

Elementi ishrane bilja

Prof. dr. sc. Vladimir Vukadinović

[Agronomski aspekt ishrane bilja je fokusiran na povećanje prinosa i njegove kakvoće kao temeljnog mjerila uspješnosti biljnog uzgoja.](#) Stoga ishrana bilja razvija metode i tehnike poboljšanja mineralne ishrane, odnosno gnojidbe, istražujući tlo kao prirodan supstrat, ali i efikasnost gnojidbe svim vrstama mineralnih i organskih gnojiva, uključujući i utjecaj poboljšivača tla, utvrđuje raspoloživost hraniva iz tla i potrebu za gnojidbom, ali i mjere popravke tla biološke, kemijske i fizikalne naravi. Biljke koriste energiju Sunčeve radijacije za transformiraju neorganske, nežive u organsku, živu tvar potrebnu svim živim bićima na Zemlji.

Element	pH tla							
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
Dušik (N)								
Fosfor (P)								
Kalij (K)								
Sumpor (S)								
Kalcij (Ca)								
Magnezij (Mg)								
Željezo (Fe)								
Mangan (Mn)								
Bor (B)								
Bakar (Cu)								
Cink (Zn)								
Molibden (Mo)								

Biljke su [fotoautotrofi](#) koji svoju hranu (šećere) same sintetiziraju u procesu fotosinteze, odnosno *primarne organske produkcije* koristeći Sunčevu energiju, ugljični dioksid i vodu, a za sintezu složenih organskih spojeva zahtijevaju osim *organogenih elemenata* (C, O i H) i više *mineralnih elemenata*. Dakle, premda su gnojiva opće prihvaćena kao biljna hrana jer poboljšavaju rast biljaka, proizvođači moraju osigurati biljkama potrebnu energiju Sunca, dovoljno vode, a tek onda dostanu količinu neophodnih elemenata

Slika 1. Povezanost pH s raspoloživosti esencijalnih elemenata iz tla (tamnije je bolje)

gnojidbom jer tlo nije dovoljan, niti pravovremeni izvor hranjivih tvari, osobito glavnih elemenata ishrane bilja (N, P i K).

[Raspoloživost elemenata ishrane u tlu veoma je različita, a ovisi od mnogih svojstava tla \(indikatorima plodnosti\)](#) kao što je pH tla (Slika 1.), sadržaju humusa, strukturi tla (zbijenost, dreniranost, prozračnost, brzina infiltracije i perkolacije vode i dr.), količini oborina (ispiranje i sapiranje hraniva, dovoljna količina

kisika za metabolizam korijena, erozija i dr., Tablica 1.), ali i gnojidbi. [Ne treba zanemariti niti genetsku specifičnost biljne ishrane koja može biti različita i unutar jedne biljne vrste, odnosno ovisiti o kultivaru,](#) kao niti agrrotehniku (obrađa, [izbor gnojiva i gnojidbu,](#) pripremu za sjetvu i sjetvu, način i vrijeme prihrane, [intenzitet i diverzitet rotacije,](#) borbu s korovima i zaštitu od bolesti i štetočina).

Tablica 1. [Kako svojstva tla utječu na pojavu deficita elemenata](#)

Svojstva tla	Očekivani deficit elemenata				
Hladna tla	N	P	S	Fe	Zn
Vlažna tla	N	P	K	Fe	Zn
Suha tla (suša)	P	K	S	B	
Visok pH	Fe	Mn	Zn	Cu	
Nizak pH	Ca	Mg	S	Mo	
Zbijena tla	P	K	Mg		
Humozna tla	K	Mn	Cu		
Slabo humozna tla	K	P	B	S	Zn
Pjeskovita tla	K	Mg	S	B	Mn
Suvišak kalcija	P	Fe			
Suvišak magnezija	Ca				
Manjak magnezija	Mg	Ca			

Fundamentalni principi gnojidbe

[Vrhunski prinosi uz dobru kakvoću uroda postižu se samo korištenjem kombiniranog učinka i optimiziranjem cjelokupne agrrotehlike i prakse upravljanja, pa samo ishrana, odnosno gnojidba, ma kako bila važna, nije dovoljna.](#) Također, suvremeni trendovi pokušavaju zamijeniti visoko intenzivnu proizvodnju hrane visoko učinkovitim sustavom što zahtijeva poznavanje i uključivanje većeg broja različitih indikatora u određivanju potrebe za gnojidbom, kako u agrrotehničkom aspektu, tako i u primjeni gnojiva.

Znanstveno-stručni temelji utvrđivanja potrebe za gnojidbom vrlo su opsežni i nadasve multidisciplinarni te ih nije moguće sažeti niti jednostavno prikazati. [Za bolje razumijevanje tako složene problematike može pomoći autorov popis 50 pravila u knjizi „Filozofija gnojidbe“ za interpretaciju kemijske analize tla](#) i dopunskih informacija neophodnih za utvrđivanje potrebe u gnojdbi ALR_{xp} kalkulatorom, pa su ispod navedeni [\(citirani\) tek fundamentalni principi gnojidbe](#):

- 1) Pravilna primjena gnojiva (doza, vrijeme i način aplikacije) može značajno povećati prinos usjeva te je potrebno unaprijed znati potrebe usjeva za najveći mogući prinos, [a to se postiže uz najmanje rizika temeljem analize tla](#) (prije osnovne gnojidbe, prije sjetve, za potrebe prihrane i korekciju uočenih problema nakon vizualno pregleda i/ili temeljem folijarne analize);
- 2) Nedovoljna, ali u suviše velika doza gnojiva utječe na profitabilnost biljne proizvodnje. [Suvišna \(luksuzna\) gnojidba povećava trošak proizvodnje i štetno utječe na okoliš, a premala će smanjiti prinos, a time i prihod](#). Nepotrebno visoka gnojidba, kao i visoka ulaganja u druge agrotehničke zahvate u jednom trenutku više neće rezultirati većim prinosom ili pak rastom profita;
- 3) Previsoke doze dušika namijenjene povećanju prinosa, npr. pšenice, šećerne repe, vinove loze itd. mogu umanjiti kvalitetu proizvoda, povećati žetveni indeks i produljiti vegetaciju, ali i predstavljati tzv. [ekološko opterećenje](#);
- 4) Prije gnojidbe, odnosno kupovine gnojiva, [usporedite njihovu formulaciju, sadržaj aktivne tvari, kemijski oblik hraniva \(pogodnost i namjenu za pojedine usjeve, njegovu topivost u tlu, brzinu transformacije i/ili retrogradacije i/ili gubitaka, reakciju na pH tla i dr.\) i cijenu](#) (tzv. strategija 4R). Koncentrirana kompleksna gnojiva, obzirom na veću ukupnu koncentraciju aktivne tvari (max. konc. aktivne tvari NPK ~60 %), mogu biti znatno jeftinija, ali i smanjiti troškove transporta i primjene, no obično sadrže manju količinu sekundarnih i mikro elemenata (npr. kalcija, magnezija i dr.);
- 5) [Premda je inkorporacija gnojiva u trake \(tzv. lokalizirana gnojidba\) općenito najučinkovitija metoda](#), nije uvijek najjeftiniji niti najpogodniji način za primjenu. Unos gnojiva u tlo je u odnosu na njegovu površinsku primjenu agronomski i ekonomski mnogo efikasniji i ekološki prihvatljiviji način gnojidbe. Naime, primjena gnojiva „*pod brazdu*“ osigurava ravnomjernu raspodjelu hranjivih tvari u *rizosferi* omogućavajući korijenu da rastući dođe u kontakt s gnojivom (korijen raste tijekom cijele vegetacije u potrazi za vodom i hranivima za razliku od nadzemnog dijela biljke);
- 6) [Folijarna primjena gnojiva u obliku spreja ima svoje mjesto](#), naročito elemenata slabe pokretljivosti u biljkama, u visoko profitabilnim biljnim proizvodnjama, posebice u sjemenarstvu, voćarstvu i povrćarstvu. [Međutim folijarna gnojidba zapravo je prihrana jer ne može zadovoljiti ukupne potrebe biljaka u makroelementima, a hraniva je potrebno dodavati u više navrata zbog niske koncentracije otopine](#) kojom se biljke prskaju (kako se ne bi izazvale štete od ožeglina i zastoj u rastu) te je potrebna vrlo velika količina vode. Također, hraniva mogu biti isprana kišom ili navodnjavanjem;
- 7) Biogenost tla je neobično važna jer su [mikroorganizmi glavni pokretači ciklusa hranjivih tvari u tlima i stoga kritično važni za poljoprivredu, proizvodnju hrane i regulaciju klime](#) te zdrava i jaka *biota* omogućuje usvajanje više biljnih hranjivih sastojaka. Također, važan je [pravilan plodored, odnošenje ili spaljivanje žetvenih ostataka, sjetva siderata, među- i zimskih pokrovnih usjeva](#), a kad god je moguće treba primijeniti i organsku gnojidbu;
- 8) [Velik broj limitirajućih čimbenika biljne proizvodnje može se ukloniti ili umanjiti kondicioniranjem](#), npr. nizak pH tla kalcizacijom, nizak sadržaj humusa organskom i zelenom gnojidbom, ostavljanjem svih žetvenih ostataka na parceli, konzervacijskom obradom i dr. Održavanje i podizanje plodnosti u višegodišnjem periodu, bez visokih jednokratnih investicija, postižu se visoki i ujednačeni prinosi dobre i/ili izvrsne kakvoće;
- 9) [Precizna poljoprivreda](#), kao [segment pametne poljoprivrede](#) (koja pomaže donošenju ispravnih odluka temeljem relevantnih podataka), osigurava da se gnojidba na cijeloj proizvodnoj parceli obavi prema analizi tla i očekivanom, realno mogućem prinosu čime se prinosi povećavaju, rizik smanjuje, a profit raste.

- 10) Korovi iscrpljuju vodu i hranjive tvari iz tla pa ih je važno iskorijeniti, najbolje pravilnom obradom koja omogućuje unos hraniva u *rizosferu* (zonu korijena) i povećava kapacitet tla za zrak i akumulaciju vode.

Elemente biljne ishrane, organske i mineralne, potrebne za proces primarne organske produkcije nazivamo neophodna ili esencijalna biljna hraniva, a biljke ih usvajaju u više različitih kemijskih oblika. To mogu biti električno nenabijene molekule kao CO₂, O₂, N₂O itd. ili električno nabijene čestice, odnosno ioni kao NO₃⁻, H₂PO₄⁻, K⁺ itd. Dakle, biljna hraniva su kemijski elementi i molekule čije podrijetlo može biti anorgansko kao i organsko, ovisno o tome potječu li iz minerala Zemljine kore ili su produkti razgradnje žive tvari, npr. humusa, žetvenih ostataka, organskih gnojiva i dr. Biljke mogu sadržavati 60-ak kemijskih elemenata, a smatra se da je trenutno tek 17 esencijalnih elemenata koje biljke usvajaju u više različitih kemijskih oblika što opravdava njihovu pragmatičnu podjelu.

Obzirom na podrijetlo *elementi ishrane* dijele se na *organske* (C, O i H) koji čine više od 90 % suhe biljne tvari i *mineralne*, a obzirom na potrebnu količinu na *makro* (C, O, H, N, P, K, S, Ca, Mg i Fe; vjerojatno još Na i Si) i *mikro elemente* (B, Mn, Zn, Cu, Mo, Cl i Ni; vjerojatno još Co i V). Dušik (N), fosfor (P) i sumpor (S) usvajaju se u mineralnoj formi pa se svrstavaju u tu grupu, ali su i neizostavni konstituenti organske tvari. Podjela *esencijalnih elemenata* ishrane je opravdana kad se razmatra njihov utjecaj na povećanje i kakvoću prinosa, ali ne i u fiziološkom smislu jer svaki od njih omogućuje potpuni životni ciklus, bez obzira što je koncentracija mikroelemenata u suhoj biljnoj tvari ispod 1 %. Korisni (beneficijalni) elementi pod optimalnim uvjetima rasta biljaka nemaju fiziološku ulogu, ali utjecaj im je to povoljniji što su uvjeti rasta lošiji. U nekim slučajevima korisni elementi mogu djelomično zamijeniti neke od neophodnih elemenata (npr. natrij može zamijeniti nespecifično kalij). Preostali elementi svrstavaju se u nekorisne ili pak toksične, zavisno od utjecaja na rast i razvitak biljaka.

Makroelementi

Dušik (N)

Dušik se opravdano smatra najznačajnijim neophodnim (biogenim, esencijalnim) elementom biljne ishrane jer vrlo često ograničava rast i tvorbu prinosa. U agrokemijskom pogledu, dušik je svakako prvi i najznačajniji „*prinosotvorni*“ element, premda su u biljnoj proizvodnji sva tri glavna elementa ishrane, dušik (N), fosfor (P) i kalij (K) redovno primjenjuju. Suha tvar biljaka sadrži u prosjeku između 2 i 5 % dušika, što je u odnosu na ugljik zapravo vrlo mala količina, ali ga u većini tala nema dovoljno za postizanje visokih i stabilnih prinosa te se redovito primjenjuje gnojidbom, najčešće uz jednu ili više prihrana. Naime, njegovu transformaciju iz organske tvari tla ili iz molekularnog (atmosferskog) dušika obavljaju mikroorganizmi koji zahtijevaju povoljne vremenske i zemljišne uvjete što opskrbu bilja raspoloživim dušikom čini nepouzdanom i teško predvidljivom.

Za razliku od većine drugih biogenih elemenata, dušik tla je podrijetlom iz atmosfere (kao i ugljik i dijelom sumpor), ali ga biljke u najvećem dijelu usvajaju u mineralnom obliku (NO₃⁻ i NH₄⁺) te se svrstava u grupu mineralnih elemenata. Dušik je sastavni dio bjelančevina i nukleinskih kiselina te fotosintetskih pigmenta, amina, amida i mnogih drugih spojeva pa se kemija dušika opravdano smatra najvažnijim dijelom agrokemije, odnosno ishrane bilja. Samo mali broj biljaka može u simbiozi s N-fiksirajućim mikroorganizmima koristiti plinoviti dušik (N₂) iz atmosfere (gdje ga ima 78,1 % volumno ili 75,51 % po masi, ukupno 3,8 × 10¹⁵ t, ili 86,5 t iznad svakog hektara površine Zemlje). Za prevođenje molekularnog oblika dušika do amonijaka ili nitrata (u tlu su oba pretežito u ionskom obliku u kojem ih obliku biljke usvajaju), potrebna je ogromna količina energije (946 kJ mol⁻¹), što je otprilike polovica ukupne energije utrošene u biljnoj proizvodnji.

Dušik je lako pokretan u biljkama te se lako premješta iz starijih, fiziološki manje aktivnih organa u mlađe lišće ili sjeme, odnosno plod. Stoga se nedostatak dušika prvo zapaža na starijem, donjem lišću (Slika 2.) koje poprima klorotičan, odnosno blijedo-žuto-zeleni izgled, a rast biljaka i korijena je usporen. Uz jači

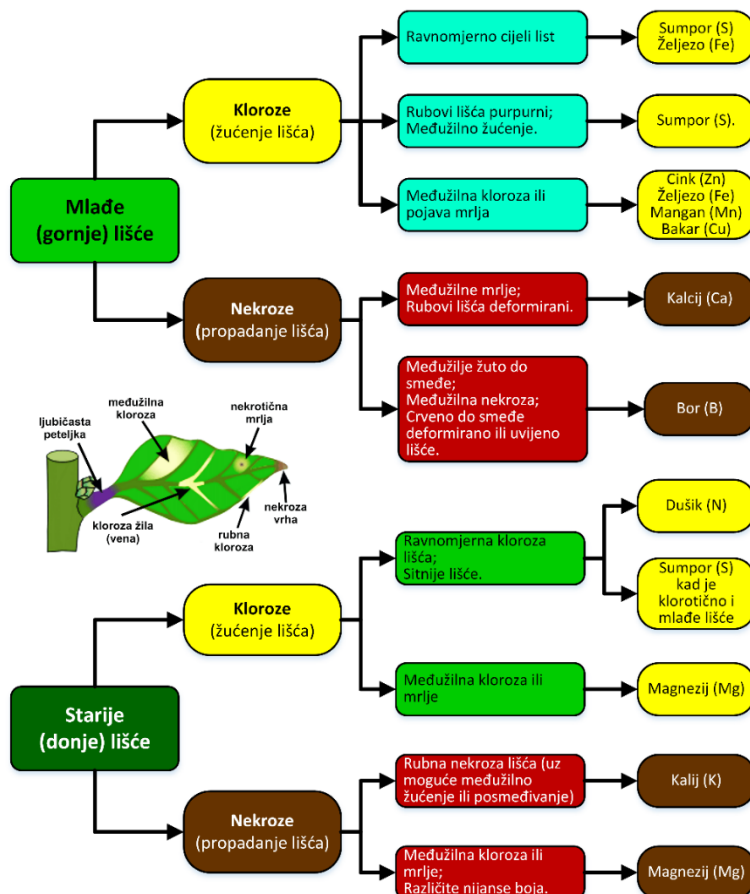
nedostatak N lišće može biti žuto, čak narančasto ili crveno, kloroza lišća se širi od vrha prema bazi lista, pri akutnom nedostatku dušika pojavljuje se nekroza (odumiranje lišća).

Fosfor (P)

Biljkama je fosfor, kao i preostala dva glavna elementa ishrane (N i K), potreban u relativno velikim količinama. Nezamjenjiv je u skladištenju i korištenju kemijske energije za potrebe metabolizma svih živih bića te nasljeđivanju (prenošenje genetičke informacije sa roditelja na potomstvo). *Fosfor (P) je nemetal koji ulazi u sastav važnih organskih spojeva kao što su nukleoproteidi, fosfolipidi, enzimi i mnogih drugih spojevi, a posebice je nezamjenjiv u aktivaciji i pokretanju endergonih reakcija.*

Biljke usvajaju fosfor isključivo u anionskom obliku i to kao $H_2PO_4^-$ i HPO_4^{2-} čija je pokretljivost u tlu vrlo ograničena zbog kemijskog vezivanja u tlu na kalcij, ili željezo i aluminij u kiselim uvjetima. Fosfor se u tlu na veće udaljenosti premješta tek erozijom što može izazvati eutrofikaciju voda, jezera ili mora. *Biljke ga nakon usvajanja ugrađuju bez redukcije u organsku tvar, za razliku od dušika i sumpora, što je evolucijski razumljivo jer se na fosforu temelji metabolizam tvari i energije, kao i sposobnost reprodukcije svih živih bića.* Pokretljivost fosfora u biljci je dobra u oba smjera.

Najveće potrebe biljaka za fosforom su na početku vegetacije kod intenzivnog razvoja korijenovog sustava i kod prijelaza iz vegetacijske u reprodukciju fazu života. *Rana potreba biljaka za fosforom često uzrokuje njegov akutni nedostatak u uvjetima kad je temperatura tla još niska ili korijen nema dovoljno kisika, uglavnom zbog suviška vlage.* U nedostatku fosfora reduciran je rast vrha biljke i korijena, a u ranoj fazi porasta (osobito kad je tlo još hladno) listovi su često plavo-zeleni, ponekad tamnije zeleni u odnosu na biljke koje imaju na raspolaganju dovoljno fosfora, a u kasnijim stadijima listovi postaju grimizni, ponekad uz rubnu nekrozu uz prerano opadanje, počevši od starijih (Slika 2.).



Slika 2. Simptomi poremećaja ishrane bilja

Kalij (K)

Kalij je alkalni metal velike rasprostranjenosti u prirodi, a u tlu i biljkama nalazi se samo kao jednovalentni kation (K^+) s redukcijским svojstvima. *Za razliku od dušika i fosfora kalij nije konstituent složenih organskih spojeva (ne ulazi u sastav organske tvari, već se labavo veže, pretežito na proteine).* Ipak je kalij neophodan element čija uloga je kardinalna zbog aktivacije i modulacije aktivnosti enzima, a zbog visoke koncentracije u protoplazmi snažno utječe na hidratiziranost protoplazme. *Stoga kalij ima ključnu ulogu u fotosintezi, floemskom transportu asimilata, metabolizmu dušika i procesima skladištenja rezervnih tvari. Budući da protoplazma sadrži visoku koncentracija K^+ izuzetno je važan za regulaciju sadržaja vode u biljkama i ima ključnu ulogu u adaptaciji biljaka na nepovoljne klimatske i zemljišne uvjete, npr. sušu, mraz i salinitet. Također, kalij ima značajnu ulogu u otpornosti i tolerantnosti biljaka na patogene.*

Kalij je vrlo pokretan element u biljkama pa se njegov nedostatak prvo zapaža na mlađem lišću koje je manje, rijetko klorotično pa mu je boja uobičajeno zelena ili je čak i tamnija (zbog usporenog rasta). Pri jačem deficitu kalija u tlu javlja se tipična rubna nekroza na starijem lišću. Novoformirano lišće manje je nego obično i često valovite površine. Biljke imaju snižen turgor i djeluju uvenulo ("spavaju"). Do nedostatka kalija najčešće dolazi na lakim, pjeskovitim tlima, zatim teškim glinovitim tlima s izraženom K-fiksacijskom moći i tlima koja imaju suvišak kalcija ili magnezija. Biljke kalij usvajaju u velikoj količini te je manjak vrlo česta pojava, a gnojidba kalijem redovita agrotehnička mjera.

Kalcij (Ca)

Kalcij je zemnoalkalni metal koji ne sudjeluje u građi žive tvari (tek u nekoliko manje važnih spojeva), ali mu je ipak fiziološka funkcija vrlo značajna jer utječe na fizičko-kemijska svojstva protoplazme, aktivira 20-k enzima, premda nespecifično. Nakuplja se u staničnim stijenkama, vakuolama, jezgri, kromosomima, kloroplastima i mitohondrijima te povećava stabilnost živih membrana, utječe na njihovu propustljivost, a prema najnovijim istraživanjima Ca-fotoprotein (ekvorin) signalizira biljkama dodir, hladnoću, vjetar, gljivični napad, salinitet, etilen, ozljede, oksidativni stres i cirkadijalni ritam. Kalcij je slabo pokretan u biljkama pa se simptomi deficita uglavnom pojavljuju na mlađim listovima uz vegetacijski vrh rasta koji su često deformirani (vrh svinutim unazad, a rubovima smotanim prema naličju ili licu lista) i mogu biti nepravilni sa smeđim ožeglinama ili pjegama.

Kalcij ulazi u red vrlo rasprostranjenih elemenata litosfere (3,6 %), a podrijetlom je iz različitih primarnih i sekundarnih minerala. Njihovom razgradnjom oslobađa se kalcij koji je u tlu pretežito izmjenjivo vezan i u neutralnim tlima prosječno čini 80 % kationa na adsorptivnom kompleksu tla, ili pak iznova gradi sekundarne minerale (karbonate). Kalcij se u formi karbonata vrlo često primjenjuje kao mjera neutralizacije kiselih tala (kalcijacija), a za popravak slanih tala primjenjuje se gips (CaSO₄).

Sumpor (S)

Sumpor je rasprostranjen kemijski element (nemetali) i u litosferi je po zastupljenosti na 16 mjestu. U tlu potječe iz matičnih stijena i prilikom njihovog raspadanja oslobađa se i brzo ga oksidiraju sumporne bakterije. Sumpor se u tlu nalazi u organskom i anorganskom obliku, a biljke ga usvajaju kao anion SO₄²⁻ i u tom obliku se akumulira u protoplazmi biljaka kao mineralna rezerva, a prilikom ugradnje u organsku tvar mora se reducirati, jednako kao i dušik. Sumpor se lako usvaja i iz atmosfere u obliku plinovitog SO₂. Sulfatni anion lako je pokretljiv u tlu, što predstavlja realnu opasnost za ispiranje sumpora iz tla te se u područjima s velikom količinom oborina može isprati više od 100 kg S ha⁻¹ godišnje. Gubitak sumpora iz tla može biti i volatilizacijom u redukcijskim uvjetima u obliku plinovitog H₂S.

Koncentracija sumpora u biljkama je između 0,1 i 0,5 %, dok je omjer S/N u proteinima 1/30-1/40. Najviše sumpora zahtijevaju kupus, cvjetača i luk i njihova potreba može iznositi do 45 kg S ha⁻¹. Sumporom su bogati biljni dijelovi koji sadrže puno proteina, posebice u biljkama iz porodice *Cruciferae* i *Leguminosae* koje ga sadrže do dva puta više. Za razliku od dušika, reducirani sumpor se u biljkama lako oksidira nazad do sulfata, dok se ion NH₄⁺ ne može oksidirati u višim biljkama do NO₃⁻. Fiziološka je funkcija sumpora vrlo značajna jer je konstituent mnogih vitalnih spojeva (aminokiselina *cistein* (R-SH), *metionin* (R-S-R) i *cistin* (R-S-S-R), *koenzima A*, enzima *proteaza* i *ureaze*, *vitamina B1* i *H*, *glikozida* i dr.) i značajan je elektrolit protoplazme.

Simptom nedostatka sumpora sličan je deficitu dušika, ali se kloroza zapaža prvo na mlađem lišću (za razliku od dušika gdje se pojavljuje prvo na starijem lišću). Suvišak S u prirodi je rijetka pojava, ali se sve češće događa u blizini industrijskih zona s velikom emisijom SO₂ u atmosferu. Smatra se da je koncentracija od 1-1,5 mg SO₂ m⁻³ opasna za živi svijet.

Magnezij (Mg)

Magnezij je zemnoalkalijski metal koji je sposoban graditi kompleksne spojeve, a najvažniji je *klorofil*. Vrlo je rasprostranjen element i čini 2,1 % litosfere, a potreban je za veći broj procesa sinteze organske tvari. Ima pozitivan utjecaj na metabolizam ugljikohidrata, proteina i masti te zajedno s drugim kationima utječe na koloide protoplazme i aktivira veliki broj enzima.

Magnezij u tlu je podrijetlom iz primarnih minerala. Ion Mg^{2+} se veže na adsorpcijski kompleks tla ili iznova gradi sekundarne minerale. Prosječno je magnezija u tlu 0,1-1,0 %, a u karbonatnim tlima i puno više. Izmjenjivi oblik magnezija zauzima do 20 % adsorpcijskog kompleksa tla (ponekad i više), a povoljan sadržaj je između 5 i 15 % od KIK-a. Vrlo mala količina Mg^{2+} nalazi se u vodenoj fazi tla, a organske rezerve magnezija, slično kalciju, su beznačajne u ishrani bilja. Na karbonatnim tlima, osobito u vlažnim uvjetima, magnezij često jače od kalcija utječe na pojavu *vapnene kloroze*.

Usvajanje magnezija je aktivan proces, uglavnom ograničen na aktivnu zonu korijena. Antagonizam kod usvajanja magnezija javlja se pri suvišku kalcija, kalija, mangana i rjeđe nekih drugih elemenata.

Koncentracija magnezija u biljkama prosječno iznosi 0,1-1,0 % u ST, najčešće 0,15-0,35 % u ST, a najviše ga ima u reproduktivnim organima, slično fosforu. U biljkama je prosječno 50 % Mg slobodno i stoga je ion Mg^{2+} vrlo značajan elektrolit. Magnezij je u biljkama pokretljiviji od kalcija i za razliku od njega premješta se i floemom, odnosno i bazipetalno. Klorofil je jedini organski spoj čiji je magnezij konstitutivni element pa ga mlađi listovi sadrže više od starijih. U fotosintezi Mg sudjeluje kao aktivni centar klorofila, uključen je u sintezu ATP-a, aktivator je velikog broja različitih enzima i kofaktor gotovo svih enzima koji kataliziraju reakcije *fosforiliranih supstrata* te je neposredno uključen u metabolizam energije.

Nedostatak magnezija manifestira se pojavom međužilne kloroze s klorotičnim područjima koja su međusobno razdvojena zelenim staničjem što čini efekt prugavosti, a simptomi su prvo vidljivi na donjim listovima.

Mikroelementi

Željezo (Fe)

Željezo je teški metal (gustoća $\rho > 5 \text{ kg dm}^{-3}$), u tlu i biljkama nalazi se kao dvo- i trovalentan kation (Fe^{2+} i Fe^{3+}) ili u odgovarajućim spojevima. Vrlo lako mijenja valentno stanje i može graditi kompleksne spojeve, a u biljkama je uglavnom u $Fe(III)$ oksidacijskom stanju. U procesima raspadanja mnogobrojnih primarnih i sekundarnih minerala dolazi do oslobađanja željeza, a ono u kiselim tlima vrlo brzo iznova gradi sekundarne minerale. Svježe istaloženi minerali željeza su u vidu amorfnih koloida pristupačnih za ishranu bilja. Većina poljoprivrednih tala sadrži dovoljno mobilnog željeza te lakomobilnih rezervi, premda je nedostatak Fe čest, najčešće na jako humoznim (naročito tresetnim) i karbonatnim tlima (npr. černozi istočne Hrvatske i neka tla mediteranskog pojasa). Biljke usvajaju željezo kao ione Fe^{2+} , Fe^{3+} ili u obliku *kelata* (organo-metalni unutar kompleksni spojevi, npr. *FeEDTA*, *FeDTPA*, *FeEDD(x)A* i dr.), pri čemu treba izabrati odgovarajući kelatni oblik s obzirom na pH reakciju tla.

Koncentracija željeza u suhoj tvari biljaka najčešće je unutar granice 50 i 1.000 ppm (špinat do 3.000 ppm, uljarice 100-200 ppm, žita 50-80 ppm u zrnu itd.). Pokretljivost Fe je u biljkama osrednja do loša jer je 80-90 % željeza čvrsto vezano. Premještanja željeza u biljkama ometa prisutnost bikarbonata ($Ca(HCO_3)_2$). Također, kod folijarne primjene željezo se premješta i descendentno, odnosno prema dolje. Najveća koncentracija željeza je u lišću pa su potrebe za njim najveće kod razvoja asimilacijske površine, ali i korijen sadrži dosta željeza.

Željezo je konstituent mnogih prostetičkih grupa enzima koji imaju brojne biološke funkcije, odnosno konstituent je *kem* strukture (*porfirin* koji sadrži Fe) gdje promjenom valencije omogućuje transport elektrona. Biljke iznose 300-1.500 Fe g ha⁻¹ i premda u tlu ima dosta željeza dostupan je samo mali dio ukupnog Fe te zbog poremećaja u sustavu *tlo-biljka-klima-agrotehnika* često dolazi do pojave *Fe-kloroza*

kad je $pH > 7,0$ ili $pH < 3,5$. Kod visokog pH i istovremeno niskog sadržaja kalija u tlu javlja se tzv. *vapnena kloroza*. Nedostatak željeza može se spriječiti uzgojem tolerantnih sorti na njegov deficit, tretiranjem sjemena ili primjenom folijarnog Fe-gnojiva.

Kritična granica nedostatka željeza je kod 50-150 ppm u ST, a tipični manjak očituje se *interkostalnom* (međužilnom) klorozom prvo mlađih listova, zatim dolazi do pojave rubne i interkostalne nekroze i opadanja lišća. Korijen je kraći i zadebljao, biljke sadrže manje Fe^{2+} , povećani su omjeri P/Fe i K/Ca, a sužen N/K. Suvišak željeza se rijetko događa, osim u vrlo kiselim i slabo dreniranim tlima, gdje je moguće toksično djelovanje suviška željeza. Kritična toksična granica za Fe je 400-1.000 ppm (prosječno 500 ppm), a ogleda se u inhibiciji vegetacijskog rasta, tamnom, plavozelenom lišću i mrkoj boji korijena.

Mangan (Mn)

Mangan je teški metal koji se u biljkama nalazi kao kation Mn^{2+} i Mn^{3+} , a u tlu i kao Mn^{4+} i Mn^{6+} . Veliki broj minerala sadrži mangan (po rasprostranjenosti u litosferi je deseti element), ali najvećim dijelom u tlu potječe iz MnO_2 . Oksidacijski broj mangana ovisi o redoks potencijalu tla, pa je u neutralnoj i lužnatoj sredini pristupačnost mangana jako smanjena zbog nastajanja teško topljivog hidroksida $Mn(OH)_2$. Raspoloživost Mn raste s kiselosti tla i njegove redukcije do Mn^{2+} (vodotopivi Mn^{2+} i izmjenjivo sorbirani Mn^{2+}) te lakoreducirajući $MnOOH$ biljke lako usvajaju (tzv. *aktivni mangan*), dok su više oksidirani oblici kao Mn^{3+} i Mn^{4+} inaktivni oblici. Biljke lako usvajaju mangan i u obliku kelata.

Mangan je konstituent i aktivator niza enzima i neophodan je za rast korijena, ali nije gradivi element organske tvari. Uloga mu je slična magneziju koji može zamijeniti na nespecifičan način u aktivaciji *dekarboksilaza* i *dehidrogenaza* u *Krebsovom* (TCA) ciklusu. Također, fiziološka uloga mangana je nezamjenjiva u fotosintetskom transportu elektrona fotosustava II u procesu *fotooksidacije* (*fotolize*) vode. Značajan je i u redukciji nitrata pa u nedostatku mangana dolazi do njihovog nakupljanja zbog usporene redukcije. Kod dobre raspoloživosti mangana smanjuje se potreba za N, P, K i Ca bez smanjivanja prinosa tako da je mangan značajan za ekonomičnije iskorištavanje drugih hraniva u tlu.

Mangan je nepokretan u biljci i deficit se prvo zapaža na mlađim organima. Smatra se da je kritična granica manjka mangana kod većine biljaka 10-20 ppm u ST, a akutan nedostatak nastupa kad je koncentracija $Mn < 10$ ppm. Simptomi nedostatka mangana se zapažaju kao mrkožute mrlje na lišću dikotiledona ili kao tipična prugasta kloroza (samo su lisne žile normalno zelene. tzv. *intervalna kloroza*) monokotiledonih biljaka. Nedostatak mangana zapaža se češće u tzv. "sušnim" godinama. Toksičnost mangana javlja se kada je u tlu $Mn > 1.000$ ppm, najčešće u ekstremno kiselim tlima, a očituje se pojavom smeđih mrlja na starijem lišću što je često povezano sa simptomom nedostatka željeza.

Cink (Zn)

Cink je teški metal, a biljke ga usvajaju kao kation Zn^{2+} , $ZnCl^+$, $[Zn(NH_3)_4]^{2+}$, $Zn(OH)^+$ i Zn-kelate i za razliku od Fe, Mn, Cu i Mo u biljkama je uvijek dvovalentan (Zn^{2+}). Usvajanje cinka je aktivan proces pa niska temperatura i suvišak fosfora snižavaju usvajanje Zn što je globalni problem uzgoja kukuruza. Pristupačnost mu je veća na kiselim tlima, a nedostatak cinka javlja se najčešće na teškim glinovitim, ali i karbonatnim tlima istočne Hrvatske te solonocima. Cink se vrlo čvrsto sorbira na izmjenjivački kompleks tla te mu je koncentracija u vodenoj fazi izuzetno niska, a pokretljivost cinka u biljci je osrednja (bolja od Fe, B i Mo).

Fiziološka uloga cinka je vrlo opsežna jer utječe na metabolizam mnogih tvari, posebice proteina. Sastavni je dio mnogih enzima i njihov aktivator. Značaj cinka je izuzetno velik u biosintezi DNA i RNA (RNA polimeraza), sintezi proteina (preko prometa RNA i utjecaja na strukturu ribosoma), sintezi auksina, odnosno utječe na rast biljaka (preko utjecaja na sintezu triptofana), stabilizaciji biomembrana i dr. Cink također utječe na aktivnost *ribuloza-1,5-fosfat* (ključni enzim *karboksilacije*), usvajanje i transport fosfora i aktivnost *fosfataza*, povećava otpornost prema bolestima (preko utjecaja na *proteosintezu*), suši (smanjuje transpiraciju) i niskim temperaturama.

Simptom nedostatka cinka uočava se pojavom *interkostalne kloroze* (međuzilna kloroza) lišća, sitnolisnatosti i rozetastoj formi mlađeg lišća (skraćenje internodija). Suvišak cinka rijetko se javlja i to samo na kiselim tlima i rudištima (kritična granica suviška je 200-500 ppm u ST lišća), a očituje se niskim rastom, sitnim listovima, kratkim internodijima i smanjenim korijenom, lišće sadrži crvenkasto mrke pjege, ali za razliku od suviška Fe i Mn, one su podjednako na mlađem i starijem lišću.

Bor (B)

Bor je za razliku od svih drugih mikroelemenata elektronegativan semimetal, a u tlu i biljkama pojavljuje se kao H_3BO_3 , $H_2BO_3^-$ ili HBO_3^{2-} . Potječe iz primarnih ili sekundarnih minerala od kojih je jedino vodotopiva borna kiselina pa se rabi kao borno gnojivo. Topljivost bornih spojeva raste s kiselošću tla pa u kiselim tlima može doći do brzog gubitka B ispiranjem. Nasuprot tome, u alkalnim tlima, posebice "lakšim" i u sušnim uvjetima, često se zapaža manjak bora. Organska tvar tla također predstavlja značajan izvor raspoloživog bora te mu je veći sadržaj u humusnom horizontu zbog sorpcije na organske koloide. Iznad pH 6 i uz suvišak K i Ca raspoloživost bora se jako smanjuje. Gnojidba borom mora se vrlo pažljivo planirati jer je mali raspon od nedostatka do njegove toksičnosti.

Pokretljivost i reutilizacija bora u biljkama relativno je slaba, slično kalciju, pa se često zapaža njegov nedostatak u lišću i gornjim, rastućim dijelovima biljaka, osobito u suši. Premda bor nije sastojak enzima, smatra se da može modulirati njihov rad (npr. stimulacija OPP), regulirati meristemsku aktivnost što se zapaža nepravilnim sekundarnim debljanjem korijena i stabla. Naime, nedostatak bora praćen je smanjenom sintezom *citokinina* uz povećan sadržaj *auksina* pa promjena fitohormonalne ravnoteže potiče neregularnu *meristemsku aktivnost* uz često odumiranje vrhova rasta i deformacije novoformiranih tkiva.

Manjak ili suvišak bora ima utjecaja i na organizaciju i rad mitohondrija te preko njih na aerobnu fazu disanja, a posredno i na propustljivost protoplazme i njezin pH te općenito bubrenje koloida. Prvo se manjak B manifestira smanjenim i abnormalnim *apikalnim rastom*, mlado lišće je deformirano, naborano, često zadebljalo i tamne, plavozelene boje uz čestu pojavu *interkostalne* i *rubne kloroze*. Lišće i peteljke su krti zbog smanjene transpiracije. S jačim nedostatkom bora smanjen je porast biljaka, slabije je zametanje cvjetova i plodova i veći dio korijenskih dlačica odumire pa se sve više smanjuje usvajanje vode i hraniva iz tla. Oplodnja je slaba jer bor utječe povoljno na klijanje polena *angiospermi*, a u njegovom nedostatku formiraju se često *partenokarpni* plodovi (bez sjemena) slabe kakvoće. Suvišak bora može se pojaviti kod navodnjavanja ili primjene komposta s puno bora.

Bakar (Cu)

Bakar pripada skupini teških metala koji se čvrsto vežu na koloide tla, posebice organske, a biljke ga usvajaju kao Cu^{2+} . U primarnim mineralima bakar je u jednovalentnom obliku, a nakon njihovog raspadanja oksidira do Cu^{2+} i u tlu gradi vrlo stabilne kompleksne spojeve s organskim kiselinama, polurazloženim ili humificiranim organskim tvarima i tako je biljkama slabo raspoloživ. Zbog toga se manjak bakra češće javlja na jako humoznim tlima uslijed "organske" fiksacije i lakim pjeskovitim tlima s visokim pH, a raspoloživost mu značajno raste s kiselošću tla (Slika 1.).

Nakon usvajanja korijenom translokacija bakra je osrednja do slaba u oba pravca i to u vidu Cu-kompleksa, obično s aminokiselinama, pa ga korijen biljaka sadrži u znatnim količinama. Biljke sadrže 2-20 ppm Cu u suhoj tvari, a slabo su opskrbljene bakrom ako je koncentracija Cu <4 ppm u tlu. *Fiziološka uloga bakra vrlo je značajna jer je on sastavni dio ili je aktivator mnogih enzima koji sudjeluju u oksidacijskim procesima, utječe na sintezu proteina, stabilizira molekule klorofila i sudjeluje u sintezi antocijana. Za razliku od enzima koji sadrže željezo, Cu-enzimi mogu direktno reagirati s O_2 i stoga preferiraju terminalne oksidacijske procese.*

Osjetljive biljke na deficit Cu su pšenica, ječam, lucerna i duhan. Simptomi manjka bakra su kloroza i nekroza lišća, odumiranje vršnih izdanaka, uvenuće, uvijanje lišća i odumiranje mlađeg lišća i gubitka

apikalne dominantnosti, slično kao kod nedostatka bora. Suvišak bakra vrlo je rijetka pojava (>15-30 ppm u ST), obično se događa na kiselim tlima ili kod dugogodišnje primjene *bordoške juhe* u voćnjacima i vinogradima. Toksičnost bakra očituje se smanjenim rastom korijena i izdanaka, klorozom starijeg lišća i crvenkasto mrkom rubnom nekrozom.

Molibden (Mo)

Molibden je vrlo čvrst metal, visoke gustoće koji je u vodenoj sredini anion (MoO_4^{2-}) za razliku od svih drugih metala. Sadržaj molibdena u tlima je izuzetno nizak (0,6-3,0 ppm, prosječno 2 ppm), a biljke ga usvajaju u obliku visoko oksidiranog molibdata (MoO_4^{2-} ali i kao Mo(IV) i Mo(V)) te u biljkama egzistira kao anion.

Pokretljivost molibdena u biljkama je osrednja, koncentracija vrlo nisko (0,1-0,5 ppm u suhoj tvari), a više ga zahtijevaju biljke iz porodice leguminoza i krstašica. Kod manjka molibdena dolazi do zastoja u *nitratnoj redukciji* i nedostatka reduciranih oblika dušika potrebnog za sintezu aminokiselina i proteina. Molibden je nezamjenjiv kod mikroorganizama (enzim *nitrogenaza*) koji obavljaju fiksaciju N_2 . Fiziološka uloga molibdena je značajna jer sudjeluje u oksidaciji sulfita (SO_3^{2-} do SO_4^{2-}) i redukciji nitrata pa je kod nedovoljne opskrbe aktivnost *nitratne reduktaze* niska uz pad sinteze proteina, narušava se kloroplastna struktura i usporava rast biljaka. Zanimljivo je kako se simptomi deficita molibdena mogu spriječiti primjenom *volframa* (metala visoke gustoće). Nedostatak molibdena utječe na povećan sadržaj neproteinskih, topljivih oblika dušika, npr. *amida*, uz smanjivanje *ribonukleazne aktivnosti*.

Manjak molibdena je rijetka pojava, najčešće na kiselim pjeskovitim tlima, uz čestu primjenu sulfatnih gnojiva, a prvo se zapaža na starijem lišću u obliku žutih i žutozelenih područja uz uvijanje rubova i *rozetavosti* (biljka indikator je cvjetača). Lišće je kod *dikotiledona* uže, deformirano i naročito suženo u donjem dijelu uz lisnu dršku. Tipičan je simptom nedostatka kod biljaka iz porodice krstašica u obliku *kauliflorije* (formiranje cvjetova na stablu bez cvjetnih stapki). Kod kukuruza ne dolazi do potpunog formiranja prašničkih antera i količina polena se smanjuje. Suvišak Mo je vrlo rijetka pojava.

Nikal (Ni)

Nikal je metal visoke gustoće kemijskih svojstava sličnih željezu i kobaltu i posljednji je stekao status esencijalnog mikroelementa. U biljkama se nalazi kao Ni(II), ali može egzistirati i kao Ni(I) i Ni(III). Gradi stabilne kompleksne spojeve i neophodan je za rad enzima *ureaze* i mnogih *hidrogenaza* potrebnih za redukciju sulfata, fotosintezu i oksidaciju vodika kod bakterija, npr. kvržične bakterije *Rhizobium* i *Bradyrhizobium* imaju vrlo nisku hidrogenaznu aktivnost kod nedostatka nikla. Značajan je za usvajanje željeza i u klijanju sjemena pa kod slabe opskrbe niklom biljke kasnije prelaze u reproduktivnu fazu. Koncentracija nikla u biljkama je vrlo niska (1,0-10,0 ppm u suhoj tvari), ali može lako dosegnuti toksične granice (10-50 ppm u ST) na tlima onečišćenim komunalnim otpadom ili na laporima koji sadrže puno nikla. Nikal je komponenta enzima *ureaze* koji transformira ureu u amonijak. Simptom nedostatka nikla najčešće je nekroza lišća koja započinje od vrha. Raspoloživost nikla opada s porastom pH.

Klor (Cl)

Klor je plin, a ubraja se u grupu mikroelemenata tek od nedavno. Naime, biljke ga sadrže u velikim količinama (1-20 g kg^{-1} suhe tvari), a za njegove specifične fiziološke funkcije dovoljne su ultra niske količine. Usvaja se kao anion (Cl^-), a antagonisti su drugi anioni (SO_4^{2-} i NO_3^-). Koncentracija klora je u tlu vrlo promjenjiva zbog njegove lake pokretljivosti pa gubici ispiranjem mogu biti vrlo veliki, premda se unosi u tlo u velikoj količini gnojivom (npr. KCl , NH_4Cl itd.). U zaslanjenim tlima često se nalazi u toksičnoj količini.

Klor nije konstituent organske tvari organske tvari biljaka premda ga pepeo bilja sadrži u velikoj količini. Pretežito je akumuliran u vakuolama lišća i značajno utječe na *osmoregulaciju*, otvaranje puči i odražavanje ionske ravnoteže neophodne za usvajanje drugih elemenata i odvijanje fotosinteze. Zajedno

s manganom sudjeluje u *fotolizi vode* (izdvajanje O_2 u procesu *fotooksidacije vode* PS II ovisi o kloru), ubrzava dijeljenje stanica lista, regulira stomatalnu aktivnost, utječe na premještanje ugljikohidrata, vodni režim biljaka i membranski transport H^+ . Od strnih žita najveću koncentraciju klora podnosi zob dok su osjetljive biljne vrste vinova loza i duhan (loše sagorijevanje), a kod krumpira je smanjena sinteza škroba. Klor dobro podnosi šećerna repa.

Simptomi nedostatka klora nisu zapaženi u prirodnim uvjetima jer se klor lako usvaja iz tla, ali i atmosfere. U kontroliranim uvjetima deficit klora manifestira se uvenućem bilja kod slabe opskrbe vodom, a zatim se pojavljuje kloroza, mrlje na lišću i metalni sjaj lišća (tzv. *bronzing*). Suvišak klora dovodi do porasta turgora i smanjenja transpiracije uz pojavu sitnih i deformiranih listova.

U Osijeku 6. lipnja 2021. god.