucija važan su čimbenik stabilnosti stabla. Najveća gustoća korijena nalazi se u neposrednoj blizini debla. Riječ je o površinskom korijenju, koje se u slučaju hrasta kitnjaka može protezati i 20 metara (Drexhage i sur., 2011).

1.2.2.4. Karakteristike topografije terena

Topografija terena, prema Horáčeku (2005), utječe na stabilnost stabala modificiranjem:

⇒ izloženosti vjetru,

⇒ smjera, brzine i turbulencija vjetra.

Prema Volarić (1999), možemo razlikovati privjetrenu (eng. *windward*) i zavjetrenu (eng. *leeward*) stranu reljefnih formi (uzvisina). Na privjetrenoj strani brzina vjetra je veća te se on kreće linearno, dok su turbulencije zanemarive. Prelaskom vjetra preko sljemena uzvisine, njegova brzina opada, ali se turbulencije pojačavaju, budući da kretanje vjetra prelazi iz linearnog u kružno (Horáček, 2005).

Na otvorenom krajobrazu, poput slabo naseljenih područja, brzina vjetra je veća dok su turbulencije manje. S druge strane, u gradskim područjima brzina vjetra se smanjuje dok se utjecaj turbulencija uvjetovan brojnim preprekama povećava. Osim prepreka, na povećane turbulencije utječe i efekt toplinskoga otoka (eng. *heat island*). Riječ je o pojavi vezanoj uz višu temperaturu urbanih područja koja dovodi do izraženijeg vrtloženja zračnih masa (Bornstein i Johnson, 1976).

Jedan od čimbenika koji utječu na opterećenje različitih struktura vjetrom je i profil brzine vjetra. Na brzinu vjetra značajan utjecaj ima trenje, koje u okolišu predstavljaju reljefne forme ili objekti. Različiti krajobrazi, ovisno o tipu svojega reljefa te načinu korištenja, imaju različite

razine razvedenosti (Ramli i sur., 2009). Prema Davenportu (1960), razlikujemo četiri kategorije razvedenosti terena:

⇒ kategorija 1 – otvorene vodene površine,

⇒ kategorija 2 – otvoreni krajobrazi s minimalnim preprekama,

⇒ kategorija 3 – suburbana područja s prosječnom količinom prepreka te stablima visine do 10 m, te

⇒ kategorija 4 – urbana ili šumovita područja.

Prema ovim kategorijama, urbana stabla nalaze se u krajobrazu kategorija 3 i 4.

1.2.2.5. Meteorološki uvjeti

Najvažniji meteorološki čimbenici koji utječu na stabilnost stabala su količina oborina i vjetar. Velika količina oborinske vode u kraćemu vremenu dovodi do zasićenja pora tla. Kada se površinske pore zasite vodom, zrak koji je zarobljen u porama u nižim slojevima ubrzava razlamanje agregata tla te dovodi do bržeg sloma tla (Kamimura, 2011).

Vjetar pak negativno utječe na stabilnost stabala kada se javlja u obliku olujnih udara. Zbog varijabilne prirode pojavnosti oluja, štete od vjetra mogu se značajno razlikovati iz godine u godinu. Niz tihih godina može prethoditi nizu zimskih razdoblja s veoma razornim olujama. Pojavnost pojedine intenzivne oluje ne utječe na vjerojatnost pojave jednako razorne oluje sljedeće godine (Quine i Gardiner, 2007).

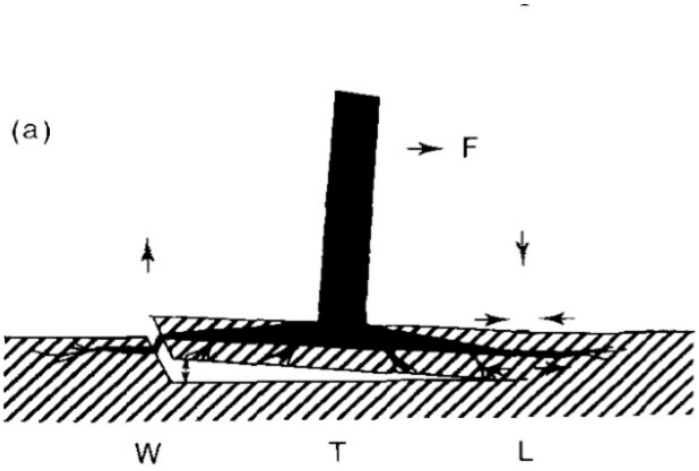
Kao posljedica interakcije s vjetrom, stabla mogu imati oštećeno lišće, slomljene grane ili dijelove krošnje. Mlada stabla mogu biti olabavljena iz tla te time podložna isušivanju korijena i posljedičnim vjetroizvalama. Kod starijih stabala glavne štete od interakcije s vjetrom očituju se u prijelomu debla ili izvali cijeloga stabla (Quine i Gardiner, 2007).

1.3. Korijenski sustav stabala

Odlučujući čimbenik stabilnosti svakoga stabla njegov je korijenski sustav – korijen je jedina veza stabla s tlom. Pri tome treba uzeti u obzir kako je normalno razvijen korijen rijetko prisutan kod urbanih stabala, s obzirom da za njega stablo zahtijeva idealne uvjete, koji su u gradovima nemogući (Drexhage i sur., 2011). Idealan korijenski sustav koji bi pružao potrebnu stabilnost nije poznat jer ovisi o pojedinom lokalitetu te stabla svoj rast prilagođavaju specifičnim uvjetima. Na primjer, dubina ukorjenjivanja može biti ograničena fluktuacijom sezonski visokih podzemnih voda (Coutts, 1983).

1.3.1. Sustav korijen - tlo

Korijen je izložen velikome broju negativnih utjecaja, od kojih većina uzrokuje oštećenja koja umanjuju vitalnost, a time i stabilnost stabla. Ova problematika posebno je aktualna upravo kod urbanih stabala koja, u usporedbi sa stablima u prirodnim šumama, rastu u značajno lošijim uvjetima tla. Tlo je zbijeno, loših vodo-zračnih odnosa, zagađeno, siromašno hranjivima, prevlažno ili pak presuho. Osim problema sa fizikalno – kemijskim svojstvima tla u urbanim sredinama, volumen tla u kojemu korijenski sustav raste često je premalen. Ovaj se problem posebice očituje kod vrsta koje razvijaju duboki korijenski sustav sa žilom srčanicom (Konijnendijk van den Bosch i sur., 2017).



Slika 2. Odnos sila u sustavu korijen – tlo. F, horizontalna sila vjetra ili vitla; W, slom korijenove ploče na privjetrenoj strani; T, središte debla; L, sila poluge na zavjetrenoj strani (prilagođeno prema Coutts, 1983)

Djelovanjem sile vjetra na stablo, ono silu prenosi na korijen te na, s njime povezano u sustav, tlo oko korijena. Pri tome se različito očituje djelovanje sile na stranu stabla koja je okrenuta vjetru te onu na koju će se stablo svijati. Na suprotnoj strani od udara vjetra, sustav korijen – tlo zbija se te savija, dok je na strani udara vjetra, gdje postoji odizanje zone korijena, sustav izložen naprezanju te potencijalnome pucanju. Nadalje, korijen u tlu djeluje poput greda te učvršćuju tlu, posebice na strani udara vjetra (Coutts, 1983).

1.3.2. Korijen hrasta kitnjaka

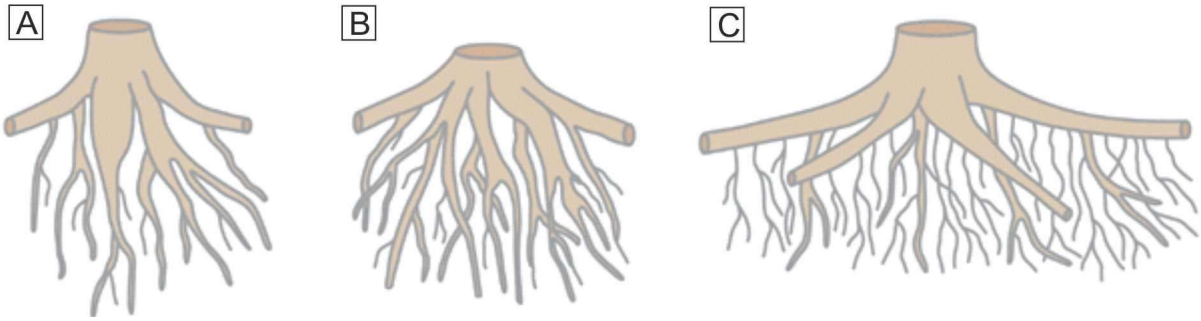
1.3.2. Korijen hrasta kitnjaka

Korijenski sustavi stabala prema obliku mogu podijeliti na tri tipa:

⇒ korijenski sustavi sa žilom srčanicom

⇒ plitki korijenski sustavi s poniručim korijenjem

⇒ čupav korijenski (srcoliki) sustavi (Schütt i sur., 2014).



Slika 3. Osnovni oblici korijenskog sustava: A) korijenski sustav sa žilom srčanicom. B) čupav korijenski sustav. C) plitki korijenski sustav sa poniručim korijenjem (prilagođeno prema Thomas, 2018)

Hrast kitnjak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) odlikuje se korijenom nalik hrastu lužnjaku (*Quercus robur* L.). U oba slučaja riječ je o dobro razvijenome sustavu horizontalnog korijenja s poniručim korijenjem te snažno razvijenom, poniručom žilom srčanicom. Zahvaljujući ovome kombiniranom obliku korijena, kitnjak je manje sklon vjetroizvalama od vrsta s jednostavnim sustavom sa žilom srčanicom ili poniručim korijenjem, kao što su obična bukva (*Fagus sylvatica* L.) i obična smreka (*Picea abies* (L.) Karst.) (Drexhage i sur., 2011). Horizontalno korijenje hrasta predstavlja 80% ukupnoga korijenskoga sustava. Uloga duboko poniručega korijena je omogućavanje transpiracije za vrijeme suše; zabilježeno je kako se kitnjak ukorijenjuje dublje od ostalih vrsta koje ga okružuju. Teksturno teža tla, kao što su pseudoglej te teška glinasto-ilovasta tla, omogućavaju dobro prodiranje korijena u dubinu (Drexhage i sur., 2011). Utjecaj zbijenosti tla nije uvijek jednak. Osim o stupnju zbijenosti, ovisi i o tipu tla te klimi u kojoj se stablo razvija. U nekim slučajevima, kao što su skeletna tla, povećana gustoća tla ima pozitivan utjecaj na rast stabla. Posljedica je to povećanoga kontakta između korijena stabla i čestica tla, čime se povećava usvajanje hranjiva i vode (Kormanek i sur., 2015).

1.4. Tlo kao čimbenik stabilnosti stabala

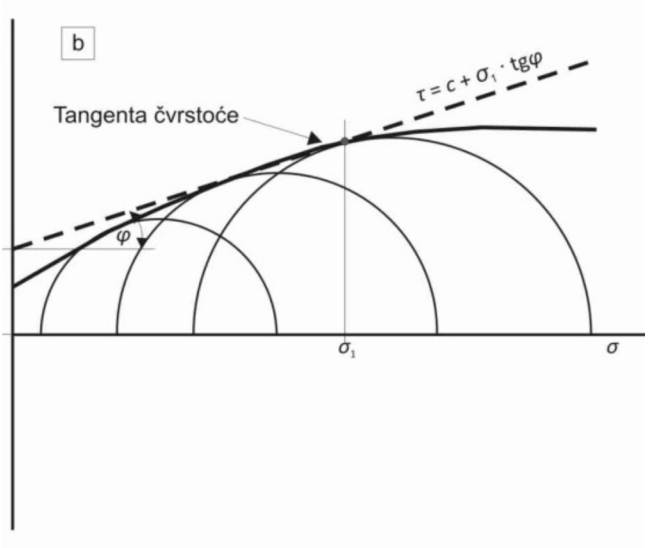
Tlo, kao medij u kojemu se korijen razvija, ključno je za stabilnost stabla. Stabilnošću se posebice bavi mehanika tla, koju možemo definirati kao znanstveni pristup razumijevanju djelovanju sila u tlu. Odnosno, riječ je o znanosti koja se bavi pojavama koje obuhvaćaju sile u tlu, koje su na neki način vezane uz inženjerstvo. Na stabilnost stabala velik utjecaj ima sadržaj vlage u tlu. Razmatramo li problematiku fluida sa stajališta opće hidraulike, fluid se u nekome mediju može gibati na dva osnovna načina. Laminaran tok uključuje kretanje čestica, u ovome slučaju čestica tla u otopini tla, u kojemu svaka čestica putuje svojim tokom te se ne presijeca s tokovima drugih čestica. Turbulentan tok pak opisuje gibanje čestica u kojemu se tokovi pojedinih čestica međusobno presijecaju te uzrokuju vrtloženje slučajnih smjerova. Kod pretjeranoga vlaženja tla dolazi do turbulentnih tokova, čime se stabilnost tla smanjuje, odnosno struktura tla je narušena. Osim toga, pri povećanome sadržaju vlage dolazi do promjene u posmičnoj čvrstoći tla, odnosno do sloma tla (Taylor, 1948). Slom tla je stanje nestabilnosti popraćeno velikim posmičnim deformacijama i s njima povezanim velikim pomacima. Obično se očituje kao klizanje jedne mase tla po drugoj, i to po jasno vidljivoj kliznoj plohi. U trenutku kada ove deformacije dosegnu posmičnu čvrstoću tla, daljnji pomaci ne dovode do deformacija tla, već do potpunog sloma, odnosno popuštanja tla. U tome trenutku, deformacije prelaze iz elastične (povratne) u plastičnu (nepovratnu) fazu. Posmičnu čvrstoću tla definira Mohr – Koulumbov zakon, odnosno Mohr – Koulumbova kružnica, koja opisuje pojavu sloma tla vezanu uz čestice gline u tlu.

Matematičkim izrazom Mohr – Koulombovog zakona posmična čvrstoća tla (τ_f) definirana je kao

$$\tau_f = c + \sigma_f \times \tan \emptyset,$$

pri čemu su:

- $\Rightarrow$ c - sila kohezije (sila kojom se čestice gline drže zajedno)
- $\Rightarrow$ σ_f - ploha sloma
- $\Rightarrow$ $\emptyset$ - kut unutarnjeg trenja (Szavits-Nossan, 2009).



Slika 4. Mohr – Koulombov zakon sloma (Pandur, 2013)

Do sloma tla dolazi u trenutku kada anvelopa sloma (eng. *failure envelope*) tangira Mohrovu kružnicu sloma; to je trenutak u kojemu deformacije prelaze u plastičnu (nepovratnu) fazu te uzrokuju popuštanje tla.

Na stabilnost stabla ova pojava utječe na sljedeći način:

⇒ sile kojima se čestice tla drže zajedno nestaju, a samim time i integritet tla;

⇒ korijen stabla više se ne nalazi u čvrstome mediju već slobodno gibajućem („tekućem“) te gubi oslonac.

Ako se takvi uvjeti u tlu poklope s udarima vjetra, stablo će se izvaliti (Szavits-Nossan, 2009).

1.5. Potezni test

Kao jedna od mjera statičkih integriranih metode (eng. *Statics-Integrated Methods*) utvrđivanja sigurnosti od vjetroloma ili vjetroizvale, odnosno stabilnosti stabla, provodi se potezni test. Ove metode dio su tzv. integrirane statičke procjene (njem. *Statisch Integrierte Abschätzung*, SIA) stabla, metode kojom se procjenjuje stabilnost stabla temeljem triju sastavnica trokuta stabilnosti. Važno je napomenuti kako je riječ o nedestruktivnoj metodi, odnosno kako ispitivano stablo nastavlja neometano rasti (Wessoly i Erb, 2014).

Potezni test uključuje primjenjivanje sile na nosive, nadzemne dijelove stabla, čime se utvrđuje njihova reakcija na primjenu sile, odnosno vjerojatnost da će se stablo izvaliti.

Prvi korak poteznoga testa jest analiza opterećenja vjetrom, koja se provodi Newtonovom formulom za opterećenje vjetrom. Prema formuli, ukupna srednja sila (F_{vjetar}), koja se javlja uslijed djelovanja vjetra, jest suma svih sila koje djeluju u svim točkama debla i krošnje do određene visine (z), te se može prikazati matematičkim izrazom

$$F_{vjetar} = \frac{1}{2} c_w \rho v_z^2 A \ ,$$

u kojem je:

- $\Rightarrow c_w$ – koeficijent otpora
- $\Rightarrow \rho$ – gustoća zraka
- $\Rightarrow v_z^2$ – srednja brzina vjetra
- $\Rightarrow A-$ površina debla i krošnje na koju vjetar djeluje (Horáček, 2005)

Opterećenje vjetrom eksponencijalno se povećava porastom visine stabla. Na većim visinama brzina vjetra značajno raste zahvaljujući smanjenome otporu terena te manje turbulentnome toku zraka (Detter i sur., 2018). Na ovaj način dobiveno maksimalno opterećenje vjetrom predstavlja smjernice za provođenje poteznoga testa, kojim će biti ispitivano ponašanje stabla kao strukture tijekom simuliranog udara vjetra.

Drugi korak testa predstavlja elasto-inklino metoda mjerenja otklona stabla. Primjenom senzora inklinometara i elastometara, procijenjuje se vjerojatnost od izvale stabla (inklinometri), odnosno prijeloma debla (elastometri). Djelovanjem sile vjetra na deblo, ono se otklanja za određeni stupanj, koji je u vezi sa stupnjem savijanja korijena uz žilište. Istovremeno, drvena vlakanca debla se na strani udara vjetra istežu, a zbijaju na suprotnoj strani.

Proces izvale svih stabala otprilike je jednakoga toka te ga opisuje generalizirana krivulja izvale (njem. *Verallgemeinerte Kippkurve*). Prema ovoj krivulji, maksimalno opterećenje prije izvale postiže se na 2,5 ° otklona žilišta stabla, bez obzira radi li se o stablu sa zdravim ili oštećenim korijenskim sustavom. Kada je riječ o neoštećenome korijenskome sustavu, opterećenje koje stablo može podnjeti prije izvale ostaje konstantno sve do veoma velikog stupnja otklona. Kod

oštećenoga korijena, samostalna izvala započinje značajno ranije. Luk savijanja utvrđen je dvjema točkama savijanja, nul-točkom te drugom točkom uvjetne (različite) lokacije na stablu. Ukoliko se otklon ograniči na vrijednosti od nekoliko stotinki stupnja pa sve do 0,5 stupnja, ova metoda neće uzrokovati nikakva oštećenja na stablu. Definicija ove krivulje omogućava prognozu maksimalne sile opterećenja prije izvale već kod otklona od 0,5 ° (Wessolly i Erb, 2014).

Rezultati dobiveni mjerenjem inklinometrima opisuju generaliziranu krivulju izvale, dok se podaci prikupljeni elastometrima stavljaju u odnos s podacima o elastičnosti svježeg drva. Na temelju ovoga odnosa, moguće je utvrditi točka u kojoj je dosegnuta granica proporcionalnosti, odnosno trenutak u kojemu će početi pucanje vlakanaca.

Na temelju usporedbe rezultata dobivenih u prva dva koraka, izračunava se faktor sigurnosti stabla od izvale ili loma (Detter i sur., 2018).

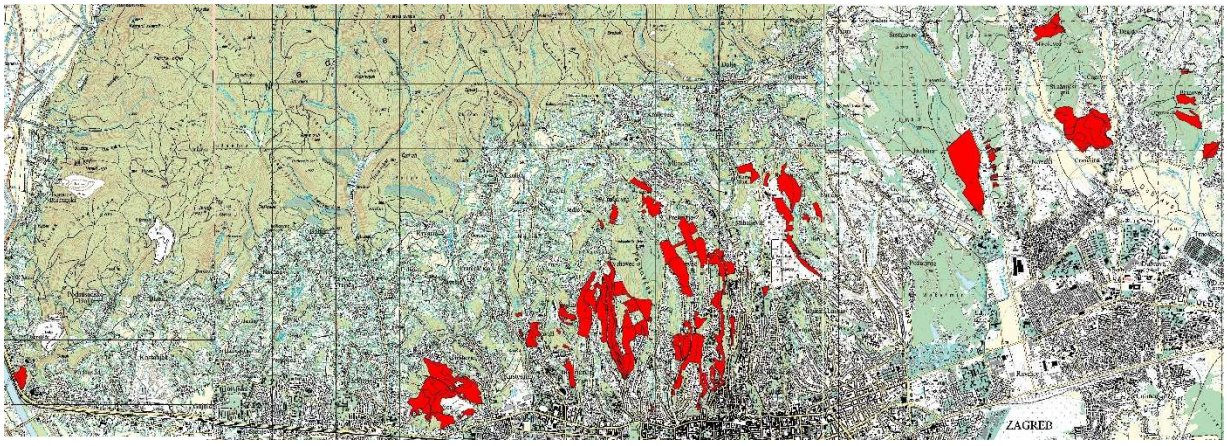
2. CILJ ISTRAŽIVANJA

Cilj istraživanja provedenog u ovome radu jest utvrditi utjecaj povećanja vlage tla na stabilnost stabala hrasta kitnjaka mjerenu poteznim testom, kao i utjecaj ponavljanih povlačenja stabala na mogućnost ponovnog uspostavljanja ravnoteže, odnosno ima li višestruko primjenjivanje sile prilikom povlačenja nepovoljan utjecaj na otpornost stabla od izvale.

3. MATERIJAL I METODE ISTRAŽIVANJA

3.1. Područje istraživanja

Za područje istraživanja odabrane su park-šume na području Grada Zagreba. Riječ je o šumskim sastojinama koje su uklopljene u tkivo grada i čija je primarna zadaća trajno i optimalno pružanje općekorisnih funkcija građanima (Paulić, 2015). Pod općekorisnim funkcijama podrazumijevamo sve neproizvodne funkcije šuma; zahvaljujući upravo ovim šumama, gradovi imaju čišći zrak te vodu, ugodniju mikroklimu u okruženju park-šuma te značajne rekreacijske površine za svoje stanovnike. Osim ovih funkcija, općekorisne funkcije obuhvaćaju i ekološko-socijalne funkcije, kao što su prirodnozaštitarske (među kojima je i protuerozivna, veoma značajna za klizištima sklona područja Zagreba), genetska, i ekofiziološka funkcija. Grad Zagreb karakterizira velik broj park-šuma. Na prostoru grada nalazi se 395,08 ha šumskog zemljišta. Većinom je riječ o manjim, razdvojenim površinama (kompleksima), rascjepkanim i okruženim urbanim zonama. Pružaju se u smjeru sjever-jug u pojasu od gotovo 9 kilometara, te u smjeru istok-zapad u potezu od preko 20 kilometara.



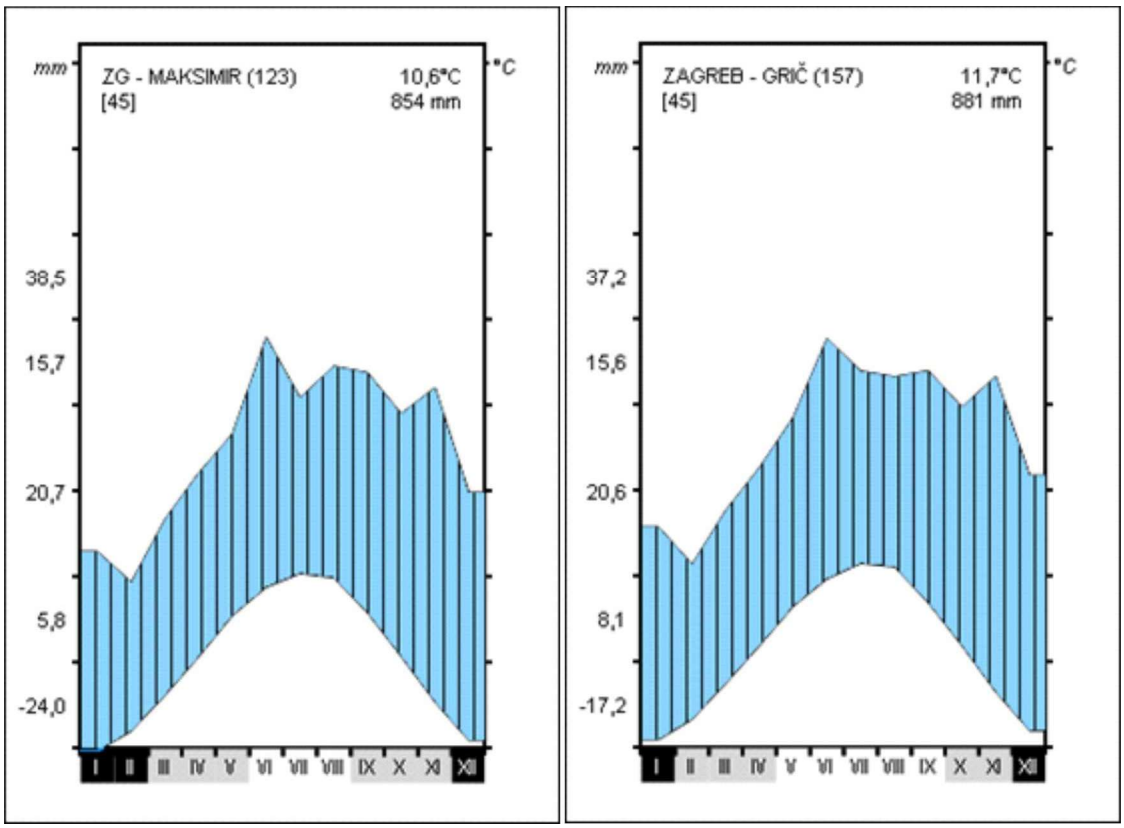
Slika 5. Položaj GJ 'Park šume grada Zagreba' (Paulić, 2015)

Cilj gospodarenja park-šumama u prvome je redu pridobivanje i održavanje općekorisnih funkcija, pri čemu su odmor i rekreacija građana na prvome mjestu (Matić i sur., 2010).

Iako su sastavni dio zelenih površina grada Zagreba, park-šumama gospodari poduzeće Hrvatske šume d.o.o., na razini gospodarske jedinice „Park šume grada Zagreba“, UŠP Zagreb, RJ Hortikultura.

3.1.1. Klimatska obilježja park-šuma grada Zagreba

Srednja godišnja temperatura na području grada Zagreba iznosi 10,6 °C (Maksimir), odnosno 11,7 °C (Grič). Temperaturni maksimum nalazi se u drugoj polovici srpnja, dok je najniža temperatura u godini zabilježena u siječnju.



Slika 6. Klima dijagrami prema Walteru za meteorološke postaje na području grada Zagreba za razdoblje 1960. – 2004. (Seletković i sur., 2010)

Srednja godišnja količina oborina na području grada Zagreba kreće se u rasponu od 854 mm (Maksimir) do 881 mm (Grič), a nisu prisutna razdoblja suhoće ili suše. Vrhunci količina oborina nalaze se u drugoj polovici lipnja te krajem listopada i studenoga.

3.1.2. Geološka podloga i tla park-šuma grada Zagreba

Geološku podlogu u gospodarskoj jedinici 'Park šume grada Zagreba' tvore uglavnom kvartarne naslage terasnih i obrončanih diluvija te aluvija. Na južnim se obroncima Medvednice nalaze silikatni i silikatno-karbonatni supstrati na kojima su se razvili različiti tipovi tala, kao što su luvisol, pseudoglej, koluvijalno i aluvijalno tlo te kiselo smeđe tlo (Matić i sur., 2010). Prema zastupljenosti pojedinih tipova tala ističe se pseudoglej obrončani kao najzastupljenije tlo na području gospodarske jedinice na 89,5 % površine, dok je dominantna teksturna oznaka tla praškasta ilovača i praškasto-glinasta ilovača (Paulić,2015).

3.2. Odabir lokacije istraživanja

Budući da je riječ o šumama koje rastu u urbanome području te su time stabla izložena nepovoljnim utjecajima takvoga okruženja, a ujedno je potencijalna opasnost u slučaju izvale, velika zbog razvijene mreže pješačkih staza, park-šume predstavljaju idealnu lokaciju za provođenje ovoga istraživanja. Dobna struktura je, s gledišta uređivanja šuma, nepovoljna; čak trećina sastojina su stare sastojine, čime je opasnost od izvale stabala veća. Usto, riječ je o lokacijama koje su od velikog interesa posjetiteljima te je time i veći značaj utvrđivanja opasnosti od izvale stabala (Matić i sur., 2010). Uređajni razred hrasta kitnjaka zauzima gotovo 80 % površina GJ „Park šume grada Zagreba“ (Anon., 2014) te je stoga ova vrsta odabrana za istraživanje.

Kao točne lokacije istraživanja odabrane su park-šume Granešina i Zelengaj.

3.2.1. Park-šuma Granešina

Park-šuma Granešina smještena je u istočnome dijelu grada Zagreba te obuhvaća sastojine u sklopu Grada mladih. Glavna namjena ove šume jest rekreacija i boravak posjetitelja, posebice djece. Samim time tlo na području šume izloženo je gaženju i zbijanju, što se nepovoljno očituje na rast korijenovog sustava, kao i propusnost tla za vodu. Većina sastojina na području park-šume su sastojine hrasta kitnjaka. U središtu park-šume raste 140-godišnja sastojina hrasta kitnjaka s primjesama hrasta lužnjaka, običnog graba te manjim udjelima klena, pitomoga kestena, običnog jasena, bagrema, lipe i drugih vrsta. Stara hrastova stabla visine su do 30 metara, s dobro razvijenim tanjurastim krošnjama. Krošnje gradi dosta suhih grana obraslih imelom. Na istočnome dijelu park-šume prostire se značajno mlađa, 50-godišnja sastojina bagrema s primiješanim hrastom kitnjakom te drugim vrstama (Matić i sur., 2010).

3.2.2. Park-šuma Zelengaj

Park-šuma Zelengaj naslanja se na park-šume Kraljevec i Tuškanac-Dubravkin put-Cmrok, a zanimljivo je što se svojim južnim rubom spušta do središta Zagreba, čime je posebno dostupna posjetiteljima. U središnjemu dijelu prevladava stara, 130-godišnja miješana sastojina hrasta kitnjaka, običnoga graba i bukve, uz primiješana stabla bagrema, lipe, divlje trešnje, klena, johe, hrasta lužnjaka i gorskoga javora. Ipak, hrast kitnjak prevladavajuća je vrsta, posebice na osunčanim i sušim grebenima, gdje tvori samostalne skupine stabala, bez primjesa ostalih vrsta. Stabla hrasta kitnjaka su krupna i krošnjasta, s prsnim promjerima do 100 cm. Pojedina stabla napadnuta su imelom ili su pak suhovrha ili natrula; dosta je stabala obraslom bršljanom. Sve ove pojave upućuju na intenzivan antropogeni utjecaj, zbog kojega će se u budućnosti morati

uklanjati bolesna i oštećena stabla, ali i ona koja su potencijalno opasna za objekte i okolinu. Umjesto njih trebat će, ako se pomladak ne razvije prirodno, posaditi sadnice kako bi se tlo što prije zaštitilo od erozije. U sastojini po hektaru uspijeva 221 stablo, od čega je samo 15 stabala hrasta kitnjaka (Matić i sur., 2010).

3.3. Vlažnost tla

Vlaga u tlu predstavlja glavni izvor vode u biljnoj proizvodnji te ima odlučujući učinak na procese u tlu. Upravo je iz ovih razloga bitno utvrditi njezin sadržaj (udio) u tlu. Pri tome se najčešće utvrđuje poljski vodni kapacitet, odnosno maseni udio vode u volumenu posve zasićenog tla. S obzirom na udio vode u tlu, razlikujemo mokru, vlažnu i suhu fazu tla (Pernar, 2017). Mjerenja u ovome radu vršena su u tlu koje je bilo u vlažnoj, odnosno suhoj fazi.

Vlažna faza tla podrazumijeva najpovoljnije stanje vlažnosti. Udio vode nalazi se između točki venuća i poljskog vodnog kapaciteta. Suha faza stanje je vlažnosti kada je udio vode ispod točke venuća, odnosno uvjeti u tlu postaju nepovoljni za stabla (Pernar, 2017).

Vlažnost tla moguće je mjeriti direktnim ili indirektnim metodama. Sam odabir metode ovisi o potrebnoj točnosti podataka, mogućnosti ponavljanja rezultata, zahtjevima za kalibracijom, karakteristikama proučavanog područja, cijeni te jednostavnosti provedbe metode.

Mjerenje vlažnosti tla TDR tipom vlagomjera (radarska reflektometrija, eng. *Time-domain reflectometry*), direktna je metoda koja je korištena u ovome radu. TDR metodom određuje se brzina kojom elektromagnetski energetski impuls putuje između dviju sondi. Brzo gibajući neutroni puštaju se u tlo iz radioaktivnog izvora. Neutroni usporavaju prilikom sudara s kationima vodika u tlu. Prednost TDR metode, u odnosu na gravimetrijsko određivanje vlažnosti tla, jest u tome što nije destruktivna te je velike točnosti. Izlazni podaci sondi mogu se odmah prevesti u podatke volumetrijskog sadržaja vode; točnost je ±1%. Ovom metodom moguće je bez teškog fizičkog rada dobiti pouzdane podatke. Sam uređaj je lagan, prenosiv, primjenjiv i na teškim te gusto pošumljenim terenima (Pernar, 2017).

Glavni problem s ovom metodom jest to što sonde moraju biti u potpunosti u kontaktu s tlom kako bi se ostvarila točna mjerenja te je ograničene točnosti u alkalnim tlima (Dobryal i sur., 2012).

3.3.1. Opis izmjere vlažnosti tla

Mjerenje vlažnosti tla vršili smo pomoću dvije različite sonde. Sondom "FieldScout 300" (Spectrum Technologies, SAD) vršena su mjerenja u vlažnim uvjetima na obje lokacije, dok su sondom "Theta Probe" (Eijkelkamp, Nizozemska) vršena mjerenja u suhim uvjetima, također na obje lokacije. Budući da sonde moraju doći u kontakt s tlom cijelom svojom duljinom, potrebno je očistiti tlo od listinca ili niskoga raslinja prije samog mjerenja. U oba slučaja vlažnost tla utvrđivana je na:

⇒ četiri glavne strane svijeta - sjever, istok, zapad, jug;

⇒ četiri udaljenosti od debla - 0 m, 1 m, 2 m, 3 m;

⇒ dvije dubine - do 20 cm te do 50 cm.

Mjerenja na dubini većoj od 20 cm vršena su pomoću lopate, kojom je napravljen zasjek u koji je utisnuta sonda te je prosječna dubina takvih mjerenja iznosila 30 cm.

Dobiveni podaci iskazani su u volumetrijskome postotnome sadržaju vode u tlu.

Slika 7. Prikaz izmjere vlažnosti tla TDR sondama

Mjerenje sondom “FieldScout 300” vrši se utiskivanjem paralelnih igli sonde u tlo cijelom njihovom duljinom. Pritiskom na tipku sonda očitava vlažnost te rezultat prikazuje na digitalnome zaslonu kao postotni udio vode u tlu. Mjerenja je potrebno vršiti oprezno, kako bi se izbjeglo savijanje igala, budući da ono može dovesti do netočnih rezultata.

Sonda “Theta Probe” istog je principa rada, međutim sonda se sastoji od tri kraće koje su smještene kružno te je time smanjena vjerojatnost od savijanja. Pritiskom na tipku, sonda očitava rezultat te ga prikazuje kao postotni udio vode u tlu na digitalnome zaslonu. Osim za mjerenje vlažnosti tla, sonda se može koristiti i u svrhe drugih geotehničkih mjerenja tla, istraživanje prometnosti ili kapaciteta tla (Pandur, 2013).

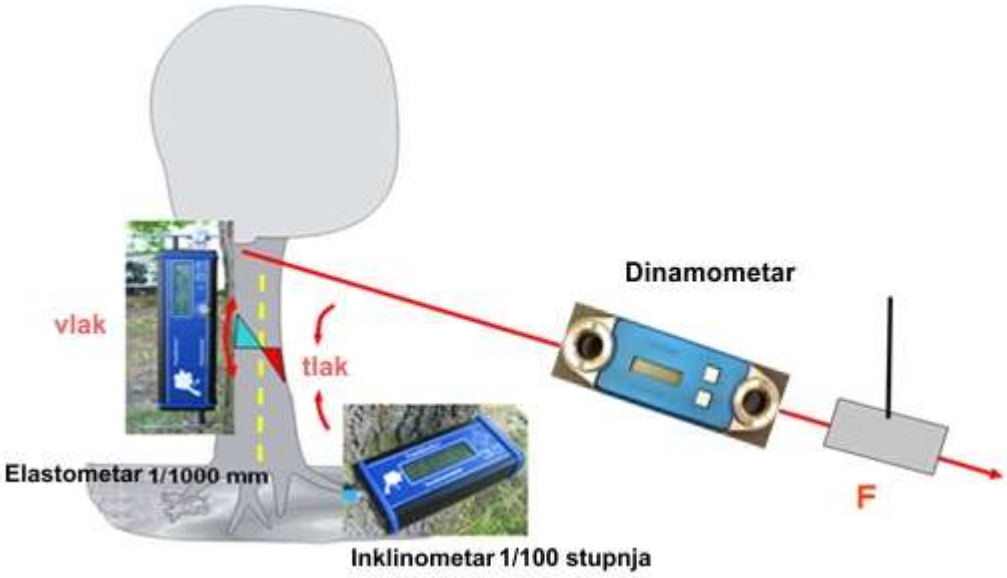
3.4. Potezni test

Potezni test metoda je procjene sigurnosti od loma i izvale cijeloga stabla; njime se simulira utjecaj udara vjetra na stablo, odnosno djelovanje sile vjetra.

Metoda se sastoji od povlačenja stabla, čime se simulira umjeren udar vjetra, a mjere se promjene u duljini vlakana i nagib korijenove ploče (žilišta). Stablo se povlači preko sustava kablova dok se sila primjenjuje vitlom. Silu mjeri dinamometar postavljen na uže, nagib inklinometri na žilištu, a promjene u duljini vlakana elastometri postavljeni duž debla, na mjestu najvećeg naprezanja (zbijanja ili istezanja). Ovi se podaci obrađuju računalnim algoritmima te se tako obrađeni pridružuju izmjerenoj visini stabla, promjeru krošnje i debla, svojstvima drva i faktoru aerodinamičkog otpora u konačnoj procjeni stabilnosti stabla.

Podnosi li stablo opterećenje vjetra simulirano poteznim testom u skladu s dobivenim vrijednostima za maksimalno opterećenje vjetrom, faktor sigurnosti stabla iznosi 1 (100%). Faktor sigurnosti od 100 %, izračunat ovom metodom, ukazuje na to da je struktura stabla dovoljno jaka da se odupre opterećenju kakvo bi stablo iskusilo u teškoj oluji, s udarima vjetra od 32,5 m/s. Budući da u skladu sa inženjerskim standardima svaka struktura mora imati dostatnu rezervu čvrstoće iznad očekivanog opterećenja, kao faktor sigurnosti uzima se vrijednost 1,5 (Detter i sur., 2018). Stablo čiji je faktor sigurnosti veći od 1,5 ima značajne rezerve čvrstoće i može se smatrati sigurnim od izvale ili loma (Brudi i van Wassenaer, 2002).

Prije provođenja mjerenja, potrebno je izvršiti vizualan pregled stabla (VTA metoda) te utvrditi najslabije mjesto na stablu, koje će se detaljnije ispitati.



Slika 8. Shematski prikaz poteznog testa TreeQinetic (Paulić, 2015)

3.4.1. Opis izmjere sa poteznim testom

Za testiranje stabilnosti stabala u ovome radu odabrano je sveukupno deset stabala hrasta kitnjaka; pet na lokaciji u Granešini te pet na Zelengaju. Mjerenja su provođena u više navrata:

⇒ pri povećanoj vlažnosti tla: u listopadu i studenom 2017. godine, te

⇒ pri smanjenoj vlažnosti tla: u srpnju 2018. godine.

Za povođenje poteznog testa korišten je sustav TreeQinetic (Argus Electronic GmbH, Njemačka). Sustav se sastojao od četiri inklinometra, dinamometra te jedinice za bežično prikupljanje i prijenos podataka na prijenosno računalo, u stvarnome vremenu (tzv. data logger).

Inklinometri se postavljaju na žilište stabla, što je bliže tlu moguće; cilj ih je rasporediti ravnomjerno po opsegu stabla, odnosno na svaku stranu svijeta po jedan senzor. Pri postavljanju bitno je da niti jedan dio senzora ne zapinje za stablo ili neku drugu prepreku. U svrhu toga provodi se čišćenje žilišta prije postavljanja inklinometara. Sva četiri inklinometra treba usmjeriti prema smjeru povlačenja ili okomito na njega. Mjerenjem se bilježi nagib žilišta u smjeru x-osi (inklinometri paralelni na smjer povlačenja), odnosno u smjeru y-osi (inklinometri okomiti na smjer povlačenja). Zabilježene vrijednosti su na stotinku stupnja, a te se vrijednosti stavljaju u odnos sa zabilježenom silom na dinamometru; iz tog odnosa vidljivo je ponašanje opterećenog korijenskog sustava.

Slika 9. Postavljenje poteznog testa za izmjeru stabilnosti stabla

Sidrište za užad kojim se stablo povlači te na kojemu je dinamometar postavlja se što je više moguće na stablu koje se ispituje, odnosno što je bliže teoretskome težištu stabla moguće. Visine sidrišta za užad na stablima mjerenima u ovome istraživanju bile su u rasponu od 5,3 m do 9,9 m. Na uže kojim se stablo poteže stavlja se dinamometar koji mjeri silu potezanja u kilonjutnima (kN). Ručno vitlo, kojim se uže zateže, smješteno je na tlu na stablu koje predstavlja drugu točku sidrenja užadi za potezanje stabla.

Smjer potezanja stabla biran je tako da sva stabla budu potezana u približno istome smjeru: smjer potezanja je određen prema smjeru dominantnih vjetrova na području grada Zagreba koji dolaze iz smjera sjever - sjeveroistok.

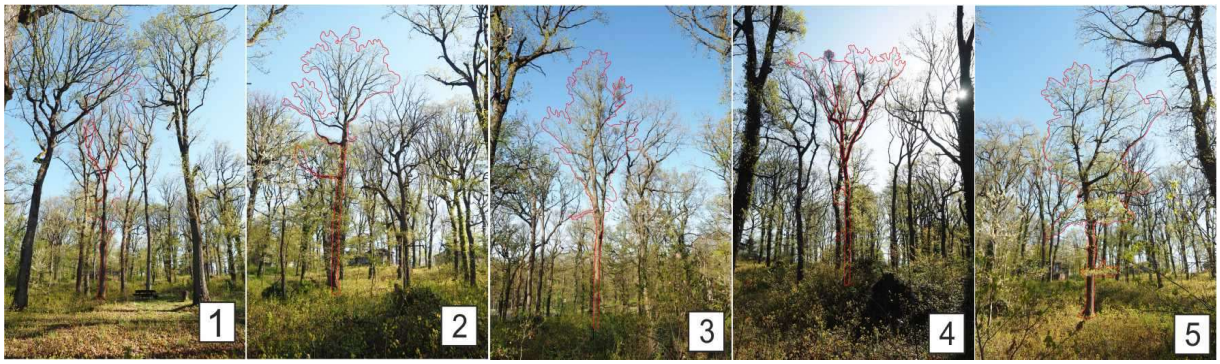
Svako stablo potezano je pet puta; iza svakog potezanja i postizanja maksimalne određene sile i otklona, vitlo je otpuštano te je mjeren oporavak stabala, odnosno povratak stabla u izvorni položaj. Granična sila do koje je povlačenje vršeno iznosila je prosječno 20 kN, dok je granični

otklon žilišta iznosio do 0,25°. Te su vrijednosti određene s obzirom da se njima stabla ne ugrožavaju, odnosno neće dovesti do trajnog oštećenja korijenskog sustava (Wessoly i Erb, 2014). Prilikom mjerenja zabilježeni su položaji svih senzora, visina sidrišta na stablu, visina samoga stabla, kao i udaljenost od stabla na kojemu se nalazila druga točka sidrenja užadi za potezanje stabla (udaljenost povlačenja). Usto su uzimani unakrsni promjeri na visini od 1 m, kao i na prsnoj visini.

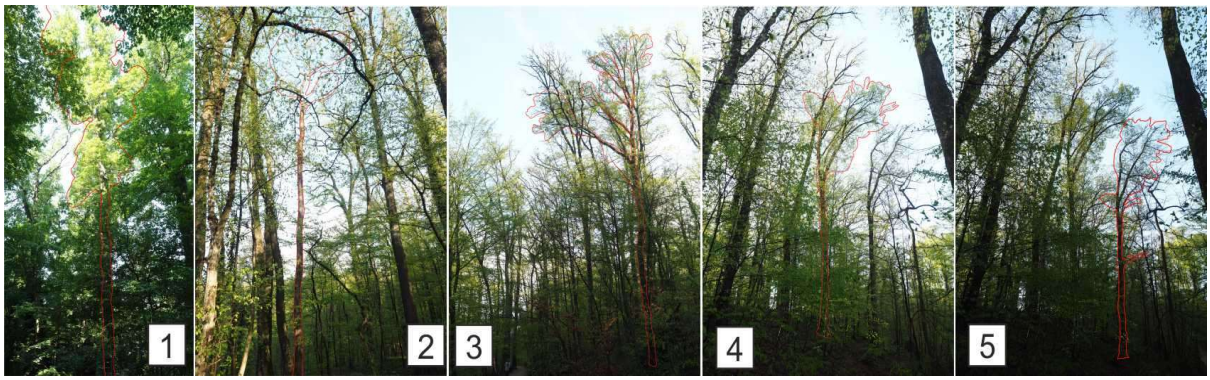
Svi podaci koji su prikupljeni tijekom mjerenja obrađeni su u softverskom programu ArboStat (Arbosafe GmbH, Njemačka).

3.4. Istraživana stabla

Istraživanje je provedeno na zrelim urbanim stablima hrasta kitnjaka podjednake dobi i dimenzija, bez ili s malim znakovima truleži na žilištu, ravnomjerno razvijene krošnje te podjednako ravnih debala. Posebno je važna okolina odabranih stabala: u radijusu od 3 m oko svakoga stabla nije smjelo biti pješačke staze, kanala, ceste ili bilo kojeg drugog građevinskog zahvata ili objekta koji bi mogao utjecati na normalan razvoj korijena. Budući da sva odabrana stabla rastu na maloj udaljenosti jedno od drugoga, stanišni uvjeti su homogeni, kao i klimatski čimbenici kojima su izložena.



Slika 10. Istraživana stabla na lokaciji Granešina



Slika 11. Istraživana stabla na lokaciji Zelengaj

Prosječan promjer istraživanih stabala iznosio je 64,7 cm. Prosječna visina stabla iznosi 28,54 m, s prosječnim težištem na 20,52 m. Prosječna širina krošnje jest 11,121 m, a zauzima površinu od 70,92 m^2 (Tablica 1).

Tablica 1. Deskriptivni podaci o istraživanim stablima

	Promjer (cm)	**Visina (m)**	**Širina krošnje (m)**	**Površina krošnje (m^2)**	**Površina stabla (m^2)**	**Visina težišta (m)**	**Izračunato opterećenje vjetrom (kNm)**
Granešina 1	64	27,0	7,3	55,2	63,3	18,0	196,9
Granešina 2	61	27.7	13,42	83,8	92,7	20,4	306,4
Granešina 3	61	26,1	10,3	73,0	79,2	17,7	224,0
Granešina 4	75	25,5	14,11	62,6	73,3	19,5	239,4
Granešina 5	66	21,0	11,32	96,8	102,7	13,7	219,0
Zelengaj 1	75	35,0	10,38	107,0	119,9	24,9	540
Zelengaj 2	56	28,5	7,08	33,7	44,2	21,7	174,5
Zelengaj 3	72	33,4	14,64	52,8	67,6	23,8	276,1
Zelengaj 4	53	30,1	12,33	77,3	87,0	22,7	326,9
Zelengaj 5	64	31,1	10,33	67,0	79,3	22,8	316,5
Srednja vrijednost	64,7	28,54	11,12	70,92	80,92	20,52	281,97
Min	53	21	7,08	33,7	44,2	13,7	174,5
Max	75	35	14,64	107	119,9	24,9	540
Standardna devijacija	7,51	4,08	2,60	21,67	21,26	3,39	104,53
Koeficijent varijabilnosti	11,61	14,28	23,39	30,56	26,28	16,50	37,07

Visine stabala veće su na lokaciji Zelengaj, a kreću se u rasponu od 28,5 m do 35,0 m. Samim time na ovoj su lokaciji veće i površine krošanja, koje su u rasponu od 33,7 m^2 do 107,0 m^2, kao i opterećenje vjetrom, koje obuhvaća raspon od 174,5 kNm do 540,0 kNm. Ove velike raspone podataka potvrđuje i koeficijent varijabilnosti, koji za površinu krošnje iznosi 30,56 %, a za opterećenje vjetrom 37,07 %.

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

4.1. Vlažnost tla

Povećanje vlažnosti tla utječe na smanjivanje fizikalno – mehaničkih svojstva tla, prvenstveno smične čvrstoće tla koju određuje kohezija između čestica gline, čime može doći do povećanja vjerojatnosti izvale stabla (Paulić, 2015).

Vlažnost tla je određena neposrednim mjerenjem sadržaja volumetrijske vlage u tlu (%), u dva navrata (vlažni i suhi uvjeti) na dvije dubine mjerenja (od 0 – 20 cm i 21–50 cm) te na dvije lokacije istraživanja (Granešina i Zelengaj).

Tablica 2. Deskriptivna statistika volumetrijske vlage tla (%) na dubini od 0 – 20 cm i 21–50 cm prema lokacijama istraživanja

	Valid N	Mean	Median	Minimum	Maximum	Variance	Std.Dev.
Granešina 0-20 cm 'vlažno tlo' (%)	75	20,379	20,70	9,30	30,40	20,994	4,582
Granešina 0-20 cm 'suho tlo' (%)	165	17,309	16,00	7,00	32,00	29,715	5,451
Granešina 21-50 cm 'vlažno tlo' (%)	74	18,746	19,00	9,30	26,50	16,045	4,006
Granešina 21-50 cm 'suho tlo' (%)	108	22,028	22,00	13,00	29,00	12,962	3,600
Zelengaj 0-20 cm 'vlažno tlo' (%)	237	26,951	26,80	9,30	43,70	82,530	9,085
Zelengaj 0-20 cm 'suho tlo' (%)	92	10,750	11,00	7,00	14,00	2,563	1,601
Zelengaj 21-50 cm 'vlažno tlo' (%)	201	23,675	22,30	7,60	46,80	85,890	9,268
Zelengaj 21-50 cm 'suho tlo' (%)	52	8,346	9,00	5,00	11,00	2,113	1,454

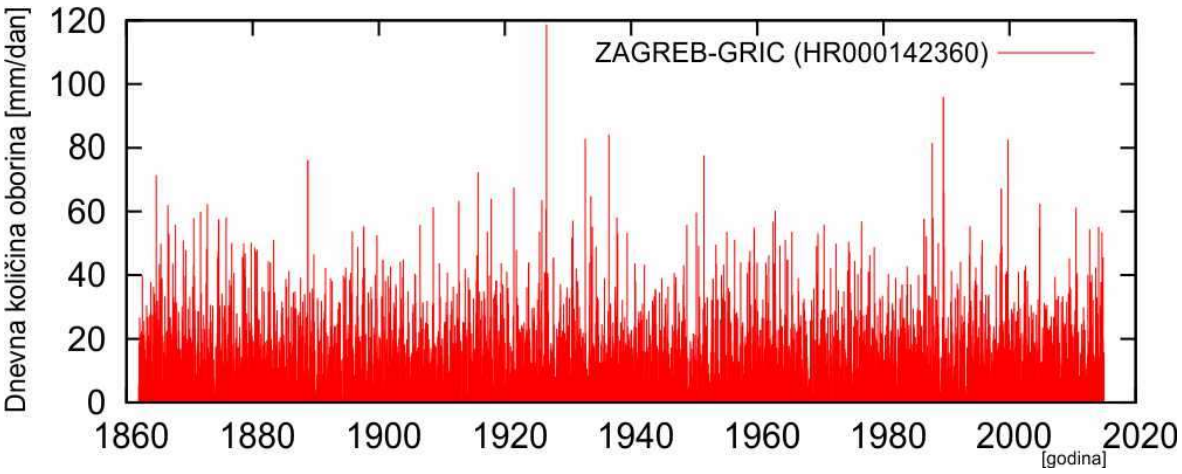
U suhim uvjetima postignute su najniže, a u vlažnim uvjetima najviše vrijednosti volumetrijskog sadržaja vlage u tlu na lokaciji Zelengaj. U oba slučaja riječ je o mjerenjima vršenima na dubini tla od 21 – 50 cm. Minimalna vrijednost vlage tla iznosila je 5,00 %, dok je maksimalna vrijednost iznosila 46,8 %.

Prosječne vrijednosti volumetrijske vlage tla veće su u vlažnim uvjetima na svim lokacijama ispitivanja i dubinama mjerenja, osim mjerenja na dubini 21-50 cm u Granešini gdje je zabilježena veća vrijednost prosječne i maksimalne vlage tla u suhim nego u vlažnim uvjetima.

Prema podacima DHMZ-a o dnevnoj količini oborina u danima koji su prethodili mjerenju poteznim testom izračunata je količina oborina za razdoblje od nekoliko dana.

Mjerenjima u suhim uvjetima na lokaciji Granešina prethodila su tri dana s ukupno 16,2 mm oborina te jedan dan bez oborina, dok su na lokaciji Zelengaj mjerenju prethodila tri dana oborina s ukupnom količinom od 18,1 mm te jedan dan bez oborina. Sva mjerenja provedena su na dane kada nije bilo oborina

Mjerenju u vlažnim uvjetima na lokaciji Granešina prethodila su dva dana s ukupnom količinom oborina od 32,2 mm; dan mjerenja bio je suh. Mjerenju u vlažnim uvjetima na lokaciji Zelengaj prethodila su tri dana s 47,5 mm oborina, dok dan prije mjerenja nije bilo oborina.



Slika 12. Dnevna količina oborina za meteorološku postaju Zagreb-Grič od 1860 do 2014. godine (KNMI Climate explorer)

U Zagrebu temeljem mjerenja dnevne količina oborina, u razdoblju od 1860. do 2014. godine samo je u 0,91 % dana zabilježena količina oborina veća od 30 mm. U istome je razdoblju u 0,33% dana zabilježena količina oborina veća od 40 mm, odnosno u 0,13 % dana količina veća od 50 mm. Dan s najvećom količinom oborina zabilježen je 8.8.1926. godine, kada je izmjerena količina od 118,8 mm.

Tablica 3. T-test nezavisnih uzoraka usporedbe volumetrijske vlažnosti tla u vlažnim i suhim uvjetima ispitivanja stabilnosti stabla poteznim testom na istraživanim lokacijama

	Mean	Mean	t-value	df	p	Valid N	Valid N	Std.Dev.	Std.Dev.	F-ratio	p
Granešina 0-20 cm 'vlažno tlo' (%) vs Granešina 0-20 cm 'suho tlo' (%)	20,37867	17,30909	4,241678	238	0,000032	75	165	4,581877	5,451133	1,415425	0,092100
Granešina 21-50 cm 'vlažno tlo' (%) vs Granešina 21-50 cm 'suho tlo' (%)	18,74595	22,02778	-5,76867	180	0,000000	74	108	4,005653	3,600255	1,237884	0,312232
Zelengaj 0-20 cm 'vlažno tlo' (%) vs Zelengaj 0-20 cm 'suho tlo' (%)	26,95148	10,75000	16,98841	327	0,00	237	92	9,084582	1,600996	32,19805	0,00
Zelengaj 21-50 cm 'vlažno tlo' (%) vs Zelengaj 21 -50 cm 'suho tlo' (%)	23,67463	8,346154	11,87222	251	0,000000	201	52	9,267659	1,453658	40,64578	0,00

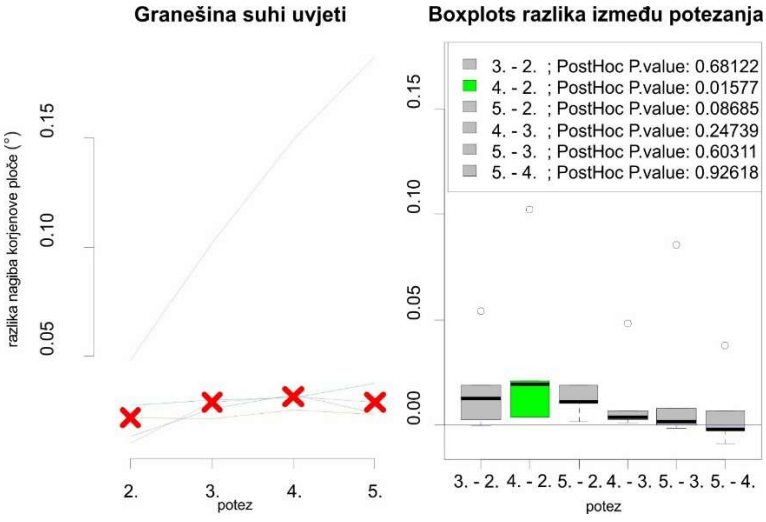
Prema rezultatima T-testa, u svim je testiranjima utvrđena statistički značajna razlika volumetrijske vlažnosti tla između mjerenja u suhim i vlažnim uvjetima.

Srednje vrijednosti na lokaciji Granešina na dubini od 0 do 20 cm iznosile su 20,38 % u vlažnim uvjetima, odnosno 17,23 % u suhim uvjetima. Na dubini od 20 do 50 cm iznosile su 18,75 % u vlažnim, odnosno 22,03 % u suhim uvjetima.

Srednje vrijednosti na lokaciji Zelengaj na dubini od 0 do 20 cm iznosile su 26,95 % u vlažnim uvjetima, odnosno 10,75 % u suhim uvjetima. Na dubini od 20 do 50 cm iznosile su 23,67 % u vlažnim, odnosno 8,35 % u suhim uvjetima.

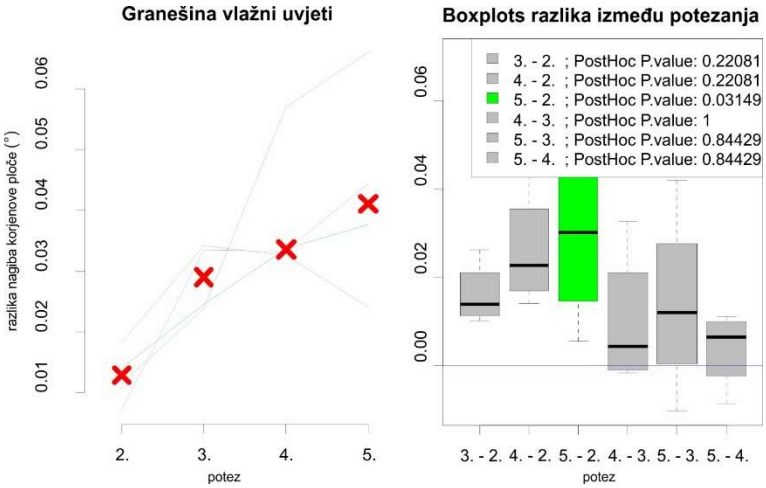
4.2. Utjecaj ponavljanih povlačenja stabala na kut nagiba korijenove ploče

Cilj višestrukih povlačenja stabala bio je utvrditi postoji li značajna razlika u kutu nagiba korijenove ploče kao posljedice višestrukih povlačenja tijekom izvođenja poteznog testa pri vlažnim i suhim uvjetima. Utvrđivao se utjecaj ovih povlačenja na stabilnost stabla, s obzirom da ona utječu na sve veću zbijenost tla, čime stabla postaju sve slabije učvršćena u tlu. Uspoređivano je po pet mjerenja za svako stablo. Statistički test kojim je rađeno testiranje razlike u nagibu nakon opetovanog potezanja je Friedman ANOVA sa post hoc provjerom sa Wilcoxon-Nemenyi-McDonald-Thompson testom. Riječ je o neparametrijskome testu za zavisne uzorke koji, za razliku od jednostavnog ANOVA testiranja, ne zahtijeva pretpostavku normalne distribucije i jednake varijance. Time je ovaj test manje statističke snage, u odnosu na parametrijsku verziju ANOVA testa (Ramsey i sur., 1990).



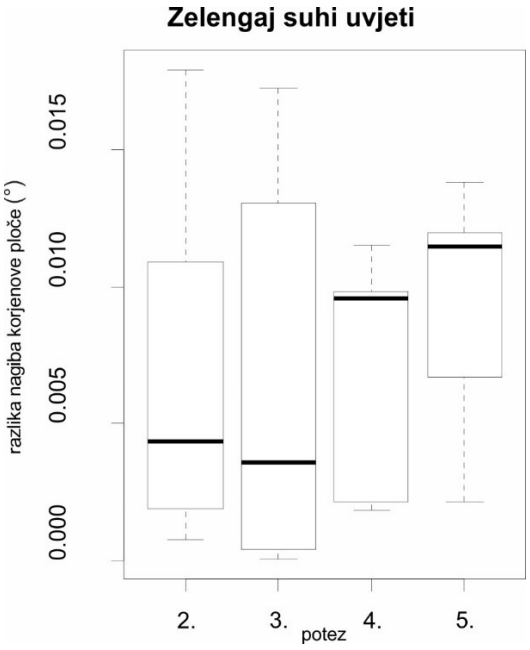
Slika 13. Razlika nagiba korijenove ploče između opetovanih potezanja stabala u Granešini pri uvjetima suhog tla

Iz rezultata Friedman ANOVA testa na lokaciji Granešina u suhim uvjetima poteznim testom su zabilježene značajne razlike (p = 0.01577) između nagiba korijenove ploče pri opetovanom potezanju stabla. Stablo 1 pokazuje ekstremne vrijednosti, u usporedbi s ostalim stablima.



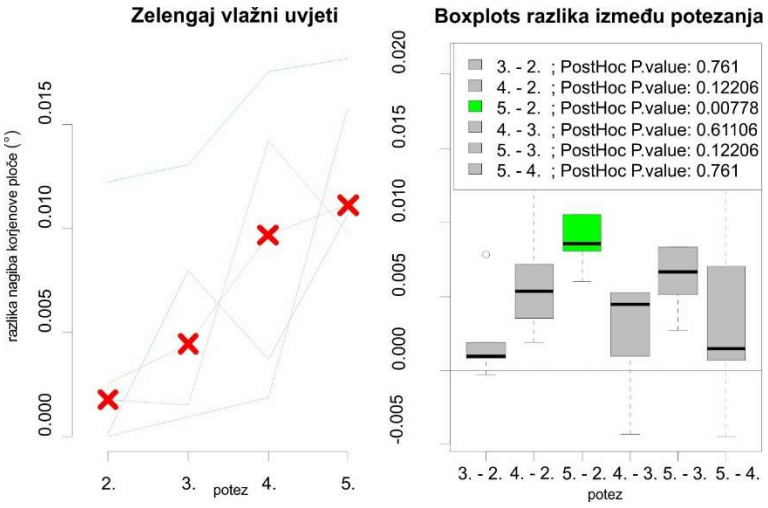
Slika 14. Razlika nagiba korijenove ploče između opetovanih potezanja stabala u Granešini pri uvjetima vlažnog tla

Iz rezultata Friedman ANOVA testa na lokaciji Granešina u vlažnim uvjetima poteznim testom su zabilježene značajne razlike (p = 0.03149) između nagiba korijenove ploče pri opetovanom potezanju stabla.



Slika 15. Razlika nagiba korijenove ploče između opetovanih potezanja stabala u Zelengaju pri uvjetima suhog tla

Iz rezultata Friedman ANOVA testa na lokaciji Zelengaj u suhim uvjetima poteznim testom nisu zabilježene značajne razlike (p = 0.3738) između nagiba korojenove ploče pri opetovanom potezanju stabla.



Slika 16. Razlika nagiba korijenove ploče između opetovanih potezanja stabala u Zelengaju pri uvjetima vlažnog tla

Iz rezultata Friedman ANOVA testa na lokaciji Zelengaj u vlažnim uvjetima poteznim testom su zabilježene značajne razlike (p = 0.00778) između nagiba korijenove ploče pri opetovanom potezanju stabla.

4.3. Faktor sigurnosti od izvale pri vlažnim i suhim uvjetima tla

Faktor sigurnosti izračunat je pomoću softvera ArboStat, na temelju podataka o nagibu korijenove ploče (žilišta) dobivenih terenskim mjerenjima inklinometrima. Dobivene vrijednosti uspoređuju se s graničnom vrijednošću od 1,5. Prema Wessolyiju i Erbu (2014), stablo čiji je faktor sigurnosti od sigurnosti $\geq$1.5 smatra se sigurnim od izvale.

	Faktor sigurnosti - vlažni uvjeti	**Faktor sigurnosti - suhi uvjeti**	**Razlika u faktoru sigurnosti između vlažnih i suhih uvjeta (%)**
Granešina 1	1,67	2,99	-132
Granešina 2	0,65	0,84	-19
Granešina 3	1,51	1,53	-2
Granešina 4	1,43	1,56	-13
Granešina 5	1,06	1,45	-39
Zelengaj 1	1,58	1,47	11
Zelengaj 2	1,64	1,64	0
Zelengaj 3	2,75	2,69	6
Zelengaj 4	1,09	1,08	1
Zelengaj 5	0,94	1,27	-33
Srednja vrijednost	1,432	1,652	
Min	0,65	0,84	
Max	2,75	2,99	
Standardna devijacija	0,5748391	0,6747477	
Koeficijent varijabilnosti	40,14	40,84	

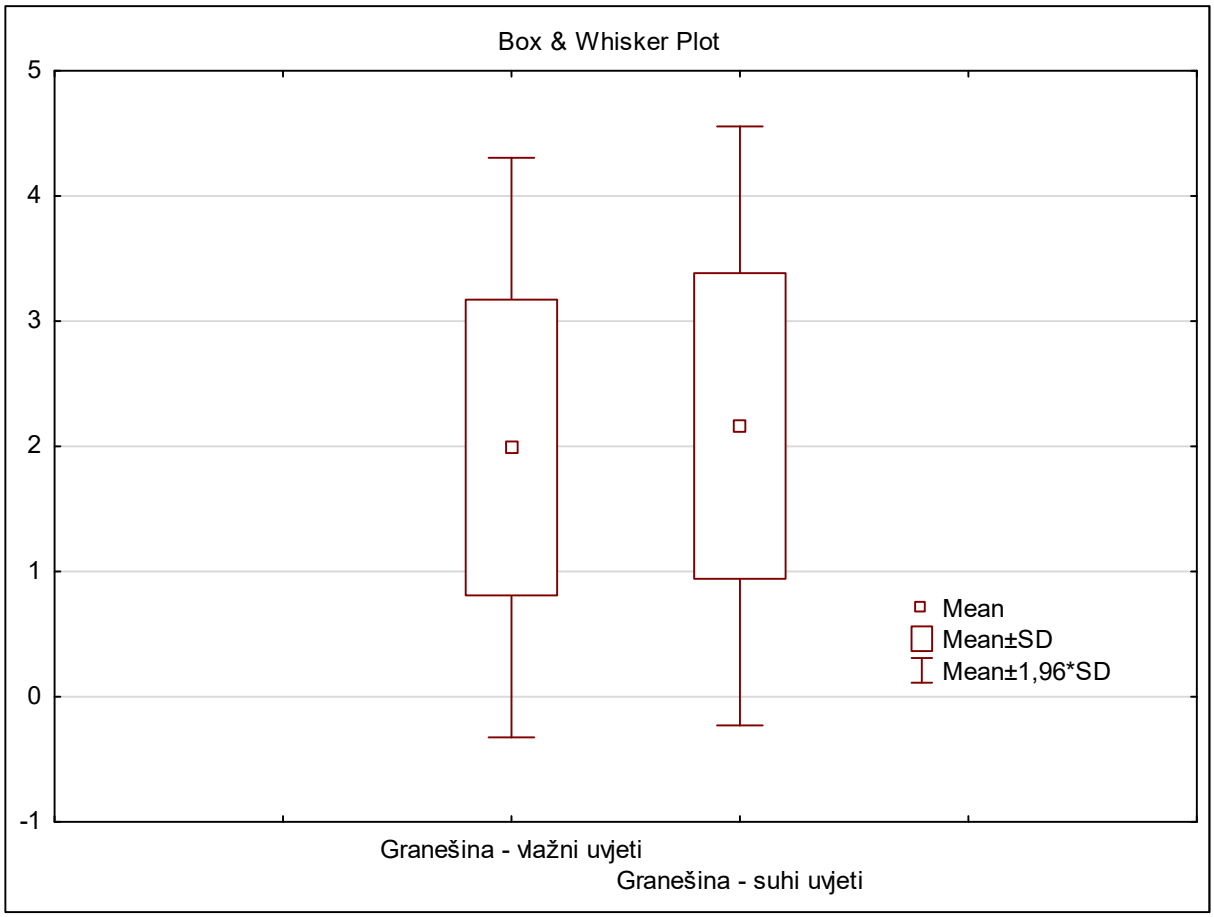
Tablica 4. Deskriptivni podaci o izračunatim faktorima sigurnosti stabala

Na lokaciji Zelengaj u vlažnim je uvjetima faktor sigurnosti bio dovoljno visok kod triju stabala, u rasponu od 1,58 do 2,64. U suhim uvjetima zadovoljavajuće visok faktor imala su samo dva stabla, s vrijednostima od 1,64 i 2,69. Pri tome je kod triju stabala utvrđen veći faktor sigurnosti u vlažnim uvjetima, u usporedbi sa suhim uvjetima. Ipak, riječ je o relativno malim promjenama faktora sigurnosti. Stablo 3 bilo je jednakoga faktora sigurnosti u oba mjerenja. Stablo 5 jedino je stablo kod kojega je faktor sigurnosti bio veći u suhim uvjetima, i to za trećinu.

Za usporedbu pojedinih parova faktora sigurnosti u vlažnim i suhim uvjetima testiranja korišten je Wilcoxon test, koji predstavlja modifikaciju testa predznaka te je neznatno manje pouzdan od najvažnijeg parametarskog T - testa (Vasilj, 1972).

Tablica 5. Wilcoxon test usporedbe parova faktora sigurnosti od izvale na lokaciji Granešina pri vlažnim i suhim uvjetima testiranja

Parovi varijabli	N	T	Z	p - vrijednost
Granešina vlažni uvjeti vs Granešina suhi uvjeti	20	53,00	1,941299	0,052223



Slika 17. 95 % interval pouzdanosti za faktor sigurnosti od izvale na lokaciji Granešina pri vlažnim i suhim uvjetima testiranja

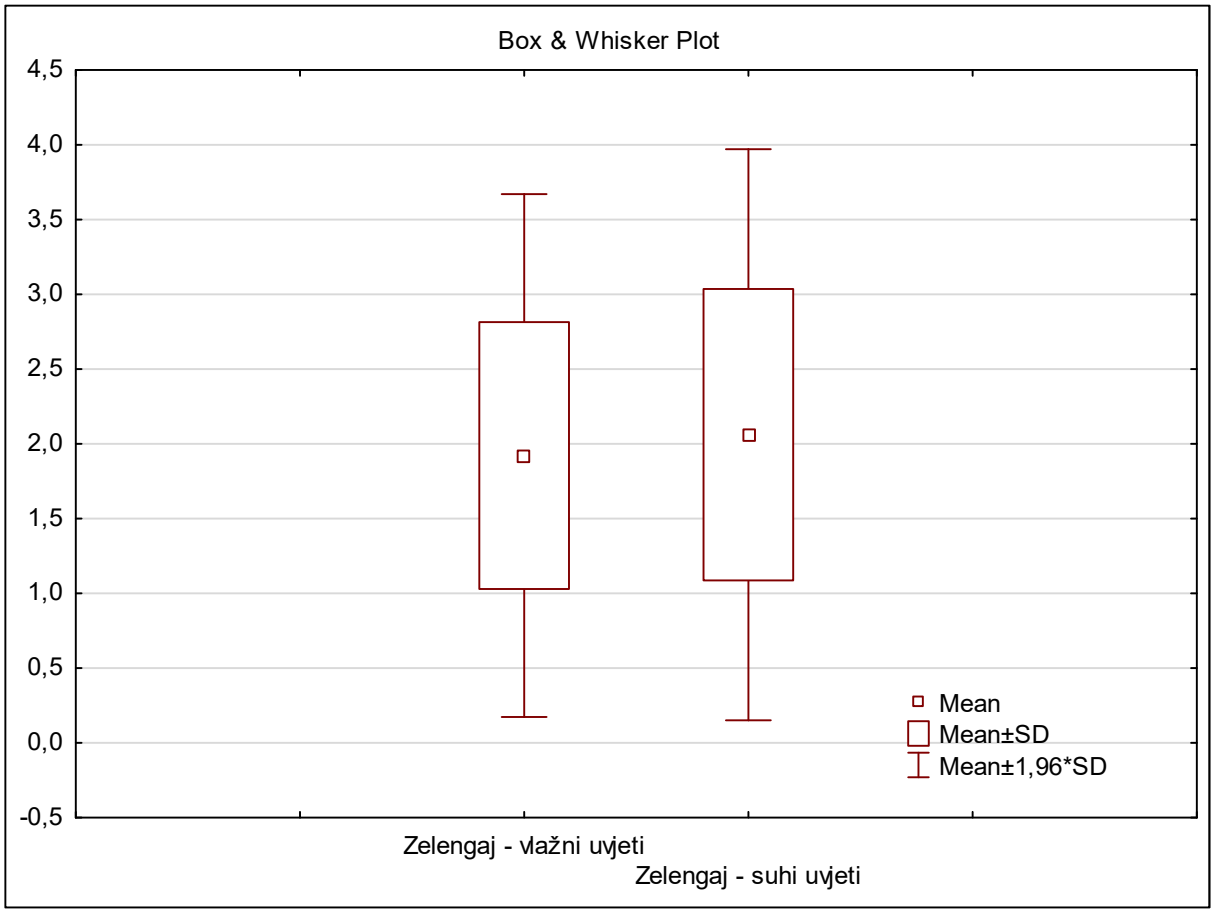
S obzirom da p-vrijednost iznosi 0,052, odnosno veća je od 0,050, možemo zaključiti kako ne postoji statistički značajna razlika između dobivenih faktora sigurnosti na lokaciji Granešina pri vlažnim i suhim uvjetima.

Srednja vrijednost faktora sigurnosti od izvale na lokaciji Granešina u suhim uvjetima iznosila je 1,99, dok je u suhim uvjetima iznosila 2,16. Iz ovih je podataka vidljivo kako nema statistički

značajne razlike između ovih dvaju mjerenja, budući da se intervali pouzdanosti gotovo u potpunosti preklapaju.

Tablica 6. Wilcoxon test usporedbe parova faktora sigurnosti od izvale na lokaciji Zelengaj pri vlažnim i suhim uvjetima testiranja

Parovi varijabli	N	T	Z	p - vrijednost
Zelengaj vlažni uvjeti vs Zelengaj suhi uvjeti	18	58,00	1,197635	0,231060



Slika 18. 95 % interval pouzdanosti za faktor sigurnosti od izvale na lokaciji Zelengaj pri vlažnim i suhim uvjetima testiranja

Iz rezultata testa vidljivo je kako ne postoji statistički značajna razlika između dobivenih faktora sigurnosti stabala pri suhim i vlažnim uvjetima na lokaciji Zelengaj, budući da je $p = 0,23$.

Srednja vrijednost faktora sigurnosti od izvale na lokaciji Zelengaj u suhim uvjetima iznosila je 1,94, dok je u suhim uvjetima iznosila 2,06. Iz ovih je podataka vidljivo kako ne postoji

statistički značajna razlika između ovih dvaju mjerenja, s obzirom na to da se intervali pouzdanosti gotovo u potpunosti preklapaju.

Srednje vrijednosti kojima su izračunati intervali pouzdanosti na obje lokacije dobivene su pomoću podataka svih senzora, odnosno podaci o faktorima sigurnosti od izvale u svim smjerovima.

5. RASPRAVA

Cilj ovoga istraživanja bio je utvrditi ima li povećanje vlažnosti tla utjecaj na stabilnost stabala hrasta kitnjaka. S obzirom da su tipovi tala koja se nalaze na istraživanim lokacijama praškasta ilovača i praškasto-glinasta ilovača, poljski vodni kapacitet nalazi se na 35-40 % zasićenosti tla vodom (Pernar, 2017). Maksimalna srednja vrijednost vlažnosti tla u ovome je istraživanju iznosila 26,8 %. Može se zaključiti kako tijekom istraživanja poljski vodni kapacitet nije dosegnut, ali su vladali vlažni uvjeti u razdoblju vršenja mjerenja. Prema Rahardjo i sur. (2016), porast volumetrijskog sadržaja vode u tlu dovodi do smanjenja stabilnosti stabla, čineći ga podložnijim negativnome utjecaju vjetra. Tlo na istraživanim lokacijama bio je pseudoglej, koji zbog svoje teže teksture omogućava dobro prodiranje korijena u dubinu (Drexhage i sur., 2011), ali ujedno zbog veće udjela glinenih čestica može vezati i veću količinu vode te je time potrebna i veća količina oborina kako bi se dosegnuo poljski vodni kapacitet.

Rezultati dobiveni ovim istraživanjem sukladni su ranijim spoznajama kako ne postoje statistički značajne razlike u dnevnim intenzitetima oborina između mjernih postaja Grič i Maksimir (Gajić-Čapka i Čapka, 1985), budući da su na obje lokacije postoje statistički značajne razlike između suhih i vlažnih mjerenja, odnosno Zelengaj i Granešina imaju jednak intenzitet oborina. Usprkos većoj količini oborina u razdoblju koje je prethodilo mjerenjima u suhim uvjetima (srpanj), to je ujedno i razdoblje s najvećom prosječnom temperaturom zraka na području grada Zagreba. Tako visoke temperature utječu na povećanu evaporaciju vode te njezin manji dio može ući u pore tla. Osim toga, u istraživanju su obuhvaćena zrela stabla hrasta kitnjaka velikih dimenzija te razvijenih krošanja. Prema Ghani i sur. (2008), velik utjecaj na sposobnost sidrenja stabala ima dubina ukorijenjivanja blizu debla. U slučaju hrasta kitnjaka, čak 80 % ukupnoga korijenskog sustava nalazi se na dubini do 30 cm te se rasprostire horizontalno oko debla (Drexhage i sur., 2011). S obzirom na visoke temperature te činjenicu kako je najveći dio korijena bio pod zastorom posve razvijene krošnje, mala je količina oborina mogla doći do tla te se infiltrirati u dubinu.

Mjerena stabla bila su višestruko potezana, s ciljem utvrđivanja mogućeg utjecaja višestrukih udara vjetra simuliranih poteznim testom na stabilnost stabala. Nakon obrade podataka, utvrđeno je kako postoje statističi značajne razlike u kutu nagiba u oba mjerenja na lokaciji Granešina. Raspon promjene između pojedinih potezanja u suhim uvjetima veoma je malen. U rezultatima iz Granešine odskače stablo 1. Kod toga je stabla kut nagiba kod svakoga potezanja rastao velikom brzinom. Možemo pretpostaviti kako je riječ o stablu s oštećenim korijenom na

strani s koje su dobivani rezultati velikih kutova nagiba. Potrebna su detaljnija ispitivanja zdravstvenog stanja korijena ovoga stabla za pouzdano utvrđivanje uzroka ovih rezultata.

Raspon rezultata veći je kod mjerenja u vlažnim uvjetima, uspoređujemo li posljednje potezanje s prvime. Time je početna pretpostavka kako ponavljana potezanja utječu na povećanje kuta nagiba potvrđena, a ujedno je moguće i zaključiti kako učestali udari vjetra velike snage u kratkome razdoblju mogu dovesti do smanjenja sigurnosti stabla. Na lokaciji Zelengaj u suhim uvjetima nije utvrđena statistički značajna razlika u kutu nagiba, dok je utvrđena u vlažnim uvjetima. Prema Stokes (1999), povećanjem promjera stabla te zrelošću, stabilnost korijenove ploče raste. S obzirom da su stabla na lokaciji Zelengaj bila najvećih dimenzija, utjecaj njhove dimenzije mogao je uvjetovati manje kuteve nagiba u ponavaljanim potezanjima. Prema Ribeiro i sur. (2016), otpornost stabala na vjetroizvalu raste s porastom njihove visine te prsnoga promjera. Budući da je prosječna visina stabala u ovome istraživanju iznosila 28,54 m, a prosječan promjer 64,7 cm, možemo zaključiti kako je bila riječ o velikim stablima te su njihove dimenzije imale pozitivan utjecaj na stabilnost.

Iz prijašnjih istraživanja (Fraser i Gardiner, 1967), utvrđeno je kako smjer povlačenja ne igra veliku ulogu u naginjanju stabla prilikom poteznog testa već značajniji utjecaj na povećanje nagiba korijenove ploče imaju tip tla te dubina ukorijenjivanja. Prema Nicoll i sur. (2005), potrebna je veća sila kako bi se stablo izvalilo potezanjem uz nagib, u odnosu na silu potrebnu za izvalu niz nagib. Područje istraživanja u ovome radu obuhvaćalo je lokacije čiji je nagib pratio slojnice terena (Zelengaj) ili je nagib padine bio blag (Granešina), stoga možemo pretpostaviti kako nagib nije bio važan čimbenik tijekom mjerenja.

Prema Kamimura i sur. (2011), težina korijenove ploče (eng. *root plate*) jedan je od glavnih faktora koji osigurava stablo od izvale te je zbog toga povećana količina vode u toj zoni u početku poželjna jer povećava težinu i time potpomaže otpor izvaljivanju. Porastom te težine, na prvi udar vjetra težište stabla pomiče se van te najuže zone korijena te stablo postaje izuzetno nestabilno i podložno izvali. U ovome istraživanju tlo nije bilo u potpunosti zasićeno, odnosno poljski vodni kapacitet nije dosegnut. Time je moguće objasniti povećanje faktora sigurnosti u vlažnim uvjetima na lokaciji Zelengaj, budući da je količina oborina povećala masu korijenove ploče u dovoljnoj mjeri da stabla postanu stabilnija, odnosno bolje usidrena.

Budući da šumski pokrov ima velik utjecaj na smanjenje opasnosti od klizišta uzrokovanim velikim oborinama na strmim padinama (Giadrossich i sur., 2017), potrebno je detaljnije istražiti utjecaj povećane vlažnosti tla na padinama većih nagiba na sigurnost od izvale stabala.

Kao parametar procjene utjecaja vlažnosti na stabilnost stabala, korišten je izračunati faktor sigurnosti od izvale. Prema dobivenim rezultatima, ne postoji statistički značajna razlika između mjerenja u vlažnim i suhim uvjetima niti na jednoj od lokacija istraživanja. Ipak, na lokaciji Granešina, razlika je gotovo statistički značajna (p=0,052). Razlog zbog kojega rezultati ipak nisu statistički značajni vjerojatno jest stablo 1, koje zbog velikih vrijednosti otklona u suhim i vlažnim uvjetima odskače značajno od ostalih izmjerenih stabala. Na stabilnost stabala također utječe i njihovo okruženje. Prema Peterson i Claassen (2012), stabla koja stoje na osami značajno su sklonija vjetroizvali od onih koja u okruženju od 5 metara imaju stablo iste vrste. Isti utjecaj grupe stabala iste vrste na stabilnost pojedinoga stabla navode i Gardiner i sur. (2016). Uvjeti kakvi su vladali na području istraživanja podupiru ovu tvrdnju, budući da su stabla rasla u sklopljenoj sastojini dugi niz godina te su bila zaštićena i podupirana okolnim stablima. Samim time je za pretpostaviti kako su manje podložna vjetroizvali. Faktori sigurnosti od izvale izračunati za stabla u ovome istraživanju nisu pokazali značajne promjene iz vlažnih u suhe uvjete tla te se kreću u rasponu od 2 – 132% na lokaciji Granešina te od 0 – 33% na lokaciji Zelengaj. Prosječna promjena faktora sigurnosti od izvale na obje lokacije između vlažnih i suhih uvjeta iznosi 9,77 %, ne uzmemo li u izračun stablo 1 s lokacije Granešina. Naime, kod ovoga je stabla promjena faktora sigurnosti iznosila 132%. Unatoč tome, faktor sigurnosti ovoga stabla je iznad 1,5 (iznosi 1,69) čime je ono i dalje sigurno od izvale prema kriterijima poteznog testa.

Prema Szoradova i sur. (2012), kod neoštećenih stabala dva faktora koja mogu imati značajan utjecaj na faktor sigurnosti su visina stabla te površina krošnje. Prosječna visina neoštećenih stabala u tom istraživanje iznosila je 21,0 m, a površina krošnje iznosila je 158,8 m^2 , dok su stabla iz ovog istraživanja imala prosječnu visinu od 28,54 m te površinu krošnje od 70,92 m^2 . Dobiveni rezultati za faktor sigurnosti od izvale iz ovoga istraživanja ne mogu potvrditi zaključak Szoradove i sur. (2012) kako visina i površina krošnje imaju značajan utjecaj na povećanje faktora sigurnosti od izvale kod neoštećenih stabala, s obzirom da unatoč statistički značajnim razlikama u vlažnosti tla, stabla sa najvećim visinama i površinama krošnje imaju slične faktore sigurnosti kao i stabla sa najmanjim visinama i površinama krošnje (npr. na lokaciji Zelengaj kod stabala 1 i 2).

Ipak, prema Szoradova i sur. (2012), čak i neoštećena stabla s faktorom sigurnosti 1,8 mogu se izvaliti, stoga je potrebno daljnje promatranje i oprez u njezi istraživanih stabala. Prema Pauliću (2015), pri uvjetima povećane vlažnosti tla kod hrasta kitnjaka dolazi do smanjenja faktora sigurnosti od vjetroizvale, ali ovo smanjenje nije bilo utvrđeno kod svih stabala. Rezultati ovoga

istraživanja podupiru ove ranije rezultate, s obzirom da je kod triju stabala utvrđeno smanjenje faktora sigurnosti, dok je kod jednoga stabla faktor ostao nepromijenjen.

Prema Cannon i sur. (2015), postoji veći broj faktora koji utječu na stabilnost stabala, kao što su vrsta stabla, dimenzije stabla, vjetar, povećanje vlažnosti tla, pa čak i oštećenja nastala djelovanjem vatre. Prema Wessoly i Erb (2014), upravo je vanjsko opterećenje stabla najvažniji faktor stabilnosti stabla te utječe na 75% stabilnosti stabla.

U ovome je istraživanju proučavan samo utjecaj povećanja vlažnosti tla te bi se u budućim istraživanjima trebalo uključiti i druge faktore, posebice učestalost i karakteristike olujnih udara vjetrova, budući da će oni postajati sve češća pojava uzrokovana globalnim promjenama klime (Rahardjo i sur., 2016).

6. ZAKLJUČAK

Cilj istraživanja provedenog u ovome radu je bio utvrditi utjecaj povećanja vlage tla na stabilnost stabala hrasta kitnjaka mjerenu poteznim testom, kao i utjecaj ponavljanih povlačenja stabala na mogućnost ponovnog uspostavljanja ravnoteže, odnosno ima li višestruko primjenjivanje sile prilikom povlačenja nepovoljan utjecaj na otpornost stabla od izvale.

- ✓ Na obje lokacije istraživanja utvrđene su statistički značajne razlike u vlažnosti tla između mjerenja u suhim i vlažnim uvjetima. Razlike sadržaja volumetrijske vlage tla su bile izraženije kod lokacije Zelengaj nego u Granešini.
- ✓ Ponavljana potezanja stabala utječu na povećanje kuta nagiba korijenove ploče, odnosno postoji statistički značajna razlika između dva testiranja u vlažnim uvjetima tla na obje lokacije istraživanja, dok je u suhim uvjetima tla povećanje kuta nagiba utvrđeno samo na lokaciji Granešina.
- ✓ Nije utvrđena statistički značajna razlika u faktorima sigurnosti od izvale stabala u vlažnim i suhim uvjetima tla. Na lokaciji Granešina stabilnost stabla u vlažnim uvjetima je bila smanjena kod svih stabala dok se na lokaciji Zelengaj kod većine stabala stabilnost u vlažnim uvjetima povećala.

LITERATURA

1. Anon., 2014: Osnova gospodarenja za G.J. "Park šume Grada Zagreba" 2014 – 2023. Hrvatske šume d.o.o., Zagreb, 106 str.
2. Anić, I., M. Oršanić, 2010: Morfološka i šumskouzgojna obilježja park-šuma grada Zagreba. U: Matić, S., I., Anić (ur.), Park-šume grada Zagreba, Akademija šumarskih znanosti, Zagreb, 135–158.
3. Batchelder, S., M. Batchelder, Urban trees and associated problems; Part 2. 2011. URL: http://www.sbcatree.com/assets/batchelder_Fall_2011.pdf (pristupljeno 18.09.2018.)
4. Bornstein, R. D., D. S. Johnson, 1976: Urban-rural wind differences. Atmospheric Environment Vol. 11: 597-604.
5. Brudi, E., P. van Wassenaer: Tree and Statics: Non-Destructive Failure Analysis. 2002. URL:http://www.treeconsult.org/upload/mediapool/pdf/baumstatik_und_biomechanik/trees-and-statics-nondestructive-failure-analysis.pdf (pristupljeno 15.12.2017.)
6. Cannon, J. B., M. E. Barrett, C. J. Peterson, 2015: The effect of species, size, failure mode, and fire-scarring of tree stability. Forest Ecology and Management. Vol. 356: 196-203.
7. Coutts M. P., 1983: Root architecture and tree stability. Plant Soil, Vol. 71: 171–188.
8. Detter, A., E. Brudi, F. Bischoff: Statics Integrated Methods: Results from pulling test since the past decades. 2018. URL:http://www.treeconsult.org/upload/mediapool/pdf/baumstatik_und_biomechanik/results-from-pulling-tests-in-the-past-decades.pdf (pristupljeno 20.02.2018.)
9. Dobriyal, P., A. Qureshi, R. Badola, S. A. Hussain, 2012: A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. Journal of Hydrology. Vol. 458-459: 110-117.
10. Drexhage, M., M. Chauviere, F. Colin, C. N. N. Nielsen, 2011: Development of structural root architecture and allometry of *Quercus petraea*. Canadian Journal of Forest Research. Vol. 29(5): 600-608.
11. Ferrini, F., C. C. Konijnendijk van den Bosch, A. Fini, 2017: Routledge Handbook of Urban Forestry. 1 (34): 1.
12. Fraser, A. I., J. B. H. Gardiner, 1967: Rooting and Stability of Sitka Spruce. Forestry Commission Bulletin. No. 40. Her Majesty's Stationery Office, London. 56 str.

13. Gajić-Čapka, M., B. Čapka, 1985: Analiza ljetnih oborina na području grada Zagreba. Rasprave. Vol. 20: 31-40.
14. Gardiner, B., P. Berry, B. Moulia, 2016: Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. Plant Science. Vol. 245: 94-118.
15. Ghani, M. A., A. Stokes, T. Fourcaud, 2008: The effect of root architecture and root loss through trenching on the anchorage of tropical urban trees (*Eugenia grandis* Wight). Trees. Vol. 23: 197-209.
16. Giadrossich, F., M. Schwarz, D. Cohen, A. Cislaghi, C. Vergani, T. Hubble, C. Phillips, 2017: Methods to measure the mechanical behaviour of tree roots: A review. Ecological Engineering. Vol. 109(part B): 256-271.
17. Horáček, P., 2005: Introduction to tree statics and static assessment. U: Fay, N., Horáček, P., Kolařík, J. (ur.). Wind Load Simulation and Tree Statics. Bristol, Treework Environmental Practice, 2005, 5–15.
18. Jim, C. Y., H. H. T. Liu, 1997: Storm damage on urban trees in Guanghzou, China. Landscape and Urban Planning. Vol. 38: 45-59.
19. Kamimura, K., K. Kitagawa, S. Saito, H. Mizunaga, 2011: Root anchorage of hinoki (Chamaecyparis obtuse (Sieb. Et Zucc.) Endl.) under the combined loading of wind and rapidly supplied water on soil: analyses based on tree-pulling experiments. European Journal of Forest Research. Vol. 131(1): 219-227.
20. Kenneth, R., J. N. Haritos, P. K. Ades, 2006: Mechanical stability of trees under dynamic loads. American Journal of Botany. Vol. 93(10): 1522–1530.
21. Kormanek, M., T. Glab, J. Banach, G. Szewczyk, 2015: Effects of soil bulk density on sessile oak Quercus petraea Liebl. seedlings. European Journal of Forest Research. Vol. 134 (6): 969–979.
22. Mason, W.L., 2002: Are irregular stand more windfirm? Forestry. Vol. 75; 347–355.
23. Matheny, N., J. Clark: Tree risk assessment – What We Know (and What We Don't Know). 07.05.2018
URL:https://www.researchgate.net/publication/292089898_Tree_risk_assessment_What_we_know_and_what_we_don%27t_know (pristupljeno 22.06.2018.)
24. Matić, S., 2010: Njega, održavanje i obnova park-šuma kao temeljni preduvjet njihove vječnosti. U: Park-šume grada Zagreba. Ur:Matić S. i I. Anić. Akademija šumarskih znanosti. 83–94.

25. Mattheck, C., K. Bethge, 1998: The mechanical survival strategy of trees. Arboricultural Journal, Vol. 22(4): 369–386.
26. Nicoll, B.C., A. Achim, S. Mochan, B.A. Gardiner, 2005: Does steep terrain influence tree stability? A field investigation. Canadian Journal of Forest Research. Vol. 35 (10): 2360-2367.
27. Nicolotti, G., P. Gonthier, F. Guglielmo, M. M. Garbelotto, 2009: A Biomolecular Method for the Detection of Wood Decay Fungi: A Focus on Tree Stability Assessment. Arboriculture & Urban Forestry. Vol. 35(1): 14-19.
28. Niklas, K. J., H.C. Spatz, 2000: Wind-induced stresses in cherry trees: evidence against the hypothesis of constant stress levels. Trees, Vol. 14 (4): 230–237.
29. Pandur, Z., 2013: Primjena komercijalnog sustava za praćenje rada strojeva u istraživanju izvoženja drva forvarderom. Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb, 312 str.
30. Paulić, V., 2015: Prosudba opasnih stabala korištenjem vizualnih metoda i arborikulturnih instrumenata. Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb, 296 str.
31. Pernar, N., 2017: Tlo – nastanak, značajke, gospodarenje. Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb, 799 str.
32. Peterson, C. J., V. Claassen, 2012: An evaluation of the stability of Quercus lobata and Populus fremontii on river levees assessed using static winching tests. Forestry. Vol. 86: 201 – 209.
33. Quine, C. P., B. A. Gardiner, 2007: Understanding how the interaction of wind and trees results in windthrow, stem breakage and canopy gap formation. U: Plant disturbance ecology: the process and the response. Ur: Johnson E. i K. Miyanishi. Academic Press. 103-155.
34. Rahardjo, H., N. Amalia, L. E. Choon, F. R. Harnas, L. T. Tieng, F. Y. King, 2016: Flux boundary measurements for the study of tree stability. Landscape and Ecological Engineering. Vol. 13(1): 81-92.
35. Ramli, N. I., M. I. Ali, M. S. H. Saad, T. A. Majid, 2009: Estimation of Roughness Length (z_0) in Malaysia using Satellite Image. (8.-12.11.2008.) URL:http://www.iawe.org/Proceedings/7APCWE/T2D_1.pdf(pristupljeno11.05.2018)
36. Ramsey, P. H., J. L. Hodges Jr., J. P. Shaffer, 1990: Significance probabilitiesof the Wilcoxon signed-rank test. Journal of Nonparametric Statistics. Vol. 2: 133-153.

37. Ribeiro, G. H. M. P., J. Q. Chambers, C. J. Peterson, S. E. Trumbore, D. Magnabosco Marra, C. Wirth, J. B. Cannon, R. I. Negron-Juarez, A. J. N. Lima, E. V. C. M. de Paula, J. Santos, N. Higuchi, 2016: Mechanical vulnerability and resistamce to snapping and uprooting for Central Amazon tree species. Forest Ecology and Management. Vol. 380: 1-10.
38. Rust, S., A. Detter, C. Fuchs, B. Schirutschke, 2013: Einfluss der Witterung auf die Ergebnisse statischer Zugversuche. U: Jahrbuch der Baumpflege. Ur: Dujesiefken, D. Haymarket Media. 250-254.
39. Schütt, P., H. J. Schuck, B. Stimm, 2014. Lexikon der Baum- und Straucharten. Das Standardwerk der Forstbotanik. Nikol Verlag, Hamburg, 581 str.
40. Schwarz, M., A. Rist, D. Cohen, F. Giadrossich, P. Egorov, D. Büttner, M. Stolz, J.-J. Thormann, 2015: Root Reinforcement of Soil Under Compression. Journal of Geophysical Research: Earth Surface. Vol. 120: 2103–2120.
41. Seletković, Z., I. Tikvić, D. Ugarković, 2010: Stanišni uvjeti park-šuma grada Zagreba. U: Matić, S., I., Anić (ur.), Park-šume grada Zagreba, Akademija šumarskih znanosti, Zagreb, 39–45.
42. Stokes, A., 1999: Strain distribution during anchorage failure of Pinus pinaster Ait. at different ages and tree growth response to wind-induced root movement. Plant and Soil. Vol. 217 (1-2): 17-27.
43. Szavits-Nossan, V. 2009: Posmična čvrstoća tla.

    URL:https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/7._Predavanje_MT.pdf (pristupljeno 10.11.2017.)
44. Szoradova, A., L. Praus, J. Kolarik, 2013: Evaluation of the root system resistance against failure of urban trees using principal component analysis. Biosystems Engineering. Vol. 115: 244-249.
45. Taylor, D. W., 1948: Fundamentals of Soil Mechanics. JOHN WILEY & SONS Inc., New York, 715 str.
46. van Wassenaer, P., M. Richardson, 2009: A Review of Tree Risk Assessment Using Minimally Invasive Technologies and Two Case Studies. The International Journal of Urban Forestry. Vol. 32(4): 275-292.
47. Vasilj, Đ., 1972: Primjena nekih neparametrijskih metoda u statističkoj obradi eksperimentalnih podataka. Agronomski glasnik. Vol. 36 (7-8): 375-392.

48. Volarić, B., 1999: Klasična teorija fena i njegova zemljopisna raspodjela. Hrvatski meteorološki časopis. Vol. 33/34: 53-62.
49. Wessolly, L., M. Erb, 2014: Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. Patzer Verlag, Berlin, 288 str.