UDK 630* 815 + 847 (001)
https://doi.org/10.31298/sl.146.5-6.1

Izvorni znanstveni članci – Original scientific papers
Šumarski list, 5–6 (2022): 175–185

RAST SADNICA OBIČNE BUKVE (*Fagus sylvatica* L.) POD UTJECAJEM SUBOPTIMALNE ISHRANE S MINERALNIM HRANIVIMA

GROWTH OF COMMON BEECH (*Fagus sylvatica* L.) SAPLINGS UNDER THE IMPACT OF SUBOPTIMAL MINERAL NUTRITION

Krunoslav SEVER[1], Davor POLJAKOVIĆ[2], Tomislav KARAŽIJA[3], Boris LAZAREVIĆ[3], Antonia VUKMIROVIĆ[1], Mario ŠANGO[1] i Željko ŠKVORC[1]

SAŽETAK

U ovome radu prikazani su rezultati rasta bukovih sadnica pod utjecajem suboptimalne ishrane s dušikom (N), fosforom (P), magnezijem (Mg) i željezom (Fe). Cilj rada bio je približiti ovu problematiku šumarskoj praksi kroz raspravu dobivenih rezultata u kontekstu dosadašnjih spoznaja o rastu biljaka pod utjecajem suboptimalne ishrane s mineralnim hranivima. U rano proljeće 2019. godine 30 bukovih jedinki u razvojnom stadiju ponika, porijeklom iz jedne prirodne mješovite sastojine hrasta kitnjaka i obične bukve, presađeno je u sterilni supstrat (agroperlit). Nakon presadnje tijekom sljedeće tri godine po šest presađenih biljaka redovito je zalijevano (tretirano) s kompletnom hranjivom otopinom (KO tretman), odnosno hranivim otopinama u kojima su izostavljeni dušik (-N tretman), fosfor (-P tretman), magnezij (-Mg tretman) ili željezo (-Fe tretman). Prema tomu, na šest biljaka unutar svakog od pet prethodno opisanih tretmana bilježeni su početak i trajanje razvoja lišća (2020. i 2021. godine), broj listova te prosječna i ukupna površina lišća (2019., 2020. i 2021. godina). Promjer stabljike na vratu korijena i visina stabljike mjereni su u proljeće 2019. i jesen 2021. godine, na temelju čega je izračunat debljinski i visinski prirast bukovih sadnica, te njihova vitkost na početku i na kraju pokusa. Uz to, tretiranim sadnicama utvrđena je masa suhe tvari lišća, stabljike i korijenja te ukupna dužina krupnog i sitnog korijenja, kao i broj račvanja i vrhova sitnog korijenja, što je obavljeno u jesen 2021. godine nakon njihova vađenja iz agroperlita. Na temelju usporedbe dobivenih rezultata između biljaka u kontrolnom i ostalim tretmanima bilo je moguće zaključiti da je pod utjecajem suboptimalne ishrane bukovih sadnica s P došlo je do odgode proljetnog otvaranja pupova i početka razvoja lišća. Najsporiji razvoj lišća zabilježen je pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s N i Mg. Prosječna površina lišća nije bila značajnije utjecana suboptimalnom ishranjenošću niti s jednim hranivom. Smanjenje broja listova i njihove ukupne površine pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti sa svim hranivima zabilježeno je tek u posljednjoj godini provedbe pokusa. Debljinski i visinski prirast stabljike također su bili negativno utjecani suboptimalnom ishranjenošću sa svim hranivima, a smanjena vitkosti sadnica zabilježena je samo pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s Fe. Ukupna, duljina krupnog i sitnog korijenja također je bila negativno utjecana suboptimalnom ishranjenošću sa svim hranivima, izuzev N. Pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s N došlo je do povećanja ukupne dužine sitnoga korijenja, kao i do povećanja broja račvanja i vrhova sitnog korijenja. Unatoč tomu, na masu suhe tvari krupnog i sitnog korijenja suboptimalna ishranjenost sa svim hranivima imala je negativan utjecaj, uključujući i N.

KLJUČNE RIJEČI: Sadnice, mineralna hraniva, suboptimalna ishrana, rast, masa suhe tvari

[1] Doc. dr. sc. Krunoslav Sever, Prof. dr. sc. Željko Škvorc, Antonia Vukmirović mag. ing. silv., Mario Šango dipl. ing. šum. Fakultet šumarstva i drvene tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Svetošimunska cesta 25, HR-10000 Zagreb
[2] Davor Poljaković univ. bacc. ing. silv. Sovski Dol 83, 34350 Čaglin
[3] Doc. dr. sc. Tomislav Karažija, Doc. dr. sc. Boris Lazarević. Agronomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Svetošimunska cesta 25, HR-10000 Zagreb
Korespodencija: Željko Škvorc, e-mail: zskvorc@sumfak.hr

UVOD
INTRODUCTION

Za normalan rast i razvoj biljke zahtijevaju 17 neophodnih ili biogenih elemenata koje usvajaju u ionskom obliku i oni pretežno potječu iz minerala tla, a to su anorganski ioni, soli ili molekule, što obično nazivamo mineralnim hranivima. Nadalje, biogeni elementi ili mineralna hraniva dijele se na makroelemete ili makrohraniva kamo spadaju: ugljik (C), kisik (O), vodik (H), dušik (N), fosfor (P), kalij (K), sumpor (S), kalcij (Ca) i magnezij (Mg), te mikroelemete ili mikrohraniva kamo spadaju: željezo (Fe), bor (B), mangan (Mn), cink (Zn), bakar (Cu), molibden (Mo), klor (Cl) i nikal (Ni). Prefikse elemenata ishrane (makro i mikro) treba shvatiti u smislu potrebne količine nekog elementa za normalan rast biljke, odnosno njihove koncentracije u biljnom tkivu, a nikako u smislu njihova značaja, jer je za život biljaka svaki od 17 navedenih elemenata jednako neophodan. Koncentracija makroelemenata u suhoj tvari biljke obično iznosi više od 0,1 %, a koncentracija mikroelemenata iznosi tek između 0,001 i 0,0001 %. Unutar grupe makroelemenata, ishrana bilja obično ne proučava C, O i H koji se nazivaju i organogenim elementima, iz razloga jer grade više od 90 % žive tvari (Vukadinović i Vukadinović 2011).

Uloga mineralnih hraniva u biljci ogleda se u regulaciji svih biokemijskih procesa koji definiraju njezin rast, uključujući asimilaciju CO_2 u procesu fotosinteze, premještanje asimilata tj. ugljikohidrata prema mjestima intenzivna rasta tj. meristemima stabljike i korijena te disanje tj. razgradnju ugljikohidrata i oslobađanje energije neophodne za sintezu organskih tvari i njihovu ugradnju u biljni organizam (Taiz i Zeiger 2010, Brondley i dr. 2012, Hawkesford i dr. 2012). Stoga se normalan rast i razvoj biljaka u cjelini, kao i rast njihovih nadzemnih (stabljika i lišće) i podzemnih (krupno i sitno korijenje) organa može se odvijati samo pod utjecajem optimalne ishrane s mineralnim hranivima (Mengel i Kirkby 2001).

Iz tog razloga, prihrana sadnica s mineralnim gnojivima prilikom njihova uzgoja u šumskim rasadnicima predstavlja neizostavan pomotehnički zahvat koji se poduzima s ciljem podizanja njihove kvalitete (Haase i dr. 2006, Seletković 2006, Schmal i dr. 2011, Uscola i dr. 2015). Visoku kvalitetu sadnica uzgojenih u šumskim rasadnicima uz dobro razvijenu stabljiku (odgovarajućeg promjera i visine) i dobro razvijen korijen (odgovarajuće dužine i volumena) definira i zadovoljavajuća koncentracija mineralnih hraniva u suhoj tvari lišća, stabljike i korijena (Haese 2007, Drvodelić i Oršanić 2019). Prema dosadašnjim iskustvima i spoznajama visoko kvalitetne u odnosu na manje kvalitetne sadnice tijekom prvih godina rasta u prirodnim staništima (nakon presadnje iz šumskih rasadnika) imaju veće preživljenje i bolji rast (Walters i Reich 2000; Villar-Salvador i dr. 2005, 2010 i 2013; Haase i dr. 2006, Seletković i dr. 2009, Shi i dr. 2019). Prethodno nevedeno ukazuje na važnost problematike kojom se bavi ishrana bilja u kontekstu osnivanja novih i/ili umjetne obnove postojećih šumskih sastojina.

Uvidom u domaću literaturu moguće je zaključiti da se velika većina dosadašnjih spoznaja o utjecaju mineralnih hraniva na rast sadnica šumskoga drveća temelji na istraživanju utjecaja njihove gnojidbe s različitim dozama kompleksnih mineralnih gnojiva (Komlenović i Rastovski 1982, Komlenović 1984, 1992 i 1995, Potočić i Seletković 2001, Seletković 2006, Potočić i dr. 2009, Seleković i dr. 2009). Neka od tih istraživanja rezultirala su utvrđivanjem optimalnih doza gnojidbe koje pozitivno utječu na kvalitetu sadnica (Komlenović 1992 i 1995, Potočić i Seletković 2001, Seletković 2006). Međutim, takav pristup i dalje ostavlja cijeli niz otvorenih pitanja o pojedinačnom utjecaju mineralnih hraniva na rast sadnica u kontekstu podizanja njihove kvalitete.

S obzirom na široku rasprostranjenost obične bukve diljem Europe i njezin velik ekološki značaj u stranoj literaturi sve je više istraživanja u kojima se obrađuje njezina ishrana s mineralnim hranivima (Gessler i dr. 2004, Peuke i Rennenberg 2004, Kreuzwieser i Gessler 2010, Peuke i Rnnenberg 2011, Theil i dr. 2014, Talkner i dr. 2015, Zavišić i Polle 2017, Yang i dr. 2016, Magh i dr. 2018, Meller i dr. 2020). Posebno u kontekstu njezina opstanka pod utjecajem klimatskih promjena, kao jedne od najosjetljivijih vrsta šumskoga drveća na sušu (Gessler i dr. 2004, Kreuzwieser i Gessler 2010, Peuke i Rnnenberg 2011, Magh i dr. 2018). Slijedeći trendove stranih istraživanja i ovaj rad također obrađuje problematiku ishranjenosti obične bukve s mineralnim hranivima iz razloga što je obična bukva na području Republike Hrvatske također najrasprostranjenija vrsta šumskoga drveća (Trinajstić 2003), kao i iz razloga jer su istraživanja njezine ishrane s mineralnim hranivima u domaćoj literaturi prilično slabo zastupljena (Potočić i dr. 2009, Seleković i dr. 2009, Sever i dr. 2021).

S obzirom na prethodno navedeno ovaj rad ima dva cilja. Prvi cilj je ispitati utjecaj suboptimalne ishranjenosti bukovih sadnica s dušikom (N), fosforom (P), magnezijem (Mg) ili željezom (Fe) na njihov rast i morfološke značajke. Drugi cilj je raspraviti dobivene rezultate u kontekstu dosadašnjih spoznaja o utjecaju suboptimalne ishranjenosti bilja s N, P, Mg i Fe na fiziološke procese koji definiraju njihov rast, kako bi se ova problematika dodatno približila šumarskoj praksi.

MATERIJALI I METODE
MATERIAL AND METHODS

Biljni materijal i dizajn pokusa – *Plant material and experimental design*

Ovo istraživanje provedeno je na Fakultetu šumarstva i drvne tehnologije, Sveučilišta u Zagrebu, u laboratoriju Za-

voda za šumarsku genetiku, dendrologiju i botaniku u razdoblju od proljeća 2019. do jeseni 2021. godine. Istraživanje je započelo kada su biljke bile stare oko mjesec dana (razvojni stadij ponika) i trajalo je tijekom tri uzastopna vegetacijska razdoblja 2019. – 2021. godine. Detaljan opis biljnoga materijala na kojemu je provedeno ovo istraživanje i sam dizajn pokusa objavljen je ranije (Sever i dr. 2021). Međutim, ovom prilikom valja ponoviti da su bukove sadnice na kojima je provedeno ovo istraživanje uzgajane u PVC kvadratičnim kontejnerima (dimenzija 10 x 10 cm i visine 20 cm) ispunjenim s agroperlitom neutralne pH reakcije kao sterilnim supstratom za uzgoj biljaka, koji u sebi ne sadrži nikakva biljna hraniva. U svakom kontejneru rasla je po jedna biljka, a svaki od ukupno pet tretmana predstavljalo je šest kontejnera s pripadajućom biljkom. Istraživanje je provedeno na ukupno 30 biljaka. Različiti tretmani podrazumijevali su zalijevanje sadnica s prethodno pripremljenim modificiranim Hoaglandovim hranjivim otopinama (Sever i dr. 2021). U kontrolnom tretmanu sadnice su zalijevane s hranjivom otopinom koja je sadržavala sva esencijalna makro i mikro hraniva (KO tretman). S druge strane, hranjive otopine s kojima su zalijevane sadnice u ostala četiri tretmana sadržavale su sva esencijalna makro i mikro hraniva, izuzev dušika (-N tretman), fosfora (-P tretman), magnezija (-Mg tretman) i željeza (-Fe tretman). Zalijevanje sadnica obavljano je manualno u skladu s gore opisanim dizajnom pokusa sa 100 ml odgovarajuće hranjive otopine po kontejneru/sadnici svakih sedam dana, u razdoblju od proljeća 2019. do jeseni 2021. godine.

Razvoj lišća – *Leaf development*

Razvoj lišća istraživanih sadnica praćen je svaka tri dana tijekom proljeća 2020. i 2021. godine. Početak i završetak razvoja lišća opisan je brojem dana u godini (počevši od 01. siječnja) koji je svakoj sadnici bio potreban da počne otvarati svoje zimske pupove (ljuskice pupova su razmaknute do te mjere da iz vršnog dijela pupa proviruju zeleni vršci lišća) i potpuno razvije svoje lišće (lišće je tamno zelene boje i relativno je čvrsto). Prema tome, početak razvoja lišća svake sadnice predstavlja broj dana u godini od 1. siječnja do početka otvaranja pupova. Prosječno trajanje razvoja lišća svake sadnice predstavlja razliku u broju dana potrebnih za potpuni razvoj njezina lišća i broja dana kada se njezino lišće počelo razvijati.

Površina i masa suhe tvari lišća – *Leaf area and leaf dry mass*

Svake godine pred kraj vegetacijskoga razdoblja sa svih je sadnica uzorkovano svo lišće koje je potom skenirano u svježem stanju te mu je izmjerena površina pomoću softverskog paketa WinFOLIA 2005b (Regent Instruments, Quebec City, Canada). Nakon skeniranja, lišće je sušeno u sušioniku na temperaturi zraka od 60 °C u trajanju od 48 sati (AOAC 2015). Nakon sušenja svakom je listu utvrđena masa suhe tvari pomoću analitičke vage s preciznošću od 0,01 g.

Rast stabljike – *Stem growth*

Promjer stabljike na vratu korijena (D) i visina stabljike (H) mjereni su u rano proljeće 2019. godine na početku pokusa i u jesen 2021. godine na kraju pokusa. Na temelju razlike u D i H izmjerenih 2021. i 2019. godine izračunat je debljinski prirast stabljike na vratu korijena (id) i visinski prirast stabljike (ih) u razdoblju od 2019. do 2021. godine. Vitkost stabljike predstavlja omjer H i D.

Rast korijenja – *Root growth*

Nakon vađenja sadnica iz plastičnih kontejnera u jesen 2021. godine njihov je korijen skeniran u svježem stanju. Nakon toga, pomoću softverskog paketa WinRHIZO Pro (Regent Instruments, Quebec City, Canada) za svaku je sadnicu utvrđena ukupna dužina krupnog i sitnog korijenja te broj grananja i vrhova sitnog korijenja.

Masa suhe tvari – *Dry mass*

Nakon vađenja sadnica iz plastičnih kontejnera u jesen 2021. godine njihove su stabljike, te krupno (deblje od 2 mm) i sitno (tanje od 2mm) korijenje sušeni na temperaturi zraka od 60 °C u trajanju od 48 sati (AOAC 2015). Nakon sušenja za svaku je sadnicu utvrđena masa suhe tvari stabljike, te krupnog i sitnog korijenja pomoću analitičke vage s preciznošću od 0,01 g. Ukupna masa suhe tvari lišća utvrđena je zbrajanjem suhe tvari lišća producirane tijekom 2019., 2020. i 2021. godine.

Kemijske analize – *Chemical analysis*

Početkom rujna 2021. godine iz srednjeg dijela vršnog izbojka svake sadnice uzorkovan je po jedan relativno zdrav list prosječne veličine. Prema tome, svaki tretman prestavlja jedan kompozitni uzorak kojega čini ukupno šest listova. Ti uzorci podvrgnuti su kemijskoj analizi s ciljem utvrđivanja ishranjenosti istraživanih sadnica s makro i mikro hranivima.

Uzorci lišća sušeni su na 105 °C do konstantne mase, nakon čega su samljeveni i homogenizirani. Iz određene količine tako pripremljenih uzoraka utvrđena je koncentracija N metodom po Kjeldahlu. Koncentracija P utvrđena je spekrofotometrijski uz prethodnu digestiju koncentriranom HNO_3 i $HClO_4$. Koncentracija K utvrđena je na plamenfotometru uz prethodnu digestiju koncentriranom HNO_3 i $HClO_4$. Koncentracije Ca, Mg, Fe, Zn, Mn i Cu utvrđene su atomskom apsorpcijskom spektrofotometrijom uz prethodnu digestiju koncentriranom HNO_3 i $HClO_4$. Sve navedene analize provedene su prema razvijenim i standardiziranim internacionalnim protokolima (AOAC 2015).

Statistička analiza – *Statistical analysis*

Utjecaj tretmana na prosječni početak i trajanje razvoja lišća, broj i površinu lišća, debljiski i visinski rast stabljike, produkciju suhe tvari (lišća, stabljike, krupnog i sitnog korijenja) te na rast korijenja bukovih sadnica ispitan je pomoću jednosmjerne ANOVA-e. LSD post-hoc test proveden je s ciljem utvrđivanja signifikantnih razlika između tretmana. Navedene analize provedene su programskim paketom Statistica 7.1. (StatSoft, Inc. 2006).

REZULTATI
RESULTS

Stanje ishrane sadnica – *Mineral nutrition of saplings*

Prema Bergmann (1993) na optimalnu ishranjenost obične bukve s mineralnim hranivima ukazuju granične vrijednosti koncentracije N (1,90 – 2,50 %), P (0,15 – 0,30 %), Mg (0,15 – 0,30 %), K (1,0 – 1,50 %), Ca (0,30 – 1,50 %), Zn (15 – 50 ppm), Mn (35 – 100 ppm) i Cu (5 – 12 ppm) u suhoj tvari lišća. Granične vrijednosti optimalne ishranjenosti obične bukve s Fe iznose 50 – 178 ppm (Van den Burg 1990). Na temelju usporedbe izmjerene koncentracije mineralnih hraniva u suhoj tvari lišća (Tablica 1) s gore navedenim graničnim vrijednostima evidentno je da je u KO tretmanu koncentracija svih hraniva bila u granicama optimalne ishranjenosti. S druge strane, najniža koncentracija N zabilježena je u -N tretmanu, P u -P tretmanu, Mg u -Mg tretmanu i Fe u -Fe tretmanu (Tablica 1). Utjecaj prethodno spomenutih tretmana očekivano se odrazio na mineralnu ishranu istraživanih sadnica, odnosno, rezultirao je suboptimalnom ishranjenošću istraživanih sadnica sa N, P, Mg i Fe. Ishranjenost istraživanih sadnica sa ostalim hranivima (K, Ca, Zn, Mn i Cu) u svim tretmanima bila je optimalna.

Razvoj lišća – *Leaf development*

Ako početak i trajanje razvoja lišća kod sadnica koje su bile optimalno ishranjene s mineralnim hranivima (KO tretman) uzmemo kao referentnu vrijednost, tada je evidentno da 2020. godine suboptimalna ishranjenost bukovih sadnica sa N, P, Mg ili Fe nije imala signifikantan utjecaj na početak i trajanje razvoja njihova lišća. Međutim, u 2021. godini to nije bio slučaj. Tada je suboptimalna ishranjenost s P signifikantno odgodila početka razvoja lišća, a suboptimalna ishranjenost s N i Mg signifikantno usporila razvoj lišća (Tablica 2).

Broj i površina lišća – *Number of leaves and leaf area*

Ako broj lišća, te njegovu prosječnu i ukupnu površinu kod sadnica koje su bile optimalno ishranjene s mineralnim hranivima (KO tretman) uzmemo kao referentne vrijednosti, tada je evidentno da 2019. godine suboptimalna ishranjenost bukovih sadnica sa N, P, Mg ili Fe nije imala signifikantan utjecaj na broj lišća te njegovu prosječnu i ukupnu površinu. U 2020. godini suboptimalna ishranjenost sadnica s N, P, Mg ili Fe i dalje nije imala signifikantan utjecaj na broj lišća i njegovu prosječnu površinu, ali je imala na ukupnu lisnu površinu. Tada je pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti sadnica s N i Mg došlo do signifikantnog smanjenja ukupne površine njihova lišća. U 2021. godini suboptimalna ishranjenost sadnica sa N, P, Mg ili Fe signifikantno je umanjila broj i ukupnu površinu lišća, dok na prosječnu površinu lišća nije imala signifikantan utjecaj (Tablica 3).

Rast stabljike – *Stem growth*

Prema rezultatima ANOVA-e u rano proljeće 2019. godine promjer stabljike na vratu korijena (ANOVA: F = 1,046; p = 0,404) i visina (ANOVA: F = 0,617; p = 0,654) istraživanih sadnica bili su podjednaki u svim tretmanima. Međutim, u razdoblju 2019. – 2020. godine prirast stabljike na vratu korijena (ANOVA: F = 6,443; p = 0,001) i visinski prirast sadnica (ANOVA: F = 6,878; p < 0,001) pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s N, P, Mg ili Fe signifikantno je zaostao za prirastom sadnica optimalno ishranjenih s mineralnim hranivima iz KO tretmana. U konačnici, na

Tablica 1. Koncentracija dušika (N), fosfora (P), magnezija (Mg), željeza (Fe), kalija (K), kalcija Ca), cinka (Zn), mangana (Mn) i bakra (Cu) u suhoj tvari lišća bukovih sadnica u 2021. godini tretiranih s kompletnom hranjivom otopinom (KO) i hranjivim otopinama u kojima su izostavljeni dušik (-N), fosfor (-P), magnezij (-Mg) i željezo (-Fe).

Table 1. Concentrations of nitrogen (N), phosphorus (P), magnesium (Mg), iron (Fe), potassium (K), calcium (Ca), zinc (Zn), manganese (Mn) and copper (Cu) in dry matter of the leaves in beech saplings treated with a complete nutrient solution (KO) and nutrient solutions in which nitrogen (-N), phosphorus (-P), magnesium (-Mg) and iron (-Fe) were omitted.

Tretman *Treatment*	N (%)	P (%)	Mg (%)	Fe (ppm)	K (%)	Ca (%)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Cu (ppm)
KO	2,38	0,25	0,32	112	1,01	1,54	36,3	34,9	10,01
-N	1,08	0,37	0,27	74	1,20	1,48	34,8	41,2	5,76
-P	2,30	0,12	0,26	79	1,71	1,25	18,8	36,3	4,59
-Mg	2,26	0,30	0,14	83	1,14	1,49	23,3	38,8	16,11
-Fe	2,27	0,16	0,40	48	1,04	1,66	32,9	43,6	5,64

Tablica 2. Prosječni početak i trajanje razvoja lišća (± SD) bukovih sadnica tijekom 2020. i 2021. godine tretiranih sa kompletnom hranjivom otopinom (KO) i hranjivim otopinama u kojima su izostavljeni dušik (-N), fosfor (-P), magnezij (-Mg) i željezo (-Fe) s rezultatima jednosmjerne ANOVA-a.
Table 2. Average beginning and duration of leaf development (days ± SD) in beech saplings during 2020 and 2021 treated with a complete nutrient solution (KO) and nutrient solutions in which nitrogen (-N), phosphorus (-P), magnesium (-Mg) and iron (-Fe) were omitted, with results of one-way ANOVA.

Tretman *Treatment*	2020. godina (*year*)		2021. godina (*year*)	
	Početak (dan u godini) *Beginning (day of the year)*	Trajanje (dana) *Duration (days)*	Početak (dan u godini) *Beginning (day of the year)*	Trajanje (dana) *Duration (days)*
KO	89 ± 7	14 ± 4	100 ± 2[a]	12 ± 3[ab]
-N	92 ± 8	17 ± 7	102 ± 4[a]	16 ± 4[c]
-P	99 ± 6	13 ± 6	107 ± 2[b]	10 ± 2[b]
-Mg	95 ± 7	18 ± 4	101 ± 3[a]	16 ± 2[c]
-Fe	93 ± 8	16 ± 4	100 ± 2[a]	15 ± 3[ac]
Rezultati ANOVA-e – *ANOVA results*				
F	1,487	0,715	8,890	6,533
p	0,236	0,589	< 0,001	< 0,001

Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecaj tretmana pri $p < 0,05$ – *Bolded valus indicate a significant effect of tretment at* $p < 0.05$.

Različita slova ukazuju na signifikantne razlike između tretmana prema LSD post-hoc testu pri $p < 0,05$ – *Different letters indicate significant differences among treatments accordingly LSD post-hoc test at* $p < 0.05$.

Tablica 3. Prosječni broj te prosječna i ukupna površina lišća (± SD) bukovih sadnica u 2019., 2020. i 2021. godini tretiranih sa kompletnom hranjivom otopinom (KO) i hranjivim otopinama u kojima su izostavljeni dušik (-N), fosfor (-P), magnezij (-Mg) i željezo (-Fe) s rezultatima jednosmjerne ANOVA-a.
Table 3. Average number as well as average and total leaf area (± SD) in beech saplings during 2019, 2020 and 2021 year treated with complete nutrient solution (KO) and nutrient solutions in which nitrogen (-N), phosphorus (-P), magnesium (-Mg) and iron (-Fe) were omitted, with results of one-way ANOVA.

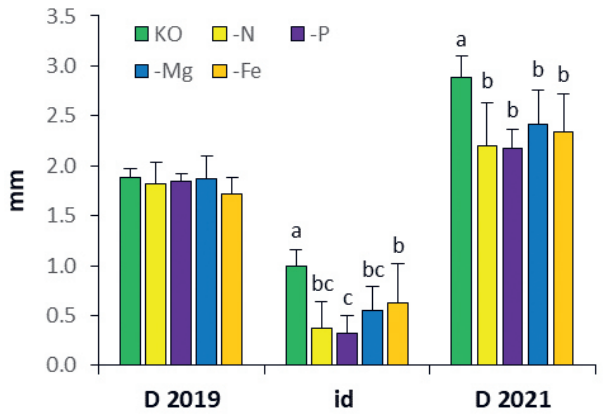
Tretman *Treatment*	2019. godina – *year 2019*			2020. godina – *year 2020*			2021. godina – *year 2021*		
	Broj *Number*	Površina – *Area* (cm^2)		Broj *Number*	Površina – *Area* (cm^2)		Broj *Number*	Površina – *Area* (cm^2)	
		Prosijek *Average*	Ukupno *Total*		Prosijek *Average*	Ukupno *Total*		Prosijek *Average*	Ukupno *Total*
KO	2,1 ± 0,4	10,1 ± 2,5	21,5 ± 4,5	3,2 ± 0,8	6,6 ± 2,5	23,0 ± 8,3[a]	7,5 ± 1,0[a]	13,4 ± 1,7	100,5 ± 18,8[a]
-N	1,8 ± 0,4	9,4 ± 3,7	17,5 ± 8,6	2,2 ± 1,2	5,6 ± 3,7	12,4 ± 7,8[b]	4,5 ± 0,8[b]	9,9 ± 2,1	45,1 ± 14,8[b]
-P	2,0 ± 0,0	9,6 ± 3,2	19,2 ± 6,3	3,3 ± 1,2	5,9 ± 3,2	19,2 ± 6,7[ab]	5,5 ± 1,5[b]	10,6 ± 3,5	55,3 ± 10,6[b]
-Mg	1,7 ± 0,5	10,7 ± 2,1	17,6 ± 5,5	2,7 ± 0,5	4,7 ± 2,1	11,3 ± 1,3[b]	4,8 ± 1,2[b]	12,3 ± 2,9	58,3 ± 14,0[b]
-Fe	2,0 ± 0,0	7,2 ± 1,2	14,3 ± 2,4	3,7 ± 1,0	5,4 ± 1,2	17,6 ± 2,0[ab]	5,5 ± 0,8[b]	10,7 ± 3,8	58,7 ± 20,4[b]
Rezultati ANOVA-e – *ANOVA results*									
F	1,806	1,527	1,210	2,201	1,455	3,926	6,595	1,459	10,556
p	0,159	0,225	0,331	0,098	0,246	0,013	< 0,001	0,244	< 0,001

Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecj tretmana pri $p < 0,05$ – *Bolded values indicate significant effect of tretment at* $p < 0.05$.

Različita slova ukazuju na signifikantne razlike između tretmana prema LSD post-hoc testu pri $p < 0,05$ – *Different letters indicate significant differences among treatments accordingly LSD post-hoc test at* $p < 0.05$.

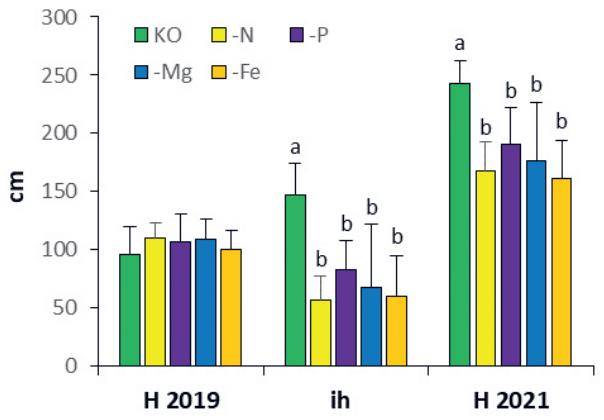
kraju pokusa u jesen 2021. godine to je rezultiralo signifikantno nižim promjerom stabljike na vratu korijena (ANOVA: F = 4,653; p = 0,006) i visinom sadnica (ANOVA: F = 5,773; p = 0,002) utjecanih suboptimalnom ishranjenošću s N, P, Mg ili Fe u odnosu na sadnice optimalno ishranjene s mineralnim hranivima iz referentnog KO tretmana (Slike 1 i 2).

Vitkost sadnica na početku eksperimenta u rano proljeće 2019. godine također je bila podjednaka u svim tretmanima (ANOVA: F = 0,771; p = 0,554). Do kraja eksperimenta samo je pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s Fe došlo do signifikantnog opadanja vitkosti sadnica (ANOVA: F = 3,029; p = 0,036) u odnosu na sadnice iz referentnog KO tretmana (Slika 3).



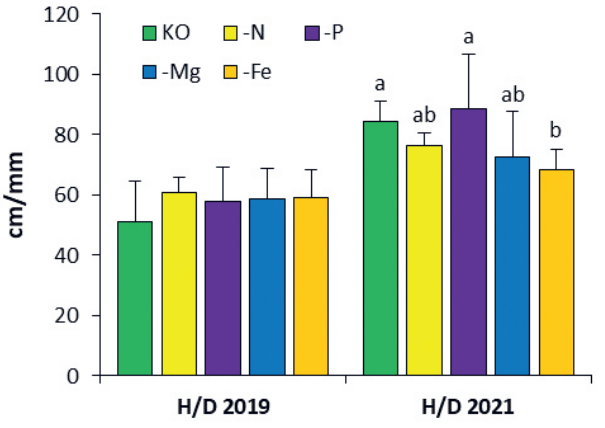
Slika 1. Prosječni promjer stabljike na vratu korijena (mm) na početku istraživanja 2019. godine (D 2019) i na kraju istraživanja 2021. godine (D 2021) te debljinski prirast stabljike u razdoblju 2019. – 2020. godine (id) pri tretmanu sa kompletnom hranjivom otopinom (KO) i hranjivim otopinama u kojima su izostavljeni dušik (-N), fosfor (-P), magnezij (-Mg) i željezo (-Fe). Vertikalni barovi ukazuju na SD, a različita mala slova na razlike između tretmana pri $p < 0,05$.

Figure 1. Average stem diameter at root collar (mm) at the beginning of investigation in year 2019 (D 2019) and at the end of the investigation in year 2021 (D 2021) as well as stem diameter increment in period 2019 – 2021 (id) tretated with a complete nutrient solution (KO) and nutrient solutions in which nitrogen (-N), phosphorus (-P), magnesium (-Mg) and iron (-Fe) were omitted. Vertical bars indicate SD and different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) among treatments.



Slika 2. Prosječna visina stabljike (cm) na početku istraživanja 2019. godine (H 2019) i na kraju istraživanja 2021. godine (H 2021) te visinski prirast stabljike u razdoblju 2019. – 2020. godine (ih) pri tretmanu sa kompletnom hranjivom otopinom (KO) i hranjivim otopinama u kojima su izostavljeni dušik (-N), fosfor (-P), magnezij (-Mg) i željezo (-Fe). Vertikalni barovi ukazuju na SD, a različita mala slova na razlike između tretmana pri $p < 0,05$.

Figure 2. Average stem height (cm) at the beginning od investigation in year 2019 (H 2019) and at the end of the investigation in year 2021 (H 2021) as well as stem diameter increment in period 2019 – 2021 (ih) tretated with a complete nutrient solution (KO) and nutrient solutions in which nitrogen (-N), phosphorus (-P), magnesium (-Mg) and iron (-Fe) were omitted. Vertical bars indicate SD and different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) among treatments.



Slika 3. Vitkost sadnica prikazana kao odnos prosječne visine i promjera stabljike na vratu korijena (cm/mm) na početku istraživanja 2019. godine (H/D 2019) i na kraju istraživanja 2021. godine (H/D 2021) pri tretmanu sa kompletnom hranjivom otopinom (KO) i hranjivim otopinama u kojima su izostavljeni dušik (-N), fosfor (-P), magnezij (-Mg) i željezo (-Fe). Vertikalni barovi ukazuju na SD, a različita mala slova na razlike između tretmana pri $p < 0,05$.

Figure 3. Slenderness of saplings shown as the ratio of average height and diameter of the stem at the root collar (cm/mm) at the beginning of the investigation in 2019 (H/D 2019) and at the end of the investigation in 2021 (H/D 2021) treated with a complete nutrient solution (KO) and nutrient solutions in which nitrogen (-N), phosphorus (-P), magnesium (-Mg) and iron (-Fe) were omitted. Vertical bars indicate SD and different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) among treatments.

Rast korijenja – *Root growth*

Ako duljinu krupnog i sitnog korijenja te broj račvanja i vrhova sitnog korijenja kod sadnica koje su bile optimalno ishranjene s mineralnim hranivima (KO tretman) uzmemo kao referentne vrijednosti, tada je evidentno da je pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti sadnica s N, P, Mg ili Fe došlo do usporenog rasta njihova krupnog korijenja u duljinu. Nadalje, suboptimalna ishranjenost sadnica s P, Mg ili Fe rezultirala je signifikantnim opadanjem ukupne duljine sitnog korijenja i broja račvanja, a suboptimalna ishranjenost s P i Fe signifikantnim opadanjem broja vrhova sitnog korijenja. Međutim, suboptimalna ishranjenost sadnica s N izazvala je suprotan učinak, tj. rezultirala je signifikantnim povećanjem broja račvanja i vrhova sitnog korijenja, te nešto većom ukupnom duljinom njihova sitnog korijenja, što ipak nije bilo signifikantno (Tablica 4).

Produkcija i alokacija suhe tvari – *Dry mass production and its allocation*

Ako produkciju suhe tvari kod sadnica optimalno ishranjenih s mineralnim hranivima (KO tretman) uzmemo kao referentnu vrijednost, tada je evidentno da je suboptimalna ishranjenost sadnica s N, P, Mg ili Fe imala signifikantan i negativan utjecaj na produkciju suhe tvari lišća (ANOVA: F = 10,837; $p < 0,001$), stabljike (ANOVA: F = 7,508; $p <$

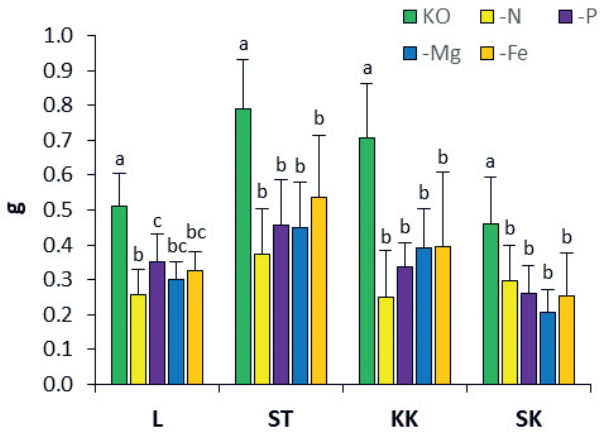
Tablica 4. Prosječna dužina krupnog (> 2,0 mm) i sitnog (< 2,0 mm) korijenja te broja račvanja i vrhova (± SD) u korijenju bukovih sadnica tretiranih sa kompletnom hranjivom otopinom (KO) i hranivim otopinama u kojima su izostavljeni dušik (-N), fosfor (-P), magnezij (-Mg) i željezo (-Fe) s rezultatima jednosmjerne ANOVA-a.

Figure 4. Average length of coarse (> 2.0 mm) and fine (< 2.0 mm) roots as well as number of forks and tips (± SD) in roots of beech saplings treated with complete nutrient solution (KO) and nutrient solutions in which nitrogen (-N), phosphorus (-P), magnesium (-Mg) and iron (-Fe) were omitted, with results of one-way ANOVA.

Tretman *Treatment*	Dužina krupnog korijenja *Lenght of coarse root* (cm)	Dužina sitnog korijenja *Lenght of fine root* (cm)	Broj račvanja *Number of forks*	Broj vrhova *Number of tips*
KO	19,9 ± 7,6[a]	1497,1 ± 271,0[a]	12448 ± 1880[a]	2952 ± 607[a]
-N	9,8 ± 6,7[b]	1790,4 ± 435,3[a]	15889 ± 4245[b]	3965 ± 792[b]
-P	8,0 ± 1,4[b]	986,5 ± 168,9[b]	7495 ± 1622[c]	2206 ± 397[c]
-Mg	12,2 ± 2,2[b]	938,7 ± 190,6[b]	7610 ± 683[c]	2592 ± 445[ac]
-Fe	10,4 ± 7,6[b]	908,0 ± 285,6[b]	7199 ± 2685[c]	2074 ± 649[c]
Rezultati ANOVA-e – *ANOVA results*				
F	3,857	11,596	14,215	9,711
p	0,014	< 0,001	< 0,001	< 0,001

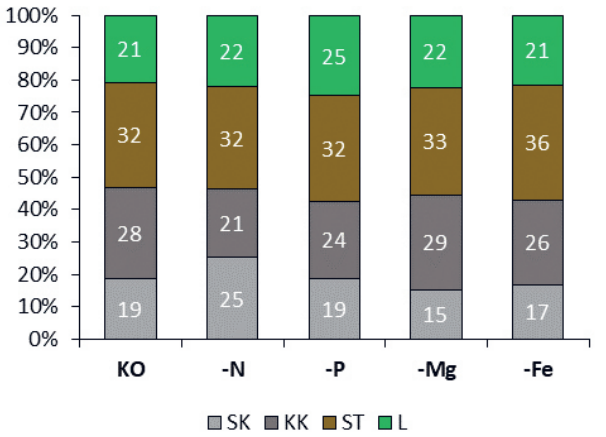
Podebljane vrijednosti ukazuju na signifikantan utjecj tretmana pri $p < 0,05$ – *Bolded valus indicate significant effect of tretment at* $p < 0.05$.

Različita slova ukazuju na signifikantne razlike između tretmana prema LSD post-hoc testu pri $p < 0,05$ – *Different letters indicate significant differences among treatments accordingly LSD post-hoc test at* $p < 0.05$.



Slika 4. Prosječna masa (g) ukupno producirane suhe tvari lišća (L), stabljike (ST) te krupnog (KK) i sitnog (SK) korijenja u razdoblju 2019. – 2021. godine pri tretmanu sa kompletnom hranjivom otopinom (KO) i hranjivim otopinama u kojima su izostavljeni dušik (-N), fosfor (-P), magnezij (-Mg) i željezo (-Fe). Vertikalni barovi ukazuju na SD, a različita mala slova na razlike između tretmana pri $p < 0,05$.

Figure 4. Average mass (g) of total produced leaf (L), stem (ST), coarse root (KK) and fine root (SK) dry matter in period 2019 – 2020 tretated with a complete nutrient solution (KO) and nutrient solutions in which nitrogen (-N), phosphorus (-P), magnesium (-Mg) and iron (-Fe) were omitted. Vertical bars indicate SD and different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) among treatments.



Slika 5. Relativni udjeli ukupno producirane mase suhe tvari u razdoblju 2019. – 2021. godine alocirane u lišće (L), stabljiku (ST), krupno (KK) i sitno (SK) korijenje pri tretmanu sa kompletnom hranjivom otopinom (KO) i hranjivim otopinama u kojima su izostavljeni dušik (-N), fosfor (-P), magnezij (-Mg) i željezo (-Fe).

Figure 5. *Relative ratios of total produced dry mass in the period 2019 – 2021 allocated to leaves (L), stem (ST), coarse root (KK) and fine root (SK) treated with a complete nutrient solution (KO) and nutrient solutions in which nitrogen (-N), phosphorus (-P), magnesium (-Mg) and iron (-Fe) were omitted.*

0,001), krupnog (ANOVA: F = 8,508; $p < 0,001$) i sitnog (ANOVA: F = 5,208; $p = 0,003$) korijenja. Ovdje valja istaknuti da je najniža produkcija suhe tvari lišća, stabljike i krupnog korijenja zabilježena kod sadnica suboptimalno ishranjenih s N, a produkcija suhe tvari sitnog korijenja kod sadnica suboptimalno ishranjenih s Mg (Slika 4).

U lišće je alocirano najviše suhe tvari pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s P, u stabljiku pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s Fe, u krupo korijenje pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s Mg, a u sitno korijenje pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s N (Slika 5).

RASPRAVA
DISCUSSION

Dušik – *Nitrogen*

Dušik je sastavna komponenta aminokiselina koje grade proteine, koji pak upravljaju svim životnim procesima stanice i čitave biljke. Uz topive i strukturne proteine, enzime i klorofilno-proteinske komplekse, N je sastavni dio cijelog niza drugih organskih spojeva važnih za rast biljaka. Iz tog razloga biljke tijekom svoga života imaju izuzetno velike potrebe za N, a koncentracija N u suhoj tvari biljnog tkiva obično iznosi od 1 do čak 5 %, što je u odnosu na ostala mineralna hraniva najveća koncentracija (Hawkesford i dr. 2012). Uz to biljke, a pogotovo šumsko drveće ima vrlo dobar mehanizam skladištenja i recikliranja N unutar svoga organizma (Millard 1996, Millard i Grelet 2010). Uskladišteni N listopadno drveće u najvećoj mjeri koristi u proljeće, prilikom razvoja novog lišća (Millard 1996, Ueda i dr. 2009). Prema tomu, naš rezultat prema kojemu bukove sadnice pri suboptimalnoj ishranjenosti s N imaju najsporiji razvoj lišća (Tablica 2) možemo pripisati nedovoljnoj količini uskladištenog N neophodnoga za normalan proljetni razvoj lišća. Štoviše, rezultati ranijih istraživanja također ukazuju na to da kod nekih vrsta šumskoga drveća pod utjecajem loše u odnosu na dobru ishranjenost s N proljetni razvoj lišća traje duže (Thitithanakul 2012). Dobro je poznato da uslijed loše ishranjenosti s N koncentracija klorofila i enzima RUBISCO u lišću biljaka značajno opada, što rezultira smanjenom asimilacijom CO_2 i produkcijom ugljikohidrata (Evans 1989). S obzirom da je celuloza koja definira strukturu biljnog organizma građena od ugljikohidrata njihova poremećena produkcija i nedostatak jasno se manifestira u vidu smanjenog rasta. U skladu s tim, ne iznenađuje što je u 2021. godini najniža prosječna i ukupna površina lišća bukovih sadnica utvrđena pri suboptimalnoj ishranjenosti s N (Tablica 3). Odnosno, što su bukove sadnice pri suboptimalnoj ishranjenosti s N imale izuzetno slab debljinski i visinski prirast stabljike (Slike 1 i 2) te najmanju masu suhe tvari lišća, stabljike i krupnog korijenja (Slika 4). Općenito gledano, takvi rezultati potpuno odgovaraju rezultatima ranijih istraživanja u kojima je također utvrđeno da suboptimalna ishranjenost šumskoga drveća s N ima izuzetno negativan utjecaj na rast njegovih nadzemnih organa (Stober i dr. 2000). Vrlo izražen rast sitnoga korijenja bukovih sadnica pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s N koji se ogleda u njegovoj najvećoj dužini, te najvećem broju račvanja i vrhova (Tablica 4) također odgovara rezultatima ranijih istraživanja. Poznato je da pod utjecajem nedostatka N u tlu i/ili loše ishranjenosti s N biljke intenziviraju rast sitnog korijenja (Mengel i Kirkby 2001, Hawkesford i dr. 2012). Korištenjem veće količine resursa (ugljikohidrata i mineralnih hraniva) za rast sitnoga korijenja na uštrb stabljike i/ili lišća biljke pokušavaju svojim sitnim korijenjem, koje je ujedno i fiziološki najaktivnije prožeti što veći volumen tla, ne bi li zadovoljile svoje potrebe za N (Stober i dr. 2000). Štoviše, poznato je da nedostatak ostalih mineralnih hraniva nema takav stimulativni utjecaj na rast sitnog korijenja kao nedostatak N (Hawkesford i dr. 2012). U skladu s tim, sadnice koje su bile suboptimalno ishranjene s N producirale su više suhe tvari sitnog korijenja nego sadnice koje su bile suboptimalno ishranjene s P, Mg ili Fe (Slika 4). Uz to, najveći udio od ukupno producirane suhe tvari u sitno korijenje uložile su one sadnice koje su bile suboptimalno ishranjene s N, čak više nego sadnice iz KO tretmana koje su bile optimalno ishranjene sa svim mineralnim hranivima (Slika 5).

Fosfor – *Phosphorus*

Jedna od najvažnijih fizioloških uloga P u biljci je prijenos energije u obliku molekula adenozintrifosfata (ATP). Uslijed loše ishranjenosti biljaka s P svi metabolički procesi koji zahtijevaju energiju značajno se usporavaju (Mengel i Kirkby 2001, Hawkesford i dr. 2012). Jedan od tih procesa je i dioba stanica u vršnim meristemima stabljike (pupovima). To objašnjava najkasniji početak razvoja lišća bukovih sadnica pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s P, kako 2020. tako i 2021. godine kada je to bilo posebno izraženo (Tablica 2). Niska koncentracija P u lišću ne ometa razvoj klorofila dok istovremeno reducira lisnu površinu (Taiz i Zeiger 2010, Hawkesford i dr. 2012). Uslijed toga, lišće biljaka suboptimalno ishranjenih s P u odnosu na lišće biljaka optimalno ishranjenih s P može imati podjednak sadržaj ukupnih klorofila, ali zbog reducirane površine lišća biljke koje su suboptimalno ishranjene s P obično imaju višu koncentraciju klorofila u lišću, što u konačnici rezultira tamno zelenom bojom njihova lišća (Hawkesford i dr. 2012). U našem slučaju, upravo to objašnjava ubrzan razvoj lišća bukovih sadnica pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s P, čiji je završetak razvoja procjenjivan upravo na temelju poprimanja tamno zelene boje, što je bilo posebno izraženo u 2021. godini (Tablica 2). Uz to što je važan u kontekstu prijenosa energije do mjesta intenzivna rasta, P ima važnu ulogu u metabolizmu ugljikohidrata koji su također nužni za rast biljaka (Mengel i Kirkby 2001, Hawkesford i dr. 2012). Te dvije fiziološke uloge P u biljci koje u znatnoj mjeri mogu biti narušene uslijed njezine suboptimalne ishranjenosti s P objašnjavaju signifikantno manji debljinski i visinski prirast stabljike (Slike 1 i 2), odnosno signifikantno manju duljinu krupnog i sitnog korijenja te broj račvanja i vrhova sitnoga korijenja (Tablica 4) kao i masu suhe tvari lišća, stabljike i korijenja (Slika 4) kod sadnica suboptimalno ishranjenih s P u odnosu na sadnice iz KO tretmana (Tablica 1).

Magnezij – *Magnesium*

Magnezij sudjeluje u brojnim fiziološkim i biokemijskim procesima unutar biljke, od kojih se posebno izdvajaju asi-

milacijia CO_2 u procesu fotosinteze i kasniji transport ugljikohidrata kao osnovnog produkta fotosinteze (Taiz i Zeiger 2010, Hawkesford i dr. 2012, Tränkner i Tavakol 2018). Uključenost Mg u fotosintetski proces ogleda se u činjenici da je neizostavna gradivna komponenta molekule klorofila (Taiz i Zeiger 2010). Stoga pod utjecajem loše ishranjenosti biljaka s Mg dolazi do otežane sinteze klorofila i sporijeg razvoja kloroplasta, što u konačnici usporava razvoj čitavog lista (Taiz i Zeiger 2010, Hawkesford i dr. 2012). Međutim, šumsko drveće u vakuolama stanica mezofila i endoderme akumulira značajne količine Mg koje uslijed otežanog usvajanja Mg iz tla koristi za neometano odvijanje rasta (Hauer-Jákli i Tränker 2019). S obzirom na prethodno navedeno i naš rezultat, možemo pretpostaviti da je signifikantno sporiji razvoj lišća bukovih sadnica pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s Mg u odnosu na sadnice iz KO tretmana, što je bilo posebno izraženo 2021. godini (Tablica 2) posljedica otežane sinteze klorofila i/ili nedovoljne količine uskladištenog Mg. Na sličan način moguće je objasniti i najmanju površinu lišća bukovih sadnica pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s Mg u 2020. godini (Tablice 3). Dobro je poznato da pod utjecajem loše ishranjenosti biljaka s Mg dolazi do nakupljanja ugljikohidrata u lišću i njihova otežanog premještanja prema mjestima rasta (Tränkner i dr. 2018), što usprava rast stabljike i korijena te u konačnici rezultira relativno malom biomasom stabljike i korijenja (Hawkesford i dr. 2012, Hauer-Jákli i Tränker 2019). Takav efekt loše ishranjenosti biljaka s Mg na njihov rast pripisuje se otežanom premještanju saharoze kao transportnog oblika ugljikohidrata floemom prema meristemima stabljike i korijena (Tränkner i dr. 2016 i 2018). Upravo to objašnjava signifikantno manji debljinski i visinski prirast stabljike (Slike 1 i 2), odnosno signifikantno manju dužinu krupnog i sitnog korijenja te broj račvanja korijenja (Tablica 4) kao i masu suhe tvari lišća, stabljike i korijenja (Slika 4) kod sadnica suboptimalno ishranjenih s Mg u odnosu na sadnice iz KO tretmana koje su bile optimalno ishranjene sa svim mineralnim hranivima, uključujući i Mg (Tablica 1).

Željezo – *Iron*

Željezo je biljkama neophodno za sintezu klorofila, redukciju nitrata i sulfata, simbiotskoj i/ili nesimbiotskoj asimilaciju N_2 i transport elektrona u svjetlim reakcijama fotosinteze posredstvom proteina u čijoj izgradnji Fe ima centralnu ulogu (Taiz i Zeiger 2010, Brondley i dr. 2012). Uslijed suboptimalne ishrane s Fe kod biljaka dolazi do smanjene sinteze proteina, lipida i klorofila te porasta koncentracije slobodnih aminokiselina (Brondley i dr. 2012). Zbog poremećene sinteze proteina, klorofila i lipida dolazi do pojave kloroze na lišću i otežanog transporta elektrona u svjetlim reakcijama fotositeze te otežane asimilacije CO_2 i smanjene sinteze ugljikohidrata, što se u konačnici negativno reflektira na rast čitave biljke (Vukadinović i Vukadinović 2011). Prethodno navedeno, ide u prilog našim rezultatima prema kojima je pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti bukovih sadnica sa Fe došlo do signifikantnog opadanja debljinskog i visinskog prirasta stabljike (Slike 1 i 2), te usporenog rasta korijena na što ukazuju signifikantno manja dužina krupnog i sitnog korijenja te broj račvanja i vrhova sitnoga korijenja (Tablica 4) kao i mase suhe tvari lišća, stabljike i korijenja (Slika 4) uspoređujući sadnice suboptimalno ishranjene s Fe sa sadnicama iz KO tretmana koje su bile optimalno ishranjene sa svim mineralnim hranivima, uključujući i Fe (Tablica 1).

ZAKLJUČAK
CONCLUSION

Na temelju usporedbe dobivenih rezultata između sadnica u kontrolnom i ostalim tretmanima bilo je moguće zaključiti da su početak otvaranja pupova i početak razvoja lišća bili odgođeni samo pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s P. Nadalje, razvoj lišća koji je uslijedio nakon otvaranja pupova pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s N i Mg bilo je najsporiji, dok suboptimalna ishranjenost s P i Fe nije utjecala na brzinu razvoja lišća. Prosječna površina potpuno razvijenog lišća nije bila značajnije utjecana suboptimalnom ishranjenošću niti s jednim hranivom, dok je ukupna lisna površina u 2020. godini bila reducirana samo pod utjecajem suboptimalne ishranenosti s N i Mg, a 2021. godine do redukcije ukupne lisne površine došlo je pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti sa svim hranivima. Na debljinski i visinski prirast stabljike te produkciju suhe tvari lišća, stabljike i korijenja negativno je utjecala suboptimalna ishranjenost sa svim hranivima. Razvoj korijenja bio je negativno utjecan suboptimalnom ishranjenošću sa svim hranivima, osim sa N. Naprotiv, pod utjecajem suboptimalne ishranjenosti s N došlo je do povećanja ukupne dužine sitnog korijenja te broja račvanja i vrhova sitnog korijenja. Bez obzira na to, rezultati ovoga rada nedvosmisleno ukazuju da suboptimalna ishranjenost bukovih sadnica sa mineralnim hranivima koja su bila uključena u ovaj pokus ima negativan utjecaj na njihovu kvalitetu.

LITERATURA
REFERENCES

- AOAC, 2015: Officinal Method of Analysis of AOAC International, Gaithersburg, Maryland, USA.
- Bergmann, W., 1993: Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Entstehung, visuelle und analytische Diagnose. Gustav Fischer Verlag Jena, 1 – 835 str.
- Brondley M., P. Brown, I. Cakmak, Z. Rengel, F. Zhao, 2012: Functions of nutrients: micronutrients. U: P. Marschner (ur.), Marschner´s mineral nutriotion of higher plants. 3th edition. Amsterdam: Elsevier Ltd. 191 – 269 str.

- Drvodelić, D., M. Oršanić, 2019: Izbor kvalitetne šumske sadnice poljskog jasena (*Fraxinus angustifolia* Vahl) za umjetnu obnovu i pošumljavanje. Šum list, 11–12: 577 – 585 str.
- Evans, J. R., 1989: Photosyntesis and nitrogen relationsheep in leaves C3 plants. Oecologia, 78: 9 – 19 str.
- Gessler, A., C. Keitel, M. Nahm, H. Rennenberg, 2004: Water shortage affects thewater and nitrogen balance in central European beech forests. Plant Biol, 6: 289 – 298 str.
- Haase, D. L., R. W. Rose, J. Trobaugh, 2006: Field performance of three stock sizes of Douglas-fir container seedlings grownwith slow release fertilizerin the nursery growing medium. New Forests, 31: 1 – 24 str.
- Haase, D. L., 2007: Morphological and Physiological Evaluations of Seedling Quality. USDA Forest Service Proceedings RMRS P-50: 3 – 8 str.
- Hauer-Jákli, M., M. Tränker, 2019: Critical leaf magnesium thresholds and the impact of magnesium on plant growth and photo-oxidative defense: a systematic review and meta-analysis from 70 years of research. Front Plant Sci, 10: 766 str.
- Hawkesford M., W. Horst, T. Kichey, H. Lambers, J. Schjoerring, I. Skrumsager-Møller, P. White, 2012: Functions of macronutrients. U: P. Marschner (ur.), Marschner´s mineral nutriotion of higher plants. 3th edition. Amsterdam: Elsevier Ltd. 135 – 189 str.
- Komlenović, N., P. Rastovski, 1982: Mogućnost unaprijeđenja proizvodnje sadnica hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.), kitnjaka (*Quercus petraea* Liebl.) i crnike (*Quercus ilex* L.) primjenom mineralnih gnojiva. Agrohemija, 5-6: 209 – 216 str.
- Komlenović, N., 1984: Mineralna ishrana nekih vrsta listača i četinjača na posebnim supstratima. U: Fiziološki aspekti mineralne ishrane bilja. Beograd, 145 – 152 str.
- Komlenović, N., 1992: Primjena gnojiva s produženim djelovanjem u proizvodnji šumskih sadnica. Radovi, 27: 95 – 104 str.
- Komlenović, N., 1995: Primjena kompleksnih gnojiva u uzgoju šumskih biljaka obloženog korijenovog sustava. Radovi, 330: 1 – 10 str.
- Kreuzwieser J, Gessler A (2010) Global climate change and tree nutrition: Influence of water availability. Tree Physiol, 30: 1221–1234.
- Magh, R. K., M. Grün, V. E. Knothe, 2018: Silver-fir (*Abies alba* Mill.) neighbors improve water relations of European beech (*Fagus sylvatica* L.), but do not affect N nutrition. Trees, 32: 337–348 str.
- Meller, S., E. Frossard, M. Spohn, J. Luster, 2020: Plant nutritional status explains the modifying effect of provenance on the response of beech sapling root traits to differences in soil nutrient supply. Front For Glob Change, 3: 535117.
- Mengel, K., E. A. Kirgby 2001: Principles of plant nutrition. 5th edition, Springer science + Business media Dordreacht, 849 str.
- Millard, P., 1996: Ecophysiology of the internal cycling of nitrogen for tree growth. Z. Pflanzenernaehr. Bodenk, 159: 1 – 10 str.
- Millard, P., G. A. Grelet, 2010: Nitrogen storage and remobilisation by trees: ecophysioloical relevance in a changing world. Tree Physiol, 30: 1083 – 1095 str.
- Peuke, A. D., H. Rennenberg, 2004: Carbon, nitrogen, phosphorus, and sulphur concentration and partitioning in beech ecotypes (*Fagus sylvatica* L.): phosphorus most affected by drought. Trees, 18: 639 – 648 str.
- Peuke, A. D., H. Rennenberg, 2011: Impacts of drought on mineral macro- and microelements in provenances of beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings. Tree Physiol, 31: 196 – 207 str.
- Potočić, N., I. Seletković, 2001: Utjecaj vremena i metode gnojidbe na uspjevanje sadnica hrasta lužnjak. U: Znanost u potrajnom gospodarenju šumama. Šumarski fakultet, Sveučilište u Zagrebu i Šumarski institut, Jastrebarsko. Zagreb, 367 – 371 str.
- Potočić, N., I. Seletković, M. Čater, T. Ćosić, M. Šango, M. Vedriš, 2009: Ekofiziološki odziv suncu izloženih sadnica obične bukve (*Fagus sylvatica* L.) pri različitim razinama gnojidbe. Šum list, 5–6: 280 – 289 str.
- Schmal, J. L., D. F. Jacobs, C. O'Reilly, 2011: Nitrogen budgeting and quality of exponentially fertilized *Quercus robur* seedlings in Ireland. Eur J For Res, 130: 557 – 567 str.
- Seletković, I., 2006: Utjecaj gnojidbe dušikom, fosforom i kalijem na rast i razvoj sadnica hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.). Šumarski fakultet Zagreb. Disertacija, 134 str.
- Seleković, I., N. Potočić, A. Jazbec, t. Ćosić, T. Jakovljević, 2009: Utjecaj različitih sjetvenih supstrata i vrsta sporotopivih gnojiva na rast i fiziološke parametre sadnica obične bukve (*Fagus sylvatica* L.) u rasadniku i nakon presadnje. Šum list, 9–10: 469 – 481 str.
- Sever, K., D. D. Sviličić, T. Karažija, B. Lazarević, Ž. Škvorc, 2021: Fotosintetski odgovor bukovih klijanaca na suboptimalnu ishranjenost s mineralnim hranivima. Šum List, 5–6: 225 – 238 str.
- Shi, W., P. Villar-Salvador, G. Li, X. Jiang, 2019: Acorn size is more important than nursery fertilization for outplanting performance of *Quercus variabilis* container seedlings. Ann For Sci, 76: 22 str.
- StatSoft, Inc., 2006: STATISTICA (data analysis software system), version 7.1. www.statsoft.com
- Stober, C., E. George, H. Persson, 2000: Root Growth and Response to Nitrogen. U: Schulze ED. (ur.) Carbon and Nitrogen Cycling in European Forest Ecosystems. Ecological Studies (Analysis and Synthesis), vol 142. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Taiz, L., E. Zeiger, 2010: Plant Physiology. Fourth Edition. Sinauer Associates, Inc. Sunderland, Massachusetts, 782 str.
- Talkner, U., K. J. Meiwes, N. Potočić, I. Seletković, N. Cools, B. De Vos, P. Rautio, 2015: Phosphorus nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L) is decreasing in Europe. Ann For Sci, 72: 919 – 928 str.
- Thiel, D., J. Kreyling, S. Backhaus, C. Beierkuhnlein, C. Buhk, K. Egen, G. Huber, M. Konnert, L. Nagy, A.,Jentsch, 2014: Different reactions of central and marginal provenances of *Fagus sylvatica* to experimental drought. Eur J For Res, 133: 247 – 260 str.
- Thitithanakul, S., 2012: Effect of nitrogen supply before bud break on early development of the young hybrid poplar. Agricultural sciences. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II. Doktorat, 173 str.
- Tränkner, M., B. Jákli, E. Tavakol, C. M. Geilfus, I. Cakmak, K. Dittert, M. Senbayram, 2016: Magnesium deficiency decreases biomass water-use efficiency and increases leaf water-use efficiency and oxidative stress in barley plants. Plant and Soil, 406: 409 – 423 str.
- Tränkner, M., E. Tavakol, B. Jákli, 2018: Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection. Physiologia Plantarum, 163: 414 – 431 str.
- Trinajstić, I., 2003: Taksonomija, morfologija i rasprostranjenost obične bukve. U: S. Matić (ur.), Obična bukva (*Fagus sylavatica* L.) u Hrvatskoj. Zagreb: Akademija šumarskih znanosti, Hrvatske šume d.o.o., Grad Zagreb, Gradski ured za poljoprivredu i šumarstvo, 33 – 47 str.

- Ueda, M. U., E. Mizumachi, N. Tokuchi, 2009: Allocation of nitrogen within the crown during leaf expansion in *Quercus serrata* saplings. Tree Physiol, 29: 913 – 919 str.
- Uscola, M., K. F. Salifu, J. A. Oliet, D. F. Jacobs, 2015: An exponential fertilization dose-response model to promote restoration of the Mediterranean oak *Quercus ilex*. New For, 46: 795 – 812 str.
- Van den Burg, J., 1990: Foliar analysis for determination of tree nutrient status – a compilation of literature data. Literature 1985-1989. "De Dorschkamp", Institute for Forestry and Urban Ecology. Wageningen, the Netherlands, 220 str.
- Villar-Salvador, P., J. L. Peñuelas, J. L. Nicolás-Peragón, L. F. Benito, S. Domínguez-Lerena, 2013: Is nitrogen fertilization in the nursery a suitable tool for enhancing the performance of Mediterranean oak plantations? New For, 44: 733 – 751 str.
- Villar-Salvador, P., J. Puértolas, J. L. Peñuelas, R. Planelles, 2005: Effect of nitrogen fertilization in the nursery on the drought and frost resistance of Mediterranean forest species. Sist Recur For, 14: 408 – 418 str.
- Villar-Salvador, P., N. Heredia, P. Millard, 2010: Remobilization of acorn nitrogen for early seedling growth in the Mediter-ranean oak *Quercus ilex* L., grown with contrasting nutrient availability. Tree Physiol, 30: 257 – 263 str.
- Vukadinović, V., V. Vukadinović, 2011: Ishrana bilja. Poljoprivredni fakultet Osijek, Osijek, 442 str.
- Walters, M. B., P. B. Reich, 2000: Seed size, nitrogen supply, and growth rate affect tree seedling survival in deep shade. Ecology, 81: 1887 – 1901 str.
- Yang, N., A. Zavišić, R. Pena, A. Polle, 2016: Phenology, photosynthesis, and phosphorus in European beech (*Fagus sylvatica* L.) in two forest soils with contrasting P contents. J Plant Nutr Soil Sci, 179: 151 – 158 str.
- Zavišić, A., A. Polle, 2017: Dynamics of phosphorus nutrition, allocation and growth of young beech (*Fagus sylvatica* L.) trees in P-rich and P-poor forest soil. Tree Physiol, 38: 37 – 51 str.

SUMMARY

This paper presents the results of beech seedling growth under the influence of suboptimal nutrition with nitrogen (N), phosphorus (P), magnesium (Mg) and iron (Fe). The aim of the paper was to bring this issue closer to forestry practice through the discussion of the obtained results in the context of current knowledge on plant growth under the influence of suboptimal nutrition with mineral nutrients. In the early spring of 2019 year, 30 beech seedlings originating from one natural mixed stand of sessile oak and common beech were transplanted into a sterile substrate (agroperlite). After transplanting, over the next three years six transplanted plants for each treatment were regularly watered (treated) with a complete nutrient solution (KO treatment), or nutrient solutions in which nitrogen (-N treatment), phosphorus (-P treatment), magnesium (-Mg treatment) or iron (-Fe treatment) was omitted. Therefore, the beginning and duration of leaf development (2020 and 2021), the number of leaves and the average and total leaf area (2019, 2020 and 2021) were recorded on six plants within each of the five previously described treatments. The root collar diameter and the height of the stem were measured in spring 2019 and autumn 2021, based on which the diameter and height increment of beech seedlings and their slenderness at the beginning and end of the experiment were calculated. In addition, on the treated saplings we determined the dry mass of leaves, stems and roots, and the total length of coarse and fine roots as well as the number of forks and tips of fine roots, which was done in autumn 2021 after their removal from agroperlite. Based on the comparison of the obtained results between the plants in the control and other treatments, it was possible to conclude the following. Under the impact of suboptimal nutrition of beech saplings with P there was a delay in spring bud burst and the beginning of leaf development. The slowest leaf development was observed under the impact of suboptimal nutrition with N and Mg. The average leaf area was not significantly affected by suboptimal nutrition with any nutrient. The decrease in the number of leaves and their total area under the impact of suboptimal nutrition with all nutrients was recorded only in the last year of the experiment. Stem diameter and height increments were also negatively affected by suboptimal nutrition with all nutrients, and reduced saplings slenderness was observed only under the impact of suboptimal Fe nutrition. The total length of coarse and fine roots was also negatively affected by suboptimal nutrition with all nutrients except N. Under the impact of suboptimal N nutrition, there was an increase in the total length of the fine roots as well as an increase in the number of forks and tips of the fine roots. Nevertheless, suboptimal nutrition with all nutrients had a negative effect on the dry mass of coarse and fine roots, including N.

KEY WORDS: Saplings, mineral nutrients, suboptimal nutrition, growth, dry mass