

ISHRANA BILJA

Vukadinović, Vladimir; Vukadinović, Vesna

Authored book / Autorska knjiga

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

Publication year / Godina izdavanja: **2011**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:151:009394>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-26**



Sveučilište Josipa Jurja
Strossmayera u Osijeku

**Fakultet
agrobiotehničkih
znanosti Osijek**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Agrobiotechnical
Sciences Osijek - Repository of the Faculty of
Agrobiotechnical Sciences Osijek](#)



ISHRANA BILJA

Vladimir Vukadinović
Vesna Vukadinović



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
POLJOPRIVREDNI FAKULTET U OSIJEKU

Vladimir Vukadinović

Vesna Vukadinović

ISHRANA BILJA



Osijek, 2011.

Dr. sc. Vladimir Vukadinović
Red. prof. Ishrane bilja, Poljoprivredni fakultet u Osijeku
Dr. sc. Vesna Vukadinović
Doc. Vrednovanja zemljišnih resursa, Poljoprivredni fakultet u Osijeku

ISHRANA BILJA

III. izmijenjeno i dopunjeno izdanje

Nakladnik: *Poljoprivredni fakultet u Osijeku*

Recenzenti:

Prof. dr. sc. Blaženka Bertić, red. prof. Fertilizacije, Poljoprivredni fakultet u Osijeku

*Prof. dr. sc. Zdenko Rengel, akademik HAZU, Plant Nutrition, Sveučilište zapadne
Australije, Perth*

*Prof. dr. sc. Rudolf Kastori, akademik, VANU i MTA, Fiziologija biljaka, Poljoprivredni
fakultet, Novi Sad*

Prof. dr. sc. Dragan Amić, red. prof. Kemije, Poljoprivredni fakultet u Osijeku

Prof. dr. sc. Milan Poljak, red. prof. Fiziologije bilja, Agronomski fakultet Zagreb

*Dr. sc. Miranda Šeput, nasl. doc., Hrvatski centar za poljoprivredu, hranu i selo, Zagreb
Ivan Gašpar, dipl. inž., savjetnik tvornice mineralnih gnojiva "Petrokemija" d.d., Kutina*

Lektor: *Ksenija Budija, prof.*

Grafičko oblikovanje i kompjutorski prijelom: *Igor Plac i Vladimir Vukadinović*

Tisak: "Zebra" Vinkovci

Naklada: 500 primjeraka

CIP zapis dostupan u računalnom katalogu Gradske i sveučilišne knjižnica Osijek pod brojem: 130318081; ISBN 978-953-6331-24-1

Na temelju članka 52. stavka 1. podstavka 11. Statuta Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku i sukladno članku 22. Pravilnika o izdavačkoj djelatnosti Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku, a na prijedlog Sveučilišnog odbora za izdavačku djelatnost od 12.12.2011. god., Senat Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku je na sjednici Senata održanoj 16. siječnja 2012. dao suglasnost (broj 48/11) za izdavanje udžbenika pod nazivom „Ishrana bilja“ autora prof. dr. sc. Vladimira Vukadinovića i doc. dr. sc. Vesne Vukadinović na Poljoprivrednom fakultetu u Osijeku. Dana je i suglasnost o upotrebi amblema Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku koji mora biti otisnut na pogodnom mjestu na prednjoj korici udžbenika.

Tiskanje ove knjige financijski su potpomogli:

1. Hrvatski centar za poljoprivredu, hranu i selo, Zagreb
2. Tvornica šećera d.o.o., Osijek
3. Osječko-baranjska županija
4. Agrokor Trgovina d.d., Zagreb
5. Sladorana d.d., Županja
6. AM Agro d.o.o, Petrijevci
7. Poljoprivredni centar d.o.o., Veliškovci

Sadržaj

1.	UVOD U ISHRANU BILJA.....	1
1.1.	BILJEŠKA O AUTORIMA	3
1.2.	POVIJEST ISHRANE BILJA	4
2.	ELEMENTI BILJNE ISHRANE	7
2.1.	PODJELA HRANJIVIH TVARI	7
2.2.	PRAVILA ZA UTVRĐIVANJE NEOPHODNOSTI ELEMENATA BILJNE ISHRANE.....	9
3.	TLO KAO SUPSTRAT BILJNE ISHRANE.....	13
3.1.	SASTAV TLA	13
3.2.	KOLOIDNA SVOJSTVA TLA.....	20
4.	AGROKEMIJSKA SVOJSTVA TLA I NJEGOVA PLODNOST.....	25
4.1.	PROCJENA ZEMLJIŠNE POGODNOSTI	26
4.1.1.	<i>Model procjene pogodnosti zemljišta za trajne nasade.....</i>	<i>37</i>
4.1.2.	<i>Model procjene pogodnosti zemljišta za obradu.....</i>	<i>40</i>
4.2.	TIPOVI TLA.....	44
4.2.1.	<i>Osnove hrvatske klasifikacije tala.....</i>	<i>44</i>
4.2.2.	<i>Sirozem (Regosol).....</i>	<i>46</i>
4.2.3.	<i>Koluvijalno tlo (Koluvium)</i>	<i>47</i>
4.2.4.	<i>Černozem.....</i>	<i>48</i>
4.2.5.	<i>Eutrično smeđe tlo (Eutrični kambisol).....</i>	<i>49</i>
4.2.6.	<i>Crvenica (Terra rosa)</i>	<i>50</i>
4.2.7.	<i>Lesivirano tlo (Luvisol)</i>	<i>51</i>
4.2.8.	<i>Rigolano tlo (Rigosol).....</i>	<i>52</i>
4.2.9.	<i>Pseudoglej</i>	<i>53</i>
4.2.10.	<i>Aluvijalno (fluvijalno) tlo - Fluvisol.....</i>	<i>54</i>
4.2.11.	<i>Fluvijativno livadsko tlo (Humofluvisol, Semiglej)</i>	<i>55</i>
4.2.12.	<i>Ritska crnica (humoglej).....</i>	<i>55</i>
4.2.13.	<i>Močvarno glejno tlo (euglej).....</i>	<i>56</i>
4.3.	DUBINA TLA.....	58
4.4.	TEKSTURA I STRUKTURA TLA.....	60
4.5.	pH-VRIJEDNOST REAKCIJE TLA.....	65
4.5.1.	<i>Aktualna pH-reakcija</i>	<i>70</i>
4.5.2.	<i>Izmjenjiva ili supstitucijska pH-reakcija tla</i>	<i>71</i>
4.5.3.	<i>Hidrolitička kiselost tla</i>	<i>72</i>
4.6.	ORGANSKA TVAR TLA - HUMUS.....	76
4.7.	VODA U TLU	83
4.7.1.	<i>Gravitacijska voda</i>	<i>87</i>
4.7.2.	<i>Kapilarna voda</i>	<i>88</i>
4.7.3.	<i>Higroskopna voda</i>	<i>88</i>
4.7.4.	<i>Kemijski vezana voda.....</i>	<i>88</i>
4.7.5.	<i>Raspoloživost vode.....</i>	<i>89</i>
4.8.	TEMPERATURA TLA	91
4.9.	ŽASLANJENOST I ALKALIČNOST TLA	93
4.10.	SADRŽAJ ŠTETNIH TVARI U TLU.....	97
4.11.	SORPCIJA IONA U TLU I NJEN ZNAČAJ	103

IV

4.12.	OBLICI HRANJIVIH TVARI U TLU	109
4.12.1.	<i>Pokretnije hranjive tvari</i>	110
4.12.2.	<i>Dinamika hraniva u tlu</i>	112
4.13.	POTENCIJAL HRANIVA	114
5.	USVAJANJE HRANIVA	119
5.1.	KINETIKA DIFUZIJE	120
5.2.	PASIVNO USVAJANJE HRANIVA	122
5.2.1.	<i>Gibbs Donnanova ravnoteža</i>	123
5.3.	AKTIVNO USVAJANJE HRANIVA	128
5.4.	USVAJANJE VODE	139
5.5.	USVAJANJE HRANIVA LISTOM	143
5.6.	SADRŽAJ MINERALNIH TVARI U BILJKAMA	145
5.7.	PROMJENA SADRŽAJA ELEMENATA U BILJKAMA	146
5.8.	OPSKRBLJENOST BILJAKA MINERALNIM TVARIMA	148
5.9.	SIMPTOMI NEDOSTATKA I SUVIŠKA ELEMENATA ISHRANE	149
5.9.1.	<i>Opći simptomi nedostatka</i>	152
5.9.2.	<i>Ključ za determinaciju nedostatka hraniva prema simptomima</i>	154
5.9.3.	<i>Antagonizam i sinergizam elemenata ishrane</i>	159
6.	MAKROELEMENTI	161
6.1.	DUŠIK	161
6.1.1.	<i>Dušik u tlu</i>	161
6.1.2.	<i>Podrijetlo dušika u tlu</i>	163
6.1.3.	<i>Nesimbiozna fiksacija dušika</i>	164
6.1.4.	<i>Simbiozna fiksacija dušika</i>	165
6.1.5.	<i>Mineralizacija dušika u tlu</i>	166
	<i>(sivo označena polja sadrže unaprijed postavljene vrijednosti)</i>	172
6.1.6.	<i>Gubici dušika iz tla</i>	173
6.1.7.	<i>Dušik u biljkama</i>	174
6.2.	SUMPOR	181
6.2.1.	<i>Sumpor u tlu</i>	182
6.2.2.	<i>Sumpor u biljkama</i>	183
6.2.3.	<i>Nedostatak i suvišak sumpora</i>	185
6.3.	FOSFOR	186
6.3.1.	<i>Fosfor u tlu</i>	186
6.3.2.	<i>Fosfor u biljkama</i>	189
6.3.3.	<i>Nedostatak i suvišak fosfora</i>	192
6.4.	KALIJ	193
6.4.1.	<i>Kalij u tlu</i>	193
6.4.2.	<i>Kalij u biljkama</i>	196
6.4.3.	<i>Nedostatak i suvišak kalija</i>	198
6.5.	KALCIJ	198
6.5.1.	<i>Kalcij u tlu</i>	199
6.5.2.	<i>Kalcij u biljkama</i>	205
6.5.3.	<i>Nedostatak i suvišak kalcija</i>	207
6.6.	MAGNEZIJ	207
6.6.1.	<i>Magnezij u tlu</i>	208
6.6.2.	<i>Magnezij u biljkama</i>	208
6.6.3.	<i>Nedostatak i suvišak magnezija</i>	210

7.	MIKROELEMENTI	213
7.1.	ŽELJEZO	214
7.2.	MANGAN	219
7.3.	BOR	220
7.4.	CINK	224
7.5.	BAKAR	226
7.6.	MOLIBDEN	227
7.7.	KLOR	228
7.8.	NIKAL	229
8.	KORISNI ELEMENTI (BENEFICIJALNI ELEMENTI)	231
8.1.	KOBALT	231
8.2.	NATRIJ	231
8.3.	SILICIJ	232
8.4.	SELEN	233
8.5.	ALUMINIJ	234
8.6.	VANADIJ, JOD, TITAN, LANTAN I CER.	235
9.	ZNAČAJ MAKRO I MIKROELEMENTATA U ISHRANI LJUDI	237
9.1.	KALCIJ (CA)	237
9.2.	FOSFOR (P)	238
9.3.	KALIJ (K)	238
9.4.	NATRIJ (NA)	238
9.5.	KLOR (CL)	239
9.6.	SUMPOR (S)	239
9.7.	MAGNEZIJ (MG)	239
9.8.	ŽELJEZO (FE)	240
9.9.	CINK (ZN)	240
9.10.	BAKAR (CU)	241
9.11.	MOLIBDEN (MO)	241
9.12.	SELEN (SE)	242
9.13.	JOD (I)	242
9.14.	MANGAN (MN)	242
9.15.	KOBALT (CO)	243
9.16.	ULTRAMIKROELEMENTI	243
9.16.1.	<i>Krom (Cr)</i>	243
9.16.2.	<i>Vanadij (V)</i>	244
9.16.3.	<i>Fluor (F)</i>	244
9.16.4.	<i>Kositar (Sn)</i>	244
9.16.5.	<i>Germanij (Ge)</i>	244
9.16.6.	<i>Stroncij (Sr)</i>	244
9.16.7.	<i>Cezij (Cs)</i>	245
9.16.8.	<i>Arsen (As)</i>	245
9.16.9.	<i>Litij (Li)</i>	245
9.17.	OTROVNI TEŠKI METALI	245
10.	GNOJIVA	247
10.1.	MINERALNA GNOJIVA	247
10.1.1.	<i>Podjela mineralnih gnojiva</i>	247
10.1.2.	<i>Kakvoća mineralnih gnojiva</i>	250
10.2.	DUŠIČNA GNOJIVA	254

10.2.1.	Amonijev sulfat, $(NH_4)_2SO_4$	254
10.2.2.	Amonijev nitrat (AN), NH_4NO_3	255
10.2.3.	Vapnenasto amonijev nitrat (KAN), $NH_4NO_3 + CaCO_3$	255
10.2.4.	Natrijev nitrat (čilska salitra), $NaNO_3$	256
10.2.5.	Kalcijev nitrat (norveška salitra), $Ca(NO_3)_2$	256
10.2.6.	Amonijev klorid, NH_4Cl	257
10.2.7.	Amonijeve soli karbonatne kiseline.....	257
10.2.8.	Urea, $CO(NH_2)_2$	258
10.2.9.	Kalcijev cijanamid, $CaCN_2$	259
10.3.	TEKUĆA N I NPK GNOJIVA.....	260
10.4.	SPOROĐJELJUJUĆA N-GNOJIVA.....	262
10.5.	FOSFORNA GNOJIVA.....	264
10.5.1.	Mljeveni sirovi fosfati.....	266
10.5.2.	Fosforitno brašno.....	266
10.5.3.	Primarni kalcijevi fosfati.....	267
10.5.4.	Sekundarni kalcijevi fosfati.....	268
10.6.	KALIJEVA GNOJIVA.....	269
10.6.1.	Kalijev klorid.....	270
10.6.2.	Kalijev sulfat.....	270
10.7.	SLOŽENA MINERALNA GNOJIVA.....	271
10.7.1.	Kompleksna gnojiva.....	271
10.7.2.	Proizvodnja kompleksnih gnojiva razlaganjem fosfata s HNO_3	273
10.7.3.	Proizvodnja kompleksnih gnojiva razlaganjem fosfata s H_2SO_4	274
10.7.4.	Miješana gnojiva.....	276
10.7.5.	Sporodjeljujuća kompleksna gnojiva.....	276
10.7.6.	Antagonizam gnojiva.....	277
10.8.	MIKROGNOJIVA.....	279
10.9.	KRISTALONI.....	281
10.10.	ORGANSKA I PRIRODNA GNOJIVA.....	282
10.10.1.	Stajnjak.....	282
10.10.2.	Tekući i polutekući stajnjak (gnojnica i gnojovka).....	286
10.10.3.	Guano.....	288
10.10.4.	Gradski otpad.....	288
10.10.5.	Zelena gnojidba (sideracija) i pokrovni usjevi.....	288
10.10.6.	Komposti.....	290
10.10.7.	Zemljišni crvi i vermikomposti.....	292
10.10.8.	Bihugnoj.....	293
10.11.	VODENE KULTURE (HIDROPONI) I HRANJIVE OTOPINE.....	294
10.12.	KONDICIONERI TLA.....	297
10.13.	ANTITRANSPIRANTI (ANTIDESIKANTI).....	300
10.14.	BIOLOŠKA GNOJIVA, BIOLOŠKI AGENSI I MIKORIZA.....	301
10.14.1.	Bakterijska gnojiva.....	302
10.14.2.	Mikoriza.....	303
11.	UTVRĐIVANJE POTREBE U GNOJIDBI.....	305
11.1.	OPSKRBLJENOST TLA I ZADATAK GNOJIDBE.....	318
11.2.	METODE ZA UTVRĐIVANJE POTREBA U GNOJIDBI.....	326
11.2.1.	Vegetacijski pokusi.....	327
11.2.2.	Kemijske ekstraktivne metode.....	327

11.2.3.	<i>Raspoloživost hraniva i visina priroda</i>	328
11.2.4.	<i>Utvrđivanje potrebe u gnojidbi prema Mitscherlichu</i>	330
11.2.5.	<i>Metoda procjene potrebe u gnojidbi po Friedu i Deanu</i>	332
11.2.6.	<i>Druge metode procjene potrebe u gnojidbi</i>	333
11.2.7.	<i>Ekonomski pristup u procjeni potrebe gnojidbe</i>	333
11.2.8.	<i>Utvrđivanje gnojidbe uz pomoć AL-metode i koncept ciljnog prinosa</i>	334
11.2.9.	<i>N_{min} metoda</i>	346
11.2.10.	<i>EUf metoda</i>	350
11.2.11.	<i>Suvremene, nedestruktivne (senzorske metode) utvrđivanja potrebe u gnojidbi</i>	356
11.3.	PRIMJENA RAČUNALA U SIMULACIJI PRIMARNE ORGANSKE PRODUKCIJE ...	363
11.3.1.	<i>Matematičko modeliranje rasta i razvoja usjeva</i>	364
12.	GNOJIDBA USJEVA	381
12.1.	NAČINI PRIMJENE GNOJIVA	381
12.2.	AGROKOLOŠKI I EKOFIZIOLOŠKI TEMELJI GNOJIDBE NAJVAŽNIJIH RATARSKIH USJEVA	386
12.2.1.	<i>Pšenica</i>	386
12.2.2.	<i>Šećerna repa</i>	391
12.2.3.	<i>Kukuruz</i>	395
12.3.	IZNOŠENJE GLAVNIH HRANIVA USJEVIMA	400
12.4.	OSNOVE AGROKEMIJSKOG RAČUNANJA	401
13.	TLOZNANSTVENI POJMOVNIK	407
14.	OPĆA LITERATURA	439

Predgovor trećem izdanju

Poštovani poljoprivredni proizvođači, inženjeri i studenti poljoprivrede, pred Vama je napokon treće izdanje udžbenika Ishrana bilja. Između drugog i trećeg izdanja proteklo je dugo razdoblje u kojem se razina znanja u području ishrane i gnojidbe bilja dramatično povećala te se i u našoj poljoprivrednoj praksi zapažaju novi trendovi u sva tri aspekta biljne proizvodnje. Stoga su suvremeni pogledi na agronomsko-ekološke, sociološko-ekonomske i tehničko-tehnološke aspekte primarne organske produkcije motivirali autore na temeljito preuređivanje knjige koja je sada u trećem izdanju nadopunjena nizom novih znanstvenih činjenica kao i suvremenom metodologijom. Detaljno i multidisciplinarno su razmotrene nove metode, tehnologije i trendovi u gnojidbi bilja uz niz primjera, prvenstveno vlastitih istraživanja i originalnih rješenja, posebice u sferi istraživanja zemljišnih resursa s aspekta pogodnosti tla, ali i njegovih ograničenja za određenu poljoprivrednu namjenu. Praktični aspekti ishrane bilja sada su izloženi uz primjere kako učinkovito gnojiti vodeći računa o profitabilnosti, visini prinosa i kakvoći proizvoda, plodnosti tla kao i zaštiti okoliša od onečišćenja agrokemikalijama.

Treće izdanje udžbenika Ishrana bilja nadopunjeno je u svim poglavljima novim saznanjima u relevantnim temeljnim znanostima (kemija, fizika i biologija tla, fiziologija mineralne ishrane, pedologija, fertilizacija i dr.) na što se nadovezuje niz praktičnih primjera i proračuna, osobito gnojidbe, kako usjeva, tako i trajnih nasada. Opisani su i originalni kompjutorski programi za procjenu pogodnosti zemljišta za biljnu proizvodnju koji su podržani GIS-om, odnosno geostatističkom analizom poljoprivrednog prostora, kao i programi, odnosno suvremena metodologija izračuna potrebe u popravkama tla, prihrani i gnojidbi usjeva te trajnih nasada prema vlastitim, originalnim konceptima i rješenjima. Knjizi je pridodan i opširan stručno-znanstveni pojmovnik kao pomoć u razumijevanju stručnih izraza.

Veliku zahvalnost dugujemo recenzetima prof. dr. Blaženki Bertić, akademiku Zdenku Rengelu, akademiku Rudolfu Katoriju, prof. dr. Draganu Amiću, prof. dr. Milanu Poljaku, dr. sc. Mirandi Šeput i Ivanu Gašparu, dipl. inž., lektorici Kseniji Budiji, prof., kao i tehničkom uredniku Igoru Placu, koji su, svaki u svom području, uložili veliki trud u recenziju udžbenika Ishrana bilja, jezični i pravopisni standard i grafički dizajn te doprinijeli poboljšanju trećeg izdanja udžbenika Ishrana bilja. Zahvajujemo i svim donatorima koji su pomogli tiskanje ove knjige.

Osijek, prosinac 2011. god.

Autori:

Vladimir Vukadinović
<http://tlo-i-biljka.eu>

Vesna Vukadinović
<http://pedologija.com.hr>

1. UVOD U ISHRANU BILJA

Ishrana bilja je relativno mlada znanstvena disciplina u području biotehničkih znanosti. Nastala je izdvajanjem iz agrikulturne kemije, jednako kao pedologija te hranidba životinja. Agrikulturna kemija začeta je u 19. stoljeću i napretkom prirodnih znanosti uslijedio je njen buran razvoj uz podjelu na uže discipline.

Danas je ishrana bilja u širem smislu dio fiziologije bilja jer izučava ishranu poljoprivrednih biljnih vrsta na poljoprivrednim i prirodnim staništima u odnosu na visinu i kakvoću priroda. To je vrlo pojednostavljena definicija ishrane bilja u čijem okviru se, pored fizioloških procesa i funkcija kemijskih elemenata u živoj tvari, istražuju i svi procesi fizikalne, kemijske, fiziološke i biokemijske prirode, koji u interakciji biljke i tla kao supstrata utječu na usvajanje hranjivih tvari, njihovo premještanje i raspodjelu u biljci, rast, razvitak i tvorbu prinosa, odnosno primarnu organsku produkciju. Cjelovita definicija ishrane bilja stoga bi morala pored biljno-fiziološkog aspekta obuhvatiti ekološki i agrotehnički aspekt.

Biljno-fiziološki aspekt ishrane bilja istražuje usvajanje kemijskih elemenata, sintezu organske tvari, rast i razvitak biljaka. Ekološki aspekt podrazumijeva međusobni odnos agrobiocenoza i prirodnog okoliša pa se danas javlja kao posebna znanstvena disciplina - ekofiziologija. Naglasak ekofiziologije je istraživanje utjecaja abiotičkih čimbenika fizioloških procesa koji dovode do promjena u rastu i razvoju, dakle i biološkom te poljoprivrednom prirodnom biljaka.

Agroekološki aspekt ishrane bilja je na povećanju priroda 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 i kondicionera (poboljšivača) tla te utvrđuje potrebu za gnojidbom, odnosno mjere popravke tla biološke, kemijske i fizikalne naravi.

Iz šire definicije ishrane bilja jasno je da ona graniči s više znanstvenih disciplina, a s nekima se djelomično i preklapa. Primjerice, fiziologija bilja također izučava probleme ishrane i drugih, ne samo poljoprivrednih biljaka, ali neovisno o supstratu ishrane, dok je za ishranu bilja tlo dio jedinstvenog sustava tlo-biljka-atmosfera. Ekologija se bavi prvenstveno odnosom živih organizama i prirodne sredine, dok ishrana bilja u toj međuovisnosti naglašava značaj prirodne sredine za tvorbu prinosa. Granične discipline su: a) pedologija koja izučava tlo kao prirodni supstrat biljne ishrane i bavi se procesima njegovog nastanka, fizikom, kemijom, hidrologijom, morfologijom i klasifikacijom; b) zemljišna mikrobiologija koja istražuje transformacije organske tvari tla kroz aktivnost zemljišnih mikroorganizama te c) biljna proizvodnja koja se bavi praktičnim odgovorima iz područja gnojidbe, agrotehnike i općenito njege usjeva uz poboljšanja svojstava tla kao supstrata biljne ishrane.

Racionalna, ekonomski isplativa primarna organska proizvodnja podrazumijeva primjenu gnojiva u količinama koje odgovaraju potrebama i stanju biljaka (usjeva, povrća, nasada), plodnosti tla, profitabilnosti rada i uloženi sredstava te istovremeno vodi računa o vremenskim uvjetima, okolišu i mogućem prinosu. Razumijevanje vrlo složenog i dinamičnog sustava tlo-biljka-atmosfera zahtijeva multidisciplinarni pristup jer ga određuju brojni biološki, klimatski i zemljišni čimbenici posebice jer plodnost tla, koja je njegovo agregirano i najvažnije svojstvo, nije moguće apsolutno kvantificirati. Za dobru analizu i kvantifikaciju biljne produktivnosti potreban je velik broj podataka o konkretnim agroekološkim uvjetima kako bi se što točnije utvrdila potreba u gnojidbi i popravkama tla te primijenila adekvatna agrotehnika, odnosno donijela ispravna odluka o razini ulaganja i dr.

Bez adekvatne gnojidbe nema visokih i stabilnih prinosa, potrebne kakvoće proizvoda niti profitabilnosti pa se gnojidba opravdano smatra najvažnijom agrotehničkom mjerom u primarnoj organskoj produkciji, a određivanje doze gnojiva, njegove vrste, vremena primjene i načina gnojidbe mora se temeljiti na znanstveno-stručnim spoznajama o raspoloživosti i odnosima hraniva u tlu, fiziološkim potrebama biljke, ekonomičnosti proizvodnje te intenzitetu i smjeru utjecaja pojedinog agroekološkog čimbenika. Uz to, tlo ni u kom slučaju nije nepresušan resurs i ne osigurava prirodnim procesima dovoljnu količinu hraniva za visoke prinose pa je potrebno gnojdbom vratiti iznesene ili na drugi način izgubljene hranjive elemente. Bez vraćanja elemenata ishrane u tlo, odnosno gnojidbe, tlo siromaši i prinos pada. Stoga redovite analize tla i biljaka osiguravaju temelj za precizan proračun bioraspoloživosti i bilance hraniva u tlu, potrebu u gnojidbi i popravkama tla te osiguravaju profitabilnu i ekološki prihvatljivu proizvodnju hrane.

1.1. BILJEŠKA O AUTORIMA

Vladimir Vukadinović (1948.) u trajnom je zvanju redovitog profesora Ishrane na Poljoprivrednom fakultetu u Osijeku. Cijeli životni vijek proveo je kao istraživač i sveučilišni nastavnik baveći se Ishranom bilja, naročito problemima ishrane dušikom i kalijem, kako usjeva tako i trajnih nasada, te proučavajući zemljišne resurse s aspekta produktivnosti tala, gnojidbe i faktora ograničenja proizvodnje. Vrlo rano, s pojavom informatičke tehnologije sredinom sedamdesetih godina prošlog stoljeća, svoja istraživanja i rezultate oplemenjuje kompjutorskim modelima, GIS-om i izradom računalnih programa kao pomoć u razumijevanju produktivnosti tala, izradi gnojidbenih preporuka za usjeve, povrće i trajne nasade te kao pomoć u donošenju odluka po pitanjima popravki i rajonizacije.

Značajno je istaći kako je prof. dr. Vladimir Vukadinović diplomirao u Sarajevu 1971. godine na Odsjeku za biologiju Prirodno-matematičkog fakulteta što je njegovim istraživanjima u području agronomije dalo specifičan fiziološki „štih“ u kojima je biljka sa svojim potrebama za rast, razvitak i tvorbu prinosa iznad ili jednaka po važnosti agroekološkom i agrotehničkom aspektu primarne organske produkcije.

S 40 godina staža u istraživanjima i nastavi Ishrane bilja, Fiziologije bilja, Ekofiziologije, Primjene kompjutera u poljoprivredi i Zemljišnih resursa autor je objavio više od 150 znanstvenih i stručnih članaka, nekoliko skripti i udžbenika te izradio niz kompjutorskih programa i modela kao i programa za statističku obradu rezultata istraživanja.

Vesna Vukadinović (1964.) docent je Pedologije i Vrednovanja zemljišnih resursa na Poljoprivrednom fakultetu u Osijeku. Magistrirala je 1998. godine na Agronomskom fakultetu u Zagrebu, a doktorirala 2003. na Poljoprivrednom fakultetu u Osijeku istražujući solonece istočne Hrvatske te učinkovitost njihove popravke hidrotehničkim i kemijskim mjerama.

Uži znanstveni interes doc. dr. sc. Vesne Vukadinović je utvrđivanje plodnosti različitih tipova tala, posebice onih ograničene produktivnosti uzrokovane niskom ili visokom pH reakcijom, a šire područje obuhvaća sistematiku tala, njihovu genezu, fizikalna i kemijska svojstva tla, primjenu kartografije u poljoprivredi te procjenu pogodnosti zemljišta u poljoprivrednoj proizvodnji.

1.2. POVIJEST ISHRANE BILJA

Rast biljaka kao prirodna pojava čvrsto je povezan s tvorbom organske tvari, odnosno biološkog (ukupna količina tvari) i poljoprivrednog prinosa (dio biljaka zbog kojih se uzgajaju). Potreba za hranom i osiguranje prehrane oduvijek je bio najvažniji čimbenik preživljavanja ljudske vrste pa se smatra da je neolitski čovjek prije 10.000 godina počeo kultivirati i uzgajati biljke radi prehrane. Razumljivo je da su se kroz povijest čovječanstva mnogi veliki umovi i znanstvenici bavili problemom osiguranja dovoljnih količina hrane za sve veću ljudsku populaciju. U kratkom pregledu povijesti spomenuti su samo najznačajniji istraživači i ključne postavke ishrane bilja.

Već su stari Egipćani koristili stajski gnoj i pepeo biljaka za povećanje prinosa svojih usjeva. Najstariji pokušaji objašnjenja ishrane bilja vezani su uz *Aristotela* (384.-322. pr.n.e.), starogrčkog filozofa, koji je postavio *humusnu teoriju*. Suština ove teorije je u tome da se biljke hrane humusom koji usvajaju korijenjem te nakon izumiranja iznova grade humus. *Aristotel* je smatrao da se cjelokupan svijet temelji na četiri počela: zemlji, vodi, zraku i vatru, nasuprot suvremeniku *Demokritu* (460.-360. pr.n.e.) koji je osnivač atomarne hipoteze prema kojoj je sva tvar građena iz sićušnih nedjeljivih čestica - atoma. Trebalo je 2.000 godina da se *Aristotelova* humusna teorija kritički preispita i odbaci.

Jan Baptist van Helmont (1579.-1644.), belgijski fizičar koji je bio pažljiv promatrač prirode, prvi je počeo izvoditi kvantitativne pokuse (biometrijska mjerenja) u ishrani bilja. U posudu koja je sadržavala 90,72 kg suhog tla zasadio je mladicu vrbe tešku 2,27 kg i zalijevao je samo vodom. Nakon tri godine vrba je težila 76,7 kg dok je težina tla bila neznatno umanjena (89,8 kg) pa je *van Helmont* pogrešno zaključio kako je za rast biljaka potrebna samo voda. Već tada se javljaju skeptici koji sumnjaju u prethodno navedene teorije i tragaju za drugim tvarima rasta. *John Woodward* (1665.-1728.), profesor medicine u Londonu, je tražio elemente biljne ishrane u atmosferi i tvarima koje voda otapa u tlu. Njegovi pokusi pokazali su da biljke brže rastu ako voda sadrži otopljene čvrste tvari u odnosu na porast biljaka u destiliranoj vodi. Engleski istraživač *Stephen Hales* (1677.-1761.) je uveo modernu eksperimentalnu tehniku s ponavljanjima tretmana u izučavanju usvajanja i izdvajanja vode transpiracijom i ispitivanju značaja zraka za rast biljaka. *Halesa* stoga mnogi smatraju ocem biljne fiziologije, iako je on također vjerovao u tada vladajuću *flogistonsku teoriju* (*Johann Joachim Beker*, 1667.) po kojoj kod izgaranja organske tvari nestane hipotetski element *flogiston*, a zaostaje samo pepeo.

Sljedeće razdoblje istraživanja u ishrani bilja vezano je za otkriće plinovitih elemenata. *Joseph Priestley* (1733.-1804.) utvrđuje kako biljke iz zraka usvajaju CO₂ (1775.), što predstavlja prvi korak u otkriću procesa fotosinteze. *Jan Ingenhousz* (1730.-1799.), nizozemski fizičar, otkriva da biljke samo na svjetlu

izdvajaju kisik (1779.). Također, on je prvi utvrdio kako je količina kisika koje biljke otpuštaju na svjetlu veća od količina ugljikovog dioksida koje ispuštaju u mraku, što jasno ukazuje kako je jedan dio mase biljaka podrijetlom iz zraka, a drugi iz tla. Konačno, 1782. godine *Jean Senebier* (1742.-1809.), švicarski svećenik, shvaća pravo značenje asimilacije ugljika kao redukcije CO₂ pomoću svjetlosti. Otkrića *Lavoisiera* (1743.-1794.) o nepromjenjivosti kemijskih elemenata koji sudjeluju u kemijskoj reakciji konačno ruše *flogistonsku teoriju* i omogućuju *Nicolas-Théodore de Saussureu* (1767.-1845.) da u djelu "*Récherches chimiques sur la Végétation*" (Kemijsko istraživanje vegetacije) objavljenom 1804. godine izloži kvantitativno objašnjenje fotosinteze. Od tada je jasno kako biljke zahtijevaju iz zraka CO₂, vodu iz tla ili atmosfere i očividno još neke elemente iz tla koji zaostanu u pepelu nakon spaljivanja suhe tvari biljke.

Nova shvaćanja sporo su privlačila pozornost kako znanstvenih krugova, tako i poljoprivredne proizvodnje. Naime, to je vrijeme kada prevladava mišljenje *Thaera* (*Albrecht Daniel Thaer*, 1752.-1828.) kako su humus i voda temelj ishrane bilja, dok su soli u najboljem slučaju sporedna hraniva. Otuda *Jöns Jacob Berzelius*, otac kemijske notacije spojeva, još 1838. godine, smatra da ugljik biljaka potječe iz humusa i usvaja se korijenom.

Slijedi razdoblje utemeljenja *agrikulturne kemije* sa sve širim prihvaćanjem *mineralne teorije* nasuprot napuštene *humusne*. Tri su istraživača posebice zaslužna za napredak u razumijevanju ishrane bilja: Francuz *Jean-Baptiste Boussingault* (1802.-1887.) i Nijemci *Carl Sprengel* (1787.-1859.) te *Justus von Liebig* (1803.-1873.). *Boussingault* na temelju mnogobrojnih poljskih gnojidbenih pokusa zaključuje kako dušiku pripada prvo mjesto u povećanju prinosa, ali još uvijek misli da ga biljke usvajaju iz atmosfere (kao i ugljik). *Sprengel* je između 1825. i 1835. godine, kao docent agrikulturne kemije u Göttingenu i Braunschweigu, otkrio i prvi formulirao "*zakon minimuma*" u agrikulturnoj kemiji tvrdeći kako je rast biljaka ograničen najmanje raspoloživim hranivom. Ovo pravilo često se pogrešno pripisuje *Justusu von Liebigu*.

Istraživanja *Boussingaulta* i *Sprengela* omogućila su *Justusu von Liebigu* da svojim istraživanjima u razdoblju od 1835. do 1840. konačno opovrgne *Thaerovu humusnu teoriju* u svojoj knjizi "*Organska kemija i njena primjena u agrokemiji i fiziologiji*" (1840.). Osnovne postavke *Liebigove mineralne teorije* ishrane bilja mogu se sažeti u nekoliko činjenica:

- mineralne tvari u biljci su nužan, a ne slučajan sastojak,
- biljke za život zahtijevaju 10 elemenata: C, O, H, N, P, S, K, Ca, Mg i Fe od kojih C, O i H potječu iz zraka,
- biljne vrste zahtijevaju različitu količinu hraniva,
- nedostatak hraniva u tlu može se nadoknaditi gnojidbom i
- humus nije neophodan za život biljaka, ali je kao izvor hranjivih elemenata vrlo značajan.

Liebigova istraživanja imala su snažan utjecaj na razvoj ishrane bilja, ali i pored neospornih zasluga, neke njegove postavke nisu bile točne. Naime, *Justus von Liebig* je smatrao da biljke koriste samo mineralne tvari u ishrani pa sukladno tome, humusu nije pridavao veliki značaj. Dapače, poricao je značaj stajnjaka u opskrbi biljaka dušikom kao i značaj leguminoza u obogaćivanju tla vezivanjem atmosferskog dušika. To je dalo jak poticaj primjeni mineralnih gnojiva, a i *Liebig* ih je za vlastite potrebe proizvodio i primjenjivao, ali bez veće učinkovitosti. Njegova istraživanja ovisnosti prinosa o sadržaju hraniva u tlu rezultirala su *zakonom minimuma*, koji je *Liebig* slikovito predstavljao bačvom različite visine dužica, a visina prinosa ograničena je elementom u najmanjoj količini.

U razdoblju između 1840. i 1900. godine ishrana bilja izdvaja se iz agrikulturne kemije kao samostalna znanstvena disciplina. Niz istraživača u nadziranim uvjetima *pješčane* (*Wiegmann, Polstorff* i dr.) i *vodene kulture* (*Knop, Sachs* i dr.) u potpunosti oblikuju *teoriju mineralne ishrane bilja*. Nadzirani uvjeti uzgoja biljaka omogućili su razjašnjavanje potrebe biljaka za biogenim elementima i njihovu fiziološku funkciju. U tom razdoblju koriste se sve savršenije analitičke metode u ispitivanju hraniva u tlu pa *John Thomas Way* 1850. godine otkriva adsorpcijska svojstva tla i sposobnost tla da spriječi ispiranje hraniva. To omogućuje primjenu vodotopljivih mineralnih gnojiva i povećava učinkovitost gnojiva na porast prinosa uzgajanih biljaka. Istovremeno, istraživanja u mikrobiologiji (*Pasteur, Winogradski, Hellriegel, Willfahrt, Schlösing, Müntz* i dr.) rasvijetljavaju ulogu mikroorganizama u procesu mineralizacije organske tvari i kruženju elemenata u prirodi.

Otkriće biogenosti dušika pripisuje se *de Saussureu* i *Boussingaulu* (1804.), fosfora *Liebigu* (1839.), kalija i sumpora *Birneru* i *Lucanusu* (1866.), kalcija *Stohmmanu* (1862.), magnezija *Boehmu* (1875.) i željeza *Grisu* (1843). Nakon 1920. godine istraživačke metode su sve suptilnije pa se otkrivaju novi biogeni elementi: Mn (1922.), Cu (1925.), B (1926.), Zn (1926.), Mo (1939.), Cl (1954.) i Ni (1987.). Oni dobivaju naziv *mikroelementi* jer ih biljke sadrže u maloj količini. Postaje jasno da biljke mogu usvajati i niskomolekularne organske tvari što otvara mogućnost primjene različitih kemijskih preparata (stimulatora, inhibitora, sredstava za zaštitu itd.) u biljnoj proizvodnji. Stupanj kemizacije ubrzo je narastao do te mjere da danas predstavlja stvarnu opasnost zbog onečišćavanja prirodne sredine i samih poljoprivrednih proizvoda.

Rezultati suvremenih otkrića i osnovnih postavki ishrane bilja razmatraju se opširno u daljnjem tekstu. Također, udžbenik *Ishrana bilja* sadrži niz primjera, proračuna i objašnjenja iz aplikativne ishrane bilja, posebice Vrednovanja zemljišnih resursa i Fertilizacije. Stoga se detaljno obrazlaže procjena pogodnosti zemljišta za određene poljoprivredne namjene (uzgoj usjeva, trajnih nasada i dr.), utvrđivanje potreba za gnojibdom, popravkama zemljišta, kemijskoj analizi tla i biljaka i dr.

2. ELEMENTI BILJNE ISHRANE

Svijet (Svemir) izgrađen je iz tvari i energije. Biljke za život koriste svemirsku energiju u obliku Sunčeve radijacije pomoću koje transformiraju neorgansku (neživu) tvar u organsku (živu) potrebnu svim živim bićima na Zemlji. Taj proces *primarne organske produkcije*, osim *organogenih elemenata* (C, O i H), zahtijeva i više *mineralnih elemenata*. *Elemente biljne ishrane*, organske i mineralne, potrebne za proces primarne organske produkcije nazivamo *neophodna 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 i molekule kao K⁺, NO₃⁻ itd. Dakle, biljna hraniva su elementi ishrane, odnosno 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. Veliki broj različitih hraniva, njihova uloga u rastu i razvitku biljaka, odnosno tvorbi organske tvari (biološkog i poljoprivrednog prinosa) te specifična i složena funkcija uz različiti značaj, opravdava podjelu biljnih hraniva na grupe, ali samo za potrebe ishrane bilja i to u razmatranju utjecaja na povećanje prinosa.

2.1. PODJELA HRANJIVIH TVARI

Mineralna hraniva biljke usvajaju u mineralnom obliku i ona pretežito potječu iz minerala tla, a to su anorganski ioni, soli ili molekule. Ova grupa biljnih hraniva obuhvaća i mineralne oblike dušika (NO₃⁻ i NH₄⁺) u kojima se on pretežito i usvaja, premda potječu iz organskih spojeva koji se *mikrobiološkom razgradnjom* i *mineralizacijom organske tvari* transformiraju do mineralnih oblika.

Organska hraniva se pretežito usvajaju jednako kao i mineralna u ionskom obliku, a to mogu biti i molekule čija molarna masa, prema dosadašnjim saznanjima, ne prelazi 1.000 g mol⁻¹ (1 kilodalton, 1 kDa = 1,6605387313 yg).

Usvajanje hraniva iz tla je vrlo učinkovit proces koji podržava velika površina korijena biljaka i njegova sposobnost apsorpcije elemenata ishrane pri njihovoj vrlo niskoj koncentraciji u vodenoj otopini tla. *Bioraspoloživost hraniva* potpomaže i niz živih organizama (bakterije, gljive, mezofauna i dr.) budući da korijenov sustav biljaka i tlo, koje on prožima, čine jedinstven sustav (*rizosferu*) s jakim uzajamnim utjecajem.

jer je za život viših biljaka svaki od navedenih 17 elemenata neophodan. Prisutnost makroelemenata najčešće je veća od 0,1 % dok mikroelementi čine tek 10^{-1} do 10^{-4} postotaka izraženo na suhu tvar biljke (ultramikroelemenata ima manje od $10^{-4}\%$). Niže biljke (*tallophyta*, s malim odstupanjima) imaju jednake zahtjeve za elementima ishrane kao i više biljke pa to ukazuje na male biokemijske promjene žive tvari tijekom filogeneze, nasuprot znatnoj morfološkoj evoluciji biljne građe.

Unutar grupe makroelemenata često se izdvajaju organogeni (nemineralni) elementi (C, O i H) koji grade više od 90 % žive tvari. U klasifikaciji organogenih elemenata obično se izostavljaju dušik, fosfor i sumpor, premda su oni obvezatni konstituenti organske tvari, ali u znatno manjim količinama prema ugljiku, kisiku i vodik, a biljke ih pretežito usvajaju u mineralnom obliku.

2.2. PRAVILA ZA UTVRĐIVANJE NEOPHODNOSTI ELEMENATA BILJNE ISHRANE

Korisni ili beneficiani elementi pod optimalnim uvjetima rasta biljaka nemaju fiziološku ulogu, ali utjecaj im je povoljniji što su uvjeti rasta lošiji. Oni mogu u nekim slučajevima zamijeniti djelomično (i samo nespecifično) funkciju nekih neophodnih elemenata. Preostali elementi, a biljke ih mogu sadržavati 60-ak, svrstavaju se u *nekorisne* ili toksične, ovisno o utjecaju na rast i razvitak biljaka. Daljnjim razvitkom i usavršavanjem metoda istraživanja moguće je u skoroj budućnosti i utvrđivanje fiziološke funkcije nekih od nekorisnih ili čak toksičnih elemenata. Danas je općeprihvaćeno da se neophodnost kemijskih elemenata za život biljaka utvrđuje prema pravilima *Arnona* i *Stouta* (1939.):

- element mora biti potreban tijekom cijelog životnog ciklusa biljaka,
- mora imati posebnu funkciju koju ne može obavljati drugi element i
- mora imati neposrednu ulogu u biljnom metabolizmu, odnosno mora biti potreban za obavljanje specifične fiziološke funkcije.

Naknadno su *Arnon* i *Stout* dodali i četvrto pravilo:

- element mora biti potreban za više od dvije biljne vrste da bi se smatrao neophodnim.

Mineralni elementi ishrane mogu se podijeliti i prema njihovim kemijskim svojstvima:

1. nemetali (nekovine) (N, P, S, Cl i B) i
2. metali (kovine)
 - K (alkalijski metali)

- Ca i Mg (zemnoalkalijski metali)
- Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, Ni (teški metali čija je gustoća $\rho > 5 \text{ kg dm}^{-3}$)

Česta je i podjela elemenata biljne ishrane kako to prikazuje tablica 2.1.

Tablica 2.1. Podjela hranjivih elemenata (Dennis, 1971.)

Organski	Glavni	Sekundarni	Mikro	Funkcionalni
C	N	Mg	B, Mn	Na, Si
O	P	Ca	Cu, Mo	V, Cl
H	K	S	Fe, Zn	Co

Biogene elemente možemo podijeliti i prema njihovoj ulozi u metabolizmu tvari i energije:

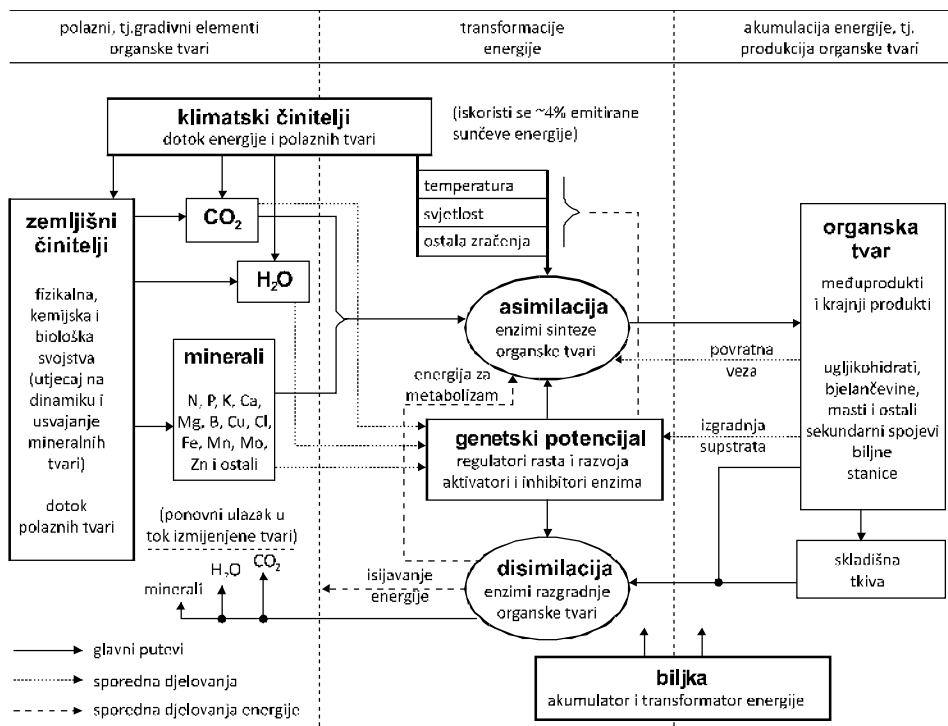
Strukturni elementi ili konstitucijski (C, H, O, N, P, S) su molekularne komponente, npr. ugljikohidrata, proteina, nukleinskih kiselina, različitih sekundarnih spojeva kao što su alkaloidi, lignin i dr. To su elementi male atomske mase (prva dva reda periodnog sustava), a kemijski se vežu stabilnim, kovalentnim vezama.

Enzimski aktivatori (K, Ca, Mg, Mn, Zn) obavljaju svoje funkcije kao ioni i, premda su često nejasni mehanizmi aktivacije enzima, nema sumnje o njihovoj važnosti.

Redoks-reagensi (Fe, Cu, Mn, Mo) funkcioniraju kao ioni, a odlikuje ih mogućnost lake promjene valentnosti što im omogućava sudjelovanje u redoks reakcijama (npr. citokromne reakcije u disanju: $\text{Fe}^{3+} + e^- \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$, Cu kao Cu^{2+} ili Cu^+ , Mn je aktivator fotooksidacije vode u fotosintezi (P680): $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{H}^+ + 4 e^- + \text{O}_2$, a Mo je dio enzima nitrat reduktaze odgovornog za redukciju nitrata u nitrite).

Nedovoljno poznatih funkcija (B, Cl). Premda je B neophodan za vaskularne biljke te je njegovo djelovanje primjetno u velikom broju procesa (uključujući staničnu diobu, membranski transport i rast korijena), to mogu biti tek sekundarni učinci. Klor (u obliku iona Cl^-) biljke akumuliraju u velikim količinama i njegova nespecifična uloga u osmotskim funkcijama je jasna (ali može biti zamijenjena drugim ionima). Ipak, klor ima jednu vrlo specifičnu funkciju u izdavanju kisika kod fotooksidacije vode u fotosintezi.

Rast biljaka i tvorba prinosa najuže su povezani s usvajanjem mineralnih elemenata biljne ishrane, njihovim premještanjem i raspodjelom u biljci te ugradnjom u organsku tvar, ali i inim vanjskim (zemljišnim, klimatskim) i unutarnjim (biljnim) čimbenicima rasta i razvitka bilja. Složeni utjecaj vanjskih i unutarnjih čimbenika rasta biljaka i tvorbe prinosa može se shematski prikazati slikom 2.2., a podjelu elemenata biljne ishrane prema njihovoj fiziološkoj funkciji prikazuje tablica 2.2.



Slika 2.2. Shema utjecaja vanjskih i unutarnjih čimbenika rasta i tvorbe prinosa

Tablica 2.2. Osnovne fiziološke funkcije biljnih hraniva

Element ishrane	Rel. konc. prema N	Oblik usvajanja	Fiziološke funkcije elemenata biljne ishrane
Grupa 1. Elementi koji čine organske spojeve biljaka			
N	100	NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-	Konstituent aminokiselina, amida, proteina, nukleinskih kiselina, nukleotida, koenzima.
S	3	SO_4^{2-} , SO_3^{2-}	Komponenta cisteina, cistina i metionina, lipoične kiseline, koenzima A, tiamina, pirofosfata, glutationa, biotina, ATP.
Grupa 2. Elementi važni za akumulaciju energije i strukturni integritet biljaka			
P	6	$H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}	Konstituent fosfata šećera, nukleinskih kiselina, nukleotida, koenzima, fosfolipida, fitinske kiseline, itd. Ključna uloga u reakcijama ATP-a.
B	0,2	BO_3^{3-} , $B_4O_7^{2-}$, H_3BO_3	Kompleksi s manitolom, mananima, poliuronskim kiselinama i drugim komponentama staničnih zidova. Uključen u elongaciju stanica i metabolizam RNA.
Si		$Si(OH)_4$	Ugrađen kao amorfni silicij u zidovima stanica. Doprinosi boljim mehaničkim svojstvima stanične stijenke, uključujući njihovu krutost i elastičnost.
Grupa 3. Elementi koji ostaju u obliku iona			

K	25	K ⁺	Potreban kao kofaktor (modulator) za više od 40 enzima. Glavni kation u uspostavljanju i održavanju turgora stanica te elektroneutralnosti protoplazme.
Na		Na ⁺	Uključen u regeneraciji fosfoenolpiruvata kod biljaka s C4 i CAM tipom fotosinteze. Zamjena za kalij u nekim funkcijama.
Mg	8	Mg ²⁺	Potreban za djelovanje velikog broja enzima uključenih u prijenos fosfata. Sastavni dio klorofila.
Ca	12,5	Ca ²⁺	Sastavni dio srednje lamele staničnih zidova, kofaktor enzima uključenih u hidrolizu ATP-a i fosfolipida. Funkcija "drugog glasnika" regulacije metabolizma.
Mn	0,1	Mn ²⁺	Potreban za aktivnost dehidrogenaza, dekarboksilaza, kinaza, oksidaza i peroksidaze. Aktivira i mnoge enzime i fotosintetsko izdvajanje O ₂ .
Cl	0,3	Cl ⁻	Neophodan u fotooksidaciji vode (fotosintetsko izdvajanje O ₂).
Grupa 4. Elementi uključeni u transfer elektrona			
Fe	0,2	Fe ²⁺ , Fe ³⁺	Sastavni dio citokroma i proteina s neheminskim željezom uključenih u fotosintezu, N ₂ fiksacija i disanje.
Cu	0,01	Cu ²⁺	Komponenta oksidaze askorbinske kiseline, tirozinaze, monoamin oksidaza, uratne oksidaze (urikaze), citokrom oksidaza, fenolaza, lakaze i plastocijanina.
Zn	0,03	Zn ²⁺ , Zn(OH) ⁺	Sastavni dio alkoholne dehidrogenaze, glutaminske dehidrogenaze, karboanhidraze itd.
Mo	0,0001	MoO ₄ ²⁻	Konstituent nitrogenaze, nitratne reduktaze i dehidrogenaze ksantina.
Ni		Ni ²⁺	Sastavni dio ureaze, a kod N ₂ fiksirajućih bakterija i hidrogenaza.
<i>Evans and Sorger (1966.), Mengel and Kirkby (1987.)</i>			

3. TLO KAO SUPSTRAT BILJNE ISHRANE

"Tla Hrvatske najveće su blago hrvatskog naroda, poznavati ih znači poznavati temelje na kojima počiva hrvatska država" (prof. dr. M. Gračanin). Fortescue (1913.) nadahnuo je rekao: „Zemlja je mjesto koje pruža sklonište u gradu, na selu i kod kuće. Ona je izvor hrane, materijala za gradnju i proizvodnju iz ugljena, plina i nafte, iz izvora i rijeka te drugih najosnovnijih životnih potreba. Ona je nepromjenjiva za sve ljudske aktivnosti. Kuće i tvornice, šume i farme, rijeke, putovi i željeznice, rudnici i rezervoari su oblici zemlje. Oni nude beskrajne mogućnosti za razvoj i otkrivanje. Ona je osnovni izvor bogatstva."

Tlo je najveći i najznačajniji prirodni resurs čovječanstva. Nažalost, pretjeranim ili neodgovornim korištenjem tla dolazi do snižavanja njegove produktivnosti i konačno degradacije. Proces upropaštavanja tla je gotovo uvijek jednosmjernan, bez realne mogućnosti vraćanja u prethodno stanje. U procesu degradacije tla promjene su prividno male, barem u životu jedne ljudske generacije, što smanjuje potrebnu pozornost i odlaže pravovremeno poduzimanje mjera za zaustavljanje destruktivnih procesa. Stoga, briga o zemljišnim resursima, njegovim prirodnim bogatstvima i biološkoj raznolikosti sve više zaokuplja širi krug populacije, a ne samo one koji se bave poljoprivredom te sve više postaje odgovornost cjelokupne društvene zajednice. Naime, globalne promjene okoliša nepovratno mijenjaju ekosferu ili ekosustav (Zemlje, odnosno geobiosfere) te utječu na život velikog dijela svjetskog stanovništva, a mogu biti prirodne i antropogene pa je ekološko opterećenje okoliša zapravo jednako: broj stanovnika × tehnologija × životni standard.

3.1. SASTAV TLA

Tlo je polifazni sustav građen iz čvrste, tekuće, plinovite i žive faze. Neprestano se mijenja u prirodnim ciklusima (npr. kisika, vode, minerala, hranjivih tvari i dr.) održavajući povoljnu strukturu i oslobađajući hranjive elemente neophodne za život u i na tlu.

Omjer pojedinih frakcija mehaničkih elemenata tla kreće se u određenim granicama u kojima tlo predstavlja povoljan supstrat biljne ishrane. Čvrsta faza sastavljena iz mineralnog i organskog dijela, podjednake je važnosti s gledišta ishrane bilja. Taj gornji, rastresiti dio Zemljine kore, koji je nastao raspadanjem litosfere pod utjecajem klimatskih čimbenika i djelovanjem živih organizama,

transformiran je u prirodno biljno stanište, supstrat iz koga biljke korijenovim sustavom usvajaju sve neophodne mineralne tvari za svoj rast i razvitak.

Tablica 3.1. Elementarni sastav litosfere (*Epstein, 1972.*)

Element	%
O	46,60
Si	27,72
Al	8,13
Fe	5,00
Ca	3,63
Na	2,83
K	2,59
Mg	2,09
Ukupno	98,59

Elementarni sastav Zemljine kore čini više od 2.000 različitih minerala (*litosfera* od grčki lithos = stijena; sphaira = sfera) izgrađenih od ~ 90 kemijskih elemenata od kojih su 81 stabilni nuklidi, pri čemu njih 8 gradi više od 98 % litosfere (tablica 3.1.). Kako je *ekosustav* po definiciji skup biotskih i abiotskih elemenata i procesa koji imaju utjecaja na ponašanje i cjelokupan život u definiranom prirodnom okruženju, onda je *agrosustav* ograničen na poljoprivredni prostor, a u širem

smislu *agrosfera* (*mega agroekosustav*) kao dio *biosfere* u tijesnoj je vezi s litosferom i procesima koji formiraju tlo i određuju njegova svojstva kao supstrata biljne ishrane.

Sastav oraničnog sloja u kojem se nalazi najveći dio korijenovog sustava biljaka u povoljnom stanju vlažnosti približno je slijedeći:

1) Čvrsta faza - 50 % zapremine

A) Neorganski dio - 95 % mase:

80 % primarni minerali

20 % sekundarni minerali

B) Organski dio - 5 % mase: pretežito koloidi

2) Tekuća faza - 25 % zapremine:

Vodena otopina soli i plinova (100-1.000 ppm)

3) Plinovita faza - 25 % zapremine:

O₂ 20,0 % (21,0 %)

N₂ 78,6 % (78,03 %)

Ar 0,9 % (0,94 %)

CO₂ 0,5 (0,03 %)

(u zagradama je sastav atmosfere)

4) Živa faza (*edaphon*) - ukupno oko 5 t ha⁻¹:

Bakterije i aktinomicete (40 %),

Gljive (40 %), makrofauna (5 %),

Mikro i mezofauna (3 %) i

Crvi (12 %).

Čvrsta faza tla sastavljena je iz *primarnih* i *sekundarnih minerala*, *oksida silicija*, *seskvioksida* te drugih kemijskih supstanci i organske tvari. Smatra se da je optimalan sastav čvrste faze tla 93 % minerala i 7 % organskih tvari (85 % humus, 10 % korijenje i 5 % *edafon*) što je rijetko u proizvodnji usjeva, dok vrtna tla mogu sadržavati i više organske tvari. Dakle, za različite agroekološke uvjete i način biljne proizvodnje idealan sastav može znatno varirati, a često je mišljenje kako su teksturno najpovoljnija ilovasta tla koja sadrže oko 40 % pijeska, 40 % praha i 20 % gline.

Minerali tla su primarni i sekundarni (1. silikati, odnosno glina, 2. oksidi i hidroksidi i 3. karbonati, sulfati, fosfati itd.).

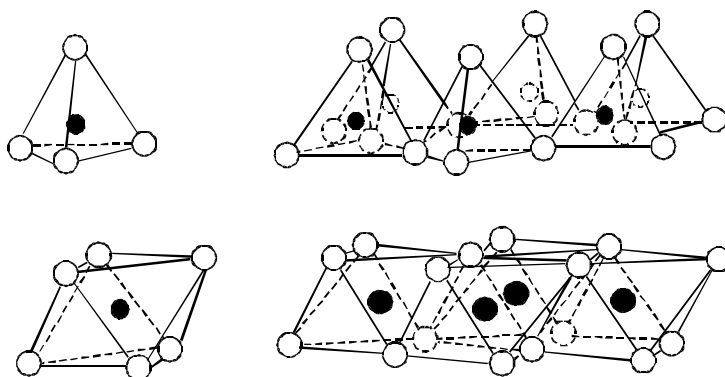
Tablica 3.2. Koncentracija nekih elemenata u tlu i matičnom supstratu (*Sparks*, 2003.)

Element	Tlo (mg kg ⁻¹)		Litosfera (prosjeak, mg kg ⁻¹)	Sedimenti (prosjeak, mg kg ⁻¹)
	Medijana	Rang		
O	490.000	-	474.000	486.000
Si	330.000	250.000-410.000	277.000	245.000
Al	71.000	10.000-300.000	82.000	72.000
Fe	40.000	2.000-550.000	41.000	41.000
C (total)	20.000	7.000-500.000	480	29.400
Ca	15.000	700-500.000	41.000	66.000
Mg	5.000	400-9.000	23.000	14.000
K	14.000	80-37.000	21.000	20.000
Na	5.000	150-25.000	23.000	5.700
Mn	1.000	20-10.000	950	770
Zn	90	1-900	75	95
Mo	1,2	0,1-40	1,5	2
Ni	50	2-750	80	52
Cu	30	2-250	50	33
N	2.000	200-5.000	25	470
P	800	35-5.300	1.000	670
S (total)	700	30-1.600	260	2.200

Primarni minerali se u *mehaničkoj analizi* tla definiraju kao *pijesak* i *prah*. Površina im je relativno mala i stoga im je sorpcijska sposobnost elemenata ishrane zanemariva. Njihovim raspadanjem oslobađaju se biljna hraniva koja tako postaju raspoloživa za ishranu biljaka. Proces raspadanja primarnih minerala je vrlo spor i u kraćem vremenskom (vegetacijskom) razdoblju ne predstavlja značajan izvor elemenata ishrane. Prosječan kemijski sastav tla i matične stijene (prosjeak litosfere) pokazuje tablica 3.2.

Stabilnost primarnih minerala prema raspadanju je različita. Najstabilniji je *kremen*, a najmanje su otporni *plagioklasi* bogati kalcijem. Prisutnost divalentnog željeza smanjuje stabilnost minerala jer mu se oksidacijom povećava promjer i tako razmiče kristalna rešetka minerala. Tvrdoća minerala može biti utvrđena na više načina, najčešće u odnosu na objekt poznate tvrdoće prema skali austrijskog mineraloga *Mohsa* (*Friedrich Mohs*, 1820.). Prema *Mohsovoj skali* najmekši je talk (1), a najtvrdi mineral dijamant (10), dok je gips tvrdoće 2, kalcit 3, fluorit 4, apatit 5, feldspat 6, kremen 7, topaz 8 i korund 9.

Sekundarni minerali (često se koriste i sinonimi *glineni minerali*, *alumosilikati*) zajedno s organskom tvari predstavljaju aktivnu, koloidnu frakciju tla. Minerali gline čine manji dio čvrste faze tla u odnosu na količinu primarnih minerala, izuzev u nekim tlima tropskog pojasa. Imaju svojstva koloida, pretežito su negativno nabijeni, kao i organska tvar tla te su sposobni sorbirati katione. Sorpcijska sposobnost označava se kao KIK (kationski izmjenjivački kapacitet) ili CEC (*Cation Exchange Capacity*) i izražava u $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$ tla što je identično mekv/100 g tla (stariji način izražavanja).

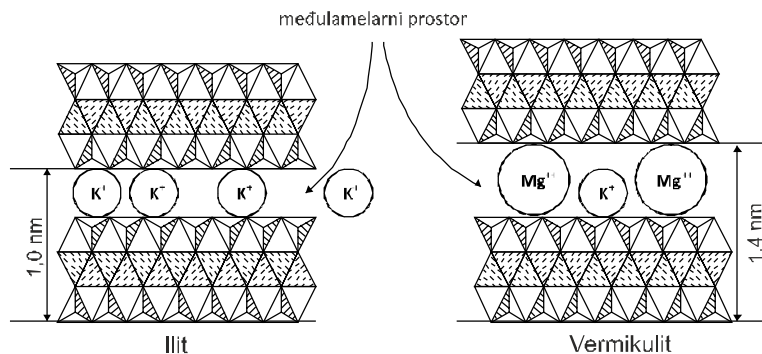


Slika 3.1. Tetraedri silicija i oktaedri aluminija minerala gline

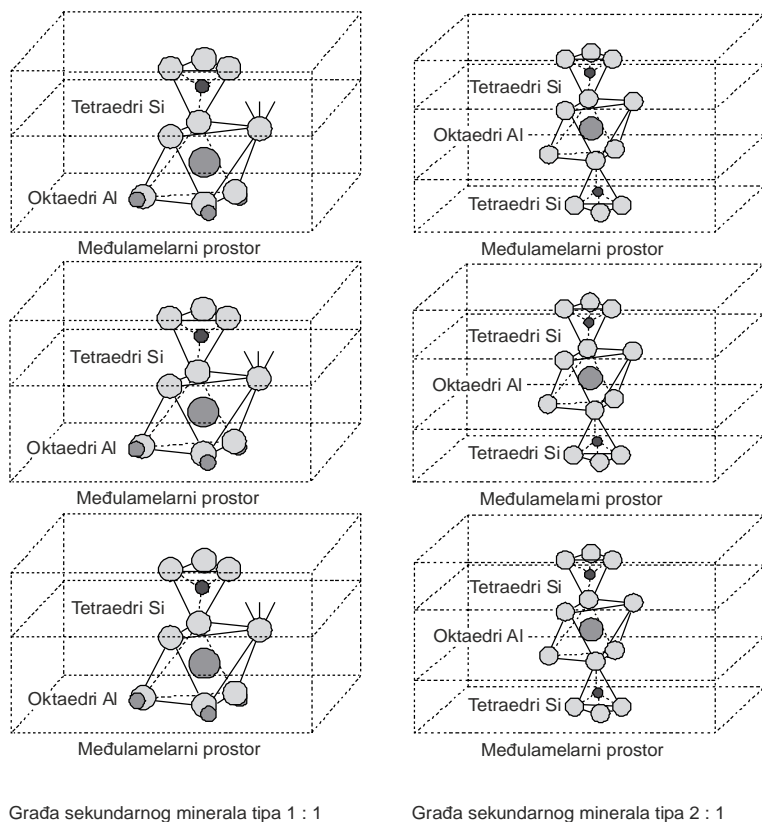
Sekundarni minerali su slojevite strukture i elektrostatskim silama vežu katione na vanjskim (nespecifično) i unutarnjim površinama (specifično, samo neke katione čiji promjer u hidratiziranom stanju dopušta ulazak u međulamelarni prostor određenog minerala). Izgrađeni su iz dvije strukturne jedinice i to tetraedara SiO₂ i oktaedara Al, Mg ili Fe (slike 3.1. i 3.2.). Zbog takve kemijske građe sekundarni minerali tla nazivaju se i alumosilikati. Različitim kombinacijama osnovnih strukturnih jedinica nastaju svi poznati sekundarni minerali ili drugim imenom minerali gline.

Na stabilnost i otpornost sekundarnih minerala prema raspadanju utječe više čimbenika: unutrašnja struktura stabilnosti (otpornost na hidrolizu kod H⁺ napada), prisutni kompleksirajući ligandi (organske kiseline, anorganski anioni), temperatura (posebice amplituda promjene), specifična površina ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ minerala) i efikasnost uklanjanja produkata raspadanja (ispiranje, taloženje). Topljivost (razlaganje) sekundarnih minerala je znatno veća od primarnih, ali je

još uvijek vrlo mala i spora, pa u smislu oslobađanja biljci pristupačnih hraniva ne predstavlja značajan izvor. Npr. konstanta topljivosti alumosilikata je $K_{top} = 10\text{-}11$ do $10\text{-}12 \text{ SiO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ i ovisi najviše o pH i temperaturi.



Slika 3.2. Kristalna rešetka i međulamelarni prostor ilita i vermikulita (Mengel and Kirkby, 1978.)



Slika 3.3. Raspored tetraedara silicija i oktaedara aluminija u sekundarnim mineralima tipa 1:1 i 2:1

Sekundarni minerali svrstani su u tri grupe:

1. kaoliniti,
2. smektiti (*montmoriloniti*) i
3. iliti ili *hidratizirani liskuni*.

Tablica 3.3. Osnovna svojstva sekundarnih minerala tla

Koloid	Promjer (mm)	Površina m ² g ⁻¹		Međurazmak slojeva (nm)	KIK cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹
		vanjska	unutarnja		
Kaoliniti	0,1-5,0	5-20	-	0,7	3-15
iliti	0,1-2,0	50-100	5-100	1,0	20-50
Vermikuliti	0,1- 5,0	50-100	450-600	1,0-1,4	120-150
Montmorilonit	< 1,0	70-150	500-700	1,0-2,0	80-120
Humus	-	-	-	-	100-300

Kaoliniti (*dikit, nakrit*) su građeni iz jednog sloja tetraedara silicija i jednog sloja oktaedara aluminija međusobno čvrsto povezanih kisikom tako da se ne mogu razmicati. Zbog omjera strukturnih jedinica svrstavaju se u grupu minerala 1:1, a kemijska formula im je $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$. Električni naboj raspoređen je samo po površini takvog tipa minerala jer je međulamelarni prostor razmaka oko 0,7 nm uz ponavljajuću distancu slojeva (*c-razmak*) također 0,7 nm. Sposobnost adsorpcije kaolinita je mala (3-15 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹), a njegova specifična površina iznosi svega 5-20 m² g⁻¹.

Montmoriloniti (Smektiti) (*pirofililit, talk, vermikulit, saukonit, saponit, nontronit* i dr.) su građeni iz dva sloja tetraedara silicija između kojih je umetnut jedan sloj oktaedara aluminija pa se ubrajaju u tip sekundarnih minerala 2:1. Mogu biti dioktaedarske građe, npr. *montmorilonit* i *beidelit* ($\sim \text{Na}_4(\text{Al}_{2-x}\text{Mg}_x)\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) ili trioktaedarske kao *saponit* ($\sim \text{Na}_{4-y}(\text{Mg}_{3-y}\text{Al}_y)\text{Al}_x\text{Si}_{4-x}\text{O}_{10}(\text{OH})$). Jedan dio silicija često je zamijenjen fosforom ili aluminijem, a dio aluminija s Mg, Fe, Ni ili Li. Ovakva građa montmorilonita daje višak negativnog naboja koji se uravnotežuje vezivanjem kationa iz otopine tla (kapacitet sorpcije je 80-120 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹). Velika sposobnost sorpcije kationa smektitima uvjetovana je većim razmakom između strukturnih jedinica kristalne rešetke prema kaolinitima (u vlažnom stanju *c-razmak* > 2 nm), što omogućuje sorpciju iona u međulamelarnim prostorima. Udaljenost slojeva mijenja se ovisno o vlažnosti tla, odnosno sadržaju vode između njih, što se očituje kao bubrenje ili sakupljanje. Specifična ili sorpcijska površina smektita (vanjska i unutarnja) je 700-800 m² g⁻¹.

Slični smektitima su vermikuliti i kloriti, uz bitnu razliku da vermikuliti znatno manje bubre u vodi (*c-razmak* oba je oko 1,4 nm) što im omogućuje fiksaciju iona K⁺.

Vermikuliti (*hidratizirani biotiti* ili *flogopiti*) mogu biti *dioktaedarske* ($\text{Na}_4(\text{Al,Fe})_2(\text{Al}_x\text{Si}_{4-x})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \times 4 \text{H}_2\text{O}$) ili *trioktaedarske* građe ($\text{Na}_x(\text{Mg,Fe})_2(\text{Al}_x\text{Si}_4$

$\times O_{10}(OH)_2 \times 4 H_2O$), dio Al^{3+} može biti zamijenjen s Mg^{2+} (što povećava negativan naboj) i imaju veliku moć sorpcije $120-150 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ uz specifičnu površinu od $300-500 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. Kod *klorita* (*amezit*, *klinoklorit*, *hamozit*, *penatit* i dr.) c-razmak je stabilan i neovisan o vlažnosti (ne bubre) jer imaju kristalnu strukturu 2:1:1 (nazivaju se još i sekundarni minerali kristalne građe 2:2), odnosno između slojeva tetraedara i oktaedara aluminijski ubačen je hidroksidni sloj koji ne dopušta razmicanje kristalne strukture, odnosno bubrenje.

Iiliti (*hidratizirani muskovit*) su građom slični montmorilonitima, ali im je dio silicija zamijenjen aluminijem, kemijske formule $(K,H)Al_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \times H_2O$. Nastaju raspadom minerala muskovita. Višak naboja se neutralizira vezivanjem kalija između slojeva kristalne rešetke pa se oni ne mogu znatnije razmicati (c-razmak je oko 1,0 nm). Stoga je sposobnost sorpcije ilita znatno manja prema montmorilonitima i vermikulitima ($20-50 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$) uz izraženu sposobnost fiksacije kalija.

Nastanak sekundarnih minerala je izrazito spor proces. Proračuni pokazuju da godišnje u prosjeku nastane 0,0002 g gline na svakih 100 g tla. Količina gline u oraničnom sloju tla može se smanjivati erozijom i ispiranjem pa se kod obrade takvih tala moraju provoditi odgovarajuće mjere zaštite i konzervacije. Postojanost sekundarnih minerala je znatno manja u odnosu na primarne pa u starijim tlima prevladavaju sekundarni minerali, ali sa sniženim sorpcijskim sposobnostima za katione i porastom kapaciteta za zamjenu aniona (što ima značaja kod primjene mineralnih gnojiva, pretežito u tropskim regijama). Na stabilnost i otpornost sekundarnih minerala prema raspadanju utječe:

- unutarnja struktura (otpornost na hidrolizu kod H^+ napada),
- prisutni *kompleksirajući ligandi* (organske kiseline, anorganski anioni),
- temperatura (posebice amplituda promjene),
- specifična površina ($\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$ minerala) i
- efikasnost uklanjanja produkata raspadanja (ispiranje, taloženje).

Električni naboj česticama gline omogućuje međusobno vezivanje i nastajanje prostornih struktura (slično proteinima). Predstavu o veličini tako nastale površine daje sljedeći podatak: tlo s 10 % montmorilonita na 1 m^2 površine do dubine od 20 cm ima površinu veću od 24 km^2 . Električno polje koloidnih čestica tla dozvoljava sorpciju drugih nabijenih čestica, kao što su unipolarni ioni i bipolarne molekule, na primjer voda. Otuda se koloidne čestice tla ponašaju kao *amfoterne jedinice* jer pod određenim uvjetima mogu sorbirati i anione.

Kationi, polarno vezani na sekundarne minerale, ne ispiru se iz zone korijenskog sustava, ali se zato lako zamjenjuju drugim kationima. Na taj se način u tlu zadržavaju hraniva u biljkama pristupačnom obliku za usvajanje. Svojstvo sorpcije iona sekundarnih minerala tla ima ogromnu važnost u mineralnoj ishrani bilja jer sekundarni minerali (zajedno s organskim koloidnim dijelom tla)

sprječavaju ispiranje hraniva iz zone korijenskog sustava i zadržavaju vodu neophodnu višim biljkama i mikroorganizmima u tlu.

3.2. KOLOIDNA SVOJSTVA TLA

Prisutnost koloida usko je povezana s veličinom čestica *disperzne faze* i njihovim istovrsnim električnim nabojem. U koloidnom sustavu gravitacijska sila teži taloženju raspršenih koloidnih čestica, dok suprotno djeluju odbojna sila istovrsnog naboja čestica i *snaga difuzije*, odnosno *kinetička sila čestica* koja ih pokreće u pravcu manje koncentracije. Sile gravitacije prevladavaju kad su čestice većeg promjera od $4\ \mu\text{m}$ ($0,004\ \text{mm}$) te se one tada talože i ne dolazi do nastanka koloidnog sustava. Treba naglasiti da se zbog specifičnih uvjeta koji vladaju u tlu obično uzima granični promjer koloidnih čestica tla od $2\ \mu\text{m}$. Dakle, mineralne čestice tla manjeg promjera od $0,002\ \text{mm}$ su čestice gline, odnosno sekundarni minerali.

Koloidni sustav može se nalaziti u tri stanja:

- Sol (tekući),
- Gel (krut i elastičan) i
- Koagel (kada se disperzna faza nalazi u stanju zgrušavanja).

Koloidi tla su *hidrofilni*, odnosno koloidna otopina je voda, a disperznu fazu čine sekundarni minerali i organska tvar, odnosno složene organomineralne čestice.

Čestice koloidnog sustava posjeduju površinski napon određen količinom slobodne energije. Suglasno drugom zakonu termodinamike, sustav je u ravnoteži kada je njegova ukupna slobodna energija najmanja te stoga koloidni sustav teži uspostavljanju ravnotežnog stanja smanjivanjem slobodne energije što se može odvijati na dva načina:

- smanjivanjem površine koloidne čestice, što je omogućeno u procesu *koagulacije* i
- smanjivanjem *slobodne energije* na granici krute i tekuće faze, što dovodi do približavanja koloidnih čestica te nastajanja opne otapala oko koloidnih čestica i manifestira se kao pojava *adsorpcije*.

Značajno svojstvo vode je velika površinska napetost i izražena polarnost što uvjetuje kondenzaciju manje polarnih otopljenih tvari na površini vode. U suprotnom slučaju, otopljena tvar se koncentrira neposredno uz koloidnu česticu. Budući da je sadržaj vode u tlu vrlo promjenjiv, to se neposredno odražava na stanje koloida u njemu.

Adsorpcija je reverzibilan (povratan) proces i jedan dio sorbiranih iona i dipolnih molekula neprekidno se odvajaju od koloidne čestice uslijed *Braunovog gibanja* pa se uspostavlja određena ravnoteža između *sorpcije* i *desorpcije*. Snižavanjem koncentracije i padom temperature adsorpcija raste. Do pojave *supstitucije* (zamjene) iona na koloidnoj čestici vrlo lako dolazi kada je zasićena, odnosno kada su sva mjesta za polarno vezivanje zauzeta. Tada je sorpcija novog iona moguća samo zamjenom i to u *elektroekvivalentnim omjerima*, npr. Ca^{2+} zamjenjuje 2 K^+ , 2 Na^+ zamjenjuju Mg^{2+} itd.

Složena struktura koloidnih čestica (*micela*) dopušta sorpciju na vanjskim i unutarnjim površinama pri čemu veličina unutarnjih prostora omogućava ulaz samo pojedinim ionima, naročito u fazi bubrenja koloidnog sustava. Takva pojava naziva se *specifična* ili *selektivna sorpcija*. Ioni unutar koloidne čestice

Tablica 3.4. Izmjenjivi kationi i njihovi ionski radijusi

Kation	Ionski radijus (nm ili 10^{-9} m)
Al^{3+}	0,051
Fe^{3+}	0,064
Mg^{2+}	0,066
Zn^{2+}	0,074
Fe^{2+}	0,070
Na^+	0,097
Ca^{2+}	0,099
K^+	0,133

možu ostati "zarobljeni" nakon smanjivanja količine vodene faze pa dolazi do pojave koja se uobičajeno naziva *fiksacija*.

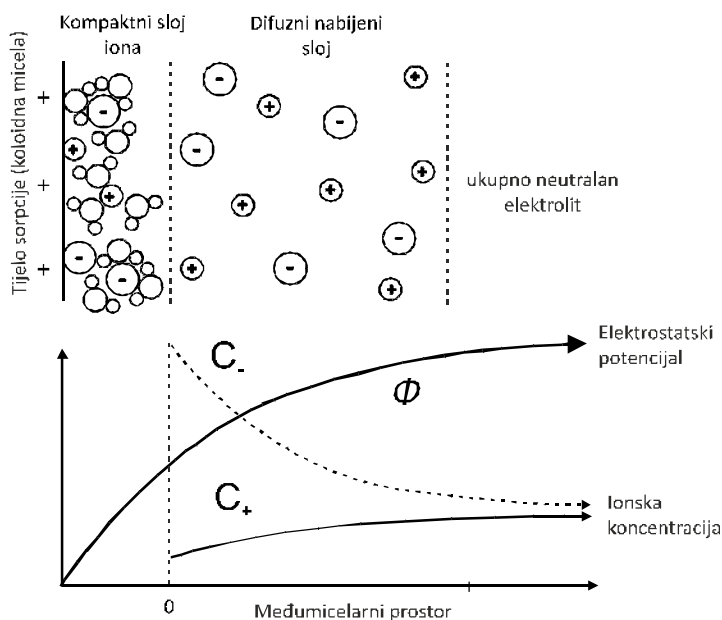
Na vanjskoj površini koloidne micelle nalazi se relativno čvrsto vezani sloj iona, takozvani prvi sloj (slika 3.4.). On privlači novi sloj iona, obično 2 do 3, između kojih je *intermicelarna vodena faza* koloidnog sustava. Ioni vanjskih slojeva su sve slabije *polarizirani* (prostorno orijentirani) te su raspoređeni potpuno difuzno izvan električnog polja koloidne micelle. Rastresiti slojevi iona su lako pokretljiviji i stoga lako zamjenjivi drugim ionima. Razlika električnog potencijala između

adsorbiranog (nepokretnog) sloja i vanjske površine micelle (*difuznog sloja*) pomnožena s debljinom difuznog sloja naziva se *elektrokinetički potencijal koloidne micelle*.

Ako su u koloidnom sustavu prisutni ioni suprotnog znaka, posebice trovalentni ioni, potencijal micelle pada i lako dolazi do prelaska difuznog sloja u adsorpcijski u trenutku pada potencijala na nulu, što se označava kao *izoelektrična točka koloidnog sustava*. U tom stanju koloidni sustav *koagulira*, zapravo dolazi do *precipitacije* (taloženja) krute faze i koloid prelazi iz sola u gel. Promjer iona u hidratiziranom stanju ovisi o njegovom naboju, ali i veličini, odnosno gustoći naboja (tablica 3.4.)

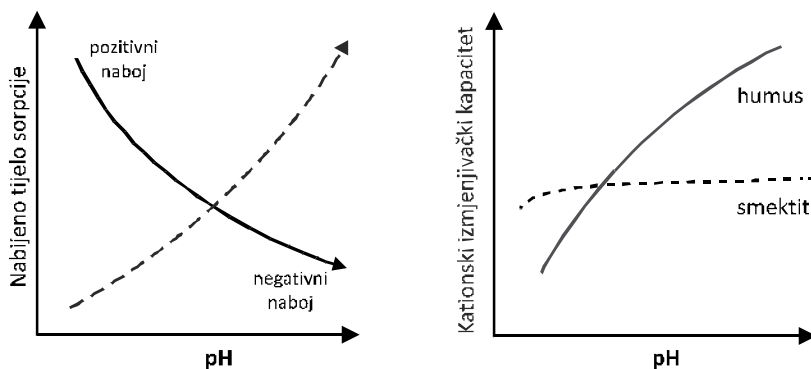
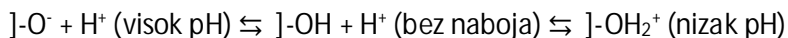
Visoka koncentracija kationa, posebice Na^+ , u tlu izaziva disperziju (*deflokulaciju*) aglomeriranih čestica gline što uzrokuje strukturnu degradaciju tla. Do pojave disperzije dolazi u prisustvu 0,025-0,150 mola jednovalentnih kationa, 0,0005-

0,002 mola dvovalentnih ili 0,00001-0,0001 mola trovalentnih kationa (*Schulze-Hardyev zakon*).



Slika 3.4. Slabljenje električnog polja udaljavanjem od električno nabijene čestice i rezultirajuća raspodjela iona (*Gouy-Chapman-Stern-Grahamov model*)

Permanenta nabijenost koloida tla odgovorna je za *izomorfnu zamjenu* atoma u sekundarnim mineralima (npr. Zn^{2+} za Al^{3+} u oktaedarskom sloju), izomorfna zamjenu u oba sloja (npr. Mg^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{2+} za Al^{3+} u oktaedrima, odnosno Al^{3+} za Si^{4+} u tetraedrima) i mogućnost nastanka pozitivnog naboja (npr. zamjena Al^{3+} za Mg^{2+}), dok promjenjiva nabijenost izaziva disocijaciju vanjskih hidroksilnih skupina na rubovima kristalne rešetke te *protoniranje* sekundarnih minerala:



Slika 3.5. Utjecaj pH na sorpcijsku moć organskih i mineralnih koloida te tip i naboj koloida

Ovisno o vrsti i tipu koloidnih micela, razlikuje se njihova nabijenost, stabilnost i promjenjivost naboja kako to pokazuje tablica 3.5.

Tablica 3.5. Nabijenost ($\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$) i relativna stabilnost koloida tla

Koloid	Negativan naboj	Pozitivan naboj	Stabilnost %	Varijabilnost%
Humus	200	0	10	90
Vermikuliti	120	0	95	5
Montmoriloniti	100	0	95	5
Iliti	40	0	80	20
Kaoliniti	12	4	5	95
Fe i Al oksidi	5	5	0	100

Vrlo je važno naglasiti da uz promjenu pH nastaje znatna promjena nabijenosti koloida tla, posebice kod organske tvari. Stoga, smanjivanje naboja jako utječe na pad sorpcijske sposobnosti i *kelatizirajuću moć* humusa u kiseloj sredini, npr. u šumskim tlima i tresetištima, općenito u redukcijskim uvjetima (slika 3.5.).

4. AGROKEMIJSKA SVOJSTVA TLA I NJEGOVA PLODNOST

Efektivna plodnost ili *produktivnost biljnog staništa* vrlo je složeno svojstvo tla. Najlakše se može definirati količinom organske tvari koju biljke mogu sintetizirati na nekom staništu tijekom vegetacijskog razdoblja (dio godine kada je rast biljaka moguć). Razumljivo je da količina nastale organske tvari neposredno ovisi o biološkim, klimatskim i zemljišnim čimbenicima pa se plodnost tla, iako je to njegovo najvažnije svojstvo, ne može apsolutno utvrditi jer efektivnu (stvarnu) plodnost karakterizira sposobnost pružanja biljkama potrebnih uvjeta za rast i razvitak. Stoga postojeći sustav klasifikacije (*boniteta*) uspijeva samo generalno odrediti plodnost tla.

Svojstva tla mogu se promatrati statički i dinamički. *Statička svojstva*, općenito, uključuju teksturu, strukturu, dubinu, apsolutnu masu, pH i električnu provodljivost jer se ona u kratkom vremenu malo ili uopće ne mijenjaju. *Dinamička svojstva* podrazumijevaju izgled površine tla, sadržaj vode i druge jako promjenjive veličine na koje čovjek utječe obradom ili se mijenjaju pod utjecajem vremenskih prilika (sadržaj vode, zraka, erozija itd.).

Izraz plodnost tla tijesno je povezan s kapacitetom tla čime se označava njegova sposobnost da osigura potrebnu hranu biljkama u adekvatnim količinama i pogodnim proporcijama. Stoga je prvi zadatak ishrane bilja istražiti međuodnos biljaka i tla kao supstrata biljne ishrane. *Supstrat ishrane*, osim prirodnog tla, može biti pijesak, šljunak, sintetska podloga ili vodena otopina hranjivih elemenata (hidroponi). *S agrokemijskog gledišta, plodno je ono tlo koje u tijeku čitave vegetacije osigurava biljkama dovoljno hraniva i na kome se trajno postižu visoki prirodni.* Često se za plodnost tla koristi izraz produktivnost jer ona unutar nekog agroekološkog područja u velikoj mjeri ovisi o plodnosti tla, ali i tipu gospodarenja.

Plodnost tla najbolje je definirati vrednovanjem njegovih specifičnih funkcija koje kvantificiraju biljnu produktivnost, ali ujedno opisuju i utjecaj na zdravlje ljudi. *"Dobro organizirana poljoprivredna proizvodnja na dugi rok povećava ili održava produktivnost i profitabilnost proizvodnje na nacionalnoj razini, čuva ili poboljšava integritet, raznolikost i sustav poljoprivredne proizvodnje kao i okolnih prirodnih ekosustava, a također poboljšava zdravlje ljudi, njihovu sigurnost i zadovoljstva u estetskom pogledu"* (Stuart i Robinson, 1997).

Korištenje tla u poljoprivrednoj biljnoj proizvodnji može se opisati ključnim atributima *biološko-ekološkog*, *sociološko-ekonomskog* i *tehničko-tehnološkog* karaktera. Njihov složeni međusobni odnos zahtijeva multidisciplinarni pristup u kvantifikaciji i analizi produktivnosti tla te veliki broj različitih podataka o njemu. Razumijevanje utjecaja i intenziteta djelovanja *indikatora plodnosti (atributa ili parametara)* i uvid u njihove međusobne interakcije neophodno je za optimalno

korištenje zemljišnih resursa i primarnu produkciju hrane uz učinkovito korištenje klime, reljefa i usjeva.

Primarna poljoprivredna produkcija u svijetu, zbog strateškog značaja i ovisnosti o klimatskim faktorima, podložna je fluktuaciji oscilatornog tipa s posljedicama koje se odražavaju preko tržišta hrane na značajne promjene cijena poljoprivrednih proizvoda. Jasno je da se poljoprivredna proizvodnja ne može preorijentirati u kratkom vremenu pa se metode predviđanja i prognoze u primarnoj produkciji hrane sve više koriste, prvenstveno u sociološko-ekonomskim, ali i drugim aspektima.

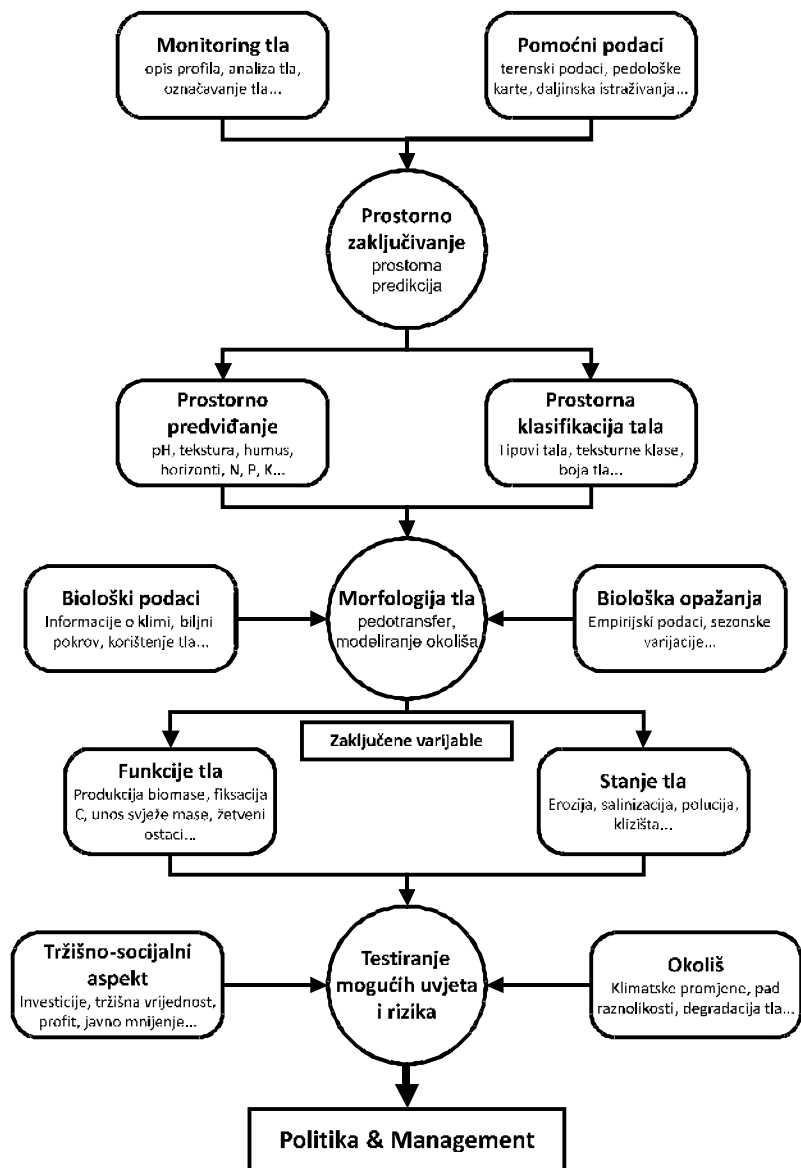
Biološko-ekološki aspekt suvremenog korištenja tla sve više uključuje brojčane metode dinamičkog definiranja sustava biljka-tlo-atmosfera, dok tehničko-tehnološku razinu problema u sadašnjem trenutku karakterizira visoko učinkovita agrotehnika s problemima nadzora i automatizacije.

4.1. PROCJENA ZEMLJIŠNE POGODNOSTI

Procjena pogodnosti tla uključuje izmjeru i interpretaciju vanjske morfologije tla, vegetacije, klime, indikatora pogodnosti fizikalne, kemijske i biološke naravi te niza drugih indikatora (iz grupe sociološko-ekonomskih i tehničko-tehnoloških) potrebnih za odabir najpovoljnijeg načina korištenja tla. Stoga je procjena zemljišne pogodnosti (*Land evaluation*) proces utvrđivanja pogodnosti (prikladnosti) zemljišta za određene vrste korištenja, a klasifikacija zemljišne pogodnosti (*Land suitability classification*) je način grupiranja pojedinih tipova zemljišta u smislu njihove apsolutne ili relativne prikladnosti za određenu vrstu primjene. Dakle, vrjednovanje zemljišta bavi se procjenom zemljišnih performansi za određene namjene. To uključuje praćenje i tumačenje klime, tla i vegetacije te druge aspekte zemljišta u smislu zahtjeva za alternativnim oblicima korištenja zemljišnih resursa unutar relevantnog fizičkog, ekonomskog i socijalnog konteksta.

Dobra procjena proizvodnog potencijala tla uključuje agroekološka svojstva, ali i kvantifikaciju načina njegove uporabe pa se isključivanjem sociološko-ekonomske grupe atributa usvaja fizički pristup u proizvodnji hrane za koji je karakteristična kvalitativna procjena proizvodnih sposobnosti tla. Takav pristup procjene produktivnosti tala zastupa većina konvencionalnih metoda koje tla razvrstavaju u *bonitetne klase* pri čemu prva klasa ima očekivano više produktivnost prema drugoj (*bonitiranje*). Danas to više ne smije biti jedini kriterij, jer kapacitet produkcije tla ovisi o složenom kompleksu i interakciji velikog broja čimbenika. Stvarna produktivnost ovisi i o motiviranosti proizvođača za proizvodni rizik, odnosno za maksimalno ulaganje, zatim potrebe

tržišta, ekonomske politike države te socijalne i kulturne tradicije. Nedostaci konvencionalne procjene, odnosno bonitiranja pogodnosti zemljišta, vrlo efikasno se mogu riješiti kompjutorskim, sofisticiranim modelima utvrđivanja pogodnosti zemljišta, kakav je npr. za usjeve ISPAID (*Iowa Soil Properties and Interpretations*).



Slika 4.1. Procedura digitalnog kartiranja tla za izradu jedinstvene baze podataka EU

Odluke o korištenju zemljišta uvijek su bile dio evolucije ljudskog društva, ali su se kroz povijest znatno mijenjale i danas govorimo o procesu planiranja

korištenja zemljišta u svim zemljama svijeta, uključujući i one u razvoju. Svrha planiranja korištenja zemljišta je donošenje odluke o najkorisnijem načinu eksploatacije danas uz njegovo očuvanje za budućnost. Stoga se planiranje i vrjednovanje zemljišta mora temeljiti na potpunom razumijevanju prirodnog okoliša kako bi se izbjegle sve vrste oštećenja prirodnih resursa (slika 4.1.).

Potpuno kvantitativno određivanje i analiza produktivnosti tla zahtijeva visoko sofisticiran računalni model, mnoštvo točnih podataka o tlu i multidisciplinarni pristup. Nažalost, danas se praktično sve potrebne analize tla uglavnom obavljaju unutar agronomске struke, odvojeno od drugih disciplina te je stoga procjena produktivnosti tla ograničena uglavnom samo na agrološke aspekte proizvodnje hrane.

U principu, prihvaćanje *koncepta zemljište* je od osobite važnosti jer je zemljište znatno širi pojam od tla koje je zapravo njegov dio, jednako kao što su to vegetacija, hidrologija, fiziografija, infrastruktura, klima itd. Samo male jedinice zemljišta su homogene u svim aspektima i njih je tada moguće identificirati i prikazati na zemljišnim, vegetacijskim i hidrološkim kartama. Zapravo, za analizu nije presudno je li tlo homogeno, već koliko nehomogenost utječe na kapacitet produktivnosti pod određenim uvjetima njegove uporabe.

Pored kvantitativnih mjerila rizika (numeričke vrijednosti, rangovi i dr.), kompjutorski modeli uz pomoć GIS alata integriraju sve agroekološke, tehnološke i zemljišne podatke (*pedološke, topografske*) u jedinstveni informacijski sustav/bazu. Zbog brzog napretka tehnologije kao i potrebe za velikim brojem relevantnih podataka u procjeni pogodnosti zemljišta sve se više primjenjuju i *daljinska istraživanja*. Takva istraživanja podrazumijevaju primjenu različitih metoda prikupljanja i interpretacije informacija o udaljenim objektima bez fizičkog dodira s njima pri čemu se koriste zrakoplovi, sateliti i svemirske sonde kao uobičajene platforme za ovu vrstu opažanja. Izraz *daljinsko istraživanje* obično je ograničen na metode koje rabe energiju elektromagnetskog zračenja kao sredstvo za otkrivanje i mjerenje svojstava objekata. Takva definicija uključuje *električno-magnetno induksijska* (EMI) i *gravitacijska mjerenja* (snaga polja) pa *daljinska istraživanja* općenito obuhvaćaju upotrebu različitih vrsta snimaka: fotografskih, termalnih, radarskih itd.

Koristeći suvremenu metodologiju i klasične analize procjene pogodnosti zemljišta (fizikalne, kemijske, biološke i dr.) moguće je razviti kompleksan programski alat za odlučivanje o potrebi kondicioniranja tla, eliminiranja čimbenika minimuma, izradu gnojidbenih preporuka uz davanje agrotehničkih savjeta proizvođačima, očuvanje i zaštitu prostora i dr. te provesti rajonizaciju ratarske i voćarsko-vinogradarske proizvodnje. Prednosti takvog pristupa su brzina i pouzdanost informacijskog sustava, utemeljenog na GIS-u, za

utvrđivanje agroekoloških i ekonomskih rizika kod izbora terena/tla za usjeve, povrće, zasnivanje voćnjaka i vinograda i dr.

Produktivnost tla opisuje se indikatorima (parametrima, atributima) koji mogu biti jednostavni (dubina, nagib, količina oborina itd.), ili složeni od interakcija nekoliko jednostavnih (kapacitet za vodu, propusnost tla ili prirodna plodnost). Ukupnost svih karakteristika daje *zemljišnu kakvoću* koja je određena interakcijom jednostavnih i složenih parametara s različitom težinom za različite uvjete, ovisno o vrijednosti svih parametara na jednom mjestu. Npr., opskrbljenost biljaka vodom određena je jednostavnim parametrima kao što su količina padalina i potencijal evapotranspiracije, ali i složenim kakav je retencijski kapacitet tla za vodu te interakcija između navedenih svojstava.

Najčešće je način korištenja zemljišta određen tipom "kulture" (npr.: godišnja - usjevi i trajna "kultura" – nasadi, pašnjaci) što je preširoko za kvantificiranje produktivnosti tla. *Tip korištenja zemljišta* stoga se karakterizira ključnim atributima bioloških, sociološko-ekonomskih, tehničkih i drugih aspekata koji su relevantni za promjene u produktivnosti zemljišta. Npr., ključni atributi su biljna vrsta ili intenzitet njenog rasta, tehnički *know-how* (znanje i vještina u primjeni tehnologije) proizvođača, veličina posjeda, raspoloživa energija, oruđa, kapital, laboratoriji itd.

Za procjenu veličine produktivnosti tla, *izbor usjeva je dominantan ključni atribut*, dok su ostali važni atributi određeni dostupnom tehnikom i financijskim sredstvima. Stoga je kod niskog ulaganja u proizvodnju zaista nerealno koristiti visoku tehnologiju.

Kombinacija zemljišne jedinice i načina korištenja zemljišta predstavlja *sustav korištenja pojedinog tla* što je i temelj uspješne *kvantifikacije*. Pri tome, proizvodnja više od jedne biljne vrste ("kulture" ili usjeva) na jednom polju u isto vrijeme, mora uzimati u obzir utjecaj jedne "kulture" na drugu (*kompeticija* prema svjetlu, vodi, hranivima). Složen sustav je sastavljen od pojedinačnih i/ili multiplih sustava korištenja tla. Detalji i točnost svih osnovnih podataka određuju relevantnost procjene produktivnosti zemljišta, a njih je potrebno unijeti u bazu podataka za potrebe kompjutorske interpretacije i procjene kapaciteta produkcije nekog tla.

Temeljni problem dobre procjene produktivnosti zemljišta je kako prikazati kakvoću tla s jedne strane i njegove nedostatke unutar jednog sustava korištenja tla. Naime, tlo je pogodno za uzgoj neke "kulture" ako zadovoljava određene zahtjeve za korištenje, koji su često izraženi pojmom kakvoće tla. Ako *zahtjev za korištenje* nije potpuno zadovoljen, *pogodnost tla* je ispod optimalne, ili u ekstremnom slučaju, tlo je nepogodno (ili neprikladno) za planiranu uporabu.

Kakvoća tla i zahtjevi za njegovim korištenjem moraju biti kvantitativno opisani, odnosno moraju biti mjerljivi. Npr., utvrđivanje raspoloživosti vode vrlo je složen problem jer je to dinamičan sustav čiji status reprezentira higroskopna,

kapilarna i gravitacijska voda, a ukupni vodni potencijal tla je suma matriks, osmotskog, hidrostatskog, pneumatskog i gravitacijskog potencijala (prva dva su najvažnija). Dakle, retencija vode je funkcija teksture tla, ali i velik broj drugih parametara može utjecati na to svojstvo tla (npr. zbijenost tla, prisutnost nepropusne zone, nagib tla, visina podzemne vode, homogenost soluma itd.).

Zbog velikog broja čimbenika i njihovih dinamičnih međuodnosa funkcijska veza između pojedinih svojstava tla je *transfer funkcija* koja se opisuje varijablama u odnosu na mjerljiva svojstva sustava. Primjenom računarskih simulacijskih modela primarne produkcije moguće je kvantificirati trenutne vrijednosti tla, također i za neku udaljenu vremensku točku. Ako je raspoloživih podataka o tlu i klimi malo, onda se mogu utvrditi samo opće karakteristike, npr. stanje vode, što je zapravo koncept *FAO agroekoloških zona* (AEZ) koji je razvijen za tu namjenu, ali je nedovoljno precizan i služi samo za grubu procjenu kapaciteta produkcije širih regija.

Karte s jedinicama zemljišta su poseban reprezentant svojstava tla, tj. kombinacije njegovih klimatskih i fiziografskih karakteristika. Na nesreću, podaci o zemljištu su rijetko potpuni i točni. Npr., klimatski podaci se sakupljaju u meteorološkim postajama koje pokrivaju šira područja i podložni su tzv. *prostornim distribucijama*. Klimatske odlike osciliraju po godinama, a često su izražene tek kao prosječne vrijednosti, koje tipiziraju pojedine zone u prilično širokim regionalnim granicama. S druge strane, fizikalno-kemijska svojstva tla su manje promjenjive veličine, ali ih najčešće premalo ima jer su fizikalne i kemijske analize tla relativno spore i skupe.

Tablica 4.1. FAO klasifikacija pogodnosti zemljišta (1976.)

Red	Klasa	Podklasa
S (Suitable) Pogodno	S1 (Visoko pogodno)	
	S2 (Umjereno pogodno)	S2t
		S2d
		S2td
itd.		
	S3 (Djelomično pogodno)	
N (Not suitable) Nepogodno	N (Djelomično nepogodno)	N1y
		N1z
	itd.	
	N2 (Trajno nepogodno)	

Ograničenja kod definiranja jedinica zemljišta često su uzrokovana *fiziografskim pojavama* ("oblik zemljišta") i drugim nehomogenostima *soluma* ili *matičnog*

supstrata. Zbog toga je potrebno skupiti što više relevantnih informacija o tlu i interpretirati ih prije nego li određeno područje bude definirano kao *zemljišna jedinica*. Najjednostavnija metoda čuvanja, rukovanja i prikazivanja sređenih podataka je alokacija svih podataka u prikladne ćelije u mrežnoj karti, a zbog lakšeg određivanja koordinata mjesta, mrežu je najbolje uključiti u sustav meridijana.

Veličina mrežne jedinice je vezana uz svrhu procjene i određena gustoćom temeljnih mreža. *Mapping-monitoring sustav*, kakav je danas u svijetu vrlo čest, s vrlo grubom kartom predviđenom uglavnom za nacionalno (strateško) planiranje, nije dovoljno pouzdan na razini parcele. Zbog toga, da bi se polučila stvarna korist od *kvantifikacije produktivnosti tla* (koncepta "zemljište") i omogućilo regionalno planiranje proizvodnje hrane, potrebna je izrada poludetaljnih (razina posjeda, mjerilo 1:50.000), detaljnih (razina malih posjeda, mjerilo 1:25.000) i konačno vrlo detaljnih karata (razina parcele, mjerilo 1:10.000). Svaka ćelija na karti mora biti označena kompletnim setom klimatskih i zemljišnih podataka. To znači da najmanja zemljišna jedinica koja može biti analizirana ima veličinu jedne mrežne ćelije. Naravno, veće jedinice nastaju *agregacijom* susjednih ćelija sličnih svojstava, a takvo integriranje ima smisla samo unutar jednog sustava korištenja zemljišta.

Tematske karte svojstava zemljišta (slika 4.2.) imaju isključivo namjenu vizualiziranja svojstava tla (ili vremenskih trendova) s osnovnim informacijama. Osim toga, one pomažu da se uoče anomalije u ukupnom setu podataka. Izračunavanja (računarska simulacija produktivnosti) se uobičajeno obavljaju za pojedinačne ćelije ili za grupu ćelija s identičnim sadržajem podataka pa agregiranje tih grupa ćelija sa sličnim rezultatima daje prikladnu kartu. Ako se određivanje potencijalne proizvodnje uzme kao osnova za procjenu pogodnosti tla, mogu se javiti problemi kad su specifikacije razreda preširoke pa agregiranje dovodi do nepotrebnog gubitka informacija. Kriterij za agregiranje kvantitativnih (utvrđenih) proizvodnih podataka u kvalitativne razrede pogodnosti može biti relativna razina proizvodnje. Npr., tlo koje ima relativnu proizvodnost > 80 % je vrlo pogodno, dok < 20 % relativne produkcije pripada klasi trajno nepogodnih zemljišta i isključuje tlo za poljoprivrednu namjenu.

Kategorizacija pogodnosti tla često je puno složenija u pojedinim zemljama pa se razlikuje *red pogodnosti* (grupiranje većih površina na temelju procjene pogodnosti za određenu namjenu), *klasa pogodnosti* (tipovi zemljišnog prostora različitog stupnja pogodnosti), *podklasa pogodnosti* (označavanje prostornih jedinica istog stupnja pogodnosti, ali različitih ograničenja određenih klasom pogodnosti) i *jedinica pogodnosti* (osnovna zemljišna jedinica). Kada je jednom određena mrežna ćelija sa pojedinim zemljišnim svojstvima, potrebno je još odrediti tip korištenja zemljišta. Međunarodna FAO klasifikacija pogodnosti (tablica 4.1.) sva zemljišta dijeli na *pogodna* (3 klase) i *nepogodna* za proizvodnju hrane (2 klase). Pojedine klase dijele se na podklase prema grupama čimbenika

kao što su *agronomski* (svojstva tla, potrebe biljaka i sl.), *management* (lokacija, mehanizacija, prerada i dr.), *uređenje zemljišta* (cijena krčenja, čišćenja, zaštita od poplava, izgradnja sustava za navodnjavanje i dr.), *kondicioniranja* (rizici zaslanjivanja, visoke podzemne vode, erozije i sl.) i *socijalno-ekonomski faktori*. Sličan princip bonitiranja do nedavno je bio na snazi i kod nas (tablica 4.2.), a nije se puno promijenio niti novi sustav bonitiranja iz 2010. god. koji je još uvijek kvalitativan te posve neprilagođen vremenu i suvremenim potrebama biljne proizvodnje.

Dakle, tip korištenja tla određen je biljnom vrstom („kulturom“) koja se uzgaja i ključnim atributima koji određuju razinu greške (rizika?) proizvodnje. Pri tom je izbor biljne vrste *ključni atribut*, dok ostali atributi korištenja tla, općenito, odražavaju raspoloživu tehniku i upravljačku vještinu te klasificiraju tip korištenja tla u elementarni, tradicionalni ili napredni.

Svaki tip korištenja tla postavlja specifične zahtjeve koji moraju biti ispunjeni kako bi se osigurala potrebna razina proizvodnje. Postoje razlike između zahtjeva za optimalno provođenje nekog sustava korištenja tla i minimalnih potreba koje moraju biti zadovoljene. Minimalni zahtjev za korištenje tla sadrži sljedeće aspekte po biljnim vrstama:

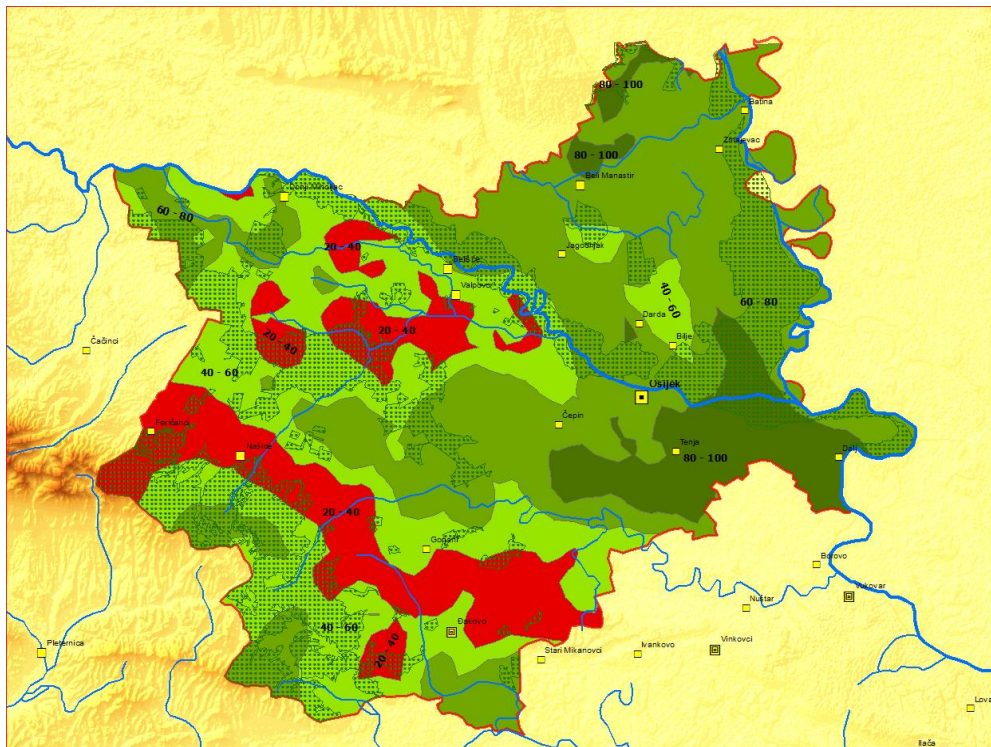
- minimalna temperatura i duljina dana,
- minimalna gnojidba,
- tolerantna zaslanjenost i pH tla,
- minimalni zahtjevi za klijanje,
- minimalni zahtjevi zakorjenjivanja (dubina soluma, skelet),
- minimum radnih potreba,
- potreba za irigacijom i/ili drenažom i
- minimalna infrastruktura.

Velik dio zemljišnih resursa ima jedan ili više ograničavajućih čimbenika. Na našoj planeti stresovi vezani za biljnu proizvodnju su raspoređeni na sljedeći način: za 23 % stresova odgovoran je mineralni sastav tla, za 28 % uzrok je suša, za 12 % suvišak vode, a za 24 % stresova odgovorna je loša struktura tla. Dakle, 87 % svih zemljišta Zemlje ne zadovoljava potpuno potrebe biljaka.

Indikativni minimum zahtjeva da korištenje tla sadrži sve atribute tipa korištenja, a na prvom mjestu je zadovoljenje potreba biljne vrste-usjeva. Neki od minimuma primjenjuju se kod svih razina tehnomenadžerstva, npr. temperatura i dnevno svjetlo. Većina minimalnih zahtjeva uzima se u obzir za određene razine tehnologije kao *osnovni zahtjevi plodnosti* potrebni za najnižu tehnološku razinu, ali uglavnom ne ugrožavaju tip korištenja tla uz moguća dodatna ulaganja. Nadalje, drugi čimbenici, koji nisu navedeni, mogu biti vrlo značajni, npr. visoka tržišna cijena ili zalihe mogu odmah natjerati proizvođača da prihvati nisku razinu proizvodnje bez obzira na tip korištenja tla.

Tablica 4.2. Bonitet zemljišta (Pravilnik o bonitiranju zemljišta (N.N. 47/1982.))

1) Duboka zemljišta, ilovaste teksture, propusna, dobro drenirana, neutralne reakcije u kojima je podzemna voda ispod 120 cm, dobrog adsorpcijskog kapaciteta, nagiba manjeg od 5 %, zaštićena od poplava, laka za obradu (naročito mehaniziranu) i navodnjavanje.	1a) ilovaste teksture, ravna, dobro drenirana, nagib < 2 %, bez erozije; 1b) ilovaste teksture, ravna, dobro drenirana, nagib < 4 %, slabo izložena eroziji; 1c) ilovaste teksture, ravna, dobro drenirana, nagib < 5 %, slabo izložena eroziji.
2) Srednje duboka zemljišta, ilovasta ili glinasta, umjerene do dobre propusnosti, dobro drenirana, neutralna ili slabo kisela, podzemna voda do 100 cm, na ravnom ili nagiba ispod 8 %, moguća slaba erozija ili kratkotrajne poplave, laka ili srednje teška za obradu, pogodna za mehaniziranu obradu i navodnjavanje.	2a) ilovaste teksture, dobro drenirana, na ravnom ili nagib ispod 3 %, izložena slaboj eroziji; 2b) glinaste teksture, teško propusna, umjereno do dobro drenirana, na ravnom ili malo nagnuta nagiba manjeg od 8 %, izložena slaboj eroziji; 2c) glinaste teksture, teško propusna, umjereno do dobro drenirana, na nagnutom terenu nagiba manjeg od 8 %, sadrže površinski skelet i izložena slaboj eroziji.
3) Srednje duboka i duboka zemljišta, ilovaste ili glinaste teksture, umjereno do teško propusna, dobro do nepotpuno drenirana, od slabo alkalne do srednje kisele reakcije, podzemna voda do 80 cm dubine, nagiba do 16 % i neravna, izložena eroziji i kratkotrajnim poplavama, lako do teško obradiva, ograničena upotreba mehanizacije, potrebne su mjere zaštite od erozije, odnosno poplava.	3a) ilovaste teksture, dobro propusna, srednje izložena eroziji; 3b) glinaste ili ilovaste teksture, do 10 % skeleta, slabo drenirana i teško propusna, nagnuta do 16 %, neravna, srednje izložena eroziji; 3c) glinaste ili ilovaste teksture, do 10 % skeleta, slabo drenirana i teško propusna, nagnuta do 16 %, neravna, izložena jakoj eroziji.
4) Duboka, srednje duboka i plitka zemljišta ilovaste ili glinaste teksture koja mogu imati do 30 % skeleta ili pjeskovita s manje od 10 % gline, alkalne do jako kisele reakcije ili zaslanjena, dobro do teško propusna, duboke podzemne vode, redovno, ali kratkotrajno poplavljena ili prevlažna, nagiba do 30 % s izraženom površinskom erozijom, potrebne su mjere zaštite od poplava i erozije.	4a) umjereno do dobro drenirana zemljišta, slabo skeletna do 10 % i nagiba ispod 10 %, izložena eroziji; 4b) kratkotrajno prevlažna, srednje skeletna zemljišta (do 30 % skeleta), loše drenirana, srednje duboka; 4c) često vlažena zemljišta, skeletna do 30 %, loše drenirana, nagnuta nagiba do 30 %, izložena svim oblicima erozije, srednje duboka.
5) Plitka i srednje duboka tla koja sadrže do 50 % skeleta, do ekstremno kisele reakcije, srednje dugo prekomjerno vlažna, izložena redovnim poplavama u ravnici ili nagiba do 45 % s izraženim tragovima površinske erozije. Neophodna je zaštita od erozije i meliorativni zahvati. Dije se u dvije podklase (skelet do 30 % ili 50 % uz nagib do 45 %).	
6) Uglavnom plitka zemljišta koja sadrže do 70 % skeleta, dugotrajno vlažna ili plavljena i nagiba do 45 % te izložena jakoj eroziji, visoka razina podzemne vode (dvije podklase).	
7) Uglavnom plitka zemljišta koja sadrže do 70 % skeleta, nagiba do 60 %, izrazito erozivna, zaslanjena ili alkalizirana. Uz zaštitu od erozije moguće ih je koristiti samo kao livade, pašnjake ili šume (dvije podklase).	
8) Plitka zemljišta, do 80 % skeleta. Moguće ih je koristiti samo za pašnjake ili šume.	

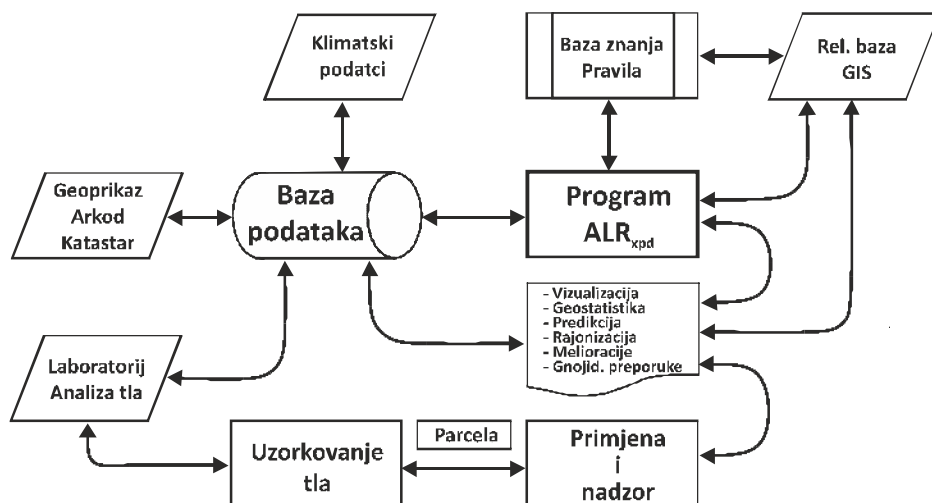


Slika 4.2. Primjer karte relative zemljišne pogodnosti za usjeve Osječko-baranjske županije (*Program ALR_{xpd}*, Vukadinović, 2010., QGIS, kriging, ~ 17.500 uzoraka)

Kada pri izboru tipa korištenja tla postoji neodlučnost, uvijek je potrebno razmotriti sve minimalne zahtjeve za proizvodnju. Npr., kod izbora biljne vrste za proizvodnju šećera u Hrvatskoj jedini izbor je šećerna repa, s obzirom na njene zahtjeve za temperaturom i dužinom osvjetljenosti. Naime, šećerna trska zahtjeva minimalnu temperaturu od 15 °C i kratak dan, dok je šećerna repa biljka dugog dana i podnosi minimalnu temperaturu od 5 °C. Kad je u pitanju minimum zahtjeva za gnojidbom, onda je indikator potrebna minimalna koncentracija nekog elementa u biljci, ali i drugi fizikalno-kemijski parametri "neplodnosti", odnosno ograničavajući čimbenici uzgoja, npr.:

- saturiranost tla aluminijem (> 60 %),
- nepovoljan pH,
- visok sadržaj CaCO₃ ili CaSO₄,
- visoka koncentracija bora (> 2 mg dm⁻³ u 1:1 H₂O ekstraktu),
- visoka koncentracija klora (> 10 cmol dm⁻³ u 1:1 H₂O ekstraktu),
- preko 30 mg dm⁻³ NO₃⁻ ili NH₄⁺ iona (1:1 H₂O ekstrakt) ili
- preko 8,5 cmol dm⁻³ hidrogenkarbonata (1:1 H₂O ekstrakt).

Mala koncentracija elemenata u biljci indicira nisku raspoloživost hraniva što je itekako kompleksan problem vezan uz brojne čimbenike "neplodnosti", npr. dekompoziciju rezervnih hraniva, a što se pak teško kvantificira jer ovisi od puno čimbenika, među kojima je najpromjenjivija mikrobiološka aktivnost.



Slika 4.3. Dijagram toka interpretacijske baze tala Osječko-baranjske županije (Vukadinović, 2010.)

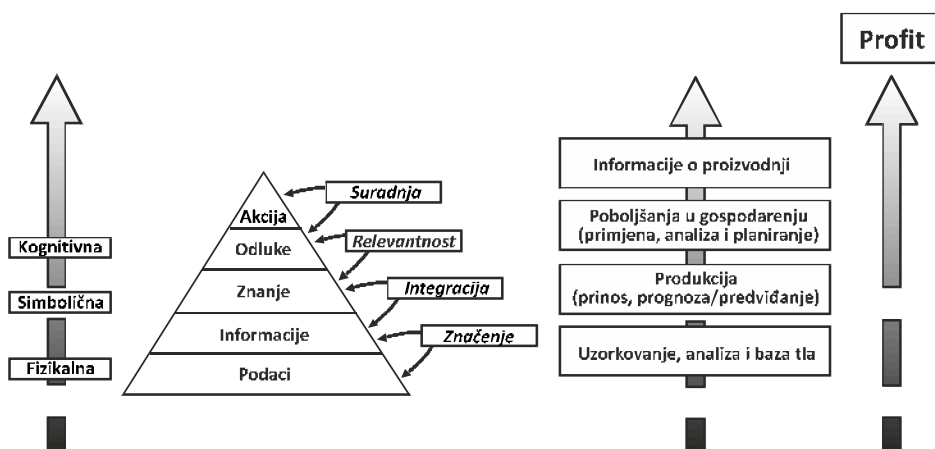
Sjeme za klijanje i nicanje zahtjeva potrebnu količinu vode, kisika, temperaturu, povoljan pH, a fotoblastično sjeme i određenu duljinu osvjetljenja. Ipak, u ranim etapama rasta biljaka kritična je struktura tla (npr. u tlu mora biti < 40 % šljunka) i intenzitet erozije. Zatim, dubina ukorjenjivanja ne smije biti premala, za kukuruz mora biti > 50 cm, šećernu repu i pšenicu > 60 cm itd. Minimalni zahtjevi kultivacije kod uporabe traktora ne dozvoljavaju nagib parcele veći od 10 % i sadržaj skeleta > 5 %, dok za primjenu visoke tehnologije nagib ne smije biti veći od 5 % i tlo mora biti bez skeleta.

U najrazvijenijim zemljama svijeta tlu se, kao izuzetno važnom resursu, pridaje važnost nezamjenjivog prirodnog resursa. Zbog toga se pokušavaju utvrditi i kvantificirati svi čimbenici koji utječu na svojstva tla i njegovo korištenje kako bi se tlo očuvalo, zaštitilo od degradacije ili onečišćenja, povećala njegova produktivnost i omogućilo planiranje proizvodnje dovoljne količine i kvalitetne i zdravstveno ispravne hrane (slika 4.4.). U tom se smislu istražuju sva svojstva tla i klime, antropogeni i drugi utjecaji, a podaci se spremaju u *komputorske baze podataka* u kojima se kompleksnim i sofisticiranim načinom interpretiraju i tako oplemenjeni svestrano koriste. Naravno, s tom svrhom razvijeno je niz *komputorskih modela* prilagođenih različitim namjenama, agroekološkim i drugim uvjetima, različite složenosti i najčešće podržanih GIS-om, odnosno geostatističkom analizom i predikcijom prostornih svojstava. Budući da je model pojednostavljeni prikaz izračunate stvarnosti dobivene bez potrebe za

obavljanjem pokusa, modeli se uspješno primjenjuju u procjeni/vrjednovanju zemljišta, čemu smo i mi doprinjeli (slika 4.3.).

Modeli su klasificirani prema složenosti računanja (kvalitativno do kvantitativno), *deskriptivno složeni*, (empirijski do mehanicistički) i mogu biti različite organizacije. *Biofizikalni modeli* su uglavnom pojednostavljeni sustavi korištenja zemljišta koji omogućuju predviđanje i prije njihove stvarne primjene. Njima se predviđa korištenje zemljišta u fizičkom, kvantitativnom smislu, kao što su prinos usjeva, opskrba hranjivim tvarima, učinci na okoliš, opasnost od erozije, obradivost i dr. te utjecaj na gospodarenje zemljištem. Također, modeli za vrjednovanje zemljišta mogu biti temeljeni na zemljišnim svojstvima (zemljišnim indeksima, visini prinosa, cijeni zemljišta, plodnosti/kakvoći ili kombinaciji, npr. cijeni zemljišta i postignutim prinosima), pa čak i na razlici prema drugim tipovima korištenja zemljišta, ali se uvijek unutar modela uspostavlja red važnosti ili hijerarhija pojedinih svojstava.

Najjednostavniji modeli su *holistički*, teško ih je formalizirati te se ne mogu ekstrapolirati, ali u vrjednovanju pogodnosti zemljišta, npr. za vinovu lozu, često se ističu jer objedinjuju lokaciju (franc. *terroir*) i tradiciju u vinogradarstvu i proizvodnji vina. Premda će uvijek postojati dvojbe oko značaja *terroira* na proizvodnju kvalitetnih vina, mudar vinogradar svakako razumije interakciju terena i kakvoće grožđa, odnosno vina.



Slika 4.4. Shematski prikaz korisnosti geoinformacija u procjeni produktivnosti zemljišta

Ekspertni modeli formaliziraju stručne prosudbe o pojedinim zemljišnim svojstvima. *Empirijsko-statistički modeli* omogućuju kvantitativnu predikciju prinosa usjeva dok dinamički simulacijski modeli koriste vremenski slijed ulaznih podataka za simulaciju biofizikalnih mehanizama (npr. rasta, razvitka i tvorbe prinosa) i prema zakonima prirode daju odgovore za različite agroekološke uvjete.

U svijetu postoji niz interpretacijskih baza zemljišnih resursa, npr. SAD na nacionalnoj razini koriste više različitih baza kao što su *State Soil Geographic Database* (STATSGO), *Soil Survey Geographic Database* (SSURGO), *Map Unit Interpretation Record Database* (MUIR), *National Soil Characterization Database* (NSSC), a na razini pojedinih država vrlo je interesantna *ISPAID* baza tala Iowe (*Iowa Soil Properties and Interpretations Database*) koja koristi gotovo 110 parametara za kvantifikaciju kapaciteta produkcije i pravi je primjer moderne interpretacijske baze.

Na Poljoprivrednom fakultetu u Osijeku već dvadesetak godina *Vladimir Vukadinović*, prvi autor ovog udžbenika, kreira i razvija interpretacijsku bazu tala istočne Hrvatske kao i kompjutorske modele za potrebe analize, prognoze, planiranja poljoprivredne proizvodnje i provođenje mjera čuvanja tla. Interpretacijska baza temelj je razvoja ekspertnog sustava odlučivanja o racionalnoj gnojidbi ratarskih usjeva, povrća te višegodišnjih kultura, ali i kondicioniranja zemljišta, uklanjanja faktora ograničenja u proizvodnji i savjeta poljoprivrednim proizvođačima u duhu dobre poljoprivredne prakse. Nakon što se ALR_{xpd} kalkulatorom utvrdi potreba gnojidbe, uz mjere tehnološke i ekonomske optimizacije uzgoja planiranih usjeva i mjere popravke tla, podaci iz izlazne baze u dbf formatu vizualiziraju se tematskim kartama u GIS-u (slika 4.2.). Time je ostvareno najvažnije svojstvo informacijskog sustava da se nakon prikupljanja podataka, njihovog pohranjivanja, ažuriranja i analiziranja, kreiraju kvalitetne informacije potrebne za donošenje ispravnih odluka o korištenju zemljišta. Baza podataka o tlu i biljnoj proizvodnji kombinirana s prostornim podacima (karte zemljišta) uz implementaciju GIS tehnologije čini *zemljišni informacijski sustav* tala istočne Hrvatske za usjeve i posebno za trajne nasade.

4.1.1. Model procjene pogodnosti zemljišta za trajne nasade

S aspekta vrednovanja i zaštite zemljišta namijenjenog višegodišnjim nasadima, posebice vinogradarstvu, zbog potrebe za puno većim brojem informacija u odnosu prema uzgoju usjeva, GIS je postao nezamjenjiv alat za podršku procesu donošenja odluka. Naime, izbor terena za podizanje vinograda presudno utječe na prinos, kakvoću i profitabilnost u narednih 20 do 40 godina, koliki je eksploatacijski vijek takvog nasada. Stoga je izbor lokacije za sadnju vinograda izuzetno važan jer se pogreške u tom dijelu naknadno ne mogu ispraviti.

Vinova loza i vino su prirodan proizvod na čija svojstva snažno utječe velik broj agroekoloških uvjeta, a kombinacija vremenskih i prostornih varijabli, naročito promjenjivost tijekom vegetacije vinove loze, daje lokacijsku specifičnost i prepoznatljivost vinu. Stoga su za uzgoj vinove loze neobično važni lokalni agroekološki faktori, napose klima i tlo. Kako je *mezoklima* pod utjecajem topografije, ekspozicije, nagiba, barijera kretanju zraka (*mrazni džepovi*) i u

manjoj mjeri zemljišnog pokrivača (golo tlo, trava, usjev, skelet), tipa tla i vlage u tlu, sve su to značajni indikatori za procjenu pogodnosti zemljišta za zasnivanje trajnih nasada. Također, zbog izloženosti Suncu, temperaturi zraka, brzine vjetra i vlažnosti, potrebno je uzeti u obzir i mikroklimatske značajke koje su ovisne o tipu nasada, sklopu i međusobnom rasporedu voćaka, odnosno čokota, bujnosti loze i orezivanju. Za potrebe planiranja korištenja zemljišta koje će najbolje zadovoljiti potrebe ljudi, mudro je uključiti autohtono znanje jer lokalno stanovništvo obično ima vlastitu klasifikaciju pogodnosti poljoprivrednog zemljišta, koja ne mora biti društveno i ekonomski optimalna (zbog različitih interesa poljoprivrednika i šire zajednice kojoj pripadaju).

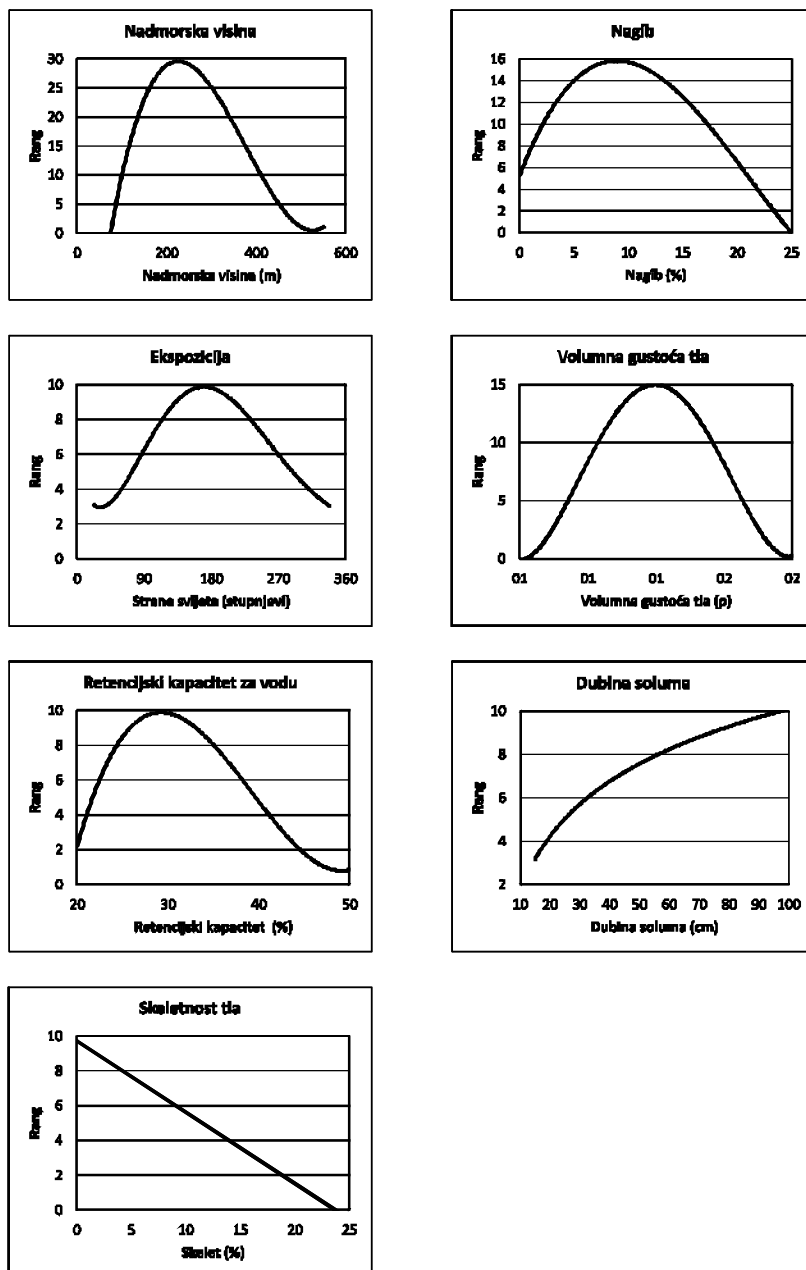
Izračun pogodnosti zemljišta za vinograde (*Vukadinović*, neobjavljeno) čine dvije grupe indikatora pogodnosti zemljišta:

- 1) Limitirajući (ukupno 100 bodova, indikatori koji isključuju sadnju vinograda)
 - a) Nadmorska visina (m), do 30 bodova (slika 4.6.)
 - b) Nagib (%), do 15 bodova
 - c) Ekspozicija ili aspekt (stupnjevi 0-360), do 10 bodova
 - d) Volumna gustoća tla (g cm^{-3}), do 15 bodova
 - e) Retencijski kapacitet za vodu (%), do 10 bodova
 - f) Dubina soluma (m), do 10 bodova
 - g) Skelet (%), do 10 bodova
- 2) Antropogeni (ukupno 100 bodova, indikatori koji se kondicioniranjem i uređenjem zemljišta mogu popraviti tako da zadovoljavaju dugoročno potrebe vinove loze)
 - a) pH-KCl, do 25 bodova
 - b) Humus (%), do 15 bodova
 - c) AL- P_2O_5 ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$), do 15 bodova
 - d) AL- K_2O ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$), do 15 bodova
 - e) KIK ($\text{cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$), do 10 bodova
 - f) CaCO_3 (%), do 20 bodova

Indikatori se mogu primjenjivati koristeći tablične vrijednosti ili pak kao nelinearne skor funkcije (slika 4.5.). Tablične vrijednosti indikatora dopuštaju primjenu ovog modela za različite agroekološke uvjete uzgoja vinove loze pri čemu je moguća promjena ranga (značaja indikatora) kao i njegovog trenda (tablica 4.4.).

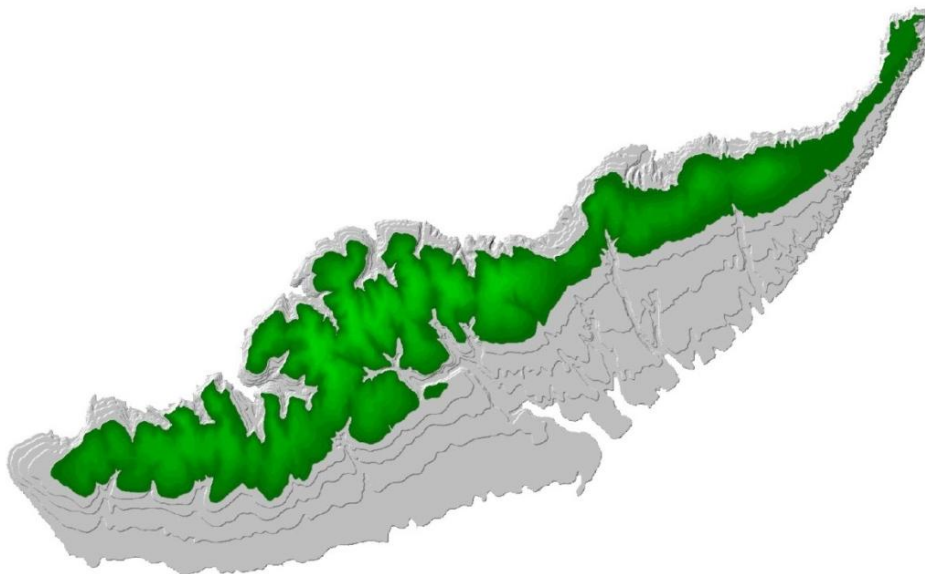
Za limitirajuće čimbenike, prosječna vrijednost mora biti ≥ 40 %, inače se zemljište klasira kao nepogodno za vinovu lozu. Antropogena grupa čimbenika (pH-KCl, karbonati, humus, KIK, AL- P_2O_5 i AL- K_2O) zapravo je korektivni faktor limitirajuće grupe indikatora pogodnosti zemljišta, ali najviše do 20 % (± 10 % u plus ili minus). Naime, zemljišta s malo humusa mogu se humizirati, kisela tla se mogu kalcizirati, a meliorativnom PK gnojdbom može (mora) se raspoloživost P i K podići do potrebne razine. Te mjere se preporučuju kao obvezne i to prije

duboke obrade, odnosno rigolanja pred sadnju. Nakon sadnje, podizanje razine organske tvari moguće je samo ograničeno u duljem periodu redovitom organskom gnojidbom, dok je kalcijaciju i unos većih količina P i K teško moguće izvesti bez većih oštećenja korijena.



Slika 4.5. Oblik skor funkcija i rang limitirajućih indikatora za vinovu lozu istočne Hrvatske (Vukadinović, neobjavljeno)

Opisana metodologija podržana kompjutorskim modelima i GIS-om pogodna je kako za procjenu pogodnosti zemljišta za određenu poljoprivrednu namjenu, naročito za *rajonizaciju* poljoprivrednog prostora, tako i za donošenje odluka, analize i planiranja segmenata poljoprivredne proizvodnje kao što je obrada, kondicioniranje, uređenje i dr.



Slika 4.6. GIS prikaz "sigurne zone" od mraza za vinovu lozu na Baranjskoj planini (> 125 m nadmorske visine, zeleno)

4.1.2. Model procjene pogodnosti zemljišta za obradu

Funkcionalni modeli moraju uvažavati funkcije, procese i relevantne indikatore kojima se kakvoća tla u odgovarajućem segmentu može definirati kao mjerljiva vrijednost (s relativno malom analitičkom ili mjernom greškom) uz primjenu metodologije (Vukadinović *et al.*, 2009.). Stoga je vrlo teško kreirati učinkovit i ujedno pouzdan model procjene pogodnosti tla za obradu pa takvih modela za procjenu pogodnosti obrade tla ima vrlo malo i uglavnom se temelje na samo nekoliko indikatora. Npr., unutar interpretacijske baze ISPAID (Iowa State University, 2006.) samo su dva indikatora za procjenu pogodnosti obrade tla (*Tilt Rating and Power Index*), a temelje se na sadržaju gline, praha i pijeska, udjelu organske tvari i dreniranosti tla. Bogunović *et al.* (1998.) daju prikaz pogodnosti zemljišta Hrvatske utemeljen na malobrojnim i nedovoljno pouzdanim podacima *Osnovne pedološke karte RH*. Na ovom mjestu se ukratko izlaže novi, originalni koncept procjene pogodnosti zemljišta za obradu (Vukadinović i Jug, 2010.).

Kako je model tek aproksimacija stvarnosti, uključeni su samo relevantni aspekti procjene pogodnosti zemljišta za obradu na temelju raspoloživih podataka *Namjenske pedološke karte Hrvatske* i kemijske analize tla čiji su uzorci geolocirani uz pomoć GPS-a (ukupno 17.500 uzoraka):

- 1) Opća obradivost (5 klasa temeljem tipa tla, f1),
- 2) Obradivost kod nepovoljnog stanja vlažnosti (3 klase temeljem tipa vlaženja tla, f2),
- 3) Indeks potrebne snage (3D funkcija koja objedinjuje volumnu gustoću tla i sadržaj organske tvari u njemu, f3),
- 4) Primjenjivost direktne sjetve (3 klase temeljem fizikalnih svojstava tipa tla, f4),
- 5) Automorfni (uključuje i pH) ili hidromorfni tip tla (4 klase, logična funkcija, f5)
- 6) Načib terena (6 klasa temeljem nadmorske visine).

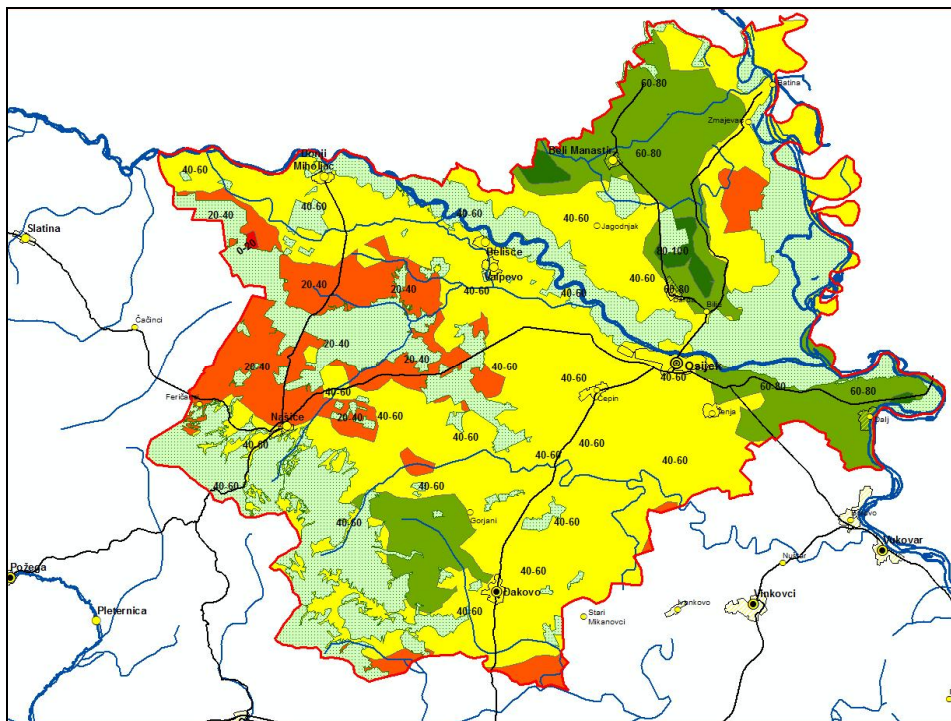
Prosječna pogodnost svih tala za obradu istočne Hrvatske procijenjena je opisanim modelom na 49,6 % (odgovara FAO klasifikaciji S3, ograničeno pogodno) uz relativno visok koeficijent variranja (Kv = 33,25 %, tablica 4.3. i slika 4.7.).

Tablica 4.3. Distribucija pogodnosti zemljišta za obradu Osječko-baranjske županije (ha)

Površina Osječko-baranjske županije	Klase pogodnosti zemljišta za obradu		
Površina poljoprivrednog zemljišta (ha)	300.007 (73 %)	N2	251 (0,08 %)
		N1	38.039 (12,7 %)
		S3	198.820 (66,3 %)
		S2	58.989 (19,7 %)
		S1	3.909 (1,30 %)
Površina šuma i šikara (ha)	112.198 (27 %)	413.923 ha (100 %)	

Međutim, vrlo je malo trajno nepogodnih tala (< 1 % i to samo močvarno glejno vertični tip), privremeno nepogodnih ima gotovo trećina (30 %), dok na S3 otpada gotovo polovica uzoraka (45 %), na S2 (umjereno pogodno) šestina (18 %), a izvrsnih tala (S1, vrlo pogodno) za obradu svega je 7 %. Geostatistička obrada krigingom ograničena je samo na Osječko-baranjsku županiju (slika 4.7., tablica 4.4.) gdje se i nalazi najveći broj analiziranih uzoraka tla te je utvrđena nešto drugačija distribucija pogodnosti za obradu u odnosu na prostor istočne Hrvatske. Naime, manje od 13 % je nepogodnih poljoprivrednih površina (FAO klasa pogodnosti N1 i N2, privremeno i trajno nepogodno), dok je dvije trećine svrstano u klasu S3 (ograničeno pogodno) što upućuje na niz mogućih problema

u obradi. Svega 21 % (obradivost klase pogodnosti S1 i S2) tala pripada u dobre i izvrsne površine za obradu.



Slika 4.7. Karta zemljišne pogodnosti za obradu Osječko-baranjske županije, obrada krigingom ~ 17.500 uzoraka (Vukadinović i Jug, 2010.).

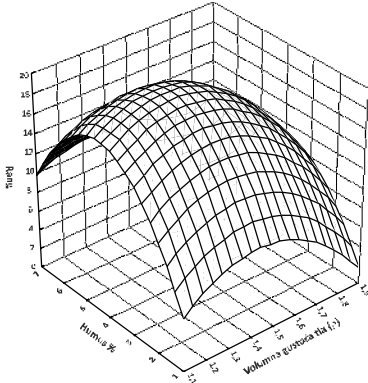
Agricultural Land Issues (Saskatchewan, Canada, 2009.) računa produktivnost tla primjenom sljedeće formule:

$$FR = ((C + OM + T + (P \times PAF) \times (-DEP) \times Phys) - Econ$$

- FR = konačna ocjena
- C = ocjena klime
- OM = organska tvar tla
- T = tekstura
- P = ocjena profila
- PAF = faktor prilagodbe profila
- DEP = faktor dubine
- Phys = fizikalni čimbenici
- Econ = ekonomski čimbenici

Elementi modela procjene pogodnosti za usjeve prikazani su u poglavlju o utvrđivanju potreba u gnojidbi.

Tablica 4.4. Model procjene pogodnosti zemljišta kombiniranim pristupom (korištenje tablice rangova, 3D funkcije i logičkog izraza)

<u>Opća obradivost (f1)</u>	<u>rang</u>
1) tla pogodna za obradu	15
2) tla umjereno pogodna za obradu	10
3) tla ograničeno pogodna za obradu	5
4) tla privremeno nepogodna za obradu	2
5) tla trajno nepogodna za obradu	0
<u>Obradivost kod nepovoljnog stanja vlažnosti (f2)</u>	<u>rang</u>
1) može se obrađivati u širokom rasponu stanja vlažnosti	25
2) može se obrađivati unutar optimalne vlažnosti	10
3) može se obrađivati unutar uskih granica ("minutna tla")	5
<u>Funkcija indeksa potrebne snage za obradu (f3)</u>	
	
<u>Primjenjivost direktne sjetve (No-tillage) (f4)</u>	<u>rang</u>
1) bez ograničenja	10
2) nakon agrotehničkih i hidrotehničkih mjera popravka	7
3) trajno ograničenje	4
<u>Indeks načina vlaženja tla (f5)</u>	
IF (tip tla = automorfan and pH-KCl > 5) THEN rank = 20 ELSE rank = 0 ELSEIF (tip tla = hidromorfan AND pH-KCl > 5) THEN rank = -5 ELSE rank = -10 ENDIF	
<u>Nagib terena (procjena temeljem nadmorske visine u m) (f6)</u>	<u>rang</u>
0	10
100	8
150	6
200	4
250	2
500	1

4.2. TIPOVI TLA

S aspekta ishrane bilja tlo je živi, dinamičan izvor hraniva nužan za život biljaka, koji čine fizikalna sredina specifičnih kemijskih i bioloških svojstava tipičnih za pojedine prirodne i antropogenizirane tipove tala. U prirodnim ekosustavima (npr. šumskim) kakvoća tla je njegova inherentna sposobnost održavanja biljne i životinjske produktivnosti. Međutim, razoravanjem djevičanskih tala i njihovim višegodišnjim korištenjem u biljnoj proizvodnji uz primjenu potrebnih agrotehničkih i hidrotehničkih mjera, tip tla, odnosno njegova pedološko-sistematska oznaka, ni u kojem slučaju ne može biti odrednica primarne organske produkcije nekog tla. Naime, prirodna svojstva nekog tla mogu se znatno unaprijediti ili čak bitno izmijeniti u funkcionalnom smislu sve do razine koja opravdava ulaganje i omogućuje profit biljne proizvodnje. Dakle, poboljšanja biljno-hranidbenog kapaciteta tla, kao supstrata biljne ishrane, treba isključivo promatrati u agrokemijskom, a nikako u pedološkom smislu.

Funkcioniranje plodnog tla je blizu optimalnog kapaciteta sadržaja i kruženja hraniva koja omogućavaju biljkama rast i djelotvorno iskorištenje hraniva. U zdravom tlu hraniva se nalaze u pristupačnom obliku te ih biljke koriste prema svojim potrebama. U takvom tlu postoji minimalna opasnost od ispiranja hraniva, erozije ili gubljenja hraniva volatilizacijom. Hraniva se kreću u zoni korijenovog sustava te smanjuju potencijalnu kontaminaciju okoline.

4.2.1. Osnove hrvatske klasifikacije tala

Ne ulazeći preduboko u pedološku sistematiku naših tala, s obzirom na predmet izučavanja ishrane bilja i razmatranje tla kao supstrata biljne ishrane, u sljedećem poglavlju izložene su osnove Hrvatske pedološke sistematizacije tala, a zatim je dan kratak prikaz najčešće korištenih tipova tla s aspekta njihovog prirodnog i agrološkog potencijala produktivnosti, navođenjem faktora ograničenja i mjerama njihove popravke.

Odjel automorfnih tala

1. Klasa nerazvijenih tala (A)-C profila. Tipovi:
 - a) Kamenjar (*Litosol*)
 - b) Sirozem (*Regosol*)
 - c) Eolski pijesak (*Arenosol*)
 - d) Koluvijalno tlo (*Koluvium*)
2. Klasa humusno akumulativnih tala A-C profila. Tipovi:

- a) Vapnenačko-dolomitna crnica (*Kalkomelanosol*)
 - b) Rendzina (*Rendzina*)
 - c) Humusno-silikatno tlo (*Ranker*)
 - d) Černoze (*Černoze*)
 - e) Smonica (*Vertisol*)
3. Klasa kambičnih tala A-(B)-C profila. Tipovi:
 - a) Eutrično smeđe (*Eutrični kambisol*)
 - b) Distrično smeđe (*Distrični kambisol*)
 - c) Smeđe krečnjačko (*Kalkokambisol*)
 - d) Crvenica (*Terra rosa*)
 4. Klasa eluvijalno iluvijalnih tala A-E-B-C profila. Tipovi:
 - a) Lesivirano (*Luvisol*)
 - b) Podzol (*Podzol*)
 - c) Smeđe podzolasto (*Brunipodzol*)
 5. Klasa antropogenih tala P-C profila. Tipovi:
 - a) Rigolano (*Rigosol*)
 - b) Vrtno (*Hortisol*)
 6. Klasa tehnogenih tala građe profila I-II-III...Tipovi:
 - a) Tlo deponija (*Deposol*)
 - b) Flotacijski materijal (*Flotisol*)
 - c) Nanosi iz zraka (*Aeroprecipitati*)

Odjel hidromorfnih tala

1. Klasa pseudoglejnih tala A-Bg-Eg-C profila. Tip:
 - a) Pseudoglej
- 2) Klasa nerazvijenih hidromorfnih tala građe (A)-I-II. Tip:
 - a) Aluvijalno tlo (*Fluvisol*)
- 3) Klasa semiglejnih tala A-C-G profila. Tip:
 - a) Fluvijativno livadsko tlo (*Humofluvisol, Semiglej*)
- 4) Klasa glejnih tala A-G profila. Tipovi:
 - a) Pseudoglej-glejno
 - b) Ritska crnica (*Humoglej*)
 - c) Močvarno glejno (*Euglej*)
- 5) Klasa tresetnih tala T-G profila. Tipovi:
 - a) Izdignuti (visoki) treset
 - b) Prijelazni treset
 - c) Niski treset
- 6) Klasa antropogenih tala P-G profila. Tipovi:
 - a) Tla rižišta

- b) Rigolano tresetno
- c) Hidromeliorirano

Odjel halomorfnih tala

1. Klasa akutno zaslanjenih tala Asa-G ili Asa-CG profila. Tip:
 - a) Solončak
2. Klasa soloneca A-Bt,na - C profil: Tip:
 - a) Solonec

Odjel subakvalnih tala

1. Klasa nerazvijenih subakvalnih tala (A) - C ili A-G profila. Tip:
 - a) Protopedon
2. Klasa subakvalnih tala A-C ili A-G profila. Tipovi:
 - a) Gitja (*Gyttja*)
 - b) Daj (*Dy*)
 - c) Sapropel (*Sapropel*)

4.2.2. Sirozem (*Regosol*)

Sirozemi su nerazvijena tla (A)-C građe profila. Nastaju erozijom soluma ranije formiranih tala, najčešće na rastresitom matičnom supstratu (eruptivi zrnaste strukture, les, lapori, karbonatni pješčenjaci, kristalasti dolomiti). Uništavanjem prirodne vegetacije i neracionalnom obradom čovjek u znatnoj mjeri ubrzava procese erozije te se javlja kao dominantan čimbenik u njihovom nastajanju. Uz to i klima s povećanom količinom oborina može ubrzati eroziju, ali i u aridnijim uvjetima omogućiti intenzivniju mineralizaciju, koja dovodi do evoluiranja u razvijena tla. Svojstva sirozema ovise isključivo o prirodi matičnog supstrata. Najpovoljnija fizikalna i mehanička svojstva imaju sirozemi nastali na lesu. To su dobro aerirana, relativno topla i ocjedita tla. Sadržaj humusa je nizak (< 1 %). Kemijska svojstva su isključivo vezana za tip matičnog supstrata. Silikatni regosoli su nekarbonatni, odnosno, neutralnu reakciju imaju regosoli na bazičnim supstratima, a kiselu regosoli nastali na trošini kiselih stijena. Najzastupljeniji podtip su silikatno-karbonatni regosoli s 10-20 % CaCO_3 , a $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) = 7,8-8,5$. U sastavu adsorpcijskog kompleksa ovog podtipa dominiraju Ca^{2+} i Mg^{2+} ioni.

Sirozemi u intenzivnoj poljoprivrednoj proizvodnji su zemljišta vrlo dobrih proizvodnih sposobnosti. Na rastresitim supstratima je omogućen nesmetan razvoj korijena. Prije podizanja plantažnih nasada voćnjaka i vinograda potrebno je provesti protuerozijske zaštitne mjere (terasiranje, zatravljanje međurednog prostora, obrada po izohipsama, malčiranje, konturna obrada i sadnja). Uz redovnu gnojidbu mineralnim gnojivima, prvenstveno dušičnim i fosforim, organska gnojidba dodatno popravljiva fizikalno-mehanička svojstva. U jako karbonatnim regosolima može doći i do imobilizacije željeza uslijed debalansa omjera Ca:Mg, što rezultira pojavom kloroze. Posljedice se mogu ublažiti izborom kalcifilnih biljaka (npr. podloge vinove loze koje mogu podnijeti visoke koncentracije CaCO_3), unošenjem magnezija, željeza i sumpora. U sušnim klimatima regosole zaštićene od erozije treba navodnjavati umjetnim kišenjem, naročito na nagnutim terenima. Od velike pomoći je produbljivanje oraničnog sloja, što je relativno lako zbog rastresitog supstrata.

Regosoli rigolani dublje od 60 cm prilikom podizanja trajnih nasada postaju antropogena tla, odnosno Rigosoli.

4.2.3. *Koluvijalno tlo (Koluvium)*

Koluviji, kao nerazvijena ili slabo razvijena tla, imaju građu profila (A)-C ili Ap-C. Produkti su akumulacije transportiranog materijala u podnožju padina najčešće vodom (bujice, površinski tokovi). U njihovom nastanku vrlo važnu ulogu ima čovjek uništavanjem prirodnog biljnog pokrivača uz zanemarivanje protuerozijskih zaštitnih mjera. Osim toga, intenzivna obrada onemogućava evoluciju, jer ih kontinuirano održava u inicijalnoj fazi. Antropogenizacija rigolanjem, terasiranjem, navodnjavanjem ili uklanjanjem suvišnog skeleta omogućava stvaranje Ap horizonta. Zbog slojevite građe i različitog podrijetla transportiranog materijala pokazuju veliku prostornu heterogenost teksture, jednako i po dubini profila. Količina skeleta i krupne sitnice najveća je na gornjim dijelovima koluvijalnih konusa. Donji dijelovi su najčešće pjeskovito ilovaste, ilovaste i pjeskovite teksture. To su uglavnom laka, ocjedita, toplja i dobro aerirana tla niskog kapaciteta za vodu, zbog čega lako stradavaju od suše. Kemijska svojstva ovise im o mineraloškom sastavu pretaloženog materijala. Svi koluviji su siromašni humusom, svega 1-2 % u inicijalnom horizontu. Reakcija može biti kisela (isprani karbonati u starijim tlima), neutralna i slabo alkalna (karbonatni i silikatni podtipovi). Općenito, koluviji su tla s malim količinama ukupnog dušika i malo nitrata, slabo opskrbljena fosforom, ali dobro opskrbljena kalijem.

Produktivna sposobnost i način korištenja koluvija ovise o vrsti transportiranog materijala. Tako su skeletni koluviji na vrhovima konusnih nanosa neplodna tla korištena eventualno kao pašnjaci. Kod oglejenih koluvija na nižim terenima

treba provesti odvodnju suvišnih voda, jer zbog plitkih podzemnih voda može doći do zamočvarivanja ili zaslanjivanja. Koluviji s prevagom sitnice i naročito dubokom podzemnom vodom intenzivno se koriste u poljodjelskoj proizvodnji. Na površinama bez navodnjavanja prevladava uzgoj ratarskih kultura. Mjere koje se mogu primijeniti za povećanje produktivnosti su: zaštita od erozije, navodnjavanje, humizacija, melioracijska gnojidba mineralnim gnojivima, produbljivanje oraničnog sloja, regulacija potoka i rijeka na nagnutim terenima brdskog područja.

4.2.4. Černozem

Sklop profila černozema je Amo-AC-C. Nastaje u područjima kontinentalne (stepske aridne do semiaridne) klime s hladnim i suhim zimama, vlažnim proljećima te suhim i toplim ljetima. Kontinentalna klima naše regije vlažnija je od klime tipične ukrajinske černozemne zone. Međutim, prosječna količina oborina od 600-650 mm godišnje s temperaturom 10-11 °C i evaporacijom oko 710 mm godišnje, stvara izvrsne preduvjete za genezu černozema. Bujan razvoj stepske i livadno-stepske travne vegetacije tijekom proljeća, zbog zaliha zimske vlage, usporava i staje s početkom suhog i toplog ljeta. Suha klima u ljetnim mjesecima i niske temperature zimi značajno usporavaju mineralizaciju organske tvari u tlu, dok se najintenzivnija humifikacija i akumulacija humusa odvija u vlažnijim periodima godine. Matični supstrat je prapor (les), aluvijalni nanosi, pijesak i pjeskoviti les. Formira se na ravnim reljefnim oblicima: lesni platoi na 90-140 m nadmorske visine, lesne terase na 70-90 m i suhe riječne terase ispod 70 m n.m. Geneza tipičnog černozema je vezana za lesne platee i les bogat karbonatima (20-30 % CaCO₃). Les kao matični supstrat povoljno utječe na fizikalna svojstva tala, jer je ilovaste teksture, rastresit, porozan i ocjedit. Les na terasama prolazi kroz djelomičnu metamorfozu te postaje glinast, oglejen ili alkaliziran. U tipičnim černozemima nema utjecaja podzemnih voda, koje su na lesnim platoima dubine 10-40 m, a na terasama 3-5 m. U mikrodepresijama je moguće oglejavanje dubljih slojeva, a ako su podzemne vode plitke i zaslanjene, dolazi do zaslanjivanja i alkalizacije.

Černozemi imaju povoljna fizikalno-mehanička svojstva. Na lesnim platoima su ilovaste teksture, na terasama glinasti, a najbogatiji glinom su izluženi (nekarbonatni u A horizontu) i oglejeni podtipovi. Struktura je stabilna mrvičasta, a vodnozračni i toplinski režim su izvrsni. Odnos krupnih i sitnih pora je najpovoljniji 3:2. To su duboka tla sa solumom debljine 60-120 cm, rastresita, ocjedita, umjereno zbijena, nisu ljepljiva u vlažnom stanju, pri obradi se lako drobe i ne pružaju veliki otpor te se kvalitetno mogu obrađivati u velikom intervalu vlažnosti. Biljke se lako ukorjenjuju i imaju vrlo dubok i razgranat korijenov sustav. Sadržaj humusa naših černozema je 2-5 %, a C/N odnos je oko

10. Većina tala je karbonatna već od površine s 3-20 % CaCO_3 u oraničnom sloju do 35 % u prijelaznom, AC. Reakcija karbonatnih černozeza je slabo alkalna ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) = 7,5-8,5$), a kod ostalih neutralna. KIK je 30-35 $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$, a zasićenost adsorpcijskog kompleksa bazama je jako visoka ($> 85 \%$, a u karbonatnim podtipovima i preko 97 %). Opskrbljenost ukupnim dušikom u našim černozezima je relativno dobra (0,16-0,30 %). Fosfora, kako mineralnog tako i organskog, ima dovoljno. Opskrbljenost kalijem je osrednja.

Černozeze je jedno od najplodnijih tala, međutim u uvjetima niske agrotehnike i semiaridne klime (suša barem jedan mjesec tijekom godine) prinosi znatno variraju. Visoka plodnost je odlika karbonatnih, izluženih i oglejenih černozeza, a najnižu imaju zaslanjeni, alkalizirani i erodirani varijeteti. Intenzivnim korištenjem u proizvodnji hrane, uz relativno nisku agrotehniku, plodnost se smanjuje. Značajno opada sadržaj humusa i hraniva, pogoršava se struktura tla, javlja erozija, a kod nekih varijeteta i plitke podzemne vode. Stoga je u intenzivnoj eksploataciji černozeza dobro uvesti gnojdbu stajnjakom, plodored s višegodišnjim travama zbog sprječavanja pogoršavanja fizikalnih svojstava te tako usporiti procese mineralizacije organske tvari. Također, produbljivanje oraničnog sloja u kombinaciji s organskom gnojdbom značajno smanjuje opasnost stvaranja "tabana pluga", zbijenost i poboljšava procjeđivanje vode, a kako su černozezi nalaze u semiaridnoj klimatskoj zoni u blizini velikih rijeka, navodnjavanje je efikasna mjera protiv suše i dr.

4.2.5. *Eutrično smeđe tlo (Eutrični kambisol)*

Građa profila eutrično smeđeg tla je A-(B)v-C ili A-(B)v-R. Ovaj tip tla nastaje u semiaridnom do semihumidnom području s prosječnom godišnjom količinom oborina 600-700 mm i srednjom temperaturom 10-12 °C. Geneza je vezana za valovite, brežuljkaste i brdovite reljefne oblike (100-500 m nadmorske visine) na različitim matičnim supstratima: les, ilovasti jezerski i riječni sedimenti, te neutralne i bazične eruptivne stijene. Prirodna vegetacija su listopadne šumske zajednice. Dobra prirodna drenaža omogućava infiltraciju oborinskih voda u dublje dijelove profila. Pritom na karbonatnim supstratima dolazi do ispiranja CaCO_3 iz soluma u procesu dekarbonatizacije. Na nekarbonatnim supstratima, uslijed ispiranja javlja se blaga acidifikacija soluma. Ipak, dominantan pedogenetski proces u eutričnim kambisolima je proces argilosinteze, tijekom kojeg se formiraju sekundarni alumosilikati u kambičnom ili (B)v horizontu. U mlađim tlima moguća je pojava pothorizonta (B)ca ili Cca u kojem se akumulira CaCO_3 ispran iz soluma. Eutrično smeđa tla su duboka (izuzev skeletnih podtipova), sa solumom debljine 50-100 cm. Tekstura je ilovasta do ilovasto glinasta u kambičnom horizontu. Stabilna graškasta do orašasta struktura preduvjet je povoljnih vodozračnih odnosa cijelom dubinom profila. Osrednjeg

je kapaciteta za vodu s vrijednostima 35-40 %. Kemijska svojstva su također povoljna. Eutrično smeđa tla su bogata bazama cijelom dubinom profila. U mladim tlima reakcija u humusno akumulativnom horizontu obično je neutralna, a ponekad čak i slabo alkalna ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) = 6,5-6,8$). Pošto je u (B)v horizontu uznapredovao proces dekarbonatizacije, pH u vodi se može spustiti do 5,5. Sadržaj humusa je u šumskim tlima 2-6 %, a na oranicama svega 1-3 %. Radi se o zreлом humusu (*mull tip*) sa C/N odnosom 9-14. Kapacitet adsorpcije kationa je u rasponu 20-40 $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$. Količina ukupnog dušika varira (0,1-0,3 %), biljkama pristupačnog fosfora ima malo, a kalija osrednje. Uza sve to treba naglasiti da je biološka aktivnost izuzetno velika.

Eutrično smeđa tla su dobre do izvrsne plodnosti ovisno o dubini profila, evolucijskoj starosti, stupnju erozije, antropogenom utjecaju i sl. Najplodniji su podtipovi na lesu i aluvijalnim nanosima. U intenzivnoj poljoprivrednoj proizvodnji može se pojaviti niz problema: pogoršana struktura uslijed neadekvatne obrade, niski sadržaj humusa i hraniva, moguća izražena teksturna diferencijacija unutar profila, manjak vode u sušnim uvjetima i erozija. Rješenje je moguće primjenom niza melioracijskih mjera: poboljšanje strukture i intenzivna gnojidba organskim gnojivima uz uvođenje u plodored višegodišnjih trava i siderata; intenzivna gnojidba mineralnim gnojivima, naročito dušičnim i fosfornim, dok kalij treba dodati u većim dozama samo kod uzgoja kaliofilnih biljaka ili u intenzivnoj proizvodnji uz navodnjavanje; produbljivanje oraničnog sloja može se provesti jednokratno miješanjem A i (B)v horizonata uz pojačanu gnojidbu; navodnjavanje, naročito u proizvodnji visokoprofitabilnih kultura; protuerozijske zaštitne mjere su od velikog značaja za plantažne nasade (terasiranje, konturna obrada, oranje po izohipsama, pravilan plodored, međuredno zatravljivanje) i dr. Od ukupnih površina ovih tala čak 80-90% koristi se u intenzivnoj poljoprivrednoj proizvodnji, a svrstavaju se i u vrlo pogodna zemljišta za voćarsku i vinogradarsku proizvodnju.

4.2.6. Crvenica (*Terra rosa*)

Sklop profila crvenice je A-(B)rz-R. Nastanak ovog tipa tla usko je vezan za uvjete mediteranske klime s prosječnom temperaturom zraka iznad 12 °C, godišnjom količinom oborina preko 1.000 mm, toplim i vlažnim zimama i obveznim suhim ljetnim periodom. Crvenice se formiraju u krškom, najčešće, brdskom reljefu u kojem dominiraju čvrsti vapnenci i dolomiti. Prirodna vegetacija su šume hrasta crnike, crnog bora, hrasta medunca te njihovi različiti degradirani oblici (makija i garig). Za genezu crvenica je bitan proces *rubifikacije* tijekom kojeg dolazi do dehidratacije i kristalizacije oksida željeza koji se oslobađaju iz vapnenaca kao netopljivi ostatak. U vlažnom se periodu intenzivno ispiru karbonati i akumulira reziduum, a u suhom se odvija dehidratacija te dolazi do kristalizacije hematita

(Fe_2O_3). S obzirom da nastaju na čvrstoj stijeni, crvenice su uglavnom skeletna i plitka tla, iako solum može biti i do 80 cm dubine. Humusno akumulativni horizont je tamne crvenosmeđe boje, a kambični, (B)rz, izrazito crvene. Prema mehaničkom sastavu to su glinasto ilovasta do glinasta tla s 30-50 % gline, osrednjeg kapaciteta za vodu. Struktura je poliedrična i stabilna. Crvenice su ocjedite, dobrih vodozračnih svojstava, sa sadržajem humusa 1-2 %. U većini slučajeva to su nekarbonatna tla, ali u kontaktu s flišnim naslagama može doći do sekundarne akumulacije CaCO_3 u manjim količinama. Reakcija je neutralna do slabo kisela. Zasićenost bazama, među kojima dominiraju kalcijeve i magnezijeve, iznad je 80 %. Kapacitet adsorpcije kationa dosta je visok, 35-60 $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$. Usljed niskog sadržaja humusa tla su siromašna dušikom. Opskrbljenost fiziološki aktivnim fosforom vrlo je niska (oko 1 mg 100 g^{-1} tla), jer u prisutnosti većih količina seskvi oksida dolazi do fiksacije fosfora. Sadržaj kalija je osrednji (10-20 mg 100 g^{-1} tla).

Crvenice su osrednjih proizvodnih sposobnosti. Budući su to plitka tla s puno skeleta, lako stradavaju od suše. Glavne mjere popravke su: humizacija, intenzivna gnojdba fosfornim i dušičnim gnojivima, borba protiv suše navodnjavanjem, protuerozijske mjere zaštite tla od erozije vodom i vjetrom. Koriste se u intenzivnom uzgoju niza poljoprivrednih kultura (duhan, vinova loza, voće i povrće), a dug vegetacijski period u mediteranskom području omogućava da se uz navodnjavanje dobiju i dvije žetve godišnje.

4.2.7. *Lesivirano tlo (Luvisol)*

Lesivirana tla su građe A-E-Bt-C. Nastaju u područjima umjereno tople semihumidne do humidne klime s prosječnom količinom oborina iznad 650 mm godišnje i srednjom temperaturom zraka 8-11 °C. Matični supstrati su pretežito ilovasti s više od 10 % gline ili rahle stijene čijim raspadanjem se može formirati dublji ilovasti profil. To su: les, pleistocenske ilovine, terciarni jezerski sedimenti lakše teksture, stariji koluvijalni i aluvijalni nanosi. Reljefni oblici na kojima nastaju su stare riječne i jezerske terase, zatravnjene i blaže valovite forme na nadmorskoj visini 100-700 m. Prirodna vegetacija su uglavnom iskrčene mezofilne listopadne šume. Za luvisole je karakterističan proces eluvijalno-iluvijalne migracije. Suština je ispiranje čestica gline (lesiviranje) s bazama, najčešće kalcija i magnezija, descendnim tokovima vode iz humusno akumulativnog i eluvijalnog horizonta. U iluvijalnom *argiluvičnom* horizontu (Bt) dolazi do njihove akumulacije. Preduvjet ovih procesa je blago zakiseljavanje, što znači da se odvijaju u uvjetima umjerene do slabe kiselosti ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) = 5,0-6,5$). Svojstva lesiviranih tala su u direktnoj vezi sa supstratom. Najbolje uvjete za ukorjenjivanja biljaka imaju luvisoli nastali na lesu (tipični luvisol), pleistocenskim ilovinama i silikatnim supstratima. S obzirom na oštro izraženu

teksturnu diferencijaciju profila svojstva svakog horizonta su specifična. Debljina soluma najčešće je u granicama 55-120 cm. Površinski horizonti su, prema teksturi, pjeskovite ili praškaste ilovače, a Bt glinaste ilovače. Struktura je stabilna mrvičasta u A horizontu do orašasta, odnosno grudvasta u Bt. Zbog uznapredovanog procesa lesiviranja eluvijalni horizont može biti bestrukturan. Sadržaj humusa je do 2 %, a C/N odnos 10-20. KIK je nizak ($10-20 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$). Luvisoli su srednje opskrbljeni dušikom i kalijem, a sadržaj pristupačnog fosfora vrlo im je nizak.

Proizvodna sposobnost, odnosno plodnost lesiviranih tala, ovisi o intenzitetu procesa lesiviranja. Ako je proces slabo izražen, tla su plodnija jer je omogućeno zadržavanje vlage i baza u Bt horizontu, slabija je zbijenost i lakši prodor korijena. Međutim, intenziviranje eluvijalno-iluvijalne migracije, s aspekta poljoprivredne proizvodnje, praćeno je nizom negativnih posljedica: pad sadržaja humusa i stabilnosti strukturnih agregata, pojačano zbijanje Bt horizonta uz slabu perkolaciju vode, pojačana acidifikacija, ubrzanje erozije na padinama. Iz tog razloga u intenzivnu poljodjelsku proizvodnju treba uvesti agrotehničke mjere popravke. Dubokim oranjem (barem do 40 cm), izmiješat će se A, E i djelomično Bt horizont. Tako će se smanjiti zbijenost, poboljšati vodopropusnost, a dio aktivnih koloida i baza vratiti će se u oranični sloj što će usporiti acidifikaciju. Obzirom na nedostatne količine hraniva preporučljivo je duboko oranje kombinirati s visokim dozama dušičnih i fosfatnih gnojiva (uz kalcizaciju kad je to potrebno), a za neke kulture i kalijevim gnojivima. Kalcizaciju, kao mjeru kemijske popravke, najčešće nije potrebno provoditi. Na valovitim se reljefnim oblicima antropogenizacijom potiče erozija, stoga je potrebno na padinama u agrotehniku uključiti i uobičajene protuerozijske mjere.

4.2.8. *Rigolano tlo (Rigosol)*

Rigosoli su tla potpuno izmijenjene prirodne građe sa sklopom profila P-C. Nastaju rigolanjem (miješanjem) dva ili više genetskih horizonata i slojeva do najmanje 60 cm dubine. Rigolanje je mjera koja se najčešće primjenjuje prilikom podizanja plantažnih nasada vinograda ili voćnjaka s ciljem homogeniziranja oraničnog sloja do određene dubine. Na taj se način mogu u velikoj mjeri promijeniti svojstva izvornog tipa tla (sirozem, koluvij, rendzina, crvenica, eutrični kambisol, luvisol, pseudoglej), kao što su: pH, dubina, vodnozračni režim, struktura, tekstura, sadržaj humusa, zbijenost i sl. Rigolani P sloj je obično dubine 50-80 cm, a ponekad i do 120 cm. Vodni režim im je često neujednačen. Kemijska svojstva su određena mineraloškim sastavom izvornog tipa tla.

Produktivnost rigosola može postati vrlo visoka ako se rigolanje izvrši u kombinaciji s melioracijskom gnojidbom mineralnim i organskim gnojivima,

sredstvima za kalcizaciju te primijene protuerozijske zaštitne mjere (terasiranje, međuredno zatravljivanje, konturna obrada i sadnja).

4.2.9. Pseudoglej

Građa profila je A-Eg-Bg-C. Formira se na teksturno diferenciranim supstratima, što znači da se ispod relativno propusnog površinskog sloja na dubini 30-40 cm nalazi nepropustan horizont. Stoga dolazi do suficitarnog vlaženja površinskih dijelova soluma stagnirajućom površinskom, najčešće oborinskom vodom i geneze pseudoglejnog (g) horizonta. Formira se u uvjetima semihumidne i humidne klime (> 650 mm oborina godišnje), na ravničarskim i valovitim reljefnim oblicima s blagim nagibima. Geološka podloga su duboki rastresiti sedimenti s prirodnim pokrovom hrastovo-grabovih šuma. Kod pseudogleja jasno se razlikuju tri faze: mokra – tlo je saturirano vodom u periodu zima-proljeće, dominiraju redukcijski procesi pa reducirani Fe^{2+} i Mn^{2+} spojevi, kao lakopokretljivi, migriraju u dublje dijelove profila; vlažna – sadržaj vode je između poljskog vodnog kapaciteta i točke uvenuća; suha – sadržaj vode pada ispod točke uvenuća, dominiraju oksidacijski procesi, a reducirane forme željeza i mangana prelaze u oksidirane te se talože u vidu konkrecija tamnosmeđe do crne boje. U pseudogleju nema oštre podjele na oksidacijski i redukcijski horizont. Umjesto toga nastaje morfološki specifičan pseudoglejni horizont (mramorirani izgled) kao posljedica naizmjeničnog smjenjivanja mokre i suhe faze. Površinski horizonti (A i Eg) su, prema teksturi, praškaste ilovače s više od 40 % praha, a pseudoglejni (Bg) glinaste ilovače. Zbog slabo izražene strukture i puno praha površinski sloj pseudogleja se vrlo često u mokroj fazi pretvara u kašastu masu, koja isušivanjem postaje tvrda i vrlo kompaktna. Najviše pora ima A horizont, a pseudoglejni je praktično nepropustan za vodu s niskim kapacitetom za zrak (3-6 %). Sadržaj humusa je 1-3 % i naglo opada s dubinom. Ukupnog dušika ima malo (~ 0,1 %) jer su procesi fiksacije dušika, amonifikacije i nitrifikacije vrlo slabi, a i znatne se količine nitrata gube iz tla denitrifikacijom. C/N odnos je 10-15, pH reakcija je slabo do umjereno kisela ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) = 5-6$). KIK je relativno malen, od 10-20 $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$ u površinskim horizontima, a do 30 $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$ u Bg. Zasićenost bazama je ispod 50 % što takva tla čini lošim izborom za uzgoj pojedinih usjeva, npr. šećerne repe, lucerne itd. Pseudogleji su siromašni fosforom zbog njegove kemijske fiksacije. Naime, u pseudoglejima slobodni fosfati grade Al i Fe-fosfate jer je humat efekt slabo izražen (nizak sadržaj, uglavnom kiselog humusa slabog kelatizirajućeg potencijala). Opskrbljenost kalijem je različita, često ispod 10 mg 100 g^{-1} tla (prema AL metodi).

Proizvodna sposobnost prirodnih, neuređenih, pseudogleja je niska. Obično se kao takvi koriste u ratarskoj proizvodnji, ali daju vrlo promjenjive prinose, koji

uvelike ovise o količini i rasporedu oborina te primijenjenoj agrotehnici. Međutim, u intenzivnoj proizvodnji, naročito voćarstvu i vinogradarstvu, uz meliorativnu gnojdbu i druge popravke pred zasnivanje nasada, pseudogleji mogu imati zadovoljavajuću do visoku produktivnost. Problem suvišnih površinskih oborinskih voda može se riješiti kombinacijom baulacije, drenažnih kanala i rigolanja minimalno na dubini 50-70 cm. Dubokim oranjem ili rigolanjem produbljuje se antropogeni P horizont miješanjem genetskih horizonata A, Eg i djelomično Bg. Tako se povećava vodopropusnost, poroznost, kapacitet za zrak, ubrzoava aeracija. Ovu mjeru je potrebno kombinirati s unošenjem melioracijskih doza fosfornih i kalijevih te organskih gnojiva (stajnjaka) uz kalcizaciju. Kod višegodišnjih nasada treba voditi računa o koncentraciji mikroelemenata i eventualnom debalansu nakon kalcizacije. Na ratarskim se površinama mogu provesti mjere podririvanja, krtičenja ili postavljanje cijevne drenaže. Od protuerozijskih mjera mogu se primijeniti terasiranje, zatravljivanje u plantažnim nasadima, konturna obrada i sadnja.

4.2.10. Aluvijalno (fluvijalno) tlo - Fluvisol

Aluvijalna tla predstavljaju recentne riječne, jezerske i morske nanose slojevite građe. Građa profila je (A)-I-II. Rasprostranjena su u nizinskim područjima uz velike vodotoke (riječni poloji). Tekućice, naročito za visokih vodostaja, nose sa sobom velike količine trošnog materijala, koji se tijekom poplava taloži na okolne terase. Sortiranje nošenog materijala odvija se duž vodotoka (od izvora prema ušću taloženje sve sitnijeg materijala), poprečno na smjer vodotoka (kod izlivanja uz obalu prvo se odlažu teže ili krupnije čestice, a lakše i sitnije voda odnosi dalje) i po dubini sedimentiranih slojeva. Svojstva fluvisola ovise o vrsti istaloženog materijala. Najlošija fizikalna svojstva imaju jako skeletni i jako glinasti aluviji, a najplodniji su ilovasti i pjeskovito ilovasti. Većinom su to porozna, vodopropusna, dobro aerirana tla stabilnih mikroagregata. Reakcija im je u rasponu od slabo kisele (nekarbonatni) do slabo alkalne (karbonatni). Opskrbljenost humusom je najčešće vrlo slaba (< 1 %), kao i fiziološki aktivnim fosforom i kalijem. S obzirom da su aluvijalna tla vrlo heterogena, i njihova produktivnost je različita, a najčešće se koriste u povrtlarskoj proizvodnji. Tipični aluviji su u klasi vrlo plodnih tala s dubokim fiziološki aktivnim profilom i podzemnom vodom na 1-2 m. Glavni ograničavajući čimbenik je poplava, nanošenje skeleta i pijeska, a u skeletnim i lakopropusnim pjeskovitim formama usjevi često stradavaju od posljedica suše. Stoga je bitno poduzeti barem neke hidromelioracijske zahvate kao što su: obrana od poplava, snižavanje razine podzemne vode kanalskom mrežom, navodnjavanje skeletnih i pjeskovitih formi i dr. Uz navodnjavanje je obvezna i humizacija te gnojdbu visokim dozama dušičnih i fosfornih gnojiva.

4.2.11. Fluvijativno livadsko tlo (*Humofluvisol, Semiglej*)

Humofluvisoli ili semigleji su građe A-C-G. Za ovaj je tip tla karakteristično vlaženje podzemnom vodom dubljom od 100 cm. Istovremeno se površinski dijelovi profila (A i C horizont) razvijaju u terestričnim uvjetima. Nastaju u dolinama velikih rijeka, a najčešće dominiraju u centralnim dijelovima riječnih poloja u negativnim reljefnim formama, na lesnim platoima i lesnim terasama. Prirodnu vegetaciju čine zajednice nizinskih šuma (hrasta lužnjaka, poljskog jasena, johe i sl.) ili livadskih trava. Matični supstrati su različiti karbonatni ili nekarbonatni riječni nanosi, najčešće ilovasti i glinasti, a na prostoru Panonske nizine pretaloženi les. Humusno akumulativni horizont je debljine 30-50 cm, tamnosive, tamnosmeđe ili crne boje. Ilovaste forme, nastale na tekturno lakšim aluvijalnim nanosima ili lesu, stabilne su mrvičaste strukture, dobrog kapaciteta za vodu, ocjedite i prozirne te bogatije organskom tvari. Kod glinastih formi vodnozračni režim je slabiji, struktura grudvasta, a moguća je i pojava vertičnosti. Sadržaj humusa je 3-5 %. Semigleji su obično karbonatni, a kod često plavljenih može doći do ispiranja CaCO_3 . Reakcija je slabo kisela (nekarbonatni varijeteti) do slabo alkalna. Ako su podzemne vode obogaćene lakotopljivim solima može doći do zaslanjivanja i alkalizacije. KIK je dobar (20-40 $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$), a ovisi o sadržaju gline i humusa. Opskrbljenost hranivima je dobra.

Proizvodna sposobnost humofluvisola je izvrsna te se mogu svrstati u kategoriju naših najplodnijih tala. To su duboka tla, dobro opskrbljena hranivima, dobrog vodozračnog režima. Terestrični uvjeti u površinskim slojevima omogućavaju veliku biološku aktivnost i akumulaciju organske tvari. Usjevi na humofluvisolima vrlo rijetko stradavaju od suše jer je u sušnijim periodima moguće dodatno vlaženje kapilarnim usponom podzemne vode.

Razoravanjem djevičanskog semigleja dobiju se visoko produktivna tla ukoliko su provedene potrebe hidrotehničke mjere (zaštita od poplava).

4.2.12. Ritska crnica (*humoglej*)

Građa profila ritskih crnica je Aa-Gso. To su duboka tla, rijetko plića od 150 cm. Geneza je vezana za doline naših velikih rijeka, reljefne depresije, ritove i dijelove riječnih terasa gdje je oscilacija u razini podzemnih voda ovisna o promjenama vodostaja rijeka. Matični supstrat su različiti fluvijativni nanosi ilovaste do glinaste teksture, pretaloženi les i eolski pijesci. Amplituda kolebanja podzemne vode je vrlo velika (od površine do minimalno 150 cm) što rezultira izmjenama aerobnih i anaerobnih uvjeta. U slučajevima kada su vode bogate solima, javljaju se procesi salinizacije i alkalizacije, a humogleji mogu evoluirati u halomorfna tla. Humusno akumulativni horizont je najčešće dubine 50-70 cm, a

ponekad i do 100 cm. Kod karbonatnih podtipova je crne boje i sitno grudvaste do grudvaste strukture, dok je kod nekarbonatnih jače naglašena siva nijansa u boji i poliedrična struktura. U pravilu, ritske crnice imaju nepovoljna fizikalna svojstva. Glinasta tekstura (30-40 % gline) je uzrok narušenih vodozračnih odnosa jer se voda vrlo sporo procjeđuje, a i količina krupnih pora je mala. Toplinski režim je nepovoljan (hladna tla). Kod teksturno najtežih varijanti (40-50 % gline) točka uvenuća je visoka (~ 25 %), a propusnost za vodu izrazito niska (oko 10^{-7} cm s⁻¹). Sadržaj humusa je 3-6 %, a C/N odnos 10-20. U karbonatnim podtipovima sadržaj karbonata se povećava s dubinom, a kreće se u rasponu 1-17 % u humusno akumulativnom do 30 % u glejnom horizontu. U vodi ritskih crnica pH je visok (7,5-8,5). Nekarbonatni podtipovi su neutralne reakcije. Vrijednosti KIK-a su visoke (20-50 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹), a zasićenost bazama iznad 85 %. Humogleji su vrlo dobro opskrbljeni dušikom i biljkama pristupačnim kalijem, a srednje fosforom. Međutim, na teksturno težim ritskim crnicima, kakve su kod nas u Baranji uz Dunav, vrlo je izražena fiksacija kalija pa kemijska analiza tla AL metodom može pokazivati zadovoljavajuću raspoloživost kalija, koji biljke ipak ne mogu usvojiti, posebice ljeti u sušnom periodu.

Produktivnost ritskih crnica je vrlo dobra, a većina poljoprivrednih površina pod ovim tlama je meliorirana te, uz spuštanje razine podzemne vode, humogleji lako evoluiraju u semiglejna tla (humofluvisole).

Mjere popravke humogleja su: zaštita od poplava, odvodnja, pravilna agrotehnika (duboka obrada, pravilan izbor trenutka obrade kod donje granice plastičnosti, borba protiv korova, gnojidba mineralnim gnojivima, naročito fosforom); popravak fizikalnih svojstava i u sušnim godinama navodnjavanje (ili ubacivanje vode crpkama u otvorenu kanalsku mrežu).

Za stabilne prinose, koji mogu dostići i znatno premašiti one na černozemima i semiglejima, potrebno je provesti niz hidrotehničkih i agrotehničkih zahvata. U prvom redu to je obrana od poplava, jer su ogromne štete u poplavnim godinama; zatim odvodnja suficitarnih voda, kao što je snižavanje razine podzemnih voda kanalskom mrežom i cijevnom drenažom; prorahljivanje, naročito teških glinastih formi za uređivanje vodozračnog režima i navodnjavanje u sušnijim godinama jer se razina vode jako spušta pa oranični sloj stradava od suše.

4.2.13. Močvarno glejno tlo (euglej)

Sklop profila euglejnih tala je Aa-Gso-Gr. Njihova pedogeneza se odvija na najnižim pozicijama riječnih terasa i u negativnim reljefnim formama s plitkom podzemnom vodom, koja je unutar 80 cm od površine. Obilježje ovom tipu tla daju izraženi hidromorfizam u humusno akumulativnom horizontu te jasna

diferencijacija glejnog horizonta na oksidacijski (Gso) i redukcijski (Gr) pothorizont. U profilu se vrlo jasno uočavaju tri zone. Donja zona (Gr) je konstantno zasićena vodom te u njoj prevladavaju redukcijski procesi. Dakle, odvija se redukcija Fe^{3+} u Fe^{2+} spojeve, viševalentnih Mn spojeva u divalentne, sulfata do sulfida (najčešće crnog i teško topljivog FeS_2). Posljedica je promjena boje tla pa ona postaje zelenkasta (Fe(II) sulfat i Fe(II) silikati), sivoplavkasta (*vivijanit*). U srednjoj zoni (Gso) zbog oscilacija podzemnih voda dominiraju procesi oksido-redukcije, što znači da se prilikom dizanja podzemne vode javlja redukcija, a njenim spuštanjem kisik ulazi u pore pa nastupa oksidacija. Za ovaj horizont je tipično prisustvo velikih količina netopljivih oksidiranih spojeva željeza i mangana u vidu tamnih zrnatih konkreција i žućkastih, crvenkastih i smeđih mazotina i pjega. Kada je podzemna voda bogata kalcijevim hidrogenkarbonatom ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), on se kapilarno uspinje u Gso, prevodi u netopljivi CaCO_3 i stvara bijele zrnate konkreције. Može se javiti i proces argilosinteze. U gornjoj se zoni (Aa) velika količina organskih ostataka hidrofilne vegetacije razgrađuje u jako vlažnim uvjetima i stvara hidromorfni ili močvarno-barski humus. Budući da su kod eugleja tijekom kraćeg perioda u sezoni poplava ili dizanja razine podzemnih voda sve pore saturirane vodom, redukcijski procesi su vrlo slabi. Dubina ovog horizonta je do 50 cm.

Močvarno glejna tla se dijele na podtipove na temelju podrijetla suvišne vode. Tako se razlikuju:

- a) Hipoglej - oglejavanje podzemnom vodom,
- b) Epiglej - oglejavanje površinskim, pretežno poplavnim vodama, koje stagniraju unutar 1 m u profilu i
- c) Amfiglej - suvišno vlaženje podzemnom i poplavnom vodom, a međusloj je slabije oglejen.

Većina eugleja je težeg mehaničkog sastava, što pretpostavlja i nepovoljna fizikalna svojstva jer više gline znači i veću zbijenost, plastičnost, ljepljivost i kontrakcije pri sušenju. Svi podtipovi su dubokih soluma, orašaste ili poliedrične strukture. Sadržaj humusa se kreće 3-6 % kod mineralnih, 10-30 % kod humoznih formi. Pretežno su to nekarbonatna tla s reakcijom od slabo kisele do slabo alkalne. KIK je 20-40 $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$, a zasićenost bazama 80-90 % s dominacijom iona Ca^{2+} . Ukupne količine dušika nisu male, ali zbog anaerobnih uvjeta nitratnog dušika je malo. Opskrbljenost fosforom je također niska, pošto u anaerobnim uvjetima prelazi u netopive Fe(II) fosfate. Kalija ima dovoljno.

Proizvodna sposobnost močvarno glejnih bez melioracijskih zahvata je niska te je njihovo korištenje ograničeno na košnju trske i rogoza ili kupljenje nekvalitetnog sijena s vlažnih livada. Stoga je za njihovu popravku potrebno provesti niz melioracijskih zahvata kao što su odvodnja, duboka obrada i melioracijska gnojdba mineralnim gnojivima. Hidrotehničke melioracijske mjere imaju za cilj spuštanje razine podzemnih voda drenažom (otvorena kanalska

mreža ili podzemna drenaža), sprječavanje poplava podizanjem nasipa i obrana od slivnih voda dizanjem razine perifernih dijelova parcela. Nakon provedenih hidrotehničkih može se dogoditi u aridnim područjima da ljeti eugleji stradavaju od suše pa je potrebno provesti i navodnjavanje. Ako podzemne vode nisu zaslanjene, najbolje je da se primjenjuje podzemno navodnjavanje (subirigacija). Dubokom obradom tla intenziviraju se procesi oksidacije i mineralizacije organske tvari. Obvezna je i gnojidba povećanim dozama fosfornih i dušičnih gnojiva.

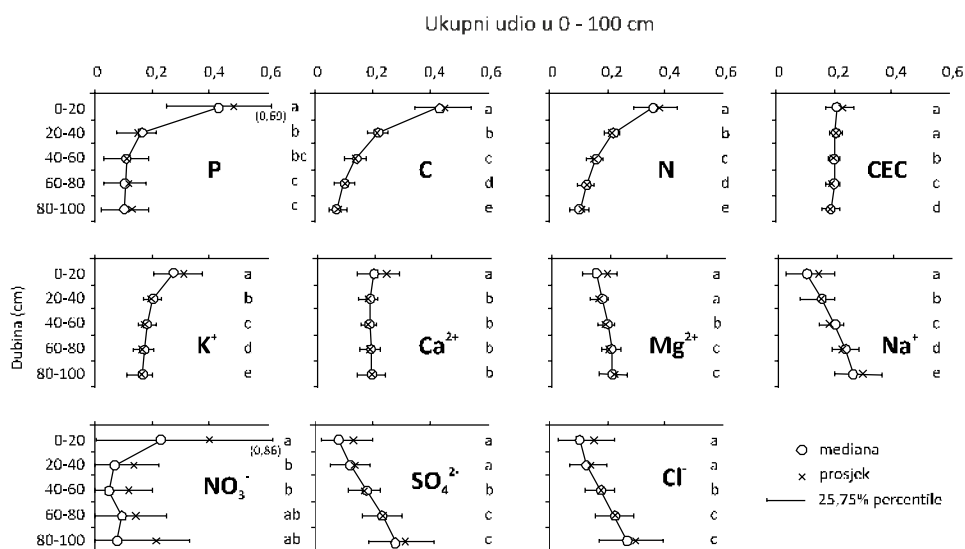
4.3. DUBINA TLA

Poljoprivredna tla moraju imati dovoljnu dubinu profila za potrebe ishrane i učvršćivanje biljaka. S druge strane, obrada tla, sjetva, sadnja, gnojidba, pa i druge agrotehničke mjere, zahtijevaju potrebnu dubinu soluma. Porastom dubine soluma povećava se korijenova zona i raste volumen tla iz kojega se biljke opskrbljuju hranivima i vodom. Kod sadnje korijen se nalazi na nekoj inicijalnoj dubini (sjeme se polaže sjetvom na 5-10 cm) i rastom prodire u tlo u potrazi za hranom i vodom. Neprestanim rastom ("*otvorena organizacija korijena*"), što je posebno naglašeno za glavni korijen čija je osnovna zadaća snabdjeti biljke s dovoljno vode, on prodire kroz slojeve tla različite teksture i gustoće. Budući da podoranični sloj sadrži uobičajeno više gline uz slabu propusnost, voda se često zadržava iznad te nepropusne zone (*waterlogging*) uz štetne posljedice, pa i propadanje korijena u *reduktivnim uvjetima* (nizak pH, nedostatak kisika, odnosno hipoksija pa i anaerobioza - bez O₂). Podoranični sloj često može biti, osobito na aluvijalnim terasama, "zacementiran" (*hardpan*), a plitak *solum* obično korespondira s čvrstom stijenom kao matičnim supstratom što predstavlja poteškoće u rastu korijena, odnosno biljaka. Vrlo česta barijera korijenskom rastu je kemijske naravi te ekstremno nizak pH, ali i zaslanjenost tla mogu restriktivno utjecati na rast korijena. Pukotine u čvrstom podoraničnom sloju omogućuju pak biljkama moćnog korijena, npr. drvenastim vrstama, vinovoj lozi i dr., usvajanje vode (i hrane) s dubina većih od 20 m.

Punu efektivnu dubinu, s koje korijen još može usvojiti dovoljnu količinu vode, biljke dostižu sredinom vegetacije i ona prosječno iznosi 70 % od maksimalne dubine korijena. Tablica 4.5. pokazuje potrebnu dubinu soluma za ukorjenjivanje nekih poljoprivrednih biljnih vrsta.

Dubina tla može se iskazivati i kao apsolutna veličina, ali za poljoprivrednu namjenu važnija je efektivna dubina tla, tj. *dubina fiziološki aktivnog profila* u kojem korijen biljke nalazi vodu, kisik i neophodna hraniva i ima pomoć korisnih mikroorganizama (*rizoflora*). Raspored i količina biljnih hraniva mijenja se, kako

u vremenu tako i po profilu, ovisno o zemljišnim, klimatskim i biljnim čimbenicima što je izuzetno važno za raspoloživost hraniva. Stoga se kod nekih metoda utvrđivanje potrebe za gnojidbom (npr. N_{min} metoda) i za pojedine nasade (npr. vinogradi, voćnjaci) utvrđuje raspored i količina hraniva po dubini profila, a vertikalna distribucija pojedinih elemenata biljne ishrane ovisna je i o njihovoj pokretljivosti u tlu. Npr. sulfati, kloridi i natrij (iako je Na^+ kation, jako je hidratiziran) lako se premještaju u dublje slojeve soluma, dok je koncentracija slabo pokretnog fosfora i nešto manje kalija najveća u oraničnom sloju. Elementi čija je rezerva u tlu pretežito u organskoj tvari (C i N) nalaze se najvećim dijelom u gornjim slojevima soluma (slika 4.8.).



Slika 4.8. Vertikalna distribucija nekih elemenata ishrane po dubini profila (Esteban et al., 2001.)

Tablica 4.5. Odgovarajuća dubina korijena nekih biljaka

<u>Plitko ukorijenjene biljke</u> (30-60 cm)	krstašice (kupus, cvjetača i sl.), celer, salata, luk, krumpir, špinat, povrće (izuzev kad je korijen repa), mrkva, krastavac
<u>Srednja dubina ukorijenjivanja</u> (50-100 cm)	grah, stočna repa, djetelina, krastavac, grašak, paprika, soja, šećerna repa, suncokret, duhan, rajčica
<u>Biljke dubokoq korijena</u> (90-150 cm)	vinova loza, limun, listopadno voće, masline, lucerna, ječam, pamuk, lan, kukuruz, lubenice, zob, sirak, pšenica

4.4. TEKSTURA I STRUKTURA TLA

Čvrstu fazu tla čine čestice primarnih i sekundarnih minerala različite veličine, međusobno prostorno povezane, pri čemu između njih ostaju pore ispunjene vodom i zrakom. Dakle, pod *teksturom* se podrazumijeva udio pojedinih čestica u građi čvrste faze tla ovisno o njihovoj veličini. *Struktura (pedality)* označava njihov međusobni raspored. Ta svojstva su međusobno čvrsto povezana i predstavljaju vrlo značajan čimbenik ishrane bilja. Povoljna struktura i tekstura tla znače i dobru poroznost i dreniranost, dakle povoljne uvjete za rast korijena, povoljan vodnozračni režim, odnosno dobru vododrživost i prozračnost tla. Stoga se tekstura s pravom smatra mjerom kojom se dobro procjenjuje potencijalna plodnost nekog tla.

Veličina čestica tla u principu ovisi o materijalu na kojem je tlo u procesu pedogeneze nastalo, odnosno svojstava matičnog supstrata, a određuje se laboratorijskim metodama mehaničke analize tla. Ovisno o promjeru, čestice se svrstavaju u najmanje tri klase:

- pijesak (0,02-2,00 mm ili 0,05-2,00 mm),
- prah (0,002-0,02 mm ili 0,002-0,05 mm) i
- glina (<0,002 mm).

Česta je praksa da se čestice pijeska dijele na krupni (2,0-0,2 mm) i fini pijesak (0,20-0,02 mm), a krupnije frakcije, prisutne na skeletnim tlima, svrstavaju se u šljunak (sitan i krupan). Relativni odnosi između navedenih grupa čestica koriste se za determinaciju tla prema tekturnim klasama (slika 4.9. i 4.10.).

Povezivanjem pojedinih čestica primarnih i sekundarnih minerala, te organske tvari tla, nastaju sekundarne čestice koje se nazivaju makro i mikro strukturni agregati. *Mikroagregati* se sljepljuju u veće *makroagregate*, koji zapravo čine strukturu tla. Granična veličina za razlikovanje mikro i makroagregata je promjer čestica od 0,25 mm.

Tla kod kojih je agregacija mehaničkih elemenata slabo izražena su nestrukturna i u tu grupu ulazi većina pjeskovitih tala, ali i neka teška glinasta. Stabilnost agregata određena je kvalitetom organske tvari koja predstavlja *adhezivno* sredstvo, a shematski izgled organomineralnog kompleksa tla prikazuje slika 4.11. Kao mjera stabilnosti strukturnih agregata uzima se njihova otpornost na raspadanje pri vlaženju, iako je zapravo vrlo važno da se agregati tla ne raspadaju kod obrade.

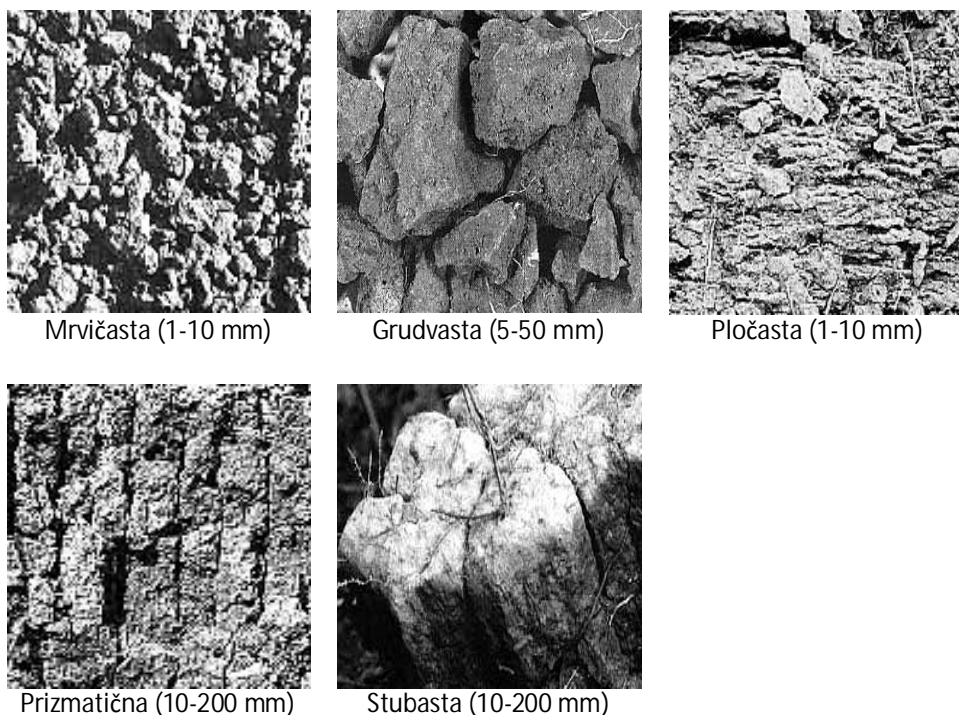
Tablica 4.6. Utjecaj teksture na fizikalna svojstva tla (Hall, 2008.)

Svojstvo	Krupni pijesak	Sitni pijesak	Prah	Glina
Retencijski kapacitet za vodu	vrlo nizak	srednji	visok	vrlo visok
Kapilarnost	vrlo mala	srednja	dobra	vrlo dobra
Dreniranost	vrlo visoka	umjerena	loša	vrlo loša
KIK	vrlo nizak	nizak	umjeren	visok
Kohezija i plastičnost	nema	vrlo niska	umjerena	visoka
Zbijanje	vrlo slabo	slabo	umjereno	visoko
Prirodna plodnost	vrlo niska	niska	umjerena	visoka
Aeracija	vrlo dobra	umjerena	siromašna	vrlo siromašna
Relativna temperatura	toplo	svježe	hladno	vrlo hladno
Mogućnost ispiranja polutanata	vrlo visoka	dobra	umjerena	niska

Teksturna svojstva tla, prije svega poroznost, sposobnost upijanja (infiltracija) i provođenja vode (*konduktivitet*) utječu na ishranu bilja izravno preko mogućnosti opskrbljivanja korijena vodom i zrakom (tablica 4.7.). Kod zasićenja pora tla vodom nedostaje kisik potreban za disanje korijena i oksidaciju organske tvari tla (mikrobiološka aktivnost). Smatra se da *anoksija* (nedostatak kisika) nastupa kada je 4 % (ili manje) volumena tla ispunjeno zrakom. Tada prvo dolazi do prestanka metabolizma u korijenu (zaustavlja se produkcija ATP i disanje), a zatim odumire korijen. Problemi nastaju i ranije, već kada je zrakom ispunjeno ispod 10 % zapremine tla. Naime, lagani deficit kisika često se zapaža u korijenu, a kod stvarnog nedostatka prekida se disanje i zaustavlja usvajanje hraniva pa uskoro nastupa odumiranje korijena. U nedostatku kisika nakuplja se u tlu ugljikov(IV) oksid (CO₂) koji usporava disanje korijena i mikrobiološku aktivnost, a u prisustvu vode gradi karbonatnu (ugljičnu) kiselinu. Mala količina (1-2 % CO₂) može djelovati stimulativno na rast korijena, ali više od 5 % ima inhibitorni utjecaj, odnosno dovodi do smanjenog intenziteta disanja korijena. Tablica 4.8. pokazuje toleranciju nekih biljnih vrsta na manjak kisika i višak ugljikovog(IV) oksida.

Problemi vezani uz poroznost tla u suvremenoj poljoprivrednoj proizvodnji vrlo često su izazvani stalnim mehaničkim zbijanjima teškom mehanizacijom, posebice u uvjetima veće vlažnosti tla, što izaziva porast *mehaničke impendance* (otpora pri obradi) tla s dugotrajnim negativnim promjenama uz primjetno snižavanje efektivne plodnosti tla. Ipak, tlo posjeduje mehanički ili *fizički puferni*

kapacitet, odnosno otpornost na strukturne deformacije, te se može manje ili više djelotvorno "suprotstaviti" nekim mehaničkim efektima i obnoviti odgovarajuće stanje strukturnosti u kraćem ili dužem razdoblju.



Slika 4.12. Tipovi strukture tla

Tablica 4.7. Utjecaj teksture tla na intenzitet infiltracije vode u tlo i njegov kapacitet sorpcije (*Soil Sense M-03 and C-09*)

Tekstura tla	Intenzitet infiltracije (mm h^{-1})		KIK ($\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$)
	bez vegetacije	tlo pod vegetacijom	
Glina	0-5	5-10	> 30
Glinasta ilovača	5-10	10-20	15-25
Ilovača	10-15	20-30	15-20
Pjeskovita ilovača	15-20	30-40	5-15
Pijesak	20-25	40-50	5

Redukcijski uvjeti, nastali lokalnim zakiseljavanjem, pogoduju nastanku reduciranih oblika željeza i mangana, koji su topljiviji u vodi od njihovih oksidacijskih oblika, pa višak Fe i Mn djeluje toksično. Također, u redukcijskim

uvjetima nitratni oblik dušika se lako transformira do nitrita ili čak do elementarnog dušika (u procesu denitrifikacije) i tako se gubi iz tla.

Tablica 4.8. Tolerancija biljaka na deficit O₂ i suficit CO₂ u tlu

Tolerancija	Biljna vrsta	O ₂ %	CO ₂ %
Visoka	riža, šećerna repa	< 1	< 10
Srednja	zob, ječam, jabuka	< 5	< 15
Niska	kukuruz, duhan, grah	< 10	< 10

Problemi u ishrani bilja nastali zbog slabe strukturalnosti tla i lošeg vodnozračnog režima vrlo su česti, a uklanjaju se različitim tehnikama uređenja tla, odnosno agromelioracijskim zahvatima ili primjenom različitih kondicionera. Višak vode, bez obzira kako nastaje (podzemna ili površinska voda), izravno utječe na loše prozračivanje tla i snižavanje parcijalnog tlaka kisika u zoni korijena, odnosno *hipoksiju* ili u ekstremnim slučajevima (poplava, pokorica, ledena kora i dr.) *anoksiju* i zastoj u metabolizmu korijena, odnosno prestanak usvajanja vode i hraniva.

Stabilnost strukturalnih agregata tla može se poboljšati unošenjem organske tvari, npr. humizacijom, zaoravanjem, a ne spaljivanjem žetvenih ostataka, organskom gnojidbom, sideracijom te primjenom kondicionera za popravak strukture. Također, unošenje kalcija (kalcizacija), kao i organska ili mineralna gnojidba, utječu na strukturalnost tla povećanjem organske produkcije korijena i nadzemne mase, odnosno preko zaoravanja veće količine žetvenih ostataka. Pri tome i mikrobiološka aktivnost tla mora biti povećana jer prosto miješanje tla i organske tvari ne djeluje na poboljšanje strukture.

Pogoršavanje strukture često se jednim imenom naziva *degradacija tla* jer se pogoršava njegova kakvoća uz istodobno smanjenje kapaciteta proizvodnje. Tla mogu biti manje ili više degradirana, sve do jako erodiranih, znatnog gubitka hraniva i organske tvari, pretjerano podložna zbijanju zbog neadekvatne obrade, a korištenjem vode loše kakvoće za navodnjavanje mogu biti zaslanjena. Takvi procesi su posljedica lošeg gospodarenja tlom koje odudara od dobre poljoprivredne prakse. U ekstremnim slučajevima, degradacija tla može dovesti do *dezertifikacije* (pretvaranje zemljišta u pustinju) u polusušnim (*semiaridnim*) i sušnim (*aridnim*) područjima. Intenzivna degradacija tla, koja se zapaža u životu jedne ljudske generacije, zahtijeva trenutnu promjenu načina korištenja tla radi njegovog očuvanja i zaštite od štetnih procesa.

Ovisno od stupnja i intenziteta degradacije, postoji više učinkovitih metoda kojima se može zaustaviti ili minimizirati degradacija tla. Npr. *eolska* i *erozija vodom* mogu se spriječiti podizanjem *vjetrozaštitnih pojasa*, primjenom *no-till* (bez obrade) agrotehnike, konzervacijskom i konturnom obradom, terasiranjem, sjetvom pokrovnih usjeva, malčiranjem i dr. Zaštita od erozije posebno je važna na nagnutim tlima lakog mehaničkog sastava, pjeskovite i praškaste teksture.

Moćna zaštita od erozije i zbijanja tla su pokrovni usjevi i siderati koji se siju između dvije vegetacijske sezone, čime se tlo ne ostavlja golo i izloženo eroziji, a sjetva međuusjeva (*strip cropping*) u trajnim nasadima povećava infiltraciju vode u zonu korijena, potiče mikrobiološku aktivnost, sprječava rast korova i formiranje pokorice. Ako su siderati, pokrovni ili međuusjevi iz porodice leguminoza, tlo će biti dodatno obogaćeno dušikom.

4.5. pH-VRIJEDNOST REAKCIJE TLA

Reakcija tla izražena kao pH-vrijednost, pokazatelj je niza agrokemijskih (fizikalnih, kemijskih i bioloških) svojstava tla važnih za ishranu bilja. pH tla, pa otuda i njegov *redoks potencijal*, određen je kako mineralnim tako i organskim dijelom tla. pH vrijednost predstavlja negativan dekadski logaritam koncentracije H^+ iona, odnosno njihovog aktiviteta. Npr., čista destilirana voda slabo disocira i to na sljedeći način:



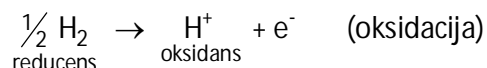
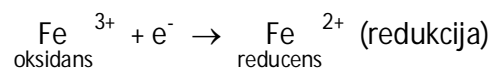
$$[H^+] = [OH^-]$$

$$[H^+] = 10^{-7} \text{ mol dm}^{-3} = 0,0000001 \text{ mol dm}^{-3}$$

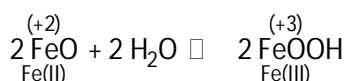
$$pH = -\log [H^+], \text{ odnosno } pH = \log \left(\frac{1}{[H^+]} \right)$$

$$pH = 7$$

Redoks-reakcije (ili oksidoredukcija) su reakcije prijenosa elektrona između kemijskih spojeva ili iona pri čemu se oksidacijom gube elektroni, a redukcijom dobivaju te za svaku reakciju oksidacije imamo odgovarajuću reakciju redukcije, npr.:



Pri "normalnim" uvjetima u tlu za biljke ($pH > 3,5$; $[Fe^{3+}] < 10^{-6} \text{ mol dm}^{-3}$) ion Fe^{3+} zapravo nema značaj za ishranu bilja (premda se u vodenoj fazi mogu nalaziti sljedeći ioni željeza: Fe^{3+} , $FeOH^{2+}$, Fe^{2+} , $FeOH^+$). Oksidacija željeza u tlu pri vrlo niskim vrijednostima pH može se prikazati kao redoks-reakcija:



Redoks potencijal tla p_e definira se analogno reakciji tla:

$$p_e = -\log(e^-)$$

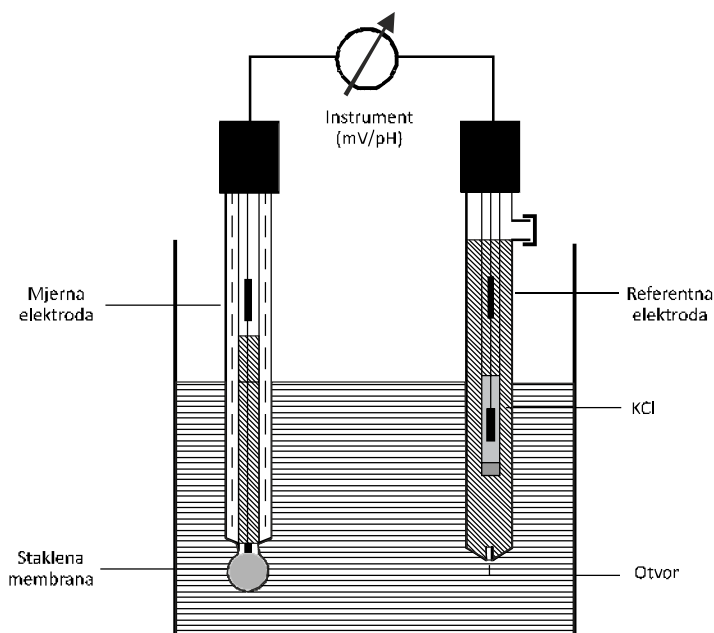
gdje je p_e hipotetski "aktivitet elektrona", odnosno *elektromotorna sila* ili *potencijal zamjene* u vodenoj fazi tla. Vrijednost p_e negativnog predznaka (suvišak elektrona) omogućuje redukciju, a pozitivna podržava procese oksidacije u tlu. Odnos p_e prema potencijalu standardne vodikove elektrode E_h , izraženog u voltima (ravnotežni potencijal na 0 V) je:

$$p_e = \frac{E_h}{0,059}$$

Elektrometrijsko mjerenje pH-vrijednosti obavlja se pH-metrom koji čine mjerna (staklena) i referentna (kalomel) elektroda uronjene u suspenziju tla čineći tzv. solni most (slika 4.13.). Referentna elektroda ima poznati potencijal kojim se utvrđuje promjena potencijala između staklene i referentne elektrode pa je pH zapravo:

$$pH = -(dE - \text{const})/0,059$$

(gdje je dE promjena potencijala u V, a 0,059 je "odgovor" staklene elektrode u V ($RT(\ln/10)/F = 59,16 \text{ mV}$ na 298,2 K).

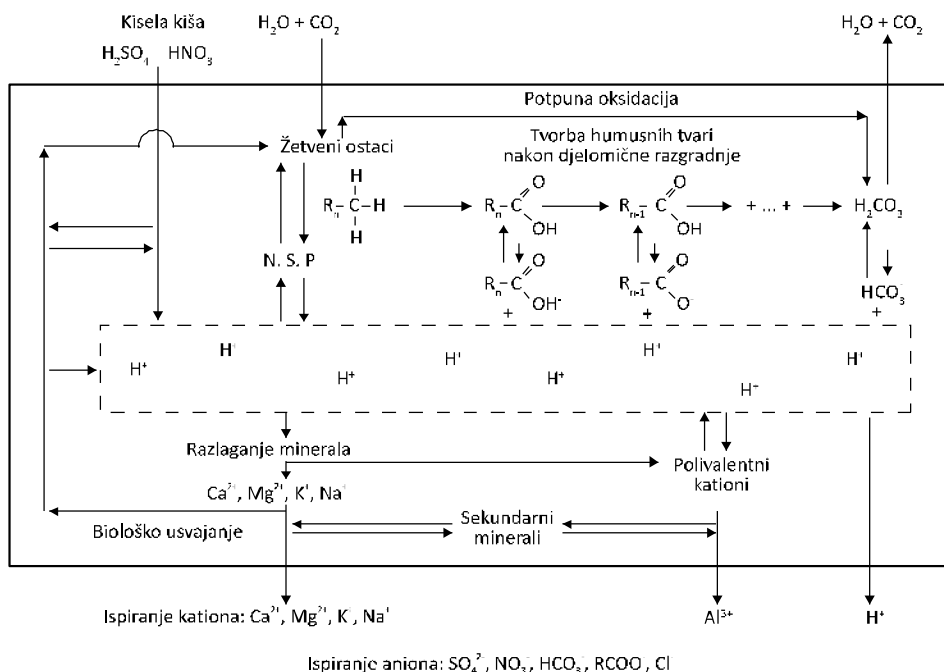


Slika 4.13. Princip rada pH-metra

U procesu pedogeneze i starenja tla dolazi do promjene sadržaja alkalijskih i zemnoalkalijskih metala, tako da udaljavanje (ispiranje) lužina (najčešće kalcijevih) izaziva promjenu tla u kemijskom i fizičkom pogledu. Smatra se da

ispiranje lužina s tijela adsorpcije u tlu započinje kada je godišnja količina oborinskog taloga veća od 630 mm. U tom slučaju na adsorpcijskom kompleksu tla dolazi do zamjene lužnatih iona vodikovim i kiselost tla postupno raste. Također, pH je u gornjih 5 cm površine tla često niži za 0,5 do 1,0 pH jedinice prema ostalom dijelu rizosfere, najčešće zbog dušične gnojidbe i povećanog sadržaja N. Zakiseljavanje tla može izazvati i *industrijska polucija*, posebice kisele kiše u širem području velikih energetske postrojenja, ali uzrok mogu biti i prirodni procesi (slika 4.14.).

Proces zakiseljavanja je vrlo štetan (odmah iza erozije po globalnim efektima degradacije tala) jer uzrokuje niz problema u ishrani bilja. U kiselim tlima mineralno-koloidna frakcija podvrgnuta je dugotrajnom ispiranju vodenom otopinom kiselina (huminska i druge) i postupno prelazi u *glinene kiseline* koje se lako premještaju u dublje slojeve soluma. Nakupljanje gline na određenoj dubini dovodi do stvaranja vodonepropusne zone uz sve izraženije uvjete za dalju redukciju. U takvim okolnostima ($\text{pH} < 5,5$) najčešće višak H^+ na adsorpcijskom kompleksu aktivira ione aluminija i željeza koji u većim količinama djeluju otrovno na biljke, blokiraju snabdijevanje fosforom i drugim elementima. Neke od karakterističnih reakcija koje ovise o pH-vrijednosti, odnosno njihov standardni oksido-redukcijski potencijal (E_n^0), prikazuje tablica 4.9.



Slika 4.14. Utjecaj "kiselih" kiša na zakiseljavanje tla

Tablica 4.9. Neke ravnotežne oksido-redukcijske reakcije u tlu (Murray, B., 1994.)

E_h^0 (mV)	Reakcija	Produkt
-1.660	$Al^{3+} + 3 e^-$	Al
-760	$Zn^{2+} + 2 e^-$	Zn
-563	$O_2 + e^-$	O_2^-
-560	$Fe(OH)_3 + e^-$	$Fe(OH)_2 + OH^-$
0	$2 H^+ + 2 e^-$	H_2
153	$Cu^{2+} + e^-$	Cu^+
210	$CO_2 + 4 H^+ + 4 e^-$	$C + 2 H_2O$
303	$\frac{1}{8}SO_4^{2-} + \frac{5}{4}H^+ + e^-$	$\frac{1}{8}H_2S + \frac{1}{2}H_2O$
770	$Fe^{3+} + e^-$	Fe^{2+}
834	$\frac{1}{2}NO_3^- + H^+ + e^-$	$\frac{1}{2}NO_2^- + \frac{1}{2}H_2O$
1.229	$O_2 + 4 H^+ + 4 e^-$	$2 H_2O$
1.260	$NO_3^- + 6 H^+ + 5 e^-$	$\frac{1}{2}N_2 + 3 H_2O$
1.290	$MnO_2 + 4 H^+ + 2 e^-$	$Mn^{2+} + 2 H_2O$
1.450	$MnOOH + 3 H^+ + e^-$	$Mn^{2+} + 2 H_2O$
1.510	$Mn^{3+} + e^-$	Mn^{2+}
1.808	$Co^{3+} + e^-$	Co^{2+}

Puferni kapacitet protiv zakiseljavanja, u literaturi označen kao ANC (*Acid-neutralizing capacity*) ili pHBC, čine kemijske reakcije koje do neke mjere mogu neutralizirati promjene pH u tlu. ANC je definirana kao razlika između koncentracije kationa jakih baza i aniona jakih kiselina, ili dinamički kao količina kiseline potrebne za promjenu pH vrijednosti (kod pufernog kapaciteta za sprječavanje lužnatosti koristi se izraz pozitivni ANC). Odnos između pH i ANC u vodenoj fazi tla ovisi o koncentraciji CO_2 , količini organskih kiselina i topljivosti aluminija. Količina otopljenog ugljikovog dioksida u vodenoj fazi tla je zbog biološke aktivnosti (mineralizacije organske tvari) veća u odnosu na prirodnu ravnotežu (više je CO_2 u tlu negoli u atmosferi) što utječe na niži pH tla, ali nema nikakvog utjecaja na ANC. Jednako tako na ANC nema utjecaja veća koncentracija organskih kiselina koja također smanjuje pH. Utjecaj topljivosti aluminija na ANC puno je složeniji, a kemijski mehanizam objašnjava se u poglavlju o aluminiju. U literaturi se mogu pronaći empirijski izrazi za procjenu pufernog kapaciteta protiv zakiseljavanja (pHBC), npr.:

$$pHBC = [12,79 - 0,19 \times \text{glina}\% - 0,7 \times \text{OC}\% - 0,03 \times \text{prah}\% + 0,74 \times \text{prah}\% \times \text{OC}\%] \times 0,06$$

(pHBC ($t CaCO_3 ha^{-1} pH^{-1}$) odnosi se na tone vapna po hektaru po jedinici pH; OC % je postotni udio ugljika u tlu; potrebno je još poznavati udio gline i praha).

Analizom gornjeg izraza za procjenu pufernog kapaciteta protiv zakiseljavanja lako se dolazi do zaključka kako sadržaj gline znatno više utječe na sprječavanje zakiseljavanja tla u odnosu na humus (tablica 4.10.), uvažavajući količinu u tlu.

Tablica 4.10. Ovisnost pufernog kapaciteta protiv zakiseljavanja o teksturi i organskoj tvari tla

Glina	Prah	Humus	pH _{BC} CaCO ₃ ha ⁻¹ pH ⁻¹
%			
10	80	2	11,45
20	70	2	18,56
30	60	2	25,62
40	50	2	32,68
10	80	4	15,58
20	70	4	22,12
30	60	4	28,67
40	50	4	35,22

Prema *Nernstovoj jednadžbi* relacija ravnotežnog stanja kod elektronskog transfera je:

$$E_h = E_h^0 - \frac{RT}{nF} \times \log \frac{[\text{red}]}{[\text{oks}]}, \text{ zapravo}$$

$$E_h = E_h^0 - \frac{0,059}{n} \times \log \frac{(\text{reducirana molekula})}{(\text{oksidirana molekula})(H^+)^m},$$

odnosno za Fe²⁺ i Fe³⁺ relacija je:

$$E_h = E_h^0 - \frac{0,059}{n} \times \log \frac{[Fe^{2+}]}{[Fe^{3+}]} = 0,77 - 0,059 \times \log \frac{[Fe^{2+}]}{[Fe^{3+}]},$$

dakle, (Fe³⁺) = (Fe²⁺) kad je E_h = E_h⁰ = 0,77 volt,

a za topljivost MnO₂:

$$E_h = E_h^0 - \frac{0,059}{n} \times \log \frac{[Mn^{2+}]}{[H^+]^4} = 1,23 - 0,059 \times \log [Mn^{2+}] - 0,118 \text{ pH}$$

Pod pretpostavkom da je koncentracija Mn²⁺ = 10⁻⁵ mol⁻¹, tada je:

$$E_h = 1,378 - 0,118 \text{ pH}$$

(E_h = potencijal ravnoteže u V, E_h⁰ = standardni potencijal u V, n = broj mola elektrona reakcije, m = broj mola protona reakcije, R = plinska konstanta = 8,314 J K⁻¹ mol⁻¹, F = Faraday-eva konstanta = 96.487 C mol⁻¹).

Prema tome, elektronski potencijal zapravo je:

$p\epsilon = \frac{E_h}{0,059}$ pa je otuda za željezo ($E_h^0 = 0,77 \text{ V}$):

$$p\epsilon = \frac{0,77}{0,059} = 13,05 - \log \frac{[\text{Fe}^{2+}]}{[\text{Fe}^{3+}]}$$

U vrlo kiselim uvjetima vodena faza tla može sadržavati $10^{-5} \text{ mol dm}^{-3} \text{ Fe}^{3+}$ i $10^{-3} \text{ mol dm}^{-3} \text{ Fe}^{2+}$ što daje sljedeću vrijednost elektromotorne sile (elektronskog potencijala):

$$p\epsilon = 13,05 - \log \frac{(10^{-3})}{(10^{-5})} = 11,05$$

U jačim oksidacijskim uvjetima vrijednost $p\epsilon$ raste: ako je u otopini tla $10^{-5} \text{ mol dm}^{-3} \text{ Fe}^{3+}$ i $10^{-7} \text{ mol dm}^{-3} \text{ Fe}^{2+}$ (manje reduciranog željeza u odnosu na gore prikazani primjer), tada je $p\epsilon$ 15,05, dok je između pH i $p\epsilon$ u aerobnim uvjetima tla relacija približno sljedeća:

$$p\epsilon - \text{pH} \approx 15, \text{ odnosno}$$

$$p\epsilon \approx 15 - \text{pH}$$

Redukcijski uvjeti u tlu mogu se praktično indicirati jednostavnim kemijskim testovima tako da se:

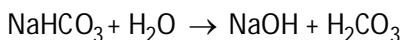
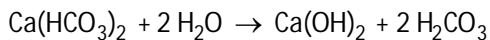
- svježi prijelom nativnog tla poprska s 1 %-tnom vodenom otopinom $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ i za redukcijske uvjete dobije tamnoplavo obojenje ili
- svježi prijelom nativnog tla poprska s 0,2 %-tnom otopinom α, α -dipiridila u 10 %-tnoj octenoj kiselini i za redukcijske uvjete dobije jarkocrvena boja.

Prema podrijetlu vodikovih iona u tlu ukupna pH-reakcija (titracijom tla određena kiselost ili alkalnost) razvrstava se u tri kategorije:

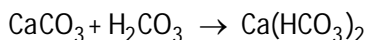
- aktualna,
- izmjenjiva i
- hidrolitička kiselost tla

4.5.1. Aktualna pH-reakcija

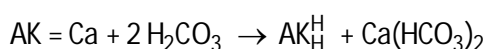
Aktualna pH-reakcija tla je posljedica prisutnosti slobodnih iona u vodenoj fazi tla, najviše H^+ , Al^{3+} i OH^- . Oslobođanje tih iona s adsorpcijskog kompleksa izazvano je njihovom zamjenom topljivim organskim i mineralnim kiselinama ili kiselim solima te njihovom disocijacijom u vodenoj sredini. Aktualna kiselost ili alkalnost tla određuje se *elektrometrijski* u vodenoj suspenziji tla. Prisutnost lakohidrolizirajućih soli utječe na aktualnu pH-reakciju na sljedeći način:



Ako u tlu ima dovoljno kalcija, nastaje kalcijev hidrogenkarbonat koji nakon hidrolize uvjetuje pH tla 7-8:



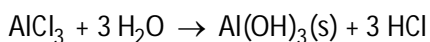
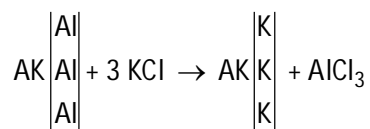
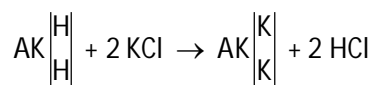
Budući da su u tlu uvijek prisutne otopljene neutralne soli (KCl, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ i dr.), jedan dio adsorbiranih iona vodika zamjenjuje se kationima (alkalnim elementima) ovih soli što utječe na porast kiselosti vodene faze tla, odnosno predstavlja aktualnu kiselost:



Značaj aktualne pH-reakcije tla za život biljaka je velik, stoga obvezno agrokemijske analize obuhvaćaju utvrđivanje ove veličine, jer je to osnovna pH-reakcija tla koja utječe na adsorpcijski kompleks, a preko njega na strukturu tla i njegova biološka svojstva.

4.5.2. *Izmjenjiva ili supstitucijska pH-reakcija tla*

Izmjenjiva pH-reakcija tla određena je prisutnošću H^+ iona i dijelom iona aluminija i željeza koji se djelovanjem neutralnih soli (konvencionalno usvojena otopina 1 mol dm^{-3} KCl) zamjenjuju s adsorpcijskog kompleksa tla:



Kako se vidi iz gornjih kemijskih jednadžbi, kiselost ovog tipa nastaje zamjenom iona na adsorpcijskom kompleksu tla i može nastati unošenjem većih doza gnojiva u obliku soli kao što su npr. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, KCl itd. Izmjenjiva pH-reakcija pruža neposredan uvid u stanje adsorpcijskog kompleksa tla. Time ukazuje indirektno i na druge uvjete koji određuju hranidbena svojstva tla pa se u agrokemijskoj analizi obvezatno određuje iz suspenzije tla u 1 mol dm^{-3} KCl.

U posljednje vrijeme sve se češće koristi i određivanje izmjenjive pH-reakcije u otopini CaCl_2 koncentracije $0,01 \text{ mol dm}^{-3}$, koja u odnosu na mjerenje u suspenziji tlo : voda (1:5) daje manju sezonsku fluktuaciju, a ona pak najviše ovisi o koncentraciji soli u tlu. Rezultati mjerenja pH u $0,01 \text{ mol dm}^{-3} \text{CaCl}_2$ su po vrijednosti između supstitucijske kiselosti (u $1 \text{ mol dm}^{-3} \text{KCl}$) i aktualne kiselosti (u vodi).

4.5.3. Hidrolitička kiselost tla

Hidrolitička kiselost tla nastaje pri neutralizaciji tla višebaznim solima pri čemu se svi vodikovi ioni ne zamjenjuju kationima metala kod iste pH-vrijednosti sredine. Jedan dio ove kiselosti aktiviraju neutralne soli kao što je KCl, a drugi dio soli tipa natrijevog acetata (CH_3COONa , pH = 8,2) ili kalcijevog acetata (bazične soli) koje mogu zamijeniti na adsorpcijskom kompleksu tla gotovo sve ione vodika i aluminija:



Budući da nastala natrijeva lužina jako disocira, lužnata reakcija omogućuje zamjenu H^+ s adsorpcijskog kompleksa tla natrijevim ionima:



Količina nastale octene kiseline ekvivalentna je količini vodikovih iona na adsorpcijskom kompleksu tla pa se njenom neutralizacijom (titracija lužinom) određuje veličina hidrolitičke kiselosti nekog tla. Ova kategorija kiselosti zastupljenija je od izmjenjive, koja je zapravo tek dio hidrolitičke kiselosti pa se njenim određivanjem procjenjuje *ukupna potencijalna kiselost* nekog tla. Stvarna, odnosno *ukupna kiselost (ili ukupna alkalnost)*, određuje se titracijom tla lužinama, odnosno kiselinama.

Najčešća primjena hidrolitičke kiselosti je kod utvrđivanja potreba za kalcizacijom ili kada je potrebno poznavati ukupnu potencijalnu kiselost nekog tla. Hidrolitička kiselost izražava se u $\text{cmol}^{(+)} \text{dm}^{-3} \text{g}^{-1}$ nezasićenosti adsorpcijskog kompleksa lužnatim ionima, odnosno kationima baza.

Biljke su općenito osjetljivije na lužnatost nego na kiselost tla (tablica 4.11. i 4.12.) pa je uobičajeno da se pH-reakcija tla interpretira na fiziološko-ekološkoj osnovi kako to prikazuje slika 4.15.

Adsorpcijski kompleks tla i njegova puferna sposobnost imaju velik značaj u razmatranju pH-reakcije nekog tla. Naime, "nositelji zemljišne kiselosti" su glineni minerali i organska tvar koji ujedno čine *tijelo sorpcije* u tlu. U slučaju različite sorpcijske moći dvaju tala, a kada im je izmjenjiva i hidrolitička kiselost jednaka, njihova zakiseljenost je zapravo različita jer su i različito opskrbljena

kationima baza (prvenstveno ionima Ca^{2+}). Stupanj zasićenosti kationskog izmjenjivačkog kapaciteta tla bazama (V %) izračunava se sljedećim izrazom:

$$V \% = \frac{S \times 100}{S + H}$$

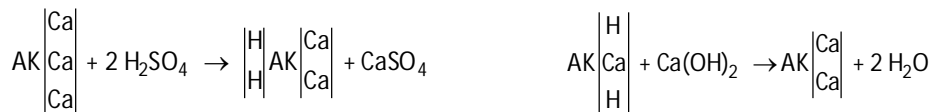
(S = količina sorbiranih baza u $\text{cmol}^{(+)} \text{dm}^{-3} \text{g}^{-1}$; H = hidrolitička kiselost u $\text{cmol}^{(+)} \text{dm}^{-3} \text{g}^{-1}$)

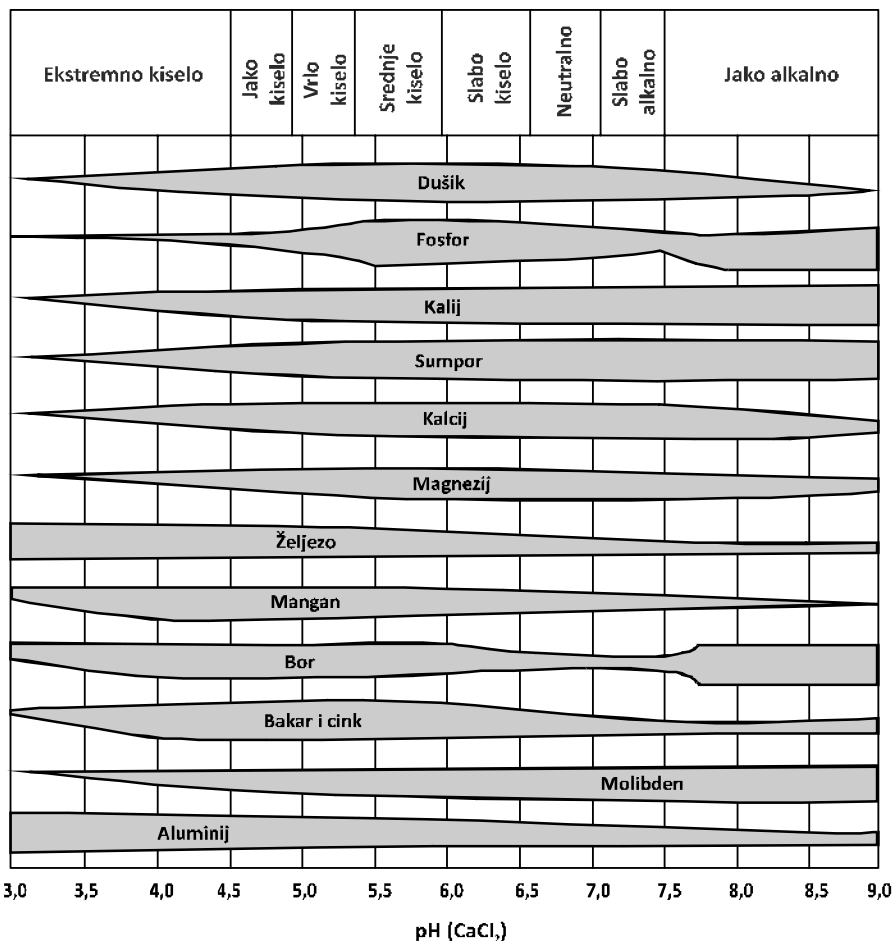
Tablica 4.11. Kategorije pH-vrijednosti tla (aktualna kiselost, tlo/voda = 1:5)

Kategorija pH-reakcije tla	pH-vrijednost
Ekstremno kiselo	3,50-4,50
Vrlo jako kiselo	4,51-5,00
Jako kiselo	5,01-5,50
Umjereno kiselo	5,51-6,00
Slabo kiselo	6,01-6,50
Neutralno	6,51-7,30
Slabo alkalno	7,31-7,80
Jako alkalno	7,81-8,50
Ekstremno alkalno	8,51-9,00

Otuda je kapacitet sorpcije nekog tla $T = S + H$. Ako je $V = 80 \%$, to znači da je na adsorpcijskom kompleksu sorbirano 80 % kationa baza (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), a 20 % iona H^+ i/ili Al^{3+} . U tlu s manjim kationskim izmjenjivačkim kapacitetom isti postotak kationa baza znači i veću kiselost tla, npr. kada je KIK $15 \text{ cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$ tla uz $V = 40 \%$ na njemu je vezano 60% kiselih iona pa je $H_y = 15 \times 60 / 100 = 9 \text{ cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$ tla. Kod istog udjela kiselih iona na KIK-u, ali dvostruko veće sorpcijske moći tla, npr. $30 \text{ cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$ tla, hidrolitička kiselost je također dvostruko veća: $H_y = 30 \times 60 / 100 = 18 \text{ cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$. Sposobnost tla da smanji ili onemogući promjenu pH-reakcije (npr. kod unošenja fiziološki kiselih ili lužnatih gnojiva) naziva se *puferna moć tla*, a procjenjuje se njegovim *pufernim kapacitetom*.

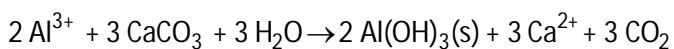
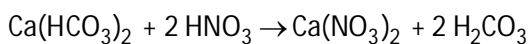
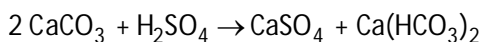
Kako je već opisano, puferna moć tla (pHBC) određena je omjerom količine kiseline ili lužine prema promjeni pH, dok se *puferni kapacitet tla* u smislu održanja koncentracije pojedinih hranjivih elemenata u vodenoj fazi tla razmatra posebno u poglavlju *sorpcijska moć tla*. Tlo se odupire promjeni pH-reakcije na više načina. Jedan od najznačajnijih mehanizama je vezivanje iona na adsorpcijski kompleks:



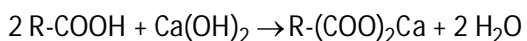
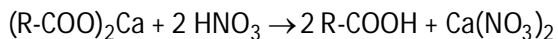


Slika 4.15. Utjecaj pH tla na raspoloživost elemenata ishrane (*Minshew, 1999.*)

Sljedeći mehanizam puferizacije pH-reakcije uvjetovan je prisutnošću slobodnog kalcijevog karbonata u tlu koji djeluje protiv zakiseljavanja:



Različite huminske i organske kiseline gradnjom neutralnih soli također potpomažu pufernu sposobnost tla. Ovaj mehanizam podjednako sprječava promjenu pH prema lužnatoj i kiseljoj reakciji:



Promjena pH-reakcije tla može biti izazvana pedoklimatskim čimbenicima, prirodnim ili antropogenim (agrološkim i industrijskim) od kojih su najznačajniji gnojdba, kalcizacija, neadekvatna agrotehnika (obrada, biljni pokrov i sl.), blizina industrijskih objekata (kisele kiše) itd.

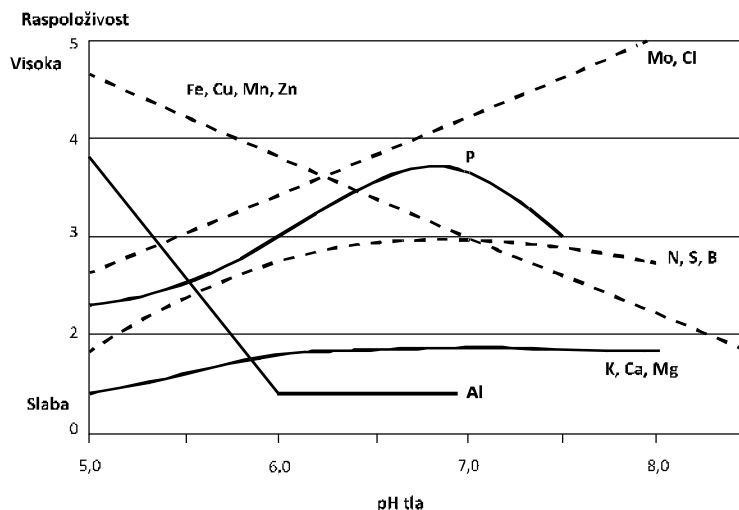
Reakcija tla utječe neposredno na biljke putem toksičnosti izazvane povećanim koncentracijama iona H^+ , Al^{3+} i OH^- ili posredno preko utjecaja na promjenu niza agrokemijskih svojstava tla. Fiziološko-biokemijska konstitucija žive tvari zahtjeva približno podjednak odnos između kationa i aniona pa veće koncentracije iona H^+ ili OH^- utječu na ionsku ravnotežu potrebnu za normalan metabolizam biljaka. Posredan utjecaj pH ogleda se preko promjene raspoloživosti biogenih elemenata (slike 4.15. i 4.16., tablica 4.13.) ili preko promjene aktivnosti mikroorganizama tla. Važno je naglasiti da korovske biljke, u odnosu na uzgajane, bolje podnose negativne utjecaje pH-reakcije tla pa veća zakorovljenost kiselih tala jače ometa uzgoj poljoprivrednih vrsta zbog povećane kompetitivne sposobnosti korova.

Različite biljne vrste ne podnose jednako sekundarne efekte kisele reakcije tla. Pojedine vrste su osjetljive na nedostatak kalcija (Ca^{2+}), odnosno višak aluminija (Al^{3+}), željeza (Fe^{2+} , Fe^{3+}) ili mangana (Mn^{2+}). Npr., šećerna repa loše podnosi nedostatak kalcija, ali je tolerantna na višak mangana, dok krumpir dobro podnosi višak Al^{3+} itd. Reakcija tla je značajna i kod pojave nekih gljivičnih oboljenja.

Nasuprot kiselosti, više biljke znatno lošije podnose povećanu alkalnost tla koja je tipična za aridnu (suhu) klimu u kojoj nema ispiranja lužina s adsorpcijskog kompleksa. Posebice je štetna uloga natrija koji pogoršava fizikalna svojstva tla jer uzrokuje disperziju zemljišnih agregata. Također, natrij povećava moć čvrstog vezivanja vode pa porast osmotske vrijednosti vodene faze tla uzrokuje nedostatak pristupačne vode uz otrovnu učinkovitost viška natrija.

Tablica 4.12. Optimalni pH tla za različite biljne vrste (*Whittaker et al.*, 1959.)

Usjev/nasad	Optimalni pH	Usjev/nasad	Optimalni pH
Borovnica	4,0-4,8	Sudanska trava	5,5-7,0
Djetelina crv. i bijela	6,0-7,5	Zob	5,5-7,0
Duhan	5,0-6,0	Lucerna	6,5-8,0
Grašak	5,8-6,8	Lupina	5,5-7,0
Jabuka	5,6-7,0	Mrkva	5,7-7,0
Jagoda	5,0-6,5	Pšenica	6,0-8,0
Suncokret	6,5-8,5	Rajčica	5,3-7,8
Ječam	5,5-7,0	Raž	5,0-7,0
Krastavac	5,3-6,8	Salata	5,8-7,0
Krumpir	4,9-6,5	Šećerna repa	6,4-7,4
Špinat	6,0-7,0	Soja	5,5-7,0



Slika 4.16. Utjecaj pH na raspoloživost neophodnih elemenata (Goedert *et al.*, 1997.)

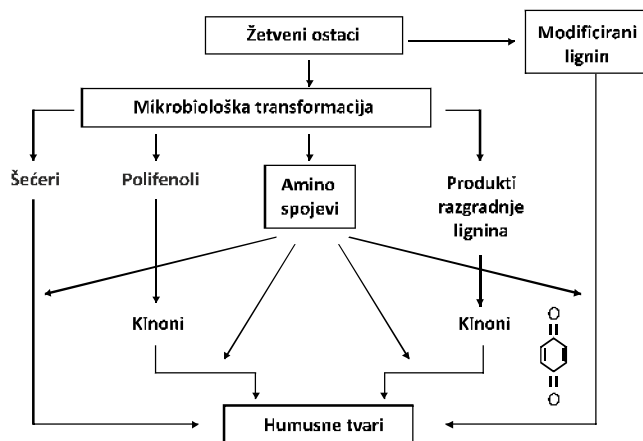
Tablica 4.13. Utjecaj pH-reakcije tla na iskorištavanje mineralnog gnojiva

pH	N	P	K
	Efikasnost (%) u prvoj godini primjene		
7,0	70	30	60
6,0	63	15	60
5,5	52	15	45
5,0	38	10	30
4,5	21	8	21

4.6. ORGANSKA TVAR TLA - HUMUS

Organska tvar u tlu podrijetlom je od ostataka živih organizama koji su više ili manje razloženi i zatim najvećim dijelom iznova grade organske spojeve tla, ali bitno različite u odnosu na živu tvar. Količina organske tvari u tlu i njena kakvoća utječe ne samo na mogućnost rasta biljaka, već i na proces nastanka tla koji je usko povezan s njenom prisutnošću. U odnosu na mineralni dio, količina organske tvari je mala, no ipak je od suštinskog značenja. Naime, prisutnost organske tvari u tlu određuje razliku između tla u smislu prirodnog supstrata biljne ishrane i rastresite mase raspadnutih stijena litosfere u termičkim i kemijskim procesima.

Organska tvar izrazito utječe na čitav niz vrlo značajnih fizičkih i kemijskih svojstava tla, kao što su struktura, kapacitet za vodu, sorpcija iona, sadržaj neophodnih elemenata (N, P, S itd.) i drugo. Ona je osnovni izvor energije za životnu aktivnost mikroorganizama tla pa bi eventualnim nestankom organske tvari tla došlo do katastrofalnih posljedica po čitav život na Zemlji. Od ukupne količine nežive organske tvari tla, na humus otpada 60-80 %.



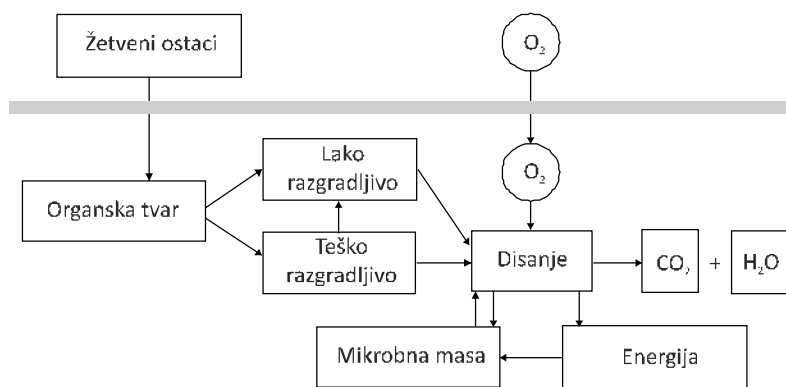
Slika 4.17. Opća shema tvorbe humusa u tlu

Podjela organske tvari tla prema veličini čestica izvršena je slično kao kod mineralne frakcije. Krupnije čestice organske tvari, koje su sačuvala svoju organiziranu strukturu žive tvari, predstavljaju *inertnu organsku rezervu tla*. Frakcija čije čestice imaju svojstva koloidnih micela označavaju se kao *humus* i *humusne kiseline*. Zahvaljujući svojim koloidnim svojstvima, ovaj dio organske tvari u tlu je vrlo aktivan. Prema Waksmanu "Humus je proizvod žive tvari i njen prirodni izvor, humus je rezerva i stabilizator organskog života na Zemlji".

Ugljik i dušik organske tvari u tlu podrijetlom su iz atmosfere, odakle su dospjeli u tlo asimilacijskim procesima mikroorganizama i viših biljaka. Sumpor djelomično potječe iz atmosfere jer se može nalaziti i u plinovitom stanju kao SO_2 i H_2S , dok fosfor vodi isključivo podrijetlo iz materijala od kojeg je nastalo neko tlo (matičnog supstrata). Nabrojani elementi, koji ulaze u sastav humusa, u procesu razgradnje organske tvari koju obavljaju mikroorganizmi tla, prelaze u mineralne oblike i postaju raspoloživi biljkama.

Proces oslobađanja organski vezanih elemenata u pristupačne oblike naziva se *mineralizacija* ili *mobilizacija hraniva*. Pod tim pojmom podrazumijevaju se svi procesi koji dovode do transformacije nepristupačnih organskih rezervi hraniva u pristupačne, što kod humusa podrazumijeva njegovu razgradnju do niskomolekularnih organskih spojeva podložnih mineralizaciji ili izravno pogodnih za usvajanje korijenom kad im je molekularna masa manja od 1.000 kDa. Dakle, humus nastaje biokemijskim putem (slika 4.17.) pri čemu aktivnost mikroorganizama koji sudjeluju u tom procesu (gljive, bakterije, aktinomicete,

ali i kišne gujavice) ovisi o uvjetima u kojima djeluju. Najznačajniji čimbenici su vodnozračni režim tla, pH-reakcija, temperatura, količina i sastav svježe unesene organske tvari u tlo.

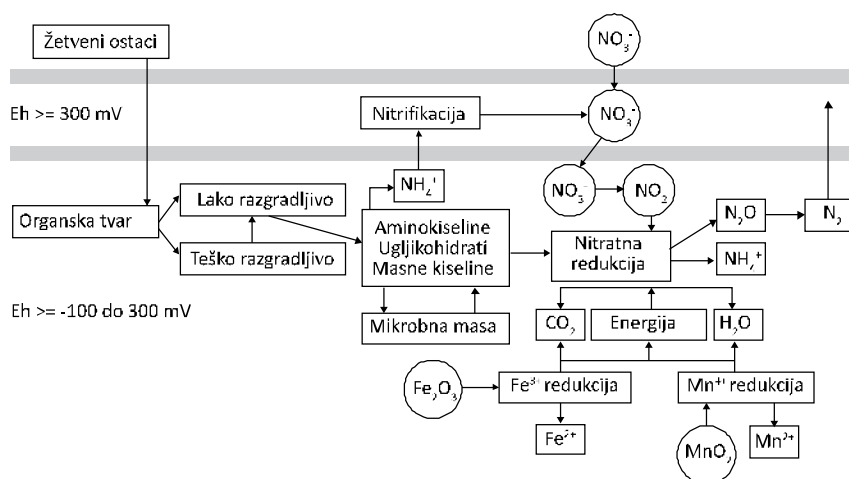


Slika 4.18. Razgradnja žetvenih ostataka u oksidacijskim uvjetima (kada je $E_h > 300$ mV)

U tlima pod prirodnim biocenozama intenzitet nastanka i razgradnje organske tvari je uravnotežen, što rezultira stabilnim sadržajem humusa. Uključivanjem tla u poljoprivrednu proizvodnju neizbježno se intenziviraju procesi razgradnje te otuda sklonost svih poljoprivrednih tala smanjivanju sadržaja organske tvari. Brzina kojom pada sadržaj organske tvari ovisan je o sustavu gospodarenja i korištenja nekog tla. Stoga se kod provođenja svake agrotehničke mjere mora razmatrati kako će se to odraziti na bilancu organske tvari tla. Potrebno je naglasiti da je pad sadržaja organske tvari u tlu prilično spor proces, ali pod "normalnim" okolnostima korištenja tla.

Tehnički problem zaoravanja velike količine žetvenih ostataka u poljoprivrednoj praksi izaziva još uvijek dvojbu kako postupiti. Znanost od početka zastupa zaoravanje žetvenih ostataka, nikako njihovo spaljivanje. Naime, žetveni ostaci često izazivaju određene probleme, jer velika zaostala masa, njezino usitnjavanje i zaoravanje stvara poteškoće (npr. priprema tla za sjetvu pšenice poslije berbe kukuruza). Također, mineralizacija velikih količina svježe organske tvari zahtjeva dodatnu N-gnojidbu (za sprječavanje tzv. "dušičnog manjka"), dok su žetveni ostaci kao izvor mineralnih hraniva od slabijeg interesa jer sadrže puno celuloze, a malo N, P, K i ostalih biogenih elemenata. Novi pristup, posebice eksponiran svjetskom energetsom krizom, smatra žetvene ostatke vrijednim proizvodom jer sadržavaju veliku količinu energije koju treba iskoristiti, a ne osloboditi. Stoga, veliku masu žetvenih ostataka treba iskoristiti na parceli zaoravanjem, ili na drugi način što bliže mjestu nastanka, npr. na samom gospodarstvu. Hranjive tvari u žetvenim ostacima, ma kako ih malo bilo, nalaze se na mjestu primjene i nije potreban nikakav transport, dakle mala količina biogenih elemenata nije razlog njihovog spaljivanja.

Žetveni se ostaci na tlima dobre biogenosti brzo razlažu, utječu na povećanje mikrobiološke populacije različitih mikroorganizama i mezofaune (povećavaju biogenost), dok primjena manjih količina dušika za podešavanje povoljnog C/N omjera ne predstavlja posebnu poteškoću. Jedan dio djelomično razložene svježije organske tvari uz pomoć mikroorganizama iznova gradi humus i taj proces se naziva *humifikacija*. Mnoga istraživanja jasno pokazuju da hranjive tvari iz žetvenih ostataka imaju istu hranidbenu vrijednost kao iz stajnjaka.



Slika 4.19. Razgradnja žetvenih ostataka u uvjetima fakultativne anaerobne respiracije mikroorganizama ($E_h = -100$ do $+300$ mV)

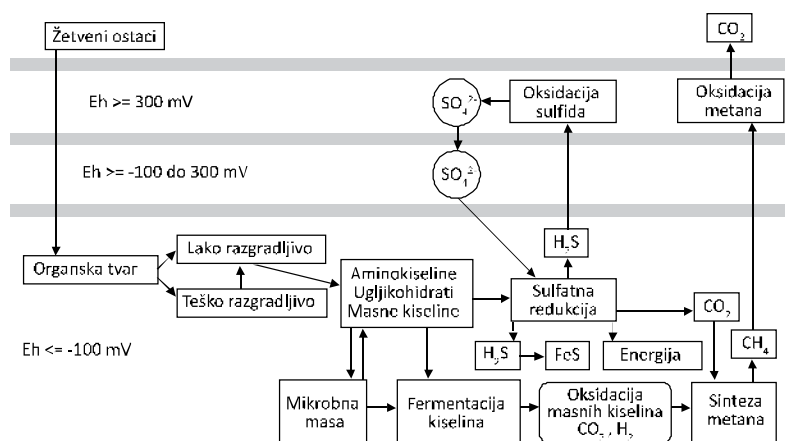
Uvjeti oksido-redukcije u tlu bitno utječu na razgradnju svježije unesene organske tvari u tlo. Naime, mikrobiološka aktivnost i metabolizam mikroorganizama uvjetovani su oksido-redukcijskim potencijalom i mogućnošću oksidacije organske tvari (slike 4.17., 4.18. i 4.19.). Oksido-redukcijski potencijal (E_h) u tlu rijetko prelazi $+700$ mV (oksidacijski uvjeti), odnosno -300 mV (redukcijski uvjeti). U oksidacijskim uvjetima ($E_h \geq +300$ mV) tlo sadrži dovoljno kisika i tada djeluju *aerobni mikroorganizmi*. Kod $E_h = -100$ do 300 mV organsku tvar razlažu *fakultativno anaerobni mikroorganizmi*, a u redukcijskim uvjetima ($E_h \leq -100$ mV) *anaerobni mikroorganizmi*. Ovisno o oksido-redukcijskom potencijalu, zone oksido-redukcije u tlu su prema *Chenu i Avnimelechu* (1986.) sljedeće:

- redukcija kisika: $E_h \geq +300$ mV (aerobna respiracija),
- redukcija nitrata i Mn^{4+} : $E_h = +100$ do $+300$ mV (fakultativna anaerobna respiracija),
- redukcija Fe^{3+} : $E_h = -100$ do $+100$ mV (fakultativna anaerobna respiracija),
- redukcija sulfata: $E_h = -200$ do -100 mV (anaerobna respiracija) i
- nastanak metana: $E_h \leq -200$ mV (anaerobna respiracija).

Sitni fragmenti organske tvari i ekskrementi makro i mezofaune koji preostaju nakon prve faze humifikacije vrlo su povoljan medij za rast bakterija, algi i

nematoda, što dalje ubrzava njenu razgradnju. Najveći dio CO_2 odlazi u atmosferu i samo se 20-30 % ugradi u novonastali humus. Od ugljikohidrata se manje od 20 % transformira u humus, dok se *lignin*, *tanin* i *fenolne komponente* humificiraju s više od 75 %. Važno je spomenuti da se dušik humificira s koeficijentom od približno 50 %.

Nakon katabolizma svježe organske tvari slijedi anabolizam i sinteza "*plazma tla*". *Plazma tla* je tekuće konzistencije i sadrži proteine, soli, druge razložene organske fragmente i vodu. Zapravo to je "*krv tla*" jer su u vodi otopljene različite tvari i suspenzirane sitnije krute čestice (analogno pravoj krvi). Zbog toga porozna struktura tla ima važnost krvotoka koji prenosi pojedine komponente plazme tla i osigurava kisik i vodu. Iz plazme se sintetskim procesima i vezivanjem na glinene čestice gradi stabilna humusna tvar tla koja zapravo i održava povoljnu strukturu preko nastanka organomineralnih kompleksa, odnosno strukturnih agregata. Stoga je humus zapravo *dormantna snaga tla* ili uspavana moć i temelj prirodne plodnosti tla, odnosno izvor energije i plodnosti "Majke Zemlje".



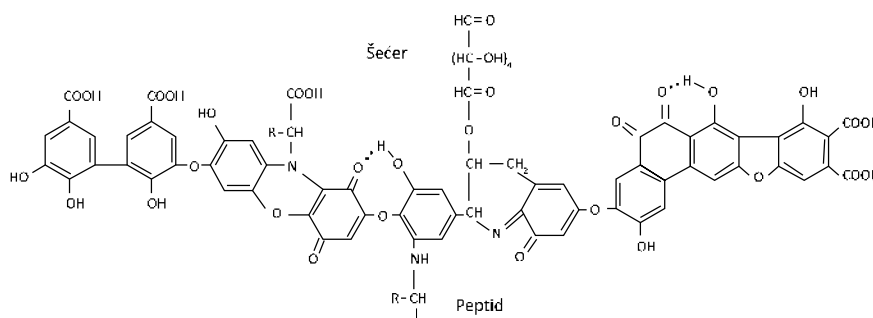
Slika 4.20. Razgradnja žetvenih ostataka u redukcijским uvjetima (kada je $E_h \leq -100$ mV)

Humus se kao aktivna koloidno-organska frakcija tla povezuje na različite načine s mineralnim koloidnim česticama i tako nastaju stabilni organomineralni kompleksi (slika 4.11.) koji su temelj agregiranja čestica tla u strukturne agregate.

S pedološkog aspekta, humus je organska tvar koja je u uvjetima nekog staništa teško razloživa što dovodi do njenog nagomilavanja u tlu. Međutim, humus nije određena kemijska tvar niti grupa sličnih spojeva koji bi se kemijski lako mogli definirati. Stoga je razumljivo da humus različitih tala posjeduje bitno drugačija kemijska i fizička svojstva. Humus se može opisati i kao proizvod nepotpunog razlaganja biljnih i životinjskih ostataka pri čemu se oni djelomično posve mineraliziraju, dok se preostali dio pod utjecajem različitih mikroorganizama tla

iznova sintetizira u više ili manje stabilne kemijske spojeve otporne prema daljnjem razlaganju. Taj prirodni proces je nezamjenjiv i za sada još nije nemoguće sintetizirati stabilnu organsku tvar kao zamjenu za humus. Humusne tvari, usprkos svojoj velikoj heterogenosti, posjeduju neka zajednička svojstva koja ih jasno razlikuju od životinjskih i biljnih ostataka.

Osnovne grupe humusnih tvari su *huminske* (slika 4.21.) i *fulvo kiseline* te *humini*. *Huminske kiseline* se ekstrahiraju iz tla lužinama kao tamno obojene suspenzije, a talože kiselinama u obliku gela. Molekularna masa im je 10.000-100.000 kDa, a elementarni sastav: C = 51-62 %, H = 2,8-6,6 %, O = 31-36 % i N = 3,6-5,5 %. Jezgre huminskih kiselina su ciklične prirode i povezane su mostovima tipa -O-, -N=, -NH- ili -CH₂-, a na jezgre su vezani polimerni ugljikovi lanci koji nose funkcijske ili reakcijske skupine (-COOH, -OH, -OCH₃, i =CO) koje određuju karakter veze huminskih kiselina i čestica tla.



Slika 4.21. Struktura molekule huminske kiseline (Stevenson, 1982.)

Ciklične jezgre općenito su srodne fenolima, ali i drugim organskim kiselinama i vitaminima. Polimerizaciju obavljaju mikroorganizmi, npr. mnoge vrste gljiva, aktinomicete (*Streptomyces*) i drugi uz pomoć enzima iz grupe *fenol oksidaza*. *Aspergillus*, *Pisolithus*, *Rhizoctonia* i *Streptomyces* su samo predstavnici mikroorganizama koji sintetiziraju ciklične (aromatske) komponente humusa iz necikličnih spojeva.

Fulvokiseline su žućkaste (otuda im potječe naziv) ili crvenkaste boje, molekularna masa im je 1.000-5.000 kDa, dakle znatno su manje prema huminskim kiselinama, a zaostaju u otopini nakon taloženja huminskih kiselina. Elementarni sastav im je: C = 42-47 %, H = 3,5-5 %, O = 45-50 % i N = 2-4,1 %. Fulvokiseline također imaju ciklične jezgre, ali manje kondenzirane, kiselije i topljivije u vodi u odnosu na huminske kiseline.

Humini se uobičajeno ekstrahiraju iz tla toplom lužinom (NaOH), a smatra se da su reducirani anhidridi humusnih kiselina.

Sadržaj organske tvari u tlu može se povećavati, smanjivati ili zadržavati na istoj razini. Promjene su spore jer su komponente humusa, huminske i fulvo kiseline, vrlo otporne na razlaganje. Organska tvar u tlu sadrži prosječno 50-54 % ugljika i

4-6 % dušika pa je omjer C/N približno 10:1. Oranjem se zaorava više ili manje žetvenih ostataka širokog C/N omjera, a i primjenom organskih gnojiva u tlo se unosi organska tvar s prilično širokim omjerom C/N. Mikrobiološka aktivnost u tlu dovodi do postupnog sužavanja tog omjera u procesu oksidacije ugljika, a oslobođenu kemijsku energiju koriste mikroorganizmi za svoje potrebe (*kemosinteza*). Sve dok C/N omjer ne padne na određenu vrijednost, sav oslobođeni dušik u toj fazi razgradnje organske tvari koriste mikroorganizmi za svoje potrebe. Oslobođanje dušika i mogućnost njegovog usvajanja višim biljkama započinje tek kad je $C/N < 25:1$, a potpuna asimilacija od strane mikroorganizama je kod $C/N > 33:1$. Dušik je ugradnjom u živu tvar mikroorganizama privremeno izgubljen za ishranu bilja, a takav vid imobilizacije naziva se *biološka fiksacija dušika* koja traje sve do uginjanja mikroorganizama (odnosno do mineralizacije nežive biomase mikroorganizama).

Omjer ugljika i dušika ovisi o fizikalno-kemijskim svojstvima tla pa je tako u kiselim tlima uobičajeno širi nego u neutralnim i lužnatim tlima. Također, C/N omjer se mijenja s povećanjem dubine soluma. U podoraničnom sloju omjer je uži u odnosu na pliće slojeve tla.

Značaj humusa u tlu može se promatrati s fizičkog, kemijskog i biološkog aspekta. U fizičkom pogledu humus poboljšava vodnozračni režim i termička svojstva tla. Tlo s više humusa je tamnije boje te apsorbira veću količinu Sunčeve radijacije uz njegovo brže zagrijavanje. Nezamjenjiva je uloga humusa u nastanku strukturnih agregata tla i nastajanju mrvičaste strukture koja poboljšava aeraciju i drenažu. Strukturna tla vežu više vode, manje su podložna eroziji i ispiranju koloidnih čestica te se znatno lakše obrađuju.

Veliki broj važnih kemijskih svojstava tla vezan je uz prisutnost humusa. Izrazita moć sorpcije iona i sposobnost različitih reakcija humusa s mineralnom frakcijom tla osigurava organskoj tvari prvorazredan značaj u poboljšanju njegovih kemijskih svojstava. Humus znatno povećava kapacitet tla za sorpciju iona i preko toga poboljšava njegova puferna svojstva regulirajući ravnotežu između iona u vodenoj fazi tla i onih koji su izmjenjivo vezani na koloidnim česticama tla.

Vrlo značajna uloga humusa je u stvaranju kompleksnih spojeva (*kelata*) koje biljke lako mogu usvajati i tako vezani ioni kovina nisu podložni ispiranju ili različitim mogućnostima imobilizacije (kemijska i biološka fiksacija). Teški metali imaju posebice izraženu sklonost kelatiranju.

Pored sprječavanja gubitaka teških metala ispiranjem ili njihovom transformacijom u teško topljive spojeve koje biljke ne mogu usvajati, značajna je uloga organske tvari u sprječavanju kemijskog vezivanja fosforne kiseline nakon gnojidbe fosforim gnojivima (*humat efekt*), posebice u kiseloj sredini gdje lako nastaju netopljivi i nepristupačni fosfati željeza i aluminijski. Stoga je

humus naročito važan u opskrbi biljaka fosforom, kalcijem i željezom i kao izvor dijela P, S, K, Fe i drugih biogenih elemenata.

Procesi sorpcije, desorpcije i potencijal hraniva razmatraju se u posebnom poglavlju, a iznos sorpcije u tlu koji otpada na organsku tvar može se približno procijeniti empirijskim izrazima:

$$\text{KIK}_{\text{cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1} \times \text{g}^{-1} \text{ org. tvari}} = -60 + 50 \times \text{pH}$$

Kako sorpcijska moć humusa jako ovisi o pH tla, poželjno je kod procjene kationskog izmjenjivačkog kapaciteta tla uzeti u obzir korekciju na pH. Empirijska procjena KIK-a često se izračunava sljedećim izrazom:

$$\text{KIK}_{\text{cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}} = \frac{200 \times \text{humus \%}}{100} + \frac{50 \times \text{glina \%}}{100}$$

Prema gornjem izrazu za empirijsku procjenu KIK-a, kod 2 % humusa i 20 % gline u tlu KIK = 14,0 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹, a uz korekciju na pH = 7 (neutralna pH-reakcija) KIK = 15,8 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹, u kiseloj sredini (pH = 4) KIK = 12,8 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹. Naravno, kod tala koja sadrže puno humusa, npr. šumska, livadna ili vrtna, s porastom kiselosti kapacitet sorpcije jako pada. Uz to, smanjivanje kapaciteta sorpcije se odražava na lošu sposobnost kelatizacije u kiseloj sredini, odnosno slabu učinkovitost humat efekta.

Dakle, značaj organske tvari tla je dvojak. Ona je izvor biljnih hraniva i ima nezamjenjivu ulogu za stabilnost agregata tla (osnovni čimbenik kultivacije), potpomaže kretanje vode i zraka u tlu, povećava retenciju vode i biogenost, sprječava eroziju, snažno povećava puferni efekt tla uz sprječavanje ispiranja hraniva (zadržavanje hraniva u zoni korijena, sorpcija pesticida itd.), daje boju (što utječe na bolje zagrijavanje tla) i snižava njegovu gustoću ($\rho_{\text{t}} \sim 2,65 \text{ g cm}^{-3}$ u mineralnim tlima, a u tresetnim (> 30 % humusa) $\rho_{\text{t}} \sim 0,90 \text{ g cm}^{-3}$; $\rho_{\text{v}} \sim 1,35 \text{ g cm}^{-3}$).

4.7. VODA U TLU

Voda je "medij života" i dobra opskrbljenost vodom svih živih bića izuzetno je važna. Biljke najveći dio vode uzimaju korijenskim sustavom iz tla, premda je mogu usvajati listom i svim drugim organima (ako nisu prekriveni debelom kutikulom ili korom). Gruba procjena raspoloživosti vode (AI) najčešće se iskazuje *indeksom aridnosti po De Martonneu*:

$$AI = \frac{\left[\frac{P / (T + 10) + 12 \times p}{(t + 10)} \right]}{2}$$

P = srednja godišnja količina padalina (mm)

T = srednja godišnja temperatura (°C)

p = količina padalina najsušnijeg mjeseca (mm)

t = prosječna temperatura najsušnijeg mjeseca (°C)

Za 650 mm godišnje količine vodenog taloga, prosječnu godišnju temperaturu od 11 °C, 50 mm padalina u najsušnijem mjesecu i prosječnu mjesečnu temperaturu najsušnijeg mjeseca od 25 °C *indeks aridnosti* za semiaridnu klimu, kakva je na prostoru istočne Hrvatske, po *De Martonneu* je:

$$AI = \left[\frac{P / (11 + 10) / (25 + 10) + 12 \times 50}{2} \right] = 9,01$$

Tablica 4.14. Klasifikacija klime prema indeksu suše *De Martonnea*

AI	Klima
≤ 5	aridna (sušna)
5 – 12	semi-aridna (polu sušna)
12 – 20	sušna sub-humidna
20 - 30	vlažna sub-humidna
30 – 60	humidna (vlažna)
≥ 60	kišna

Kad je *indeks aridnosti* ≤ 20, prema *De Martonneu*, područje je sušno (tablica 4.15.). Ekvatorijalna *humidna klima* ima svih 12 mjeseci indeks aridnosti > 20, ekvatorijalna klima s jednim sušnim razdobljem ima 7 mjeseci indeks iznad 20 itd. Indeks aridnosti može se primijeniti i za procjenu aridnosti po mjesecima vegetacije.

Za determinaciju učinkovitosti oborina nekog područja najčešće se koristi *Thornthwaite indeks* učinkovitosti padalina (tablica 4.15.):

$$PE_{\text{indeks}} = \sum_{T}^{n=12} 1,65 \times \left[\frac{P}{(T - 12,2)} \right]^{\frac{10}{9}}$$

P = mjesečne padaline u mm

T = prosječna mjesečna temperatura u °C

n = broj mjeseci

Danas se najčešće koristi UNESCO-v indeks aridnosti (1979.) koji se temelji na omjeru između padalina (P = padaline) i potencijalne evapotranspiracije (ET_o = *Pennman-Monteithova* formula):

$$AI = \frac{P}{ET_o}$$

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 \times u_2)}$$

ET_o = referentna evapotranspiracija (mm dan⁻¹),
 R_n = neto radijacija na površini usjeva (MJ m⁻² dan⁻¹),
 G = toplinski tok u tlu (MJ m⁻² dan⁻¹),
 T = prosječna dnevna temperatura zraka na 2 m visine (°C)
 u_2 = brzina vjetra na 2 m visine (m s⁻¹)
 e_s = tlak zraka pri saturaciji zraka vodenom parom (kPa)
 e_a = aktualni tlak zraka (kPa)
 $e_s - e_a$ = deficit saturacije zraka vodenom parom (kPa)
 D = nagib krivulje tlaka zraka (kPa °C⁻¹)
 γ = psihrometrijska konstanta (kPa °C⁻¹)

Tablica 4.15. Klasifikacija klimatskih područja zasnovana na *Thornthwaite indeksu* učinkovitosti padalina

PE indeks	Klimatska klasa
≥ 128	kišna
100-127	humidna (vlažna)
64- 99	kišna sub-humidna
32- 63	suha sub-humidna
≤ 16	aridna (sušna)

Bilanca vode u tlu ovisi o dotoku, kretanju i gubitku vode (slika 4.22.). Pokretljivost vode u tlu i njeni gubitci vrlo su složeni i na taj proces djeluje niz čimbenika od kojih su najznačajniji fizikalna svojstva tla (tekstura, struktura, dubina soluma, dubina podzemne vode i dr.), klima (količina i raspored padalina, temperatura i vlaga zraka, evaporacija i dr.),

vegetacija, naročito potreba biljaka za vodom, dubina i moć usvajanja korijenskog sustava, intenzitet transpiracije i dr.

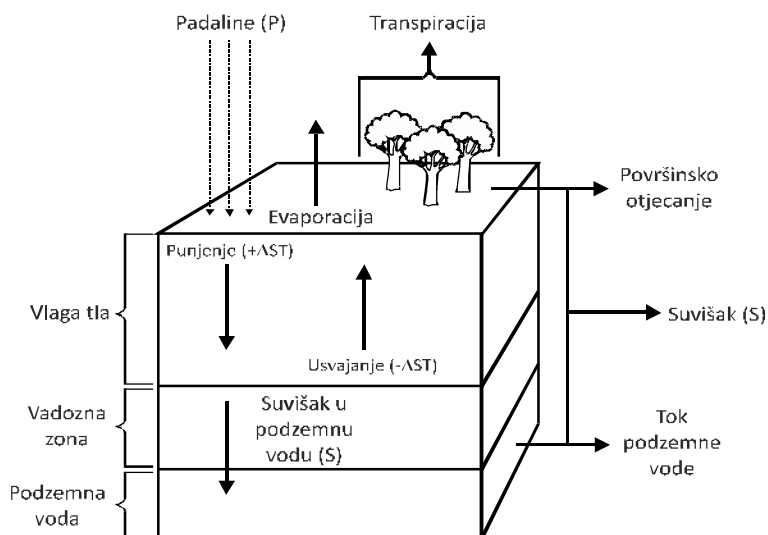
Visok osmotski tlak vodene faze na slanim tlima može onemogućiti usvajanje vode. Biljke slanih staništa (*halofite*), koje su prilagođene takvim uvjetima, mogu usvajati vodu vezanu silama do 100 bara (10 MPa), za razliku od mezofita čija sila usvajanja vode ne prelazi 15 bara (1,5 MPa). Porast osmotskog tlaka često nastaje kod unošenja većih količina mineralnih gnojiva u suho tlo. Ta se pojava naziva *solni udar* i sprječava biljke da uzimaju vodu i hranjive tvari u njoj.

Voda se u tlu nalazi vezana različitim silama koje korijenski sustav kod usvajanja mora savladati pa se voda u tlu dijeli na dvije klase:

- pristupačna i
- nepristupačna.

Sile koje vodu drže uz čestice tla su s jedne strane *tenzija vlažnosti* (površinske, hidrostatičke i gravitacijske sile), a s druge strane *osmotski tlak* vodene faze tla.

Ukupna količina vode koju tlo može zadržati nakon procjeđivanja (*perkolacije*) gravitacijske vode i gubitka površinskim otjecanjem na nagnutim parcelama (*runoff*) koju tlo ne može upiti (*infiltracija* vode) označava se kao *retencijski kapacitet za vodu*. Budući da se čestice tla udružuju u strukturne agregate, od kojih zapravo najvećim dijelom ovisi njegov porozitet, kapacitet nekog tla za vodu funkcija je teksture i strukture tla (slika 4.23.) te sadržaja aktivne frakcije organske tvari. Naime, humus posjeduje veliku sposobnost zadržavanja vode u količini koja je nekoliko puta veća od njegovog sadržaja u tlu.



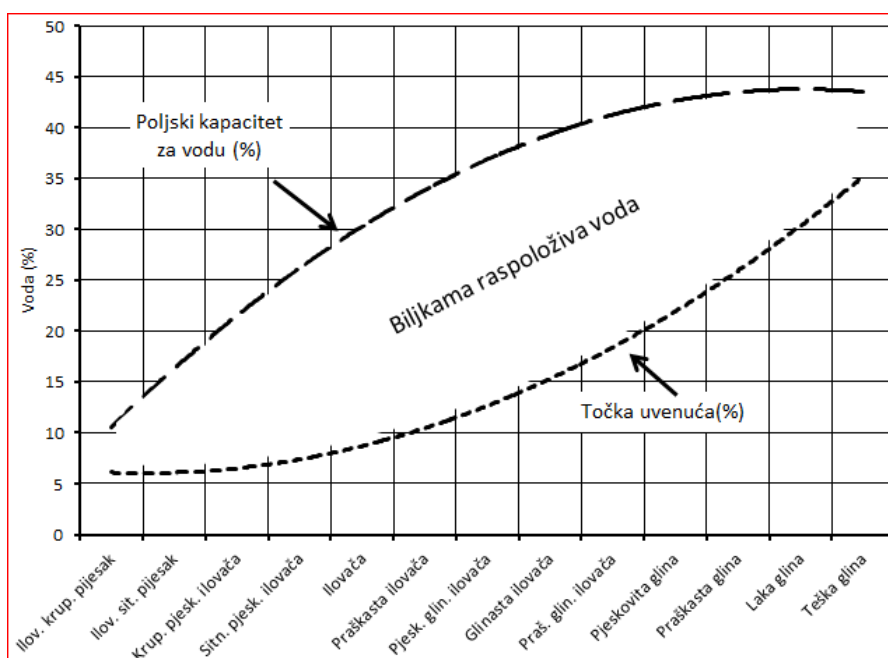
Slika 4.22. Bilanca vode u tlu

Količina vode u tlu ovisi najviše o teksturi i sadržaju organske tvari. Tla "fine teksture", zahvaljujući većoj površini čestica i mnoštvu kapilarnih pora, zadržavaju više vode u odnosu na tla grube teksture, što dobro ilustrira tablica 4.16. Pokretljivost vode u tlu, odnosno njegova hidraulična svojstva ovise o teksturi i strukturi tla, odnosno ukupnoj poroznosti tla, dijamentru pora i popunjenosti pora vodom. Što tlo sadrži manje vode, posebice suho tlo, to teže provodi vodu (negativniji potencijal, ψ) pa konduktivitet (provodljivost tla za vodu) raste s vlažnošću tla.

Voda u tlu dijeli se u četiri klase, ovisno o njoj pristupačnosti za usvajanje: *gravitacijska, kapilarna, higroskopska i kemijski vezana voda*.

4.7.1. Gravitacijska voda

Gravitacijska voda zadržava se u krupnim porama tla i otječe pod djelovanjem gravitacije. Zbog toga se ovaj oblik često naziva i *slobodna voda*. U slučaju jačih padalina ili poplave (kod dužeg zadržavanja gravitacijske vode) dolazi do *hipoksije* (i *anaerobioze*), otkazivanja funkcija korijenja i gušenja biljaka. Vlažnost tla preostala nakon otjecanja gravitacijske vode odgovara *poljskom kapacitetu vlažnosti*. Brzo otjecanje gravitacijske vode iz zone korijenja uvjetuje njezinu malu iskoristivost za potrebe biljaka.



Slika 4.23. Utjecaj teksture tla na raspoloživost vode

Tablica 4.16. Sadržaj vode u tlima različite teksture

Teksturna klasa tla	Voda % (na apsolutno suho tlo)			
	Higroskop. voda	Koeficijent uvenuća	Poljski kapac. vlage	Dostupna voda
Fini pijesak	3,41	3,7	7,6	2,9
Pjeskovita ilovača	6,93	7,2	15,5	8,3
Prašasta ilovača	10,40	12,7	24,0	11,3
Glinasta ilovača	16,10	20,6	30,4	9,8

4.7.2. Kapilarna voda

Kapilarna voda zadržava se u porama pod utjecajem površinskih sila čestica tla. Ona ne podliježe gravitaciji jer se drži silama površinskog napona za zidove kapilara tla ili je pak "poduprta" razinom podzemne vode. Kapilarna voda je raspoloživa za usvajanje i predstavlja najvažniji dio vode. Količina kapilarne vode u nekom tlu označava se kao *poljski kapacitet vlažnosti* ili *kapilarni kapacitet tla*. Količina vode u kapilarama može se izraziti *Poiseuille-Hagenovom* jednadžbom:

$$Q = \frac{dp \times \Pi \times r^4}{8 \times l \times n}$$

(dp = najveći deficit difuznog tlaka (≈ 15 bara), r = radijus kapilare, l = duljina kapilare, n = viskoznost vode)

S obzirom da adhezijske sile čestica tla smanjuju vodni potencijal, kapilarna voda ima sposobnost kretanja po gradijentu vlažnosti, odnosno od vlažnijeg (veća slobodna energija) prema manje vlažnom dijelu tla (manja slobodna energije vode).

4.7.3. Higroskopna voda

Higroskopna voda je dio kapilarne vode čije opne ne prelaze debljinu 15-20 molekula vode i ona se drži za čestice tla snagom koja dostiže 100 MPa. Ovaj oblik vode određuje se sušenjem na 105 °C i biljkama je potpuno nedostupan. Količina higroskopne vode u nekom tlu upravo je proporcionalna njegovoj koloidnoj frakciji, a obrnuto proporcionalna veličini čestica. Dakle, s porastom sadržaja koloida tla i smanjivanjem njegovih čestica, sve je više higroskopne vode.

4.7.4. Kemijski vezana voda

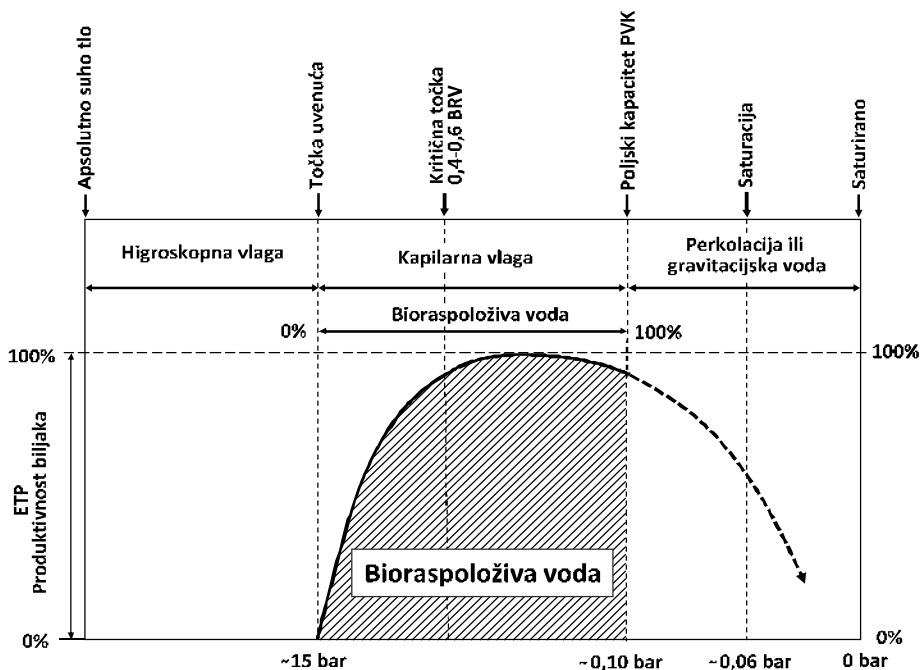
Kemijski vezana voda ugrađena je u različite hidratizirane kemijske spojeve tla i nije raspoloživa za usvajanje.

4.7.5. Raspoloživost vode

Higroskopna i kemijski vezana voda u tlu predstavljaju takozvanu *mrtvu rezervu* i mogu se odrediti *metodom uvenuća biljaka* koja se temelji na uzgoju biljaka u posudama. Kad se biljke dobro razviju, zalijevanje se prekida, a one se prenose u hladovinu. U trenutku početka venjenja, količina vode utvrđuje se nekom od laboratorijskih metoda i ta se vlažnost tla označava kao *koeficijent uvenuća* nekog tla za ispitivanu biljnu vrstu. Međutim, tlo još sadrži izvjesnu količinu vode koju biljke mogu s velikim naporom koristiti, a nakon toga uvenuće biljaka je toliko da se ne mogu više povratiti u život dodavanjem vode. To stanje vlage u tlu naziva se *točka trajnog uvenuća* i odgovara približno stanju u kojem tlo sadrži isključivo higroskopnu vodu. Interval vlažnosti između koeficijenta uvenuća i točke trajnog uvenuća naziva se *interval uvenuća*. Stoga se može napisati:

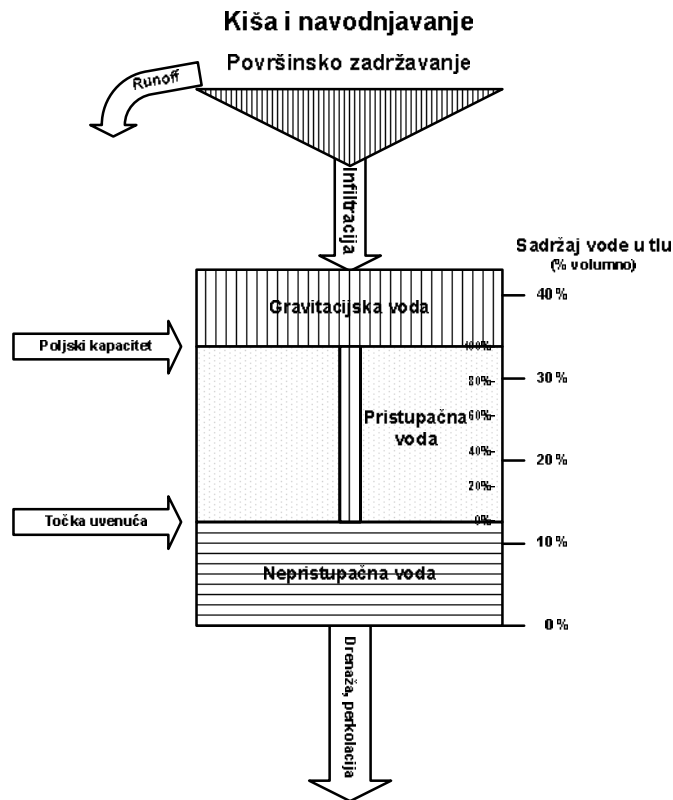
$$\text{Raspoloživa voda} = (\text{sadržaj vode u tlu} - \text{točka uvenuća}) \times \text{dubina korijena}$$

Biljke mogu usvajati vodu silom do 1,5 MPa (što odgovara $pF = 4,2$ jer je $\log_{10}(15.000) = 4,18$) pa higroskopna i kemijski vezana voda u tlu predstavljaju tzv. *mrtvu rezervu* i mogu se odrediti *metodom uvenuća biljaka* koja se temelji na uzgoju biljaka u posudama. Voda koja je vezana za čestice tla silom manjom od 10 kPa (0,1 bara) lako se gubi iz tla pod utjecajem gravitacije i procjeđivanjem kroz krupnije pore tla (slika 4.24.).



Slika 4.24. Tenzija vode u tlu i njena bioraspoloživost (BRV)

Utvrđivanje raspoloživosti vode (*water budget*) je vrlo složen problem jer je status vode dinamičan sustav čiji su reprezentanti higroskopna, kapilarna i gravitacijska voda. *Ukupni potencijal vode tla* (ψ_t) suma je matriks (ψ_p), osmotskog (ψ_o), hidrostatskog (ψ_m), pneumatskog (ψ_{pn}) i gravitacijskog potencijala (ψ_g) od kojih su prva tri presudna za raspoloživost vode (*matriks potencijal* je posljedica međusobnih veza vode i čestica tla, osmotski nastaje vezivanjem vode za otopljene tvari u njoj, a hidrostatski je posljedica gustoće, količine vode i gravitacije). Stoga je *retencija vode* prvenstveno određena teksturnom klasom tla, ali i velikim brojem drugih parametara (zbijenost, prisutnost nepropusne zone, nagib, visina podzemne vode, homogenost soluma itd.) koji se teško mogu potpuno procijeniti. Približnu veličinu potencijala vode u sustavu tlo-biljka-atmosfera prikazuje tablica 4.17. Iz tih podataka jasno je da postoji vrlo velika razlika u potencijalu vode između tla, biljke i atmosfere što je uz korijenski tlak pokretačka sila usvajanja vode, njenog kretanja kroz biljku i konačno gubitka transpiracijom. Premda je korijenski tlak u tim odnosima tla, biljke i atmosfere mali (1 do 2 bara), njegova je uloga nezamjenjiva, posebice u okolnostima kada je visoka relativna vlaga zraka ili u ranim fazama rasta kad biljke nemaju još formirano lišće.



Slika 4.25. Status vode u tlu: "Bucket model" raspoloživosti vlage za glinaste ilovače (Hillel, 1998.).

Tablica 4.17. Potencijal vode (u barima) u sustavu tlo-biljka-atmosfera (*Milton and Moorby, 1978.*)

Sredina	Turgescientne biljke	Uvenule biljke
Tlo	-0,1 do -10,0	-10,0 do -20,0
List	-2,0 do -15,0	-15,0 do -30,0
Atmosfera	-100,0 do -2000,0	-100,0 do -2000,0

Za utvrđivanja statusa vode u tlu (slika 4.25.) potrebno je poznavati veliki broj parametara, npr. dubinu korijena, gustoću i porozitet tla, poljski kapacitet za vodu, točku uvenuća, faktor usjeva, faktor tla, aktualnu evapotranspiraciju, potencijalnu evapotranspiraciju (najveću moguću), retencijski kapacitet tla za vodu, aktualnu vlažnost tla, količinu oborina i dr. (tablica 4.18.) što se razmatra detaljno u poglavlju "Matematičko modeliranje rasta i razvoja usjeva".

Tablica 4.18. Fizikalna svojstva tla važna za status vode (*Alberta Agriculture, Food and Rural Development, 2004.*)

Tekstura	Ukupni porozitet %	Točka uvenuća	Poljski kapacitet	Raspoloživa voda vol. %	Infiltracija (satur. tlo) mm h ⁻¹
		vol. %			
Ilovasti pijesak	40	6	16	10	26-60
Pjeskovita ilovača	42	8	22	14	25,6
Ilovača	43	12	30	18	6,8
Pjesk.-glin. ilovača	45	13	29	16	4,3
Prašasta ilovača	45	10	30	20	13,2
Glinasta ilovača	47	16	36	20	2,3
Praš.-glin. ilovača	47	18	40	22	1,5
Pjeskovita glina	45	20	37	17	1,2
Ilovasta glina	47	25	46	21	1
Glina	49	23	42	19	0,6

4.8. TEMPERATURA TLA

Temperatura tla može znatno varirati ovisno o vremenu (godišnje, dnevno) i dubini profila. Stoga se tla prema temperaturnom režimu klasificiraju na temelju prosječne temperature na dubini od 50 cm u 5 klasa:

- stalno smrznuta (*pergelic*),
- hladna ili ledena (*cryic*, prosječna godišnja temperatura ≤ 8 °C),
- srednja (*mesic*, prosječna godišnja temperatura je između 8 i 15 °C),
- topla (*thermic*, prosječna godišnja temperatura je između 15 i 22 °C) i
- hipertopla (*hyperthermic*, prosječna godišnja temperatura ≥ 22 °C).

Osim temperature tla, važan je i njegov toplinski kapacitet koji je ovisan o omjeru vode, mineralne i organske tvari, sposobnost prijenosa topline (toplinski konduktivitet tla) između zagrijavanog površinskog sloja prema rizosferi i dublje na što utječe omjer mineralog dijela, vode, plina i organske tvari u tlu, kao i sposobnost odavanja topline (*radijacijom*, odnosno zračenje topline u okolni prostor te *konvekcijom* ili kretanjem zagrijanog, lakšeg zraka).

Tla koja sadrže više organske tvari su, pored dobre strukture i tamnije boje te bolje apsorbiraju Sunčevu radijaciju. Npr. *albedo* (refleksija Sunčeve radijacije u %) tamnog tla je 5-15 %, travnjaka 10-20 %, dok na golom, vlažnom tlu s malo organske tvari može doseći gotovo 50 %. Važno je znati da od Sunčeve radijacije koja dospije na površinu usjeva svega ~ 1 % biljke iskoriste u procesu fotosinteze, ~ 80 % se potroši za evaporaciju vode, a tek ~ 20 % je iskorišteno u zagrijavanju tla. Zagrijavanje tla jako ovisi i o ekspoziciji (koja određuje upadni kut Sunčevog zračenja), što je neobično važno kod uzgoja termofilnih vrsta (npr. vinove loze), godišnjeg doba, nadmorske visine (za svakih 100 m nadmorske visine temperatura zraka pada za ~ 0,65 °C), biljnog pokrova, vlažnosti tla, brzine vjetra i mikrotopografije (dubina, način obrade tla i sl.).

Temperatura tla je važan ekološki čimbenik koji određuje niz strukturnih i funkcionalnih svojstava kako prirodnih tako i poljoprivrednih ekosustava. U nekim ekosustavima, temperatura u zoni korijena je najvažniji čimbenik za utvrđivanje neto primarne produktivnosti jer određuje duljinu vegetacije. Porastom temperature raste enzimatska aktivnost žive faze tla, jednako kao i metabolizam i rast korijena uz porast usvajanja vode i hraniva što zatim potiče sve druge biokemijske procese u biljci (disanje i fotosintezu) te ubrzava rast i razvitak biljaka. Smatra se da temperatura tla utječe na kinetiku usvajanja hraniva, posebice NH_4^+ , H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} i K^+ i to po pravilu Q_{10} , odnosno za svakih 10 °C usvajanje se ubrzava za 2 do 3 puta, ali samo do neke granice (npr. usvajanje fosfora i kalija raste kod kukuruza sve do 35 °C, dok disanje korijena na 40 °C još ne dostiže svoj maksimum).

Značaj temperature tla može se promatrati s više gledišta:

- A) Dekompozicija organske tvari (oslobađanje hraniva, utjecaj na vodni režim)
- B) Razgradnja minerala tla (led, temperaturna amplituda dan/noć i dr.)
- C) Rast biljaka (potreba za temperaturom, temperaturna valenca, optimum)
 - 1) direktan utjecaj
 - a) klijanje i nicanje sjemena
 - b) rast korijena
 - c) usvajanje hraniva
 - d) rast izdanaka
 - 2) indirektan utjecaj
 - a) premještanje vode
 - b) premještanje plinova (N_2 , O_2)
 - c) struktura tla

- d) raspoloživost hraniva
- D) Difuzija hraniva
- 1) premještanje od najveće ka nižoj koncentraciji
 - 2) plinovi (O_2 , CO_2 , CH_4 , C_2H_2 , N_2)
 - 3) ioni (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NO_3^- , PO_4^{3-})
 - 4) organske tvari
- E) Pokretljivost vode (konvekcija, evaporacija)
- F) Biologija tla
- 1) mikroorganizmi (bakterije, gljive, i sl.; mikrobi mogu živjeti od $-12\text{ }^\circ\text{C}$ do $100\text{ }^\circ\text{C}$, ali u tlu većina ih živi između 0 i $30\text{ }^\circ\text{C}$)
 - 2) mezofauna (npr. gujavice; većina velikih organizama spušta se dublje u tlo tijekom zime ili ljeta)
 - 3) mikrobiološka kontrola razgradnje organske tvari (utjecaj na strukturu tla)

4.9. ZASLANJENOST I ALKALIČNOST TLA

Ukupne površine *halomorfnih* (zaslanjenih) tala na Zemlji (FAO) iznose približno 830 mil. ha (~ 400 mil. ha zaslanjenih, ~ 430 mil. ha alkalnih). Od trenutno 230 mil. ha navodnjavanih površina čak 45 mil. ha su zaslanjena tla ili izložena sekundarnom zaslanjivanju (19,5 %), a od 1,5 milijardi ha u suhom ratarenju 32 mil. ha (2,1%) je salinizirano do različitog stupnja ovisno o intenzitetu antropogenizacije. Procijenjeno je da procesi salinizacije i/ili alkalizacije u svjetskim razmjerima svake minute odnesu oko 3 ha površina za proizvodnju hrane. Na prostoru Republike Hrvatske problem salinizacije i/ili alkalizacije je ograničen na područje istočne Slavonije i Baranje, dolinu Neretve te uski obalni pojas Dalmacije i otoka.

Premda u Hrvatskoj, zbog pretežitog utjecaja relativno humidne klime, ima malo zaslanjenih i alkalnih tala (nova istraživanja ukazuju na više tisuća hektara), koja su uglavnom mozaično raspoređena unutar većih proizvodnih parcela, ima i većih kompleksa tako degradiranih površina. Veličinu problema zaslanjivanja i/ili alkaliziranja vrlo lijepo ilustrira nekoliko fotografija iz trokuta Valpovo-Donji Miholjac- Našice (slika 4.26.).

Također, u intenzivnoj ratarskoj proizvodnji, posebice plastenicima i staklencima, može doći do sekundarnog zaslanjivanja navodnjavanjem vodom koja sadrži previsoku količinu soli i uporabom velikih količina mineralnih gnojiva. Obično se zaslanjenost i/ili alkaliziranost tala klasificira prema tablici 4.20. Lužnatost vode za irigaciju i fertirigaciju izražava se u jedinicama RSC (*Residual Sodium Carbonate*):

$$RSC_{\text{mmol dm}^{-3}} = [\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}] - [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$$

RSC je ekvivalent količini kiseline ($\text{mmol dm}^{-3} \text{ H}^+$) koja je potrebna za neutralizaciju lužnatosti izazvane kalcijevim i magnezijevim karbonatima i hidrogenkarbonatima. Kada je $RSC > 2,5$, takvu je vodu rizično koristiti. Ako je $RSC 1,25-2,50$, voda je potencijalno opasna za dulju uporabu, a ispod 1,25 pogodna je za navodnjavanje.

Koncentracija otopljenih soli u vodi konvencionalno se utvrđuje mjerenjem električnog konduktiviteta ili električne provodljivosti tla (EC, tablica 4.19.):

EC je recipročna vrijednost specifičnog otpora (Ω):

$$EC = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{R} \times \frac{L}{A}$$

gdje je L/A konstanta mjerne ćelije K_c :

$$K_c = R \times EC$$

Zaslanjenost tla mjeri se u tlu konzistencije paste (saturirani vodni ekstrakt) ili u vodnom ekstraktu tla 1:5, a kada vrijednosti EC prelaze 4 dS m^{-1} , tlo se smatra zaslanjenim. Sposobnost prenošenja mola kationa ili aniona u otopini tla označava se kao *ekvivalentna provodljivost*, ali u polifaznom sustavu, kao što je tlo s velikom količinom elektrolita, dolazi do različitih anomalija pa se kao približan izraz za određivanje ukupnih lakotopljivih soli ($TDS = \text{Total Dissolved Solids}$) koristi:

$$TDS_{\text{mg dm}^{-3}} = EC_{\text{mS cm}^{-1}} \times 640$$

S većom količinom elektrolita u tlu, raste i osmotski tlak vodene faze:

$$OT_{\text{bar}} = EC_{\text{mS cm}^{-1}} \times 0,36$$

Višak soli povećava osmotski tlak vode pa tla s vrijednostima $EC \approx 4 \text{ mS cm}^{-1}$ imaju osmotski tlak oko 1,5 bara u suspenziji tlo-voda, dok u prirodnim uvjetima vlažnosti tenzija vode može često narasti u zaslanjenim tlama iznad granice raspoloživosti ($> 15 \text{ bara}$ ili $1,5 \text{ MPa}$) što ometa njeno usvajanje, ali i usvajanje hranjivih tvari. To rezultira pojavom *fiziološke suše* jer u tlu ima dovoljno vode, ali korijen biljaka ju ne može usvojiti.

Tablica 4.19. Klasifikacija slanih i alkalnih tala prema EC i SAR (Millar, 2003.)

Klasifikacija	EC dS m^{-1}	Alkalizirano SAR	pH	Fizikalni uvjeti tla
Zaslanjena	> 4	< 13	$< 8,5$	Normalno
Alkalna (sodic)	< 4	≥ 13	$< 8,5$	Loše
Zaslanjeno-alkalna	> 4	≥ 13	$< 8,5$	Normalno
Visok pH	< 4	< 13	$> 7,8$	Promjenjivo



Slika 4.26. Negativan utjecaj zaslanjivanja/alkalizacije na soju i kukuruz na području Bocanjevaca i Marijanaca (Vukadinović, 2011.)

Alkalizacija natrijem ocjenjuje se u odnosu na kompetitivne ione Ca^{2+} , Mg^{2+} i K^+ u jedinicama SAR (*Sodium Adsorption Ratio*) i ESP (*Exchangeable Sodium Percentage*):

$$\text{SAR}_{\text{cmol}^{(+)} \text{ dm}^{-3}} = K_G \times \frac{[\text{Na}^+]}{\sqrt{[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]}}$$

$$K_G = \frac{(\text{Ca}_{0,5} - x) \times (\text{Na}^+)}{(\text{Ca}^{2+})^{0,5} \times (\text{Na} - x)} \quad \text{ESP} = \frac{\text{Na}_{\text{izm}^+} (\text{cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1} \text{ tla})}{\text{KIK} (\text{cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1} \text{ tla})} \times 100$$

Gaponov koeficijent (K_G) važan je kod zamjene natrija i kalcija na sekundarnim mineralima koji specifično vežu ione u međulamelarnim prostorima (smektit i vermikuliti) i često se koristi za predviđanje natrij-kalcij razmjene u aridnim uvjetima. Povezivanje *aktivitetnog omjera* i omjera kationa na KIK-u daje mogućnost izračunavanja puferne sposobnosti nekog kationa, odnosno sposobnosti tla da održi njegovu koncentraciju u tekućoj fazi, npr. za natrij:

$$\frac{\text{Na}_{\text{iz}}}{(\text{Ca} + \text{Mg})_{\text{iz}}} = K_G \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})}}$$

Na lijevoj strani jednažbe su koncentracije u $\text{cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ tla izmjenjivo sorbiranih kationa (ekstrakcija amonijevim acetatom), dok desna predstavlja njihov aktivitet u tekućoj fazi tla izražene u mmol dm^{-3} . *Gaponov koeficijent* (K_G) uravnotežuje obje strane jednažbe, a kad u tlu nema *selektivne sorpcije*, što je tipično za natrij zbog njegovog velikog ionskog radijusa te ne može ulaziti u međulamelarne prostore sekundarnih minerala, iznosi 1/2. Pojavom selektivne sorpcije (tipično za K^+ i NH_4^+) K_G raste te ukazuje na čvrstoću vezivanja adsorpcijskim kompleksom tla (pojava *fiksacije*).

Između vrijednosti ESP i SAR te postotka izmjenjivog natrija na KIK-u, postoji empirijski utvrđena povezanost:

$$\text{ESP} = 0,015 \times \text{SAR} - 0,01 \quad (\text{uz } K_G = 0,015)$$

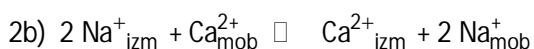
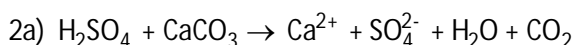
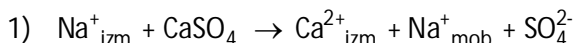
Za praktične potrebe, potencijal pojedinog hraniva rijetko se prikazuje energijom koju biljka mora uložiti da bi usvojila hranivo. Češće se izražava kao aktivitetni, odnosno *Scofieldov omjer* (AR_{Na}), ili analogno potencijalu vodika (pH), prema *Woodruffu* kao dekadni negativni logaritam aktiviteta Na^+ iona umanjen za pola potencijala Ca^{2+} i Mg^{2+} , npr. za natrij:

$$\text{pNa} = \text{pNa} - 0,5 \times \text{p}(\text{Ca} + \text{Mg})$$

Istraživanja na našim solonecima (*Vesna Vukadinović, 2003.*) pokazala su kako se sadržaj natrija u tlu smanjuje tek nakon šesterostrukog eluiranja tla vodom na približno 1/2 do 1/3 prvobitne vrijednosti. Stoga treba naglasiti da ni vrijednosti

kvocijenta alkalizacije (SAR) u Bt, na horizontu soloneca-solončaka na lokaciji Kurnjak (45,677 N; 18,220 E) nisu pale ispod 15 (slika 4.27.) pa kod jako alkaliziranih soloneca samo ispiranje natrija velikom količinom vode ne dovodi do pada SAR-a na prihvatljivu vrijednost SAR < 15.

Uklanjanje suviška natrija iz tla moguće je provesti melioracijskim dozama gipsa (ili sumporne kiseline) što je puno češća melioracijska mjera popravke natričnih tala. Naime, primjenom gipsa dolazi do zamjene 2 Na⁺ na adsorpcijskom kompleksu tla (izm) s Ca²⁺ pa se pokretni natrij (mob) s vodom ispire iz tla.



Potreba za gipsanjem lako se izračuna kad su poznati KIK i ESP. Primjerice, ako je: a) KIK = 15 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹, b) ESP 20 %, c) volumna gustoća tla 1,5 (3.000.000 kg × 20 cm⁻¹ ha⁻¹) tada je:

$$\text{ESP}/100 \times \text{KIK}, \text{ odnosno: } 20/100 \times 15 = 3,0 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1} \text{ Na},$$

$$3,0/100 \times 136/2 = 2,04 \text{ g kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ (M(CaSO}_4\text{) = 136 g mol}^{-1}\text{, a za prirodni M (CaSO}_4\text{} \times 2 \text{ H}_2\text{O) = 172 g mol}^{-1}\text{)},$$

$$2,04 \times 3.000.000 = 6.120.000 \text{ g ili } \underline{6,12 \text{ t CaSO}_4 \text{ ha}^{-1}}$$

U Hrvatskoj je bilo istraživanja primjene fosfogipsa kao materijala za kalcizaciju (deponija Lonjsko polje, ~ 4,5 mil. t) koji je otpad u proizvodnji mineralnih gnojiva (vidi poglavlje Mineralna gnojiva), ali je s aspekta zaštite okoliša takva praksa nedovoljno provjerena zbog njegove radioaktivnosti (sadrži radioaktivne nuklide U, Ra i dr.) te toksičnih elemenata (F, Cd i dr.).

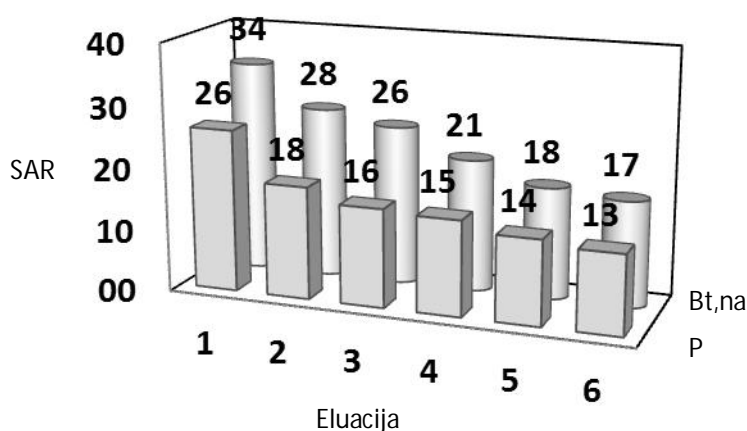
4.10. SADRŽAJ ŠTETNIH TVARI U TLU

Ekološki sustav podrazumijeva zajednicu svih živih bića i životnog prostora bez obzira je li to prirodna sredina (uključujući fizička i kemijska svojstva tla) ili je izmijenjena aktivnošću ljudi. Brz tehnološki napredak i potreba za sve većim količinama hrane uz intenzivnu kemizaciju poljoprivrede uzrok su sve onečišćenijoj životnoj sredini, smanjenju njenih prirodnih mogućnosti regeneracije i sve bržoj *devastaciji*. Stoga većina razvijenih zemalja, uključujući i RH (*Ustavno pravo svakog čovjeka je pravo na zdrav okoliš*), shvaća da je zaštita tla neodvojiva od gospodarskog razvitka društva te donosi stroge zakone o zaštiti okoliša i uvodi monitoring, odnosno sustavno motrenje, mjerenje i

utvrđivanje stanja okoliša, emisije polutanata ili populacije u duljem vremenskom periodu, uključujući i motrenje poljoprivrednih površina.

Monitoring je sustav neprekidnog promatranja elemenata životne sredine u prostoru i vremenu. Cilj je prikupiti podatke kvantitativne i kvalitativne prirode o prisutnosti i distribuciji polutanata, njihovoj emisiji, izvorima i vrsti onečišćenja (točkasti, difuzni i sl.) i njihovoj lokaciji na određenim mjernim postajama. Prevencija u zaštiti okoliša uz monitoring svakako će sve više dobivati na značaju jer je:

Opterećenje okoliša = brojnost ljudske populacije × razina tehnologije × životni standard



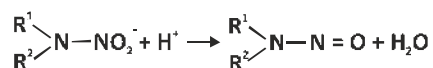
Slika 4.27. Promjena SAR-a u solonecu-solončaku na lokaciji Kurnjak nakon uzastopne elucije vodom (Vesna Vukadinović, 2003.)

Intenzivna poljoprivredna proizvodnja podrazumijeva danas "visoku" tehnologiju uz visok stupanj kemizacije. Korištenje mineralnih gnojiva i pesticida postupno mijenja prirodna svojstva tla, a preko podzemnih voda djeluje negativno i na širu životnu okolicu. Stoga je danas sve više „zelenih“, pristalica očuvanja prirodne životne sredine, a pokret se širi i u proizvodnji tzv. *zdrave hrane*, odnosno *alternativnoj poljoprivredi*. Nasuprot tradicionalnom načinu ratarenja s intenzivnom primjenom kemijskih sredstava, razvija se više tipova *alternativne poljoprivrede* pod različitim imenima (*organsko ratarenje, biološka poljoprivreda, biodinamička, ekološka, naturalna, bioproizvodnja, održiva ili obnovljiva* ili *sustainable* itd.). Zajedničko je svim tim načinima proizvodnje hrane isključivanje ili drastično smanjenje primjene kemijskih sredstava za zaštitu, uporabe mineralnih gnojiva, regulatora rasta i aditiva stočnoj ishrani. Inzistira se na pravilnom plodoredu, korištenju biljnih ostataka, organskim gnojivima i zelenoj gnojidbi, uzgoju leguminoza i biološkim metodama zaštite od štetnika s ciljem održavanja i povećavanja efektivne plodnosti tla.

Najveći dio poljoprivredne proizvodnje (> 98 %) još uvijek se temelji na intenzivnoj primjeni mineralnih gnojiva, pesticida, regulatora rasta i velikog broja različitih aditiva u ishrani životinja i to se neće znatnije promijeniti obzirom na brz porast populacije ljudi. Tlo se onečišćava (*kontaminacija*) i velikim brojem *polutanata* iz vode i zraka (plinovi i aerosoli u blizini velikih gradova, kemijskih, metalnih i energetskih postrojenja). Aeroonečišćenje plinovima (CO₂, SO₂, N₂O) u obliku *kiselih kiša* izaziva oštećenja tla i vegetacije pa se u posljednje vrijeme sve češće spominje kao uzrok odumiranja šuma. Najčešći onečišćivači tla su ugljikovodici, teški metali (kadmij, olovo, krom, bakar, cink, živa i metaloid arsen), herbicidi, pesticidi, ulja, katran, PCB, dioksin i dr.

Mineralna i organska gnojiva, primijenjena u količinama većim od potrebnih za ishranu bilja, mogu dovesti do narušavanja kemijskih i fizičkih svojstava tla, onečišćenja podzemnih voda ili lošije kakvoće poljoprivrednih proizvoda. Zbog toga se u posljednjih 30-ak godina intenzivno ispituje ekološki rizik primjene dušičnih, fosfornih i kalijevih gnojiva te teških metala (uključujući i mikroelemente) kao primjesa mineralnih ili organskih gnojiva dobivenih iz različitih otpadaka (gradsko smeće, kože itd.).

Posebice je opasna predozacija dušičnim gnojivima, jer nagomilavanje lako pokretljivog nitratnog oblika dušika u tlu utječe na njegovo pojačano ispiranje uz kontaminaciju okolnih vodotokova i podzemnih voda, a nakupljanje u hrani štetno djeluje na ljude i stoku. Smatra se da u prosječnom dnevnom obroku čovjeka, od ukupne količine nitrata (~ 90 mg), 2/3 se unosi povrćem, a 1/3 vodom za piće. WHO (Svjetska zdravstvena organizacija) dopušta koncentraciju NO₃⁻ od 45 mg dm⁻³ (10 ppm N-NO₃) u pitkoj vodi. Nitriti se brzo izlučuju iz organizma, međutim njihov visok sadržaj u biljnim proizvodima smatra se štetnim, jer se u digestivnom traktu (u kiseloj sredini želuca) reduciraju do nitrita koji reagiraju sa sekundarnim aminima (uključujući i neke pesticide) dajući *kancerogene nitrozamine*:



Iako kod ljudi još nije dokazana korelacija između razine uporabe dušičnih gnojiva i sinteze nitrozamina u digestivnom traktu, već i teoretske mogućnosti o tomu uznemiruju javnost, posebice u razvijenim zemljama koje imaju velike zalihe hrane.

Nitriti i nitriti izazivaju *methemoglobinemiju* pa i *nefritis* s visokim stupnjem mortaliteta. Methemoglobinemija (bolest eritrocita sa simptomom plave kože kod beba) česta je kod djece starosti do 4 mjeseca (3-6 mj.) koja ne posjeduju razvijen sustav zaštite (niska razina HCl u želucu ne može uništiti sve mikroorganizme koji transformiraju nitrate do nitrita te odsustvo enzima *diaforaze*), pa koncentracija nitrata u dječjoj hrani ne smije prelaziti 250 mg NO₃⁻

kg⁻¹ svježe tvari. *Methemoglobin* se u kritičnim slučajevima može pomoću injekcija metilenskog plavog transformirati u *hemoglobin*.

Čest argument protiv uporabe visokih doza dušičnih gnojiva je favoriziranje bolesti i pojava infekcija biljaka. Luksuzne doze dušika dovode do formiranja lišća čije parenhimske stanice imaju tanke stijenke što smanjuje njihovu otpornost na infekcije i parazite. Također, u procesima denitrifikacije oslobađaju se dušični oksidi (NO_x i N₂O) za koje se smatra da uništavaju *ozonski omotač Zemlje* koji štiti žive organizme od štetnog utjecaja *UV zračenja*. Ipak, treba istaći da je uporaba N-gnojiva izvor beznačajnih količina dušikovih oksida (manje od 1 %) u odnosu na druge izvore uništavanja ozonskog sloja.

Fosfatna gnojiva uvijek sadrže izvjesnu količinu radioaktivnih elemenata (nizovi ²³⁸U i ⁴⁰K), ali treba naglasiti da je onečišćavanje oranica *radionuklidima* iz gnojiva vrlo spor proces koji ne mijenja fizička i kemijska svojstva tla i uglavnom je cjelokupna primjena fosfata od prvih početaka do danas ispod prirodnog *fona* zračenja tla. Međutim, fosfor može biti uzrok *eutrofikacije voda*, odnosno burne pojave algi, a nakon njihovog ugibanja troši se kisik za razgradnju ogromne organske mase što dovodi do izumiranja drugih živih organizama u vodi. Opasnosti od eutrofikacije voda najviše pridonose detergentski *polifosfatima* (67 %), industrija (13 %), erozija tala (10 %), od čega samo 3 % otpada na obradiva tla. Naime, fosfor iz mineralnih gnojiva je vrlo slabo pokretan u tlu.

Mikroelementi (Cu, Mo, Zn), kao i druge teške kovine ili nekovine (Cd, Pb, Hg, Cr, Ni, As, Se i dr.), kod visokog sadržaja u tlu mogu imati štetne efekte na biljke, domaće životinje i ljude (tablica 4.20.). Njihovo nakupljanje u oraničnom sloju tla može biti posljedica onečišćenja ljudskom aktivnošću, ali i prirodnim biogeološkim procesima, odnosno biljke takvih staništa usvajaju korijenom veliku količinu mikroelemenata iz dubljih slojeva i premještaju ih u oranični sloj. Uklanjanje štetnih tvari, najčešće teških kovina biljkama *hiperakumulatorima*, koje su u posljednje vrijeme GMO tehnikama (*transgene biljke*) postale vrlo efikasne, označava se kao *fitoremedijacija* (*phytoremediation*), a postoje četiri različite tehnologije uklanjanja toksičnih metala iz tla i vode:

- *Fitoelekstrakcija* - skupljanje biljaka nakon akumulacije metala i njihovo izdvajanje iz ostataka, najčešće pepela,
- *Fitovolatizacija* - isparavanje pojedinih metala iz nadzemnih dijelova biljke,
- *Fitostabilizacija* - korištenje biljaka kako bi se smanjila ili spriječila bioraspoloživost (mobilnost) toksičnih metala u tlu i
- *Rizofiltracija* - korištenje biljnih korijena za uklanjanje toksičnih metala iz onečišćenih voda.

Fitoremedijacija može biti vrlo efikasna tehnologija za uklanjanje štetnih elemenata iz tla, ali i dalje ostaje problem kamo s njima jer su opasne za dalju uporabu. Npr. koncentracija As (u suhoj tvari) može doseći 7.000 ppm u biljci *Sarcosphaera coronaria*, Cr u *Dicoma niccolifera* 1.000 ppm, Al u *Hordeum*

vulgare 1.000 ppm, Cu u *Haumaniumstrum robertii* 1.000 ppm, Zn u *Thlaspi caerulescens* 10.000 ppm itd.

U posljednje se vrijeme velika pozornost pridaje kadmiju jer se kao pratitelj fosfora nalazi u znatnim količinama u fosfatima sedimentnog podrijetla. Fosforiti iz Maroka sadrže 15,4 ppm Cd, a iz Senegala čak 75,0 ppm Cd. Normalne koncentracije Cd u tlu su 0,1 do 1 mg Cd kg⁻¹ tla, dok mineralna gnojiva iz "Petrokemije" d.o.o. sadrže 35,7 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅, pa u sljedećih barem stotinu godina kadmij iz mineralnih gnojiva neće predstavljati problem. Zapravo, opasnost od kadmija i drugih teških metala izrazita je tek u vrlo kiseloj sredini.

Tablica 4.20. Dopuštene vrijednosti elemenata (ppm na suhu tvar) u poljoprivrednim tlima i njihova otrovnost (McBride, 1994.)

Element	Biološka funkcija	Toksičnost za biljke	Toksičnost za sisavce	Fitotoksičnost (tolerancija)
Ag	?	V	V	5-10
Al	F?	S	N	50-200
As	F?	SV	V	5-20
B	FB	S	N	50-200
Ba	?	N	H	500
Be	?	SV	V	10-50
Cd	F?	SV	V	5-30
Co	FS	SV	S	15-50
Cr	F?	SV	V	5-30
Cu	FBS	SV	S	20-100
F	FS	NS	S	50-500
Fe	FBS	N	N	>1.000
Hg	?	V	V	1-3
Mn	FBS	NS	S	300-500
Mo	FBS	S	S	10-50
Ni	F?	SV	V	10-100
Pb	?	S	V	30-300
Sb	?	S	V	150
Se	FS(B?)	SV	V	5-30
Ti	?	SV	V	20
V	F?	V	V	5-10
Zn	FSB	NS	NS	100-400

?=fiziološka uloga nepoznata, F?=fiziološka uloga moguća, FB=fiziološka uloga kod biljaka, FS=fiziološka uloga kod sisavaca, N=niska, S=srednja, V=visoka toksičnost

Pored mineralnih, i organska gnojiva primijenjena u velikim količinama također su izvor onečišćavanja tla i voda. Npr., korištenje gnojovke, posebice svinjske u blizini velikih stočnih farmi, često na tlima lakšeg mehaničkog sastava dovodi do ispiranja topljivih dušičnih oblika i detergenata u vodotokove.

Opasni su i ostaci *perzistentnih pesticida* (poluvijek razgradnje 1-10 godina) koji dovode do redukcije i uništenja flore i faune tla, blokiraju aktivna mjesta na adsorpcijskom kompleksu tla i umanjuju sposobnost kelatiranja teških metala organskom koloidnom frakcijom tla. Prema Pravilniku o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja (NN 32/10), u RH su utvrđene maksimalno dopuštene količine onečišćujućih tvari u poljoprivrednom zemljištu (tablica 4.21.).

Poljoprivredno zemljište smatra se onečišćenim kada sadrži više teških metala i potencijalno onečišćujućih elemenata od maksimalno dopuštenih količina (MDK), izraženih u mg kg^{-1} . Stupanj onečišćenja zemljišta teškim metalima i potencijalno onečišćujućim elementima izračunava se prema sljedećoj jednadžbi:

$$So (\%) = \frac{\text{ukupna koncentracija teških metala u zemljištu}}{\text{maksimalno dopuštena vrijednost}} \times 100$$

Tablica 4.21. Maksimalno dopuštene koncentracije teških metala u poljoprivrednom tlu

Tekstura tla	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
	mg kg^{-1}						
Pjeskovito tlo	0,0-0,5	0-40	0-60	0,0-0,5	0-30	0-50	0-60
Praš.- ilov. tlo	0,5-1,0	40-80	60-90	0,5-1,0	30-50	50-100	60-150
Glinasto tlo	1,0-2,0	80-120	90-120	1,0-1,5	50-75	100-150	150-200

Za interpretaciju onečišćenja (So , %) koristite se sljedeći kriteriji:

- čisto, neopterećeno zemljište, do 25 %
- zemljište povećane onečišćenosti, 25-50 %
- zemljište velike onečišćenosti, 50-100 %
- onečišćeno zemljište, 100-200 %
- zagađeno zemljište, > 200 % od graničnih vrijednosti.

Nakon što su posljednjih godina zapažena oštećenja ozonskog omotača Zemlje, sve se češće proučava štetno djelovanje ultravioletnog *UV-B zračenja* (290-320 nm) na ljude i životinje, ali i *fotobiološki efekt* na biljke i njihovu produktivnost. UV-B zračenje je opasno jer se apsorbira makromolekulama (proteinima i nukleinskim kiselinama) i izaziva njihove strukturne promjene. U SAD-u je na pokusima sa sojom zapaženo snižavanje prinosa do 25% kod UV senzitivnih kultivara, ovisno o jačini zračenja (oštećenju ozonskog omotača 20-40% odgovaraju respektivno UV-B doze zračenja od $14,6 \text{ kJ m}^{-2}$ i $22,2 \text{ kJ m}^{-2}$).

Oštećenje ozonskog sloja u stratosferi izaziva povećana koncentracija ugljikova(IV) oksida (CO_2), klorfluorugljika (CFC), metana (CH_4) i dušikovih oksida (NO_x , N_2O). Neka mjerenja pokazuju zabrinjavajuću godišnju stopu povećanja od 0,5 % za CO_2 , 5-7 % za CFC, 1 % za CH_4 i 0,2 % za N_2O .

4.11. SORPCIJA IONA U TLU I NJEN ZNAČAJ

Procesi vezivanja hraniva u tlu u pristupačnom obliku (sorpcija) za razliku od čvrstog vezivanja iona posve su različite naravi. Naime, kemijska, biološka i fizička sorpcija najčešće se označavaju kao fiksacija jer tako vezana hraniva mogu biti raspoloživa, ali tek nakon kraćeg ili dužeg vremena (npr. završetkom života mikroorganizama hraniva koja su oni usvojili opet su raspoloživa biljkama). Na temelju *dvojnog električnog sloja* iona koloidne micela, razlikuju se dva osnovna tipa sorpcije:

- fizička i
- fizičko-kemijska adsorpcija.

Fizička adsorpcija je pojava nagomilavanja iona na površini čestica tla (slika 4.28.). Vezivanje iona i polarnih molekula na temelju razlike u električnom potencijalu posljedica je površinskog napona čestica tla. Budući da je površina čestica tla vrlo velika, površinska energija razmjerna je prije svega teksturi i veličini čestica koje, primjerice, higroskopnu vodu u tlu drže silama i većim od 1.000 bara.

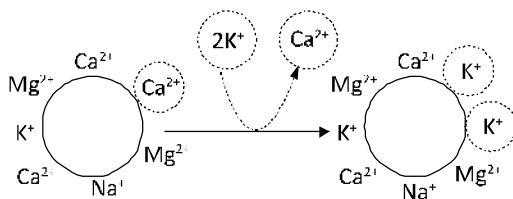
Fizičko-kemijska adsorpcija (često se naziva i *kemisorpcija*) događa se zbog prisnog kontakta iona nagomilanih fizičkom adsorpcijom uz nabijene čestice u vodenoj fazi tla. Nagomilani ioni reagiraju međusobno i s adsorpcijskim kompleksom tla uz određene kemijske promjene.

U širem smislu pod adsorpcijom iona podrazumijevaju se sljedeće pojave:

- adsorpcija u užem smislu odnosi se na privlačenje iona koloidnom micelom,
- desorpcija ili oslobađanje iona iz električnog polja micela,
- supstitucija je zamjena iona u elektroekvivalentnim iznosima i
- retencija je zadržavanje iona u difuznom sloju.

Potrebno je naglasiti kako je izraz *sorpcija* zadržavanje tvari bez implikacije o vrsti mehanizma zadržavanja. Ovaj pojam uključuje *adsorpciju*, *apsorpciju*, *taloženje* (*precipitaciju*) i *površinsko taloženje*.

- *Adsorpcija označava površinsko zadržavanje iona ili malih molekula pri čemu nema interakcije (ili je minimalna) između adsorbiranih čestica.*
- *Apsorpcija je zadržavanje tvari unutar drugog materijala (analogno zadržavanju vode u spužvi).*
- *Površinsko taloženje je trodimenzijski mehanizam akumulacije tvari na površini, a razlikuje se od adsorpcije po tome što zadržane čestice međusobno reagiraju i mogu čak imati čvrstu strukturu znatno iznad izvorne podloge.*
- *Taloženje (precipitacija) označava formiranje 3-D struktura bez reakcije sa supstratom na kojem dolazi do taloženja (sorbent). Proces taloženja često se događa u otopinama pri čemu nastaje talog diskretnih čestica.*



Slika 4.28. Princip sorpcije i zamjene kationa (*Mengel and Kirkby, 1978.*)

Sorpcija kationa u tlu je proces koji uglavnom protječe vrlo brzo, pri čemu temperatura tla u prirodnim okolnostima nema veliki značaj. Adsorbirani ioni ili molekule su dipolnih svojstava i mogu se zamjenjivati na adsorpcijskom kompleksu drugim ionima po zakonu o djelovanju masa, odnosno sorbirani ioni i ioni u otopini tla nalaze se u određenom omjeru.

Za ishranu bilja značajna je koncentracija kationa u vodenoj fazi tla, jer je tijelo sorpcije predstavljeno mineralnom i organskom koloidnom frakcijom tla (glina i humus) koje je pod normalnim okolnostima negativno nabijeno. Smanjivanjem koncentracije otopine tla (ili porastom kapaciteta sorpcije) raste sorpcija dvovalentnih kationa na račun jednovalentnih. U suprotnom slučaju, povećanje koncentracije vodene faze tla povećava sorpciju jednovalentnih kationa. Stoga se u vlažnijim uvjetima bolje sorbiraju dvovalentni kationi (Ca^{2+} , Mg^{2+} itd.), a u sušnijim jednovalentni (K^+ , Na^+ itd.).

Kapacitet sorpcije svih poljoprivrednih tala kreće se u širokim granicama ($5\text{-}200 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$), dok su najčešće vrijednosti $15\text{-}45 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ tla. Tla s većim sadržajem humusa i gline redovito imaju veći kapacitet sorpcije prema lakšim i malo humoznim tlima. Tako, npr. ruski černozeми imaju prosječan kapacitet sorpcije $56 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$, a laka pjeskovita tla dravskog rita u Baranji tek oko $10 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$. Tablica 4.22. pokazuje tipične vrijednosti KIK-a ovisne o teksturi tla.

Tablica 4.22. Ovisnost kationskog izmjenjivačkog kapaciteta o teksturi tla

Tekstura tla	KIK $\text{cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$
Laka pjeskovita tla	3 - 5
Pjeskovito ilovasta tla	10 - 20
Ilovasta tla	10 - 15
Praškasto ilovasta tla	15 - 25
Glinasta i glinasto-ilovasta tla	20 - 50
Organska tla	50 - 100

Kapacitet adsorpcijskog kompleksa tla određuje se preko veličine zamjene kationa na njemu. Uobičajena metoda je izmjena kationa na adsorpcijskom kompleksu tla s NH_4^+ (npr. iz otopine amonijeva acetata). U ekstraktu tla utvrdi se sadržaj pojedinih desorbiranih kationa, dok se ukupni kapacitet sorpcije odredi nakon utvrđivanja količine vezanog iona NH_4^+ (desorpcije pomoću NaCl , odnosno Na^+ i destilacije N-NH_4 uz njegovo vezivanje kiselinom). Budući da se

utvrđuje sposobnost zamjene na adsorpcijskom kompleksu, kapacitet za sorpciju naziva se *kationski izmjenjivački kapacitet* tla (*KIK* ili *CEC*) i u agrokemiji izražava se u $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$ (identična vrijednost starom načinu izražavanja u mekv/100 g tla). Npr., ako je u ekstraktu NH_4 -acetata utvrđeno kako 100 g tla veže 300 mg Ca^{2+} , 70 mg Mg^{2+} , 8 mg K^+ i 6 mg Na^+ , tada je KIK:

$$\text{KIK} = \frac{300}{20} + \frac{70}{12} + \frac{8}{39} + \frac{6}{23} = 21,30 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1} \text{ tla}$$

U brojniku su koncentracije kationa u mg 100 g⁻¹ tla, a u nazivniku njihove približne ekvivalentne mase (atomska masa podijeljena s valentnošću). Naravno, u kiselijoj sredini, jedan znatan dio alkalnih iona može biti zamijenjen kiselim ionima pa je zapravo:

$$\text{KIK} = \text{suma baza} + \text{hidrolitska kiselost}$$

Ako je suma baznih kationa 21,30 $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$, a hidrolitska kiselost (Hy) 3,55 $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1} \text{H}^+$, tada je $\text{KIK} = 21,30 + 3,55 = 24,85$ te se relativna zastupljenost pojedinih kationa (baznih i kiselih) na adsorpcijskom kompleksu računa kao u tablici 4.24.

Tablica 4.23. Izračun relativne zastupljenosti kationa na KIK-u

Kation	Proračun	Postotak KIK-a
Ca	$(300/20) / 24,85 * 100$	60,36
Mg	$(70/12) / 24,85 * 100$	23,47
K	$(8/39) / 24,85 * 100$	0,83
Na	$(6/23) / 24,85 * 100$	1,05
H	$(3,55/1) / 24,85 * 100$	14,29
Ukupno:		100,00

U SI mjernom sustavu veličina KIK-a prikazuje se na sljedeći način: mekv/100 g = $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$, odnosno izmjenjivi $\text{Ca}^{2+} = 4 \text{ mekv}/100 \text{ g} = 4 \text{ cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1} = 4 \text{ cmol} (\frac{1}{2}\text{Ca}^{2+}) \text{kg}^{-1}$. Kod $\text{pH} > 5,5$ na KIK-u se prosječno nalazi 70-85 % Ca^{2+} , 5-10 % Mg^{2+} , 2-5 % K^+ i < 0,1 % Na^+ , dok je u kiselim tlima dio bazičnih iona (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ i Na^+) zamijenjen manje ili više "kiselim" ionima H^+ i Al^{3+} .

Čvrstoća veze sorbiranog iona na adsorpcijskom kompleksu ovisna je o više čimbenika:

- svojstva tijela sorpcije (vrsta sekundarnih minerala, struktura humusnih frakcija),
- kapaciteta za sorpciju (sadržaj gline i humusa) i
- svojstva iona (valencija i radijus hidratiziranog iona).

Viševalentni ioni vežu se čvršće na adsorpcijski kompleks tla zbog većeg naboja. Također, manje hidratizirani ioni drže se većom silom na adsorpcijskom

kompleksu jer im je električni naboj slabije neutraliziran slojem molekula vode. Zbog toga je ionski radijus vrlo značajna veličina kod razmatranja jačine sorpcije pojedinih elemenata. Naime, atomi manje atomske mase, ali iste valencije, posjeduju veći ionski radijus u hidratiziranom stanju zbog toga što je jednak električni naboj raspoređen na manju površinu (veća gustoća naboja). Tablica 4.25. pokazuje radijuse nekih kationa.

Redosljed sposobnosti zamjene kationa, ovisno o stupnju njihove hidratiziranosti, utvrdio je *Hofmeister*:



Posljednji kation litij u *Hofmeisterovom nizu* ima najveću gustoću naboja, stoga i najveći promjer (radijus) u hidratiziranom stanju te je jačina njegova veze na adsorpcijskom kompleksu najmanja i najlakše se zamjenjuje nekim od sljedećih kationa iz niza. Redosljed zamjene kationa, ovisno o tijelu sorpcije, utvrdio je *Schachtschabel* kao relativno povećanje u odnosu prema ionu NH_4^+ :

Kaolinit	Na^+	$< \text{H}^+$	$< \text{K}^+$	$< \text{Mg}^{2+}$	$< \text{Ca}^{2+}$
Montmorilonit	Na^+	$< \text{K}^+$	$< \text{H}^+$	$< \text{Mg}^{2+}$	$< \text{Ca}^{2+}$
Mikas	Na^+	$< \text{Mg}^{2+}$	$< \text{Ca}^{2+}$	$< \text{K}^+$	$< \text{H}^+$
Huminske kiseline	Na^+	$< \text{K}^+$	$< \text{Mg}^{2+}$	$< \text{Ca}^{2+}$	$< \text{H}^+$

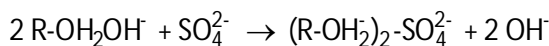
Tablica 4.24. Masa, gustoća naboja i ionski radijusi nekih kationa

Ion	Molarna masa g mol^{-1}	Gustoća naboja A^2	Ionski radijus (nm)	
			nehidratiziran	hidratiziran
Al^{3+}	27	0,38	0,051	
H^+	1			
Ca^{2+}	40	0,09	0,099	0,96
Mg^{2+}	24	0,16	0,065	1,08
K^+	39	0,04	0,133	0,53
NH_4^+	19	0,04	0,143	0,54
Na^+	23	0,05	0,095	0,79

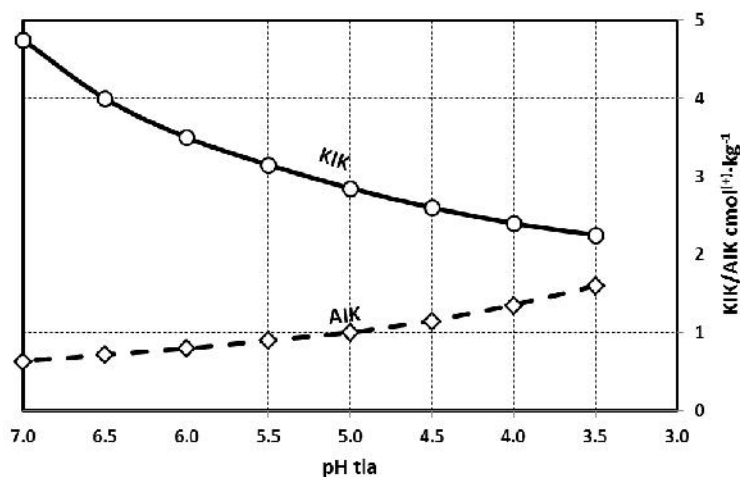
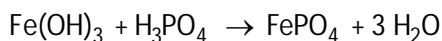
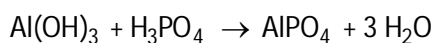
Zbog sličnog promjera hidratiziranih iona K^+ i NH_4^+ ta dva iona u tlu mogu zamjenjivati jedan drugoga u međulamelarnim prostorima sekundarnih minerala. Sekundarni minerali iz grupe *illita* i *vermikulita* u *imbibiranom* (nabubrelom) stanju imaju proširene međulamelarne prostore upravo toliko da ta dva iona mogu ući, a nakon sušenja tla ostaju „zaglavljani“ i nepristupačni za usvajanje. Pojava se naziva *fiksacija* (*selektivna fiksacija*) i uvjetovana je veličinom međulamelarnih prostora u ekspaniranom (proširenom) stanju i radijusom hidratiziranih iona.

Sorpcija aniona u tlu znatno je slabije proučena, naziva se i AIC (anionski izmjenjivački kapacitet tla ili *eng. AEC*), i ta se pojava uglavnom događa u vrlo kiselim, redukcijskim uvjetima (slika 4.29.). Mehanizam sorpcije aniona

vjerojatno je povezan s aktivacijom lužnatog dijela glinenih minerala pri niskim pH-vrijednostima. Koloidi gline u takvim se uvjetima ponašaju kao amfoterne jedinice:

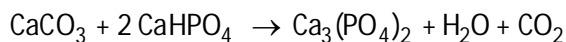
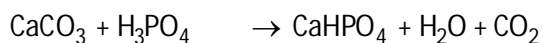


Puno je bolje proučen mehanizam "kemijske sorpcije" aniona, npr. fosfata (slika 4.30.), pri čemu nastaju spojevi koji su netopljivi u vodi:



Slika 4.29. Utjecaj pH tla na KIK i AIK u $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$

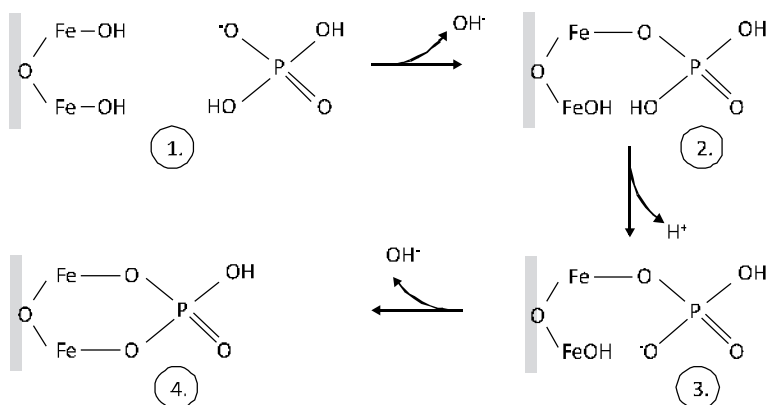
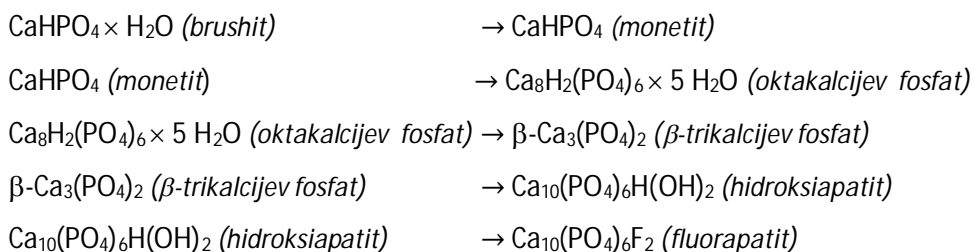
Svježe istaloženi fosfati aluminija ($\text{AlPO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ *variscit*) i željeza(III) ($\text{FePO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ *strengit*) slabo su topljivi u vodi i to tek ispod pH 4,5. Stoga je u kiselim tlima, koja sadrže slobodno željezo i aluminij, učinkovitost P-gnojidbe vrlo mala zbog toga što se fosforna kiselina inaktivira ionima Al^{3+} i Fe^{3+} . U neutralnim i lužnatim tlima u prisutnosti kalcija također dolazi do kemijske sorpcije fosfatnih aniona:



U tlima s pH 8 ili više, formira se netopljivi *oktalcijev fosfat* ($\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6$), a kod pH 9 i više netopljivi *kalcijev hidroksiapatit*, *kalcijev fluoroapatit* ili *karbonatni apatiti*.

Navedene reakcije dovode do prelaska primarnih fosfata koji su potpuno topljivi u vodi, preko sekundarnih, topljivih u slabim kiselinama (kemijski oblici fosfora u većini mineralnih gnojiva), do tercijarnih fosfata koji su s aspekta ishrane bilja

zanemarljivi jer su topljivi samo u jakim kiselinama. Navedena pojava u ishrani bilja označava se kao *retrogradacija fosfora*:



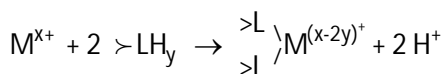
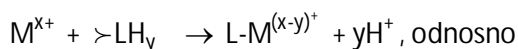
Slika 4.30. Sorpcija fosfata u tlu

Ipak, svježe istaloženi kalcijev tercijarni fosfat sadrži kristalnu vodu pa ga u duljem vremenskom razdoblju manjim dijelom ipak mogu usvojiti biljke, posebice one s razvijenim i učinkovitim korijenskim sustavom. Kemijska sorpcija i desorpcija fosfata stoga ima trend održavanja ravnoteže koja se može prikazati *Langmuirovim izrazom*:

$$A = \frac{A_{\max} \times K \times c}{1 + Kc}$$

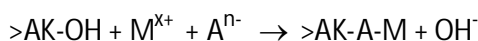
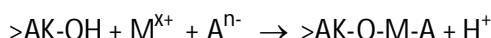
(A = količina sorbiranih fosfata, A_{max} = najveća sorpcija fosfata, K = konstanta koja odgovara čvrstoći sorpcije/veze, c = ravnotežna koncentracija fosfata u vodenoj fazi tla).

Organska koloidna frakcija tla lako stupa u reakcije s teškim metalima (M^{x+}) vežući ih u obliku kompleksnih spojeva ili kelata na funkcionalno kisele grupe (ligand = L) jakim kovalentnim i ionskim vezama:



Važno je naglasiti kako koloidna (aktivna) organska frakcija tla sadrži velik broj različitih funkcijskih grupa pogodnih za vezivanje metala (*Lewisove baze*): karboksilnu, fenolnu, aminsku, karbonilnu, tiolnu (sulhidrilnu) itd. Nastali *organometalni kompleksni spojevi (kelati)* vrlo su pogodan oblik biljnih hraniva. Naime, tako vezani teški metali ne sudjeluju u drugim kemijskim reakcijama koje ih mogu prevesti u teže ili nepristupačne oblike, ne ispiru se iz rizosfere, a biljke ih lako usvajaju.

U tlu su prisutni kationi i anioni pa se sorpcija obje vrste iona zapravo događa istovremeno i bez *kompeticije*. Taj *sinergistički proces* dobro objašnjava koncept nastanka *ternarnih kompleksa* (trojnog kompleksa):



Prva reakcija označava *a tip* (češći) u kojem metalni ion M^{x+} veže na površini anion A^{n-} , dok je druga reakcija tipična za *b tip ternarnog kompleksa* u kojem anion predstavlja most između metalnog iona i površine. *Ternarni kompleksi* uključuju vezu Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} i Zn^{2+} s PO_4^{3-} na Fe- i Al- hidrokside u kojima prisutni fosfati vežu teške metale u spojeve slabe topljivosti. Međutim, u prisutnosti organskih tvari (*liganda*) nastaju ternarni kompleksi koji blokiraju Al^{3+} i Fe^{3+} (npr. glicin-Cu-Al(OH)₃) i time sprječavaju kemijsku fiksaciju fosfora (pojava je poznata pod imenom *humat efekt*). Taloženje (*precipitacija*) netopljivih fosfata, željezovog(III) ili aluminijevog, predstavlja složen gnojidbeni problem koji se može nadzirati preko topljivosti Al^{3+} u kiselim mineralnim tlima (pH < 5).

4.12. OBLICI HRANJIVIH TVARI U TLU

Hranjive tvari tla nalaze se u različitim i promjenjivim oblicima koji određuju njihovu bioraspodivnost pa je usvajanje hraniva korijenskim sustavom biljaka ovisno o nizu njihovih fizičko-kemijskih svojstava. Pristupačnost hraniva u pravilu je prostorno i vremenski promjenjiva, ovisno o nizu svojstava tla, genetskih odlika biljne vrste (kultivara i hibrida), biljnog uzrasta, vodno-zračnog režima, mikrobiološke aktivnosti itd.

Podjela hranjivih tvari prema njihovoj pristupačnosti temelji se na njihovoj topljivosti u vodi. Uobičajeno se *biljna hraniva* (elementi biljni ishrane) dijele na *mobilne* i *rezervne elemente ishrane*. U grupu mobilnih hraniva svrstavaju se vodotopljiva i izmjenjivo sorbirana hraniva. Mobilna hraniva čine manje od 2 % ukupnih hraniva nekog tla, dok su preostalih 98 % (često i više) rezerve. Rezervna hraniva su hranjive tvari u tlu vezane organskim ili anorganskim

vezama koje ne dozvoljavaju njihovo usvajanje u tom obliku. Njihova raspoloživost je stoga potencijalnog karaktera te ona moraju prethodno proći kroz proces *mobilizacije*, odnosno transformacije u pristupačne oblike.

4.12.1. Pokretljive hranjive tvari

Pod pokretljivim (mobilnim) hranivima u tlu podrazumijevaju se hraniva u vodenoj fazi tla i dio hraniva koji nije čvrsto vezan na adsorpcijski kompleks, lako se zamjenjuje te je relativno dobro pokretljiv u tlu. Naime, vodotopljivi dio hraniva potpuno je pokretljiv i premješta se u tlu kretanjem vode (*mass-flow*) ili *difuzijom*. Izmjenjivo vezana hraniva, usprkos polarnoj vezi, smatraju se također pokretnim jer postoji stalno prisutna ravnoteža između procesa sorpcije i desorpcije, odnosno njihove zamjene.

Hraniva u vodenoj otopini tla pretežito su u ionskom obliku. Njihova koncentracija je vrlo niska, obično u granicama 0,01-0,10 % (100-1.000 ppm) uz osmotsku vrijednost vodene faze tla od 0,1-0,5 bara (tablica 4.25.). U uvjetima suše koncentracija vodene faze tla raste te u ekstremnim slučajevima može dostići toksičnu granicu ($pF > 4,2$, odnosno tenzija vlage 15 bara ili više). Količina vodotopljivih hraniva dostiže samo 1-10 % od izmjenjivo vezanih hraniva u nekom tlu. Tipične koncentracije neophodnih elemenata u vodenoj fazi tla prikazuje tablica 4.26.

Tablica 4.25. Tipična kompozicija otopine tla, ionska koncentracija i pripadajući osmotski tlak (*Lowrison*, 1989.)

Ion	Konc. ppm	Ionska konc. $\text{g dm}^{-3} \times 10^3$	Konc. \times naboj $\times 10^3$	
			Anioni	Kationi
SiO_3^{2-}	36,9	0,484	0,968	
NO_3^-	300,2	4,841	4,841	
CO_3^{2-}	114,2	1,903	3,806	
Ca^{2+}	188,7	4,708		9,416
Mg^{2+}	8,1	0,335		0,670
PO_4^{3-}	2,0	0,021	0,063	
K^+	5,7	0,147		0,147
Na^+	5,8	0,252		0,252
SO_4^{2-}	56,7	0,590	1,180	
Cl^-	7,4	0,209	0,209	
C (org. tvar)	37,5			
Ukupno	763,1	13,486	11,067	10,485

Osmotski tlak na 25 °C = $14,068 \cdot 10^{-3} \times 22,4 \times 298/273 = 0,34$ bara; $14,068 = 13,486 + H^+$ (pH = 3,23)

Izmjenjivo vezana hraniva u tlu također su u ionskom obliku, ali su električnim silama zadržana uz koloidne čestice. Takva hraniva lako se usvajaju, a istovremeno je onemogućeno njihovo kretanje s vodom tla i ispiranje iz zone korijena. Uglavnom su to kationi te njihov sadržaj u tlu ovisi o veličini kationskog izmjenjivačkog kapaciteta tla. Adsorpcijski izmjenjivački kompleks neutralnog tla pretežito je popunjen ionima Ca^{2+} (oko 80 %), Mg^{2+} (10-15 %), a ostatak zauzimaju K^+ , Na^+ i drugi ioni. U kiselim tlima H^+ i Al^{3+} (često Fe^{3+} , Mn^{2+} i dr.) mogu zauzimati veći dio tijela sorpcije. Stupanj popunjenosti adsorpcijskog kompleksa bazama važno je mjerilo za procjenu mogućnosti opskrbe biljaka hranjivim tvarima s obzirom na njihov sadržaj, pokretljivost, kemijski oblik i druga agrokemijska svojstva tla.

Tablica 4.26. Tipične koncentracija iona ili elemenata (mmol dm^{-3}) u vodenoj fazi tla (Mengel and Kirkby, 1978.)

Element	Rang svih tala	Kisela tla	Karbonatna tla
Ca	0,5-38	3,4	14
Mg	0,7-100	1,9	7
K	0,2-10	0,7	1
Na	0,4-150	1,0	29
N	0,16-55	12,1	13
P	< 0,001-1	0,007	< 0,03
S	< 0,1-150	0,5	24
Cl	0,2-230	1,1	20

Važno je naglasiti kako vodotopljiva hraniva, premda su najpristupačniji oblik, zbog velike pokretljivosti u tlu i promjenjivosti koncentracije, nisu i najpovoljniji oblik biljnih hraniva. Velik problem predstavlja i mogućnost njihovog udaljavanja iz zone korijenovog sustava kretanjem vode u tlu (*mass flow*) i difuzijom, odnosno ispiranjem do razine podzemne vode uz konačni gubitak za ishranu biljaka (tablica 4.27.).

- Vrlo mobilna hraniva u tlu su: NO_3^- , SO_4^{2-} , H_3BO_3
- Umjereno mobilna su NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} i MnO_4^{2-} ,
- Imobilna su N_{org} , H_2PO_4^- , $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$, Cu^+ , Cu^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} i Zn^{2+}

Tablica 4.27. Difuzijski koeficijenti i intenzitet difuzije iona u tlu

Ion	Difuzijski koeficijent ($\text{m}^2 \text{sec}^{-1}$)		Intenzitet difuzije (mm dan^{-1})
	Rang	Prosjek	
NO_3^-	10^{-10} - 10^{-11}	5×10^{-11}	3,00
K^+	10^{-11} - 10^{-12}	5×10^{-12}	0,90
H_2PO_4^-	10^{-12} - 10^{-15}	1×10^{-13}	0,13

Anionska sorpcija uvjetovana je prisutnošću pozitivnih naboja različitih oksida u tlu, humusnih tvari i minerala gline i to samo kod niskih vrijednosti pH, ali je moguća i nastankom ternarnih kompleksa. Sorpcija aniona različita je za pojedine anione. Najveći značaj je za ione PO_4^{3-} (slika 4.30.), srednji za SO_4^{2-} , a vrlo slab za ione NO_3^- i Cl^- .

Rezervna hraniva su raznolika grupa spojeva čija je topljivost u vodi slaba, ograničena i izuzetno spora. To su čvrsto vezana hraniva ugrađena u kristalnu rešetku primarnih i sekundarnih minerala, teško topljive soli i drugi kemijski spojevi, humusne tvari, fiksirani kalijevi ili amonijevi ioni, živa tvar tla itd. Budući da je najveći dio hraniva tla upravo u obliku rezervnih tvari (95-99 %), ukupan sadržaj hraniva svakog tla približno odgovara toj veličini. Podjela na *organske i neorganske rezerve* može biti samo uvjetna zbog mogućnosti transformacije jednih u druge oblike. Na primjer, dušik i sumpor su u tlu pretežito organski vezani, a biljke ih usvajaju gotovo isključivo u mineralnoj formi. Rezerve fosfora u tlu su približno 50 % organske, dok su kalcij, magnezij, kalij i mikroelementi pretežito anorganski vezani.

4.12.2. Dinamika hraniva u tlu

Hraniva u tlu podložna su različitim transformacijama pri čemu jedni oblici prelaze u druge što uvjetuje i promjenu njihove mobilnosti, odnosno raspoloživosti. Promjene se događaju zbog niza razloga, npr. promjena koncentracije, stanja vlažnosti, promjene pH-vrijednosti itd. Promjene oblika raspoloživosti hraniva nazivaju se jednim imenom *dinamika hraniva u tlu* ili *dinamička ravnoteža hraniva*. Čvrstoće vezanosti hraniva daju skalu njihove pristupačnosti i pokretljivosti, kako to pokazuje tablica 4.28.

Kod podjele hraniva prema pokretljivosti i raspoloživosti, najveću poteškoću čini granica između lako i teško pokretnih rezervi. Također, precizna definicija oblika hraniva nije sasvim moguća prema pokretljivosti jer mobilnost hraniva ovisi o nizu čimbenika kao što su vrsta spoja, veličina čestica i kristala, nepravilnosti u kristalizacijskoj strukturi, prisutnosti stranih atoma u kristalnoj rešetki, površinska napetost čestica i sl. Zbog brojnih okolnosti nije moguće kemijskom analizom odrediti *apsolutno bioraspoloživi dio hraniva u tlu* (biljci pristupačan), već se približna veličina utvrđuje empirijski na temelju vegetacijskih pokusa u konkretnim agroekološkim uvjetima.

Također, gradacija na stupnjeve pristupačnosti nije čvrsta jer se događaju različiti prijelazi koji za određene uvjete nekog tla održavaju relativnu ravnotežu između oblika hraniva. Zbog toga se takva labilna ravnoteža često naziva *dinamička ravnoteža hraniva*, a promjene imaju izraženu vremensku dimenziju

ovisno o stanju vlažnosti, promjenama koncentracije pojedinih hraniva i promjeni pH.

Pod pojmom *mobilizacija* podrazumijevaju se svi procesi koji uzrokuju prijelaz nepristupačnih u raspoložive (pokretljive) oblike hraniva, dok je *imobilizacija* suprotan proces. Dakle, mobilizacija i imobilizacija označavaju sve procese u tlu koji vode promjeni bioraspoloživosti hraniva. *Fiksacija* podrazumijeva prijelaz pokretljivih hraniva u teško pokretne oblike, dok je *defiksacija* obrnut proces.

Uzroci koji dovode do promjena u dinamičkoj ravnoteži hraniva vezani su uglavnom uz promjenu koncentracije iona u vodenoj fazi tla. Takva promjena redovito nastaje kod gnojidbe. Unošenjem vodotopljivih hraniva raste koncentracija iona u vodenoj fazi tla što uzrokuje izmjenjivo vezivanje viška iona na adsorpcijski kompleks. Zamijenjeni ioni s kationskog izmjenjivačkog kompleksa stupaju u različite reakcije pa to uzrokuje daljnje smanjivanje raspoloživosti i pokretljivosti hraniva, odnosno, dolazi do transformacije pokretljivih u manje pokretne oblike.

Tablica 4.28. Shematski prikaz oblika i pokretljivosti hraniva

Oblik hraniva	Vodotopljiva	Izmjenjiva	Rezervna	
Pokretljivost	Pokretljiva		Nepokretna	
	Potpuno	Djelomično	Slabo	Teško
Raspoloživost	Vrlo laka	Laka	Umjerena	Nepristupačna
	Pristupačna			

Porast koncentracije iona u vodenoj fazi može biti izazvan, osim gnojidbom i drugim pojavama, prvenstveno porastom mikrobiološke aktivnosti kada su uvjeti u tlu povoljni (voda, temperatura, kisik, pH, prisutnost organske tvari širokog C/N odnosa, prisutnosti drugih iona itd.). Ako koncentracija iona u vodenoj fazi tla opada zbog usvajanja korijenskim sustavom biljaka, uslijed ispiranja vodom ili zbog mikrobiološke fiksacije, nedostatak se nadoknađuje iz zamjenjivog dijela hraniva, a nedostatak izmjenjivih hraniva iz labilnih rezervi. Dakle, promjena koncentracije u vodenoj fazi tla izaziva promjenu koncentracije zamjenjivih hraniva što aktivira procese mobilizacije rezervnih hraniva u cilju održanja prvobitno uspostavljene ravnoteže.

Posebice je važno naglasiti da je smjer od vodotopljivih, preko izmjenjivih, do rezervnih hraniva (imobilizacija) uvijek brži od suprotnog smjera (mobilizacija).

Stoga mobilizacija hraniva iz rezervi tla, koliko god one bile bogate, nema potreban intenzitet za osiguravanje optimalne ishrane poljoprivrednih vrsta čija je vegetacija relativno kratka te se gnojidba s pravom smatra najvažnijom agrotehničkom mjerom za osiguranje visokih i stabilnih uroda.

Mjerenjem brzine transformacije hraniva u tlu različitim kemijskim i biološkim metodama može se odrediti *mobilizacijska moć* nekog tla koja je pored sorpcijske sposobnosti najbolji pokazatelj efektivne plodnosti nekog tla.

4.13. POTENCIJAL HRANIVA

Tlo i biljke, odnosno njihov korijenov sustav, čine jedinstvenu, nedjeljivu cjelinu, jednom riječju *rizosferu*. Korijenje biljaka i tlo, kao supstrat biljne ishrane, predstavljaju vrlo kompleksan i otvoren sustav za međusobne interakcije, osjetljiv i podložan promjenama pod utjecajem niza vanjskih faktora. Stoga se bioraspoloživost hraniva, promatrana unutar jedinstvenog sustava tlo-biljka, može predstaviti energijom svake komponente unutar ravnotežnog sustava tla (tekuća - čvrsta faza), odnosno njenim kemijskim potencijalom:

$$\mu_1 = \mu_1^0 + RT \times \ln \times a_1 + zFV$$

U gornjoj jednadžbi koja reprezentira koncept *potencijala hraniva*, bioraspoloživost pojedinog elementa ishrane (μ_1) stavlja se u kontekst njegovog aktiviteta u tekućoj fazi tla (μ_1^0), ukupne *ionske jakosti* tekuće faze tla (a), naboja kojim djeluje na druge ione (z), električnog potencijala (V) i *Faradejeve konstante* (F).

Utvrđivanje bioraspoloživosti hraniva je složen problem jer su hraniva raspoloživa za ishranu bilja ako se u tlu nalaze ili mogu prijeći u oblik koji biljke usvajaju (*kemijski bioraspoloživa*) i pri tome se moraju nalaziti u zoni korijenskog sustava (*fizički raspoloživa*). Zbog toga se razlikuje kemijska i fizička pristupačnost hraniva.

Kemijsko-fizička pristupačnost nekog elementa ishrane s aspekta kemijskog potencijala hraniva može se definirati s tri osnovna parametra:

- *intenzitet (I)* predstavlja neposredno raspoloživu količinu elementa, odnosno njegove slobodne ione u vodenoj fazi tla (*aktivitet*),
- *kvantitet (Q)* je potencijalno pristupačni ili izmjenjivo vezani oblik hraniva i
- *mobilitet (M)* je brzina premještanja hraniva u zonu korijena.

Navedene veličine znatno se razlikuju u pojedinim tlima, ovisno o njihovim fizičko-kemijskim svojstavima uz međusobno različite omjere Q/I koji određuje

potencijal puferne moći tla za hranjivi element ili PBC (*PBC = Potential Buffer Capacity*).

Utvrđivanje hranidbenog potencijala svodi se na mjerenje kemijskog potencijala preko parcijalne molarne slobodne energije neke komponente ravnotežnog sustava kod postojane temperature i tlaka. Polazi se od pretpostavke da između čvrste i tekuće faze tla postoji dinamično ravnotežno stanje te se koncentraciji elemenata u vodenoj fazi tla pridaje odlučujući značaj u procjeni raspoloživosti hraniva. Naime, prema konceptu potencijala hraniva, većoj koncentraciji (zapravo aktivitetu = slobodni ioni) hraniva u vodenoj fazi odgovaralo bi veće usvajanje hraniva.

Potencijal pojedinog hraniva s aspekta bioraspoloživosti, prikazuje se energijom koju biljka mora uložiti da bi usvojila hranivo (*Arnold, 1962.*), odnosno kao aktivitetni omjer AR_K (*Scofield, 1955.*) ili kao potencijal (*Woodruff, 1955a.; 1955b.*). Također, koncept kemijskog potencijala elemenata vrlo često se koristi za razumijevanje problema zaslanjivanja natrijem (*Vukadinović, Rengel, 2007.*). Naime, potencijal hraniva u alkalnim tlima vrlo je zanimljiv pokazatelj raspoloživosti i pokretljivosti pojedinih iona jer su to tla, koja sadrže velike količine izrazito hidrofilnih iona (kationa Na^+ i Mg^{2+} te lakotopljivih aniona, koji su zbog negativnog naboja *inherentno ionogeni*). Kontinuirana prisutnost velike količine vode u tlu, njena visoka osmotska vrijednost i zamjena i/ili istiskivanje Ca^{2+} i Mg^{2+} natrijem na KIK-u čine istraživanje plodnosti alkalnih tala, s aspekta potencijala hraniva, vrlo zanimljivim, ali i korisnim za razumijevanje procesa usvajanja hraniva, potrebe popravke takvih tala i provođenje redovite gnojidbe.

U stvarnosti, parametar intenziteta ne odgovara u potpunosti aktivitetu (broju slobodnih iona u otopini) nekog elementa u vodenoj fazi tla niti njegovoj koncentraciji (ukupnom broju iona), već postoji određeni omjer između aktiviteta iona koji se najčešće označava kao AR (*aktivitetni omjer*). Npr., aktivitetni omjer kalija čvrsto je povezan s Ca^{2+} i Mg^{2+} :

$$AR_K = \frac{a_K}{\sqrt{a_{(Ca + Mg)}}}$$

(a_K = aktivitet K, $a_{(Ca + Mg)}$ = aktivitet Ca + Mg)

Taj omjer zapravo ima logaritamsku ovisnost:

$$AR_{dF} = RT \times \ln \times \frac{a_K}{\sqrt{a_{(Ca + Mg)}}}$$

S obzirom da se aktivitet izražava slobodnom energijom iona, a njena vrijednost predstavlja potencijal hraniva, prvi izraz može se napisati i kao:

$$pK = pK - 0,5 \times p(Ca + Mg)$$

(gdje je pK = potencijal kalija, $p(Ca + Mg)$ = potencijal kalcija i magnezija)

Prema *Woodruffu*, kada je pK 2,5-2,9 raspoloživost kalija je slaba, od 1,8 do 2,2 je optimalna, a oko 1,5 je suvišak kalija i manjak kalcija u tlu. Vrijednost pK može se izraziti i u jedinicama energije koju biljke trebaju uložiti kod usvajanja kalija.

$$\frac{C_{iz}^+}{C_{iz}^{2+}} = K_G \frac{C_a^+}{\sqrt{C_a^{2+}}} \text{ pa je}$$

$$AR = \frac{C_a^+}{\sqrt{C_a^{2+}}}, \text{ odnosno}$$

$$\frac{K_{iz}}{Ca_{iz}} = K_G \frac{K^+}{\sqrt{Ca^{2+}}}$$

Između izmjenjivo sorbiranih kationa i onih u vodenoj fazi postoji stalno stanje dinamičke ravnoteže (opisano dijelom ranije u poglavlju "Zaslanjenost i alkaličnost tala") koja se može predstaviti izrazom:

Lijeva strana prvog izraza odnosi se na izmjenjivo vezane ione i vrijednosti su izražene u $\text{cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ tla (ekstrakcija u amonij-acetatu), dok desna predstavlja aktivitet u vodenoj fazi tla izražene u mmol dm^{-3} . Konstanta ili *Gaponov koeficijent* (K_G) uravnotežuje obje strane jednadžbe i u slučaju kada je sorpcija iona neselektivna (samo sorpcija na vanjskim površinama sekundarnih minerala) iznosi $\frac{1}{2}$. Pojavom selektivne sorpcije kalija (fiksacije) *konstanta Gapona* raste i ukazuje na čvrstoću vezivanja hranjivog elementa na adsorpcijskom kompleksu tla. Npr. kad je $K_G < 10$, K^+ je vezan u p-poziciji (površinski), ako je $K_G \approx 100$ nalazi se vezan u e-poziciji (na krajevima međulamelarnih prostora), a $K_G > 1.000$ korespondira s i-pozicijom vezivanja kalija (međulamelarni ili fiksirani kalij).

Potencijal hraniva može se iskoristiti za određivanje pufernih sposobnosti tla, a moguće je utvrditi i količinu izmjenjivo i čvrsto vezanog kalija upravo zbog toga što potencijal hraniva ima dvije veličine, intenzitet i kvantitet. Intenzitet je veličina koja ukazuje na dio hraniva tla s potencijalom koji omogućuje usvajanje, a kvantitet je predstavljen onim dijelom hraniva koje za određeno vrijeme može postati raspoloživo. Omjer između promjene kvantiteta u dva tla različitog pufernog kapaciteta i intenziteta prikazuje slika 4.31.

Potencijal fosfora također se određuje u ravnotežnom stanju tekuće i čvrste faze tla. U oba slučaja najčešće se koristi slabo koncentrirana otopina CaCl_2 ($0,01$ do $0,02 \text{ mol dm}^{-3}$) radi prilagođavanja ionske jakosti ravnotežne otopine na približno jednaku vrijednost za različite koncentracije hraniva. Fosfatni potencijal bitno se razlikuje od pK jer se ovdje radi o kemijskoj vezi fosfora i kalcija na koju snažno utječe pH. Stoga se potencijal fosfora najčešće prikazuje izrazom:

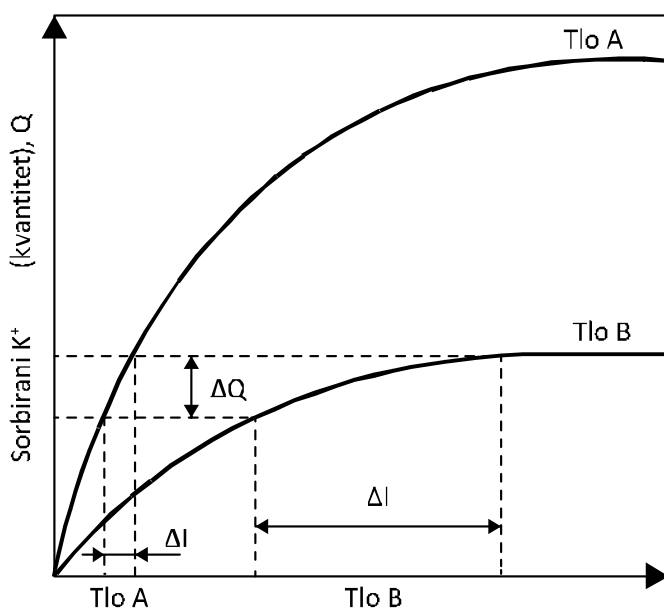
$pP = 0,5 \times pCa + pH_2PO_4$, gdje je:
 $0,5 \times pCa = -0,5 [\log(a_{Ca}) + \log(f_{Ca})]$, odnosno

$$pH_2PO_4 = - \left[\frac{\log(a_{Ca})}{(k'' + a_H)} + \log(P_T) + \log(f_{Ca}) \right]$$

a_{Ca} = aktivitet Ca u mol dm⁻³, a_H = aktivitet vodika u mol dm⁻³, P_T = ukupna koncentracija P u otopini u mol dm⁻³, k'' = konstanta disocijacije H₃PO₄ na H⁺ + H₂PO₄⁻, dok je faktor aktiviteta prema proširenoj empirijskoj jednadžbi *Debye-Huckela*:

$$\log(f_{Ca}) = -0,5091 \times z^2 \frac{\sqrt{\mu}}{1 + aB\sqrt{\mu}}$$

(gdje je μ = ionska jakost otopine (u većini tala je < 0,01) i z = valencija (naboj) iona. Poluempirijski parametri a i B jednadžbe imaju sljedeće vrijednosti: $B \approx 0,33$, dok a ima različite vrijednosti ovisno o ionu, npr.: 3 za K⁺, NO₃⁻, Cl⁻; 4 za H₂PO₄⁻, HPO₄²⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻, Na⁺; 5 za MoO₄²⁻, Ba²⁺, Cd²⁺, Pb²⁺, Hg²⁺; 6 za Ca²⁺, Mg²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺, Mn²⁺, Fe²⁺ i 9 za H⁺, Al³⁺, Fe³⁺ i Cr³⁺).



Slika 4.31. Omjer kvantiteta i intenziteta K⁺ u dva tla različitog kapaciteta za sorpciju: tlo A (visok) i tlo B (nizak) (*Mengel and Kirkby, 1978.*)

Disocijacija ortofosfatne kiseline te prisutnost iona H₂PO₄⁻ i HPO₄²⁻ neposredno je povezano s pH-vrijednosti vodene faze tla, što i gornji izraz za računanje potencijala fosfora uzima u obzir. Naime, kod pH 7,2 taj omjer je 1:1, a kod pH 6,2 deset puta je više iona H₂PO₄⁻.

Debye-Huckelova jednadžba omogućuje izračunavanje *nespecifičnog elektrostatičkog sparivanja iona* ili njihovo kompleksno vezivanje ako im je

naboj 2 (*polivalentni kationi*), a pritom su prisutne neutralne ili negativno nabijene organske molekule (*ligandi*) u dovoljnoj koncentraciji i uz relativno visoku pH-vrijednost. Npr., K_{as} (konstanta asocijacije ili sparivanja) u vodenoj fazi tla za Mg^{2+} i SO_4^{2-} je:

$$K_{as} = \frac{aMgSO_4}{aMg^{2+} \times aSO_4^{2-}} = 200 \quad (a = \text{aktivitet iona})$$

Fizička pristupačnost hraniva također je vrlo važna jer kemijski pristupačni oblici moraju biti u onom sloju tla u kojem se trenutno nalazi ili će se razviti korijenski sustav biljaka, jer korijen zbog svoje "otvorene organizacije" neprestano raste u potrazi za vodom i hranivima (*hidro i kemotaksija*). To je vrlo značajno kod gnojidbe, posebice u slučaju primjene slabo pokretnih oblika hraniva, kao što su fosforna ili kalijaska gnojiva.

Zbog niske koncentracije hraniva u vodenoj fazi tla, vrlo značajan parametar raspoloživosti je *mobilitet* ili nadoknađivanje usvojenih hraniva u zoni korijena. Veza između pokretljivosti i usvajanja hraniva različita je za hranjive elemente, ovisi o načinu usvajanja (aktivno, pasivno, prenositelji, ionska crpka itd.) i opisuje se složenim izrazima, npr. za pasivan način usvajanja:

$$I_R = 2 \pi \times r \times D_1 \times \theta \times f_1 \times \frac{dC_1}{dr} + 2 \pi \times r \times v \times C_1$$

(I_R = količina hraniva koja se usvaja iz radijalne zone korijena u $\text{mol cm}^{-1} \text{s}^{-1}$, r = radijus korijena, D_1 = koeficijent difuzije čiste vode u $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$, θ = volumen vodene faze u zoni korijena, f_1 = čimbenik difuzijskog otpora, v = količina vode koju usvaja korijen svojom površinom u $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ i C_1 = koncentracija hraniva u vodenoj fazi tla)

5. USVAJANJE HRANIVA

Stanična građa svih živih organizama uključuje složeni membranski sustav počevši s *plazmalemom* koja odvaja stanicu od vanjske sredine i preko *endoplazmatskog retikuluma* povezuje ju s *membranom jezgre* i *tonoplastom*, odnosno *vakuolom*. Stanične organele također su odvojene membranama od ostalih dijelova protoplazme. Sve žive membrane su univerzalno građene iz slojeva lipida i proteina. Membrane nisu jednostavne pregrade, već je njihova uloga vrlo aktivna uslijed čega dolazi do specifične i različite propustljivosti za pojedine tvari. Selektivnom propustljivošću žive membrane reguliraju promet tvari i energije te tako usklađuju metabolizam stanice s uvjetima koji vladaju u stanici i njenoj okolini.

Tablica 5.1. Promjena koncentracije hranjive otopine i staničnog soka korijena kukuruza i graha (*Marschner, 1986.*)

Ion	Konc. otopine (mM)			Konc. (mM) u korijenu	
	Početna konc.	Nakon 4 dana		Kukuruz	Grah
		Kukuruz	Grah		
K ⁺	2,00	0,14	0,67	160,0	84,0
Na ⁺	1,00	0,94	0,59	3,0	10,0
Mg ²⁺	0,32	0,51	0,58	0,6	6,0
Ca ²⁺	0,25	0,06	0,09	6,0	12,0
NO ₃ ⁻	2,00	0,13	0,07	38,0	35,0
Cl ⁻	0,67	0,61	0,81	14,0	6,0

Mehanizam propustljivosti živih membrana puno se istražuje, sve je više novih činjenica, ali je još uvijek nedovoljno istražen. Dobro je poznato da tvari mogu prolaziti kroz žive membrane kada su topljive unutar njih i kad je izvan stanice veća koncentracija tvari negoli u njoj. Tada dolazi do pojava koje su poznate kao *difuzija* i *osmoza*. Međutim, u prvom slučaju, voda ne bi mogla ulaziti u stanicu jer se ne otapa u lipidima, ali voda ipak lako ulazi u žive stanice. U drugom slučaju, ioni prolaze nasuprot gradijentu koncentracije pa im je koncentracija u stanicama prosječno veća za red veličine 10^3 - 10^4 prema vanjskoj sredini, odnosno vodenoj fazi tla (tablica 5.1.). Dakle, pored fizikalnih zakonitosti difuzije i osmoze, postoje i drugi, aktivni mehanizmi unošenja tvari u stanicu koji za taj proces zahtijevaju i troše energiju.

Recentna istraživanja mehanizma propustljivosti živih membrana te razumjevanje njihove propustljivosti sve češće su usmjerena na efikasnije usvajanje hraniva i drugih tvari, kako korijenovim sustavom, tako i kod folijarne primjene.

5.1. KINETIKA DIFUZIJE

Prema zakonima fizikalne kemije čestice difundiraju od veće koncentracije prema manjoj, bez obzira radi li se o otopinama ili plinovima. Otuda je *neto difuzija* upravo proporcionalna razlici koncentracija. Ta razlika naziva se *difuzijski* ili *koncentracijski gradijent*. Na brzinu difuzije (F) po *Ficku* utječe nekoliko čimbenika prema sljedećoj jednadžbi:

$$\frac{dQ}{dt} = -D \times A \times \frac{dC}{dx}, \text{ odnosno}$$

$$F = \frac{\text{difuzijski gradijent} \times \text{površina} \times \text{temperatura}}{\text{molekularna masa} \times \text{udaljenost}}$$

dQ/dt = fluks otopine (rata izmjene u mol s⁻¹ m⁻²)

D = difuzijski koeficijent (negativan)

A = površina (m²)

dC/dx = gradijent koncentracije

Prema gornjem izrazu intenzitet difuzije je upravo proporcionalan koncentracijskoj razlici, površini presjeka preko kojeg se obavlja difuzija, i temperaturi, a obrnuto proporcionalan masi čestica i udaljenosti na kojoj se proces difuzije odvija.

Prvi Fick-ov zakon prilagođen membranama opisuje sljedeći izraz:

$$\frac{dQ}{dt} = -P \times A \times (D \times C)$$

(P = koeficijent permeabilnosti).

Pojedine se tvari vrlo teško ili uopće ne otapaju u lipidnom matriksu živih membrana, a ipak vrlo brzo difundiraju, kao npr. glukoza. Zbog toga se opravdano pretpostavlja da se glukoza veže na nekog prenositelja uz nastajanje kompleksa koji je topljiv u lipidima. Ovakve reakcije kataliziraju vjerojatno specifični membranski enzimi. Pojava prolaska tvari netopljivih u lipidima pomoću gradnje kompleksa često se naziva *olakšana difuzija* i ona ima određene sličnosti s *aktivnim transportom*, ali uz bitnu razliku da se odvija uvijek niz gradijent koncentracije, dok je *aktivni transport* pojava usvajanja tvari kroz žive membrane *nasuprot difuzijskom gradijentu*.

Neto difuzija vode kroz *semipermeabilne* (polupropusne) membrane naziva se *osmoza*. Osmoza uzrokuje pojavu *osmotskog tlaka* što ga vrše *nedifuzibilne čestice* (čestice koje zbog veličine ne mogu prolaziti kroz žive membrane) unutar žive stanice na plazmalemu. *Osmotski tlak* stoga je izravno proporcionalan broju čestica u jedinici volumena.

Čestice tvari, bez obzira na njihovu masu, vrše u prosjeku isti tlak na membranu, što znači da im je zapravo prosječna kinetička energija jednaka. Uzrok toj pojavi je sljedeći:

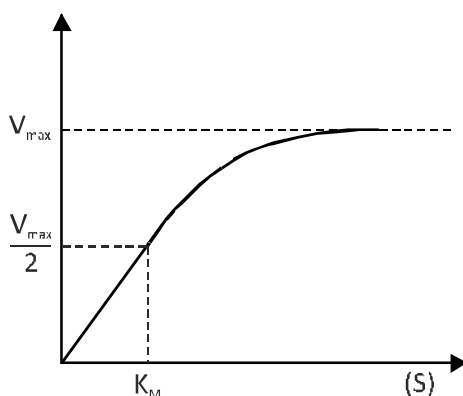
- čestice veće kinetičke energije brže se kreću i u većem broju sudara postupno predaju višak energije česticama s manjom kinetičkom energijom,
- veće čestice imaju veću masu (m), ali se zbog toga kreću manjom brzinom (v) u odnosu na male, brže čestice pa je zbog toga prosječna kinetička energija svih čestica podjednaka i može se izračunati prema izrazu:

$$k = \frac{mv^2}{2}$$

Dakle, osmotski tlak ne ovisi o veličini čestica, već isključivo o njihovom broju, odnosno aktivitetu.

Usvajanje hraniva povezuje se s više različitih procesa:

- prava difuzija,
- prolaženje kroz otvore na membrani,
- difuzija uslijed otapanja u lipidnom dijelu membrane,
- olakšana difuzija nastajanjem kompleksa koji lako prolazi kroz membranu,
- zamjenjiva difuzija (uz nastajanje kompleksa iona i molekula nosača pri čemu dolazi do njihove zamjene za iste ione i molekule protoplazme pa se ne mijenja koncentracija iona),
- aktivno usvajanje uz utrošak energije,
- pinocitoza (invaginacijom plazmaleme bliske čestice fizički se zahvaćaju).



Slika 5.1. *Michaelis-Mentenova enzimska kinetika*

Usvajanje iona, s obzirom na razliku koncentracije hraniva u vodenoj fazi tla (vanjska sredina) i stanica biljaka, često se prikazuju *Mihaelis-Mentenonom enzimskom kinetikom* (slika 5.1.):

$$I_n = \frac{I_{\max} \times (C_1 - C_{\min})}{K_m + (C_1 - C_{\min})}$$

(gdje je: I_{\max} = maksimalna brzina usvajanja, K_m označava *Michaelis-Mentenovu konstantu* čija je veličina obrnuto proporcionalna energiji veze supstrata i enzima, pri čemu je $I_n = 0,5 \times I_{\max}$ *neto influks*, C_1 = inicijalna koncentracija, a C_{\min} najmanja moguća koncentracija hraniva pri kojoj počinje primanje iona kroz plazmalemu).

Vrijednost neto usvajanja hraniva (I_n) može varirati ovisno o odnosu količine hraniva prema masi korijena ili veličini rizosfere.

5.2. PASIVNO USVAJANJE HRANIVA

Pasivno usvajanje hraniva temelji se na fizikalnim zakonima difuzije i osmoze, odnosno odvija se bez utroška energije. Razmjena tvari između biljnih stanica i vanjske sredine moguća je tim procesom samo u uvjetima dovoljne vlažnosti tla, ali i tada uz velike prepreke. Ipak, činjenica je da se difuzija elektrolita u gelima (kakve su i žive membrane) odvija znatnom brzinom. Pritom su zapažena velika odstupanja od očekivane promjene koncentracije.

Promjena kemijskog potencijala hraniva u vodenoj fazi tla i u živoj stanici koja je u neposrednom dodiru s vanjskom sredinom izračunava se *Nernstovom jednadžbom*:

$$d\mu = d \times (R \times T \times \ln \times C) + d \times (z \times F \times E)$$

(gdje je $R \times T \times \ln \times C$ = kemijski potencijal, a $d \times (z \times F \times E)$ = razlika elektropotencijala s dvije strane membrane).

Nakon transformacije u logaritamsku bazu 10 dobije se izraz koji pokazuje odnos vanjske i unutrašnje koncentracije nekog iona:

$$\log \frac{C_V}{C_U} = \frac{-d \times (z \times F \times E)}{2,3 \times R \times T}$$

R = plinska konstanta = $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}$, T = apsolutna temperatura u K , z = valencija iona, C_V = vanjska koncentracija, C_U = unutrašnja koncentracija, $\mu\text{mol ml}^{-1}$, F = *Faradayeva* konstanta $9,649 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$, E = elektropotencijal V

Elektrokemijska ravnoteža prema *Nernstu* između unutarnje i vanjske otopine može se izračunati sljedećim izrazom:

$$E(\text{mv}) = -59 \times \log \left(\frac{\text{koncentracija vakuole}}{\text{koncentracija otopine tla}} \right)$$

Stvarnu i izračunatu koncentraciju nekih biogenih elemenata prema gornjim izrazima u korijenu graška nakon stajanja od 24 sata u otopini poznate koncentracije pokazuje tablica 5.2.

Tablica 5.2. Očekivana i stvarna raspodjela iona u $\mu\text{ekv g}^{-1}$ vode između hranjive otopine i korijena graška (*Salisbury and Ross, 1986*)

Ion	Koncentracija u $\mu\text{ekv g}^{-1}$ vode	
	Očekivana	Stvarna
K ⁺	74	75
Na ⁺	74	8
Mg ²⁺	2,70	3
Ca ²⁺	10,80	2
NO ₃ ⁻	0,0272	28
Cl ⁻	0,0136	7
H ₂ PO ₄ ⁻	0,0136	21
SO ₄ ²⁻	0,000094	19

5.2.1. Gibbs Donnanova ravnoteža

Odstupanja od zakona osmoze poznata su u ishrani bilja pod nazivom *Donnanov zakon* ili *Donnanova ravnoteža*. Neravnomjerna raspodjela iona s dvije strane polupropusne membrane ranije je objašnjavana samo fizičko-kemijskim zakonitostima, a Donnanov zakon je najbolji predstavnik takvih hipoteza o usvajanju hraniva pa ga ukratko objašnjavamo.

Citoplazma kao koloidni sustav utječe na mehanizam osmoze jer koloidno-proteinske micle zbog svoje veličine ne mogu prolaziti kroz biomembrane, odnosno ne podliježu difuziji. U prirodnim uvjetima koncentracija elektrolita uvijek je veća u živoj stanici prema vanjskoj sredini, odnosno vodenoj fazi tla za 10^3 - 10^4 . Sukladno osnovnom zakonu osmoze u ravnotežnom stanju produkt koncentracije (aktiviteta) kationa i aniona unutarne otopine (protoplazme) mora biti jednak produktu koncentracije iona vanjske otopine (vodene faze tla):

$$[K_V]^+ \times [A_V]^- = [K_U]^+ \times [A_U]^-$$

Ova zakonitost samo je prividno proturječna s "ravnotežom" Donnana, budući da se uravnotežuju aktiviteti, odnosno slobodni ioni dvije sredine odvojeni polupropusnom membranom, što je moguće jer nakon sorpcije ili kemijskog vezivanja iona oni više ne utječu na ravnotežu raspodjele. Tablica 5.3. pokazuje raspodjelu iona prije i nakon uspostavljanja ionske raspodjele.

Tablica 5.3. Donnanova ravnoteža

Citool	Vodena faza tla	Citosol	Vodena faza tla
$K^+ = c_1$	$K^+ = c_2$	$K^+ = c_1 + X$	$K^+ = c_2 - X$
$P^- = c_1$	$Cl^- = c_2$	$P^- = c_1$	$Cl^- = c_2 - X$
početno stanje		stanje ravnoteže	

Prema gornjoj shemi (tablica 5.3.) u unutrašnjosti stanice je koncentracija proteina $P^- = c_1$ (*indifuzibilni anioni*) i kalija $K^+ = c_1$, a u vanjskoj sredini je otopina KCl s koncentracijom za oba iona c_2 , koja je znatno niža prema koncentraciji K^+ u stanici. U stanju ravnoteže, da bi bio zadovoljen temeljni zakon osmoze, mora biti uspostavljena sljedeća ravnoteža:

$$(c_1 + X) \times X = (c_2 - X)^2, \text{ odnosno } X = \frac{c_2^2}{c_1 + 2c_2}$$

Ako se vrijednost X (promjena koncentracije) uvrsti u jednadžbu za omjer koncentracije KCl dvije sredine, tada slijedi:

$$\frac{(KCl)_U}{(KCl)_V} = \frac{(Cl^-)_U}{(Cl^-)_V}, \text{ odnosno } \frac{c_2 - X}{X} = 1 + \frac{c_1}{c_2}$$

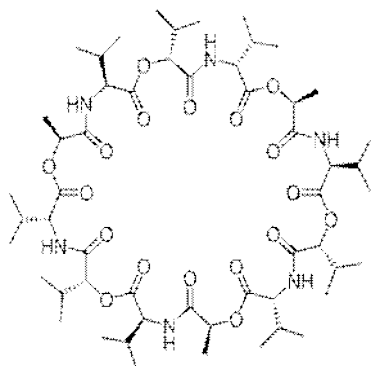
Dakle, koncentracija KCl s dvije strane membrane nakon uspostavljanja ravnoteže jednaka je jedinici uvećanoj za omjer koncentracije proteina (c_1) u unutarnjoj otopini i početne koncentracije KCl u vanjskoj sredini (c_2). Otuda veći sadržaj proteina unutar stanice uzrokuje, nakon postizanja ravnoteže, neravnomjerniju krajnju raspodjelu iona s dvije strane biomembrane uz veći osmotski tlak.

Potrebno je naglasiti da se *Donnanova ravnoteža* odnosi isključivo na slobodne ione, odnosno njihov aktivitet, pa ioni vezani *na indifuzibilne anione* (proteine) zapravo ne utječu na uspostavljanje neravnomjerne raspodjele iona. Zbog toga ioni iz vanjske, razrijeđene otopine, ulaze u stanicu sve dok im to omogućuje višak negativnog naboja na koloidnim micelama. Dakle, polarno ili kemijski vezani ioni u protoplazmi, ne utječu na stanje *Donnanove ravnoteže*, što rezultira znatno većom koncentracijom kalija u citoplazmi prema vodenoj fazi tla uz jednak broj slobodnih iona u obje otopine.

Opisani mehanizam usvajanja iona najčešće se ne podudara sa stvarnim stanjem pa se ovakvo usvajanje hraniva vjerojatno odvija u malim razmjerima (ispod 10 % usvojenih hraniva) što potvrđuju i eksperimentalni rezultati koji pokazuju kako je *Donnanov potencijal* < 90 mV. Ipak, danas se smatra kako Donnanova ravnoteža ima određen značaj kod početnog usvajanja iona pri klijanju sjemena,

premda je ishrana klijanaca heterotrofna (na račun rezervnih hraniva) i to samo dok još nije posve razvijen korijenov sustav biljaka.

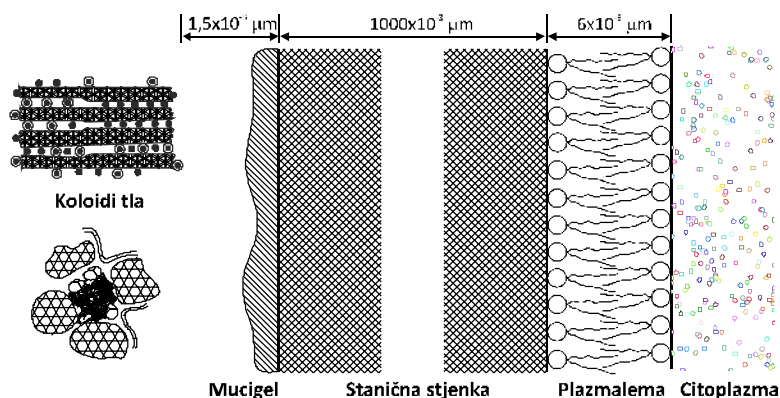
Pored difuzijsko-osmotske teorije usvajanja hraniva postoji još čitav niz različitih teorija pasivnog usvajanja. Lipoidna teorija pretpostavlja korelaciju između topljivosti tvari u lipidnom matriksu živih membrana. Usvajanje se odvija uz pomoć *ionofora*, spojeva različite kemijske građe i mase. Poznato je da višeciklični antibiotici, koji inače nisu prirodni konstituenti, kao *aktini*, *gramicidini*, *eniantin*, *valinomycin* i dr. mogu imati ulogu *ionofora* (prenositelja iona). Valinomycin (slika 5.2.) veže K^+ do 10.000 puta više od Na^+ , oduzima mu hidratacijski omotač i zatvara ga u svoj hidrofobni pa kalij lako prolazi kroz lipidni sloj membrane. Utvrđeno je i postojanje *polarnih ionofora* (*nigrecin*, *monezin* i dr.) koje omogućuju usvajanje i dvovalentnih iona. Različiti spojevi deterdžentnih svojstava (površinski aktivne tvari) utječu na gubitak hidrofobnosti lipidnog dijela membrane i jako povećavaju propustljivost. Npr.,



Slika 5.2. Struktura valinomicina

djelovanjem *dimetil-sulfoksida* povećava se usvajanje dušika i fosfora, što ima za posljedicu porast prinosa pa se sve češće provode istraživanja s primjenom takvih spojeva za intenziviranje usvajanja hraniva.

Ultrafiltracijska teorija pretpostavlja postojanje otvora različite veličine u plazmalemi kroz koje prolaze molekule različitog promjera. Recentna istraživanja pokazuju da u biomembranama zaista postoje takve pore, kanali, kroz koje se može vrlo brzo usvajati veća količina hraniva.



Slika 5.3. Kontaktno usvajanje hraniva (prema Mengel and Kirkby, 1978.)

Lipidna i ultrafiltracijska teorija su suviše pojednostavljeno shvaćanje mehanizma usvajanja hraniva i ne odgovaraju često činjeničnom stanju. Više pristalica ima apsorpcijska teorija prema kojoj se usvajanje hraniva obavlja na temelju razmjene iona između korijena i koloidnih čestica na sljedeći način:



Do razmjene dolazi u ekvivalentnom omjeru između koloidnih čestica tla i korijena pa se ovaj način usvajanja najčešće označava kao *kontaktno usvajanje hraniva* (slika 5.3.). Međutim, poznato je da biljke usvajaju hraniva kako iz otopine tla, tako i kontaktnom zamjenom pa veličina usvajanja na ovaj način ovisi o vlažnosti tla, njegovim fizičko-kemijskim svojstvima, ali i kemijskim svojstvima pojedinih iona.

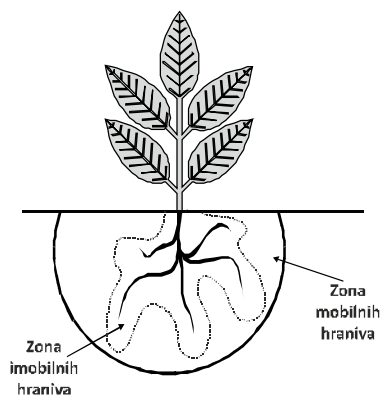
Biljke usvajaju i troše veliku količinu vode od koje se samo manji dio zadržava za potrebe biljke, dok veći dio u *transpiracijskoj struji* čini tzv. *tranzitnu vodu*. Ispitivanja su pokazala kako je usvajanje pojedinih hraniva u korelaciji s intenzitetom transpiracije, ali se to događa uglavnom samo na plodnim tlima. Strujanje vode s otopljenim tvarima u porama tla označava se kao *transport hraniva konvekcijom* ili *mass flow*. Na tlima niske opskrbljenosti pristupačnim hranivima nema jače veze između transpiracije i usvajanja hraniva što znači kako biljke koriste i druge mehanizme usvajanja hraniva. Stoga, pasivno usvajanje iona na principima difuzije, kontaktne zamjene i slobodnog toka ima ograničeni značaj. Relativan odnos između opisanih načina usvajanja pokazuje tablica 5.4.

Tablica 5.4. Relativan omjer načina pasivnog transporta hraniva (u %)

Element	Kontaktno	Konvekcija	Difuzija
N	2	98	-
P	3	6	91
K	2	20	78
Ca	28	72	-
Mg	13	87	-
S	5	95	-
B	3	65	32
Cu	70	20	10
Fe	50	10	40
Mn	15	5	80
Mo	5	95	-
Zn	30	30	40

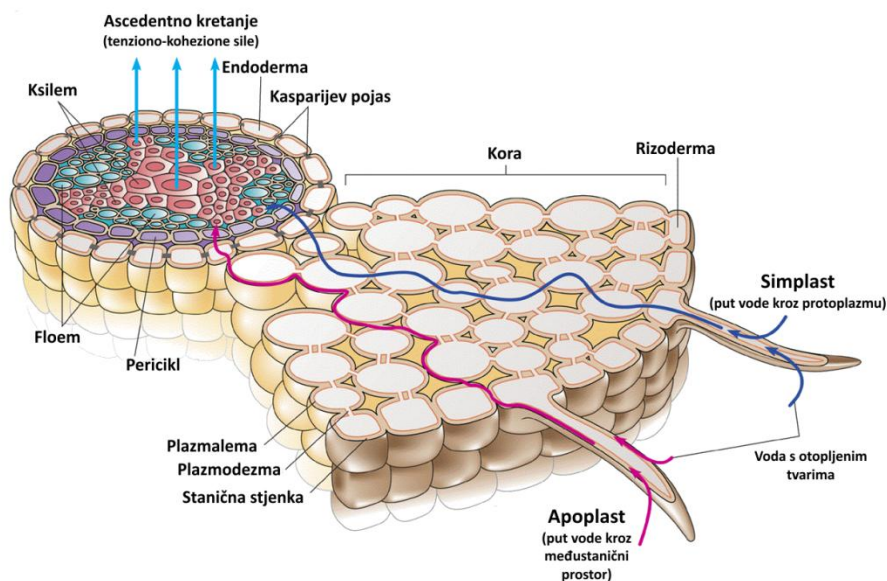
Korijenov sustav biljaka i tlo koje on prožima čine jedinstven sustav nazvan *rizosfera* s jakim uzajamnim utjecajem. Usvajanjem iz neposredne blizine korijena koncentracija hraniva brzo opada (slika 5.4.), a dotok novih količina hraniva ovisi o difuziji iona u tlu, kretanju hraniva otopljenih u vodi i brzini rasta korijena koji tako uspijeva zahvatiti sve veći volumen tla. Stoga usvajanje,

zapravo transport hraniva opisanim pasivnim mehanizmima ovisi najviše o međusobno složenom odnosu tla i korijena.



Slika 5.4. Rizosfera sa zonom mobilnih i imobilnih hraniva

Anatomska građa korijena, kako to pokazuje radijalni presjek korijena (slika 5.5.), dopušta pasivno usvajanje samo do *endodermalnog sloja* stanica s nepropusnim *Kasparijevim pojasom* od *suberiniziranih* staničnih zidova. Na taj način bi cjelokupna korijenova kora predstavljala *prividno slobodan prostor* korijena u kome se voda s hranivima kreće difuzijom. Međutim, suvremena mjerenja pokazuju da prividno slobodan prostor korijena iznosi svega 4-6 % ukupne zapremine korijena umjesto 18-20 % koliko se prethodno mislilo.



Slika 5.5. Model radijalnog transporta vode i hraniva po simplastu i apoplastu (Solomon, Berg and Martin, 2004.)

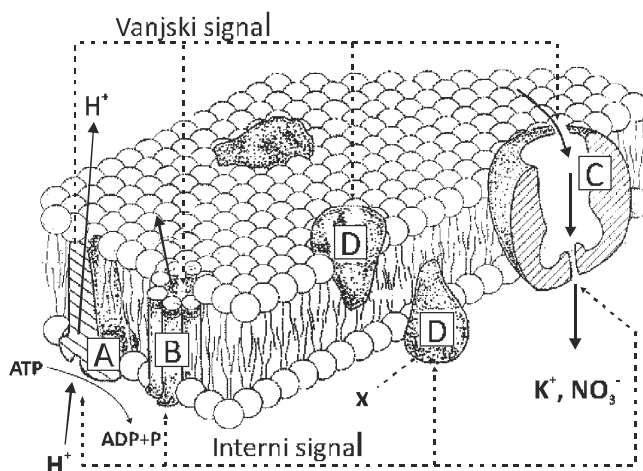
Dakle, prividno slobodan prostor korijena obuhvaća intercelularne prostore i stanične stijenke (do plazmaleme) u korijenskoj kori, a granicu čini *Kasparijev pojas* endoderme. Otuda, otpor i brzina kretanja vode i hraniva otopljenih u njoj

ovisi većim dijelom o kretanju vode kroz koru korijena po tzv. *apoplastu*. Stanični zid grade *celulozne mikrofibrile* duge 5-9 nm u matriksu od neceluloznih polisaharida (pektini i lignini) i glikoproteina sa sustavom pora (promjera 3-5 nm) kroz koje se lako premješta voda (slika 5.5.).

Put vode po *simplastu* je višestruko sporiji od kretanja po *apoplastu* jer svaka stanica pruža znatan otpor (procijenjen na 10 kPa). Apoplast je *prividno slobodan* prostor jer veliki broj negativno nabijenih aktivnih grupa, koje nastaju disocijacijom *celuloze*, *kemiceluloze* i *pektina* (*galakturonske* i *glukuronske komponente* pektina), utječu na povećavanje koncentracije kationa u neposrednoj blizini staničnih stijenki te ograničavaju njihovu slobodu kretanja dok je istovremeno koncentracija aniona smanjena. Posebice je izražen afinitet zadržavanja kalcija neposredno uz plazmalemu. Prva faza nagomilavanja iona uz plazmalemu je pasivni dio procesa usvajanja i odvija se neovisno o stanju metabolizma. Daljnji tijek usvajanja je aktivan proces (kod *suhozemnih angiosperm*) i stoga je osjetljiv na inhibitore disanja.

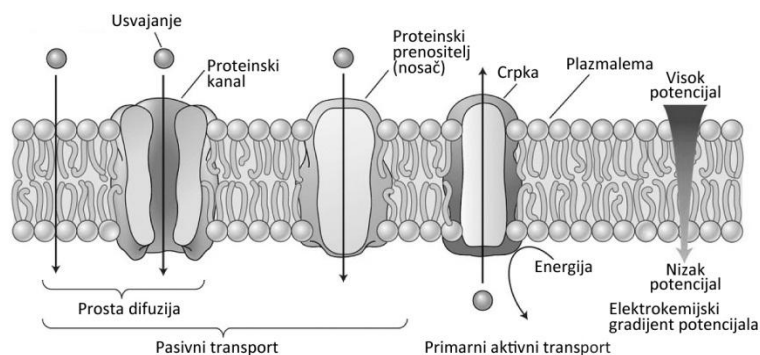
5.3. AKTIVNO USVAJANJE HRANIVA

Difuzija nasuprot gradijentu koncentracije nije moguća, jer je za prelaženje tvari iz područja niže u područje više koncentracije potrebno uložiti određenu energiju, odnosno izvršiti rad. Slikovito rečeno, takvo usvajanje je "uzbrdo".



Slika 5.6. Fluidno-mozaički model biomembrane s prikazom aktivnog usvajanja hraniva (Marschner, 1995.)

Prenošenje tvari kroz živu membranu, nasuprot gradijentu koncentracije, obavlja se s više različitih mehanizama, pa i uz pomoć molekula prenositelja proteinske ili fosfolipidne građe. *Lipidi biomembrana (fosfolipidi, glikolipidi i sulfolipidi)* imaju polarnu grupu topljivu u vodi, dok im je lipidna grupa hidrofobna. Obzirom na proteinskopolipidnu građu živih membrana, fosfolipidi imaju neophodna svojstva za prijenos hraniva kroz žive membrane. Debljina *plazmaleme* je oko 10 nm, *tonoplasta* oko 8 nm, a *endoplazmatskog retikuluma* oko 6 nm. Dakle, molekule proteina dovoljno su velike (slike 5.6. i 5.7.) i mogu zauzimati prostor od vanjske do unutrašnje strane membrane te predstavljati *kanale* za prolaz tvari. Inkorporacija proteina u cijeli presjek membrane dopušta prenošenje tvari duž molekule toplinskim gibanjem-titranjem, od jedne do druge aktivne grupe ili se, pokretani elektromotornom silom, usmjereno kreću kroz poseban kanal.



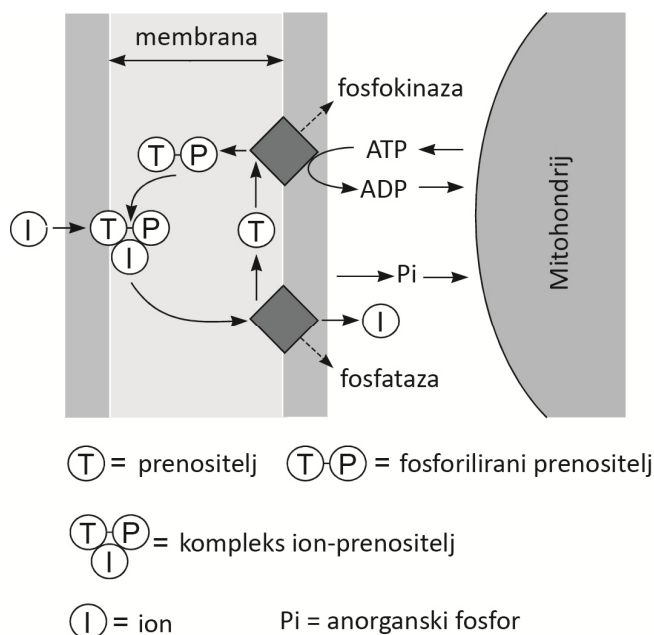
Slika 5.7. Shematski prikaz aktivnog usvajanja hraniva

Žive membrane posjeduju više različitih prijenosnih sustava za iste ili različite ione i molekule. Zbog toga se izražena selektivnost, različita brzina usvajanja pojedinih hraniva i druge specifičnosti ostvaruju na više načina i različitim mehanizmima usvajanja pojedinih elemenata ishrane, putem kemijske prirode nosača ili prirodnom enzima koji omogućuju vezivanje određene tvari na nosač. Usvajanje iona može biti i *pinocitozom* (invaginacijom plazmaleme) kada dolazi do premještanja dijela membrane u unutrašnjost citoplazme u obliku mjehurića koji se brzo kreću kroz endoplazmatski retikulum do vakuole.

Količina potrebne energije za prijenos neke tvari kroz membranu ovisi najviše o koncentraciji te tvari unutar stanice. Ako se prenesena tvar koncentrira 100 puta, potrebno je dva puta više energije uložiti u odnosu na povećanje koncentracije od 10 puta, odnosno 3 puta više za koncentracije od 1.000 puta. Dakle, potrebna energija za transport kroz žive membrane proporcionalna je dekadnom logaritmu stupnja do kojeg se tvar koncentrira u stanici.

Objašnjenje aktivnog usvajanja hraniva pomoću posebnih prenositelja dobiva na značaju s hipotezom *Lundegardovog "anionskog ili solnog disanja"* (1932. god.) i ona je, uz veći broj novijih hipoteza, još uvijek aktualna u današnjem shvaćanju

principa transporta tvari kroz žive membrane. Prema toj teoriji biljke disanjem proizvode vlastite ione (H^+ i HCO_3^-) koji se u ekvivalentnoj količini zamjenjuju za ione vanjske sredine pa je na taj način moguće unutar stanice povećati koncentraciju iona iznad koncentracije u vanjskoj sredini. Transport iona kroz plazmalemu obavlja se specifičnim prijenosnim mehanizmom. Naime, prenositelji (*carrier*) su organske molekule koje se vežu s ionima i u obliku nastalog kompleksa putuju od vanjske do unutrašnje strane membrane (slika 5.8.).



Slika 5.8. Shema membranskog transporta prenositeljima (Mengel, 1984.)

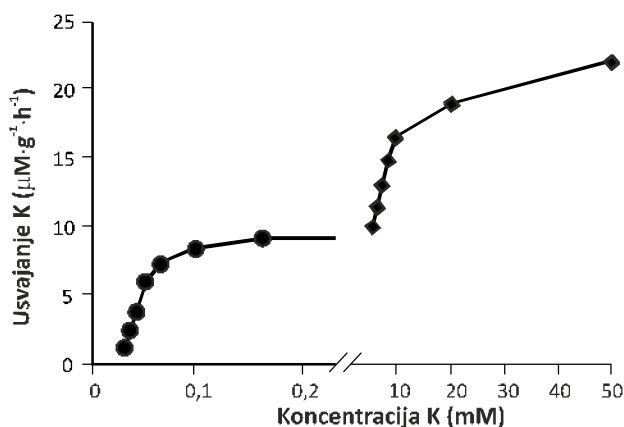
Koncept prenositelja temelji se na klasičnoj shemi enzimatske kinetike prema kojoj enzimi grade kompleks samo sa specifičnim tvarima, a brzina prijenosa adekvatna je *Michaelis-Mentenovoj* multienzimskoj kinetici što bi odgovaralo multiplom transportnom (slika 5.9.) sustavu kroz plazmalemu i tonoplast. Novija istraživanja u tom području upućuju na dokaze da veće molekule proteina predstavljaju mjesta intenzivnog ulaska različitih iona od mogućnosti da se samo *konformacijski "obrću"* unutar membrane ili pak obavljaju funkciju *vektorskog transporta*, odnosno predstavljaju usmjerene kanale za prolaz pojedinih iona. Konformacijske promjene proteina mogu biti vrlo brze, slično životinjskom *aktinomiozinu* mišića, uz skupljanje i istezanje, odnosno brzu promjenu polarnosti cijele molekule što omogućuje iznimno brzo usvajanje iona. Proteini bi stoga mogli imati funkciju specijalnih prenositelja za masovno i brzo usvajanje pojedinih hraniva.

Iz shematskog prikaza usvajanja iona (slika 5.8.) jasno je da se za taj rad troši energija iz procesa disanja. Mehanizam posjeduje sposobnost selektivnog

usvajanja iona jer postoji više prenositelja. Otuda i potječu razlike u koncentraciji pojedinih elemenata unutar biljke. Afinitet biljaka za većim usvajanjem kationa objašnjava se većom produkcijom H^+ iona prema HCO_3^- u procesu disanja i oslobađanju H^+ pri disocijaciji fosfata ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}) u drugim metaboličkim procesima.

Usvajanje aniona je manje poznato. Istraživanja na bakterijama ukazuju da se sulfati usvajaju olakšanom difuzijom gradeći kompleks vjerojatno s *permeazom* za koju se tvrdi da prenosi još šećere i aminokiseline. Naime, kod inhibicije sinteze permeaza antibiotikom *puromicinom* usvajanje nekih iona se smanjuje. *Permeaza* je protein male molekularne mase (~ 30.000 kDa) koji sadrži aminokiseline sa sumporom. Kod usvajanja fosfata sudjeluju vjerojatno dvije bjelančevine, jedna ima ulogu *permeaze*, a druga veže fosfatni ion.

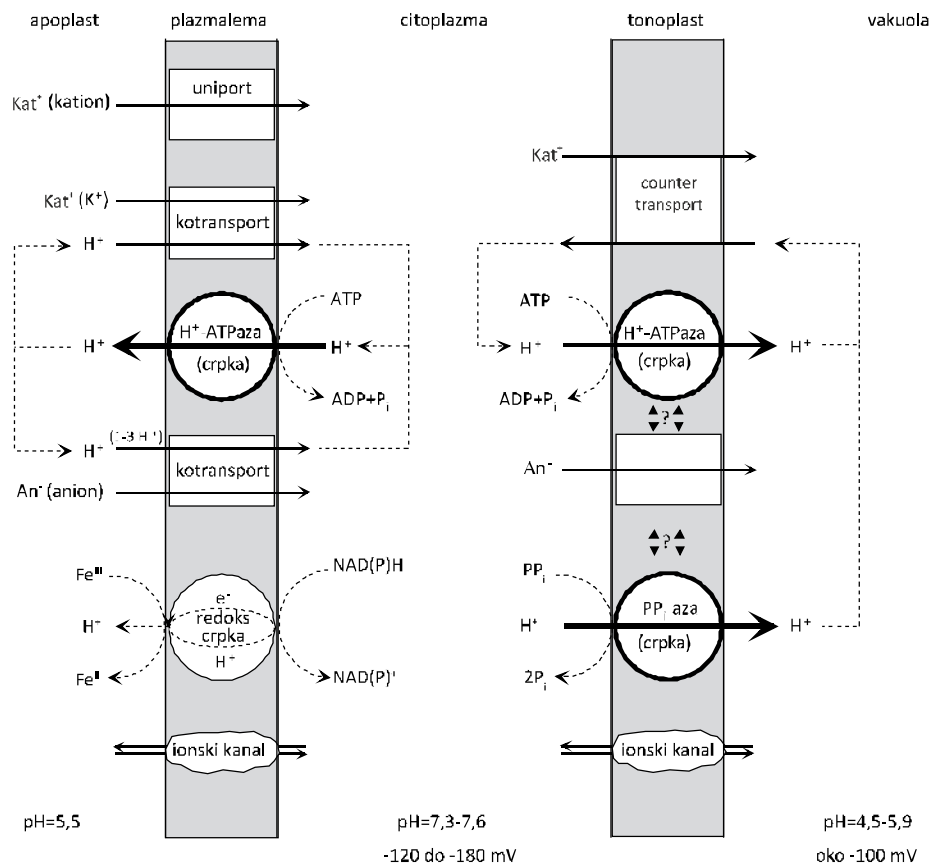
Brzina i intenzitet aktivnog prenošenja, prema hipotezi prenositelja, određeni su brojem aktivnih nosača za pojedinu tvar, stupnjem zasićenosti aktivnih mjesta za vezivanje i brzinom kruženja nosača unutar membrane. Prema novijim shvaćanjima, smatra se kako postoje dva sustava prenositelja tvari. Prvi djeluje u području niskih (do 20 mmol dm^{-3}), a drugi kod viših koncentracija. Otuda potječu različite krivulje usvajanja (slika 5.9.) pri promjeni vanjske koncentracije u otopini tla. Istraživanja pokazuju da *sustav II* djeluje i kad je *sustav I* potpuno zasićen i da na njegov rad metabolizam ima mali utjecaj. Sustav I stoga ovisi izrazito o opskrbljenosti energijom i osjetljiv je na različite inhibitore transporta elektrona i anaerobne uvjete. Zbog toga se misli da prvi sustav regulira plazmalema, a drugi, kod ulaska veće količine tvari, tonoplast.



Slika 5.9. Dvojna izoterma usvajanja kalija korijenom ječma pri nižim i višim koncentracijama otopine (Epstein, 1976.)

Teorija prenositelja je vrlo logična i definitivno prihvaćena, premda mnoga istraživanja pokazuju da između disanja i usvajanja iona nema uvijek čvrste korelacije. *Elektrokemijske teorije* i funkcioniranje *ionskih crpki* objašnjeno je temeljem čvrstih dokaza (usvajanje K^+ , Cl^- , NO_3^- , $H_2PO_4^-$ i SO_4^{2-}). Strujanje

elektrona unutar membrane omogućuje usvajanje npr. K^+ i Na^+ pri čemu se iz stanica izbacuje višak protona pa nastaje *elektropotencijal nedifuzijske naravi*.



Slika 5.10. Model i lokacija elektroionogene crpke (H^+ -ATPaza), *Marschner* (1986.)

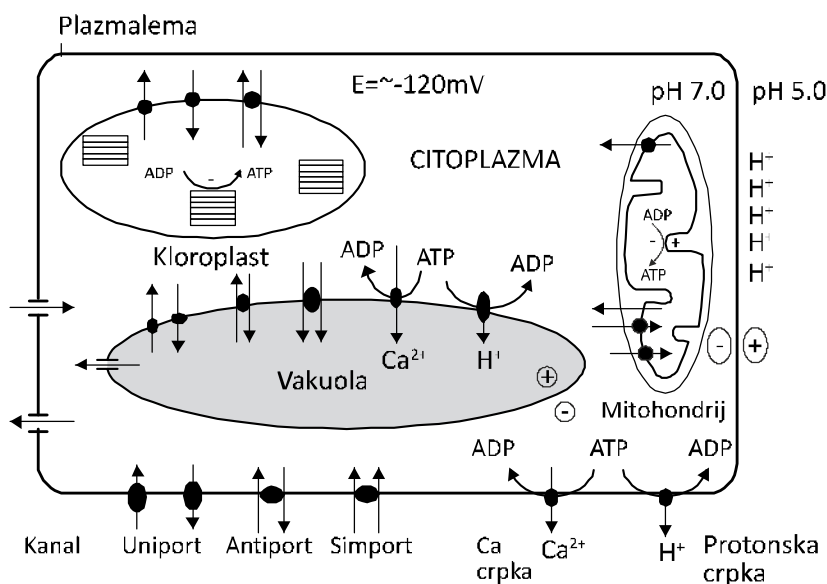
Lijevo: Plazmalema H^+ -ATPaza izdvaja H^+ iz protoplazme, a stimulirana je jednovalentnim kationima.

Desno: Tonoplast H^+ -ATPaza prenosi H^+ u vakuolu, a osjetljiva je na anione (Cl^- stimulira, NO_3^- inhibira) i relativno je neosjetljiva na katione

Elektrokemijska osnova prolaženja tvari kroz žive membrane temelji se na postojanju elektrokemijskog gradijenta između vanjske i unutrašnje sredine. Kretanje iona niz gradijent potencijala svakako je pasivan proces, a u suprotnom smjeru aktivan. Ako je u taj mehanizam uključen i neki aktivan prenositelj, tada se govori o *ionskoj crpki*.

Slika 5.11. prikazuje shematski princip aktivnog usvajanja hraniva. Pokretačka sila je energija ATP čija sinteza se odvija u kloroplastima i mitohodrijima korištenjem proton-motorne struje transmembranskog potencijala. Kada se

"ubacuje" u stanicu jedan kation, a istovremeno se "izbacuje" drugi, tada se elektrokemijski potencijal stanice ne mijenja prema vanjskoj okolini pa se takav mehanizam naziva elektroneutralna ionska crpka. U slučaju promjene potencijala, govorimo o elektrogenoj ionskoj crpki koja funkcioniра po principu *kemiosmotske Mitchellove teorije oksidacijske fosforilacije* (1970.) pomoću *proton-motorne sile* (fluksa), odnosno pokretač transporta je *elektrokemijski gradijent protona* (slika 5.10.).

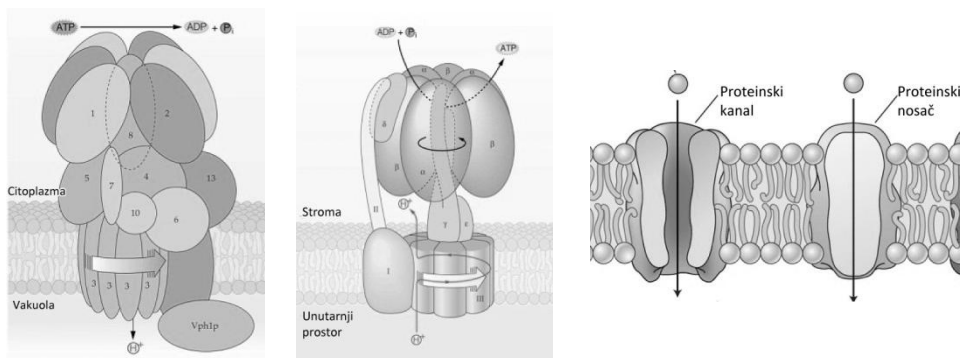


Slika 5.11. Shema aktivnog usvajanja hraniva biljnim stanicama (stanične stijenke nisu prikazane) kroz plazmalemu i tonoplast (prema G.S. Swamy, 1998)

Protoni izbačeni u vanjsku sredinu, pored funkcije zamjene iona na adsorpcijskom kompleksu i utjecaja na topljivost mineralnih tvari, potpomažu usvajanje drugih iona gradeći *kompleks proton-supstrat*. Takav transport iona naziva se *kotransport* ili *simport* i uključuje različite ionske parove, npr. $2\text{H}^+\text{-Cl}^-$, $\text{Cl}^-\text{-H}^+$, $2\text{H}^+\text{-H}_2\text{PO}_4^-$, ali i $\text{H}^+\text{-ATPazu}$. Kada se dva iona istovremeno premještaju kroz membranu u suprotnim smjerovima, pojava se naziva *antiport* ili *protutransport* (npr. $\text{Na}^+\text{-H}^+$). Paralelno s ATPaznim energetske mehanizmom funkcioniра mehanizam prenositelja (*uniport* i *counter transport* kad je u mehanizam spregnuto izdvajanje drugog iona, npr. $\text{K}^+\text{-H}^+$, $\text{OH}^-\text{-H}_2\text{PO}_4^-$ i dr.) uz istovremeni prolaz iona kroz ionske kanale i H^+ -redoks transportni mehanizam ionske crpke (slika 5.12.) u kojem su donor i akceptor elektrona NADH (uključujući fericijanid i dr.).

Ionske crpke funkcioniraju kod vrlo niskih koncentracija iona u otopini tla. Primjerice, ATPazna translokacija kroz plazmalemu moguća je kod koncentracije $\text{Ca}^{2+} < 1\text{ mmol m}^{-3}$, $\text{K}^+ < 0,2\text{ mmol m}^{-3}$ itd.

Recentna istraživanja pokazuju da se istovremeno s aktivnim usvajanjem iona kroz *kanale* (slika 5.12c.), odvija istovremeno i pasivno usvajanje K^+ , Na^+ , Ca^{2+} (što je prvo zapaženo u životinjskim tkivima) i vjerojatno drugih iona. *Ionski kanali* su zapravo makromolekularne pore kroz koje se pasivno odvija kationski transport (uvjetno rečeno, jer se gradijent potencijala uspostavlja kao rezultat metabolizma) i izuzetno su važni za održavanje *ionske ravnoteže* stanica i njihovu *osmoregulaciju*. Prolaz iona kroz *kanale* izuzetno je brz čime se danas objašnjavaju nagle osmotske pojave kod pokreta u biljaka kao što je *niktinastija* (brze reakcije, pokreti izazvani promjenom osvjetljenja, npr. otvaranje i zatvaranje cvjetova kod smjene noć-dan) i *seizmonastija* (potres, npr. mimoza).



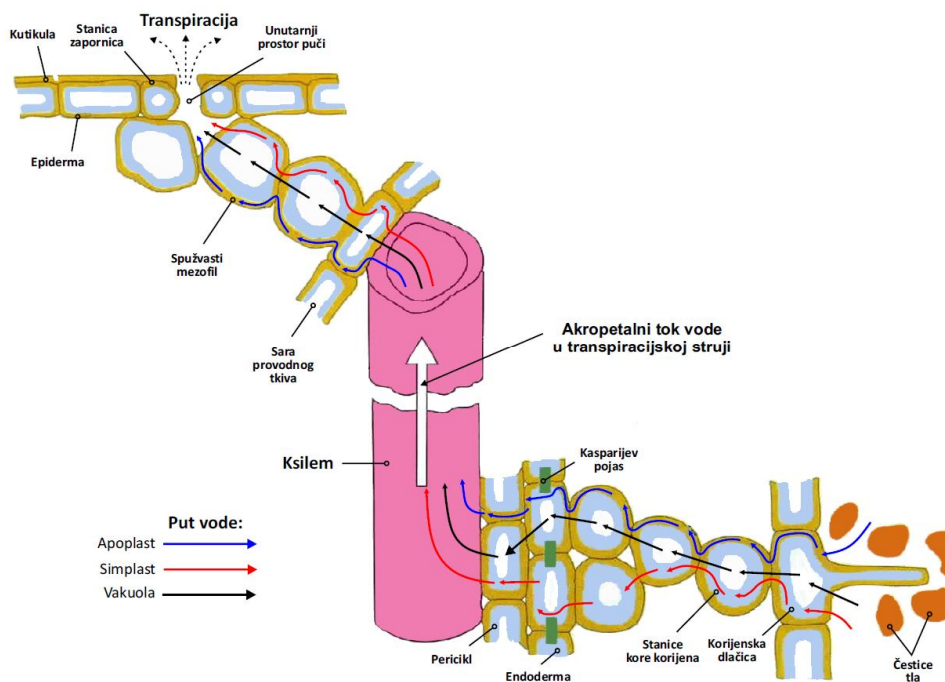
V-tip ATPazne ionske crpke F-tip ATPazne ionske crpke P-tip ATPazne protonske crpke

Slika 5.12. Struktura i tipovi ionskih crpki

U sadašnjem trenutku znanstvene misli, smatra se da je usvajanje hranjivih tvari pretežno aktivan proces koji ovisi o disanju, sintetskoj aktivnosti korijenovog sustava i fotosintetskoj aktivnosti zelenih organa. Pasivan tijekom usvajanja ograničava se najvećim dijelom na *slobodan prostor korijena*. To je prostor u korijenu u koji otopina slobodno ulazi (i pri inhibiranom disanju) i dostiže koncentraciju vanjske otopine. U tom se prostoru nalazi nepokretan elektrolit pa se, uz adsorpciju iona na njemu, (npr. R-COOH skupine) veličina stvarno slobodnog prostora smanjuje na *prividno slobodan* ili *Donnanovski prostor korijena*. U tom prostoru koncentracija iona je viša prema slobodnom prostoru jer dolazi do njihove sorpcije na električno nabijene skupine staničnih stijenki. Sukladno tome, *plazmalema* je barijera za pasivno usvajanje i ulaz tvari u stanicu odvija se aktivnim prenošenjem.

Nakon prolaska kroz Kasparijev pojas ioni se dalje prenose simplastom do parenhimskih stanica ksilema i ulaze aktivnim mehanizmom u *traheje* (provodne cijevi) ili provodne stanice (*traheide*, slika 5.13.). *Ascedentnim premeštanjem* iona (prema gore) iz korijena u ostale organe pojačava se njihovo usvajanje te povezanost rasta i usvajanja elemenata zapravo regulira intenzitet usvajanja hraniva po principu povratne veze (*feedback*).

Usvajanje hranjivih tvari je različito, ovisno o biljnoj vrsti, ali je uglavnom veće kod korova u odnosu na "kulturne" vrste. Jedan dio objašnjenja je u većoj aktivnoj površini korijena korova, njegovoj većoj sposobnosti zamjene te količini i vrsti izlučevina korijena sposobnih za mobilizaciju hraniva.



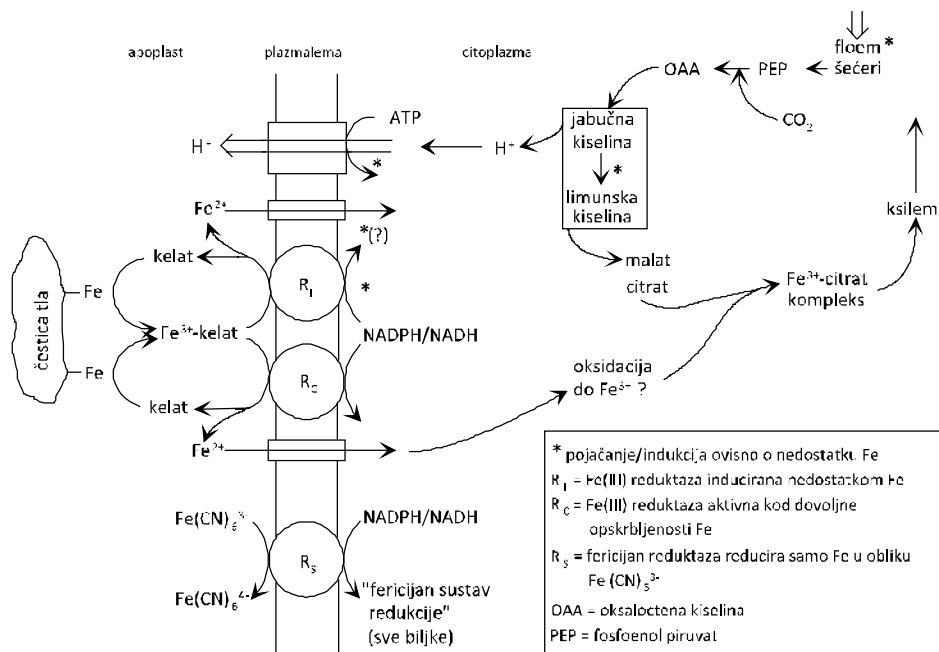
Slika 5.13. Usvajanje i put kretanja vode kroz biljku (prema <http://ebookbrowse.com>)

Aktivnu površinu korijena čini zona s vrlo finim korijenskim dlačicama koje lako mogu doći u neposredan dodir s koloidnim česticama tla. Stoga je površina korijena vrlo značajna s gledišta usvajanja hraniva. Npr., leguminoze po 1 aru (1 ar = 100 m²) imaju aktivnu površinu korijena od 5.000 m², pšenica 10.000 m², dok površina svih čestica tla u oraničnom sloju 1 ara iznosi ~ 3 × 10⁸ m². Stoga je razumljivo da korijen mora u "potragu" za hranivima i to postiže isključivo rastom.

Kapacitet zamjene korijena temelji se na principima *Donnanove ravnoteže* i raste proporcionalno s povećanjem prividno slobodnog prostora u njemu. Mogućnost usvajanja hraniva u dodiru s adsorpcijskim kompleksom tla ovisi o biljnoj vrsti, kultivaru, odnosno hibridu (tablica 5.5.). Leguminoze općenito imaju visok kapacitet zamjene (40-60 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹ ST), a biljke iz porodice trava upola niži. Zbog toga leguminoze relativno više usvajaju dvovalentne katione, a trave jednovalentne.

Izlučivanje ugljične kiseline (ugljkova(IV) oksida otopljenog u vodenoj fazi tla) u rizosferu ovisi o intenzitetu disanja korijena. Izdvojena ugljična kiselina otapa

mnoga, kemijski nepristupačna hraniva, dok H^+ ioni istovremeno zamjenjuju katione s kationskog izmjenjivačkog kompleksa tla. Produkcija H_2CO_3 obično je znatno viša od potrebne za usvajanje hraniva ($5-30 \text{ kekv ha}^{-1}$) i vjerojatno nije ograničavajući čimbenik u ishrani bilja.



Slika 5.14. Mehanizam usvajanja željeza (Kochian, 1991.)

Tablica 5.5. Kapacitet kationske izmjene korijena različitih biljaka (Marschner, 1986.)

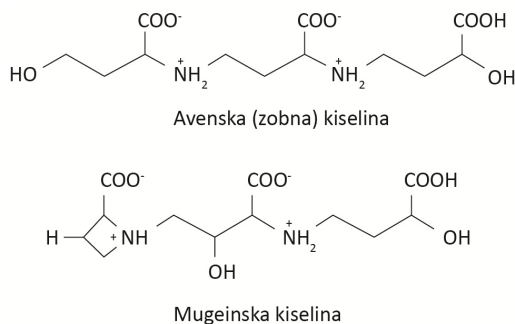
Biljna vrsta	Izmjenjivački kapacitet $cmol^{(+)} kg^{-1}$ ST korijena
Pšenica	23
Kukuruz	29
Grah	54
Rajčica	62

Od korijenskih izlučevina vrlo značajnu ulogu u ishrani bilja imaju organske kiseline, tvari koje lako grade kelate (slike 5.14. i 5.15.), reducirajuće tvari i sve one koje su dobar supstrat za rizosfernu mikrofloru te tako posredno utječu na pristupačnost hraniva.

Uobičajeno je da se svi niskomolekularni eksudati

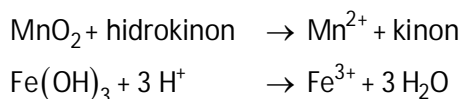
korijena u rizosferu nazivaju jednim imenom *fitosiderofore* (*phyto* = biljka, *sider* = željezo, *phore* = nosač), dok se izlučevine veće molekularne mase koje grade želatinoznu tvar označavaju kao *mucilage* ili *mucigel*. Želatinozna konzistencija tih izlučevina potječe uglavnom od polisaharida, poliuronske kiseline (20-50 %) i ektoenzima (kisela fosfataza, polifenol oksidaza i dr.), a njihova je zadaća da štite korijen od sušenja i oštećenja kod prodiranja u tlo kao i pomoć kod usvajanja hraniva. Niskomolekularne izlučevine korijena su šećeri, organske

kiseline, aminokiseline i fenoli, a uključuju i *fitosiderofore* kao kelatizirajuće agense.



Slika 5.15. Struktura dvije vrste fitosiderofora

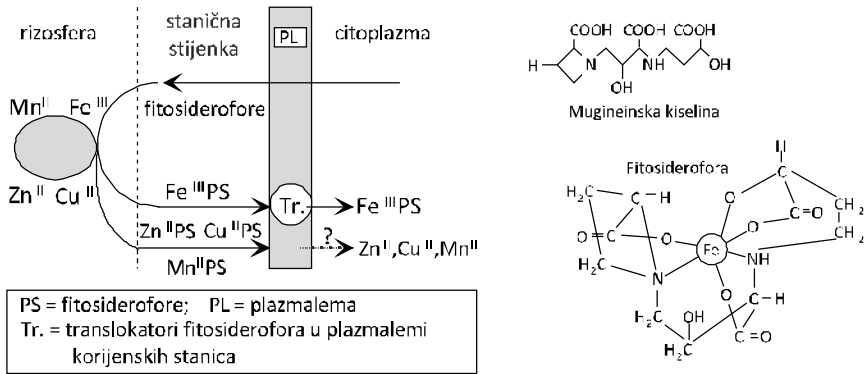
Organske kiseline su predominantne izlučevine korijena (npr. citrat) i njihov zadatak je otapanje kemijski nepristupačnih oblika hraniva. Prije svega to su različite soli kalcija (karbonati, fosfati i dr.), dok neke izlučevine redukcijskih svojstava mogu djelovati na sljedeći način:



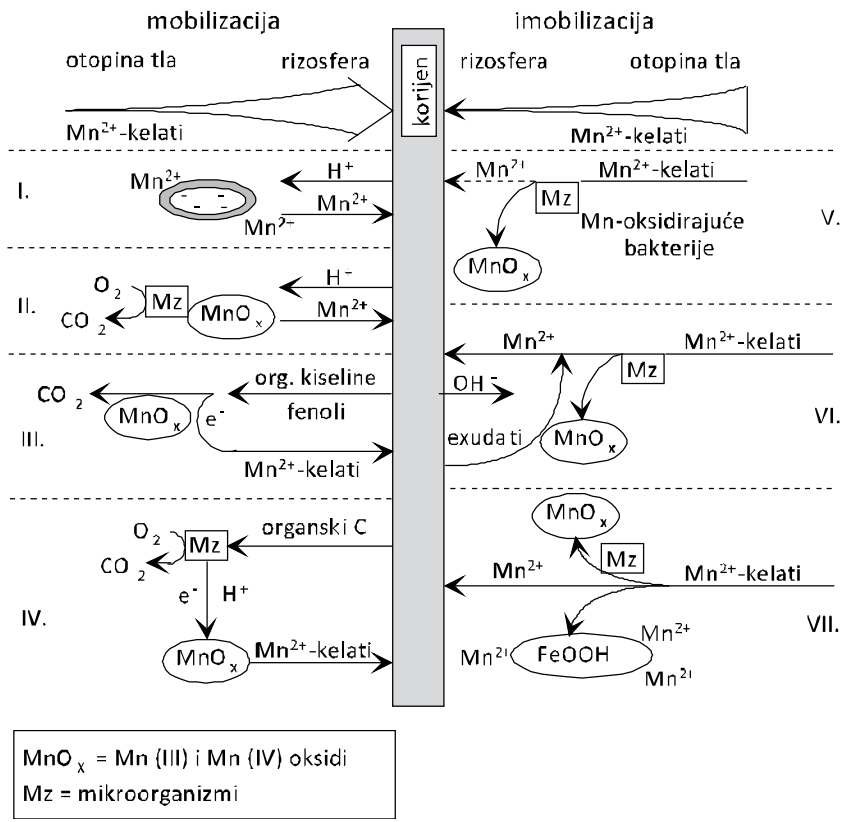
Redukcijom se manganov(IV) oksid, koji nije pokretljiv, prevodi u pokretljivi Mn^{2+} raspoloživ za usvajanje. Zakiseljavanje rizosfere potiče kelatizaciju Fe^{3+} s organskim kiselinama, zatim kelat- Fe^{3+} kompleks na površini korijena pod utjecajem Fe(III) reduktaze oslobađa i reducirano željezo koje biljka može apsorbirati.

Zapaženo je da kod nedostatka pojedinih biogenih elemenata kao što su: P, K, Zn i Fe, dolazi do pojačanog izlučivanja fitosiderofora korijenom što utječe na pojačan rad mikroflore i bržu transformaciju nepristupačnih oblika hraniva u pristupačna. Izlučivanje je ograničeno na vršnu zonu (1-2 cm) korijena. Slika 5.16. prikazuje model mobilizacije mikroelemenata fitosideroforama.

Između korijena i rizosfere postoji vrlo čvrst i kooperativan odnos koji često rezultira i pravom simbiotskom povezanošću pri čemu se mikroorganizmi rizosfere dijele na *neinfektivne* i *infektivne* mikroorganizme. Neinfektivni mikroorganizmi utječu na mineralnu ishranu biljaka preko pojačane mobilizacije, odnosno mineralizacije ili utječu direktno na morfologiju i fiziologiju korijena povećavajući kapacitet usvajanja hraniva. Dobar primjer djelovanja neinfektivne rizosferne mikroflore je mobilizacija i imobilizacija Mn (slika 5.17.).



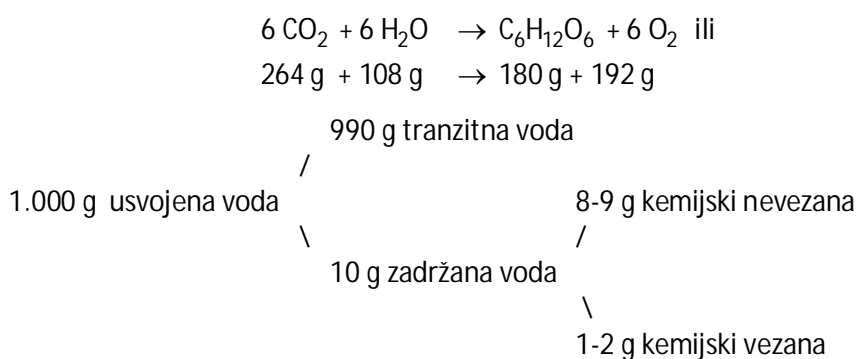
Slika 5.16. Model aktivacije mikroelemenata fitosideroforama (Marschner, 1990.)



Slika 5.17. Mehanizam mobilizacije Mn u rizosferi (Marschner, 1990.)

5.4. USVAJANJE VODE

Vodni režim biljaka sastoji se iz njenog usvajanja, kretanja kroz biljku i gubljenja. Bilanca vode u biljkama, zbog njezinog izuzetnog fiziološkog i poljoprivrednog značaja, danas je predmet svestranog izučavanja. Ona ovisi o razvijenosti i svojstvima korijenovog sustava, provodnog sustava, pokrovnih tkiva kroz koja se voda gubi te vanjskih čimbenika od kojih su najznačajniji sadržaj i raspoloživost vode u tlu, temperatura i aeracija, odnosno opskrbljenost korijena kisikom. Biljke su veliki potrošači vode, ali samo mali njezin dio sudjeluje u građi organske tvari pa se na 6 molekula CO₂ veže 6 molekula vode za sintezu jedne molekule glukoze:



Iako se po gramu šećera veže 0,6 g vode (108 g H₂O/180 g glukoze), biljke u sintezi organske tvari troše oko gram vode po gramu suhe tvari, dok najveći dio usvojene vode "prođe" kroz biljku u *transpiracijskoj struji* prenoseći hranjive tvari i hladeći fotosintetski aparat. Mnogo manja količina *kemijski nevezane vode* hidratizira protoplazmu (biljke ju sadrže ~ 75 %), potpomaže funkcionalno jedinstvo biljnog organizma i deponira se pretežito u vakuoli (~ 90 %). *Kemijski vezana voda*, koja se ugrađuje u organsku tvar, predstavlja izvor H⁺ i OH⁻. Biljke potroše prosječno transpiracijom oko 500 g vode za sintezu 1 g suhe tvari (*transpiracijski koeficijent*).

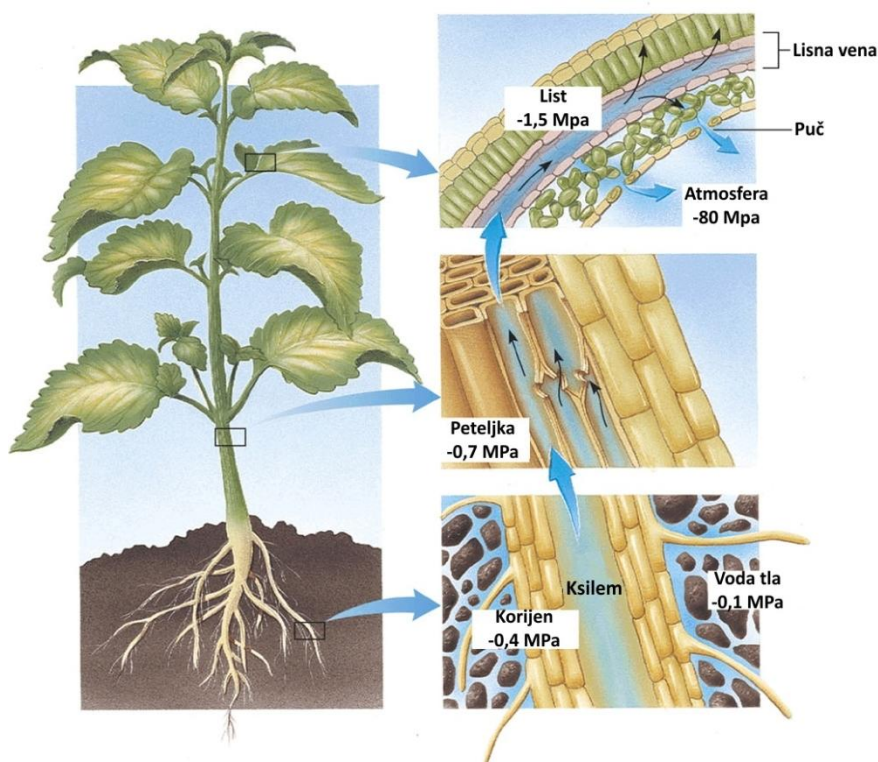
Voda se može usvajati lišćem, ali i drugim organima. Istraživanja pokazuju da nema veće razlike između usvajanja lišćem i korijenom zbog drugačije anatomske građe ta dva organa. List je prekriven *kutikulom*, na njemu je velik broj puči, a stanice *palisadnog* i *spužvastog parenhima* sadrže klorofil i obavljaju fotosintezu. Potrebno je istaknuti da je površina puči prosječno 2 % od površine lista i da kroz tako male otvore (oko 30 × 7 μm), zbog površinskog napona, tekućine teško ulaze, a i samo vlaženje stanica zapornica smanjuje ulazni otvor. Zbog toga je vjerojatnije da se voda (i otopljene mineralne tvari) preko lista usvajaju kroz kutikulu i epidermalne stanice, zapornice puči i dlačice na listu.

Sadržaj vode u protoplazmi nije mjera njezine aktivnosti, već je to njezin kemijski potencijal (*vodni potencijal*). Najveći potencijal (najveću slobodnu

energiju, $\psi_s = 0$) ima čista voda jer su njezine molekule slobodne, ali otapanjem različitih tvari u vodi, molekule vode se vežu na otopljenu tvar zbog dipolnog karaktera i otopina tada ima manju količinu slobodne energije. Na taj način uspostavlja se *gradijent vodnog potencijala* od manje koncentrirane otopine (veća slobodna energija) ka većoj koncentraciji (manja slobodna energija). Tipičan gradijent vodnog potencijala uspostavlja se od vodene faze tla preko kore korijena do endoderme. Snižavanje slobodne energije vode njezinim vezivanjem, odnosno njezinog kemijskog potencijala može se prikazati izrazom:

$$\mu - \mu^0 = R \times T \times \frac{P - P_0}{P_0} \text{ (J mol}^{-1}\text{)}$$

(μ = kemijski potencijal vode, μ^0 = kemijski potencijal čiste vode na 101 kPa i temperaturi sredine, P_0 = ravnotežni tlak para čiste vode na temperaturi sredine, P = ravnotežni tlak para otopine na istoj temperaturi, R = plinska konstanta ($8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) i T = temperatura sredine u K)



Slika 5.18. Usvajanje, transport i gubitak vode transpiracijom (Solomon, Berg and Martin, 2004.)

Moć usisavanja vode (S) ili *vodni potencijal*, odnosno sila kojom biljka ili pojedina stanica može usvajati vodu pokazuje izraz:

$$\psi = \frac{\mu - \mu^0}{v} = -S \text{ (J cm}^{-2}\text{)}$$

gdje je v parcijalni molarni volumen vode ($18 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$). Budući da je μ najčešće manji od μ^0 vrijednost vodnog potencijala ima negativan predznak te se voda premješta pasivno od mjesta s višim (manje negativnim) prema mjestu s nižim (više negativnim) potencijalom.

Osmotski tlak se znatno mijenja na razini jedne stanice što uvjetuje difuzni gradijent između vakuola i vanjske otopine, koji je različit za pojedine stanice i pogoduje održanju potencijala usisavanja vode te omogućuje premještanje vode od *rizoderme* do *endoderme* korijena. Na kretanje vode od endoderme do provodnih tkiva u *periciklu* korijena djeluju osim pasivnog osmotskog i aktivno usvajanje nasuprot difuznom gradijentu.

Kretanje vode u biljci odvija se od stanice do stanice (*ekstravaskularno*) i kroz provodna tkiva (*vaskularno*). Ekstravaskularna pokretljivost vode je malog intenziteta i temelji se na osmotskim silama. Danas se uglavnom smatra da se voda ekstravaskularno premješta korijenom pretežito kroz mikrokapilare staničnih stijenki prenoseći i otopljene mineralne tvari (*intermicelarno po apoplastu*) koje su međusobno povezane sve do endoderme. Aktivnim premještanjem vode kroz endodermu do pericikla i provodnih tkiva te dalje ascendentno (prema gore), voda se premješta isključivo vaskularno, odnosno ksilemom. Kod *gimnospermi* provodne stanice su *traheide* (s jamicama), a kod angiospermi to su *traheje* duge $\sim 10 \text{ cm}$ (kod biljaka iz porodice ljljana traheje mogu biti duge 3-5 m s promjerom 0,2 mm). *Ascendentno premještanje vode kroz ksilem omogućeno je "dvomotornim" mehanizmom* koji čini *negativni hidrostatski tlak* nastao kao posljedica *transpiracije* (povlači vodu prema lišću), a potpomognut je *korijenovim tlakom* (koji "gura" vodu od korijena prema lišću). Omjer između te dvije sile je različit ovisno o biljnoj vrsti, ali i uvjetima sredine.

Objašnjenje kretanja vode dao je *Dikson* još 1901. u svojoj *kohezijskoj teoriji* koja je i danas aktualna. Voda se gubi iz biljke najvećim dijelom u *transpiracijskoj struji* preko lista u obliku vodene pare. Zbog toga u listu raste deficit vodnog potencijala (raste sila usisavanja) koji povlači vodu iz kapilarnih stanica ksilema. Naime, u trahejama ili traheidama voda se drži jakim *kohezijskim silama* (do 35 MPa) čija tenzija ne dopušta prekidanje vodenih niti i omogućuju penjanje vode na velike visine (npr. kod lijana, eukaliptusa i sekvoja više od 100 m). Sile kohezije potpomognute su *silama adhezije* (kapilarni efekt penjanja vode kao posljedica privlačenja molekula vode kapilarnim stijenkama stanica ksilema). Vodeni stupac potpomognut je s donje strane korijenovim tlakom (0,1-0,2 MPa) kao posljedicom aktivnog premještanja vode iz kore korijena u centralni cilindar korijena pa transpiracija funkcionira kao "dvomotorni" mehanizam (slika 5.18.). Mehaničkim oštećenjem ksilema ulazi zrak i puca neprekidnost vodenih niti što narušava ascendentni tok vode.

Transpiracija je proporcionalna deficitu zasićenosti atmosfere vodenom parom, temperaturi i površini s koje se voda gubi. Razlikuje se nekoliko oblika transpiracije: *kutikularna*, *lenticelarna*, *peridermalna*, *kroz plodove* i *kroz puči*. *Kutikularna (epidermalna) transpiracija* (kutikula je mrtva lipoidna membrana iznad epiderme) ovisi o debljini kutikule što je obrnuto proporcionalno starosti biljke. Otuda, kod mladih biljaka i do 50 % otpada na kutikularnu transpiraciju. *Lenticelarna transpiracija* odvija se kroz lenticеле (otvore na kori) i ljeti može iznositi do 30 % ukupne transpiracije kod drveća. Kroz koru drveća (*peridermalno*) može se također gubiti voda, kao i preko plodova, posebice krupnih.

Najznačajniji gubitak vode kod biljaka je *transpiracijom kroz puči*. To su otvori u epidermi lista okruženi s dvije posebne *stanice zapornice*. Otvorene puči su eliptičnog oblika, širine otvora 4-12 μm i duljine 10-40 μm . Broj im je promjenjiv u granicama 1.000-2.000 $\times \text{cm}^{-2}$ kod žitarica, a do 10.0000 $\times \text{cm}^{-2}$ kod hrasta. Smještene su na lišću, ali i peteljka, plodovima, epidermi stabljike, dijelovima cvijeta itd. Na lišću mogu biti s obje strane (*amfistomalni*), ili samo s jedne (gore *epistomalni*, dolje *hipostomalni* listovi). Kod velikog broja puči njihova se veličina smanjuje, pa omjer između površine puči i ukupne površine lista malo varira za različite biljne vrste istog klimatskog područja, što se utvrđuje *indeksom puči* (I_p):

$$I_p = \frac{\text{broj puči} \times \text{dm}^{-2}}{(\text{broj puči} \times \text{dm}^{-2}) + (\text{broj epidermalnih stanica} \times \text{dm}^{-2})}$$

Ukupna površina puči iznosi 1-3 % od površine lista, a kroz njih se izgubi 2/3 vode, odnosno gubitak vode kroz puči 30-ak puta je veći nego s drugih dijelova lista. Naime, gubitak vodene pare difuzijom kroz male otvore znatno je veći zbog rubnog efekta što je prikazano *Stefanovim izrazom* za isparavanje vode:

$$V = 4 \times r \times K \times \frac{P_1 - P_0}{P} \times S$$

(gdje je V = količina isparene vode, r = radijus površine isparavanja, K = koeficijent difuzije vodene pare, P_1 = napon pare u zasićenju kod trenutne temperature, P_0 = stvarni napon pare kod trenutne temperature, P = atmosferski tlak i S = površina s koje voda isparava).

Puči vrlo osjetljivo reagiraju na promjenu vanjskih uvjeta, posebice na svjetlost, koncentraciju CO_2 , koncentraciju klorofila u lišću, temperaturu, sadržaj vode u lišću, ishranjenost biljaka kalijem i dr. Svjetlost ima najjači utjecaj na ritam otvaranja i zatvaranja puči što je usko povezano s fotosintezom i prisustvom određenih produkata metabolizma u stanicama zapornicama.

Voda se, osim transpiracijom, gubi iz biljaka u obliku tekućine (*gutacija* i *plač biljaka*). *Gutacija* je gubljenje vode u vidu kapljica, a javlja se u uvjetima dobre snabdjevenosti biljaka vodom, visoke temperature tla i visoke relativne vlage zraka (kad transpiracija nije moguća). Višak vode iz biljke izlučuje se tada kroz

vodene puči ili *hidatode* (pasivne i aktivne, npr. kod koprive). S vodom se izdvajaju i u njoj otopljene tvari, posebno kod starijeg lišća. Npr. gutacijom se lako izdvajaju Na i Mn, a u manjoj količini Fe, Zn, P i Cl. Osim elemenata izdvajaju se i manje količine organskih kiselina, aminokiselina i šećera.

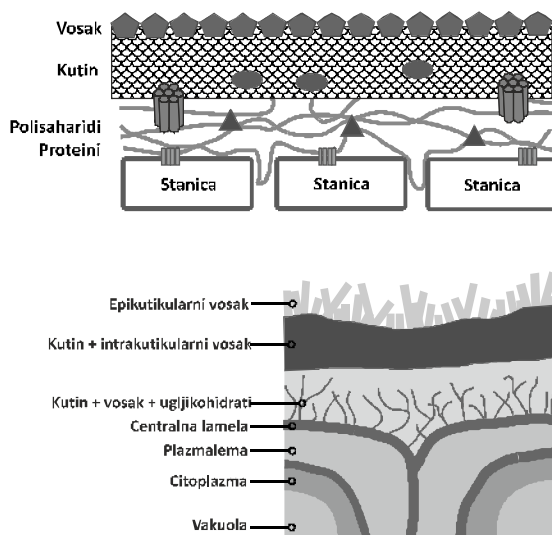
Plać biljaka ili suzenje (eksudacija) se zapaža kod povrede biljaka kao posljedica korijenskog tlaka koji potiskuje vodu ascendentno do prekida ksilema. Zbog toga se plać biljaka zapaža u proljeće, odnosno kad je tlo toplo i sadrži obilje vode, a transpiracija je znatno smanjena zbog nerazvijenog lišća. Količina *eksudata* dostiže kod vinove loze 1 dm³ po danu, kod breze 5 dm³, dok neke palme izluče 10-15 dm³ vode za jedan dan. Eksudat sadrži veću koncentraciju mineralnih tvari u odnosu na gutaciju.

5.5. USVAJANJE HRANIVA LISTOM

Premda je osnovna funkcija korijena usvajanje vode i hranjivih tvari, lišće ima važnu ulogu u ishrani bilja zbog procesa fotosinteze (koju obavljaju i drugi zeleni organi) i transpiracije. Također, preko lista se može uspješno usvajati voda, mineralne i organske tvari. Istraživanja pokazuju da nema veće razlike između usvajanja mineralnih elemenata listom i korijenom, a male razlike se pojavljuju zbog drugačije anatomske građe tih dvaju organa.

List je prekriven kutikulom, na njemu je velik broj puči, a stanice palisadnog i spužvastog parenhima sadrže klorofil i obavljaju fotosintezu. Površina puči je prosječno 2 % od površine lista i kroz tako male otvore (oko 30 x 7 μm) zbog površinskog napona tekućine teško ulaze, a uz to i vlaženje stanica zapornica smanjuje ulazni otvor puči. Zbog toga je vjerojatnije da se mineralne tvari preko lista usvajaju kroz kutikulu i epidermalne stanice, stanice zapornice puči i dlačice na listu.

Kutikula štiti od dehidracije, UV zračenja, štiti od prašine, mikroorganizama i drugih atmosferskih zagađivača. Kutikula često predstavlja prepreku znatnijem usvajanju preko lista (slika 5.19.), a njezinu propustljivost određuje kemijski sastav i struktura. Građena je iz matriksa koji čini *kutin* (polimer interesterificiranih hidroksimasnih kiselina C₁₆ i C₁₈) u koji je ugrađen *kutikularni vosak* (ugljikovodici dugog lanca C₂₂-C₃₆, alkoholi, masne kiseline i esteri), a na površini je sloj hidrofobnog *epikutikularnog voska* sličnog sastava. Za stanični zid kutikula se veže *pektinom* i u nju urastaju *celulozne fibrile* staničnog zida. Debljina kutikule je kod mezofita oko 1 μm, a kod nekih biljaka dostiže znatnu debljinu (do 13 μm) pa njezina propustljivost ovisi jako o hidrataciji koja izaziva bubrenje uz proširenje postojećih pora u njoj. Kutin je *semihidrofilan* jer sadrži lipofilne -CH₃ i -CH₂, ali i hidrofilne -CHO i -COOH skupine.



Slika 5.19. Shematski prikaz građe kutikule (Bakan, 2005.)

Stanična stijenka ne predstavlja veću prepreku prolaženju otopljenih tvari u vodi jer posjeduje velik broj hidrofilnih grupa (celuloze i kemiceluloze) i veliki broj mikropora (interfibrilarni prostori celuloznih lanaca) pa predstavlja prividno slobodan prostor analogno korijenu. Pri tome *ektodezme* smještene na vanjskom zidu epidermalnih stanica potpomažu usvajanje. One nisu plazmatične građe kao plazmodezme, već je to sustav pora u celuloznoj građi stanične stijenke. Hranjive tvari su praktično usvojene listom tek kad prođu kroz plazmalemu, što je fiziološki analogno korijenskim mehanizmima usvajanja hraniva.

Translokacija elemenata usvojenih preko lista bitno se razlikuje od usvajanja preko korijena i ovisi o njihovoj pokretljivosti u floemu (pretežito descendentni smjer kretanja - prema dolje). Poznavanje pokretljivosti elemenata usvojenih listom ima praktičan značaj zbog primjene folijarne ishrane. Smatra se da su elementi usvojeni listom, obzirom na mogućnost premještanja:

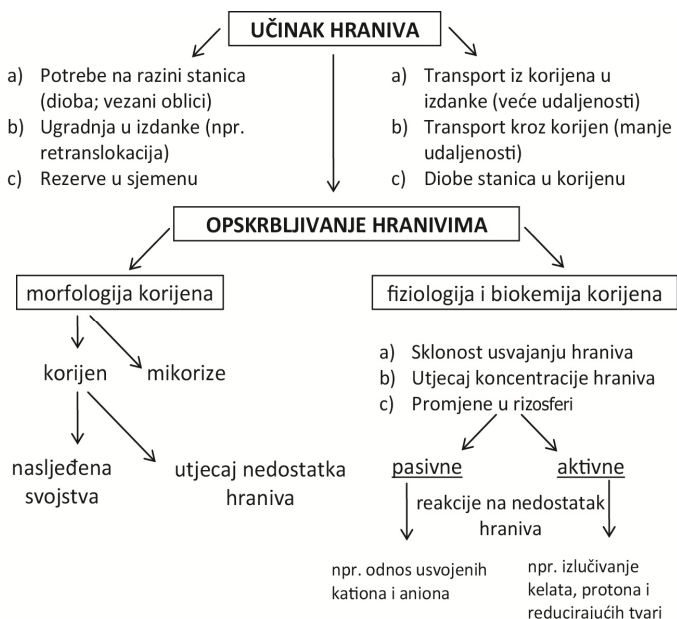
- pokretljivi: N, K, Na, Mg, P, S i Cl,
- osrednje pokretljivi: Fe, Mn, Zn, Cu i Mo i
- teško pokretljivi: Ca i B.

5.6. SADRŽAJ MINERALNIH TVARI U BILJKAMA

Biljka transformira usvojene hranjive tvari preko korijena (ili drugih organa) u vlastite građevne tvari, a samo se jedan, uglavnom manji dio, akumulira u usvojenom obliku.

Uobičajeno je da se količina biogenih elemenata u biljkama izražava na suhu tvar zbog vrlo promjenjivog sadržaja vode u njima. Koncentracija makroelemenata izražava se u postotku, a zbog niske koncentracije mikroelemenata ona se iskazuje u ppm na suhoj tvari ($\text{ppm} = \text{mg kg}^{-1} = \mu \text{g g}^{-1}$). U pojedinim situacijama, koncentracija hranjivih tvari može se iskazivati na svježu ili apsolutno suhu tvar biljke. Npr., kod primjene brzih testova za utvrđivanje potrebe u prihrani dušikom koncentracija nitrata se utvrđuje u svježoj tvari mladih biljaka pšenice, peteljka kod šećerne repe itd.

Suha tvar biljaka sadrži najviše organogenih (nemineralnih) elemenata i to u prosjeku 44-49 % ugljika, 42-46 % kisika i 5-7 % vodika. Dušik i sumpor zbog usvajanja u mineralnom obliku, najčešće se izuzimaju iz ove grupe elemenata (iako su konstituenti organske tvari, a njezinim spaljivanjem, jednako kao C, H i O ne zaostaju u pepelu). Ostatak su mineralni elementi ili elementi pepela jer zaostaju u njemu nakon spaljivanja organske tvari na 500 °C i to najviše u obliku soli, uglavnom karbonata, silikata, fosfata i drugih, ili u obliku oksida.



Slika 5.20. Mehanizmi genotipske specifičnosti (Marschner, 1995.)

Koncentracija mineralnih elemenata znatno se mijenja ovisno o biljnoj vrsti, dijelu koji se analizira, starosti, opskrbljenosti tla hranivima, vodom i drugim

vanjskim i unutarnjim čimbenicima rasta i razvitka. Također, prisutne su značajne razlike unutar biljaka jedne vrste što se označava pojmom sorte specifičnosti mineralne ishrane (slika 5.20.) i često se mora uvažavati kod utvrđivanja potrebe usjeva za pojedinim elementima ishrane.

Koncentracija elemenata u lišću, zbog njihove fotosintetične funkcije, dobar je pokazatelj ishranjenosti biljaka pri čemu se mora uvažiti sposobnost premještanja pojedinog elementa iz starijeg u mlađe, fiziološki aktivno lišće. Razlike uvjetovane biljnom vrstom na koncentraciju biogenih elemenata pokazuje tablica 5.6.

Biljke iz porodice trava sadrže relativno manje kalcija, magnezija i bora, a puno silicija. Leguminoze sadrže relativno više kalcija, magnezija i bora, a malo silicija, dok su krstašice bogate sumporom. Biljke kiselih staništa sadrže više željeza i aluminija, a biljke slanih staništa više natrija, magnezija, klora i sumpora.

Raspodjela elemenata unutar jedne biljne vrste također je promjenjiva, ovisno o dobu vegetacije i biljnog dijela. Lišće u pravilu sadrži više kalija, kalcija, magnezija i sumpora, a posebno je visok sadržaj dušika i fosfora. Mlađe lišće ima visok sadržaj većine elemenata, dok starije sadrži više slabo pokretljivih elemenata kao što su kalcij, bakar i bor. Sjeme ima visok sadržaj dušika, fosfora i magnezija, dok korijen ima relativno nizak sadržaj svih elemenata.

Tablica 5.6. Koncentracija hranjivih elemenata kod nekih biljaka u suhoj tvari (Driessen, 1986.)

Biljni dio	N	P	K	S	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹					
Pšenica (zrno)	20	4	5	0,2	0,5	1,5	100	40	30	5	5	0,2
Pšenica (slama)	5	1	10	0,7	3,0	1,0	50	40	30	5	5	0,2
Krumpir (gomolj)	15	2	20	1,0	0,5	1,0	40	10	15	5	7	0,3
Šećerna repa (list)	30	3	30	3,0	20	10	100	60	50	10	50	1,0
Šećerna repa (repa)	8	2	15	0,6	2,0	2,0	25	20	25	7	30	0,5

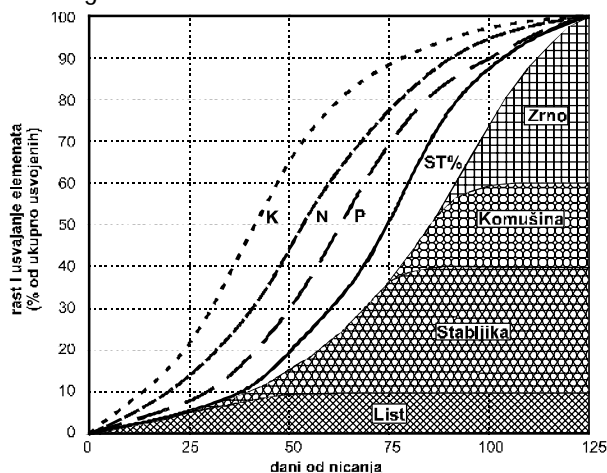
5.7. PROMJENA SADRŽAJA ELEMENATA U BILJKAMA

Usvajanje hranjivih elemenata tijekom vegetacije biljaka nije ujednačeno i pored toga što supstrat ishrane može sadržavati dovoljnu količinu pristupačnih hraniva (slika 5.21.). Kod jednogodišnjih biljaka usvajanje je uglavnom kontinuirano s izraženim *maksimumima usvajanja* u pojedinim *etapama ontogeneze*, dok kod višegodišnjih biljaka postoje prekidi zbog mirovanja u nepovoljnom dijelu godine. Biljke koje rastu pod povoljnim klimatskim prilikama cijele godine

(tropski pojas, staklenici) ipak pokazuju razdoblja smanjenog usvajanja hraniva i usporenog rasta.

Kod jednogodišnjih biljaka u fazi klijanja, usvajanje mineralnih tvari od malog je značaja jer sjeme sadrži potrebnu količinu pa se usvajaju samo voda i kisik. U ranim fazama porasta usvajanje hraniva iz supstrata je snažno te sadržaj mineralnih elemenata brzo raste, a koncentracija opada (slika 5.22.) zbog učinka "razrjeđenja" organskom tvari. U razdoblju najvećeg porasta usvajanje mineralnih elemenata je snažno, ali postoje izražene razlike ovisne o elementima i biljnim vrstama:

- **dušik**: intenzitet usvajanja je najveći u vegetacijskom razdoblju (fenofaze glavnog porasta) kada je najveća sinteza proteina.
- **fosfor**: usvajanje pokazuje dva maksimuma: prvi je slabije izražen u periodu izgradnje korijenovog sustava, i drugi jači, na prijelazu iz vegetacijske u reprodukciju (generativnu) fazu razvoja.
- **kalij**: usvaja se najintenzivnije pri tvorbi ugljikohidrata potrebnih za razvoj fotosintetskog aparata i u reprodukcijskoj fazi kod nagomilavanja rezervnih tvari u skladišnim organima.

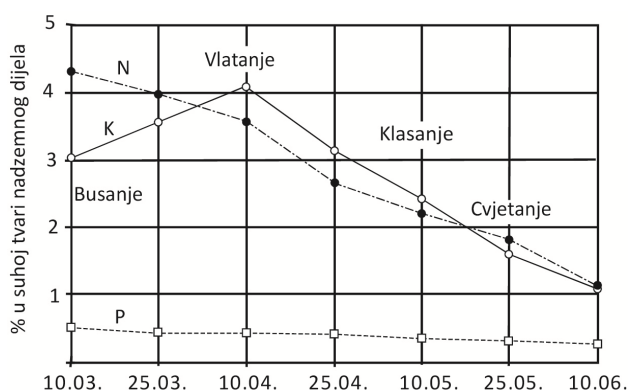


Slika 5.21. Porast sadržaja N, P i K te suhe tvari pojedinih organa kod kukuruza tijekom vegetacije

U posljednjim fenofazama razvitka dolazi do pada koncentracije pojedinih mineralnih elemenata, posebice u lišću, jer se elementi ishrane premještaju u skladišne organe. Jedan dio se izgubi odbacivanjem lišća, dio nekonstitucijskih elemenata se ispere kišom (K i Na), kao i dio ionskih oblika konstitucijskih elemenata, a jedan dio se putem korijena vrati u tlo.

5.8. OPSKRBLJENOST BILJAKA MINERALNIM TVARIMA

Opskrbljenost biljnih tkiva, posebice fiziološki najaktivnijih, ovisna je o usvojenoj količini hranjivih elemenata, ali i njihovoj pokretljivosti, odnosno sposobnosti premještanja unutar biljke. *Akropetalni smjer* premještanja hraniva (od korijena prema izdanku) uglavnom ne predstavlja poteškoću jer su svi elementi u tom smjeru dobro pokretljivi, ako je biljka snabdjevena s dovoljno vode. Nasuprot tome, u *bazipetalnom smjeru* (od vrha izdanka prema korijenu) većina elemenata je dobro do umjereno pokretljiva, ali ima i onih koji se teško premještaju (tablica 5.7). Folijarna ishrana biljaka takvim elementima je otežana ili nije moguća.



Slika 5.22. Promjena koncentracije N, P i K kod pšenice

Tablica 5.7. Pokretljivost mineralnih elemenata u floemu (Marschner, 1986.)

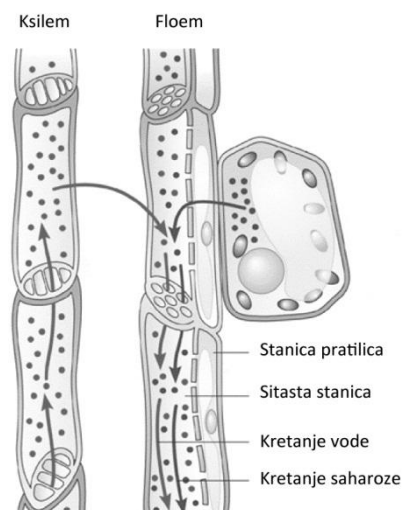
Pokretljivi	Srednje pokretljivi	Nepokretni
rubidij	mangan	kalcij
natrij	cink	stroncij
magnezij	bakar	barij
fosfor	molibden	bor
sumpor	željezo	
klor		

U nedostatku hranjivih elemenata u formiranju novih organa, posebno fotosintetskog aparata i reproduksijskih organa, biljke su sposobne premještati tvari iz starijih, manje aktivnih tkiva u mlađe i aktivnije. Budući da je većina elemenata konstituent organske tvari, prvo dolazi do hidrolitičkih procesa i oslobađanja elemenata (*remobilizacija*), njihove *translokacije* (floem-ksilem *retranslokacija*) i ugradnje u nove spojeve na mjestu potrebe. Takva pojava naziva se jednim imenom *reutilizacija elemenata*.

S obzirom na sposobnost reutilizacije, mineralni elementi se dijele u dvije grupe:

- Pokretljivi elementi: N, P, K, Mg, Cl, Mn
- Slabo pokretljivi elementi: Ca, S, Fe, Cu, Zn, B, Mo

Sposobnost translokacije elemenata često ovisi i o biljnim vrstama, a odvija se *ksilemom* i *floemom* (slika 5.23.). Tako je mangan pokretljiv u bazipetalnom smjeru kod zobi, repe, voćaka itd., ali kod leguminoza i krumpira ubraja se u nepokretljive elemente (tablica 5.7.).



Slika 5.23. Transport vode i tvari ksilemom i floemom

5.9. SIMPTOMI NEDOSTATKA I SUVIŠKA ELEMENATA ISHRANE

Poznavanja pokretljivosti elemenata u biljkama značajno je kod utvrđivanja deficijencije elemenata na temelju pojave simptoma nedostatka. Npr., kod vidljivih simptoma nedostatka pojedinog elementa u starijem lišću vjerojatno je došlo do njegovog premještanja u mlađe organe. Ako se simptom deficita primjećuje na mlađem lišću, tada je jasno da se radi o nedostatku nepokretljivog elementa.

Tipični simptomi nedostatka biogenih elemenata su *kloroze* koje se očituju kao svijetložuto, reverzibilno obojenje lišća i *nekroze* kada dolazi do izumiranja dijelova lišća. Shema (slika 5.24.) ilustrira principe vizualne dijagnostike deficita pojedinih hranjivih elemenata. Međutim, pored *primarnog simptoma nedostatka* nekog elementa, naknadno se mogu pojaviti i *sekundarni simptomi nedostatka* koji kompliciraju determinaciju uzroka pojave simptoma. Stoga je

vizualna dijagnostika često pogrešna i preostaje jedino kemijskom analizom utvrditi pravi uzrok pojave simptoma. Vrlo slična je problematika dijagnosticiranja uzroka pojave *višestrukih simptoma nedostatka ili suviška* elemenata ishrane, a kod oslabljenih biljaka često dolazi do napada bolesti što dalje komplicira vizualnu dijagnostiku "maskiranjem" primarnog uzroka pojave simptoma.

Opskrbljenost biljaka biogenim elementima može se stupnjevati prema posljedicama koje nastaju za biljku kod njihovog nedostatka ili suviška. Stupnjeve opskrbljenosti, u uobičajenoj skali od pet gradacija, prikazuje tablica 5.8. Kemijska analiza biljaka i tla, kod nas je, nažalost, još uvijek rijetka (zbog toga i relativno skupa) pa je u nedostatku takvih pokazatelja opskrbljenosti biljaka elementima ishrane dobro poznavati principe vizualne dijagnostike biogenih elemenata.

Tablica 5.8. Stupnjevi opskrbe biogenim elementima i odgovarajuće granične vrijednosti (Finck, 1969.)

A	B	C	D	E	porast konc. hraniva
akutni manjak	prikriveni manjak	dobra opskrba	luksuzna opskrba	otrovna količina	
	granično područje simptoma	granično područje prinosa		granično područje otrovnosti	

Biljni dio	Osnovni simptom	Uzrok
Starije lišće	<ul style="list-style-type: none"> → Kloroza <ul style="list-style-type: none"> → Ravnomjerna → Međuzilna ili mrlje → Nekroza <ul style="list-style-type: none"> → Vršna ili rubna → Međuzilna 	nedostatak
Mlađe lišće i vrhovi	<ul style="list-style-type: none"> → Kloroza <ul style="list-style-type: none"> → Ravnomjerna → Međuzilna ili mrlje → Nekroza (kloroza) → Deformacije 	
Starije lišće	<ul style="list-style-type: none"> → Nekroza <ul style="list-style-type: none"> → Pjegavost → Vršna ili rubna → Kloroza, nekroza 	suvišak
		N (S) Mg (Mn) K Mg (Mn) Fe (S) Zn (Mn) Ca, B, Cu Mo (Zn, B) Mn (B) B, soli Nespecifična toksičnost

Slika 5.24. Princip vizualne dijagnostike poremećaja u ishrani bilja (Marschner, 1986.)

Nedostatak nekog elementa u biljci razmjernan je njegovoj raspoloživosti u tlu (i/ili sposobnosti biljke da ga usvoji) i duljini vegetacije u kojoj ga biljka može usvajati. Nedovoljna opskrbljenost neophodnim elementima ishrane djeluje na rast i razvoj biljaka i konačno na visinu i kakvoću prinosa preko različitih fizioloških procesa (tablica 5.9.). Slaba ishranjenost može usporavati sintetske, a ubrzavati oksidacijske, ili potpuno blokirati životno važne biokemijsko-fiziološke procese. Biljke posjeduju mehanizme kojima pokušavaju ublažiti nedostatak nekog od esencijalnih elemenata. Npr., pojedini elementi usvajaju se ubrzano u ranim etapama razvoja i ta količina dovoljna je za čitav reprodukcijski ciklus, a kada su iz grupe mobilnih elemenata, potrebe za razvoj i funkcioniranje novih, mlađih organa podmiruju se premještanjem, odnosno reutilizacijom. Ipak, pojavu reutilizacije treba shvatiti kao nužno zlo za biljku, a nikako poželjan proces. Stoga je usvajanje hranjivih tvari prisutno tijekom čitavog vegetacijskog razdoblja biljaka, naravno u različitim količinama, ovisno o potrebi biljaka i njihovoj raspoloživosti.

Tablica 5.9. Uloga mineralnih elemenata u fotosintezi (*Marschner, 1986.*)

Proces	Konstituent organske tvari	Aktivator enzima i osmoregulacija
Tvorba kloroplasta		
Sinteza proteina	N, S	Mg, Zn, Fe, K, (Mn)
Sinteza klorofila	N, Mg	Fe
Prijenos elektrona		
PS II+I - fosforilacija	Mg, Fe, Cu, S, P	Mg, Mn, (K)
Fiksacija CO ₂	-	Mg, (K, Zn)
Mehanizam rada puči		
	-	K, (Cl)
Sinteza škroba i prijenos šećera		
	P	Mg, P, (K)

- **Akutni manjak (A):** jasni su simptomi nedostatka biogenog elementa, slab je rast biljaka, a primjenom elementa u nedostatku prinos znatno raste.
- **Prikriveni (latetni) manjak (B):** vizualnom dijagnostikom ne može se utvrditi nedostatak biogenog elementa, rast je prividno dobar, ali se gnojidbom postiže povećanje prinosa uz bolju kakvoću.
- **Dobra opskrba (C):** nema simptoma nedostatka hraniva i primjenom gnojidbe uglavnom nema porasta prinosa, ali se postiže bolja kakvoća.
- **Luksuzna opskrba (D):** simptomi suviška nisu vidljivi, kakvoća prinosa je niža, a primjenom gnojidbe prinos više ne raste ili često opada.
- **Otrovnost (E):** simptomi suviška elementa jasno su vidljivi, loš je rast, jako je smanjen prinos i slabe je kakvoće.

5.9.1. Opći simptomi nedostatka

Opći simptomi nedostatka neophodnih elemenata biljne ishrane (isključujući C, O i H) su sljedeći:

- Dušik (N): Reducirani rast vrha biljke i korijena; rast uspravan i vretenast; listovi blijedo-žuto-zeleni u ranijim stadijima, a kasnije postaju žući i čak narančasti ili crveni; nedostatak vidljiv prvo na donjim listovima, a kloroza se širi od vrha prema bazi lista.
- Fosfor (P): Reducirani rast vrha biljke i korijena; rast uspravan i vretenast; listovi plavo-zeleni u ranijim stadijima, a ponekad tamnije zelene boje nego listovi koji imaju dovoljno fosfora; u kasnijim stadijima listovi postaju grimizni, a ponekad rubovi posmeđe; prerano dolazi do opadanja listova počevši od starijih.
- Kalij (K): Vršak lista posmeđi; pojavljuju se rubne ožegotine lista; kod nekih biljnih vrsta razvijaju se smeđe ili svijetle pjege na listu koje su obično brojnije uz rubove lista; nedostatak je vidljiv prvo na donjim listovima.
- Kalcij (Ca): Simptomi se uglavnom pojavljuju na mlađim listovima uz vegetacijski vrh rasta; mlađi listovi su izobličeni s vrhom svinutim unazad i rubovima smotanima prema naličju ili licu lista; rubovi lista mogu biti nepravilni sa smeđim ožegotinama ili pjegama.
- Magnezij (Mg): U mlađim stadijima razvoja na listu se pojavljuje međuzilna kloroza s klorotičnim područjima koja su međusobno razdvojena zelenim staničjem što čini efekt kugličaste prugavosti; simptomi su prvo vidljivi na donjim listovima.
- Sumpor (S): Mlađi listovi su blijedo-žuto-zelene boje, slično nedostatku dušika; rast izdanka je nešto reduciran.
- Cink (Zn): Međuzilna kloroza praćena venjenjem klorotičnog područja; patuljasti rast i skraćenje internodija.
- Mangan (Mn): Svijetlozeleni do žuti listovi s izrazito zelenim žilama; u nekim slučajevima javljaju se smeđe pjege na listovima koje zatim nestaju; obično su simptomi vidljivi prvo na mlađim listovima.
- Bor (B): Snažan utjecaj na točke rasta; stabljike i listovi mogu biti znatno izobličeni; smanjena oplodnja; gornji listovi su često žućkasto-crvenkasti i mogu biti oprženi ili skovršani.
- Bakar (Cu): Mlađi listovi poprimaju blijedozelenu boju sa slabom rubnom klorozom.
- Željezo (Fe): Međuzilna kloroza mlađih listova.

Molibden (Mo): Listovi postaju klorotični sa smotanim ili kupasto izbočenim rubovima; nedostatak molibdena često u biljkama rezultira i nedostatkom dušika.

Klor (Cl): Nedostatak u uvjetima poljskog uzgoja nije uočen.

Napomena: Simptomi nedostatka mogu se kod pojedinih biljnih vrsta znatno razlikovati od navedenih. Stoga su navedeni simptomi opći i ukazuju na osnovne, odnosno najčešće simptome nedostatka.

Za primjer vizualnih simptoma deficita izabrano je nekoliko fotografija (slike 5.25., 5.26., 5.27. i 5.28.) koje su uz pismeno dopuštenje gosp. Randal F. Groff, The Mosaic Company, Plymouth, USA, preuzete s web stranice <http://www.back-to-basics.net>.

5.9.2. Ključ za determinaciju nedostatka hraniva prema simptomima

A. Simptomi na starijem lišću	
Simptomi uglavnom rasprostranjeni po cijeloj biljci, donji listovi se suše i odumiru:	
<ul style="list-style-type: none"> • biljke svijetlozelene, donji listovi žuti, suše se do smeđe boje, stabljike postaju kraće i tanke 	dušik (N)
<ul style="list-style-type: none"> • biljke tamnozelene, često vidljiva crvena ili ljubičasta boja, donji listovi žuti, suše se do tamnozelene boje, stabljike postaju kraće ili tanje 	fosfor (P)
Simptomi uglavnom lokalizirani, donji listovi se ne suše, ali su šareni ili klorotični, rubovi lista ispučeno kupasti ili naborano zavrnuti:	
<ul style="list-style-type: none"> • listovi prošarani promjenom boje ili klorotični, ponekad pocrvene, nekrotične pjege, stabljike tanke 	magnezij (Mg)
<ul style="list-style-type: none"> • listovi prošarani promjenom boje ili klorotični, male nekrotične pjege između lisnih žila ili blizu vrška i rubova lista, stabljike tanke 	kalij (K)
<ul style="list-style-type: none"> • veće nekrotične pjege ravnomjerno rasprostranjene po listu, ponekad zahvaćaju i žile, listovi tanki, stabljike kratke 	cink (Zn)
B. Simptomi na mlađem lišću	
Vršni pupovi odumiru, izobličenost i nekroza mlađih listova:	
<ul style="list-style-type: none"> • mlađi listovi svinuti, a zatim venu od vrha i rubova prema bazi 	kalcij (Ca)
<ul style="list-style-type: none"> • mlađi listovi svijetlozeleni u svom donjem dijelu (osnovica), venu počevši od osnovice, listovi usukano svinuti 	bor (B)
Vršni pupovi ne odumiru, ali su klorotični ili klonuti, bez nekrotičnih pjega:	
<ul style="list-style-type: none"> • mlađi listovi klonuti i mlohavi, bez kloroze, vršak stabljike slab 	bakar (Cu)
Mlađi listovi klorotični, nisu klonuti:	
<ul style="list-style-type: none"> • male nekrotične pjege, žile ostaju zelene 	mangan (Mn)
Lišće bez nekrotičnih pjega:	
<ul style="list-style-type: none"> • žile zelene 	željezo (Fe)
<ul style="list-style-type: none"> • žile klorotične 	sumpor (S)



Manjak N (kukuruz)



Manjak N (pšenica)



Manjak P (kukuruz)



Manjak P (pšenica)

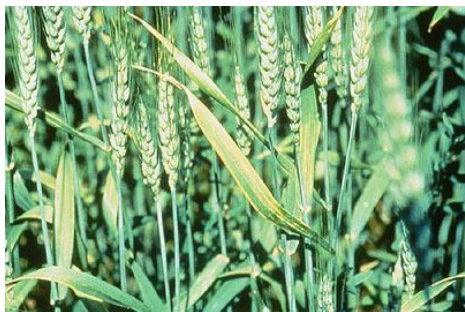


Manjak P (soja)



Manjak K (kukuruz)

Slika 5.25. Vizualni simptomi manjka elemenata ishrane (uz pismeno dopuštenje *Randy Groff, The Mosaic Company, Plymouth*)



Manjak K (pšenica)



Manjak K (šećerna repa)



Manjak K (soja)



Manjak K (lucerna)



Manjak K (krumpir)



Manjak Ca (lucerna)

Slika 5.26. Vizualni simptomi manjka elemenata ishrane (uz pismeno dopuštenje *Randy Groff, The Mosaic Company, Plymouth*)



Manjak Mg (soja)



Manjak Fe (kukuruz)



Manjak Fe (soja)



Manjak Fe (rajčica)



Manjak Mn (pšenica)



Manjak Mn (soja)

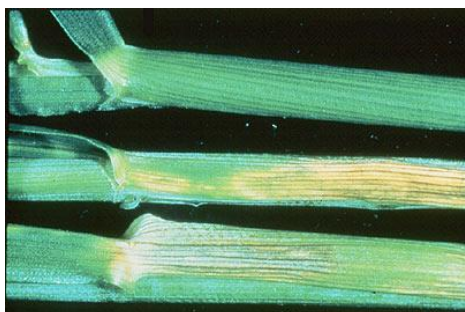
Slika 5.27. Vizualni simptomi manjka elemenata (uz pismeno dopuštenje *Randy Groff, The Mosaic Company, Plymouth*)



Manjak Zn (kukuruz)



Manjak Zn (kukuruz)



Manjak Zn (pšenica)



Manjak Zn (soja)



Manjak Ca (rajčica)



Manjak Mo (cvjetača)

Slika 5.28. Vizualni simptomi manjka elemenata ishrane (uz pismeno dopuštenje *Randy Groff, The Mosaic Company, Plymouth*)

5.9.3. Antagonizam i sinergizam elemenata ishrane

Međusobni odnos pristupačnih količina pojedinih elemenata u tlu snažno utječe na njihovu raspoloživost preko promjene kemijskog potencijala svakog od njih, a zatim različita snabdjevenost biljaka pojedinim elementima utječe na učinkovitost usvajanja korijenom po principu povratne sprege. Stoga se međuodnos elemenata ishrane u tlu odražava na mogućnost njihovog usvajanja, sadržaj tih elemenata u biljkama, a konačno i na prinos. Primjerice, niska koncentracija K^+ u tlu utječe na pojačano usvajanje dušika, dok smanjena raspoloživost dušika stimulira usvajanje fosfora. Zbog toga je omjer pristupačnih mineralnih elemenata u tlu vrlo značajan za njihovo usvajanje i razumijevanje tvorbe prinosa te njegove kakvoće. Pojava se naziva *antagonizam iona* i djelomično se može objasniti *kompeticijom iona* pri usvajanju. Naime, pojedini ioni (sličnih kemijskih svojstava, naboja, promjera itd.) konkuriraju na isti mehanizam usvajanja ili su potrebni kod prijenosa u parovima (*simport*, *antiport* ili *counterport*).

Sljedeći primjer pojednostavljeno objašnjava pojavu antagonizma iona: biljke uzgajane u otopini $CaCl_2$ ili $NaCl$ ne razvijaju se uspješno, ali kad se te dvije otopine pomiješaju, rast biljaka se normalizira. Dakle, u smjesi te dvije soli izgubila se otrovnost jedne od njih ili čak obje, odnosno ioni u tim otopinama ponašaju se antagonistički. U ishrani bilja postoji niz primjera antagonizma (tablica 5.10.) pri čemu, ovisno o vrsti, biljke različitim intenzitetom reaguju na tu pojavu.

Tablica 5.10. Neki antagonistički parovi elemenata ishrane bilja od praktičnog značaja (Bergman, 1983.)

$NH_4 - K$	$K - B$	$Mn - Mo$	$Zn - Fe$
$NH_4 - Ca$	$P - Fe$	$Mn - Zn$	$Ni - Fe$
$NH_4 - Mg$	$P - Zn$	$Cu - Mn$	$Cr - Fe$
$K - Mg$	$P - Al$	$Cu - Fe$	$Co - Fe$
$K - Ca$	$Mn - Mg$	$Cu - Mo$	$SO_4 - Mo$
$K - Na$	$Mn - Fe$	$Cu - Zn$	

Otrovnost ili toksičnost elemenata i otklanjanje otrovnosti drugim elementom nije jedini kriterij za utvrđivanje antagonizma iona. Pojava *antagonizma* očituje se i kada jedan ion onemogućuje ili najčešće smanjuje usvajanje nekog drugog. U suprotnom slučaju, kada dolazi do boljeg usvajanja nekog elementa u prisutnosti drugog, govori se o *sinergizmu iona*. Dobar primjer sinergizma je bolje usvajanje kationa i aniona kod dobre opskrbljenosti tla kalcijem koji otklanja negativne efekte niskog pH, ali i stabilizira strukturu biomembrana te povećava transmembranski elektropotencijal. Pojava antagonizma i sinergizma iona dovodi se, prema tome, u svezu s njihovim utjecajem na promjenu fizičko-

kemijskih svojstava koloida protoplazme. Naime, ioni sorbirani na proteine mijenjaju njihova koloidna i druga svojstva te utječu na putove metabolizma.

Pored klasičnog antagonizma i sinergizma mineralnih elemenata ishrane, značajni su i složeni odnosi elemenata. Primjerice, za pojavu "gorkih jamica" kod skladištenja jabuka ili truleži donjeg dijela ploda rajčice značajan je odnos $K + Mg/Ca$, a kod salate u stakleničkoj proizvodnji značajan je odnos $K \times N/Ca$ itd.

6. MAKROELEMENTI

6.1. DUŠIK

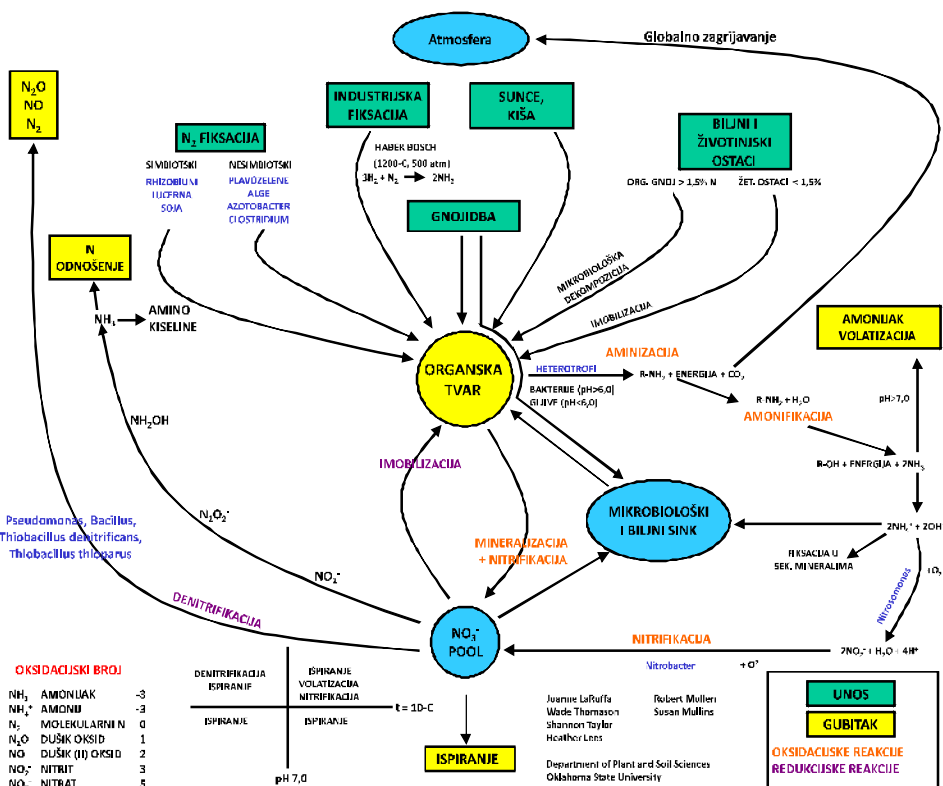
Dušik ima poseban položaj u grupi neophodnih elemenata. Podrijetlom je iz atmosfere, ali se usvaja u mineralnom obliku i svrstava u grupu mineralnih elemenata. Sastavni je dio proteina, nukleinskih kiselina, fotosintetskih pigmenta, amina, amida i drugih spojeva koji čine osnovu života pa se kemija ovog elementa opravdano smatra najvažnijim dijelom agrokemije, odnosno ishrane bilja. Značaj dušika je to veći što ga samo mali broj organizama može koristiti iz atmosfere (gdje ga ima 78,1 % volumno ili 75,51 % po masi, odnosno ukupno $3,8 \times 10^{15}$ t, ili $86,5 \text{ t ha}^{-1}$) u plinovitom obliku (N_2). Za prevođenje molekularnog oblika dušika do amonijaka ili nitrata, u kojem ga obliku biljke usvajaju, potrebna je ogromna količina energije (946 kJ). S druge strane, dušik se lako vraća u molekularno stanje u kojem je i najstabilniji pa se lako gubi iz tla gdje se njegova količina procjenjuje na ukupno 4×10^{14} tona.

6.1.1. Dušik u tlu

Dušik tla je u obliku organskih i anorganskih spojeva. Organski dio predstavljen je humusom i nepotpuno razloženim biljnim i životinjskim ostacima. Mineralni dio, koji je potpuno raspoloživ za usvajanje, samo je mali dio ukupnog dušika tla, uglavnom u količini koja je nedovoljna za dobru ishranu poljoprivrednih biljnih vrsta. U poljoprivrednim tlima ukupna količina dušika je najčešće 0,1-0,3 %, od čega je za ishranu bilja pristupačno tijekom jedne vegetacijske sezone svega 1 do 3 %. Zbog toga je u suvremenoj poljoprivrednoj proizvodnji primjena dušika gnojidbom nezamjenjiva agrotehnička mjera jer su pristupačne količine dušika u tlu uglavnom nedovoljne za postizanje visokih prinosa.

Ukupna količina dušika u tlu ovisi o nizu čimbenika kao što su klima, vegetacija, topografija terena, matični supstrat, starost tla itd. Npr. u području s hladnijom klimom (vertikalna ili prostorna zonacija) tla sadrže više humusa, a time i dušika. Nerazorana, prirodna tla pod livadama imaju više dušika od istog tla nakon uključivanja u poljoprivrednu proizvodnju.

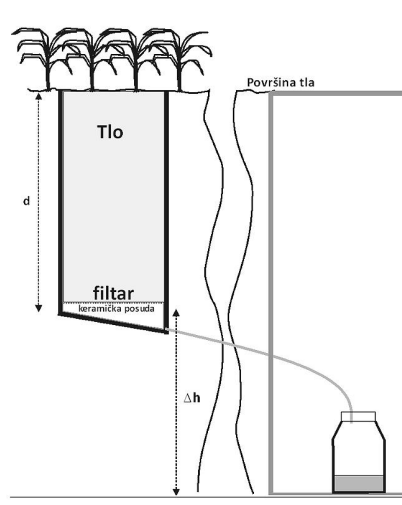
U prirodi postoji kružni tok dušika gdje je atmosfera izvor, a transformacije u dušik tla obavljaju mikroorganizmi u procesu fiksacije dušika (slika 6.1.). Dušik dopijeva u tlo i gnojidbom ili nastajanjem nitrata prilikom električnih pražnjenja u atmosferi. Kružni tok dušika je univerzalan uz jasne specifičnosti svakog ekosustava.



Slika 6.1. Ciklus dušika (Oklahoma State University, 2011.)

Utvrđivanje bilance dušika u tlu složen je problem pa se vrlo rijetko mogu utvrditi svi uzroci uobičajeno negativne bilance. Sljedeći primjer pokazuje prosječni dotok dušika u tlo i njegove gubitke različitim načinima (tablica 6.1.).

Značaj navedenih izvora dotoka i gubitaka dušika vrlo je promjenjiv, pa tako gubitci koji nastaju erozijom mogu biti vrlo veliki na nagnutim brdskim i planinskim tlima, dok su u ravnicama beznačajni. Zatim, ispiranje je veće iz lakih, plitkih i pjeskovitih, a zanemarivo iz teških i glinastih tala, itd. Ispiranje hraniva iz tla pouzdano se utvrđuje samo lizimetrima (slika 6.2.).



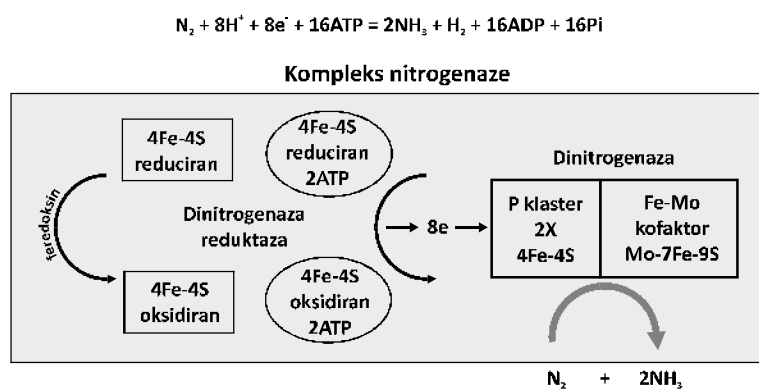
Slika 6.2. Presjek lizimetarske postaje

6.1.2. Podrijetlo dušika u tlu

U matičnom supstratu, iz kojeg je tlo nastalo, nema dušika pa se on u procesu pedogeneze nakuplja isključivo pod utjecajem živih organizama. Stoga je najveći dio dušika u tlu rezultat aktivnosti mikroorganizama, isključivo protokariota, posebice onih mikroorganizama koji mogu vezati molekularni dušik iz atmosfere i graditi vlastitu organsku tvar, a zatim drugih nižih i na kraju viših organizama čiji ostaci dospijevaju u tlo i čine organsku rezervu dušika. Procjene svjetske godišnje mikrobiološke fiksacije dušika kreću se oko 175×10^6 t, što je višestruko više od godišnje svjetske proizvodnje dušičnih mineralnih gnojiva (30×10^6 t god^{-1}). Mehanizam mikrobiološkog vezivanja dušika funkcionira uz pomoć enzima nitrogenaze, a vjerojatan tok toga procesa prikazan je shemom na slici 6.3.

Proračun pokazuje kako prosječan godišnji gubitak za područje Europe iznosi $70,5 \text{ kg N ha}^{-1}$, dok se prema navedenoj bilanci ne može utvrditi izvor gubitaka od $50,1 \text{ kg N ha}^{-1}$.

Količina dušika koji je rezultat električnih pražnjenja u atmosferi, pa i onog koji je unesen mineralnom ili organskom gnojibom, razmjerno je mali dio ukupnog dušika nekog tla.



Slika 6.3. Shema fiksacije atmosferskog dušika nitrogenazom

Enzim nitrogenaza je kompleks dvaju proteina od kojih je prvi molekularne mase oko 220.000-245.000 kDa i sadrži željezo, molibden i sumpor ($2 \text{ MoFe}_8\text{S}_6$), a drugi mase 50.000-70.000 kDa s jednim atomom željeza. Redoks potencijal je -250 do -295 mV pri čemu reducirani kompleks Fe-proteina veže 4 Mg-ATP po jednom elektronu. Izvor elektrona je *Krebsov ciklus* pa se, uz promjenu konformacije proteina, elektronskog *spin-rezonans signala* (ERS-signal) i redoks potencijala te uz hidrolizu ATP, elektron prenosi na kompleks FeMo-protein. Kod bakterija iz roda *Rhizobium* kobalt i bakar su kofaktori procesa N-fiksacije. U nedostatku kobalta ne dolazi do sinteze *leghemoglobina* (bakterijski pigment)

koji regulira ulazak O₂ i štiti Fe-protein od oksidacije. Nastali amonijak veže se u procesu *redukcijske aminacije* na *keto kiseline*, najprije na *α-ketoglutaru* i *oksaloctenu* uz tvorbu aminokiselina. *Nitrogenaza* je reduktaza širokog spektra i može reducirati više različitih spojeva kao što su N₂, H₂, C₂H₂ itd. Energetske potrebe za proces mikrobiološke fiksacije dušika iskazane preko utroška ugljikohidrata u disanju su:

$$= 1 \text{ mol glukoze} / 1 \text{ mol N}_2$$

$$= 2,57 \text{ g C g}^{-1} \text{ N} \rightarrow 35-40 \text{ ATP g}^{-1} \text{ N}_2.$$

Tablica 6.1. Primjer bilance dušika u tlu (europski prosjek)

n	Dotok N u tlo	kg N ha ⁻¹ god ⁻¹
1.	Mineralna gnojidba	60,0
2.	Organska gnojidba	40,0
3.	Simbiozna fiksacija	10,0
4.	Nesimbiozna fiksacija	6,8
5.	Kiša i navodnjavanje	5,3
6.	Unos sjemenom (sjetva)	1,3
	Ukupno dobitak:	123,4
n	Gubitak N iz tla	kg N ha ⁻¹ god ⁻¹
1.	Odošenje žetvom	120,0
2.	Erozija	27,4
3.	Ispiranje	26,1
4.	Denitrifikacija, volatilizacija	?
	Ukupni gubitak:	173,5

Suvremena znanost nastoji sposobnost mikroorganizama za fiksaciju atmosferskog dušika prenijeti na više biljke. Tehnikama genetskog inženjeringa moguće je već danas prenijeti *nif operon* (nitrogen fixation operon) s jednog na drugi mikroorganizam (npr. *Klebsiela pneumoniae* → *Escherichia coli*, *Klebsiella aerogenes*, *Salmonella typhimurium* itd.), ili na mikorizne gljive (npr. *Azotobacter* → *Rhizopogon*). *Inokulacijom mikoriznih gljiva* na korijen viših biljaka ostvaruje se prijenos mikrobiološki vezanog dušika i na biljke koje ne pripadaju porodici leguminoza te se time može značajno smanjiti potreba za gnojidbom većeg broja biljnih vrsta.

6.1.3. Nesimbiozna fiksacija dušika

Neke vrste bakterija, plavozelenih algi (rodovi *Chroococcales*, *Chamaestiphonales* i *Hormonogales*) i možda gljivica, mogu uz pomoć energije oslobođene oksidacijom organske tvari tla vezati atmosferski N₂ i koristiti ga za svoje potrebe (*nesimbiotski diazotrofi*). Od aerobnih, slobodno živućih fiksatora dušika

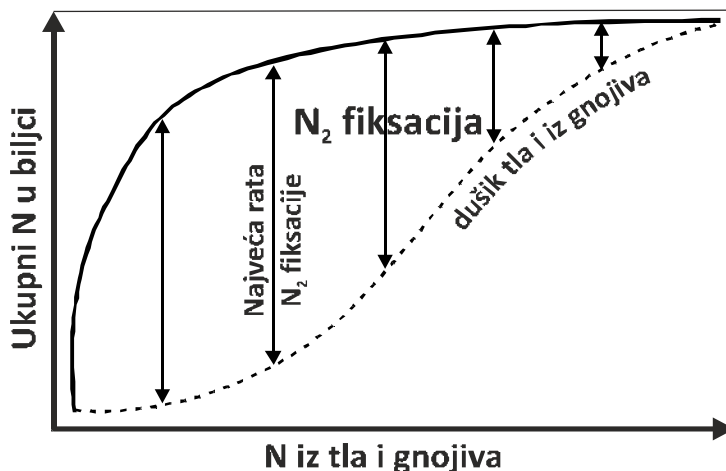
poznati su *Azotobacter*, *Azospirillum* i *Beijerinckia* s više vrsta, a od anaerobnih *Clostridium pasteurianum* te fakultativno anaerobnih *Klebsiella*. Količine dušika vezane nesimbiotskim putem su promjenjive iz više razloga, npr., *Azotobacter* ne veže N₂ ispod pH 5, a aktivnost mu ovisi o prisutnosti Mo, K, Fe i Mn u tlu uz povoljno djelovanje dobre raspoloživosti fosfora. Također, povoljni uvjeti podrazumijevaju dovoljnu količinu organske tvari s određenim omjerom C:N. Istraživanja u *Rothamsted-u* (UK) pokazuju da je tako vezana masa dušika dušika 13-38 kg ha⁻¹ god⁻¹ što prosječno iznosi 10-20 % potrebe dušika za većinu usjeva. Plavozelene alge, kao fiksatori atmosferskog dušika, imaju značaj samo u vlažnim i toplim uvjetima, kao što su rižina polja, gdje mogu vezati između 42 i 150 kg N ha⁻¹ godišnje.

6.1.4. Simbiotska fiksacija dušika

Na korijenju leguminoznih biljaka česte su *nodule* koje čine nakupine kvržičnih bakterija. Te protobakterije iz reda *Rhizobiales* (porodice *Bradyrhizobiaceae* i *Rhizobiaceae*) žive u *simbiotskoj* (asocijativnoj) zajednici i snabdijevaju biljke reduciranim dušikom, a preuzimaju od nje potrebne tvari za svoj život. Porodicu *Rhizobiaceae* čine dva roda: *Rhizobium* i *Sinorhizobium* koji obuhvaćaju više vrsta specifičnih za pojedine leguminozne biljke. Pojedini rodovi navedenig porodica tvore *nodule* (kvržice) osjetljive na vanjske uvjete, posebice nedostatak vlage. Uništavaju ih i virusi iz grupe *bakteriofaga* pa se moraju unositi u tlo kod svake sjetve, najefikasnije *inokuliranim* sjemenom. Ako u tlu postoji dovoljna količina raspoloživog dušika, tako da su zadovoljene potrebe biljke domaćina i bakterija, rast kvržica se smanjuje uz opadanje njihovog broja (tablica 6.2. i slika 6.4.). Pojedini sojevi razlikuju se intenzitetom simbiotske fiksacije atmosferskog dušika (tablica 6.3.).

Tablica 6.2. Utjecaj N gnojidbe na aktivnost nitrogenaze te rast korijena i izdanaka soje (*Marschner*, 1986.)

NO ₃ -N gnojidba kg ha ⁻¹	Aktiv. nitrogenaze μmol C ₂ H ₄ h ⁻¹ biljka ⁻¹		% N u izdanku 49 dana	ST g biljka ⁻¹ 49 dana	
	35 dana	49 dana		Biljka	Nodule
0	1,13	0,19	1,54	2,53	0,18
25	2,26	0,33	1,82	3,35	0,28
50	0,60	0,10	1,67	3,65	0,13
100	0,14	0,03	1,69	4,35	0,11



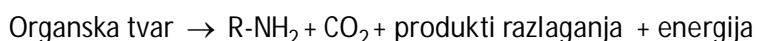
Slika 6.4. Odnos između intenziteta fiksacije i visine N-gnojidbe kod leguminoza (Marschner, 1995.)

Tablica 6.3. Simbiotska fiksacija N_2 sojevima *Rhizobiuma* ($kg\ N\ ha^{-1}\ god^{-1}$)

Leguminoza	$N\ kg\ ha^{-1}\ god^{-1}$
Lucerna	120-170 (70-200)
Bijela djetelina	50-200
Crvena djetelina	140-200
Grahorica	80-180
Soja	60-100 (20-275)
Grah	180-200
Stočni grašak	60-90
Poljski grašak	155-175

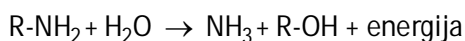
6.1.5. Mineralizacija dušika u tlu

Organski ostaci biljaka i životinja u tlu podliježu procesu mineralizacije čiji intenzitet poglavito ovisi o mikrobiološkoj aktivnosti ili *biogenosti tla*. Različite organske tvari ne razlažu se istim intenzitetom, što ovisi o njihovim kemijskim svojstvima, uvjeta koji vladaju u tlu i prisutnosti potrebne grupe mikroorganizama. Razlaganje proteina je relativno usporeno jer lako grade stabilne komplekse s mineralnom frakcijom tla. Proces njihove *dekompozicije* ovisi o prisutnosti i aktivnosti enzima *peptidaza* koje ih prvo razlažu do peptida, a zatim do aminokiselina. Stoga se taj dio procesa naziva aminizacija i može se sažeto prikazati sljedećom formulom:



Razlaganje proteina je brže u dobro prozračenim tlima uz dovoljno vlage i prisutnost kalcija. Oslobođene aminokiseline, u nedostatku raspoloživog mineralnog dušika tla, usvajaju mikroorganizmi ili se proces mineralizacije nastavlja.

Sljedeća faza u mineralizaciji dušika je amonifikacija. Taj dio procesa mineralizacije obuhvaća izdvajanje amonijaka iz oslobođenih aminokiselina tijekom dezaminizacije pod utjecajem enzima dezaminaza:



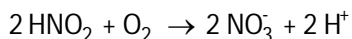
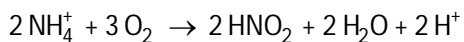
Amonifikacija je proces koji je jako ovisan o C/N omjeru organske tvari koja se mineralizira. Najpovoljniji C/N omjer je 20-25 : 1, odnosno organska tvar treba sadržavati 1,5-2,0 % dušika da bi u amonifikaciji došlo do oslobađanja amonijaka. U suprotnom slučaju, dolazi do *biološke imobilizacije dušika*, odnosno mikroorganizmi izdvajaju samo CO₂, a oslobođeni amonijak koriste za vlastite potrebe jer organska tvar sadrži puno energije, ali malo dušika. Smatra se da kod omjera C/N od 20-32 : 1 postoji ravnoteža između mobilizacije i imobilizacije, kod šireg omjera od 32 : 1 prisutna je *biološka imobilizacija*, a užeg od 20 : 1 *mobilizacija dušika*.

Prisutnost *lignina* u organskoj tvari malo utječe na brzinu amonifikacije, dok veće količine poli- i oligosaharida (celuloze i šećera) znatno usporavaju amonifikaciju. To ima praktičnu važnost kod zaoravanja žetvenih ostataka jer velika količina slame može znatno usporiti mineralizaciju dušika, ali i spriječiti prerano nastajanje nitratnog oblika dušika te njegovo ispiranje prije početka vegetacije. Kritična vrijednost, pri kojoj mineralizacija kompenzira imobilizaciju dušika za stajsko gnojivo je 2,0 %, a za gnojovku 3-4 % N (što su najčešće znatno više vrijednosti od uobičajene koncentracije dušika u organskim gnojivima), pa unošenje većih količina stajnjaka redovito izaziva prolazni *dušični manjak* (dušičnu depresiju).

Amonifikacija je proces osjetljiv i na nedostatak vlage u tlu, a oslobođeni amonijak, ovisno o potrebama mikroorganizama u dušiku, može biti biološki imobiliziran, odnosno ugrađen u proteine mikroorganizama, usvojen od viših biljaka, adsorbiran ili fiksiran na adsorpcijski kompleks tla ili pak podvrgnut daljnjoj mineralizaciji. U svim navedenim slučajevima ne dolazi do gubitka amonijaka (izuzetno gubitaka može biti *volatizacijom* u lužnatoj sredini). Naime, amonijski ion veže se na koloidnu frakciju tla, a kad je biološki imobiliziran ipak ostaje u klasi lako mobilnih rezervi dušika budući da je duljina života mikroorganizama koji ga asimiliraju relativno mala. Nakon razgradnje svježe unesene organske tvari u tlo, mikrobiološka aktivnost pada, mikroorganizmi u većem broju ugibaju i dušik tada predstavlja vrlo povoljan oblik za ishranu bilja.

Nitrifikacija je sljedeća faza u mineralizaciji dušika. Oksidaciju amonijaka do nitrata obavljaju *nitrifikatori* tla. To su nefotosintetski mikroorganizmi koji u

procesu *kemosinteze* obavljaju sintezu ugljikohidrata iz vode i ugljik(IV)-oksida za svoje potrebe, na račun energije dobivene cijepanjem ugljikovih lanaca organske tvari tla. Proces se može sažeto predstaviti sljedećim formulama:

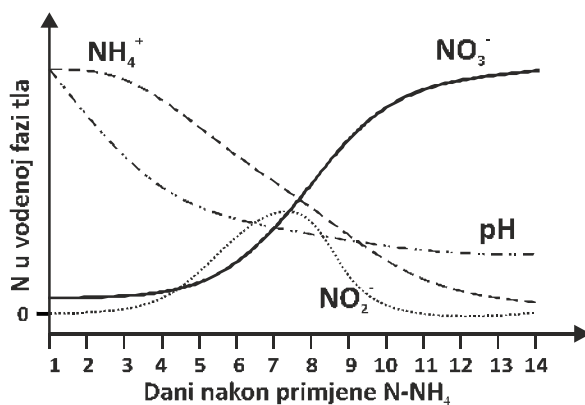


Nitrifikacijske bakterije vrlo su osjetljive na vanjske uvjete pa taj dio procesa mineralizacije dušika često predstavlja "usko grlo" mineralizacije organske tvari u tlu. Naime, za nitrifikaciju je potrebna dobra prozračenost tla, povoljna temperatura (optimalna je 26,5-32,0 °C, ali uz široki raspon ili tzv. *ekološku temperaturnu valencu*: 4,5-51,5 °C), povoljna vlažnost (optimalna je kod 50 % popunjenosti pora vodom), pH 5,5-7,0 (kada je pH veći od 5,5 većina iona NH_4^+ bit će oksidirana do NO_3^-), prisutnost kalcija i dobra opskrbljenost drugim hranivima te povoljan omjer C/N.

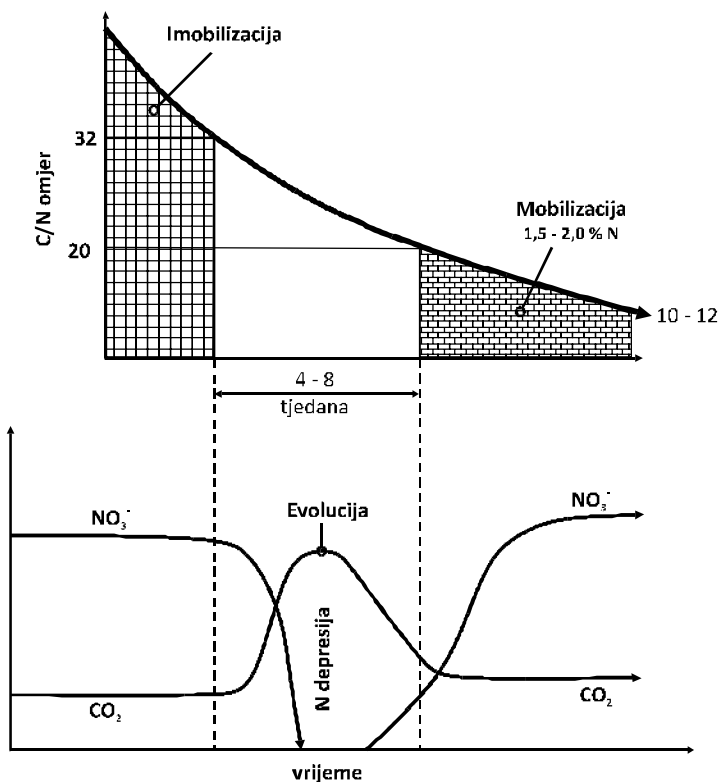
Intenzivna nitrifikacija može utjecati na snižavanje pH tla za jednu pH jedinicu (slika 6.5.) jer je nastala HNO_3 jaka kiselina pa to može pospješiti proces ispiranja lužina s kationskog izmjenjivačkog kompleksa tla, posebice tamo gdje takva opasnost već postoji (nizak puferni kapacitet tla, mala količina baza na apsorpcijskom kompleksu, nizak pH tla itd.). Stoga je povoljno da tlo sadrži potrebnu količinu baza za neutralizaciju nastale kiselosti, prvenstveno kalcija, mada Mg^{2+} , K^+ i NH_4^+ mogu spriječiti promjenu pH-vrijednosti.

Stabilni humus, kao i organomineralni kompleksi proteina s mineralnom frakcijom tla sporo se mineraliziraju, ali kod unošenja svježe organske tvari raste mobilizacija dušika i iz takvih kemijski postojanih spojeva (poticajni ili *priming efekt*). Smatra se da sužavanje omjera C/N na 10-12 : 1 ne osigurava dovoljno energije za potrebe metabolizma mikroorganizama, pa je daljnja mineralizacija takve organske tvari praktično zaustavljena. Ovisnost procesa mineralizacije dušika od C/N omjera prikazuje slika 6.6.

Unošenjem svježe organske tvari, širokog C/N omjera kao što je slama, koncentracija nitrata u tlu pada. Cjelokupnu količinu nastalih nitrata koriste mikroorganizmi za svoje potrebe, a uz to je moguće da amonijak iz prethodne amonifikacije, kao i već prisutan mineralni dušik, bude mikrobiološki vezan. Takva situacija naziva se *dušični manjak* (dušična depresija) koji može izazvati prolazni nedostatak dušika u ishrani bilja. Stoga je potrebno izbjegavati zaoravanje svježe organske tvari neposredno prije sjetve ili pak zajedno s njom unijeti u tlo potrebnu količinu dušika za poticanje mineralizacije kako bi se C/N omjer doveo na potrebnu razinu (slika 6.6.).



Slika 6.5. Povezanost mikrobiološke oksidacije amonijaka, nastanka nitrata i pH-vrijednosti tla (Mengel and Kirkby, 1978.)



Slika 6.6. Promjena C/N omjera i koncentracije nitrata kod razgradnje biljnih ostataka u tlu (Rajković, 1981.)

Potrebna količina dušika za mineralizaciju žetvenih ostataka različita je za pojedine usjeve jer koncentracija N u njima jako varira (tablica 6.4.). Primjerice, za pšeničnu slamu izračunava se na sljedeći način:

100 kg slame sadrži približno 40 kg ugljika i 0,5 kg dušika. U procesu mineralizacije iz slame mikroorganizmi asimiliraju oko 35 % C pri čemu je njihova potreba za N oko 12 % na usvojenu količinu ugljika. Proračunom dušičnog faktora, kojim se množi količina žetvenih ostataka, procjenjuje se potrebna količina dušika za mineralizaciju:

- a) $40 \text{ kg C} \times 0,35 = 14 \text{ kg C}/100 \text{ kg slame}$ (uzmu mikroorganizmi)
 b) $(14 \text{ kg C} \times 12\% \text{ N}) / 100 = 1,68 \text{ kg N}$ (potreba mikroorganizama)
 c) $1,68 - 0,5 \text{ (kg N)} = 1,18$ (dušični faktor)
 d) $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ slame} \times 10 \times 1,28 = 59 \text{ kg N/ha}$ (N za mineralizaciju)

Kako je samo mali dio dušika tla u mineralnom obliku, a cjelokupne njegove rezerve su organske, za očekivati je da postoji pozitivna korelacija između ukupnog dušika tla i intenziteta mineralizacije, odnosno njegove raspoloživosti.

Količine dušika koje se mineraliziraju u nekom tlu tijekom godine mogu biti značajne s aspekta ishrane bilja, u povoljnim uvjetima i do $1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dan}^{-1}$.

Tablica 6.4. Prosječan sadržaj N u žetvenim ostacima (kg t^{-1})

Žetveni ostaci	N kg t^{-1}	Žetveni ostaci	N kg t^{-1}
Pšenica ozima	5,0	Šećerna repa	4,5
Pšenica jara	3,0	Soja	12,0
Pšenica durum	3,5	Suncokret	12,0
Triticale	4,5	Uljana repica	8,0
Raž	3,5	Krumpir	3,5
Kukuruz	7,5	Grah	13,5
Kukuruz sjemenski	7,0	Grašak stočni	25,0
Kukuruz silažni	8,5	Lucerna	20,0
Ječam ozimi	4,0	Djetelina	25,0
Ječam jari	3,7	Duhan Virginia i Burley	5,0
Ječam pivarski	3,5	DT smjesa	22,5
Zob ozima	4,0	Rauola (siderat)	10,5
Zob jara	4,5		

Mineralizirajuća sposobnost tla može se utvrditi laboratorijskim metodama inkubacije. U takvim određivanjima imitiraju se prirodni uvjeti, odnosno obavlja se anaerobna inkubacija uzoraka tla (bez prisutnosti kisika) za utvrđivanje intenziteta amonifikacije, a u aerobnim uvjetima (prisutnost kisika) za određivanje intenziteta nitrifikacije. Ispitivanjima *Fallera i dr.* metodom aerobne inkubacije od 14 dana, gotovo 1.000 uzoraka različitih tipova tala Baranje, utvrđena je prosječna mineralizacija od 44,8 ppm N ili oko 130 kg N ha^{-1} pri

čemu nije utvrđena pouzdana korelacija između sadržaja humusa i intenziteta mineralizacije. Stoga predviđanje mineralizacije dušika često ne daje dobre rezultate u procjeni sposobnosti tla kao izvora mineralnog dušika, upravo zbog velikog broja čimbenika koji utječu na rad mikroorganizama. U navedenom slučaju, u idealnim laboratorijskim uvjetima ispitivana su tla pod vrlo intenzivnim načinom korištenja i s izraženim sadržajem rezidualnog dušika pa se čini kako mikroorganizmi njime zadovoljavaju najveći dio svojih potreba. Ipak, u suvremenoj poljoprivredi, postoji veliki broj pokušaja da se intenzitet mineralizacije kvantitativno procijeni kako bi se primijenila adekvatna količina N. Naime, suvišna (luksuzna) primjena N-gnojiva je zbog lake pokretljivosti nitrata ekološki neprihvatljiva, podjednako za organska i mineralna N-gnojiva. Za dobru procjenu potencijala N-mineralizacije koriste se vrlo složeni proračuni, ali za orijentaciju mogu poslužiti i jednostavni, npr.:

$$N_t = N_0 \{1 - \exp(-k_{Nt})\}$$

N_t je iznos mineralizacije N-NH₄ i N-NO₃ u vremenu t (tjedni), N_0 je nemineralizirani dio dušika (g g⁻¹ tla), a k_N je temperaturno ovisna konstanta $3,08 \times 10^{-4}(Q_{10}^{0,1T})$, odnosno $Q = 2$ pa je $k_N = 3,08 \times 10^{-4}(2^{0,1T})$.

Utjecaj potencijala vlažnosti tla (Ψ) na konstantu k_N može se opisati sljedećim izrazom:

$$\frac{k_N}{k_{N(-10)}} = 1,4 - \frac{\ln(-\Psi)}{5,7}$$

gdje je $k_{N(-10)}$ potencijal vlažnosti kod poljskog kapaciteta tla za vodu (-10 J kg⁻¹) × (J kg⁻¹ = 10³ Pa = 10⁻² bar).

Prema gornjim izrazima za područje istočne Hrvatske može se očekivati prosječno ~ 50 kg N ha⁻¹ mjesečno na humoznim tlima koja sadrže 0,2 % ukupnog dušika, kod temperature tla od 15 °C (ljetni mjeseci), punog poljskog vodnog kapaciteta i masu oraničnog sloja od 3×10^6 kg ha⁻¹. Međutim, vlaga tla i sadržaj ukupnog dušika su rijetko tako povoljni pa kad se uzme prosječna tenzija vlažnosti tla od 7,5 bara ($K_N = -750$ kPa = 0,239) i koncentracija $N_{\text{ukupni}} = 0,1$ %, mineralizacija pada na manje od 6 kg N ha⁻¹ mjesec⁻¹ kod temperature tla od 15 °C. Stoga bi za cijelu godinu u realnim uvjetima, odnosno kod tenzije vlažnosti od 7,5 bara, $N_{\text{ukupni}} = 0,1$ % i prosječne temperature tla od 10 °C ukupna mineralizacija iznosila oko 53 kg N ha⁻¹ god⁻¹, što se može smatrati približnom procjenom kapaciteta mineralizacije za šire područje Osijeka.

Proračun potencijala N-mineralizacije, odnosno količina mineralnog dušika koja se može očekivati iz prirodnih rezervi i žetvenih ostataka, može se procjenjivati na više različitih načina, od kojih je za područje istočne Hrvatske jedino prilagođen (i znatno modificiran) *PAPRAN model* (Vukadinović, 2009., <http://ishranabilja.com.hr>).

Tablica 6.5. Proračun potencijala N-mineralizacije (Vukadinović, 2009.)

Unos podataka:	
Agroekološka zona	2. 651-700 mm
pH-KCl	5,75
Humus %	2,00
AL-P ₂ O ₅ mg/100 g	20,0
AL-K ₂ O mg/100 g	20,0
Teksturna klasa	3. llovasto
KIK meqv/100g	18 (humus = 5,0 glina = 13,0)
Biogenost	2. osrednja
Predusjev	01. pšenica ozima
Prinos (merkantilni) predusjeva t/ha	5,0
Žetv. ostaci t/ha	3,0
Stajnjak	00. Bez organskog gnoja
God. od prim. stajnjaka	1
Rezultati:	
f-pH	0,845
NPK u žet. ost. kg/ha	15,0 : 6,0 : 30,0
NPK u gnoju kg/ha	0 : 0 : 0
potenc. min. N kg/ha	12,68
frakcija N u akt. humus	0,089
N-org u akt. humusu kg/ha	746,93
C:P omjer u žet. ost.	181,25
C:N omjer u žet. ost.	116,0
f-min za C:N omjer	0,310
f-min za C:P omjer	1,067
f-min C:N:P	0,310
temp. fakt. mineralizacije ž.o.	0,369
agroek. inten. miner. ž.o.	0,00778
rata min. kg/ha/dan	0,09859
rata min. N kg/ha/god	35,99
min. akt. humusa kg/ha/dan	0,09642
min. akt. humus/god	35,19
Ukup. godišnja rata N mineralizacije	53,58 kg N/ha

(sivo označena polja sadrže unaprijed postavljene vrijednosti)

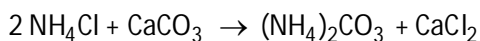
Program uzima u obzir pool svježeg organskog N (ostaci usjeva i biomasa) i stabilni organski N pool (humus). Mineralizacija organske tvari u tlu određuje se u kg ha⁻¹ dan za vegetaciju pojedinog usjeva u oraničnom i podoraničnom sloju, temeljom konstante razlaganja svježe zaorane organske tvari (funkcija C:N:P, odnosno C:N, C:P, vrste i količine biljnih ostataka, pH, temperature i vode u tlu), količine humusa te vrste organskog gnoja. Promjena humusa je proporcionalna sadržaju aktivnog N u njemu, različito za oranični i podoranični sloj. Stoga N-bilanca uključuje proračun mineralizacije aktivnog N-organskog poola humusa,

ratu mineralizacije žetvenih ostataka, eventualno korištenog organskog gnoja i rezidualni N (tablica 6.5.). Program se pokazao vrlo korisnim u proračunu potrebe za N-gnojidbom i sastavni je dio ALR kalkulatora proračuna gnojidbe.

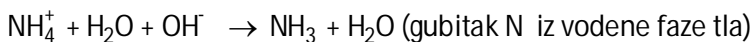
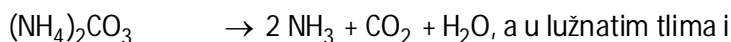
6.1.6. Gubici dušika iz tla

Mineralni dušik tla, zbog svoje brze transformacije do nitrata (koji se ne sorbiraju na koloide tla i zapravo pokazuju negativnu sorpciju), lako može biti podvrgnut ispiranju iz tla. U uvjetima velike vlažnosti i *descendentnog kretanja vode* nitrati se premještaju zajedno s vodom (kretanje mase = *konvekcija* = *mass flow*) i dospijevaju u podzemne tokove onečišćujući okoliš, a tada su i trajno izgubljeni za ishranu bilja. Ostali načini gubitka dušika iz tla manje su značajni. Dvogodišnja ispitivanja *Šestića i sur.* o ispiranju nitrata u Osijeku pokazala su da se iz smeđeg eutričnog tla kod 662 mm god⁻¹ padalina ispere 29,4 kg N-NO₃ ha⁻¹ i 5,8 kg N-NH₄ ha⁻¹, dok je istovremeno uz veću količinu padalina i na lakšim tlima ispiranje bilo više od 50 kg N ha⁻¹.

Mineralni dušik može se gubiti iz tla *volatizacijom* kao amonijak u plinovitom obliku. Ta pojava zapaža se već kod pH > 6, a porastom lužnatosti i sušenjem tla sve je izraženija:

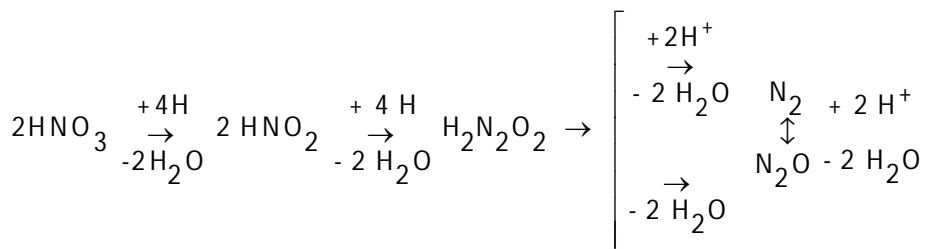


Nastali amonijevi karbonati nisu stabilni, lako se raspadaju, a plinoviti amonijak iz lužnatog tla lako prelazi u atmosferu:

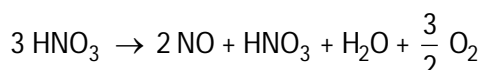


Veći gubici volatizacijom nastaju kod primjene anhidriranog amonijaka u nedovoljno vlažnom i lužnatom tlu ili kod plitkog i nepravilnog unošenja (loše zatvaranje tla nakon prolaska aplikatora).

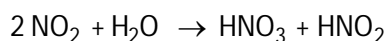
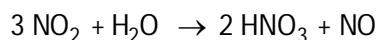
Uzrok negativne bilance dušika u tlu može biti i pojava *denitrifikacije*. To je kemijski ili mikrobiološki proces koji kod pH ≤ 5 uvjetuje redukciju nitrata do molekularnog dušika koji se u plinovitom obliku gubi iz tla. Proces denitrifikacije može u uvjetima niskog pH, slabe prozračenosti tla, velike vlažnosti, općenito u redukcijским uvjetima, biti vrlo brz, premda ima i suprotnih mišljenja. Gubitak dušika u procesu denitrifikacije može se predstaviti na sljedeći način:



Mogući su gubici dušika kod niske pH reakcije tla procesima *kemodenitrifikacije* kad u *mikrobiološkoj denitrifikaciji* nastaje slobodna dušikasta (nitritna) kiselina:



Nastali NO je plinovit i lako isparava, ali se pretpostavlja da u tlu ipak dolazi i do njegove brze oksidacije na sljedeći način:



Kemijska svojstva mineralnih oblika dušika određuju njihovo ponašanje i dinamiku u tlu. Dok nitratni dušik, kao anion, pokazuje sklonost *negativne sorpcije* (niža koncentracija u hidratacijskom omotaču koloidnih micela tla) i ne fiksira se (izuzev mikrobiološki), amonijak, kao kation, veže se na adsorpcijski kompleks tla pa je čak moguća i njegova *fizička fiksacija* u međulamelarne prostore vermikulita i ilita. Kapacitet fiksacije amonijaka nekog tla određen je, dakle, prisutnošću fiksirajućih glinenih minerala. Značajan utjecaj na intenzitet fiksacije pokazuju prisutni kationi u vodenoj fazi tla. Fiksaciju povećavaju Ca^{2+} , Mg^{2+} i Na^+ , a smanjuju H^+ , K^+ , Ba^{2+} i Li^+ . Proces fiksacije amonijevog iona analogan je fiksaciji kalija u tlu (vidi detalje kod kalija) pa veća prisutnost ilita i vermikulita intenzivira fizičku fiksaciju amonijskog dušika u tlu.

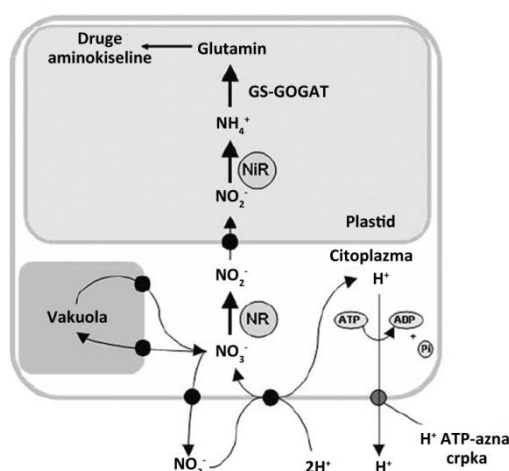
6.1.7. Dušik u biljkama

Suha tvar biljaka sadrži u prosjeku između 2 i 5 % dušika, što je u odnosu na ugljik zapravo vrlo mala količina. Ipak, biljke su veliki sakupljači dušika, ugrađuju ga tijekom čitave vegetacije u organsku tvar obavljajući transformaciju mineralne u organsku formu, stoga je raspoloživost dušika, zbog velike potrebe za njim, nedovoljne mobilizacije iz organskih rezervi, velike pokretljivosti nitratnog oblika i gubitaka, vrlo često ograničavajući čimbenik rasta i prinosa.

Dušik se pretežito usvaja kao NO_3^- i NH_4^+ ion, u povoljnim uvjetima vjerojatno više od 90 % u nitratnom obliku (slika 6.7.), ali samo kad je proces nitrifikacije u

tlu moguć ili je primijenjeno mineralno gnojivo koje sadrži nitrate. Usvajanje oba oblika je aktivan metabolički proces nasuprot elektrokemijskom gradijentu. Bitno je naglasiti da je oko 70 % korijenom usvojenih svih kationa i aniona u formi NO_3^- ili NH_4^+ iona i ta činjenica najjače utječe na omjer usvajanja kationa/aniona svih drugih elemenata ishrane.

Kod zaustavljanja disanja korijena inhibitorima ili snižavanjem temperature, intenzitet usvajanja dušika se smanjuje što ukazuje na aktivan način usvajanja dušika. Ipak, usvajanje dušika, posebice nitrata, vrlo je brz proces. Krivulja usvajanja pokazuje tipičan vremenski prirast po eksponencijalnoj ovisnosti do određene veličine, iza čega slijedi linearno usvajanje, što je karakteristično za indukciju transportnog sustava. Kod viših pH-vrijednosti ($\text{pH} \geq 7$) biljke preferiraju amonijski oblik dušika, a kod nižih ($\text{pH} < 6$) nitratni.

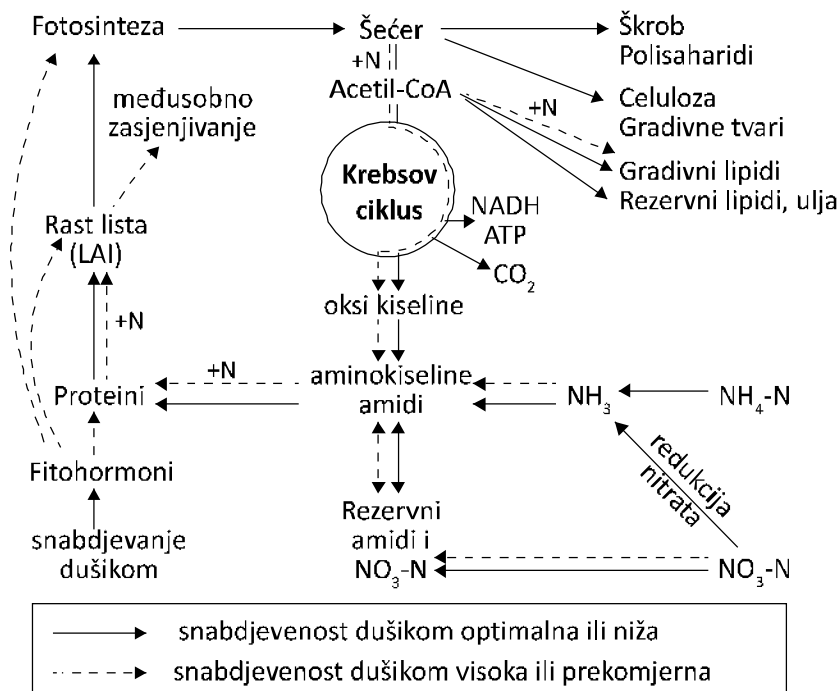


Slika 6.7. Shema usvajanja N- NO_3 (Crawford et al., 2000.)

U prisutnosti oba oblika mineralnog dušika u tlu, ioni NH_4^+ kompetitivno inhibiraju usvajanje nitrata što je značajno za praksu jer se kod nas najčešće koriste amonijsko-nitratna dušična gnojiva, a vrlo rijetko isključivo nitratna gnojiva (npr. NaNO_3 ili $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$). Također se zapaža kod nekih biljaka jak antagonizam između iona NO_3^- i Cl^- , što također ima praktičan značaj jer je primjena kalijevih gnojiva često količinski jednaka primjeni dušičnih, kod nekih usjeva (npr. repa) i veća, a najčešće se koristi KCl , vrlo rijetko skuplji K_2SO_4 , a izuzetno rijetko KNO_3 .

Oisno o obliku dušika koji se usvaja dolazi do određenih promjena u metabolizmu. Usvajanjem nitrata proces ugradnje dušika u organsku tvar ne mora odmah započeti jer se nitratni oblik dušika ($\text{NO}_3\text{-N}$) kod dobre N-opskrbe akumulira u pojedinim organima, posebice lišću i peteljka, a biljka ga koristi nakon redukcije u procesu sinteze proteina. Redukcija nitrata kod biljaka narušava ionsku bilancu jer se javlja višak kationa, naročito K^+ , Ca^{2+} i Mg^{2+} te je zbog kompenzacije viška lužnatosti stimulirana sinteza organskih kiselina,

posebice oksalocetene i jabučne. Suprotno tome, kod usvajanja amonijaka, koji je u većim koncentracijama otrovan za biljke, dolazi do njegove brze ugradnje, što izaziva manjak kationa i višak aniona, najčešće Cl^- uz razgradnju ugljikohidrata do organskih kiselina (u *Krebsovom ciklusu*). Utjecaj opskrbljivanja biljaka različitim oblicima dušika na putove njegove ugradnje, povezano s rastom biljaka, shematski pojednostavljeno prikazuje slika 6.8.



Slika 6.8. Mehanizam usvajanja dušika (Marschner, 1995.)

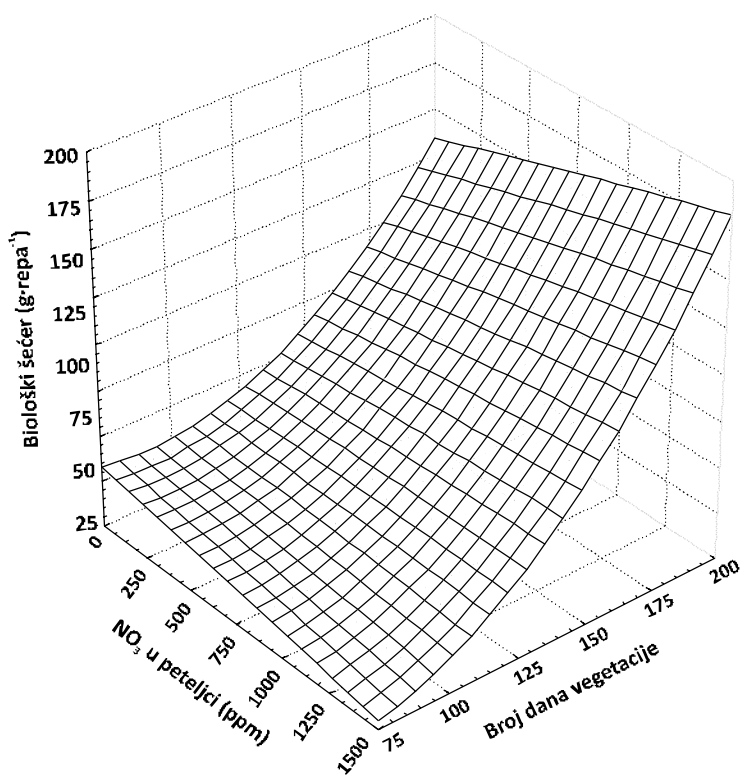
Usvajanje većih količina amonijskog oblika dušika može biti štetno, naročito kod mladih biljaka jer zahtijeva znatan utrošak ugljikohidrata zbog potrebne tvorbe ketokiselina koje vežu usvojeni amonijačni oblik dušika. Mogućnost akumulacije nitrata za biljke je vrlo povoljna jer se njihova redukcija i ugradnja obavljaju kad je to fiziološki potrebno. Ipak, preveliko nagomilavanje nitrata također nije dobro za biljke jer njegovom naknadnom i brzom redukcijom dolazi do intenziviranja procesa disanja, razgradnje rezervnih ugljikohidrata i pojačane sinteze proteina. Posljedice su produljenje vegetacije, formiranje prevelike količine lišća na štetu priroda, povećan sadržaj topljivih oblika dušika (aminokiselina i amida) što kod nekih biljnih vrsta (npr. šećerna repa) štetno utječe na kakvoću (tablica 6.6. i slika 6.9.).

Povećani sadržaj nitrata u biljkama može biti posljedica suše (povećana koncentracija u vodenoj fazi tla), visoke temperature (zbog povećane evapotranspiracije i usvajanja nitrata), zasjenjenosti biljaka u gustom usjevu ili oblačnog vremena (zbog reducirane sinteze bjelančevina), nedostatka fosfora,

kalija ili kalcija te, najčešće, pretjerane uporabe N-gnojiva (posebice nakon smanjenog prinosa prethodnog usjeva, nakon uzgoja leguminoza i sl.).

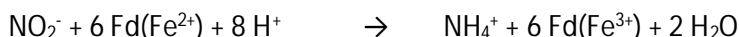
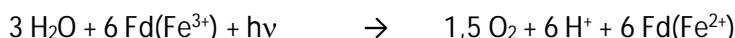
Tablica 6.6. Utjecaj rastuće doze N na porast šećerne repe i njenu tehnološku kakvoću - pješčana kultura (Vukadinović, Bertić, 1976.)

Pokazatelj	Količina N u hranljivoj otopini				
	¼ N	1/2 N	N	2 N	4 N
Cijela biljka (g)	96,44	279,56	577,11	748,00	755,44
Korijen (g)	56,44	166,67	347,00	397,78	370,89
List i glava (g)	40,00	112,89	230,11	350,22	404,55
Digestija (%)	12,80	16,40	16,50	16,10	12,80
ST soka (%)	87,67	88,65	86,84	82,14	74,85
Šećer (g/biljka)	7,22	27,33	57,26	64,04	47,47



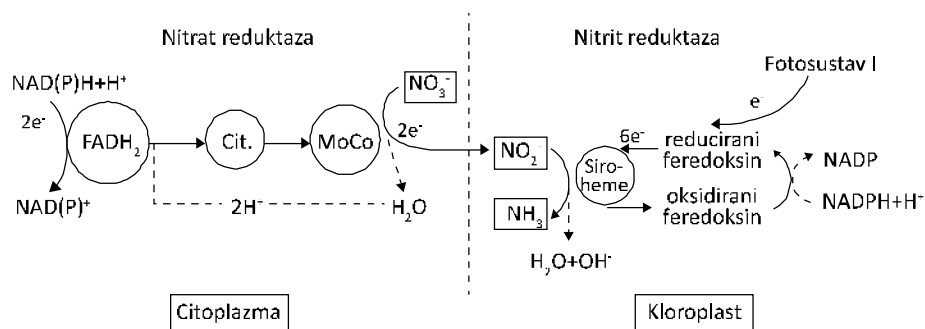
Slika 6.9. Utjecaj koncentracije nitrata u peteljkama na biološki prinos šećera u korijenu šećerne repe (Vukadinović, 1981.)

Redukciju nitrata u biljci reguliraju *nitratna* i *nitritna reduktaza* i proces se može odvijati u korijenu ili u zelenim dijelovima biljaka. Proces nitratne redukcije može se predstaviti sažeto na sljedeći način:



(Fd = feredoksin, NAD⁺=nikotin-amid-dinukleotid, oksidirani oblik, oksidans, NADH=reducirani oblik, reducens)

Prvi stupanj redukcije do nitrita obavlja *nitratna reduktaza* (NRaza) u citoplazmi, a drugi dio *nitritna reduktaza* (NiRaza) u kloroplastima. Nitratna reduktaza je *adaptivni enzim* i za njegovu sintezu potrebna je prisutnost nitrata. Sadrži FAD, Mo i aktivnu skupinu -SH. Donor elektrona u procesu nitratne redukcije je NADH koji potječe iz procesa glikolize. Kod redukcije nitrata u korijenu egzistira *nefotokemijski sustav*. Proces nitratne redukcije je usko grlo čitavog procesa redukcije nitrata u biljci dok se drugi dio procesa, koji obavlja nitritna reduktaza, odvija vrlo brzo u kloroplastima (sl. 6.10.).



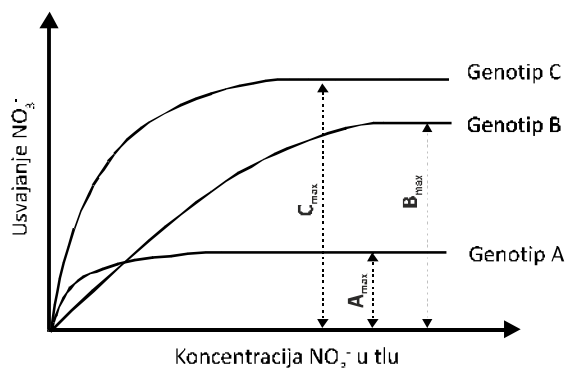
Slika 6.10. Mehanizam nitratne redukcije u biljkama (Marschner, 1995.)

Redukcija nitrita odvija se na vanjskoj strani tilakoidnih membrana i donor elektrona je feredoksin iz fotosustava 1 (PS I). Stoga je za taj dio procesa važan intenzitet i kakvoća svjetla, odnosno dovoljan intenzitet fotosinteze, dok se nakupljanje nitrata, suprotno tome, odvija pretežito u mraku.

Proces nitratne redukcije zahtijeva visok utrošak energije jer se redukcija od nitrata do amonijaka odvija uz promjenu oksidacijskog broja dušika od +5 do -3. Potrebno je i prisutnost molibdena koji je sastavni dio NRaze, Mn za fotosustav 2 (PS II) i fotooksidaciju vode u njemu (što je važno i za sintezu NADH). Dobra ishranjenost kalijem potpomaže sintezu NRaze pa se često smatra kako je kalij kofaktor u procesu redukcije dušika. Istraživanja pokazuju da kalij u tom procesu može djelomično biti zamijenjen rubidijem, ali samo do 50 % potrebe.

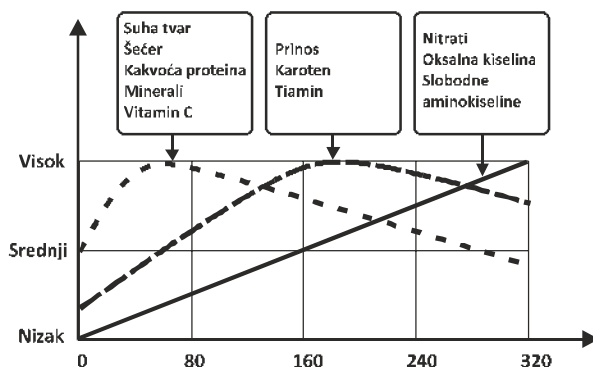
Intenzitet nitratne redukcije najveći je u mladom lišću pa ono sadrži i najveće količine dušika prema ostalim vegetativnim organima biljaka. Nakupljanje nitrata u lišću ili peteljka može se iskoristiti za procjenu N statusa biljaka,

Nedostatak raspoloživog dušika ima vrlo ozbiljne posljedice. Biljke formiraju manju asimilacijsku površinu, lišće je kraće, uže i blijedozeleno zbog manjeg sadržaja klorofila što uzrokuje niži intenzitet fotosinteze te biljke brže stare i prinos je smanjen. Žita slabo busaju, imaju sitan klas i šturo zrno. Šećerna repa ima smanjenu asimilacijsku površinu, korijen je mali uz višu koncentraciju saharoze, ali je ukupna količina šećera manja jer je prinos korijena znatno niži.



Slika 6.12. Usvajanje nitrata ovisno o sorti pšenice i konc. nitrata u tlu

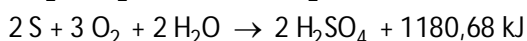
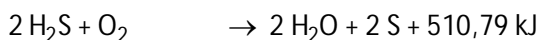
Suvišak dušika rezultira intenzivnim porastom vegetacijskih organa uz modrozelenu boju lišća te *luskuzna* ishrana dušikom ima više negativnih posljedica, npr. strna žita jače busaju, stvaraju preveliku masu lišća pa, uslijed slabog mehaničkog tkiva i velike mase, lako poliježu uz kasnije sazrijevanje. Općenito, biljke postaju neotporne na bolesti, štetočine, niske temperature i sušu dok su npr. šećerna repa i pivarski ječam osjetno slabije kakvoće. Primjenom većih doza dušika od potrebnih, opada prinos, lošija je kakvoća proizvoda (slika 6.13.), a na lakim i propusnim tlima dolazi do ispiranja nitrata i onečišćavanja podzemnih voda.



Slika 6.13. Utjecaj visokih doza dušika na prinos i kakvoću proizvoda (Scharpf et al., 1986.)

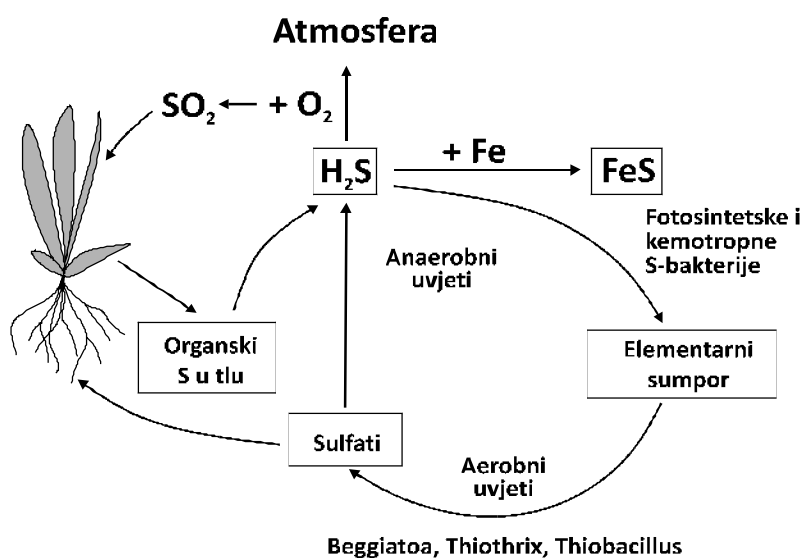
6.2. SUMPOR

Sumpor je rasprostranjen kemijski element u prirodi. U tlu potječe iz matičnih stijena gdje se nalazi najviše u obliku sulfida i prilikom njihovog raspadanja oslobađa se i brzo oksidira. Oksidaciju obavljaju sumporne bakterije od kojih su najznačajnije *Thiobacillus thiooxidans*, *Beggiatoa*, *Thiothrix* i dr. Energiju oslobođenu prilikom oksidacije sulfida do H_2SO_4 mikroorganizmi koriste u procesu kemosinteze za asimilaciju ugljikova(IV) oksida:



U odsutnosti CO_2 oslobođenu energiju mikroorganizmi akumuliraju u obliku ATP-a na što ukazuje pad koncentracije mineralnih oblika fosfora u supstratima ishrane. *Thiobacillus* je prilagođen djelovanju u vrlo kiseloj sredini (pH 2-3) gdje nastala sulfatna kiselina lako otapa sekundarne i tercijarne fosfate, ali su to ipak male količine fosfata bez većeg značaja u ishrani bilja.

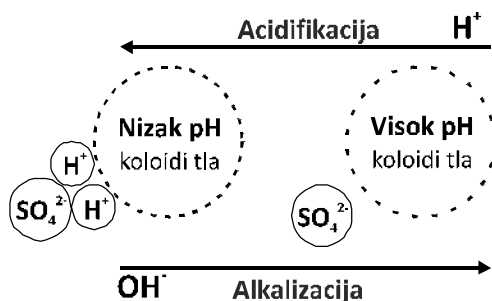
U suvremenoj industrijskoj eri, sumpor se akumulira u tlu i taloženjem iz atmosfere gdje se nalazi u vidu SO_2 ili H_2S . Procjenjuje se da godišnja imisija sumpordioksida u atmosferu iznosi oko $3 \times 10^8 \text{ t}$ ili $10\text{-}40 \text{ kg S ha}^{-1}$. U područjima s jakim industrijom, koja energiju dobiva sagorijevanjem fosilnih goriva (uglja i nafte), u tlo može dospjeti i do 200 kg S ha^{-1} godišnje. Na obogaćivanje tla sumporom djeluje mineralna gnojidba ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4$, K_2SO_4 i dr.), kao i sredstva za zaštitu bilja koja ga sadrže. Ciklus sumpora u prirodi prikazuje slika 6.14.



Slika 6.14. Ciklus sumpora u prirodi (Mengel and Kirkby, 1978.).

6.2.1. Sumpor u tlu

U tlu se sumpor nalazi u organskom i anorganskom obliku. Tla umjerenog klimata imaju ukupan sadržaj sumpora 0,05-0,4 ‰. U ocjeditim i prozračnim tlima najveći dio sumpora nalazi se u organskoj tvari (60-90 % ukupnog S tla). Manji dio anorganskog sumpora može se nalaziti u kiselim uvjetima (pH ispod 5,5, slika 6.15.) vezan na adsorpcijski kompleks, dok je najveći dio u obliku topljivih ili netopljivih soli.



Slika 6.15. Sorpcija i desorpcija S na koloide tla ovisno o pH

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 volatilacijom u redukcijskim uvjetima u obliku H₂S. Treba naglasiti kako na području Hrvatske nije utvrđen manjak sumpora u tlu, iako je bilo sumnji i ispitivanja u nekim krajevima, dok npr. u SAD-u na 10 % obradivih površina sumpora nema dovoljno u tlu.

Nedostatak sumpora može se javiti na karbonatnim tlima bogatim željezom i humusom slabo podložnom mineralizaciji, ali i u tlima siromašnim humusom. Glavni izvor nadoknade sumpora u tlu su ipak sulfati iz mineralnih gnojiva, ali i atmosfera. Oko 150 do 200 milijuna tona sumpora godišnje dospije u atmosferu vulkanskim erupcijama, prirodnim procesima iz oceana i močvara, kao i iz industrijskih objekata.

Suvišak sumpora u tlu je nepoželjan jer dovodi do zakiseljavanja za koje se smatra da uzrokuje izumiranje šuma u mnogim krajevima Europe, a takve pojave sve su više prisutne i kod nas, npr. u Gorskom kotaru i drugdje.

U tlu je omjer između ugljika, dušika i sumpora približno 125 : 10 : 1,2. Omjer između fosfora i sumpora mijenja se ovisno o dubini profila s promjenom sadržaja organske tvari u tlu koja je osnovni izvor raspoloživog sumpora u tlu.

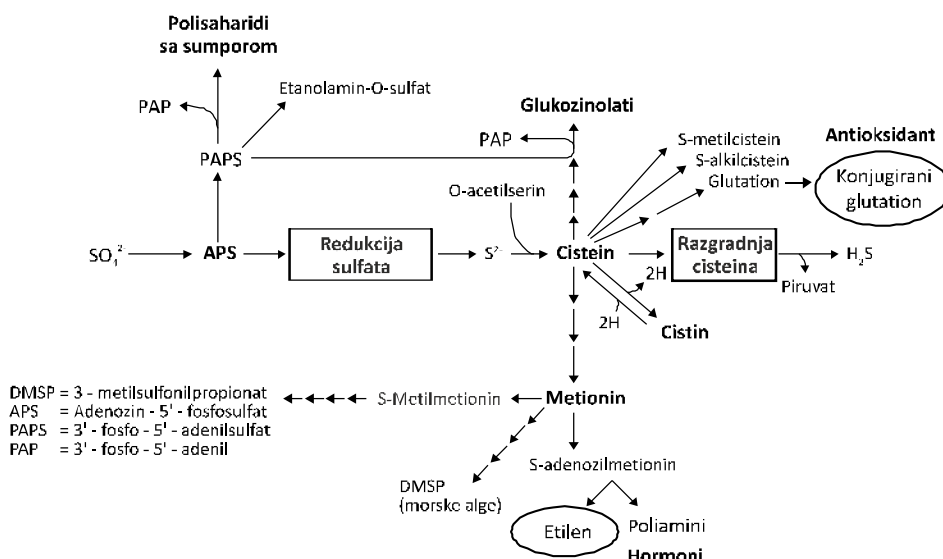
6.2.2. Sumpor u biljkama

Biljke usvajaju sumpor pretežito kao anion SO_4^{2-} i u tom obliku nalazi se u protoplazmi biljaka kao mineralna rezerva. Ipak, kod ugradnje u organsku tvar potrebna je redukcija sumpora, jednako kao kod dušika. Međutim, sumpor se lako usvaja i iz atmosfere u obliku SO_2 , kako to pokazuju istraživanja *Fallera* (1972.) (tablica 6.8.), koji se također prije ugradnje u organsku tvar mora reducirati. Najviše sumpora zahtijevaju kupus, cvjetača i luk. Njihovi zahtjevi mogu iznositi do 45 kg S ha^{-1} .

Tablica 6.8. Produkcija suhe tvari kod duhana nakon izlaganja izdanaka SO_2 , a korijena ishrani SO_4^{2-} (*Faller*, 1972.)

Biljni dio	Suha tvar (mg/biljka)			Sadržaj S (mg S g^{-1} ST)		
	Bez S	SO_2	SO_4^{2-}	Bez S	SO_2	SO_4^{2-}
List	0,8	2,0	2,0	1,5	11,4	7,4
Korijen	0,4	0,6	0,6	1,9	1,9	4,9

(biljke su izlagane 3 tjedna $1,5 \text{ mg SO}_2 \text{ m}^{-3}$, a korijen je držan u otopini koncentracije $80 \text{ mg SO}_4^{2-} \text{ dm}^{-3}$)



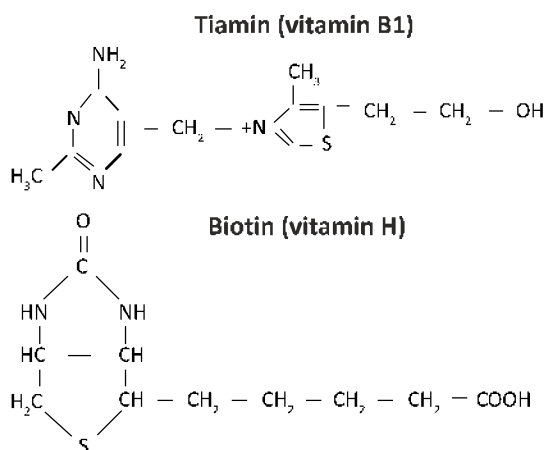
Slika 6.16. Usvajanje i ugradnja sumpora u organsku tvar

Mehanizam usvajanja sumpora shematski pokazuje slika 6.16., ali još uvijek ima dvojbi o detaljima tog mehanizma. Prema starijim shvaćanjima, usvajanje sumpora započinje transportom sumpora uz pomoć *sulfattransferaze*, odnosno vezanjem SO_4^{2-} na pirofosforilnu skupinu ATP-a te formiranjem *APS* (*adenozin fosforilsulfat*) uz pomoć enzima *ATP-sulforilaze*. U obliku tog kompleksa sumpor se usvaja, i kao aktivirana molekula (*fosfoadenozinfosfat = PAP*) u biljci reducira

do -SH skupine koju prihvaća *acetilserin*, a kompleks *prenositelj-SH* se regenerira za novo unošenje sulfatnog aniona. Acetilserin se raspada na *cistein* i *octenu kiselinu* pa je stoga cistein primarni proizvod usvajanja sumpora. Međutim, novija istraživanja pokazuju kako se sulfati usvajaju i *olakšanom difuzijom* u obliku kompleksa s *permeazama* koje se nalaze u plazmalemi ili na njezinoj površini.

Koncentracija sumpora u biljkama je između 0,1 i 0,5 %, dok je omjer S/N u proteinima 1/30-40. Sumporom su bogati biljni dijelovi koji sadrže puno proteina, posebice biljke iz porodice *Cruciferae* koje ga sadrže do dva puta više od fosfora kao i *Leguminosae*. Koncentracija sumpora u lišću kod većine biljnih vrsta nešto je manja od fosfora. U mladim biljnim dijelovima sumpor se nalazi pretežito u organskom, reduciranom obliku (~ 90 % u formi *tripeptida glutationa*), a u starijim dijelovima ili u mirovanju biljaka, pretežito je oksidiran, pa se rezerve sulfata u biljci uspješno koriste za procjenu opskrbljenosti sumporom. Za razliku od dušika, sumpor se nakon hidrolize spojeva koji sadrže reducirane oblike, lako oksidira do sulfata (dok se ion NH_4^+ ne može oksidirati u višim biljkama do NO_3^-).

Fiziološka je funkcija sumpora vrlo značajna jer je konstituent mnogih vitalnih spojeva, a zbog veće koncentracije sulfata, ima i opće ionsko djelovanje kao važan elektrolit protoplazme. Redukcija sumpora u biljkama je još uvijek nedovoljno poznat proces koji se odvija u kloroplastima te od šesterovalentnog sumpora (sulfati) do dvovalentnog -SH oblika, potrebnog za ugradnju u aminokiseline, odvija se brzo i bez međuprodukata.



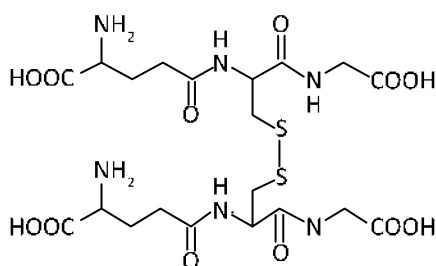
Slika 6.17. Struktura vitamina B1 i H

U biljkama sumpor gradi *estere sumporne kiseline* ($\text{R-SO}_3\text{H}$) koji su neophodni za sintezu *cisteinske kiseline*. Aminokiseline sa sumporom *cistein* (R-SH), *metionin* (R-S-R) i *cistin* (R-S-S-R) sadrže oko 50 % sumpora u biljkama. Sumpor sudjeluje u

građi mnogih enzima (*proteaze, ureaze* i dr.), sekundarnih biljnih tvari kao što su *senfna ulja, glukozidi (sinigrin, rafain, alin* itd.). Osim toga, sadrže ga vitamini *biotin* (vitamin H) i *tiamin* (vitamin B₁) (slika 6.17), zatim različiti *antibiotici* itd. Sastavni je dio *lipoidne kiseline* kao koenzima u oksidativnoj dekarboksilaciji α -*ketokiseline* i koenzima *CoA-SH* važnog u metabolizmu masti.

Proteini sadrže sumpor kao konstitucijski element, a enzimi i koenzimi kao katalitički centar. Sumpor sudjeluje i u održavanju oksido-redukcijskih procesa, djeluje na inicijalizaciju diobe stanica, sudjeluje u mehanizmu transporta elektrona itd. U proteinima disulfidne veze stabiliziraju proteinsku strukturu i određuju konformaciju značajnu za djelovanje enzima. Oksidacijom dviju molekula cisteina nastaje cistin koji se u redukcijskim uvjetima razlaže pri čemu dolazi do otpuštanja ili primanja vodika. Analogan redoks sustav posjeduje *dipeptid glutation* (slika 6.18.).

Sumpor ima značajnu ulogu u održavanju ionske ravnoteže u protoplazmi i preko toga na stanje biokoloida jer je sastavni dio *sulfolipida* biomembrana. Upravo iz tih razloga, kod usvajanja velikih količina N-NH₄, biljke zahtijevaju adekvatnu količinu sulfata ili fosfata. Sulfatni ion smanjuje hidrataciju koloida protoplazme nasuprot jednovalentnim anionima (Cl⁻, NO₃⁻ i dr.). Smatra se da sumpor ima i ulogu u otpornosti biljaka prema niskim temperaturama i suši. Oksidacijom -SH skupina nastaju disulfidni mostovi (-S-S-) uz promjenu konformacije proteina što također ima veliki značaj u kakvoći brašna. Pucanjem disulfidnih mostova lijepak brašna manje bubri, manje je topljiv itd.



Slika 6.18. Struktura dipeptida glutationa

6.2.3. Nedostatak i suvišak sumpora

Manjak raspoloživog sumpora vrlo je rijedak, posebice u industrijskim zonama gdje veći dio potreba za sumporom biljke mogu podmiriti iz atmosfere. Prelaskom na visoko koncentrirana kompleksna gnojiva (bez ili s vrlo malo punila, odnosno balasta) sumpor se sve manje unosi u tlo gnojidbom pa se u intenzivnoj proizvodnji može dogoditi da ga nema u potrebnim količinama za

postizanje visokih prinosa. Simptom nedostatka sumpora sličan je deficitu dušika, ali se kloroza zapaža prvo na mlađem lišću (za razliku od dušika gdje se nedostatak zapaža prvo na starijem). Kloroza se javlja prvo u blizini lisnih nerava, dok kod uljane repice i šećerne repe lišće može dobiti ljubičastu nijansu zbog povećane sinteze antocijanina. Često se zapažaju i morfološke promjene u nedostatku sumpora, kao što su kraća stabljika te deblji, uži i kraći listovi. Kod biljaka iz porodice krstašica i lisne žile su kraće, što dovodi do uvijanja lišća.

Suvišak sumpora u prirodi je rijetka pojava, ali se sve češće događa u blizini industrijskih zona s velikom imisijom SO_2 u atmosferu. Smatra se da je koncentracija od 1 do 1,5 mg SO_2 m⁻³ opasna za živi svijet. U izrazito redukcijskim uvjetima može doći do nagomilavanja H_2S uz pojavu gubitaka sumpora volatizacijom. Pojava suviška S često se zapaža na rižinim poljima i manifestira simptomom "bruzone" pri čemu biljke dobiju mrku boju donjeg dijela stabla. Kod suviška sulfata u tlu lišće ima po ivicama i u međunervnim površinama mrke pjege uz ranije sazrijevanje plodova.

6.3. FOSFOR

Fosfor je nemetal koji se u prirodi, tlu i biljkama javlja u peterovalentnom obliku. Ulazi u sastav značajnih organskih spojeva kao što su *nukleoproteidi*, *fosfolipidi*, enzimi i mnogih drugih, posebice spojeva koji povezuju u metabolizmu *endergone* i *egzergone reakcije*. Ciklus fosfora sastoji se od razgradnje fosfornih spojeva u tlu, njihovog usvajanja biljkama i ponovnog nastanka minerala tla. Poznato je čak oko 170 minerala koji sadrže fosfor, a rasijani su po svim magmatskim stijenama.

6.3.1. Fosfor u tlu

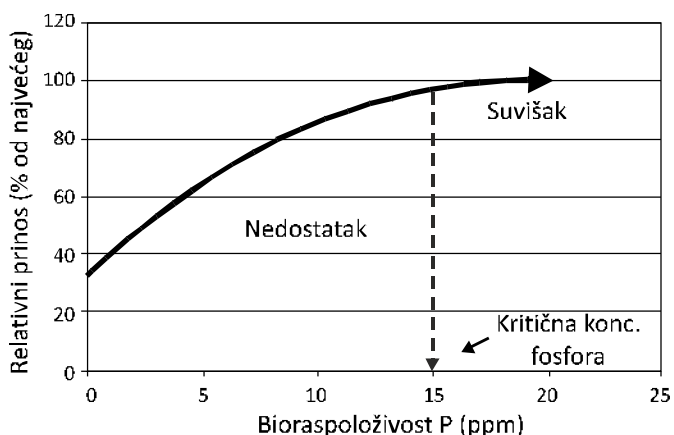
Fosfor u tlu potječe iz procesa razgradnje matičnih stijena, najviše *apatita*. Sadržaj mu je u litosferi vrlo promjenjiv (0,02-0,15 %) jer ulazi u sastav velikog broja različito topljivih minerala, ali se nalazi i vezan u organskoj tvari tla. Većina poljoprivrednih tala sadrže između 40 i 80 % anorganski vezanog i 20-60 % organski vezanog fosfora. Oba oblika dijele se u više grupa koje obuhvaćaju prilično raznolike spojeve fosfora. Podjela se temelji na topljivosti tih spojeva u različitim otapalima, a ekstraktibilnost fosfora iz tla pokazuje tablica 6.9.

Neorganski oblici obuhvaćaju niz kemijski raznoliko topljivih, stoga i biljkama različito raspoloživih fosfornih spojeva:

a) Vodotopljivi fosfati su najmanje zastupljena frakcija fosfora u tlu. U vodenoj fazi tla nalazi se u prosjeku manje od 1 kg ha^{-1} fosfora, dok porastom njihove koncentracije (nakon gnojidbe) dolazi do brze transformacije u manje topljive oblike. Ta *kritična koncentracija ravnoteže* vodotopljivih i manje topljivih oblika fosfora ovisi prije svega o količini fosfora koja se već nalazi u tlu (slika 6.19.). Utvrđivanje te vrijednosti značajan je zadatak agrokemije jer ona pokazuje razinu raspoloživog fosfora za ishranu bilja nakon gnojidbe fosforom, odnosno stupanj njegove efikasnosti.

Tablica 6.9. Prosječna količina topljivog P dobivenog ekstrakcijom iz tla različitim otopinama (Marschner, 1986.)

Ekstrakcijska otopina	pH otopine	P $\text{mg } 100^{-1} \text{ g}^{-1}$ tla
NH_4F	7,0	14,8
NH_4F	< 2,0	7,4
$\text{H}_2\text{SO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	3,0	3,6
octena kiselina	2,6	2,5
NaHCO_3	8,5	2,4
kalcijev laktat	3,8	1,2



Slika 6.19. Korelacija između raspoloživosti P i visine prinosa kao determinanta kritične koncentracije fosfora u tlu

b) Fosfor topljiv u kiselinama obično se dalje dijeli u dvije podfrakcije, ovisno o tome da li se spojevi s fosforom otapaju u slabim ili jakim kiselinama. Spojevi koji se razlažu u slabim kiselinama vrlo su heterogena grupa koja se teško može točno odrediti, a ima veliki značaj u ishrani bilja. Najčešće se topljivost u slabim kiselinama kod nas određuje u otopini *amonijeva acetatlaktata* pa se govori o *AL-topljivom fosforu*. AL otopina (pH = 3,75) razlaže sekundarne kalcijeve i druge fosfate, ali i svježe istaložene tercijarne fosfate koji tada sadrže dosta kristalne vode te su u amorfnom stanju. Druga podfrakcija, koja je topljiva u jakim kiselinama, obuhvaća tercijarne fosfate tipa *apatita* i *fosforita*, te aluminijeve i

željezove fosfate, dakle fosfor koji se obično svrstava u teško raspoložive rezerve tla.

c) Fosfor topljiv u lužnatim otopinama je frakcija koja zaostaje u tlu nakon tretmana s kiselinama i djelomično je topljiva u lužnatoj sredini. Najčešće se u tu svrhu koristi $0,25 \text{ mol dm}^{-3}$ NaOH. Kod $\text{pH} > 8$ otapaju se djelomično fosfati željeza i aluminija koji pritom grade hidrokside u obliku taloga. Hidroksilni ioni mogu zamijeniti fosfatne anione na izmjenjivačkom kompleksu tla, ako ih uopće ima. Količina fosfora koja se oslobađa u lužnatim otopinama ovisi prije svega o količini kalcija u tlu i kreće se između 50 i 600 ppm.

d) Teško topljivi fosfor je grupa spojeva čiji se sadržaj u nekom tlu neznatno mijenja, a tako vezani fosfor potpuno je neraspoloživ za ishranu bilja. Otapanje je moguće izvesti u smjesi kiselina HCl i HNO_3 (*zlatotopka*) ili u fluorovodičnoj kiselini (HF) nakon potpune razgradnje svih minerala tla, jer fosfor iz ove frakcije uglavnom zamjenjuje silicij u kristalnim rešetkama minerala.

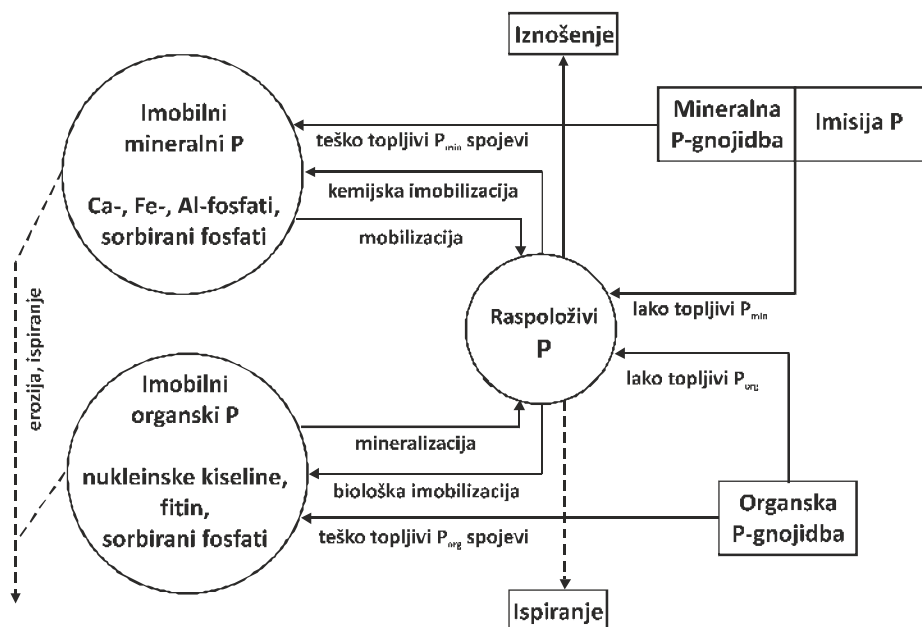
Organski fosfor tla akumulira se u tlu pretežito nakon razgradnje biljnih ostataka, ali jedan dio nastaje kao posljedica mikrobioloških kemotsintetskih procesa u tlu. Ako organska tvar sadrži manje od 0,2 % fosfora u procesu mineralizacije, sav oslobođeni fosfor koriste mikroorganizmi za svoje potrebe i više biljke ostaju privremeno uskraćene za tako oslobođeni fosfor, sve do uginuća mikroorganizama. Pojava se označava kao *biološka imobilizacija* fosfora.

Sadržaj organske frakcije fosfora značajno ovisi o tipu tla, a njezino frakcioniranje može se izvesti u kiselinama i lužinama slično mineralnom fosforu tla. Za ishranu bilja povoljnija je frakcija topljiva u kiselinama jer brže podliježe procesu mineralizacije. Međutim, tla koju su duže vremena u eksploataciji imaju veći sadržaj frakcije topljive u lužinama pa je na njima gnojidba fosforom efikasnija jer je povećanje prinosa veće, bez obzira na količinu pristupačnog fosfora u tlu.

Razumljivo je kako između sadržaja ugljika u tlu i organske frakcije fosfora postoji uska korelacijska veza. Organski oblici u tlu su manjim dijelom fosfolipidi, nukleinske kiseline (38-58 %) i *heksafosforni ester inozitola fitin* (41-49 %). Intenzitet mineralizacije organskog fosfora značajno ovisi o temperaturi i količini svježe organske tvari u tlu kao neophodnom izvoru energije za razvoj mikroorganizama. Slično mineralizaciji dušika, vrlo je važan omjer između ugljika i fosfora u organskoj tvari. Do imobilizacije fosfora dolazi ako je omjer C/P veći od 300:1, a mobilizacije tek kad se omjer suzi na 200:1. Stoga se opravdano smatra kako količina raspoloživog fosfora za ishranu bilja pretežito ovisi o sadržaju neorganskog fosfora u tlu.

Kruženje fosfora u prirodi prikazuje slika 6.20. Osnovni faktor koji određuje pristupačnost fosfora je pH reakcija tla, odnosno zasićenost adsorpcijskog kompleksa bazama. U neutralnim i lužnatim tlima prevladavaju *kalcijevi fosfati*

koji su lakše topljivi od *fosfata seskvioksida* u kiselim tlima (slika 6.21.). Budući da raspoloživost fosfora snažno utječe na efektivnu plodnost tla, razumljiva je potreba za održavanjem ili prilagođavanjem pH-vrijednosti tla. Stoga kalcizacija kiselih tala često snažnije utječe na povećanje prinosa mnogih poljoprivrednih vrsta nego gnojidba fosforom na kiselim tlima. Smatra se da je 1-2 % CaCO_3 u tlu najpovoljniji sadržaj kalcija u odnosu na topljivost fosfornih spojeva. Raspoloživost fosfora značajno ovisi još o stanju vlažnosti tla i brzini obnavljanja fosforne kiseline u vodenoj fazi tla.



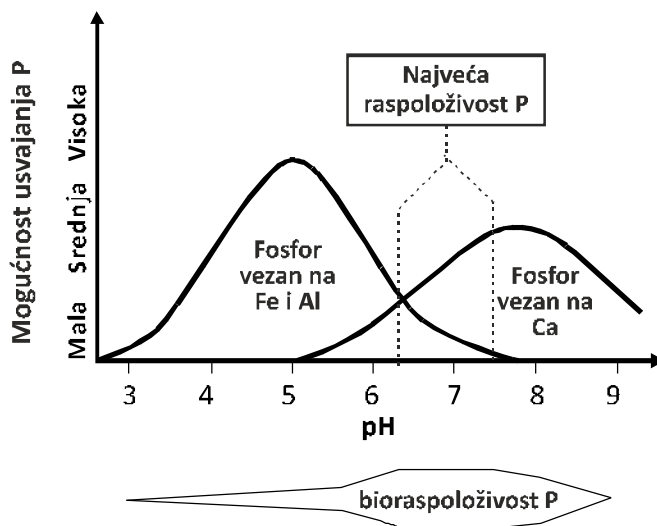
Slika 6.20. Podrijetlo, dinamika i gubitak fosfora iz tla (Welte, 1982.)

6.3.2. Fosfor u biljkama

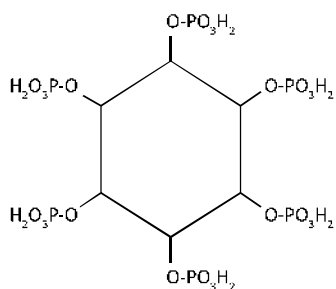
Biljke usvajaju fosfor isključivo u anionskom obliku i to kao H_2PO_4^- i HPO_4^{2-} , a ugrađuju ga, za razliku od dušika i sumpora, u organsku tvar bez redukcije, što je evolucijski razumljivo jer se na fosforu temelji metabolizam energije svih živih bića.

Ortofosfatna kiselina različito disocira ovisno o pH-vrijednosti pa je tako porastom pH sve više HPO_4^{2-} i PO_4^{3-} što se nepovoljno odražava na usvajanje fosfora. Postoje mišljenja da se aktivno usvaja samo ion H_2PO_4^- što objašnjava bolje usvajanje fosfora u slabo kiseloj sredini. Usvajanje fosfora iz vodene faze tla je vrlo brz proces, ali je, nažalost, koncentracija H_2PO_4^- u tlu vrlo mala ($\sim 10^{-5}$ mol dm^{-3}), dok je uspostavljanje dinamičke ravnoteže, nadoknadom iona fosfata

iz topljivih oblika fosfora, znatno sporiji proces. Stoga procjena raspoloživosti fosfora preko utvrđivanja njegovog hranidbenog potencijala često ne daje dobre rezultate, posebice za biljke kraće vegetacije.



Slika 6.21. Utjecaj pH-vrijednosti na raspoloživost fosfora



Slika 6.22. Struktura mioinozitol heksafosfata (fitinska kiselina)

Koncentracija fosfora u biljkama prosječno je 0,3-0,5 %. Reprodukcijski dijelovi i mlađa tkiva sadrže relativno više anorganskog fosfora. Najveće potrebe biljaka za fosforom su na samom početku vegetacije u intenzivnom razvoju korijenovog sustava i kod prijelaza iz vegetacijske u reprodukcijsku fazu života. Rana potreba biljaka za fosforom često uzrokuje nakon nicanja biljaka njegov akutni nedostatak u uvjetima kad je temperatura tla još niska ili korijen

nema dovoljno kisika, uglavnom zbog suviška vlage. Pokretljivost fosfora u biljci je dobra u oba smjera.

Između raspoloživosti i usvajanja tri glavna hranidbena elementa postoji složen međusobni odnos koji je ilustriran primjerom pšenice stare 30 dana (tablica 6.10.).

Fosfor je konstituent važnih organskih spojeva. Sastojak je *fosfatida, nukleotida, nukleinskih kiselina, enzima* itd., a kao rezerva fosfor je najčešće vezan u *fitinskoj kiselini* (slika 6.22.). Neorganski fosfor u biljci sudjeluje i u održavanju osmotskog tlaka. Značaj mu je izuzetan u aktivaciji većine organskih spojeva jer omogućuje savlađivanje energetske prepreke u biokemijsko-fiziološkim reakcijama (metabolijska aktivacija supstrata).

Tablica 6.10. Prinos suhe tvari i sadržaj N, P i K u mladoj pšenici (30 dana), *Vukadinović i sur. (1986.)*

Varijanta gnojidbe	ST kg ha ⁻¹	Iznošenje elemenata u kg ha ⁻¹				
		N	P	K	Ca	Mg
0	362,9	15,96	1,20	12,51	0,97	0,80
NP	411,4	23,08	1,95	13,39	1,04	0,91
NK	368,3	22,48	0,99	13,41	0,94	0,71
PK	445,7	19,88	2,79	19,42	1,05	0,93
NPK	641,8	30,97	3,72	27,19	1,25	1,27

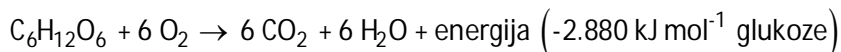
Kao sastavni dio različitih koenzima i prostetičkih grupa fosfor sudjeluje u važnim metaboličkim procesima. Sastavni je dio *purinskih, pirimidinskih, nikotinamidnih, flavinskih, piridoksalfosfatnih i tiaminfosfatnih koenzima, koenzima-A* i dr. Stoga fosfor ima dvije nezamjenjive funkcije:

- sudjeluje u metabolizmu energije ugljikohidratnih, dušikovih i velikog broja drugih spojeva, uključujući i alternativne putove (npr. OPP) i
- konstituent je DNK i ima nezamjenjivu ulogu u nasljeđivanju.

Svi živi organizmi zahtijevaju energiju za održavanje života, rast i razvitak. Rijetko se fiziološki procesi odvijaju spontano (*egzotermno*) pa kemijski vezana energija omogućuje odvijanje *endotermnih reakcija* i procesa (koji zahtijevaju energetski input), odnosno biološki rad svih stanica i organizama, a za to je potreban fosfor. S obzirom na opskrbu energijom, dva su temeljna tipa odnosa organizama i okoliša: *autotrofi* i *heterotrofi*. Prvi sintetiziraju hranu fotosintezom (zelene biljke, *primarni proizvođači*), dok *heterotrofi* koriste već gotovu organsku tvar ili hranu (*potrošači*).

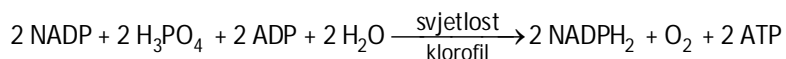
Energija oslobođena iz "nestabilnih" molekula (potencijalna energija) u egzergonim reakcijama koristi se za "aktivaciju" stabilnih molekula i "pogon" endergonih reakcija, odnosno odvijanje fizioloških procesa. Međutim, mjesta dobivanja energije i njene potrošnje najčešće su udaljeni zbog organizacije stanice i regulacije procesa, odnosno *kompartmentnosti stanice* pa se energija "konzervira" u obliku kemijske energije *ATP*, koji je svojevrsna univerzalna "energetska valuta". Direktnom hidrolizom nestabilne fosfatne veze nastaje *ADP* uz oslobađanje toplinske energije ($\Delta G = -30,5 \text{ kJ mol}^{-1}$ za standardne uvjete), a prijenosom *terminalne fosfatne grupe* enzimskom katalizom na druge spojeve oni se "aktiviraju" (*fosforiliraju*), odnosno tada sadrže dovoljno slobodne

energije da "preskoče" *energetsku barijeru* i stupe u reakciju. Stanično disanje je otuda postupno (enzimatsko) razlaganje složenih molekula do CO₂ i H₂O uz oslobađanje energije "rearanžiranjem" elektrona unutar kemijskih veza u nizu oksidoredukcijskih koraka. *Neto reakcija disanja* je:



U disanju ne sudjeluju samo ugljikohidrati, već i masti, organske kiseline, rezervni proteini, ili čak i konstitucijski proteini kad nedostaje visokoenergetskih molekula.

Premda se sinteza ATP-a i NADP-a može odvijati bez svjetlosti na račun energije različitih organskih spojeva, sveukupan metabolizam energije započinje *fotofosforilacijom*, odnosno sintezom ATP-a u procesu fotofosforilacije. Niz fotokemijskih reakcija, u kojima se energija svjetlosti transformira u energiju kemijskih (*makroergijskih*) veza, sumarno se može predstaviti jednadžbom:



Energija akumulirana u spojevima ATP i NADPH (u svijetloj fazi fotosinteze) nije stabilna i transformira se u energiju ugljikohidrata u tamnom dijelu fotosinteze.

6.3.3. Nedostatak i suvišak fosfora

Nedostatak fosfora vrlo je česta pojava, a prvi simptom je slab rast biljaka. Kod jače izraženog nedostatka slabo se razvija korijenov sustav, cvjetanje i zrioba biljaka kasne, smanjena je tvorba proteina uz povišen sadržaj amida i nizak sadržaj vitamina. Općenito, hranidbena vrijednost poljoprivrednih proizvoda je smanjena uz znatno niži prinos.

Simptomi nedostatka fosfora zapažaju se najprije u tamnozelenoj boji lišća, često uz crvenkastu nijansu, biljke su manje, lišće kasni u razvoju uz pojavu kloroze i, najzad, starije lišće izumire. Tamnija boja lišća u prvoj fazi manjka fosfora je posljedica prestanka njihovog rasta uz gotovo normalnu sintezu klorofila. Pojava crvenkaste ili purpurne nijanse uzrokovana je povećanom sintezom *antocijana* što signalizira duži nedostatak fosfora. Kod strnih žita i kukuruza crvenkasta se boja javlja tipično na rukavcima donjeg lišća. Fosfor se brzo premješta u biljci iz manje aktivnih tkiva i organa u mlađe i vitalnije dijelove. Zbog toga se kod nedovoljne raspoloživosti fosfora intenzivira aktivnost fosfataza.

Suvišak fosfora u prirodnim uvjetima relativno je rijetka pojava i događa se kad koncentracija fosfora u suhoj tvari prijeđe 1 % uz čest nedostatak cinka i željeza. Simptomi suviška su usporen rast, tamnomrke pjege na lišću koje se šire prema

bazi lista i lišće konačno opada. Veće količine fosfora ubrzavaju metabolizam i dovode do skraćivanja vegetacije, prijevremenog cvjetanja i starenja biljaka. Ubrzavanje rasta i brz razvitak biljaka skraćuje etape organogeneze što pogoduje postrnim usjevima, ali kod glavnog usjeva može skratiti period tvorbe plodova ili nalijevanja zrna.

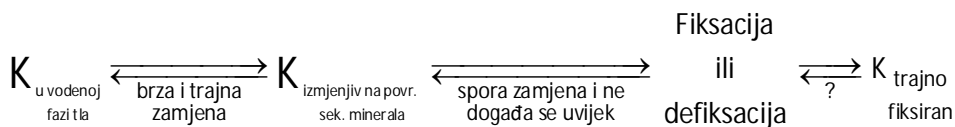
6.4. KALIJ

Kalij je alkalni metal velike rasprostranjenosti u prirodi. U tlu i biljkama nalazi se samo kao jednovalentni kation (K^+) s redukcijским svojstvima. Ne ulazi u sastav organske tvari, već se labavo veže, pretežito na proteine, ali svejedno ima vitalnu ulogu u uzgoju biljaka. Naime, kalij ima ulogu specifičnog aktivatora, odnosno modulatora aktivnosti enzima, ali i elektrolita jer 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^+ , kalij je izuzetno važan u regulaciji 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.

6.4.1. Kalij u tlu

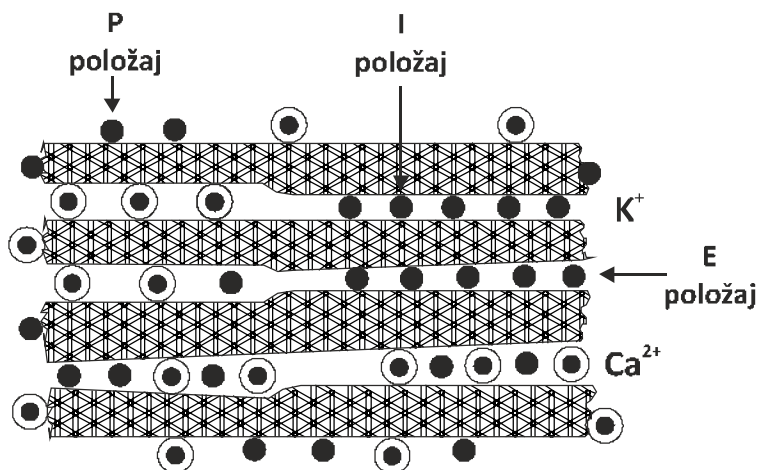
Kalij u tlu potječe iz primarnih minerala kao što su *feldspati*, *liskuni* i drugi. Njihovim raspadanjem oslobađa se kalij koji se najvećim dijelom odmah veže na adsorpcijski kompleks tla te mu je pokretljivost i opasnost od ispiranja iz tla mala, osim na lakšim, pjeskovitim tlima.

Raspoloživost kalija usko je povezana s procesima sorpcije i desorpcije pri čemu i drugi kationi utječu na nju (slika 6.24.). Budući da pristupačnost izmjenjivih kationa ovisi i o njihovim parcijalnim koncentracijama u vodenoj fazi tla, odnosno njihove slobodne energije po *Gibbsu*, raspoloživost kalija određena je njegovom ukupnom (Q_K) i neposredno pristupačnom količinom (I_K). Pojava čvrstog vezivanja kalija na specifične lokacije nekih glinenih minerala označava se kao *fiksacija* (slika 6.23.) i izravno utječe na usvajanje kalija i učinak K-gnojidbe. Između oblika kalija u tlu postoji stanje dinamičke ravnoteže koja se može prikazati na sljedeći način:



Prema tome, samo se mobilni kalij (u vodenoj fazi tla i izmjenjivo vezan na vanjskim površinama minerala gline) može smatrati potpuno pristupačnim za ishranu bilja, dok fiksirani oblik sporo nadoknađuje manjak u izmjenjivoj fazi, ali se može i nepovratno fiksirati. Sorpcija kalija dovodi do istiskivanja drugih kationa s tijela sorpcije, posebice viševalentnih od kojih su najznačajniji Ca^{2+} i Mg^{2+} . Oba navedena kationa s neselektivno vezanim kalijem (na vanjskim površinama minerala gline) pokazuju jaku mogućnost zamjene. Prisutnost većeg broja kationa u vodenoj fazi tla i različito čvrsto vezanih na tijelu sorpcije koristi se za utvrđivanje raspoloživosti kalija na temelju njegovog kemijskog potencijala ili aktivitetnog omjera (slika 6.25.).

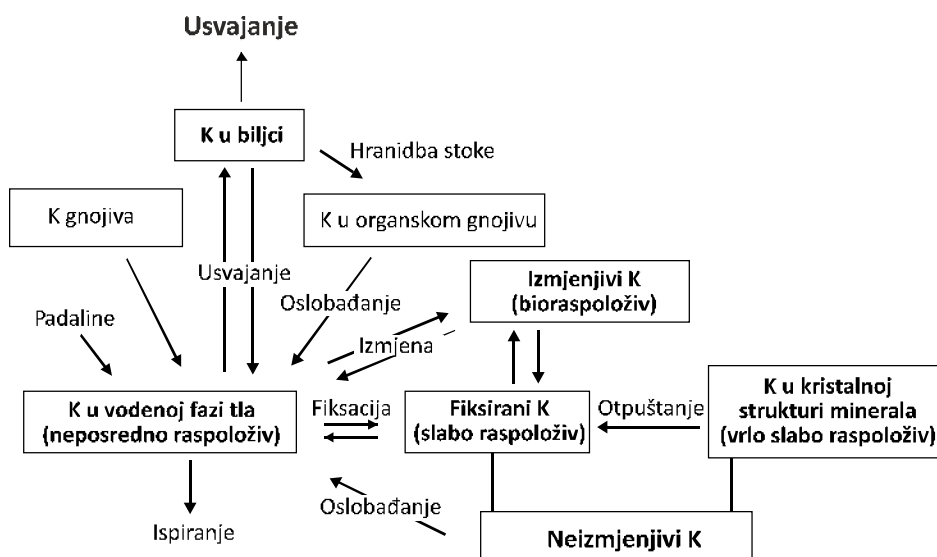
Intenzitet fiksacije kalija u nekom tlu izravno ovisi o sadržaju i sastavu gline. Sukladno tome sposobnost fiksacije nemaju *kaolinit*, *kloriti* i *glimeri*, dok malu fiksaciju pokazuje *montmorilonit*, promjenjivu *ilit* (ovisno od stupnja raspadnutosti), a jaku *vermikulit*. Fiksacija je jača u oraničnom sloju koji je, nasuprot dubljim slojevima soluma, podvrgnut naizmjeničnom sušenju i vlaženju. NH_4^+ ion zbog sličnih svojstava (promjer i naboj) lako zamjenjuje specifično vezani K^+ (iz međuslojnih prostora sekundarnih minerala) pa se koristi kod određivanja K-fiksacijske moći tala.



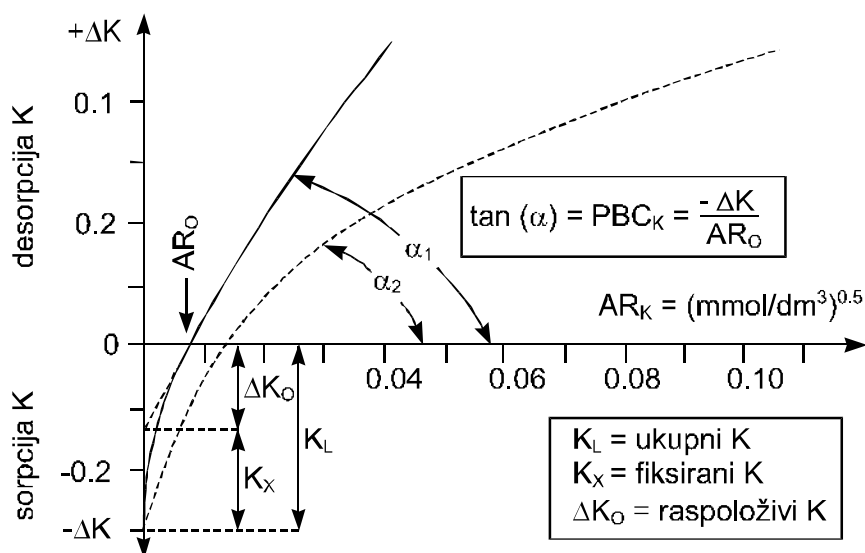
Slika 6.23. Sorpcija i fiksacija kalija na sekundarne minerale tla (Mengel and Kirkby, 1978.)

Ukupan sadržaj kalija u tlima prilično je visok te je u prosjeku 0,2-3,0 % što za oranični sloj do 20 cm dubine iznosi između 10 i 50 t ha⁻¹. Viši sadržaj kalija imaju teška, glinasta tla, dok su organske rezerve kalija vrlo male. Humus sadrži manje od 0,1 % kalija pa je za ishranu bilja isključivo odgovoran kalij na

adsorpcijskom kompleksu. Izmjenjiva količina kalija u tlu prosječno je 40-400 ppm što je oko 2 % prosječnog kapaciteta adsorpcije. Smatra se najpovoljnijim za ishranu bilja kada je na adsorpcijskom kompleksu 2,0-3,5 % K (po nekim istraživačima 3-5 %). Na kalij u vodenoj fazi tla otpada svega oko 1 % izmjenjivo vezanog kalija u nekom tlu.



Slika 6.24. Ciklus kalija u sustavu tlo-biljka (Syers, 1998.)



Slika 6.25. Aktivitetni omjer (AR_K) i puferni kapacitet za kalij (PBC_K) u dva tipa tla (Vukadinović i dr., 1988.)

Tablica 6.11. Utjecaj gnojidbe kalijem na fiksaciju kalija i AR_K na tri tipa tla u laboratorijskim uvjetima (Vukadinović *et al.*, 1988.)

K gnojidba mg 100 g ⁻¹ tla	Gundinci		Cerna		St. Mikanovci	
	Fiks. %	AR_K	Fiks. %	AR_K	Fiks. %	AR_K
10	95,5	0,27	94,2	0,32	95,0	0,34
25	83,4	0,48	91,2	0,42	94,8	0,52
50	77,3	0,56	86,8	0,63	91,9	0,75
100	70,0	1,47	76,0	1,77	80,9	1,47

$$AR_K = (\text{mmol dm}^{-3})^{0,5} \times 10^{-3}$$

Slično kao i kod fosfora, zapaženo je kako se nakon gnojidbe kalij podvrgava nekim promjenama, vjerojatno fiksaciji u međulamelarne prostore sekundarnih minerala, uslijed čega mu vremenom opada raspoloživost. Ta činjenica objašnjava pojavu slabe reakcije biljaka na gnojidbu kalijem u prvoj godini na tlima siromašno opskrbljenim kalijem. Potrebno je više uzastopnih primjena kalija kako bi se povećala djelotvornost gnojidbe (tablica 6.11.).

6.4.2. Kalij u biljkama

Fiziološka uloga kalija, kao neophodnog elementa biljne ishrane, kasno je rasvijetljena budući da kalij nije građevni element niti jednog spoja žive tvari. Danas se smatra kako se uloga kalija može razvrstati u dvije osnovne funkcije:

- aktivacija enzima i
- regulacija permeabilnosti živih membrana.

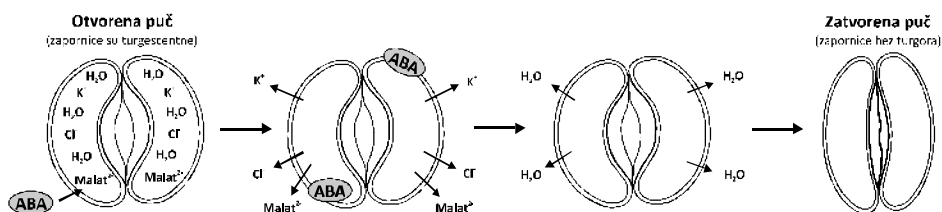
Kalij aktivira ili modulira rad 40-ak enzima (promjenom uvjeta unutar mikro okruženja, npr. pH, ionska koncentracija, temperatura, prisutnost ili odsutnost inhibitora i dr.). To je svojstvo vjerojatno povezano i s malom veličinom atoma kalija te slično rubidiju može mijenjati konformaciju proteina i oslobađati aktivna mjesta na enzimima i tako stimulirati vezu s odgovarajućim supstratima. Također, velika koncentracija K^+ u protoplazmi oduzima konstitucijsku vodu proteina za potrebe svog hidratacijskog omotača što uzrokuje konformacijske promjene, odnosno pojavu tzv. *efekta elektrokonformacijskog vezivanja*.

Kod dobre opskrbljenosti kalijem povećana je neto asimilacija uz bržu sintezu rezervnih tvari kao što su škrob, saharoza, lipidi i proteini. Na taj način kalij poboljšava kakvoću uz povećanje prinosa, djelomično i preko boljeg djelovanja drugih biogenih elemenata i faktora rasta.

Druga funkcija kalija najuže je povezana s njegovim *osmoregulacijskim djelovanjem*. Naime, kalij je najznačajniji elektrolit živih tkiva te neposredno utječe na održavanje turgora i regulaciju mehanizma rada puči (slika 6.26.). Od

ukupne količine usvojene vode, 90 % je tranzitna koja se gubi *evapotranspiracijom*, najvećim dijelom kroz puči pa one moraju biti otvorene veći dio vremena zbog asimilacije CO_2 . Zatvaranje puči predstavlja tek ograničenu kontrolu gubitka vode. Zapravo, mehanizam kontrole gubitka vode otvaranjem i zatvaranjem puči je složen (slika 6.26.) i u njemu sudjeluje *abscisinska kiselina* (ABA) koja signalizira zatvaranje puči u nedostatku vode. Suprotan efekt imaju ioni K^+ i Cl^- i malat koji djeluju suprotno i njihovo ulaženje u *stanice zapornice* uvjetuje otvaranje puči.

Utjecaj kalija na hidrataciju tkiva povezan je zapravo sa svim biokemijsko-fiziološkim procesima u živoj stanici, jer je voda sredina u kojoj se te reakcije odvijaju, ona je transportno sredstvo, izvor elektrona i protona u metabolizmu energije. Taj aspekt uloge kalija odavno je poznat, no razvitkom preciznih metoda mjerenja gradijenta pH i električnog potencijala između vanjske sredine i staničnog sadržaja, odnosno njezinih organela, uloga kalija u permeabilnosti živih membrana sve je jasnija. Naime, kalij utječe na transmembranski pH-gradijent potreban za sintezu ATP (prema kemiosmotskoj hipotezi *Mitchela*). U posljednje vrijeme više se ispituje i veza između ishrane kalijem i koncentracije ABA, odnosno utjecaj K na otpornost biljaka prema suši.



Slika 6.26. Regulacija mehanizma otvaranja i zatvaranja puči

Mehanizam usvajanja kalija funkcionira normalno samo kod dovoljne količine vode i kisika u supstratu. Budući da je aktivnost enzima ATPaze povezana s veličinom elektrokemijskog gradijenta, ona je stimulirana prisutnošću kalija te preko aktivacije transportnog sustava dolazi do boljeg usvajanja ostalih hraniva. Također, djelotvornost fosforilacije raste kod dobre opskrbljenosti kalijem što je značajno za bolje korištenje svjetlosne i kemijske energije u procesu fotosinteze.

Interesantno je spomenuti da natrij može djelomično zamijeniti kalij u njegovim fiziološkim funkcijama, ali samo na nespecifičan način, posebice kod *kaliofilnih biljaka* (biljke koje akumuliraju veću količinu ugljikohidrata, npr. šeć. repa, krumpir, kukuruz itd.). Naime, natrij slično kaliju, utječe na bolju hidratiziranost protoplazme, ali ne utječe na aktivaciju enzima jer mu je promjer u ionskom (hidratizirani ioni) obliku znatno veći od kalija.

Kod primjene viših doza dušika kalij smanjuje štetne učinke suviška povećavajući njegovu ugradnju u slabo topljive N-spojeve te tako djelotvorno sprječava i pad kakvoće mnogih poljoprivrednih proizvoda. Dobra ishranjenost kalijem

poboljšava vodno-retencijski kapacitet lišća uz učinkovitije korištenje vode pa dobra opskrbljenost kalijem umanjuje posljedice suše.

6.4.3. Nedostatak i suvišak kalija

Koncentracija kalija u biljkama dostiže ponekad 5 % na suhu tvar pa ga biljke zahtijevaju gotovo koliko i dušika (2-5 % u ST), a neke kaliofilne vrste i znatno više. Kalij se s pravom smatra elementom mladosti jer mu je koncentracija u mlađim biljkama u pravilu viša, najveći dio usvoji se do cvjetanja, ali ga često starije lišće sadrži ukupno više od mlađeg.

Nedostatak kalija, zbog njegove složene i važne funkcije u metabolizmu, odražava se na cjelokupan rast i razvitak biljaka. Rast biljaka je usporen, a kod nedostatka kalija dolazi do njegovog brzog premještanja iz starijih u mlađe, odnosno aktivne dijelove biljke. Stoga se simptomi nedostatka kalija prvo zapažaju na mlađem lišću koje je manje veličine, a kloroza se rijetko pojavljuje pa boja ostaje normalna ili je čak i tamnija (zbog usporenog rasta). Kod starijeg lišća se naknadno javlja tipična *rubna nekroza* (koja započinje od vrha) i list se često savija prema dolje. 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 ili 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.

Suvišak kalija izuzetno se rijetko javlja na poljoprivrednim tlima, a moguć je na zaslanjenim tlima ili kod višekratne obilne gnojidbe (u vrtovima, plastenicima i staklenicima). Tada se javljaju problemi s usvajanjem kalcija i magnezija, ali i nekih mikroelemenata (B, Zn i Mn).

6.5. KALCIJ

Kalcij je zemnoalkalni metal koji posjeduje sposobnost izgradnje kompleksnih spojeva, ali ne sudjeluje u građi žive tvari, osim u nekoliko manje važnih spojeva. Fiziološka funkcija mu je ipak vrlo značajna u ishrani bilja. Utječe na fizičko-kemijska svojstva protoplazme, aktivira 20-ak enzima, iako nespecifično, a nakuplja se u staničnim stijenkama, vakuolama, jezgri, kromosomima, kloroplastima i mitohodrijima te povećava stabilnost živih membrana i utječe na

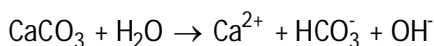
njihovu propustljivost. Kalcij ulazi u red vrlo rasprostranjenih elemenata litosfere (3,6 %).

6.5.1. Kalcij u tlu

Podrijetlom je kalcij tla iz primarnih minerala silicija i sekundarnih minerala kalcija kao što su *kalcit* (CaCO_3), *dolomit* ($\text{CaCO}_3 \times \text{MgCO}_3$), *gips* ($\text{CaSO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$), različiti kalcijevi fosfati itd. Njihovom razgradnjom oslobađa se kalcij koji je u tlu pretežito izmjenjivo sorbiran ili pak iznova gradi sekundarne minerale (sl. 6.27.).

Anorganske rezerve kalcija u tlima su prosječno 0,2-2,0 %, a u karbonatnim tlima često prelaze 10 % (tablica 6.12.). Organska rezerva kalcija u tlu je uglavnom bez značaja za ishranu bilja. Najveći dio pristupačnog kalcija (prosječno 400-4.000 ppm) je u izmjenjivom obliku pa Ca^{2+} zauzima nerijetko i preko 80 % adsorpcijskog kompleksa. U vodenoj fazi tla obično je svega 1-5 % od izmjenjive količine kalcija nekog tla, a najčešće je to između 20 i 150 ppm. Smatra se da uz koncentraciju kalcija ispod 1 mekv dm^{-3} u vodenoj fazi tla dolazi do pada prinosa.

Karbonatna tla (vapnena, krečnjačka) najčešće se javljaju u aridnim i semiaridnim klimatskim uvjetima (premda ih i ima i u vlažnim predjelima kad su formirana na karbonatnim stijenama), bogata su kalcijevim karbonatom u površinskom sloju (CaCO_3), pH im je između 7,5 i 8,5 zbog pufernog djelovanja hidrogenkarbonata:

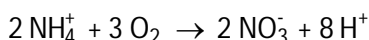


Tablica 6.12. Stupnjevi karbonatnosti tala

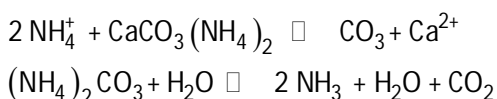
Karbonati u tlu (%)	Karbonatnost	Reakcija (oslobađanje CO_2 s 10 % HCl)
0	nekarbonatno tlo	nema reakcije
≤ 0,5	vrlo slabo karbonatno	vrlo slaba reakcija
0,5 - 2	slabo karbonatno	slaba reakcija, jedva vidljiva
2 - 4	umjereno karbonatno	slaba reakcija, vidljivi mjehurići, slab šum
4 - 10	srednje karbonatno	vidljiva reakcija, dugo oslob. mjehurića
≥ 10	jako karbonatno	jaka reakcija, snažno i šumno pjenušanje

Na karbonatnim tlima redovito se javljaju poremećaji u ishrani bilja, a manifestiraju se u vidu različitih tipova kloroza i usporenog rasta biljaka. Uzrok je slaba raspoloživost, najčešće teških metala kao i izravna toksičnost hidrogenkarbonatnog aniona (HCO_3^-). Prisutnost CaCO_3 izravno ili neizravno

utječe na raspoloživost dušika, fosfora, magnezija, kalija, mangana, cinka, bakra i željeza. Problemi u ishrani dušikom nastaju zbog brze nitrifikacije amonijakog oblika u nitratni anion pri pH 7,0-8,0 koji je podložan ispiranju:



Gubici dušika u vapnenim tlima nastaju i zbog volatilacije, pojave kojom označavamo gubitak N iz tla u obliku plinovitog amonijaka. Naime, u tlima bogatim kalcijem amonijev ion lako reagira nastankom nestabilnog amonijevog karbonata koji se pod utjecajem vode transformira do plinovitog amonijaka:



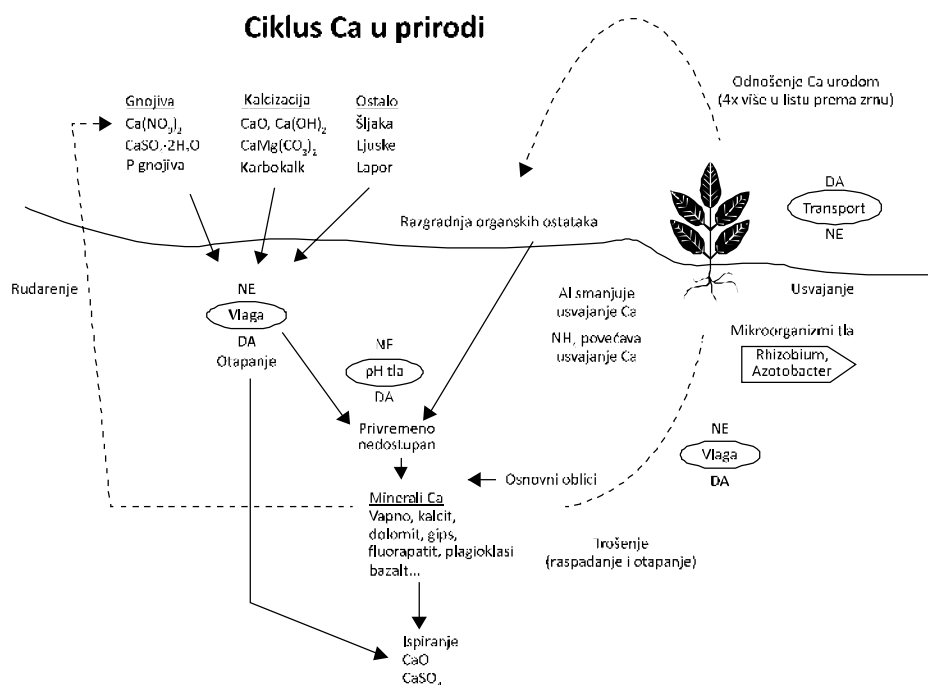
U kiselim tlima znatno je manje kalcija te se u praksi vrlo često javlja potreba za kalcizacijom kao agrotehničkom mjerom primjene vapnenih materijala radi neutralizacije zemljišne kiselosti. Agrotehničku mjeru unošenja Ca u tlo treba razlikovati od kalcifikacije, jer taj izraz označava formiranje sekundarnih minerala kalcija ili njegovih soli.

Nezamjenjiva je uloga kalcija u održavanju pH-vrijednosti tla jer on indirektno utječe na raspoloživost svih drugih elemenata, najviše B, Fe (*Fe-kloroza*), Mn, Zn i Cu. Kalcij je vrlo važan za održavanje strukture tla jer zajedno s humusnim tvarima omogućuje povezivanje njegovih čestica u strukturne agregate pa posredno snažno utječe na vodnozračni režim tla i oksido-redukcijske procese, odnosno izrazito povećava njegovu biogenost (povoljan utjecaj na proces amonifikacije, nitrifikacije, biološku fiksaciju dušika, oksidaciju sumpora itd.).

Acidifikacija poljoprivrednih tala Hrvatske veliki je problem (više od 50 % poljoprivrednih tala je kiselo), a trend pada pH ponajviše je prisutan na tlima uz konvencionalnu i intenzivnu poljoprivredu. Niska pH-vrijednost dovodi do niza negativnih pojava u tlu, npr. uzrokuje deficit kalcija i magnezija (a time i kvarenje strukture tla), toksičnost aluminija i/ili mangana, smanjene raspoloživosti fosfora, nisku efikasnost gnojidbe dušikom, fosforom i kalijem uz usporen rast i razvitak biljaka te konačno uzrokuje niži prinos i njegovu lošiju kakvoću. Stoga se kao obvezna mjera popravke kiselih tala preporuča kalcizacija (tablice 6.13. i 6.14.), ali uz detaljnu kemijsku analizu tla i uvažavanje ostalih mjera popravke (*humizacija, fosfatizacija*, primjena mikroelemenata i dr.).

U ekstremno kiselim tlima, kod pH < 4,0, dolazi do izravne toksičnosti H⁺ (više biljke ne uspijevaju ispod pH ≤ 3,7), kod pH < 5 česta je toksičnost iona Al³⁺ i Mn²⁺, a kad je pH > 4,2 toksičnost H⁺ iona je neizravne naravi i to putem aktivacije teških metala, ali i uz poremećaj u sastavu "korisne mikroflore". Naročito je slaba *nodulacija* leguminoza bakterijama iz roda *Rhizobium* i *Bradyrhizobium*. Na temelju brojnih istraživanja smatra se optimalnim kada je na adsorpcijskom kompleksu 65-85 % Ca, 5-15 % Mg i 2-3,5 % K, odnosno za

šećernu repu je povoljno kada je na adsorpcijskom kompleksu više od 85 % baza (ne manje od 65 %) uz ≥ 70 % Ca.



Slika 6.27. Ciklus kalcija u tlu

Tablica 6.13. Utjecaj kalcizacije i fosfatizacije na promjenu hidrolitičke kiselosti pseudogleja (Bertić i dr., 1985.)

Gnojidba P_2O_5 kg ha ⁻¹	Kalcizacija ($CaCO_3$ t ha ⁻¹)						Utjecaj fosfora
	0	1	5	10	15	20	
120	16,5	14,7	10,5	6,5	3,4	1,7	8,9
240	15,6	14,0	8,7	7,1	3,6	1,6	8,4
480	15,8	15,3	7,1	6,4	2,5	1,6	8,1
Utjecaj $CaCO_3$	16,0	14,7	8,8	6,7	3,2	1,6	8,5

Kalcij se gubi ispiranjem iz kiselih tala ili kad je količina oborina veća od 600-700 mm god⁻¹. U takvim uvjetima ispiranje je prosječno 80-100 kg Ca ha⁻¹ god⁻¹, a često i nekoliko puta više, posebice u blizini industrijskih područja s *kiselim kišama*.

Za utvrđivanje potrebe u kalcizaciji kiselih tala koristi se vrlo veliki broj različitih kemijskih metoda. Ipak, vrlo pouzdano je određivanje količine materijala za kalcizaciju pomoću hidrolitičke kiselosti tla. Kad je ona viša od 4 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹ (ili 4

mekv H⁺/100 g tla) za utvrđivanje potrebe kalcizacije može se primijeniti sljedeći proračun:

$$\begin{aligned}
 1 \text{ cmol}^{(+)}\text{H kg}^{-1} &= 1 \text{ cmol}^{(+)}\text{Ca kg}^{-1} \text{ tla} \\
 &= 20 \text{ mg Ca } 100 \text{ g}^{-1} \text{ tla} \\
 &= 28 \text{ mg CaO } 100 \text{ g}^{-1} \text{ tla} \\
 &= 840 \text{ kg CaO } 3.000.000^{-1} \text{ kg (20 cm dubine uz } \rho_v = 1,5 \text{ kg dm}^{-3})
 \end{aligned}$$

Dakle, za svaki cmol⁽⁺⁾H kg⁻¹ potrebno je za neutralizaciju primijeniti 840 kg CaO ha⁻¹ do dubine od 20 cm.

Kalcizacija ekstremno kiselih tala mora uvažiti i količinu izmjenjivog aluminija, a jedan od empirijskih proračuna potrebne količine Ca (*Cochrane et al.*, 1980) za njegovu neutralizaciju je sljedeći:

$$\text{CaCO}_3(\text{t ha}^{-1}) = 1,8 \times \left\{ \frac{\text{Al} - \text{ASP} \times (\text{Al} + \text{Ca} + \text{Mg})}{100} \right\}$$

ASP = saturirani Al u % ($\text{Al}_{\text{izm}} / \text{KIK} \times 100$)

Al = izmjenjivi Al (u cmol⁽⁺⁾ Al kg⁻¹ tla)

Ca i Mg = izmjenjivi Ca i Mg (cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹ tla)

Potrebe za kalcizacijom određuju se često pomoću tablica koje uzimaju u obzir vrijednost izmjenjive reakcije tla, njegov mehanički sastav i tip korištenja tla gdje je biljna vrsta odlučujući čimbenik. Takav pristup je vrlo rizičan jer može izazvati niz pogrešaka i ozbiljnih problema. Naime, kod unosa veće količine materijala za kalcizaciju od potrebne, porast oksidacijskih procesa može utjecati na pad organske tvari u tlu, pad raspoloživosti fosfora i svih mikroelemenata iz grupe teških metala, odnosno dugoročno do pada plodnosti. Potrebno je naglasiti kako je suvišak kalcija u tlu praktično nemoguće (apsolutno je neisplativo) ukloniti. S druge strane, prenizak intenzitet kalcizacije, s obzirom na cijenu i ograničeno vrijeme djelovanja, ekonomski je neisplativ.

Tablica 6.14. Utjecaj kalcizacije na prinos kukuruza, soje i pšenice (t ha⁻¹) na pseudogleju (višegodišnji prosjek) (*Kovačević i sur.*, 1993.)

Usjev	Kalcizacija t ha ⁻¹ CaCO ₃					Prosjek
	0	5	10	15	20	
Kukuruz	7,94	8,66	8,84	8,81	8,77	8,60
Soja	3,01	3,34	3,44	3,42	3,43	3,33
Pšenica	5,88	5,94	5,96	6,02	6,05	5,97
pH(KCl)	4,03	5,13	5,44	5,94	6,42	
Humus, %	1,91	1,99	1,80	1,91	1,79	
Fe ppm	44	24	14	9	5	

Generalno, tla čija je izmjenjiva kiselost $\text{pH} > 5,5$ ne bi trebalo kalcizirati. Kad je $\text{pH} 4,5$ - $5,5$, potreba za kalcizacijom je umjerena, a kad je $\text{pH} < 4,5$, kalcizacija je neophodna mjera popravke tla. Također, kad je hidrolitička kiselost tla ispod $4 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$, kalcizacija nije potrebna.

Kada je na raspolaganju samo podatak o izmjenjivom pH (u KCl), može se koristiti jednostavan, ali manje točan i često rizičan izraz za izračunavanje potrebe u kalcizaciji:

$$\text{CaO}_{\text{t ha}^{-1}} = \frac{\text{ciljni pH} - \text{izmjereni pH}}{7 - \text{izmjereni pH}} \times 2,8$$

Za proračun potrebe kalcizacije Osječko-baranjske županije (≥ 20.000 uzoraka tla, slika 6.28.) autori koriste kombinirani empirijsko-egzaktni postupak koji uzima u obzir zasićenost adsorpcijskog kompleksa tla bazama (BS %), pH u KCl-u, hidrolitičku kiselost, volumnu gustoću tla (g cm^{-3}) i dubinu oraničnog sloja do 30 cm. Prvi korak je procjena vrijednosti KIK-a (kationski izmjenjivački kapacitet) na temelju analize humusa u tlu i teksturne klase. U tu svrhu korištena je formula (*University of Minnesota, 2005.*):

$$\text{KIK}_{\text{cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}} = \frac{\text{humus \%} \times 200}{100} + \frac{\text{glina \%} \times 50}{100}$$

Pri uzimanju uzoraka procjenjuje se tekstura tla (za trajne se nasade laboratorijski utvrđuje). Hidrolitička kiselost tla se određuje u laboratoriju uvijek kada je $\text{pH-KCl} \leq 6,0$, a volumna gustoća i sadržaj gline su empirijske veličine (egzaktno utvrđene za potrebu zasnivanja trajnih nasada) izračunate iz teksturne klase na temelju statističke analize velikog broja rezultata egzaktnog određivanja mehaničkog sastava tala. Zasićenost adsorpcijskog kompleksa tla bazama izračunava se po formuli:

$$\text{BS \%} = \frac{\text{KIK} - \text{Hy}}{\text{KIK}} \times 100$$

Ciljna zasićenost KIK-a bazama (TBS %) ovisi o veličini KIK-a:

- $\text{KIK} < 19 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ tla, TBS je 90 %,
- $\text{KIK} 20$ - $28 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ to je 85 %,
- $\text{KIK} > 28 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ tla TBS je 80 %.

Na kraju se, uz pomoć procijenjene veličine KIK-a i ciljne razine njegove zasićenosti bazama, izračuna potrebna doza za kalcizaciju za usjeve u Ca t ha^{-1} za oranični sloj od 30 cm:

$$\text{Ca}_{\text{t ha}^{-1}} = \frac{\text{TBS \%} - \text{BS \%}}{100.000} \times \text{KIK}_{\text{cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}} \times 20 \times \rho_v \times 30$$

Izračun potrebe kalcizacije radi se samo za proizvodne površine kad je $\text{pH(KCl)} \leq 5,5$, bez obzira je li $\text{Hy} \leq 4 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$. Izračunata količina Ca preračunava se u

CaO t ha⁻¹ množenjem s faktorom 1,399, dok je za CaCO₃ t ha⁻¹ faktor 1,78, a za saturacijski mulj osječke Šećerane faktor je 1,483.

Kao materijal za kalcizaciju koristi se najčešće mljeveni kalcijev karbonat, ali i lapor, dolomit, saturacijski mulj iz šećerana ili drugi otpadni materijali koji sadrže kalcij. Saturacijski mulj pod imenom *Karbokalk* isporučuje Tvornica šećera iz Osijeka (godišnja produkcija ~ 35.000 t) koji sadrži 75 % CaCO₃, 7,20 % humusa (4,17 % C), 0,16 % N, 1,32 % Mg, 0,80 % P₂O₅, 0,28 % K₂O i male količine Cu (0,72 ppm), Zn (44,8 ppm) i Mn (868 ppm). Za praktičnu primjenu može se koristiti neutralizacijska vrijednost materijala za kalcizaciju. Ako je ona za CaCO₃ = 100 %, tada je CaO = 179 %, CaMg(CO₃)₂ = 119 % i Ca(OH)₂ = 136 %.

S finoćom mljevenja materijala za kalcizaciju raste i njihova djelotvornost (zbog porasta dodirne površine s česticama tla), ali krupniji materijal ima produženo djelovanje i treba ga koristiti za kalcizaciju prije zasnivanja trajnih nasada (tablica 6.15.).

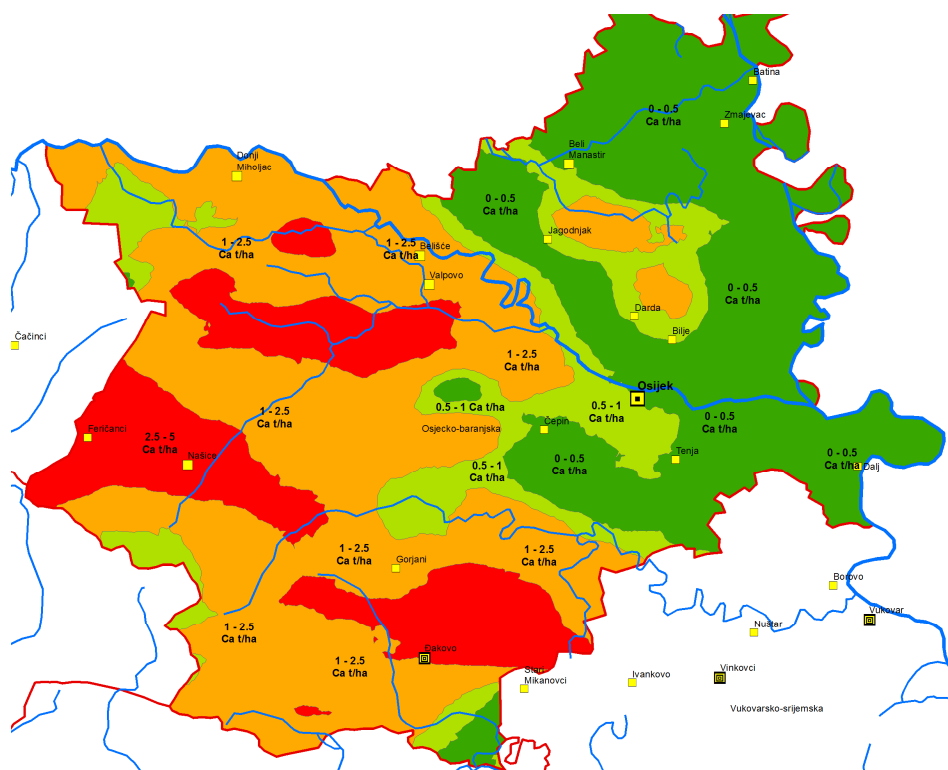
Kalcizacija je vrlo stara agrotehnička mjera (poznavali su ju stari Rimljani) i njezini pozitivni učinci na kiselim tlima dobro su poznati. Ipak, ona može izazvati drastične promjene u raspoloživosti hraniva, posebice fosfora i teških metala, pa se mora provoditi obazrivo. Mudro je postupno utjecati na promjenu pH (efekt na 3-4 godine), jer promjena od vrlo kisele do neutralne sredine radikalno mijenja uvjete (biološko-fizičko-kemijska svojstva tla), što onda zahtijeva meliorativne doze mineralnih gnojiva, prvenstveno fosfora i mikroelemenata (tablica 6.15.) te unošenje većih količina organskih gnojiva za humizaciju. Naime, kalcizacija je mjera koja radikalno mijenja biogenost tla (zbog promjene stanja oksidoredukcije) pa se pomiče ravnoteža tvorbe i razlaganja humusa u smjeru pojačane mineralizacije. To vodi, nakon početnog porasta efektivne plodnosti, u iscrpljivanje tla i pad produktivnosti. Stoga se u razvijenim zemljama može čuti poslovice "*Kalcizacija bogati očeve, a siromaši sinove*".

Tablica 6.15. Utjecaj krupnoće materijala na učinkovitost kalcizacije

Učinkovitost (%)		Krupnoća čestica	
u 1. godini	nakon 4. godine	mm	mesh
5	15	4,00	5
20	45	2,00	10
50	100	0,50	35
100	100	0,20	60

Nedostatak kalcija kod voćaka (jabuke i kruške) može se spriječiti prskanjem sprejom CaCl₂ ili Ca(NO₃)₂ kad je temperatura niža od 27 °C. Za jabuke se koristi koncentracija 360 g na 100 litara vode, a za kruške 120-180 g. Ovakav tretman pomaže i u stakleničkoj, odnosno plasteničkoj proizvodnji rajčice i paprike, jer je u vlažnoj atmosferi nizak intenzitet transpiracije, odnosno premještanje Ca u plodove na kojima nastaju tipične tamne mrlje (*bitter pit*) zbog pojačane

aktivnosti enzima *pektinaze* i propadanja parenhima zbog autolize staničnih stijenki.



Slika 6.28. Karta potrebe kalcijacije (Ca t ha^{-1}) Osječko-baranjske županije (kriging na temelju ~ 20.000 uzoraka, *Vukadinović, 2011.*)

6.5.2. Kalcij u biljkama

Kalcij se pretežito usvaja aktivnom zonom korijena, ali ima i mišljenja da je usvajanje kalcija meristemskim stanicama pasivan proces, a starijim, vakuoliziranim stanicama, aktivan. Usvajanje kalcija je znatno sporije prema većini drugih elemenata. Antagonizam kod usvajanja je u pravilu s kationima, ali i veće usvajanje nitrata, klorida i sulfata može smanjiti primanje kalcija.

Raspoloživost Ca određena je najprije pH-reakcijom tla. U ishrani bilja vrlo je važan omjer između sadržaja Ca/K (*Ehrenbergov zakon*) i odnos Ca/Mg (*Loewov zakon*), odnosno omjer $\text{K}/(\text{Ca} + \text{Mg})$. Kalcij se slično boru, a za razliku od K i Mg, u biljkama premješta ksilemom (*akropetalno*, prema gore) u transpiracijskoj struji, dok je *bazipetalno* kretanje (prema dolje floemom), kao i reutilizacija, vrlo

slaba ili se uopće ne događa. Bolje usvajanje kalcija, odnosno povećanu mobilnost Ca^{2+} u biljci, potpomaže gnojidba $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ te folijarna primjena kalcija.

Koncentracija kalcija u biljkama prosječno je oko 0,5 % u ST (0,1 do > 5 %) gdje je pretežito čvrsto vezan, a tek se vrlo mala količina pojavljuje kao elektrolit protoplazme. Trave sadrže u prosjeku manje kalcija od dikotiledona, a biljke ga usvajaju u ionskom obliku kao Ca^{2+} . U lišću je više kalcija u odnosu na korijen, dok je starije lišće bogatije od mlađeg. To ukazuje na teško premještanje kalcija u biljkama (iz fiziološki starih u mlađe, aktivnije dijelove), a *reutilizacija* (ponovno korištenje) je vjerojatno moguća samo iz korijena i stabla, ali ne i iz starijeg lišća gdje je i najviše kalcija.

Kalcij je konstituent vrlo malog broja organskih spojeva u biljci. Sudjeluje u građi *pektina* i *fitina* (*Ca-Mg-sol inozitolheksafosfata*) te se nalazi u kristalnim tijelima kao što su *oksalati* i *kalcit* i dr. U biljkama djeluje *Ca-fosfatni puferni sustav* pa na taj način kalcij sudjeluje u neutralizaciji suvišne kiselosti staničnog sadržaja, posebice vakuola. Budući da oksaloctena kiselina lako veže K, Na, N, P, B i Ca, a kalcij je faktor sinteze te kiseline, Ca je značajan za opskrbljenost biljaka navedenim elementima. Kalcij je čest i kao *CaCO₃ inkrustacija* u staničnim stijenkama biljaka.

Suprotno kaliju i drugim jednovalentnim kationima, kalcij, kao dvovalentni kation, smanjuje hidratiziranost protoplazme, povećava njezinu viskoznost i stabilizira protoplazmatske komponente. Značajna je uloga kalcija u stabilizaciji središnje pektinske lamele stanične stijenke (*Ca-pektinat*), ali i stabilnosti *kromosoma* i *stanične jezgre*. Također, kalcij je značajan za djelovanje *fitohormona*, posebice *β -indolactene kiseline* i preko nje utječe na rast biljaka i aktivnost *apikalnih meristema*. Stoga kod nedostatka Ca dolazi do neregularne diobe i diferencijacije meristemskih stanica uz čestu pojavu *poliploidije*.

Nasuprot drugim kationima, kalcij ima relativno malu ulogu u aktivaciji enzima pa se smatra da je njegovo djelovanje na metabolizam vezano uz regulaciju permeabilnosti membrana za različite tvari, ali i propustljivost elektrona i protona. Na taj način uloga kalcija je vrlo značajna u procesima fotosinteze i disanja. Također, značajna je zaštitna uloga kalcija od toksičnosti suviška mikroelemenata (izuzev Mo) uz porast otpornosti na povećan sadržaj soli u tlu kao i uloga senzora (*calmodulin* ili kalcijem modulirani proteini) egzogenih i endogenih podražaja kao i funkcija prijenosa signala, odnosno u obrambenom mehanizmu biljaka. Fiziološku ulogu kalcija kod njegovog deficita može djelomice preuzeti stroncij koji mu je kemijski vrlo sličan.

6.5.3. Nedostatak i suvišak kalcija

Kalcij se rijetko javlja u kritičnom nedostatku s izraženim simptomima deficita. Naime, probleme izaziva suviše nizak ili visok sadržaj kalcija u tlu što se preko pH-vrijednosti posredno odražava na raspoloživost većine drugih biogenih elemenata.

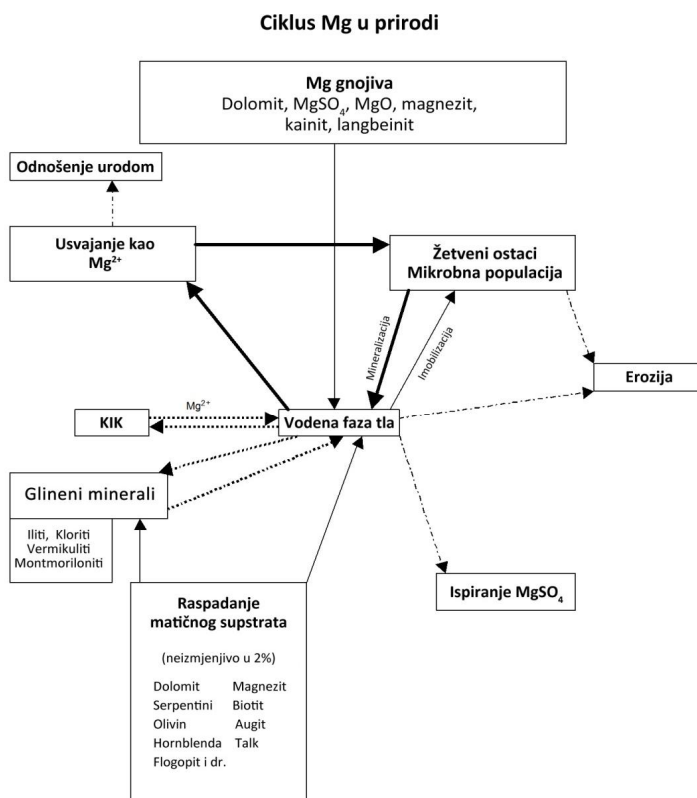
Simptomi nedostatka kalcija prvo se zapažaju na mladom lišću kao kloroza. Biljke sporije rastu, usporen je razvitak korijena (posebice kod nižih temperatura i povećane koncentracije soli), a biljke imaju "grmolik" izgled. U kasnijim fazama deficita kalcija zapaža se nekroza mlađeg lišća koja se širi od vrha i rubova pri čemu lisni nervi imaju tamnu boju. Lišće se često uvija, a biljke lako poliježu zbog slabljenja staničnih stijenki.

Nedostatak kalcija izaziva pojačanu aktivnost enzima *pektinaze* što prouzrokuje *autolize staničnih stijenki* parenhimskih stanica (posebice plodova jabuke - simptom "*bitter pit - gorke jamice*", rajčice i dr.). Javljaju se tamnosmeđe zone s odrvenjelim i začepljenim provodnim sudovima. Boja potječe od *melaninskih tvari* nastalih zbog oksidacije slobodnih *fenola* (koji se inače stabiliziraju u obliku Ca-kelata) u *kinone*. Također, biljke slabo opskrbljene kalcijem daju polen slabe klijavosti što stvara probleme kod oplodnje.

Neposredno djelovanje suviška kalcija do sada nije poznato, ali u takvim okolnostima dolazi do problema kod usvajanja gotovo svih biogenih elemenata i pojave simptoma njihovog nedostatka. Na području istočne Hrvatske vrlo su česti problemi izazvani *vapnenom klorozom* koja se manifestira simptomom deficita željeza i cinka, podjednako na trajnim nasadima kao i usjevima.

6.6. MAGNEZIJ

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.



Slika 6.29. Ciklus magnezija u tlu

6.6.1. Magnezij u tlu

Magnezij u tlu je podrijetlom iz primarnih minerala kao što su silikati, mnogi bazični minerali, te iz sekundarnih *magnezita* i *dolomita* (slika 6.29.). Nakon raspadanja 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. Organske rezerve magnezija, slično kalciju, su beznačajne u ishrani bilja. Izmjenjivi oblik magnezija zauzima do 20 % adsorpcijskog kompleksa tla ili 20-400 ppm, a povoljan sadržaj je između 5 i 15 % od KIK-a. Vrlo mala količina Mg^{2+} je u vodenoj fazi tla.

6.6.2. Magnezij u biljkama

Koncentracija magnezija u biljkama prosječno iznosi 0,1-1,0 % u ST, a u dobro opskrbljenim biljkama 0,15-0,35 % u ST. Reprodukcijski organi bogati su

magnezijem, slično fosforu. U biljkama je prosječno 50 % magnezija slobodno i stoga je ion Mg^{2+} vrlo značajan elektrolit (~ 30 % sorbiran na koloide protoplazme, a oko 15 % je ugrađeno u klorofil, kod slabe opskrbljenosti i više od 50 %). Najveću reakciju na magnezij pokazuju žitarice, posebice riža i pšenica, zatim različite trave, povrće, grožđe, duhan i voće.

U biljci je magnezij pokretljiviji od kalcija i, za razliku od njega, premješta se i floemom, odnosno i bazipetalno. Klorofil je jedini organski spoj čiji je magnezij konstitucijski element i više ga ima u mladom lišću koje raste. 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.

Tablica 6.16. Koncentracija magnezija (%) u izdancima kukuruza kod dvije vlažnosti tla i šest varijanata gnojidbe (*Irena Jug, 2008.*)

PVK	0 (kontrola)	250 kg ha ⁻¹				1000 kg ha ⁻¹	Prosjek
		KCl	K ₂ SO ₄	KCl + 20 kg sequestren	K ₂ SO ₄ + 20 kg FeSO ₄ × 7 H ₂ O	K ₂ SO ₄	
50 %	0,47	0,50	0,42	0,48	0,47	0,27	0,44
100 %	0,34	0,25	0,22	0,25	0,22	0,18	0,24
Prosjek	0,41	0,38	0,32	0,36	0,35	0,23	0,34

Na karbonatnim tlima u vlažnim uvjetima magnezij često jače od kalcija utječe na pojavu *vapnene kloroze*. U istraživanjima na istoku Hrvatske (*Jug, 2008.*) koncentracija kalcija i magnezija u suhoj tvari izdanaka bila je pod značajnim utjecajem vlažnosti tla i gnojidbenog tretmana. U sušnim uvjetima koncentracija kalcija bila je za 76 %, a magnezija za 83 % (tablica 6.16.) veća u odnosu na izdanke kukuruza uzgajane u vlažnim uvjetima (100 % PVK). Najmanja koncentracija kalcija i magnezija izmjerena je na tretmanu s 1.000 kg K₂SO₄ ha⁻¹ što je i logično zbog antagonističkih odnosa između ovih dvaju elemenata i kalija.

Magnezij je aktivator velikog broja različitih enzima: *peptidaza, dehidrogenaza, karboksilaza, dekarboksilaza* i drugih. Kofaktor je gotovo svih enzima koji kataliziraju reakcije *fosforiliranih supstrata (nukleofilni ligand, npr. fosforilnih grupa)* te je neposredno uključen u metabolizam energije. U fotosintezi Mg sudjeluje kao aktivni centar klorofila, aktivator je *ribuloza-difosfat-karboksilaze* i utječe na protonski gradijent između tilakoida i strome kloroplasta. U glikolizi Mg nespecifično aktivira *enolazu*, a također djeluje na *dekarboksilaze Krebsovog ciklusa*.

Značajna je uloga magnezija kod agregacije i stabilizacije *ribosoma* (formiranje *polizoma*) u biosintezi proteina. Također, prijenos aminokiselina s *amino-acil-RNK* na *polipeptidni lanac* aktiviran je magnezijem. Stoga se kod suboptimalnog sadržaja Mg u biljkama nakuplja topljivi, neproteinski dušik, smanjuje se

fotosinteza, opada transport škroba iz lišća te je niži intenzitet rasta biljaka uz pad prinosa i njegove kakvoće.



Slika 6.30. Morfoza soje na solonecu (Marijanci) izazvana viškom Na i Mg, odnosno manjkom Ca i K (Vukadinović, 2011.)

6.6.3. Nedostatak i suvišak magnezija

Simptomi nedostatka magnezija vezani su uz razgradnju klorofila i pojavljuju se prvo na starijem lišću u obliku kloroze, a zatim i na mlađem lišću. Kloroza je tipično *interkostalna* (žile su zelene, a prostor između njih je svijetlozelen, tzv. "mramorne vene"), kod dikotiledona *mramorirana* sa svjetlijim međužilnim dijelovima, a kod monokotiledona *linijska* zbog paralelnog pružanja lisnih žila. Kod jačeg nedostatka lišće dobiva prvo narančastu, zatim crvenu i purpurnu boju te konačno dijelovi lista prelaze u nekrotične površine, dok lisne žile još neko vrijeme ostaju zelene. Žita su osjetljiva na nedostatak magnezija, naročito u vlatanju kada imaju najveću koncentraciju kloroplastnih pigmenata, a deficit magnezija čest je na lakim, pjeskovitim tlima.

Suvišak magnezija nije česta pojava. Simptomi suviška zapažaju se na tlima nastalim na *dolomitima* i *serpentima*, a ogledaju se kao specifične *morfoze* (odstupanje od normalnog izgleda pojedinih organa, posebice lista). U istočnoj

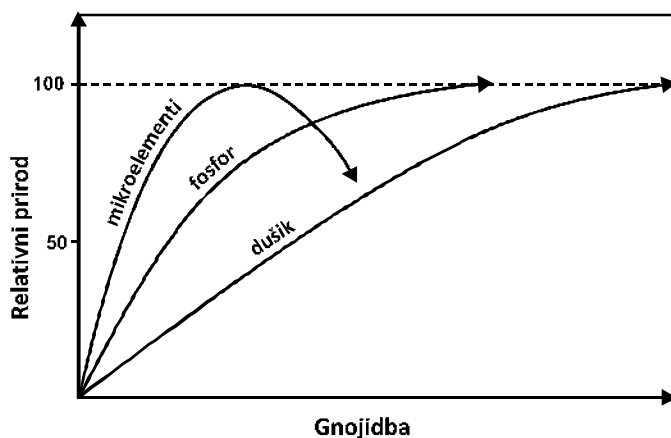
Hrvatskoj suvišak magnezija pojavljuje se na solonecima (*Vesna Vukadinović*, 2003.) čiji KIK može sadržavati više od 60 % Mg, odnosno dvostruko više nego Ca. U takvom tlu jasno se zapažaju antagonistički odnosi kationa. Naročito je naglašen odnos Ca/Mg (*Loewov zakon*), odnosno omjer $K/(Ca + Mg)$, toliko da je habitus biljaka posve netipičan pa se jasno zapaža "grmolik" izgled soje, sitnog i naboranog lista uz preranu pojavu cvijeta (slika 6.30.).

Kod monokotiledonih biljaka mlado lišće se uvija i ne razvija potpuno. Biljke pate od nedostatka kalija i kalcija pa se javljaju simptomi deficita tih, ali i drugih elemenata.

7. MIKROELEMENTI

Živa tvar općenito sadrži znatno manju količinu mikroelemenata jer oni, nasuprot makroelementima, djeluju u malim količinama pa se često zapaža njihov deficit, ali i suvišak. Razlog je usko područje povoljnog djelovanja mikroelemenata (slika 7.1.). Međutim, oni su neophodni i jednako važni u ishrani bilja kao i makroelementi, te kod nedostatka predstavljaju značajan ograničavajući čimbenik smanjenja visine prinosa, odnosno njegove kakvoće. Također, vrlo je malo podataka za naše agroekološke uvjete proizvodnje o kritičnoj koncentraciji mikroelemenata u tlu i biljkama, ispod koje dolazi do pada prinosa i kakvoće proizvoda, manjim dijelom zbog velikog broja različitih analitičkih postupaka, a većim zbog nerazumijevanja potrebe za takvim analizama i relativno visokim troškovima analiza.

Mikroelementi imaju vrlo važne i složene funkcije u biljnoj ishrani, ali većina njih povezana je s enzimatskim reakcijama u metabolizmu, kako tvari tako i energije. Ipak, između njih postoje znatne razlike koje se očituju specifičnim funkcijama u biljkama, ali i mikroorganizmima važnim za transformaciju hraniva u tlu. Primjerice, bakar, željezo i molibden su bitan dio kompleksa fotosintetskih reakcija kao i drugih metaboličkih, najviše energetskih procesa. Cink i mangan najčešće se javljaju kao "mostovi" koji povezuju enzime sa supstratom.



Slika 7.1. Porast prinosa kod gnojidbe dušikom, fosforom i mikroelementima (Marschner, 1986.)

Stoga se problemom mikroelemenata u posljednje vrijeme bavi velik broj istraživača izučavajući njihovu fiziološku funkciju i potrebe biljaka (tablica 7.1.), kemijske oblike u tlu, usvajanje i primjenu te se sve više proizvode *mikrognojiva* ili se pak mikroelementi dodaju konvencionalnim gnojivima i sredstvima za zaštitu bilja.

Tablica 7.1. Prosječna koncentracija mikroelemenata u tlu (površinskih 15 cm) i usjevima (*Brady and Weil, 1999.*)

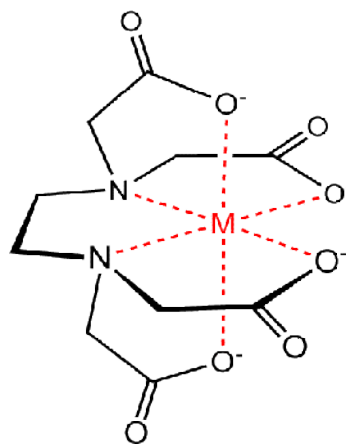
Mikroelement	Prosječna koncentracija		Omjer usjev/tlo
	tlo (kg ha^{-1})	usjev (mg kg^{-1})	
Željezo (Fe)	56.000	2,0	1:28.000
Mangan (Mn)	2.200	0,5	1:4.400
Cink (Zn)	110	0,3	1:366
Bakar (Cu)	45	0,1	1:450
Bor (B)	22	0,2	1:110
Molibden (Mo)	5	0,02	1:250
Klor (Cl)	22	2,5	1:0,9
Nikal (Ni)	50	0,2	1:250

Kao posebna vrsta mikrognojiva najčešće se primjenjuju *kelati* ili *organometalni kompleksi* (slika 7.2.) čime se povećava njihova pristupačnost i mogućnost primjene konvencionalno (putem korijena i/ili lista). *Kelatizacijom* se povećava bioraspoloživost mikroelemenata (teških metala), nema netopivih taloga, smanjena je toksičnost teških metala uz smanjeno ispiranje iz tla.

7.1. ŽELJEZO

Željezo je teški metal, u tlu i biljkama nalazi se kao dvo- i trovalentan kation ili u odgovarajućim spojevima. Vrlo lako mijenja valentno stanje i može graditi kompleksne spojeve, a u biljkama je uglavnom u Fe(III) oksidacijskom stanju.

Njegovo podrijetlo u tlu vezano je za mnogobrojne primarne i sekundarne minerale. U procesima njihovog raspadanja dolazi do oslobađanja željeza, a ono u kiselim tlama vrlo brzo iznova gradi sekundarne minerale. Svježe istaloženi minerali željeza su u vidu amorfnih koloida pristupačnih za ishranu bilja.



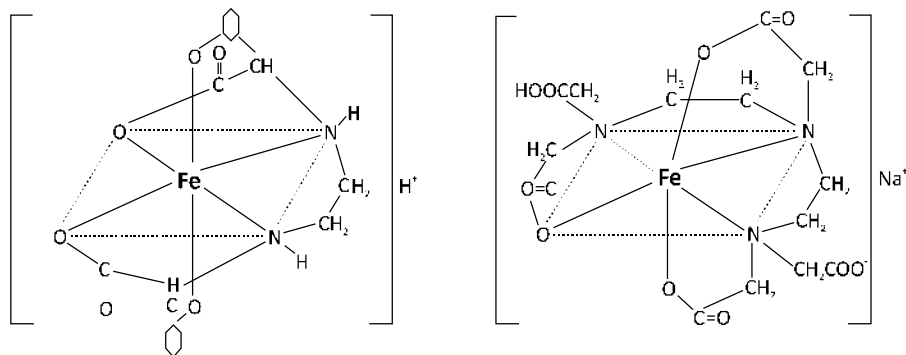
Slika 7.2. Struktura kelata (Metal-EDTA)

Rezerve u tlu su najvećim dijelom anorganske prirode i ukupni sadržaj željeza obično je između 0,5 i 4,0 % (prosječno 3,2 %). Sadrže ga karbonati, oksidi, silikati, sulfidi, a najznačajniji su *hematit* ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) i *getit* ($\alpha\text{-FeOOH}$). U tlama s

puno organske tvari organske rezerve željeza mogu biti značajne, i to kao *Fe-oksi-hidroksi* spojevi i *Fe-kelati*. U ionskom obliku nalazi se kao Fe^{3+} , izuzev u vrlo kiseloj sredini kada prevladava Fe^{2+} . Porastom kiselosti i uz prisutnost fosfora nastaju vrlo teško pristupačni fosfati željeza, dok se u lužnatoj sredini željezo nalazi u obliku teško topljivih oksida. Stoga kalcizacija i fosfatizacija kiselih tala može znatno smanjiti raspoloživost željeza (tablica 7.2.). Topljivi oblici željeza u tlu su Fe^{2+} , Fe^{3+} , $Fe(OH)^{+2}$ i $FeOH^{2+}$, a s porastom pH-vrijednosti topljivost (raspoloživost) željeza jako pada (slika 7.4.).

Tablica 7.2. Utjecaj kalcizacije i fosfatizacije na raspoloživost Fe u pseudoglejnom tlu u ppm (*Bertić i sur.*, 1985.)

Gnojidba P_2O_5 kg ha ⁻¹	Kalcizacija ($CaCO_3$ t ha ⁻¹)						Prosjek fosfora
	0	1	5	10	15	20	
120	40,9	33,2	30,6	22,5	18,8	14,3	26,7
240	47,6	36,8	29,2	24,7	19,3	15,9	28,9
480	35,8	32,7	30,7	21,9	16,5	13,1	25,1
Prosjek $CaCO_3$	41,5	34,2	30,2	23,0	18,2	14,4	16,9

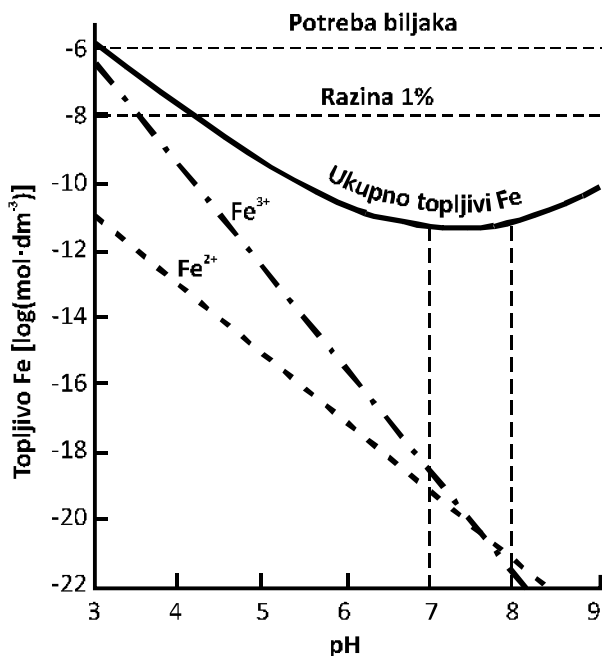


Slika 7.3. Sequestren 330 Fe (DTPA - mononatrij-vodik-feri-dietilentriamin pentaacetat, molekularna masa = 468 kDa) i Sequestren 138 HFe (EDDHA – vodik-feri-etilen-bis (alfa-imino-2-hidroksi-fenil-acetic acid), molekularna masa = 413 kDa).

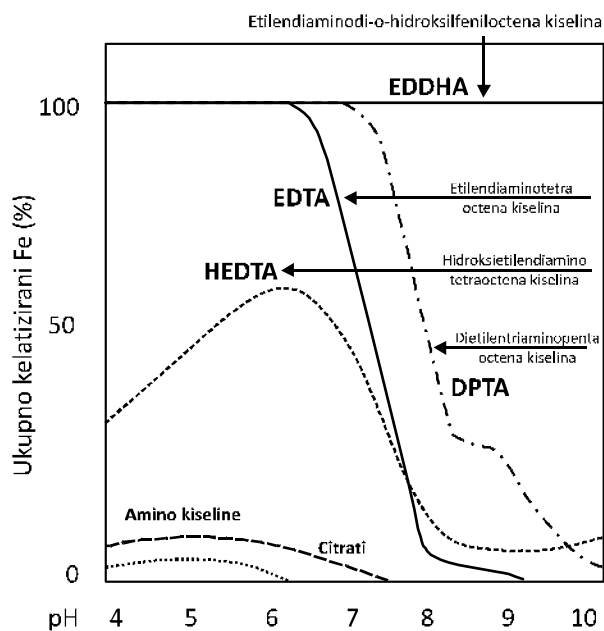
Većina poljoprivrednih tala sadrži dovoljno mobilnog željeza te lakomobilnih rezervi, premda je nedostatak čest, najčešće na jako humoznim (naročito tresetnim), ali i karbonatnim tlima (npr. černozeimi istočne Hrvatske i neka tla mediteranskog pojasa).

Biljke usvajaju željezo kao ione Fe^{2+} , Fe^{3+} ili u obliku kelata (slika 7.3.), pri čemu treba izabrati odgovarajući kelatni oblik s obzirom na pH reakciju tla (slika 7.5.). Usvajanje željeza je povezano s redukcijom pa kod nedostatka Fe u tlu biljke izlučuju korijenom fenole i druge reducirajuće agense. Kompeticiju kod usvajanja željeza pokazuju: $Cu > Ni > Co > Zn > Cr > Mn$, a kod viših pH-vrijednosti smetaju Ca^{2+} i fosfati. Također, $N-NO_3$ ishrana smanjuje, a $N-NH_4$

povećava usvajanje željeza. U biljnoj tvari je oko 80 % željeza u stromi kloroplasta vezano na proteine i kao rezerva u obliku *fitoferitina*, a 9-19 % Fe u listu je vezano kao *kem-Fe* ili *Fe-S-proteini*.

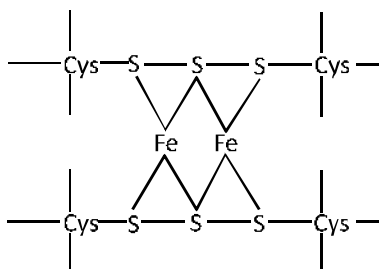


Slika 7.4. Topljivost željeza ovisno o pH-vrijednosti tla



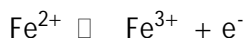
Slika 7.5. Raspoloživost različitih Fe-kelata ovisno o pH tla

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 je u biljkama osrednja do loša jer je 80-90 % željeza čvrsto vezano. Željezo se premješta u biljci vezano na *hidroksikarbonske kiseline, fenole, tiole, polisaharide* ili *aminokiseline*. Premještanje je povezano s metabolizmom i fiziološki aktivnim tvarima. Premještanja željeza u biljkama ometa prisutnost $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. 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.



Slika 7.6. Koordinativno povezivanje tiolnih grupa cisteina željezom

Željezo je konstituent mnogih prostetičkih grupa enzima kao što su *citokromi, peroksidaze, katalaze* te obvezno dolazi u *kem* strukturi gdje promjenom valencije omogućuje transport elektrona:



Željezo je neophodno za sintezu klorofila, redukciju nitrita i sulfata, asimilaciju N_2 (bez željeza je nodulacija kod *Bradyrhizobiuma* inhibirana), transport elektrona itd. U nedostatku željeza smanjuje se broj fotosintetskih jedinica (PS I) i molekula *citokroma f*, a opada i koncentracija *karotenoida*. Željezo je konstituent dvije grupe proteina: *kem-proteini* i *Fe-S-proteini* (slika 7.6.). U grupu kem-proteina spadaju *citokromi* (sadrže Fe i Cu), *peroksidaze, katalaze, legkemoclobin* bakterija, dok u Fe-S-proteine spada *feredoksin* važan u oksidoredukcijama, posebice PS I sustava.

Deficit željeza utječe na promjenu omjera P/Fe što korelira s pojavom kloroze, odnosno veće količine fosfata u biljci inaktiviraju funkciju željeza tako da je zakočena redukcija Fe^{3+} u Fe^{2+} uz smanjivanje intenziteta sinteze proteina, porast sadržaja slobodnih aminokiselina i pad sadržaja proteina, RNK i ribozoma. Usporedo dolazi do porasta sadržaja limunske kiseline zbog smanjene aktivnosti *akonitaze*. Slika 7.7. pokazuje moguće odnose između fiziološke funkcije željeza i vizualnih simptoma njegove deficijencije.

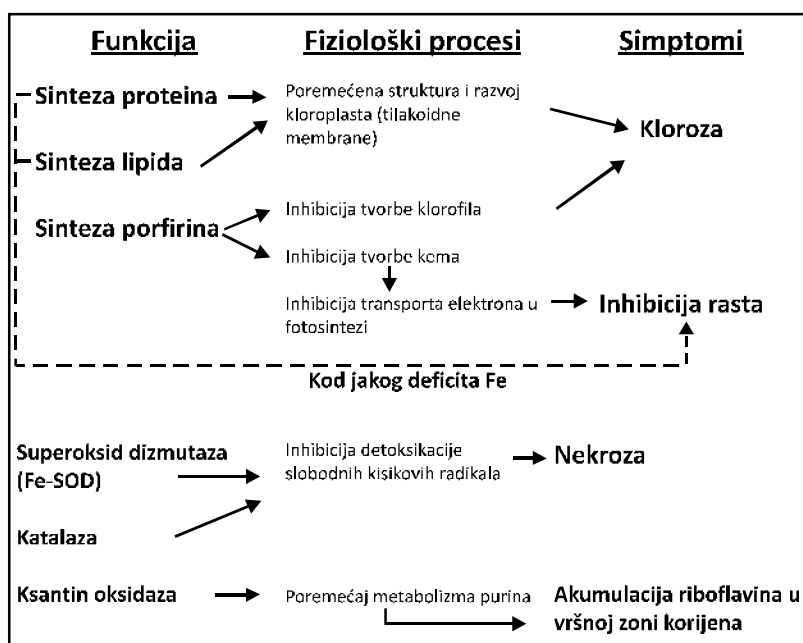
Biljke iznose biološkim prinomom 300-1.500 Fe g ha⁻¹ te, iako u tlu ima dosta željeza, često zbog poremećaja u sustavu *tlo-biljka-klima-agrotehnika* dolazi do

pojave *Fe-kloroza*. To se događa najčešće kada je $\text{pH} > 7,0$ ili $\text{pH} < 3,5$. Kod visokog pH i istovremeno niskog sadržaja kalija javlja se tzv. *vapnena kloroza*.

Kloroza se rijetko javlja kao stvarni nedostatak željeza, već je uglavnom uvjetovana njegovom inaktivacijom tj. prelaskom u oblik koji je nepristupačan biljci. Deficit željeza utječe na promjenu omjera P/Fe što se manifestira međužilnom (interkostalnom) klorozom, prvo mlađih listova, jer veće količine fosfata u biljci inaktiviraju funkciju Fe pa je zakočena redukcija Fe^{3+} u Fe^{2+} .

Kod mnogih usjeva utvrđene su značajne genetske razlike u toleranciji prema Fe klorozi. Naime, korijenje kultivara i genotipova koji su tolerantniji na Fe klorozu inicira fiziološku reakciju u uvjetima deficita željeza, što povećava mobilnost Fe u tlu.

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.



Slika 7.7. Međusobni odnos fiziološke funkcije željeza i vizualnih simptoma njegove deficijencije (*Römheld and Marschner, 1991.*)

Suvišak željeza se rijetko događa, osim u vrlo kiselim, slabo prozračenim tlima, gdje je moguće toksično djelovanje suviška željeza. Kritična toksična granica za Fe je 400-1.000 ppm (prosječno 500 ppm), a pojava je češća kod uzgoja riže (bronzing efekt). Toksično djelovanje željeza ogleda se u inhibiciji vegetacijskog rasta, tamnom, plavozelenom lišću i mrkoj boji korijena.

7.2. MANGAN

Mangan je teški metal ($\rho = 7,440 \text{ g cm}^{-3}$) 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, ali najvećim dijelom u tlu potječe iz MnO_2 . Mangan sadrže različiti oksidi stupnja oksidacije +2 do +7 (MnO_2 *piroluzit*, $[\text{MnO}(\text{OH})]$ *manganit*, Mn_2O_3 *braunit*, Mn_3O_4 *hausmanit* i dr.). Po rasprostranjenosti Mn je u litosferi deseti element.

Ukupan sadržaj mangana u tlima je 200-3.000 ppm od čega je 0,1-1,0 % biljkama raspoloživo. Oksidacijski broj mangana ovisi o redoks potencijalu tla, pa je u neutralnoj i lužnatoj sredini pristupačnost mangana smanjena zbog nastajanja teško topljivog hidroksida $\text{Mn}(\text{OH})_2$. Raspoloživost mangana raste povećanjem kiselosti tla i njegove redukcije do Mn^{2+} . Reducirani mangan (vodotopljivi Mn^{2+} i izmjenjivo sorbirani Mn^{2+} , te lakoreducirajući MnOOH) biljke lako usvajaju (označava se kao *aktivni mangan*), dok su više oksidirani oblici kao Mn^{3+} i Mn^{4+} inaktivni oblici. Biljke lako usvajaju mangan i u obliku kelata.

Oranični sloj sadrži više mangana u odnosu na podoranični, više ga je na težim i karbonatnim, a manje na lakim i pjeskovitim tlima. Pristupačnost mangana jako ovisi o oksido-redukcijskom potencijalu tla. U vlažnijim uvjetima, porastom redukcije, pristupačnost mangana je bolja. Pored vlažnosti značajni su i drugi čimbenici, npr. nitrifikacijski procesi pospješuju usvajanje mangana.

Sadržaj mangana u biljkama jako ovisi o biljnoj vrsti, ali i biljnom dijelu, odnosno organu. Izuzetno značajnu ulogu mangan ima u oksido-redukcijskim procesima. Sastavni je dio niza enzima i aktivator *enolaza*, *karboksilaza*, *superoksidismutaze* i drugih enzima, ali nije gradivi element jer je konstituent samo proteina *manganina*. Uloga mu je slična magneziju koji može zamijeniti na nespecifičan način u aktivaciji *dekarboksilaza* i *dehidrogenaza* u *Krebsovom* 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.

Kod usvajanja mangana antagonizam pokazuju dvovalentni kationi kao što su Ca^{2+} , Mg^{2+} , ali i drugi pa usvajanje može biti smanjeno do kritične granice u prisustvu većih količina željeza, bakra i cinka. Pokretljivost mangana u biljkama je mala, ali ipak bolja od B, Ca, Cu i Fe. Mlađi organi sadrže više mangana. Prosječan sadržaj u biljkama je 50-250 ppm, ali zrno pšenice sadrži prosječno samo 34 ppm, ječma 17 ppm, kukuruza svega 6 ppm Mn. Kritična koncentracija mangana je < 10 ppm za šećernu repu (lišće) i pšenicu u klasanju. Korijenom šećerne repe odnosi se oko 300 g Mn, a zrnom pšenice 100 g ha^{-1} .

Smatra se da je kritična granica manjka mangana kod većine biljaka 10-20 ppm u ST, a akutan nedostatak nastupa kad je 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) monokotiledonih biljaka. Nedostatak mangana zapaža se češće u tzv. "sušnim" godinama.

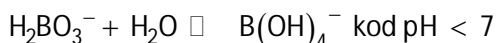
Otrovnost mangana javlja se kada je u tlu Mn > 1.000 ppm, najčešće u ekstremno kiselim tlima, a očituje se pojavom smeđih mrlja na starijem lišću što je često povezano sa simptomom nedostatka željeza. Smanjenje prinosa za 10 % javlja se kad je u tlu > 200 ppm Mn za kukuruz, > 600 ppm za soju, a za suncokret tek kada je > 5.300 ppm. Suvišak Mn izaziva manjak Fe, Mo i Mg u biljkama.

7.3. BOR

Bor je za razliku od svih drugih mikroelemenata elektronegativan semimetal. U tlu i biljkama pojavljuje se u tri oblika i to kao H_3BO_3 , $H_2BO_3^-$ ili HBO_3^{2-} . U tlu potječe iz primarnih minerala kao što su *datolit* i *turmalin* ili sekundarnih *boracit*, *kolemanit* itd. Od spomenutih spojeva najlakše je topljiva borna kiselina koja se rabi kao borno gnojivo.

Topljivost bornih spojeva raste s kiselošću tla pa u kiselim tlima može doći do brzog gubitka bora 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. Sadržaj vodotopljivog bora u tlu obično je u granicama 0,1-3,0 ppm, dok ukupnog bora tla sadrže prosječno oko 30 ppm (2-100 ppm). Veći mu je sadržaj u humusnom horizontu zbog sorpcije na organske koloide (*diolnim vezama*, slika 7.8.) u kojem obliku je raspoloživ za usvajanje. Iznad pH 6 i uz suvišak K i Ca raspoloživost bora se jako smanjuje.

Bor se vjerojatno usvaja u obliku nedisocirane borne kiseline (H_3BO_3), ali postoje mišljenja da se može usvajati i kao boratni anion $B(OH)_4^-$, odnosno u obliku kalcijevih i kalijevih borata:

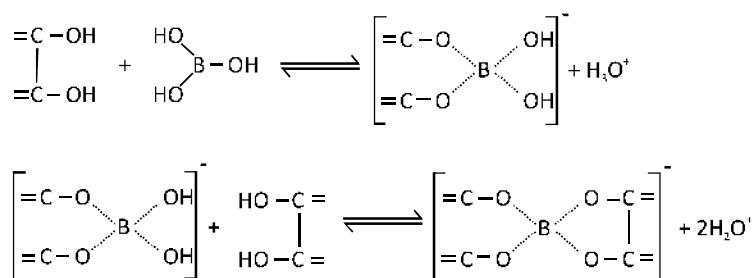


Usvajanje bora nije potpuno poznato, pa čak ima i dilema o prirodi procesa (aktivno ili pasivno usvajanje). Naime, bor ulazi s vodom u slobodan prostor korijena i nagomilava se uz stanične stijenke (prividno slobodan prostor) vežući se slabim vezama kao *B-polisaharidni kompleks*. Ipak, na aktivan proces upućuje stehiometrijski omjer između usvajanja bora i otpuštanja H^+ .

Pokretljivost i reutilizacija bora u biljkama relativno je slaba pa se često zapaža njegov nedostatak u lišću i gornjim, rastućim dijelovima biljaka. S porastom transpiracije intenzivira se ascendentno premještanje bora ksilemom uz porast koncentracije u rubnim dijelovima lišća i vrhovima rasta. Nasuprot tome, kod nedostatka vode i niskog intenziteta transpiracije, vršni dijelovi pate od nedostatka bora. Dakle, premještanje bora vrlo je slično kalciju.

Ovisno o biljnoj vrsti, koncentracija bora je promjenjiva pa tako *monokotiledone* imaju manju potrebu za borom (2-5 ppm u ST), a *dikotiledone* znatno veću (20-80 ppm u ST). Prema *Bergmannu* normalna je koncentracija bora kod ozime pšenice i ječma 6-12 ppm (5/6 *Feekes* skala), kukuruza 7-15 ppm (visina biljaka 40-60 cm), šećerne repe 35/40-100 ppm (najveća lisna masa), suncokreta 35-100 ppm (formiranje cvijeta), soje 25-60 ppm (završetak cvjetanja), jabuke 25-50 ppm (lišće u srpnju i kolovozu), vinove loze 30-60 ppm (lišće u cvjetanju) itd. Koncentracija bora veća je u lišću i reproduktivnim organima s najvećom koncentracijom u prašnicima, plodnici i peteljka. Žetvom se odnosi prosječno 200-400 g ha⁻¹, a šećernom repom približno 500 g ha⁻¹.

Bor je biogeni element, premda nije konstituent organske tvari. Fiziološka uloga mu je manje poznata prema većini esencijalnih elemenata jer ne ulazi u sastav organske tvari ni enzima, niti ima mogućnost promjene oksidoredukcijskog stanja, odnosno valencije. Neobično je kako je bor neophodan element za više (*vaskularne*) biljke, ali ne za gljive i alge. Suvremena istraživanja su pokazala kako B može biti nespecifično zamijenjen germanijem (Ge). Naime, borna i germanijska kiselina kemijski su vrlo slične i grade slične komplekse s polihidroksi fenolima.

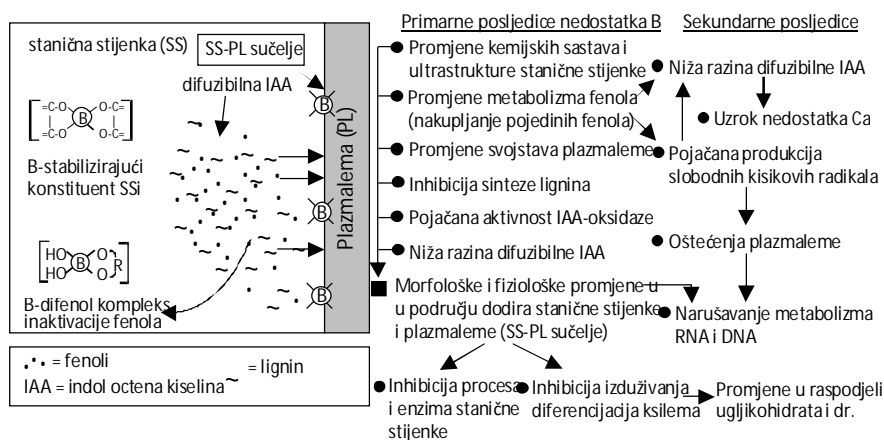


Slika 7.8. Nastajanje i tipovi dipolnih veza bora i esterifikacija

Donedavno se smatralo da je bor neophodan za transport ugljikohidrata u obliku *bornih estera* čija je difuzija kroz biomembrane olakšana za razliku od visokopolarnih samostalnih molekula šećera. Hipoteza se nije održala jer se boratni kompleks saharoze (transportni oblik šećera kod većine biljaka) vrlo rijetko može utvrditi u floemu. Danas je prihvaćeno da se transport saharoze floemom odvija uz pomoć H⁺-ATPazne crpke te se boru češće pripisuje uloga u sintezi saharoze, metabolizmu nukleinskih kiselina, fotosintezi, metabolizmu bjelančevina, a u posljednje vrijeme i u stabilizaciji staničnih membrana. Utjecaj

bora na ATPaznu aktivnost biomembrana kao i njihove specifične konformacijske promjene (slično kaliju) zapaža se u ubrzanom usvajanju drugih iona korijenom i to nakon prestanka manjka.

Veza bora sa šećerima, alkoholima i organskim kiselinama je tipa *cis-diol* pri čemu nastaju tri tipa kompleksnih spojeva (slika 7.8.). Specifičnost takvog kompleksa je njegova povezanost s istežanjem staničnih stijenki preko stimulacije ili inhibicije enzimatskih reakcija što se manifestira na rast cijele biljke.



Slika 7.9. Utjecaj nedostatka bora na fiziološke procese biljaka (Marschner, 1995.)

Premda bor nije sastojak enzima, smatra se da može modulirati njihov rad. Takva uloga bora jasno se zapaža u stimulaciji OPP (*oksidativno pentozofosfatni ciklus* ili *apotomično disanje*) degradacije ugljikohidrata kao alternative glikolitičkoj razgradnji. Dokaz tomu je prisustvo *6-P-glukonat-boratnog kompleksa* kod dobre opskrbljenosti biljaka borom, a kod njegovog manjka nema niti OPP razgradnje šećera niti produkcije *fosfoglukonata*, ali je pojačana akumulacija fenolnih tvari. Naime, manjak bora stimulira enzim *6-P-glukonat dehidrogenazu* koja regulira prvi (ireverzibilni) stupanj OPP puta. Međutim, ukupno disanje biljaka je pojačano kod nedostatka, ali i suviška B uz snižavanje P/O kvocijenta, odnosno smanjena je efikasnost transformacije energije u disanju.

Bor regulira *meristemsku aktivnost* pa kod njegovog nedostatka dolazi do neregularnog dijeljenja stanica u mladim tkivima, posebice u vrhovima rasta, korijena i izdanka, ali i poremećaja *kambijalne aktivnosti* (*sekundarni meristemi*) što se zapaža nepravilnim sekundarnim debljanjem korijena i stabla (slika 7.9.). Razlog poremećene diobe stanica vjerojatno je povezan sa sintezom *uracila* pa njegovo dodavanje biljkama ublažava simptome deficita bora. Naime, *uracil* je

esencijalna baza RNA te kod njegovog nedostatka ne dolazi do povezivanja *ribosoma* u *polisome* kao centre sinteze bjelančevina. Tako se zaustavlja sinteza proteina i to zapravo potiče neregularnu meristemsku aktivnost. Urazil je i prekursor UDPG (*uridin-2P-glukoze*), aktiviranog oblika glukoze neophodnog za sintezu saharoze, pa zbog manjka bora dolazi do blokade transporta asimilata floemom i to je zapravo najvažnija posljedica manjka bora. Smanjena alokacija fotosintata iz lista u druge organe zatim izaziva pojavu *kaloznih čepova* u sitastim stanicama floema pa je krajnja posljedica zapravo inhibicija sinteze saharoze.

Između koncentracije bora u biljkama i sinteze nukleinskih kiselina zapaža se čvrsta korelacija te se kod njegovog manjka snižava sinteza RNA i DNA (koja se može ublažiti dodatkom nukleinskih kiselina). Pad sinteze nukleinskih kiselina vjerojatno je posljedica manje ugradnje fosfora u nukleotide što izaziva i promjenu omjera [*guanin + citozin*] / [*adenin + uracil*] kod RNA. Manjak bora u biljkama povezan je i s nagomilavanjem N-NO₃ u korijenu, lišću i peteljka uz sniženu aktivnost *NRaze* (*nitratne reduktaze*) i *oksidaze askorbinske kiseline* u lišću pa opada intenzitet sinteze proteina zbog smanjenog dotoka reduciranih oblika dušika, naravno uz manji intenzitet rasta.

Nedostatak bora praćen je i smanjenom sintezom *citokinina* uz povećan sadržaj *auksina* pa promjena fitohormonalne ravnoteže potiče također neregularnu meristemsku aktivnost uz često odumiranje vrhova rasta i deformacije novoformiranih tkiva. Smatra se da je uzrok tome blokada inhibitora *IAA oksidaze* (oksidaze indolactene kiseline) uz nagomilavanje auksina što izaziva pretjerano istezanje stanica. To uzrokuje preveliko naprezanje novoformiranih tkiva koja se deformiraju i na kraju pucaju. Otuda nekoordinirana meristemska aktivnost rezultira *krastavošću* kod voća, *rozetavošću* i pojavom *suhe truleži srca šećerne repe* itd.

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 jako je smanjen porast biljaka, slabije je zametanje cvjetova i plodova, 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 nedostaku formiraju se često *partenokarpni* plodovi (bez sjemena) slabe kakvoće.

Povoljna ishrana borom ubrzava sazrijevanje, poboljšava kakvoću poljoprivrednih proizvoda, omogućuje normalnu sintezu klorofila, biljke zahtijevaju manje kalcija, ali više kalija i povećana je otpornost na sušu i visoke

temperature. Moguće je ponekad i suvišak bora, najčešće u staklenicima, pri čemu se zapaža rubna nekroza uz anatomsko-morfološke promjene lišća.

Bor se primjenjuje redovito u poljoprivrednoj proizvodnji, najčešće kod šećerne repe jer ona zahtijeva dobru opskrbu tijekom čitave vegetacije, a u njegovu nedostatku poremećaji metabolizma se jasno manifestiraju. Kritična granica opskrbljenosti borom u lišću šećerne repe je 32 ppm kod najpovoljnijeg omjera prema kalciju 1:220. Općenito, kritična granica opskrbljenosti borom je za dikotiledone 20-70 ppm, a samo 5-10 ppm kod monokotiledona u suhoj tvari. Rani simptomi manjka bora kod šećerne repe zapažaju se kao anatomske promjene mladog lišća koje je uvijeno, manje i tamnije boje, dok je starije lišće krto i klorotično, glava korijena je šuplja i često naknadno inficirana gljivicama. Indikativan je izgled peteljki koje imaju tipične plutaste izrasline jer je manjak B često povezan s manjkom kalcija. Posljedice su uvijek snižena koncentracija saharoze (*polarizacija*) uz manji prinos korijena. U nedostatku B dolazi do odumiranja vegetacijskog vrha biljaka (i gubitka apikalne dominantnosti), a suncokret je od usjeva naročito osjetljiv na nedostatak bora.

Suvišak bora može se pojaviti kod navodnjavanja ili primjene komposta s puno bora. Kritična granica toksičnosti je za kukuruz 100 ppm, 400 ppm za krastavce, a 1.000 ppm za bundeve.

7.4. CINK

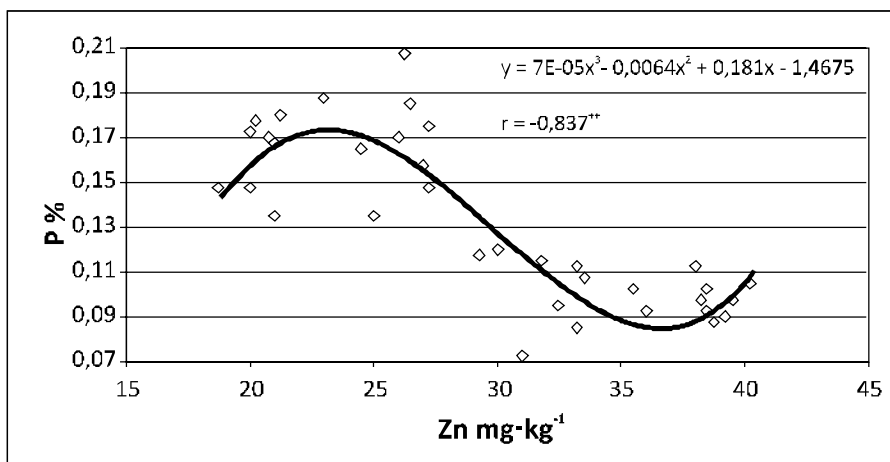
Cink je teški metal ($\rho = 7,133 \text{ g cm}^{-3}$). U tlu vuče podrijetlo iz primarnih i sekundarnih minerala. Kisele stijene sadrže manje cinka (*granit, gnajs*), a alkalne znatno više (*bazalt*). Prosječan sadržaj cinka u tlu je 5-20 ppm. Biljke ga usvajaju kao kation Zn^{2+} , ZnCl^+ , $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$, $\text{Zn}(\text{OH})^+$ i Zn-kelate i za razliku od Fe, Mn, Cu i Mo u biljkama je uvijek Zn^{2+} .

Usvajanje cinka je aktivan proces pri čemu inhibitorno djeluju sljedeći ioni: $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} = \text{Sr}^{2+} = \text{Ba}^{2+}$. Niska temperatura, kao i suvišak fosfora, snižavaju usvajanje Zn. Pristupačnost cinka je veća u kiselim tlima i u tim okolnostima postoji opasnost od njegovog ispiranja. Nedostatak cinka javlja se najčešće na teškim, glinovitim tlima, 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.

Sadržaj cinka u biljkama je nizak i ovisno o biljnoj vrsti, koncentracija je u granicama od 0,6 ppm (jabuka) do 83 ppm (konoplja) u suhoj tvari. Kod većeg sadržaja fosfora u tlu usvajanje cinka je smanjeno. Ta pojava posebice je značajna za kukuruz kod kojega fosfor često inducira deficit cinka (slika 7.10.) uz

akumulaciju većih količina željeza. Pokretljivost cinka u biljci je osrednja (bolja od Fe, B i Mo), a smatra se da je u ksilemu u obliku citrata, kelata ili kao slobodan ion.

Fiziološka uloga cinka je vrlo opsežna i značajna. Cink utječe na metabolizam mnogih tvari, posebice proteina. Sastavni je dio mnogih enzima gdje kao dvovalentni kation gradi *tetrahedralne kelate*, odnosno povezuje enzim sa supstratom. Sudjeluje u građi enzima *karboanhidraze* ($\text{OH}^- + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{HCO}_3^-$), *dehidrogenaze* (malat, glutamat itd.), *alkohol-dehidrogenaza*, *superoksid-dismutaza* itd., a ujedno je i njihov aktivator (enzimi sa SH grupom, *aldolaze*, *izomeraze*, *DNAaza* itd.). 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 karboksilaze-oksidade* (*karboksidismutaze*), usvajanje i transport fosfora i aktivnost *fosfataza*, povećava otpornost prema bolestima (preko utjecaja na proteosintezu), suši (smanjuje transpiraciju) i niskim temperaturama.



Slika 7.10. Korelacija koncentracije cinka i fosfora u izdancima kukuruza (Jug, 2008., doktorska disertacija)

Kritična granica nedostatka cinka je 15-30 ppm u ST lišća. Osjetljive biljke na nedostatak cinka su kukuruz, lan i soja, a otporne žita. Simptom nedostatka cinka uočava se u *interkostalnoj klorozu* (međužilnoj) 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 i smanjenim korijenom, lišće sadrži crvenkastomrke pjege, ali za razliku od suviška Fe i Mn, one su podjednako na mlađem i starijem lišću.

7.5. BAKAR

Sadržaj bakra u tlu prosječno je 5-50 ppm. Usvaja se kao Cu^{2+} (kupri) i pripada skupini teških metala ($\rho = 8,960 \text{ g cm}^{-3}$) koje se čvrsto sorbiraju na koloide tla, posebice organske. Bakar u tlu vodi podrijetlo iz primarnih minerala gdje se nalazi u jednovalentnom obliku, a nakon njihovog raspadanja oksidira se do Cu^{2+} . U tlu bakar gradi vrlo stabilne kompleksne spojeve s organskim kiselinama, polurazloženim ili humificiranim organskim tvarima i, tako vezan, biljkama je slabo raspoloživ. Zbog toga se manjak bakra češće javlja na jako humoznim tlima uslijed "organske" fiksacije. Na raspoloživost bakra značajno utječe pH reakcija tla i pristupačnost mu raste s kiselošću (optimalan pH je 4,5-6,0).

Biljke usvajaju bakar kao Cu^{2+} ili u vidu kelata. Proces usvajanja je aktivan i smatra se da postoji specifičan prenositelj. Kod usvajanja, konkurenciju bakru čine Mn, Fe i Zn, a također je zapaženo da dobra opskrbljenost biljaka dušikom i fosforom često izaziva nedostatak bakra. Translokacija bakra je osrednja 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.

Fiziološka uloga bakra vrlo je značajna jer je on sastavni dio ili aktivator mnogih enzima koji sudjeluju u oksidacijskim procesima (spojevi stupnja oksidacije +1, +2 i +3), ali u vodenoj sredini protoplazme stabilni su samo spojevi Cu(II). Bakar utječe na sintezu proteina, stabilizira molekule klorofila i sudjeluje u sintezi *antocijana*. Ulazi u sastav *plastocijana*, *citokromoksidaze c* (transport elektrona), *fenoloksidaze* (oksidacija fenola u kinon), *lakaze* i *fenolaze* (*lignifikacija*), *hidroksilaze* (transformacija *fenilalanina* u *tirozin*), *oksidogenaze*, *oksidaze askorbinske kiseline*, *superoksiddismutaze*, više *aminooksidaza* (utječe na oksidacijsku dezaminaciju), *galakto-oksidaze* itd. Za razliku od enzima koji sadrže Fe, Cu-enzimi mogu direktno reagirati s O_2 i stoga preferiraju *terminalne oksidacijske procese*.

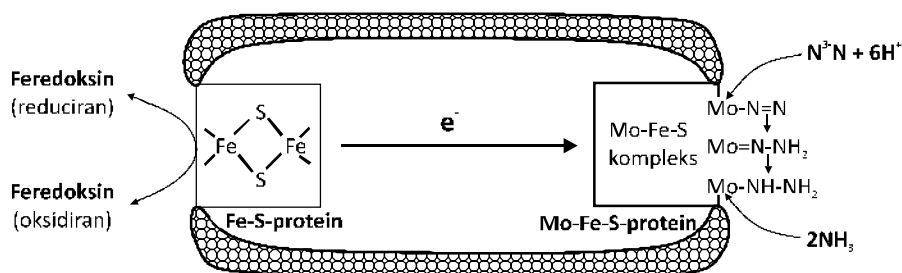
Bakar ima izražen afinitet prema proteinskoj strukturi pa je 70 % bakra u biljkama vezano na proteine u kloroplastima gdje ima ulogu stabilizatora, posebice klorofila. Značajna mu je uloga u metabolizmu dušikovih spojeva jer regulira vezivanje amonijaka na *ketokiseline*, utječe na sintezu nukleinskih kiselina, bakterijskog *leghemoglobina*, metabolizam ugljikohidrata, lignifikaciju, formiranje polena i plodnost biljaka, povećava otpornost na niske temperature i dr.

Bakar djeluje u vrlo niskim koncentracijama, ali se, i pored toga, često nađe u biljkama u manjoj količini od potrebne. Krična granica opskrbljenosti bakrom je u vegetativnim organima 1,0-3,5 ppm u ST, ovisno o biljnoj vrsti i dijelu biljke. Osjetljive biljke su pšenica, ječam, lucerna i duhan. Simptomi manjka bakra su

kloroza i nekroza lišća, odumiranje vršnih izdanaka, uvenuće, uvijanje lišća i odumiranje mlađeg lišća. Zbog nedovoljne lignifikacije dolazi do anatomskih promjena i gubitka *apikalne dominantnosti*, slično kao kod bora. Suvišak bakra vrlo je rijetka pojava (> 15-30 ppm u ST), obično na kiselim tlima ili kod dugogodišnje primjene *bordoške juhe* u voćnjacima i vinogradima. Otrovnost bakra očituje se smanjenim rastom korijena i izdanaka, klorozom starijeg lišća i crvenkastomrkom rubnom nekrozom.

7.6. MOLIBDEN

Molibden je vrlo čvrst metal, visoke gustoće ($\rho = 8,570 \text{ g cm}^{-3}$) koji je u vodenoj sredini anion. Sadržaj molibdena u tlima je izuzetno nizak, 0,6-3,0 ppm, prosječno oko 2 ppm. Kisela tla s dosta slobodnog željeza i aluminija sadrže malo molibdena. Biljke molibden usvajaju u obliku visoko oksidiranog molibdata (MoO_4^{2-} , ali i kao Mo(IV) i Mo(V)) te u biljkama egzistira kao anion pa mu pristupačnost raste porastom lužnatosti, suprotno svim drugim mikroelementima. Konkurentni ioni kod usvajanja su OH^- i SO_4^{2-} , dok usvajanje potpomažu Mg^{2+} i NH_4^+ .



Slika 7.11. Model nitrogenazne N_2 redukcije

Fiziološka uloga molibdena je značajna. Sudjeluje u oksidaciji sulfita (SO_3^{2-} do SO_4^{2-}) i redukciji nitrata (slika 7.11.) te se kod nedovoljne opskrbe Mo aktivnost *nitratne reduktaze* smanjuje, opada sinteza proteina, narušava se kloroplastna struktura i usporava rast biljaka. Zanimljivo je kako se simptomi deficita molibdena mogu spriječiti primjenom *volframa* (*tungstena*, $\rho = 19,300 \text{ g cm}^{-3}$). Nedostatak molibdena utječe na povećan sadržaj neproteinskih, topljivih oblika dušika, npr. amida, uz smanjivanje ribonukleazne aktivnosti.

Biljke sadrže vrlo malo molibdena, čak ispod 1 ppm (0,1-0,5 ppm u suhoj tvari), a relativno veći sadržaj molibdena je u biljkama iz porodice leguminoza i krstašica. Pokretljivost molibdena u biljkama je osrednja. Kod manjka molibdena dolazi do zastoja u nitratnoj redukciji (enzim *nitratna reduktaza*) i nedostatka reduciranih

oblika dušika potrebnog za sintezu aminokiselina i proteina. Molibden je nezamjenjiv kod mikroorganizama (enzim *nitrogenaza*) koji obavljaju fiksaciju N_2 . Također, smanjen je katabolizam aminokiselina koje sadrže sumpor (*cistein, cistin i metionin*).

Manjak molibdena je rijetka pojava (kad je $< 0,1-1,0$ ppm Mo u ST lišća) i prvo se zapaža na starijem lišću u obliku žutih i žutozelenih područja uz uvijanje rubova i *rozetavosti* kod cvjetače. 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 (kritična granica toksičnosti je 200-1.000 ppm u suhoj tvari) koja se manifestira smanjenim rastom i klorozom mlađeg lišća.

7.7. KLOR

Klor je zelenožuti plin, a ubraja se u grupu mikroelemenata tek u posljednje vrijeme. Naime, biljke ga sadrže u velikim količinama 1-20 g kg^{-1} (npr. 1,2 % u ST lišća šećerne repe, 1,8 % u stabljici lana itd.), a za njegove specifične fiziološke funkcije dovoljne su ultraniske količine. Biljke aktivno usvajaju klor kao anion Cl^- , a smatra se da je prenositelj proteinske prirode. Kod usvajanja klora antagonisti su anioni SO_4^{2-} i NO_3^- .

Sadržaj klora je u tlu izuzetno promjenjiv zbog lake pokretljivosti (100-1.000 $kg ha^{-1}$ u vodotopljivom obliku). U tlo dospijeva u velikoj količini gnojidbom mineralnim gnojivima, a u zaslanjenim tlima često se nalazi u toksičnoj količini.

Klor ne ulazi u građu organske tvari biljaka, premda ga pepeo bilja sadrži u velikoj količini. Pretežito je lociran u lišću, vakuolama i značajno utječe na osmoregulaciju i otvaranje puči, odnosno 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^+ .

Biljne vrste različito reagiraju na povećanu prisutnost klora u tlu nakon gnojidbe. Od strnih žita najveću koncentraciju klora podnosi zob dok su osjetljive biljne vrste vinova loza i duhan (loše sagorjevanje), a kod krumpira je smanjena sinteza škroba. Klor dobro podnosi šećerna repa. Suvišak klora dovodi do porasta turgora i smanjenja transpiracije uz pojavu sitnih i deformiranih listova.

Simptomi nedostatka nisu zapaženi u prirodnim uvjetima jer se klor lako usvaja iz tla, ali i atmosfere. U kontroliranim uvjetima nedostatak klora zapaža se prvo kao sklonost uvenuću biljaka kod nedostatka vode, a zatim se pojavljuje kloroza i bronzing (metalni sjaj lišća).

7.8. NIKAL

Nikal je posljednji stekao status esencijalnog mikroelementa. Kemijski je sličan željezu i kobaltu (metal, $\rho = 8,902 \text{ g cm}^{-3}$). U biljkama se nalazi kao Ni(II), ali može egzistirati i kao Ni(I) i Ni(III). Gradi stabilne kompleksne spojeve, npr. s *cisteinom* i *limunskom kiselinom*. Neophodan je za rad enzima *ureaze* i mnogih *hidrogenaza* potrebnih za redukciju sulfata, fotosintezu i oksidaciju vodika kod bakterija (*Rhizobium* i *Bradyrhizobium* imaju vrlo nisku hidrogenaznu aktivnost kod nedostatka Ni). Nikal je značajan za usvajanje željeza, također i u procesima klijanja 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 onečišćenim tlima, korištenjem gradskog otpada kao organskog gnojiva ili na tlima gdje matični supstrat sadrži puno nikla (npr. lapori).

8. KORISNI ELEMENTI (BENEFICIJALNI ELEMENTI)

8.1. KOBALT

Povući oštru granicu između neophodnih (*esencijalnih*) i korisnih (*beneficijalnih*) elementa ishrane vrlo je teško. Dobar primjer je kobalt (metal, $\rho = 8,900 \text{ g cm}^{-3}$) koji je esencijalni element za fiksaciju atmosferskog N_2 kod leguminoza, pa u nedostatku kobalta biljke pate od manjka dušika. Kobalt sudjeluje i u inhibiciji sinteze *etilena* (biljni hormon).

Koncentracija kobalta u tlu je izuzetno niska, prosječno 0,02-0,5 ppm. Često se ubraja u neophodne elemente (kod životinja obvezno) zbog nekih važnih fizioloških funkcija. Naime, smatra se da kobalt sudjeluje u razgradnji peroksida nastalog u različitim oksidacijskim procesima i da blokira rad enzima koji sadrže željezo.

Biljke sadrže obično 1-40 ppm kobalta. U živoj tvari Co lako gradi organometalne spojeve, slično Fe, Mn, Zn i Cu, te može ometati fiziološku ulogu tih elemenata kod većih koncentracija.

Kobalt je neophodan element za simbiotske (*Rhizobium* i *Bradyrhizobium*) i nesimbiotske (modrozeleno alge) N_2 -fiksirajuće mikroorganizme pa kod manjka kobalta pada organska produkcija leguminoza. Konstituent je vitamina B_{12} koji je srodan *keminima* (npr. *hemoglobinu*).

8.2. NATRIJ

Natrij je vrlo lagani, srebrnobijeli alkalni metal ($\rho = 0,971 \text{ g cm}^{-3}$) koja se nalazi u svim tlima (oko 2,8 % u litosferi), a biljke ga usvajaju kao Na^+ . U alkaliziranim tlima koncentracija natrija lako dostiže toksične vrijednosti. Također, veće količine natrija u tlu pogoršavaju strukturu tla jer djeluju *peptizatorski*, odnosno utječu na disperziju mikroagregata uz pojavu pokorice, ljepljivosti i niza poteškoća u obradi tla.

Sadržaj natrija u biljkama jako ovisi o biljnoj vrsti. Postoje mišljenja kako je natrij esencijalni element za neke *halofite* i biljke s C_4 tipom fotosinteze, ali to još nije definitivno potvrđeno. Natrij se lako usvaja i, budući da se u biljkama nalazi isključivo kao ion, jako utječe na osmotsku vrijednost i hidratiziranost protoplazme. Na taj način natrij regulira vodni režim biljaka pa može kod nekih

biljnih vrsta na nespecifičan način zamijeniti kalij. Dakle, natrij zamjenjuje kalij u funkciji elektrolita, ali ne može zamijeniti njegove fiziološke funkcije u moduliranju rada enzima. Stoga kod *kaliofilnih* biljaka (npr. šećerna repa) natrij pokazuje pozitivan utjecaj na visinu prinosa dok kod drugih biljaka pretežito utječe negativno (tablica 8.1.).

Tablica 8.1. Utjecaj porasta koncentracije NaCl na rast šećerne repe, kukuruza i graha (Marschner, 1986.)

Biljna vrsta	Konc. NaCl mmol dm ⁻³	Suha tvar relativno	mekv g ⁻¹ ST			
			Na	Cl	K	Ca
Šećerna repa	0	100	0,1	0,05	3,3	1,6
	25	108	1,7	1,0	2,2	0,5
	50	115	2,1	1,2	2,0	0,4
	100	101	2,6	1,5	1,9	0,3
Kukuruz	0	100	0,02	0,01	1,6	0,5
	25	90	0,2	0,5	1,8	0,3
	50	70	0,2	0,6	2,0	0,3
	100	62	0,3	0,8	2,0	0,3
Grah	0	100	0,02	0,01	1,7	2,9
	25	64	0,04	1,0	2,2	3,7
	50	47	0,2	1,4	1,9	3,4
	100	37	0,4	1,5	2,2	3,6

Utvrđeno je da starije biljke usvajaju više natrija od mlađih i nakupljaju ga u vakuolama gdje sudjeluje u neutralizaciji suvišnih kiselina. Kod dovoljne raspoloživosti kalcija usvajanje natrija je smanjeno. Uglavnom se smatra da je natrij koristan element samo za neke biljne vrste, npr. šećernu repu, duhan i lucernu.

8.3. SILICIJ

Silicij je lagani ($\rho = 2,329 \text{ g cm}^{-3}$) polumetal (*metaloide*) koji se u tlu nalazi u vrlo velikim količinama (drugi po rasprostranjenosti u litosferi, odmah iza kisika, 27,2 %), ali je njegova raspoloživa količina mala zbog slabe topljivosti krutih Si spojeva. U vodenoj fazi tla prevladava *ortosilicijeva kiselina* Si(OH)_4 , a biljke usvajaju silicij vjerojatno kao silikatni anion SiO_4^{4-} . U tlu silicij potječe iz procesa razlaganja primarnih silikatnih minerala ili izomorfne izmjene kationa kalcija, magnezija, željeza i aluminija iz kristalne rešetke sekundarnih minerala.

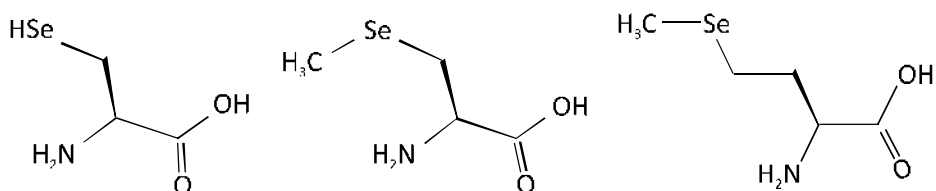
Korisna uloga silicija očituje se učvršćivanjem mehaničke osnove biljaka jer se silicij javlja u obliku *inkrustacija* u sekundarnim staničnim stijenkama pa povećava otpornost biljaka prema polijeganju, štetnim insektima i gljivičnim oboljenjima.

Po kemijskim svojstvima silicij je sličan fosforu i boru pa se smatra da ima određenu ulogu u procesima gdje ta dva elementa sudjeluju. Također je zapaženo kako gnojiva koja sadrže silicij utječu na bolje usvajanje fosfora, vjerojatno tako što silicij zamjenjuje fosfor vezan na seskviokside. Zapažena je uloga silicija i u sprječavanju toksičnosti suviška Mn, Fe i Al, kao i u snižavanju transpiracije.

Silicij se u biljkama nalazi u obliku *koloidne metasilicijske kiseline* (H_2SiO_3), odnosno kao amorfni silicij $SiO_2 \times n H_2O$, te SiO_2 inkrustiran u stanične stijenke i u omotaču škrobnih zrna gdje je kompleksno vezan na ugljikohidrate. Strna žita sadrže znatnu količinu silicija kao i biljke koje rastu na vlažnim tlima.

8.4. SELEN

Selen je polumetal (*metaloid*), male gustoće ($\rho = 4,790 \text{ g cm}^{-3}$) i kemijski sličan sumporu. U tlu se javlja u različitim oksidacijskim stupnjevima (II: Se^{2+} , 0, IV: SeO_3^{2-} i VI: SeO_4^{2-}), a biljke ga usvajaju kao selenat (SeO_4^{2-}) ili selenit (SeO_3^{2-} ,) anion. Kod visoke raspoloživosti selena u tlu jako je smanjeno usvajanje sulfata i tada Se zamjenjuje S u cisteinu i metioninu (slika 8.1.) te enzimima koji sadrže sumpor (npr. *ATP sulfurilaza*). Biljke rado akumuliraju Se, a dopuštena je koncentracija 1-5 ppm u suhoj tvari za animalnu i ljudsku prehranu zbog toksičnog djelovanja (pojava sljepila i paralize).



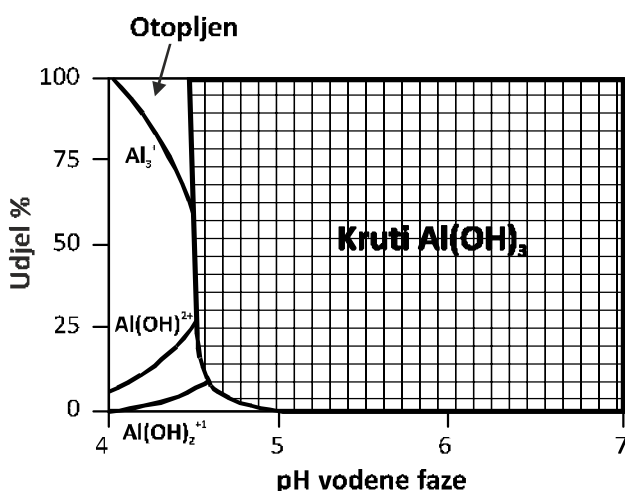
Slika 8.1. Selenocistein, metilselenocistein i selenometionin

Selen je esencijalni element za ljude i životinje (kofaktor *glutathion peroksidaze*).

8.5. ALUMINIJ

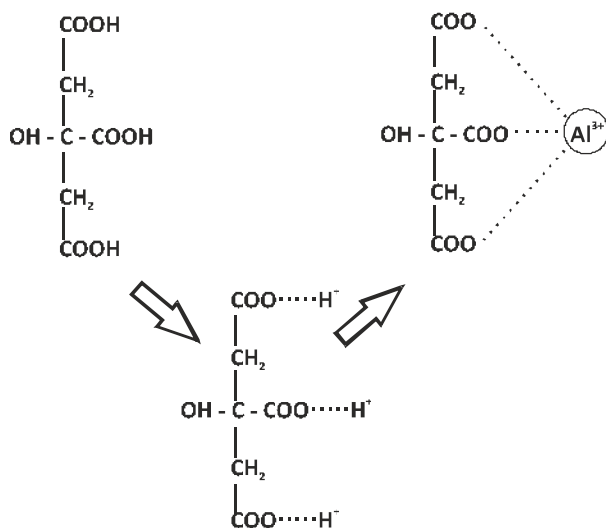
Aluminij je laki, srebrnobijeli metal male gustoće ($\rho = 2,698 \text{ g cm}^{-3}$), jedan od najzastupljenijih elemenata litosfere (treći po zastupljenosti, 8 %), sudjeluje u građi sekundarnih minerala i u vodenoj fazi tla može biti slobodan kad je pH ispod 5,0. Ima podataka kako utječe na stimulaciju rasta više biljnih usjeva (kukuruz, šećerna repa i dr.), premda je pouzdano utvrđeno kako aluminij treba biljka čaja, ali mnogo je više rezultata istraživanja o njegovim toksičnim efektima. Npr., kritična koncentracija kod soje je 5-9 μM (10 % redukcije prinosa), a nodulacija prestaje već kod 0,4 μM .

Fitotoksični efekti $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ (Al^{3+} po konvenciji) zapažaju se općenito kad je pH ispod 4,5 (slika 8.2.). Tada treba obvezno izvršiti kalcizaciju ili primijeniti gips (CaSO_4 sulfatizacija), odnosno rabiti superfosfat pri čemu nastaju netoksični spojevi $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, a mogu se primijeniti i sirovi mljeveni fosfati koji su topljivi u tako kiselim tlama, npr. fluorapatit te nastaju netoksični AlF_2^+ i AlF_2^+ .



Slika 8.2. Kemijski oblici aluminija ovisno o pH tla

Povoljan utjecaj aluminija na rast biljaka zapažen je uglavnom kod biljnih vrsta ili kultivara koje podnose njegovu visoku koncentraciju (više od 30 μM Al^{3+}). Smatra se kako mehanizam tolerancije na suvišak aluminija u tlu počiva na izlučivanju limunske i jabučne kiseline korijenom koje neutraliziraju ione aluminija (slika 8.3.), premda ima više hipoteza.



Slika 8.3. Moguće kemijske reakcije tolerantnosti biljaka na aluminij

8.6. VANADIJ, JOD, TITAN, LANTAN I CER

Biljna tvar sadrži ekstremno male količine i drugih elemenata kao što su vanadij, jod, titan, lantan, cer i dr. Vanadij (V) i titan (Ti) neophodni su elementi za neke mikroorganizme i alge (vanadij za algu *Scenedesmus*), a kod viših biljaka vjerojatno sudjeluju kao katalizatori različitih fizioloških procesa. V djelomično može zamijeniti Mo u N₂ fiksaciji mikroorganizama (*Rhizobium* i *Bradyrhizobium*). U posljednje vrijeme ispituju se povoljni učinci lantana (La) i cera (Ce) na rast i tvorbu prinosa biljaka.

9. ZNAČAJ MAKRO I MIKROELEMENTATA U ISHRANI LJUDI

Makro (potreba veća od 200 mg dan⁻¹) i mikro elementi sudjeluju u građi velikog broja različitih spojeva u ljudskom organizmu (mikroelementi u oko 50.000 spojeva) i, kao kod biljaka tako i kod ljudi, često izazivaju poremećaje metabolizma s vidljivim simptomima, zbog suviška, manjka ili interakcija, antagonističkih, ali i sinergističkih. Biljke su najvažniji izvor mineralnih tvari za ljude i životinje. Tek odnedavno se elementi bor, krom, mangan, nikal, kositar, vanadij, molibden, arsen, litij, aluminij, stroncij, cezij i silicij smatraju nužnima u ljudskoj prehrani.

Tablica 9.1. Prosječna koncentracija elemenata u ljudskom tijelu

Makroelementi g kg ⁻¹		Mikroelementi mgkg ⁻¹	
Ca	15	Fe	20-50
P	10	Zn	10-50
K	2	Cu	1-5
Na	1,6	Mo	1-4
Cl	1,1	Se	1-2
S	1,5	I	0,3-0,6
Mg	0,4	Mn	0,2-0,5
		Co	0,02-0,1

9.1. KALCIJ (CA)

Dnevne potrebe odraslog čovjeka su 1,2 g Ca, a za trudnice najmanje 1,5 g Ca dnevno.

Kalcij je po zastupljenosti peti element u ljudskom tijelu, strukturni element kostiju, a na staničnoj razini je *ionski glasnik* s mnogobrojnim funkcijama.

Smetnje u pravilnoj opskrbljenosti tijela kalcijem može prouzročiti prekomjerno konzumiranje kiselina, kuhinjske soli, konzervirane hrane i limunade. Vitamin D, mangan i fluor potpomažu njegovu ugradnju u kosti i zube, a koži ju prekomjerno konzumiranje špinata, rabarbare i kakaa.

Ekstremni nedostaci ovog elementa dovode do grčenja mišića. Stoga djeci s čestim grčevima manjka Ca, Mg, vitamin D, a često i Mn. Posebice je značajna pravilna prehrana kalcijem kod trudnica i bolesnika s osteoporozom. Razumljivo, njegov nedostatak rezultira krhkim i lomljivim kostima, lošim zubima i noktima, te presuhom i slabom kožom.

Najznačajnije namirnice u pravilnoj prehrani kalcijem su sirevi i ostali mliječni proizvodi, sezam, leća, orasi, jetra, školjke i srdele.

Prekomjerno unošenje Ca u organizam prehranom praktički nije moguće.

9.2. FOSFOR (P)

Dnevne potrebe odraslog čovjeka za fosforom su 800, a trudnica 1,2 g dan⁻¹.

Uzimanje visokih doza dovodi do gubitka kalcija, odnosno smanjivanja gustoće koštane mase. Fosfor je nezamjenjiv u metabolizmu energije i tvari, gradi ATP, funkcioniranju mnogih enzima, izgradnji nukleinskih kiselina, fosfolipida, fosfoproteina, sudjeluje u građi velikog broja koenzima, metabolizmu eritrocita itd.

Sastojak je gotovo svih namirnica, a manjak fosfora (hipofosfatemija) je rijetka pojava.

9.3. KALIJ (K)

Dnevne potrebe odraslog čovjeka su ~ 3,5 g K, a u količinama do 5 g dan⁻¹ je neškodljiv.

Manjak kalija uglavnom nije uzrokovan nedostatnim unošenjem u organizam, već prekomjernim izlučivanjem tijekom teškog rada i sportskih napora, posebice u kombinaciji s uzimanjem prevelikih količina kuhinjske soli, laksativima i lijekovima protiv visokog tlaka. Kalij je neophodan u radu mišićnog staničja te su posljedice nedostatka grčevi, slabija aktivnost crijeva i slabljenje srca, a kofaktor je enzima piruvatkinaze. Tromost probavnih organa učinkovito se može riješiti i bez laksativa konzumiranjem sjemenki lana i hranom bogatom vlaknima uz velike količine tekućine.

Kalijem bogate namirnice su mrkva, gljive, sojino brašno, pšenične klice, kajsije i banane (posebice suhe), sokovi od povrća i mineralna voda.

Prekomjerno unošenje kalija u organizam može oštetiti bubrege koji reguliraju njegov sadržaj u tijelu, a inzulin je prvi u obrani od hiperkalemije.

9.4. NATRIJ (NA)

Dnevne potrebe odrasle osobe su 2-4 g Na.

Natrij je nezamjenjiv elektrolit u ljudskom tijelu. Njegova normalna koncentracija u izvanstaničnoj tekućini je 135 do 146 mmol dm⁻³. K i Na su vrlo važni u održavanju transmembranskog potencijala i prijenosu nervnih signala, a sam natrij utječe na topljivost drugih minerala u krvi i sprječava nakupljanje

depozita unutar krvotoka. Velike količine se gube znojenjem, a hiponatrijemiju (manjak Na) karakterizira pojava slabosti cijelog organizma uz dezorijentaciju što u vrlo ozbiljnim slučajevima može izazvati neurološke probleme i kardiovaskularnu nestabilnost.

Unosi se u velikoj količini hranom i kuhinjskom soli, resorbira se dobro, a suvišak se izlučuje bubrezima.

9.5. KLOR (CL)

Odrasloj osobi se preporuča unos od 750 do 900 mg Cl dnevno.

Klor je važan za ljude. U tijelu je anion i kao takav važan je elektrolit izvanstaničnih tekućina, posebice u održavanju osmotske vrijednosti i zadržavanju vode. U želucu gradi solnu kiselinu važnu za razgradnju bjelančevina, ima ulogu u apsorpciji vitamina B12, transportu i oslobađanju CO₂. Također, uz kalij i natrij je važan prijenosnik električnih signala ljudskog tijela.

9.6. SUMPOR (S)

Sumpor je strukturni element bjelančevina s kojima se unosi u tijelo u dovoljnoj količini (ulazi u građu aminokiselina cisteina, cistina i metionina). Unosi se i kao anorganski sumpor (sulfati i sulfidi).

Gradi niz važnih spojeva, kao što su tiamin, biotin, sulfolipidi, konjugirane žučne kiseline i dr., sudjeluje u velikom broju enzimatskih reakcija, u građi antitijela itd. Pri nedostatku sumpora dolazi do degeneracije kolagena, hrskavice, ligamenata i tetiva.

9.7. MAGNEZIJ (MG)

Dnevne potrebe odraslog čovjeka su 300-400 mg Mg.

Magnezij utječe na rad više od 300 enzima i kofaktor je svih enzima uključenih u procese fosforilacije pomoću ATP (fosfataze, pirofosfataza i dr.) Njegov nedostatak je često posljedica pojačanog izlučivanja (sportski naponi i teške tjelesne aktivnosti uz laksative i lijekove za izlučivanje tekućine, dijabetes), a dovodi do problema s mišićnim staničjem uz pojavu srčanih smetnji (pseudo-angina pectoris, aritmija), noćnih bolova u listovima nogu i teškoća s krvožilnim sustavom (slabija prokrvljenost). Osim toga, manjak može izazvati poteškoće s probavom, koncentracijom, pojavu razdražljivosti, kronični umor, depresije i pojačano izlučivanje adrenalina, što vrlo često rezultira stresom.

Magnezijem bogate namirnice su kakao, pšenične mekinje, orasi, kruške, zeleno lisnato povrće, suncokret, soja, kikiriki i riža.

Toksične količine Mg su 20-30 g dnevno, ali se te količine teško mogu unijeti prehranom (treba biti pažljiv kod problema s bubrezima i štitnjačom). Također, Mg može priječiti djelovanje tetraciklin antibiotika.

9.8. ŽELJEZO (FE)

Dnevne potrebe odraslog čovjeka su 10-15 mg Fe, odrasle žene i mladi u razvoju trebaju 20 mg, a trudnice do 60 mg Fe.

Nedostatak željeza često se javlja kod djece koja konzumiraju malo voća i povrća, kod vrhunskih sportaša, trudnica, žena tijekom mjesečnog ciklusa i dobrovoljnih davatelja krvi. Kod starijih ljudi slabija je produkcija želučane kiseline što dovodi do slabog iskorištavanja Fe iz hrane. Također, prekomjerno uživanje crnog čaja (tanin) veže Fe u crijevima i čini ga neraspoloživim.

Fe je konstituent crvenih krvnih zrnaca koja prenose kisik (hemoglobin), ugljični dioksid i neke druge spojeve. Stoga njegov nedostatak dovodi do slabije pokretljivosti, slabe prokrvljenosti kože, čestih migrena, dekoncentracije, a čest simptom su ispucali kutovi usana.

Namirnice bogate željezom su grah, usoljene haringe, "crveno meso", proso, leća, orasi (špinat sadrži nedovoljno željeza!). Treba ga konzumirati hranom zajedno s vitaminom C i bakrom.

Toksični učinak se pojavljuje unošenjem 5 g dnevno. Svakako je opasno unošenje u organizam kod osoba sa smetnjama u iskorištavanju Fe i poremećajima koji dovode do nakupljanja željeza u organizmu.

9.9. CINK (ZN)

Odrasla osoba dnevno treba 15-19 mg Zn.

Cink sudjeluje u metabolizmu više od 200 enzimskih reakcija, značajan je antioksidans, utječe na porast imuniteta i zacjeljivanje rana, važan je za rast fetusa i sintezu neurotransmitera u mozgu.

Manjak Zn može uslijediti pri vegetarijanskoj prehrani, bolestima probavnog sustava, povećanim količinama teških metala, Ca i Mg u hrani, te nakon uzimanja tetraciklinskih antibiotika. Posljedice manjka cinka su smanjena produkcija inzulina i poremećaj u regulaciji šećera u krvi, slabljenje obrambenog sustava organizma, slabljenje i istrošenost kože, noktiju i kose (čak i opadanje kose), poremećaji u spolnom razvoju i životu (neplodnost, impotencija, neredovita mjesečnica), kao i problemi mentalnog razvoja djece.

Cinkom bogate namirnice su meso, riba, crni kruh i peciva, mliječni produkti, suncokret, soja, pšenica i zob.

Toksična dnevna količina cinka je 500 mg, a prekomjerno konzumiranje u količini od 300 mg dnevno tijekom višetjednog razdoblja dovodi do prekomjernog izlučivanja Cu i Mn, metalnog okusa u ustima, glavobolja, povraćanja i dijareje.

9.10. BAKAR (CU)

Dnevne potrebe odraslih osoba su 1,5-3,0 mg Cu.

Raspoloživost bakra unesenog hranom u ljudskom organizmu najčešće ometaju oštećenja jetre (alkohol i neki lijekovi), čir na želucu i bolesti probavnog sustava. Također, značajan negativan utjecaj na količinu bakra u hrani ima opterećenost tala teškim metalima i industrijska prerada hrane.

Cu je konstituent u stanicama imunološkog sustava čovjeka te njegov nedostatak može biti uzrok čestih infekcija (kao i u slučaju manjka Se, Zn, Fe i Mn). Pored toga, nedostatak bakra može dovesti do slabokrvnosti unatoč dostatnoj snabdjevenosti organizma željezom i vitaminom C, jer regulira ugradnju željeza u crvena krvna zrnca. Manjak može rezultirati i srčanom aritmijom i nedostatnom prokrvljenosti srca. Značajan je za artritis i gonartritis, jer je konstituent enzima superoksid dismutaze koji djeluje na ublažavanje boli i smiruje upalne procese u organizmu. Neka studijska istraživanja i saznanja austrijskih liječnika pokazuju da je kod osoba s problemom pamćenja i učenja utvrđen nedostatak Cu i Zn, dok su kod preaktivne i prerazigrane djece utvrđene visoke količine Cu uz nedostatak Zn.

Namirnice bogate bakrom su krastavac, orasi, riba, ostrige, leća i proso. Toksična doza Cu je 100 mg iako je i 30 puta povećana količina u jetri netoksična. Ipak, na preveliku količinu Cu u organizmu mogu ukazati neke bolesti jetre, žuči i bubrega.

9.11. MOLIBDEN (MO)

Dnevna potreba odraslog čovjeka je oko 50 do 250 µg Mo, a toksične doze su iznad 1 mg dan⁻¹.

Komponenta je enzima uključenih u alkoholnu detoksikaciju, a sudjeluje u metabolizmu sumpora. Nedostatak Mo je rijetka pojava koja je uglavnom prouzročena jednoličnom prehranom. Osobama s pojačanom kristalizacijom mokraćne kiseline (giht) i bubrežnim kamencima često nedostaje Mo. Posljedica nedovoljne količine Mo u pitkoj vodi ili hrani može biti karijes zuba unatoč dostatne količine F, osteoporoza i artritis. Nedostatak također može biti i uzrok impotencije.

Molibdenom bogate namirnice su heljda, soja, leća, orah, pšenične klice, bijeli luk, crni kruh, zob, riža, grašak, a siromašne su meso, voće i povrće.

Prevelike količine Mo u ljudskom organizmu su za naše područje gotovo nemoguće, a visok sadržaj može uzrokovati nedostatak bakra.

9.12. SELEN (SE)

Dnevna potreba odraslih ljudi je 250-300 µg Se.

Uzrok nedostatka selena povezan je sa smanjenom količinom ili njegovom pristupačnosti u tlu. Neka mineralna gnojiva, kao i teški metali, posebice Pb, Cd i Hg, vežu selen u tlu i onemogućuju njegovo kruženje u prehrambenom lancu čovjeka. Selenocistein sada se smatra 21. esencijalnom aminokiselinom (kodon UGA), a Se je još komponenta glutation peroksidaze i jodtironina.

Selen je sastavni dio stanica imunološkog sustava čovjeka te su posljedice nedostatka povećana osjetljivost na infekcije i pojava raka (debelog crijeva, dojke i prostate), kao i povišeni tlak, podložnost infarktu, reumatske bolesti i oštećenja jetre. Općenito, korist od selena je zdravlje kardiovaskularnog sustava i zaštita od pojave dijabetesa i inzulinske rezistencije. Pri nedostatku selena iz tijela se ne izlučuju Hg, Cd i Pb što može prouzročiti različite bolesti.

Najviše ga sadrže riba, kokos, pistacio, orasi i pšenične klice.

Toksične količine su 50-100 mg, a posljedice se mogu pojaviti kod 100 puta povećanih dnevnih količina tijekom više mjeseci. Istovremeno uzimanje prirodnog vitamina E (ulje pšeničnih klica) optimizira djelovanje selena. Visoke doze su toksične, a simptomi su opadanje kose i noktiju.

9.13. JOD (I)

Dnevna potreba joda je 150 µg.

Sastavni je dio hormona štitne žlijezde koja sadrži 3/4 ukupnog joda u ljudskom tijelu, a deficit joda u hrani može imati dramatične učinke na metabolizam ljudi i njihovo zdravlje. U mnogim krajevima čest je nedostatak joda u hrani i pojava hipotireoze (gušavost) pa se prakticira jodiranje kuhinjske soli, a dobri prehrambeni izvori joda su plodovi mora, kruh i mliječni proizvodi. Jod se smije uzimati samo pod liječničkim nadzorom.

9.14. MANGAN (MN)

Dnevne potrebe odraslih osoba su 2-5 mg Mn.

Glavni uzroci nedostatka Mn kod ljudi su nedovoljna produkcija želučane kiseline, industrijska prerada namirnica, ali i nedostatna opskrbljenost tala biljkama pristupačnim oblicima. Dugotrajno konzumiranje povišenih količina Zn

(60 mg dnevno tijekom više mjeseci) rezultira prekomjernim izlučivanjem Mn iz organizma. Stoga uzimanje viših doza Zn uvijek treba kombinirati s Mn.

Mangan regulira metabolizam Ca, a značajan je i kod alergijskih, astmatičkih, epileptičkih i reumatskih pojava koje su česte pri njegovom nedostatku. Muke takvih bolesnika mogu se ublažiti manganom. Nedostatak Mn sprječava ugradnju Ca u kosti i zube te je u terapiji kalcijem kod osteoporoze značajna vezanost s Mn.

Manganom bogate namirnice su pšenične klice, zobne pahuljice, lješnjak, crni kruh, a nešto manje sojino brašno, suncokret i raž.

Suvišak mangana rezultira drhtanjem mišića, otkazivanjem bubrega, bolestima centralnog nervnog sustava i haluciniranjem, a mogu ga prouzročiti doze koje premašuju dnevne potrebe 50 puta.

9.15. KOBALT (CO)

Dnevne potrebe su 0,1-0,3 μg Co.

Kobalt se u ljudskom organizmu nalazi "u tragovima". Sastavni je dio vitamina B12 i u tom se obliku i unosi u organizam. Nedostatak Co rezultira posebnim oblikom slabokrvnosti. Njime je najbogatiji prženi kikiriki, a značajne koncentracije sadrže leća, grah, kavijar, kajsija, kruška, jabuka i crveni luk. Toksične koncentracije Co nisu poznate.

9.16. ULTRAMIKROELEMENTI

9.16.1. Krom (Cr)

Dnevne potrebe odraslih su 50-200 μg Cr.

Povećano konzumiranje bijelog kruha, tjestenine i šećera znači i povećanu potrebu za kromom jer bez njega nema razgradnje šećera (inzulin može djelovati samo uz pomoć kroma). Dakle, njegov nedostatak je potpomognut dijabetesom, a rezultira i povišenjem LDL-kolesterola i masnoća u krvi. Količina navedenih supstanci u krvi može se sniziti pomoću kroma.

U najvećim količinama ga sadrže poriluk, melasa, pivski kvasac, orasi i sirevi.

Trovanje je moguće samo ako tla ili pitka voda sadrže povećane količine 6-valentnog kroma koji je kancerogen. Dijetetsko konzumiranje 3-valentnog kroma ne može štetiti čovjeku.

9.16.2. Vanadij (V)

Dnevne potrebe su 1-2 mg V.

Vanadij ima značaja u izgradnji kostiju i zubi tijekom odrastanja, a novija istraživanja ukazuju na njegovu izuzetnu funkciju regulacije šećera u krvi i antikancerogeno djelovanje. Također, zajedno s nezasićenim masnim kiselinama, utječe na snižavanje razine kolesterola u krvi, metabolizam lipida te snižavanje krvnog tlaka. Vanadij se nalazi u biljnim uljima (grah, banane, crveni luk), a naročito u mlijeku u prahu i bakalaru.

9.16.3. Fluor (F)

U organizmu čovjeka nalazi se "u tragovima", a značajan je za ugradnju kalcija u kosti i zube te njihovu otpornost na karijes. Zbog toga se često pitka voda fluorira, ali suvišak F može biti štetan. Riba i različiti čajevi sadrže značajne količine fluora.

9.16.4. Kositar (Sn)

Djelovanje kositra slabo je proučeno. Sastavni je dio probavnih enzima u želucu. Trovanje kositrom moguće je uporabom hrane iz konzervi koje sadrže kositar ili zbog uporabe pesticida koji sadrže kositar.

9.16.5. Germanij (Ge)

Dnevne potrebe germanija su oko 150 µg na dan.

Trenutno ima vrlo malo podataka o djelovanju germanija, ali je zapaženo kako igra značajnu ulogu u poboljšanju imuniteta (antivirusno i antikancerogeno djelovanje) te se koristi u terapiji tumorskih bolesti. Duže uzimanje germanija oštećuje bubrege.

9.16.6. Stroncij (Sr)

Dnevna potreba stroncija je oko 1 mg na dan.

Toksičnost u suvišku stroncija je gotovo nepoznata jer ga ima malo u hrani i okolišu (s izuzetkom radioaktivnog izotopa Sr-90).

Značajan je za kosti i metabolizam hrskavice te preventivno utječe na pojavu artritisa, karijesa i osteoporoze. Također, stroncij potpomaže sorpciju kalcija (pored Mg, B i vitamina D). Novija istraživanja pokazuju kako stroncij ima zaštitnu ulogu od pojave ciroze jetre.

9.16.7. Cezij (Cs)

Dnevne potrebe cezija su oko 100 µg na dan.

Cezij je važan u proizvodnji majčinog mlijeka. Suvremena znanost ga ubraja u ultramikroelemente. Značajne količine cezija sadrže luk, grašak i kupus.

9.16.8. Arsen (As)

Uobičajeno je arsen svrstati u otrovne elemente, ali nova saznanja navješćuju da arsen stimulira rad imunološkog sustava (dakako, samo u niskim koncentracijama).

9.16.9. Litij (Li)

Hranidbena uloga litija slabo je istražena, ali se u farmaciji s uspjehom koristi protiv depresije i paranoidne shizofrenije. Uporaba litija bez liječničkog nadzora nije preporučljiva zbog mogućeg predoziranja i hipotireoze. Plodovi mora sadrže više litija u odnosu na druge namirnice.

9.17. OTROVNI TEŠKI METALI

Uz nadzor zagađenosti okoliša i hrane teškim metalima, pretjeran strah nije potreban jer se teški metali mogu izlučiti iz organizma unošenjem određenih mineralnih elemenata i vitamina, dakle, pravilnom prehranom. Ako tako usmjeren izbor namirnica nije moguć, preporučuju se visokovrijedne dopune u prehrani, dakako, uz nužan oprez i stručni nadzor. Vitamini i mineralni elementi koji reguliraju izlučivanje teških kovina iz tijela čovjeka su Se, Cu, Zn, vitamini A, B1, B2, C i E.

Nikal (Ni), iako aktivira određene enzime i pripada neophodnim elementima za čovjeka, poznatiji je prije svega kao uzročnik alergija na nakit i modne ukrase izrađene od neplemenitih metala i kao uzročnik raka. O značaju nikla za ljude i životinje ima puno manje podataka u odnosu na biljke. Novija istraživanja pokazuju kako Ni utječe na metabolizam folne kiseline.

Olovo (Pb) je sveprisutni teški metal (ispušni plinovi automobila i tvornica), a može značajno smanjiti otpornost čovjeka. Jače trovanje rezultira bljedoćom, grčevima želuca i stomaka, slabljenjem živaca i bubrega, a štetno utječe i na sposobnost rasuđivanja, refleksa i reakcija što je posebice značajno za vozače.

Živa (Hg) dopijeva u prehrambeni lanac čovjeka prije svega pesticidima koji sadrže živu (više se ne koriste!), ali su vrlo značajan izvor žive i tvorničke

otpadne vode. Živa se akumulira u organizmu riba i školjki čija prehrambena vrijednost zbog toga može biti dvojbena. Trovanje živom ogleda se u drhtanju mišića, glavoboljama, nesanicima, smetnjama u pamćenju i problemima s ravnotežom.

Kadmij (Cd) se nalazi u cigaretnom dimu, a godišnje se tisuće tona kadmija oslobađa u atmosferu izgaranjem ugljena i raznih ulja. Kadmij sadrže i otpadne tvorničke vode, te neka mineralna gnojiva. Stoga je razumljivo da se kadmij, kao i živa, nalazi u gotovo svim namirnicama. Kao i ostali teški metali, i kadmij slabi imunološki sustav čovjeka.

10. GNOJIVA

10.1. MINERALNA GNOJIVA

Mineralna gnojiva su pretežito soli dobivene preradom prirodnih minerala, ali se proizvode i iz atmosferskog dušika. Zbog toga se često nazivaju i *sintetička* ili, pogrešno, *umjetna*. Industrija gnojiva svrstava se u sekundarnu kemijsku proizvodnju, a proizvodnja sumporne i fosforne kiseline u baznu kemiju čiji se proizvodi i velike količine industrijskog otpada opravdano identificiraju kao potencijalni izvor onečišćenja okoliša.

Pod mineralnim gnojivima podrazumijevaju se soli i drugi proizvodi koji sadrže elemente neophodne za rast i razvitak biljaka i postizanje visokih i stabilnih priroda poljoprivrednih biljnih vrsta. Gnojiva se unose u tlo radi povećanja priroda, ubrzanja rasta, poboljšanja kakvoće poljoprivrednih proizvoda i poboljšanje produktivnih svojstava tla, a sve češće se koriste i gnojiva za izvankorijensku ili folijarnu ishranu u obliku tekućine.

10.1.1. Podjela mineralnih gnojiva

Gnojiva se dijele prema podrijetlu, namjeni, sastavu i načinu proizvodnje, a prema funkciji dijele se na:

- Izravna ili neposredna gnojiva koja se u tlu vrlo brzo hidroliziraju do tvari koje biljke izravno apsorbiraju (npr.: superfosfat, nitratna, amonijska i dr. gnojiva). Sadrže hranjive elemente u obliku mineralnih soli koji se nakon hidrolize mogu izravno asimilirati.
- Neizravna ili posredna gnojiva sadrže biogene elemente, ali u kemijskom obliku koje biljke ne mogu odmah usvojiti (npr.: humus, vapno i dr.) te utječu posredno (npr. potiču mikrobiološku aktivnost, neutraliziraju kiselost, djeluju preko poboljšanja strukture tla i dr.) ili direktno nakon transformacije (mikrobiološke ili kemijske).
- Kompletna ili potpuna (često se nazivaju i kompleksna ili NPK gnojiva) pružaju sve bitne sastojke za rast biljaka tako da dodatna gnojiva nisu potrebna.
- Nepotpuna gnojiva sadrže samo jedan ili dva od tri glavna hranjiva elementa (N, P, K, NP, NK ili PK), npr.: $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, KNO_3 i dr.
- Miješana gnojiva se dobiju miješanjem odgovarajuće količine pojedinačnih gnojiva.
- Sintetska organska gnojiva (urea, kalcij-cijanamid i dr.).

Prema podrijetlu razlikuju se sljedeće vrste gnojiva:

- Mineralna ("*sintetska*", "*umjetna*") najvećim dijelom su mineralne soli, iako se u ovu grupu ubraja i urea koja je organski spoj, ali se u tlu pod djelovanjem mikroorganizama transformira do mineralnih oblika dušika. I druga mineralna gnojiva mogu sadržavati ugljik, ali sintetski proizvodi su za razliku od prirodnih topljivi u vodi, često i 100 %. Potrebno je naglasiti da molekulu uree biljka može usvojiti kako korijenom tako i folijarno.
- Organska (prirodna, naravna) sadrže hranjive elemente pretežito u obliku organskih spojeva i najčešće su prirodnog podrijetla (ponekad se nazivaju i prirodna organska), npr. stajnjak, treset, slama i dr.
- Organomineralna gnojiva su smjesa organskih i mineralnih.
- Bakterijska sadrže kulture bakterija koje imaju sposobnost transformacije nepristupačnih oblika hraniva u bioraspoložive.

Prema vremenu unošenja gnojiva se dijele na:

- Osnovna koja se unose pod brazdu,
- Startna koja se unose neposredno prije ili za vrijeme sjetve,
- Gnojiva za prihranu koja se dodaju tijekom vegetacije.

Prema vrsti hranjivog elementa gnojiva su *dušična*, *fosforna*, *kalijeva*, *magnezijeva*, *borna* itd.

Osnovni oblici dušičnih gnojiva su:

- Amonijska (amonijske soli, npr. sulfati, kloridi, karbonati),
- Nitratna (kalcijeve, natrijeve i dr. soli nitratne kiseline),
- Amonijskonitratna i
- Amidna gnojiva.

Fosforna gnojiva su soli ortofosfatne kiseline (ali i metafosfatne, pirofosfatne i polifosfatne kiseline), dok se kalij nalazi u obliku soli klorida, sulfata, karbonata itd.

Prema agrokemijskom značaju prava mineralna gnojiva sadrže neophodne biogene elemente, a posredna gnojiva ih mobiliziraju iz rezervi tla, bilo poboljšanjem njegovih fizičkih svojstava ili putem kemijskih i bioloških promjena koje izazivaju u tlu. Tu spadaju gnojiva za kalcizaciju, uporaba gipsa i sl.

Mineralna gnojiva mogu sadržavati jedan ili više hranjivih elemenata, pa se prema tome dijele na:

- Pojedinačna i
- Složena gnojiva.

Npr., NaNO_3 i $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ su pojedinačna, premda magnezij i natrij biljke također koriste, dok su KNO_3 i $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ složena gnojiva. Dakle, podjela se temelji na tri osnovna ili glavna hranjiva elementa N, P i K. Ovisno o broju glavnih elemenata složena gnojiva su dvojna ili trojna (potpuna). Gnojiva koja sadrže malu količinu punila nazivaju se koncentrirana, pri čemu se punilom prilagođava potrebna koncentracija hraniva. Ako je punilo produkt kemijske reakcije kod proizvodnje mineralnih gnojiva, naziva se još i balast.

Prema sastavu gnojiva se dijele na:

- Pojedinačna,
- Miješana i
- Kompleksna.

Pojedinačna mineralna gnojiva sadrže samo jedan neophodan element. Miješana su smjesa pojedinačnih gnojiva, dok su kompleksna proizvod kemijskih reakcija i sadrže više hranjivih elemenata u nekoliko oblika. Podjela na kompleksna i miješana gnojiva je uvjetna, jer kod miješanih gnojiva dužim skladištenjem dolazi također do različitih kemijskih reakcija (vidi antagonizam gnojiva).

Sadržaj i omjer hraniva u gnojivu može biti različit. Gnojiva koja imaju omjer hranjivih elemenata prilagođen potrebama određene biljne vrste ili sadržaju raspoloživih hraniva u tlu, nazivaju se prilagođena. Ukoliko sve komponente služe za biljnu ishranu, tada su to gnojiva bez punila (nebalastna), a u ovu grupu ulaze soli čiji kation i anion biljke koriste, npr. KNO_3 , NH_4NO_3 itd.

Ovisno o agregatnom stanju, gnojiva su:

- Kruta,
- Tekuća i
- Plinovita.

Kruta gnojiva mogu biti praškasta, peletirana (prah komprimiran u granule ili štapiće koji mogu sadržavati pesticide, hormone i dr.), granulirana (sušenjem viskozne mase u struji toplog zraka), trionizirana (npr. granule vermikulita s NPK) i dr. Tekuća se dijele na prave otopine (nemaju talog) i suspenzije, dok su plinovita takvog agregatnog stanja kod normalnog atmosferskog tlaka. Od tekućih gnojiva u posljednje vrijeme "Petrokemija" d.o.o. iz Kutine nudi više formulacija za različite potrebe pod zajedničkim imenom Fertina koje pored NPK sadrže druge makro i mikroelemente (Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn i B).

Gnojiva koja od biogenih elemenata sadrže isključivo ili najveću koncentraciju mikroelemenata nazivaju se i mikrognojivima jer se rabe u malim količinama (do 500 g ha^{-1} aktivne tvari). Radi poteškoća u ravnomjernom raspodjeljivanju tako malih količina, uobičajeno se dodaju konvencionalnim gnojivima u procesu

njihove proizvodnje ili se sjeme prije sjetve potapa u nisko koncentrirane otopine takvih gnojiva (ponekad se dodaje u omotač peletiranog sjemena).

10.1.2. Kakvoća mineralnih gnojiva

Najvažnije mjerilo kojim se ocjenjuje kakvoća gnojiva je učinak na visinu priroda u odnosu na vrstu usjeva, klimatske prilike i agrotehničke mjere. Budući da je kod nekih poljoprivrednih vrsta kakvoća ispred količine priroda, ili su podjednako značajni, djelovanje gnojiva na svojstva dobivenih proizvoda također je njihova bitna odlika. U tom smislu, pored količine *aktivne tvari*, kemijski oblik hraniva u gnojivu i njihov omjer (*formulacija*) imaju svakako veliki značaj.

Značajan kriterij za ocjenu vrijednosti gnojiva je utjecaj na promjenu plodnosti tla preko kemijskih, fizikalnih ili bioloških promjena. Otuda količina i svojstva punila također imaju značajnu ulogu, posebice preko utjecaja na *fiziološku reakciju gnojiva* i promjenu pH-vrijednosti tla.

Mineralna gnojiva se primjenjuju u velikim količinama (nekoliko stotina kg ha^{-1} , a kod meliorativne gnojidbe i nekoliko t ha^{-1}) pa fiziološka reakcija gnojiva, naročito u dugogodišnjoj primjeni, može utjecati na trajno zakiseljavanje ili alkalnost tla. U tablici 10.1. prikazana je fiziološka reakcija nekih gnojiva pomoću *potencijalnog alkalnog ili potencijalnog ekvivalenta zakiseljavanja* koji pokazuje koliko je potrebno dodati kg CaO ili CaCO_3 za neutralizaciju promjene pH tla kod unošenja 100 kg gnojiva. Negativna vrijednost alkalnog ekvivalenta ukazuje na fiziološku kiselost gnojiva, a pozitivna na alkalnost. Tablica 10.2. prikazuje fiziološku reakciju mineralnih gnojiva izraženu relativno na NaNO_3 i preko solnog indeksa (koristi se u SAD).

Tablica 10.1. Alkalni ekvivalenti mineralnih gnojiva (Leskošek, 1989.)

Vrsta mineralnog gnojiva	Alkalni ekvivalent za 100 kg	
	kg CaO	kg CaCO_3
Amonijev sulfat	-60	-110
KAN 27%	-12	-20
Urea	-46	-80
NPK (Petrokemija-stara)	-6 do -7	-10 do -15
NPK (Petrokemija-nova)	-17 do -22	-30 do -40
MAP (12:52:0)	-36	-65
Superfosfat	-2	-4
Thomasov fosfat	+45	+80

Potrebna količina CaCO_3 za neutralizaciju kiselosti gnojiva može se izračunati prema *Pierre-u* za svako gnojivo. Npr., ekvivalent svakog kg N (atomska i

ekvivalentna masa = 14) kada se rabi kao amonijak, zahtijeva za neutralizaciju sljedeću količinu CaCO_3 (ekvivalentna masa Ca je 20, a CaCO_3 sadrži 40 % Ca):

$$\frac{1 \times 20}{2 \times 14 \times 0,40} = 1,79 \text{ kg CaCO}_3$$

Proračun neutralizacije za MAP ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) bit će proporcionalan omjeru atomske mase fosfora i dušika (31/14) i utemeljen na ekvivalentnoj masi fosfora u monoamonijском fosfatu (31/3). Za svaki kg N u MAP-u potrebno je:

$$\frac{31 \times 3}{14 \times 31} = \frac{3}{14}$$

odnosno prema *Pierre*-u:

$$\frac{1 \times 3}{3 \times 14} \text{ ekvivalenata Ca} = \frac{1 \times 20}{14} \text{ kg}$$

Preračunato na 40 % Ca u CaCO_3 za svaki kg P_2O_5 u MAP-u potrebno je:

$$\frac{1 \times 20}{14 \times 0,40} = 3,58 \text{ kg CaCO}_3 \text{ N iz MAP-a}$$

Dakle, ukupno je potrebno za neutralizaciju svakog kilograma N i P_2O_5 iz MAP-a:

$$1,79 + 3,58 = 5,37 \text{ CaCO}_3$$

Tablica 10.2. Fiziološka reakcija mineralnih gnojiva izražena kao solni indeks relativno na NaNO_3 i na jednako iznošenje hraniva (*Andrew S. McNitt*, Department of Agronomy, Penn State, 1996.)

Mineralno gnojivo	Aktivna tvar %			Solni indeks	
	N	P_2O_5	K_2O	Relativno na NaNO_3	Na jednako izn. hraniva
Anhidrirani amonijak	82	-	-	47	0,57
Urea ($\text{NH}_2\text{-CO-NH}_2$)	46	-	-	75	1,62
NH_4NO_3	33 - 34	-	-	105	3,13
UAN	28 - 32	-	-	11	0,30
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	21	-	-	74	3,25
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	18 - 21	46 - 53	-	30	2,40 - N
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	11 - 13	48 - 52	-	34	1,60 - N
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	-	46	-	10	0,22
KCl	-	-	60 - 62	116	1,94
K_2SO_4	-	-	50	46	0,85
KNO_3	13	-	45	74	5,34 - N
CaCO_3 (56 % CaO)	-	-	-	5	0,08

Umjesto proračuna neutralizacije fiziološke kiselosti gnojiva po *Pierreu*, ponekad se koristi proračun po *Sluijsmansu* za izračunavanje potrebne količine CaCO_3 na 100 kg za neutralizaciju promjene pH-vrijednosti uporabom gnojiva:

$$-1,0 \times \text{CaO} - 1,4 \times \text{MgO} - 0,6 \times \text{K}_2\text{O} - 0,9 \times \text{Na}_2\text{O} + 0,4 \times \text{P}_2\text{O}_5 + 0,7 \times \text{SO}_3 + 0,8 \times \text{Cl} + n \times \text{N}$$

(gdje je n = faktor za dušik (0,8 za livade, a 1,0 za usjeve)). Ovaj način izračunavanja potrebne količine CaCO_3 za neutralizaciju daje niže vrijednosti u odnosu na *Pierre*-ov način (npr. 3,03 prema 5,37 za MAP).

Fiziološka reakcija gnojiva razlikuje se od njihove kemijske reakcije. Npr., kalijaska gnojiva su kemijski neutralne soli, ali fiziološka reakcija im je kisela jer se nakon primjene kalij iz njih izmjenjivo veže na adsorpcijski kompleks tla, usvaja korijenom viših biljaka ili mikroorganizmima, ili čak fiksira, dok u vodenoj fazi tla zaostaje "kisel" kloridni ili sulfatni anion.

Smatra se kako jedinica aktivne tvari gnojiva podjednako djeluje u ishrani bilja bez obzira na koncentraciju. Ipak, gnojivima koja sadrže više aktivne tvari danas se pridaje veći značaj, najviše iz ekonomskih razloga. Naime, kod primjene koncentriranih gnojiva manji su troškovi prevoženja, skladištenja i raspodjele. Stoga je kod izbora gnojiva potrebno prvenstveno voditi računa o cijeni aktivne jedinice hraniva, što naravno nije uvijek lako izračunati zbog produženog učinka pojedinih hraniva u složenim mineralnim gnojivima. Kako se cijena aktivne jedinice kompleksnog gnojiva računa za pojedini element, npr. na dušik pokazuje jednostavni primjer (prosto pravilo trojno) u tablici 10.3.

Treba odabrati gnojivo na temelju cijene dušika (preračunato US\$ na Kn) između formulacije a) 20-10-10 i b) 15-15-15:

Tablica 10.3. Izbor gnojiva na temelju cijene dušika

		A	B
1)	formulacija cijena Kn/100 kg	20 : 10 : 10 97	15 : 15 : 15 92
2)	kg N/100 kg gnojiva	$100 \times 0,20 = 20$	$100 \times 0,15 = 15$
3)	cijena N/1 kg gnojiva	97 x 20 1 x = 4,85 Kn	92 x 15 1 x = 6,13 Kn
Zaključak: gnojivo A je znatno jeftinije računato na aktivnu jedinicu dušika			

Važna svojstva gnojiva su njihova kemijska stabilnost, postojanost i veličina granula, sklonost vlaženju (tablica 10.4.) i druga svojstva značajna za hranjiva svojstva i način primjene u intenzivnoj poljoprivrednoj proizvodnji.

Ujednačenost veličine granula je zbog ravnomjernog raspodjeljivanja, posebice centrifugalnim raspodjeljivačima (rasipačima), vrlo važno svojstvo. Gnojiva u

granulama manje se sljepljuju, sipka su i ne praše kod primjene. Također, imaju manju dodirnu površinu s česticama tla pa se u njemu sporije otapaju i postupno prelaze u nepristupačne oblike te su u dužem vremenu izvor ishrane u odnosu na praškasta gnojiva. Najpovoljnija veličina granula je 2-3 mm u promjeru uz dovoljnu mehaničku čvrstinu na raspadanje kod primjene.

Tablica 10.4. Higroskopnost nekih mineralnih gnojiva (relativna vlaga zraka kod koje gnojivo ne upija ni otpušta vodu = ravnotežna rel. vlaga)

Kemijska formula	Temperatura °C						
	10	15	20	25	30	40	50
	Ravnotežna relativna vlaga zraka (%)						
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \times 4 \text{H}_2\text{O}$	-	55,9	54,4	55,5	46,7	35,5	-
NH_4NO_3	75,3	69,8	62,7	62,7	59,4	52,5	48,4
NaNO_3	78,0	76,8	77,1	74,4	72,4	70,1	67,3
NH_4Cl	79,5	79,2	79,3	76,0	77,2	73,7	71,3
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	79,8	79,3	81,0	81,8	79,2	78,2	77,8
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	81,8	79,9	80,0	75,8	72,9	68,0	62,5
KCl	88,3	86,2	85,7	83,4	84,0	81,2	80,0
KNO_3	97,0	95,6	92,3	92,0	95,0	87,9	85,0
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	97,8	97,0	91,7	91,9	91,6	90,3	88,3
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$	97,9	98,9	94,1	96,0	93,7	94,5	94,6
KH_2PO_4	97,0	98,4	96,2	95,4	92,9	92,9	92,6
K_2SO_4	99,1	99,7	98,5	98,8	96,3	95,7	95,8

Čvrstoća granula, otpornost na sljepljivanje i brzina raspadanja u tlu može se prilagođavati u proizvodnji različitim kemijskim dodacima (*kondicioniranje*) i presvlačenjem granula hidrofobnim opnama. To je postupak koji ujedno sprječava sljepljivanje granula uslijed vlaženja ili kemijskih reakcija između granula. Uobičajen je postupak kondicioniranja zaprašivanjem s 1-2 % inertne prašine (vapnenac, rjeđe dolomit, infuzorijska zemlja i sl.) ili tekućim, površinski aktivnim sredstvima (*alifatski amini, akril-sulfonati* itd.), u količini 0,1-0,3 %. Rjeđe se za zaprašivanje granula gnojiva koristi sumpor ili polietilen.

Gotovim se proizvodom pune vreće koje su ranije bile papirnate, a danas su isključivo polietilenske ili polivinil-kloridne, koje se mogu čuvati na otvorenom prostoru. Prijevoz gnojiva može biti, osim u stanardnim vrećama, u rasutom stanju (*rinfuza*) ili velikim vrećama (*Jumbo, Big Bag* ≥ 500 kg) što je ekonomičnije jer ne zahtijeva pakiranje u standardne vreće, a znatno je brže.

10.2. DUŠIČNA GNOJIVA

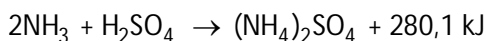
Dušična gnojiva su najšire korištena gnojiva i u odnosu prema fosforim i kalijским imaju izražen *prinosotvorni učinak*. Već uporaba samo tih gnojiva može znatno povisiti urod poljoprivrednih biljaka. Proizvodnja N-gnojiva godišnje troši nešto manje od 2 % svjetske potrošnje prirodnog plina, a podržava prehranu najmanje 40 % svjetske populacije. Važno je istaknuti da kod prekomjerne i neadekvatne primjene N-gnojiva često onečišćuju okoliš.

Kao dušična gnojiva rabe se amonijski, nitratni, amidni i drugi organski i mineralni spojevi pri čemu je i oblik dušika značajan, premda u tlu pod povoljnim uvjetima, mikrobiološkom aktivnošću mineralni oblici dušika lako prelaze jedan u drugi. Nitrifikacijske bakterije za nekoliko dana amonijski dušik transformiraju u nitratni, ali taj proces kod niskih temperatura može potrajati i znatno dulje. Amidi se pod utjecajem mikroorganizama i vlage tla prvo hidroliziraju do amonijskog dušika. Stoga brza transformacija dušika u tlu povećava mogućnost njegovog premještanja iz zone korijena i gubitak putem ispiranja nitratnog oblika pa se dušik gnojidbom uobičajeno unosi u tlo u nekoliko navrata što znatno poskupljuje primjenu.

Suvremena nastojanja usmjerena su prema pronalaženju dušičnih gnojiva niže cijene s usporenim, odnosno *produžnim djelovanjem* kako bi biljke bile opskrbljene dovoljnom količinom dušika tijekom čitavog vegetacijskog razdoblja. Danas se već proizvode dušična gnojiva takvih svojstava, ali proizvodni postupci su skupi, a proces transformacije u tlu još uvijek nije moguće nadzirati u potrebnoj mjeri.

10.2.1. Amonijev sulfat, $(NH_4)_2SO_4$

Amonijev sulfat je gnojivo koje danas ima mali značaj zbog niske koncentracije dušika i izrazite fiziološke kiselosti, dok je nekada zauzimalo drugo mjesto, odmah iza čilske salitre. Gnojivo je u obliku kristala ili granulirano s najmanje 21 % N (čisti amonij-sulfat sadrži 21,2 % N i 27,5 % S), malo higroskopno i fiziološki kiselo. Primjenjuje se samo na alkalnim tlima, uglavnom u proizvodnji riže. Amonijev sulfat se dobiva po formuli:



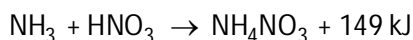
Amonijak može potjecati kao nusproizvod iz koksnog plina ili je sintetiziran, što zahtijeva veliku količinu energije.

Amonijev sulfat je potpuno topljiv u vodi (na 20 °C u 100 ml vode otapa se 75 g gnojiva) pa se najčešće koristi za prihranu. Na karbonatnim tlima zbog lokalnog zakiseljavanja pospješuje usvajanje fosfora i mikroelemenata pa daje vrlo dobre rezultate na černozeu i njemu sličnim tlima. Amonijev sulfat, dobiven kao intermedijer u drugim procesima, koristi se često u proizvodnji kompleksnih gnojiva.

10.2.2. Amonijev nitrat (AN), NH_4NO_3

Amonijev nitrat je gnojivo koje se vrlo dobro otapa u vodi, higroskopno je i sljepljuje se, zbog čega mu se u postupku proizvodnje dodaju Ca- i Mg-nitrati (kondicioniranje). Granule se zaprašuju materijalima koji odbijaju vodu, a teži se proizvodnji što krupnijih granula, odnosno kristala. Higroskopnost amonijevog nitrata raste s temperaturom pa se jače vlaži ljeti. Brzim zagrijavanjem (malo iznad 100 °C) ili u prisutnosti tvari koje djeluju kao detonatori ili upaljači (mineralne kiseline, oksidansi, metali Al, Pb, Ni, Cu i Zn) može lako eksplodirati pa ga je opasno držati u zatvorenom prostoru jer proizvodi raspadanja (NO_2 i H_2O) vjerojatno djeluju kao katalizatori koji povećavaju mogućnost eksplozije.

Amonijev nitrat iz "Petrokemije" d.o.o. sadrži 33,5 % N (čist spoj sadrži 35 % N) i 1 % MgO te spada u učinkovitija dušična gnojiva. Na temperaturi od 20 °C u 100 ml vode otapa se 188 g gnojiva što ga čini najtopljivijim dušičnim gnojivom. Nitratni oblik dušika djeluje odmah nakon primjene, a amonijski ima izvjesno produžno djelovanje. Dobiva se prema formuli:

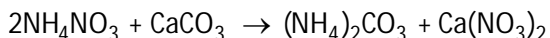


Amonijev nitrat je eksplozivna i zapaljiva tvar i tek u posljednje vrijeme može se koristiti čist kao gnojivo uz potrebne mjere opreza. Rabi se kao startno ili gnojivo za prihranu jer je 50 % dušika u nitratnom obliku koji djeluje odmah. Zbog visoke topljivosti u vodi amonijev nitrat, kao gnojivo bez punila, koristi se i za folijarnu ishranu u obliku otopine.

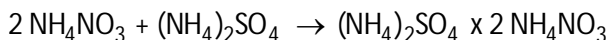
10.2.3. Vapnenasto amonijev nitrat (KAN), $NH_4NO_3 + CaCO_3$

Amonijev nitrat pomiješan s $CaCO_3$ ili dolomitom ($CaCO_3 \times MgCO_3$) naziva se KAN (vapnenasto amonijev nitrat ili kalcijev amonijev nitrat). U tom obliku KAN iz "Petrokemije" d.o.o. Kutina sadrži 27 % N (proizvodi se i s 28 % N), 4,5-5,5 % MgO, 6,5-8,5 % CaO i ima bolja fizikalna svojstva u odnosu na čisti amonijev nitrat. Kod miješanja otopine amonijevog nitrata i kalcijevog karbonata može

nastati do 1,2 % nepoželjnog amonijevog karbonata (raspada se na 58 °C) i kalcijevog nitrata (koji je jako higroskopan):



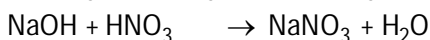
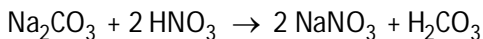
Amonijev nitrat može se miješati i s drugim solima:



KAN je dušično gnojivo koje se najviše koristi za prihranu, a može se primjenjivati i startno, ima dobra fizikalna svojstva i fiziološki je gotovo neutralno.

10.2.4. Natrijev nitrat (čilska salitra), NaNO_3

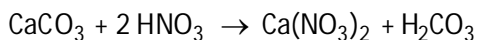
Gnojivo je u obliku bezbojne kristalne tvari, gotovo nehigroskopno i vrlo efikasno na kiselim tlima. Sadrži 15-16 % N. Fiziološki je to najjače alkalno gnojivo pa se ne smije duže vrijeme rabiti na neutralnim i lužnatim tlima jer pospješuje njihovu alkalizaciju. Proizvodi se iz prirodnih naslaga čileanskog guana protustrujnim izluživanjem i kristalizacijom iz prezasićene otopine. Također se može proizvesti i sintezom:



Čilska salitra danas se vrlo malo primjenjuje, premda je to nekada bilo najviše rabljeno dušično gnojivo (do pronalaženja sinteze nitratne kiseline). Razlog smanjene uporabe čilske salitre većim dijelom je vezan uz činjenicu da njezina redovita primjena, posebice većih količina u intenzivnoj ratarskoj proizvodnji, dovodi do alkalizacije i peptizacije koloida tla. Suvišak natrija u tlu pogoduje stvaranju pokorice, narušavanju strukture, povećava vodrživost (vjerojatno kao posljedica veće raspršenosti čestica tla) što poslije kiše, zbog veće ljepljivosti tla, izaziva poteškoće u obradi.

10.2.5. Kalcijev nitrat (norveška salitra), $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

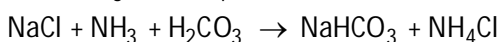
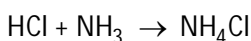
Norveška salitra je fiziološki alkalno gnojivo koje sadrži 13-16 % N, kristalizira kao $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ili $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ i vrlo je higroskopno (kritična relativna vlaga = 46,7 %), pa se isključivo pakira u nepromoćive vreće. Dobiva se na sljedeći način:



Higroskopnost gnojiva se smanjuje kad se proizvodi kao $\text{Ca}(\text{OH})\text{NO}_3$, ali tada ima još manji sadržaj dušika. Kalcijev nitrat se cijeni kao vrlo dobro dušično gnojivo, bez obzira na probleme s higroskopnošću, jer sadrži kalcij koji povoljno utječe na strukturu kiselih tala i pristupačnost drugih hraniva. Gnojivo se dobro otapa u vodi (na 26 °C u 100 ml vode 127 g) pa se može rabiti za folijarnu ishranu i kemigaciju (*fertigacija* ili *fertirigacija* zajedno s primjenom drugih kemijskih preparata, najčešće pesticida).

10.2.6. Amonijev klorid, NH_4Cl

Gnojivo sadrži 24-25 % N, fiziološki je vrlo kiselo i rijetko se primjenjuje zbog visokog sadržaja klora koji negativno utječe na mikrofloru tla. Proizvodi se na više načina:



10.2.7. Amonijeve soli karbonatne kiseline

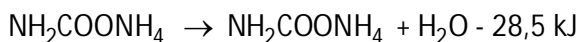
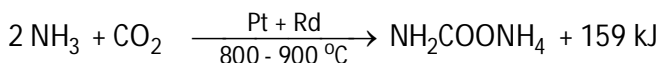
Amonijeve soli su grupa gnojiva s više spojeva različite uporabne vrijednosti za gnojidbu:

$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	amonijev karbonat
$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 \times 2 \text{NH}_4\text{HCO}_3$	amonijev seskvikarbonat
$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 \times \text{H}_2\text{O}$	amonijev karbonat-monohidrat
NH_4HCO_3	amonijev hidrogenkarbonat
$\text{NH}_4\text{COONH}_2$	amonijev karbamat

Najznačajniji iz te grupe spojeva je amonij-karbonat. To je bezbojna kristalna tvar s jakim mirisom na amonijak. Kao gnojivo rabi se smjesa navedenih soli s 29-32 % N. Gnojivo ne sadrži punilo, dovoljno je koncentrirano, ali skladištenjem, već na prosječnim dnevnim temperaturama, postupno prelazi u amonijev hidrogenkarbonat uz velike gubitke dušika.

10.2.8. Urea, $CO(NH_2)_2$

Proizvodnja uree temelji se na međusobnom djelovanju amonijaka i ugljikova(IV)-oksida:



Sinteza se odvija pod visokim tlakom od 200-300 bara, što zahtijeva velik utrošak energije uz povišenu temperaturu (185-200 °C). Ureu ne treba miješati s gnojivima koja sadrže ili oslobađaju kiseline (H_2SO_4 ili H_3PO_4) jer lako hidrolizira i tada daje spojeve lošijih kemijskih i fizikalnih svojstava, čak i uz gubitak dušika (vidi antagonizam gnojiva).

Urea s 46 % N je najkoncentriranije kruto dušično gnojivo koje ne sadrži punilo, nasipne je mase 720-770 kg m⁻³. Biljke iz uree lako usvajaju dušik, a ima i dobra tehničko-fizikalna svojstva te se lako otapa u vodi (na 26 °C u 100 ml vode 107,4 g). Pri otapanju urea oduzima toplinu otapalu i potrebno je stoga pričekati prije primjene (obično do sljedećeg dana) da se dostigne temperatura okoline te se tako može koristiti za folijarnu ishranu, fertigaciju ili kemigaciju. Pri tome treba znati da urea nije elektrolit, ne disocira i njezine otopine imaju nižu osmotsku vrijednost u odnosu na druga mineralna gnojiva (solima) te se može, prema preporukama "Petrokemije", primijeniti za folijarnu prihranu pšenice u koncentraciji 25-30 %, dok vinova loza u cvatnji podnosi tek koncentraciju od 0,5-0,7 % uree.

Urea iz "Petrokemije" d.o.o. Kutina sadrži 0,6-0,9 % biureta ($NH_2-CO-NH-CO-NH_2$) što je ispod dopuštene granice od 1 % za primjenu u ratarstvu. Npr. do oštećenja kod kukuruza dolazi tek kad se dostigne 6 kg ha⁻¹ biureta, a to je moguće tek uz primjenu 700 kg ha⁻¹ uree s 0,9 % biureta.

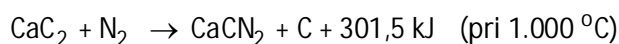
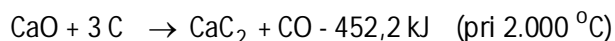
U tlu, pod utjecajem vlage, urea brzo prelazi u amonijev karbamat slabo alkalne fiziološke reakcije, a amonijev ion se dalje, pod normalnim uvjetima (vlaga, temperatura i kisik) brzo transformira do nitrata što uzrokuje slabo i prolazno zakiseljavanje pa se urea smatra fiziološki slabo kiselim gnojivom. Budući da je urea visoko koncentrirano dušično gnojivo, u primjeni se mora voditi računa o ravnomjernom raspodjeljivanju, posebice u sušnim uvjetima.

Urea se u principu primjenjuje kao osnovno gnojivo pod brazdu i tada su na neutralnim i lužnatim tlima gubici dušika volatizacijom zanemarivi. Često se primjenjuje i kao startno gnojivo, unesena plitko u tlo kad u osnovnoj gnojidbi nije primijenjeno kompleksno gnojivo koje sadrži dušik. Primijenjena u prihrani, urea može imati i negativne učinke, a mogući su i visoki gubici dušika s površine tla. Stoga je kod prihrane ozimih žita ne treba primjenjivati pri niskim

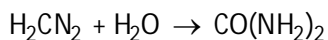
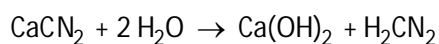
temperaturama i kod nerazvijenih biljaka s niskom razinom metabolizma. Naime, urea se lako usvaja i u molekularnom obliku korijenom i listom, a ugradnja reduciranog N zahtijeva visok intenzitet disanja, odnosno keto-kiseline Krebsovog ciklusa. Stoga, pri niskim temperaturama i/ili niskim intenzitetom metabolizma dolazi do trovanja biljaka amonijakom i zastoja u vegetaciji. Kod viših temperatura primjena uree za prihranu može izazvati ozbiljne "opekline" na listu. Također, nakon primjene uree potrebno je nekoliko dana izbjegavati navodnjavanje, jer se, premda ima slab dipolni moment, lako ispire iz tla. Lokalno koncentrirana urea u tlu utječe na smanjenje klijavosti i zastoj u ranom porastu biljaka.

10.2.9. Kalcijev cijanamid, CaCN_2

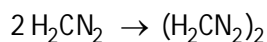
Tehnički proizvod je tamnosiv do crn zbog prisutnosti slobodnog ugljika. Kao gnojivo sadrži 18-22 % amidno vezanog dušika. Primjenjuje se prije sjetve najmanje 2-3 tjedna jer nerazloženi kalcijev cijanamid uništava sjeme i korijenje biljaka (djeluje kao *totalni herbicid*). Kalcijev cijanamid proizvodi se sljedećim procesom:



U kiselim i neutralnim tlima kalcijev cijanamid se razlaže do uree na sljedeći način:



U tlima alkalne reakcije cijanamid većim dijelom prelazi u dicijanamid koji vrlo toksično djeluje na biljke:



Gotov proizvod često se miješa s mineralnim uljima (do 3 %) što sprječava prašenje kod primjene i smanjuje opasnost od trovanja ljudi ili se granulira pa se može miješati s drugim gnojivima (koja ne sadrže amonijak). Rabi se i kao *defolijans* prije berbe pamuka ($15\text{-}30 \text{ kg ha}^{-1}$) te kao herbicid za širokolisne korove. Na listu ostavlja "opekline" slične simptomu manjka kalija (rubna nekroza).

10.3. TEKUĆA N I NPK GNOJIVA

Tekuća dušična i multielementna gnojiva primjenjuju se uglavnom za prihranu (ponekad i startnu) uz mogućnost miješanja sa zaštitnim sredstvima. Prskanje usjeva tekućim gnojivima omogućuje ravnomjerno doziranje, a hraniva usvojena preko lista praktično odmah djeluju. Učinkovitost tekućih gnojiva jednaka je konvencionalnim mineralnim gnojivima, ali se mogu preciznije dozirati i aplicirati u kombinaciji sa zaštitom usjeva tijekom vegetacije. Znatno su skuplja od konvencionalnih gnojiva i u ratarstvu se upotrebljavaju češće u sjemenskoj proizvodnji, a najčešće u povrtlarstvu, vinogradarstvu, hortikulturi i drugim profitabilnim proizvodnjama. "Petrokemija" d.o.o. iz Kutine preporučuje primjenu svojih tekućih gnojiva *Fertina* razrijeđenih na 3-5 % aktivne tvari.

Folijarna aplikacija gnojiva je najbrži način opskrbe biljaka hranjivim elementima (ne uvijek i najbolji) i omogućuje brzu eliminaciju deficita pojedinih elemenata, ali sadrži niz tehničkih i biološko-fizioloških specifičnosti koje mogu izazvati probleme:

- mali intenzitet penetracije kod biljaka s debelom kutikulom,
- otjecanje s lista kod hidrofobnih površina (lista ili ploda),
- ispiranje kišom,
- brzo sušenje otopine (spreja) na lišću,
- ograničena retranslokacija pojedinih elemenata (npr. Ca i B),
- ograničena doza zbog primjene niske koncentracije (npr. : $1\% \times 400 \text{ dm}^3 \text{ ha}^{-1} = 4 \text{ kg ha}^{-1}$ aktivne) i
- oštećenja lista kod primjene više koncentracije (visoka osmotska vrijednost, nepovoljna pH-vrijednost otopine).

Tekuća gnojiva dijele se na:

- bistrice otopine i
- suspenzije.

Bistrice otopine ne sadrže talog i u njima su hraniva potpuno otopljeni, dok ga suspenzije imaju, a potječe od netopljivog dijela krutog gnojiva, odnosno punila. Suspenzije ne treba koristiti kao "nosač" drugih kemikalija, odnosno miješati ih npr. sa zaštitnim sredstvima.

Uobičajena je podjela tekućih N-gnojiva na temelju tlaka otopine:

- otopine bez tlaka - NH_4OH s 20 % N, vodene otopine uree i amonijevog nitrata,
- otopine niskog tlaka - NH_4OH s 25 % N,
- amonijakati - otopine N-gnojiva u amonijskoj vodi s 31-47 % N i
- otopine visokog tlaka - bezvodni amonijak s 82 % N.

Proizvodnja tekućih dušičnih gnojiva znatno je niže cijene od proizvodnje krutih jer je nepotrebno sušenje, granuliranje i pakiranje gnojiva. Nedostaci takvih gnojiva su u tome što se ne mogu dobiti koncentrirane otopine zbog isoljavanja. Problem je i skladištenje zbog visokih tlakova i korozivnosti otopina, a potrebni su i posebni aplikatori kojima se unose u tlo na dubinu 12-15 cm. Bezvodni amonijak zbog visokog tlaka para (6 bara na 10 °C, 9 bara na 20 °C i 12 bara na 30 °C) mora biti pohranjen i prevožen u posudama pod tlakom te se primjenjuje s posebnom, antikorozivnom opremom.

U posljednjih nekoliko godina "Petrokemija" d.o.o. Kutina proizvodi UAN (urea + NH_4NO_3 + voda), tekuće dušično gnojivo s $30 \pm 0,5$ % N i pH ~ 7. UAN sadrži malu količinu amonijeva dihidrogenfosfata i amonijaka kao i antikorozivna sredstva koja s ugljikovim čelicima stvaraju antikorozivni sloj (tanak film hidroksida i fosfata) pa se mogu rabiti posude za čuvanje i aplikatori izrađeni od uobičajenih materijala (plastika, čelik, aluminij itd.).

UAN se primjenjuje unošenjem u tlo, ali i folijarno i to čist, razrijeđen ili pomiješan s pesticidima i mikroelementima, kao i *fertigacijom* (navodnjavanjem), te *kemigacijom* (navodnjavanjem pomiješan s pesticidima). Korisnike UAN-a treba upozoriti da nerazrijeđeno gnojivo primijenjeno folijarno izaziva različit stupanj "opekline" lista i drugih organa (npr. plodova) ovisno o vanjskoj temperaturi i biljnoj vrsti. Stoga se preporučuje folijarna primjena za oblačnog vremena (ili ujutro, odnosno uvečer) i kod biljaka koje su u fazi brzog vegetativnog porasta (brzo obnavljaju asimilacijsku površinu) i imaju visoku razinu metabolizma za ugradnju reduciranih oblika N (75 % od ukupnog N u UAN-u je reducirani N) u organsku tvar.

Oštećenje lista kod primjene UAN-a ili drugih tekućih gnojiva nije posljedica njegovog toksičnog djelovanja, već visoka osmotska vrijednost kapljica UAN-a brzo "izvlači" vodu iz nježnog tkiva lista, dovodi do plazmolize, narušava se ionska bilanca u protoplazmi i to izaziva opeklina, a nakon toga i nekrozu lišća. Također, dolazi i do blokade enzima *ureaze* i stoga incidentno visoke koncentracije uree u listu. Problem oštećenja lišća može se ublažiti dodatkom tvari za povećanje osmotske vrijednosti lišća u tekuće gnojivo, npr. saharoze. Podaci o najvećoj dopuštenoj koncentraciji aktivne tvari kod primjene tekućih gnojiva često su kontradiktorni. Npr. za pšenicu se preporučuju koncentracije dušika za folijarnu primjenu između 4 i 30 % (nerazrijeđeni UAN).

Potrebe pojedinih gnojiva prikazane u tablici 10.5. mogu se izračunati prema formuli:

$$\text{kg gnojiva} = \frac{\text{kg potrebe hraniva} \times 100}{\% \text{ aktivne tvari}}, \text{ npr. za AN: } \frac{50 \times 100}{33,5} = 149$$

Tablica 10.5. Ekvivalentne količine pojedinih N-gnojiva kod različitih potreba u N-gnojidbi

Potreba kg N/ha	Bezvodni amonijak 82 % N	Amonijev nitrat 33,5 % N	KAN 27 % N	Amonijev sulfat 21 % N	UAN 30 % N	Urea 46 % N
30	37	90	111	143	100	65
40	49	120	148	190	133	87
50	61	149	185	238	167	109
60	73	179	222	286	200	130
70	85	209	259	333	233	152
80	98	239	296	381	267	174
90	110	269	333	429	300	196
100	122	299	370	476	333	217
110	134	328	407	524	367	239
120	146	358	444	571	400	261
130	158	388	481	619	433	283
140	171	418	518	667	467	304
160	195	478	592	762	533	348
180	220	537	667	857	600	391

Količina hraniva sadržana u nekom mineralnom gnojivu izračuna se na sljedeći način:

$$\text{U 500 kg AN-a: } \frac{500 \times 33,5}{100} = 167,5 \text{ kg N}$$

Tekući anhidrirani amonijak kao najkoncentriranije dušično gnojivo (tablica 10.5.) uspješno se primjenjuje za uzgoj većine poljoprivrednih vrsta i to isključivo predstjetveno, jer nagli, ali prolazni porast alkalnosti tla nakon njegove primjene oštećuje korijen ili sjeme biljaka. Aplikacija se obavlja kod dovoljne vlažnosti tla radi sprječavanja gubitaka isparavanjem (kod 15 % vode u tlu gubici su gotovo neovisni o dubini aplikacije), a gubici mogu biti znatni volatizacijom na neutralnim i lužnatim tlima kod nestručne primjene.

10.4. SPORODJELUJUĆA N-GNOJIVA

Daljnje povećanje učinkovitosti dušičnih gnojiva moguće je postići uvažavanjem *Mitscherlichovog* zahtjeva za "sporotekućim" izvorom dušika, odnosno ishranom biljaka tijekom čitavog razdoblja vegetacije, posebice u vegetativnim etapama razvitka. Stoga je prisutna težnja da se proizvedu takva dušična gnojiva koja će

postupno oslobađati mineralni dušik, po mogućnosti prema potrebama biljaka, što bi bilo idealno, ali je i teško ostvarljivo. Naime, pod različitim uvjetima uzgoja ista biljna vrsta pokazuje znatna odstupanja kod usvajanja hraniva, a pored toga postoje i vrlo značajne razlike između njenih kultivara. Zatim, teško je utvrditi kolika je stvarno potrebna koncentracija hraniva u vodenoj fazi tla za neki usjev, ovisno o etapi razvitka, potrebi biljaka u dušiku, ali i biološko-kemijsko-fizikalnim svojstavima tla.

Sporodjelujuća dušična gnojiva pokazuju znatno niže gubitke prema konvencionalnim gnojivima (zanemarivo ispiranje, mali gubici denitrifikacijom i volatizacijom), neznatno povećavaju osmotsku vrijednost vodene faze tla i ne oštećuju sjeme ili mlade biljke, a unose se samo jednom za čitavu vegetaciju i ne onečišćuju okoliš.

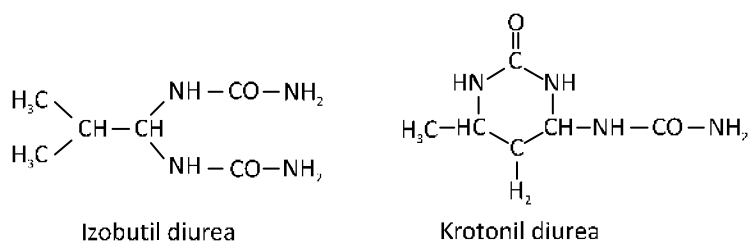
Uobičajeni tehnološki postupci za dobivanje sporodjelujućih dušičnih gnojiva su:

- prevlačenje granula krutih N-gnojiva talinom sumpora (9-30 % S), voskovima i različitim polimerima (akrilne smole, polistiren, polietilen itd.) koji slabo propuštaju vodu i usporavaju razlaganje granula i
- kondenzacija uree s aldehydima (ureaform, 38 % N) s produžnim učinkom do 6 mjeseci i neki drugi postupci sinteze:



- primjena inhibitora ureaze i nitrifikacije i
- polimeri inherentno netopivi u vodi.

Sporodjelujuća dušična gnojiva mogu biti organski spojevi kao što su *amonijevi humati* (svega 2-3 % N), *ligninske sulfo-kiseline* (N-lignin, 18-20 % N i izmjenjivačkim kapacitetom od ~ 100 cmol⁽⁺⁾ g⁻¹), *kondenzati uree i aldehida* (*ureaform* ili *UF*, 35-40 % N, *krotonilen-diurea*, 28-30 % N (slika 10.1.), *izobutilen-diurea* s 30-32 % N, (slika 10.2. i dr.), *tiourea* (36,8 % N), različiti *triazini* (pirolizati uree sadrže do 66,5 % N, npr.: *melanin* C₃H₆N₆), proizvodi na bazi CaCN₂ i HCN (npr.: C₂H₃N₃ s 58-60 % N), *oxamid* (NH₂-CO-CO-NH₂), *gunylurea* itd.



Slika 10.1. Kemijske formule nekih sporodjelujućih dušičnih gnojiva

Od neorganskih sporodjelujućih dušičnih gnojiva ispitana je grupa *metalnih amonijevih fosfata* opće formule $\text{MeNH}_4\text{PO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$, npr.: MgNH_4PO_4 (MagAmp[®]) koji sadrži 8 % N, 17,5 % P i 14 % Mg, FeNH_4PO_4 i dr. Također, komercijalno se proizvodi urea u poliolefinском omotaču (POCU - *Polyolefin-coated urea*) i urea presvučena talinom sumpora (SCU - *Sulfur coated urea*) koji znatno produžavaju vrijeme otapanja uree, povećavaju njezinu efikasnost i sprječavaju poluciju okoliša.

Nepotpuno iskorištenje dušika iz gnojiva obično se pripisuje njegovim različitim gubicima iz tla u mineralnom obliku. Sprječavanje mineralizacije organskih dušičnih gnojiva i transformaciju amonijskog do nitratnog dušika moguće je izvesti primjenom inhibitora mikrobiološke aktivnosti. U tlu $\text{NH}_4\text{-N}$ se prevodi do nitrita djelovanjem *Nitrosomonasa spp.*, dok *Nitrobacter spp.* prevodi nitrite do nitrata. Inhibicija nitrifikacije provodi se u jednoj (ovisno o pH-vrijednosti tla) ili obje faze transformacije amonijaka do nitrata.

Na inhibiciju nitrifikacije djeluju različiti kemijski preparati posebice neki pesticidi, ali se proizvode i posebni kao što su npr. *N-SERVE* (2-kloro-6-(triklorometil)-piridin, Dow Chemical Co, SAD), *AM* (2-amino-kloro-metil-pirimidin, Toyo Koatsu, Japan), *AUF* (ureaform s 10 % dicijanamida), *DCS* (1 % N-2,6-diklorfenilsukcinilamida inkorporiranog u ureu), *DIDIN* (dicijandiamid), *Terrazole* (5-etilen oksid-3-triklorometil-1,2,4-tiodiazol) itd. Od inhibitora ureaze najčešće se komercijalno koristi N-(n-butil) tiofosfat triamida (NBPT).

Ispitivanja su pokazala da je učinkovitost inhibitora nitrifikacije značajna u uvjetima visokih gubitaka dušika ispiranjem ili denitrifikacijom što je naglašeno u toplom klimatu, ali i lakim, propusnim tlima, regijama s velikom količinom padalina (ili kod navodnjavanja) i tlima koja se jako vlaže u proljeće podzemnim ili nadzemnim vodama.

10.5. FOSFORNA GNOJIVA

Pristupačnost fosfora iz gnojiva ovisi o kemijskom obliku, odnosno topljivosti fosfata u vodenoj fazi tla ili izlučevinama korijenovog sustava. Nisko koncentrirana limunska kiselina otapa sekundarne fosfate, slično korijenskim izlučevinama, pa se pristupačnost fosfornih gnojiva određuje na temelju topljivosti u vodi i 2 % limunskoj kiselini, odnosno amonijevu citratu. Zbog kemijskog vezivanja i vrlo slabe pokretljivosti u tlu te niske učinkovitosti, fosforna gnojiva se najčešće rabe za osnovnu, rjeđe startnu gnojidbu, a u prihrani samo izuzetno, odnosno fosfor je tada sastojak kompleksnog gnojiva. Fosforna gnojiva u pravilu se ne primjenjuju po površini tla, jer će se u istoj

vegetacijskoj godini iskoristiti vrlo mali dio uz opasnost da biljke budu plitko ukorijenjene i tako neotporne na sušu i polijeganje.

Rasprostranjenost fosfora u prirodi je znatna, ali se uglavnom nalazi u netopljivim solima ortofosforne kiseline, pa je zadatak kod prerade prirodnih fosfata prevesti ih u oblike koje biljke lako usvajaju.

Suvremene tendencije u proizvodnji fosfornih gnojiva idu za tim da se postigne što veća koncentracija aktivne tvari, stoga nekad vrlo raširena uporaba *superfosfata* i *Thomasovog brašna* gubi na značaju, a sve je veća uporaba *trostrukog superfosfata* i kompleksnih gnojiva s fosforom. Istražuju se i novi oblici fosfora koje biljke dobro usvajaju, npr. dobivanje fosfornih gnojiva obradom polifosfatnih kiselina amonijakom (uobičajene su formulacije 12:58:0 do 15:61:0). Vrlo perspektivan je fosfonitridamin $(NP(NH_2)_2)_n$, kao i još neki visokokoncentrirani spojevi bogati fosforom.

Za proizvodnju se fosfornih gnojiva kao sirovine koriste *apatiti* (magmatsko podrijetlo) i *fosforiti* (sedimentno podrijetlo). Zajednička formula apatita je $Ca_{10}R_2(PO_4)_6$ gdje R mogu biti ioni F^- , Cl^- ili OH^- . Najrasprostranjeniji je *fluorapatit*, čest je *hidroksiapatit*, a najmanje je rasprostranjen *klorapatit*. Dio kalcija može biti zamijenjen sa Sr, Ba, Mn, Fe itd. Čisti fluorapatit ima 42,22 % P_2O_5 , 55,59 % CaO i 3,77 % F. Fosforiti su sedimenti, nastali taloženjem iz morske vode u obliku kalcijeva fosfata $Ca_3(PO_4)_2$. Dominantan fosforit je *frankolit* $(Ca_{10}(PO_4)_{6-x}(CO_3)_x(F,OH)_{2+x})$. Najveća nalazišta fosforita su u SAD-u, sjevernoj Africi i Rusiji, gdje naslage pokrivaju tisuće km^2 , a debljina slojeva je oko 1 m. Sadržaj P_2O_5 u fosforitima iznosi 26-36 %.

Prerada sirovih fosfata u fosfatna gnojiva sastoji se u prevođenju netopljivih oblika u biljci pristupačne oblike fosfora. Kemijska prerada sirovine izvodi se na tri osnovna načina:

- elektrokemijsko dobivanje elementarnog fosfora i njegova prerada u soli (koristi se u zemljama koje posjeduju dovoljno električne energije),
- razlaganje sirovih fosfata jakim mineralnim kiselinama (najčešći postupak) i
- termička prerada sirovih fosfata ili drugih ruda koje sadrže dovoljno fosfora (nusproizvodi u čeličanama).

Prema kemijskom obliku fosforne komponente gnojiva se dijele na:

- mljevene sirove fosfate,
- primarne kalcijeve fosfate (kalcijevi dihidrogenfosfati),
- sekundarne kalcijeve fosfate (kalcijevi hidrogenfosfati) i
- topljene i termofosfate.

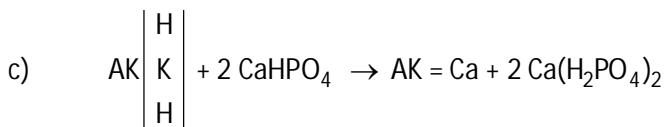
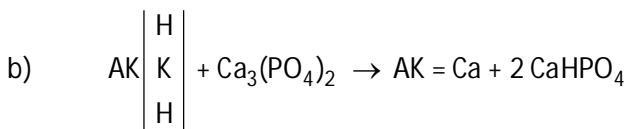
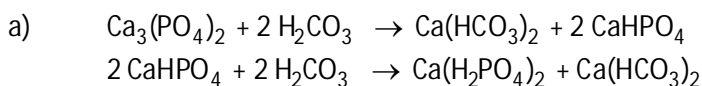
10.5.1. Mljeveni sirovi fosfati

Početakom 19. st. u Engleskoj je dobiveno prvo mineralno gnojivo mljevenjem odmašćenih životinjskih kostiju. Sadržavalo je 22-30 % P_2O_5 . Danas se takav postupak više ne koristi.

10.5.2. Fosforitno brašno

Fosforitno brašno sadrži 10-36 % P_2O_5 i najčešće se koristi za dobivanje superfosfata i tripleksa. Može se primjenjivati kao fosforno gnojivo uz dva uvjeta:

- gnojivo mora biti fino mljeveno tako da 80-90 % prolazi kroz sito s otvorima od 0,18 mm i
- mora se rabiti na kiselim tlima kao sporodjelujuće gnojivo gdje pod utjecajem aktivne i izmjenjive kiselosti tla postupno prelazi u pristupačne oblike:



Fosforitno brašno (pod različitim imenima, npr. *Hyperfos* s oko 28 % P_2O_5 , *Mikrofos*, *Pelofos* i dr.) proizvodilo se iz fino mljevenih fosfata ili šljake (*Pelofos*) iz Simens-Martеноvih peći sa 17 % P_2O_5 , 2-4 % Mg i 1-2 % Mn, a danas se vrlo rijetko takva gnojiva proizvode (u Hrvatskoj više ne) i to samo za primjenu na kiselim tlima.

Ovisno o podrijetlu, sirovi mljeveni fosfati mogu sadržavati različite količine *radionuklida* (koji većim dijelom završe na deponijama u fosfogipsu kao industrijski otpad) pa se mora ozbiljno razmotriti njihova primjena u duljem vremenskom periodu. Npr., fosforiti podrijetlom iz Norveške zrače (Bq kg^{-1}): $^{238}\text{U} = 800-2.000$, $^{232}\text{Th} = 20-100$, $^{40}\text{K} = 50-200$; fosforiti iz Wyominga: $^{238}\text{U} = 2.300$, $^{232}\text{Ra} = 2.300$, $^{232}\text{Th} = 10$; apatiti iz Rusije $^{226}\text{Ra} = 30$, $^{210}\text{Pb} = 25$, $^{210}\text{Po} = 30$, $^{232}\text{Th} = 60$, $^{40}\text{K} = 100$ itd.

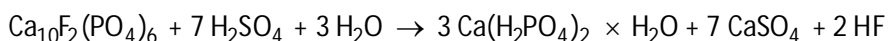
10.5.3. Primarni kalcijevi fosfati

Superfosfat, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4$

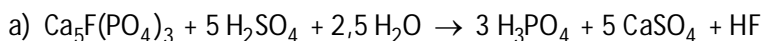
Donedavno je superfosfat bio najrasprostranjenije fosforno gnojivo koje se dobiva razlaganjem mljevenih sirovih fosfata (fosforita i apatita) sulfatnom kiselinom. Tim postupkom prvo se dobije "kiseli fosfat" s velikom količinom slobodne fosfatne kiseline koja u procesu "sazrijevanja" reagira s nerazloženim sirovim fosfatima. Ovisno o stehiometrijskom odnosu sirovih fosfata i sulfatne kiseline, može se dobiti samo ortofosfatna kiselina za proizvodnju drugih gnojiva ili proizvoda. U procesu prerade sirovih fosfata sa sulfatnom kiselinom, uzetoj u količini za dobivanje kalcijevog dihidrogenfosfata, nastaje suspenzija (*pulpa*) koja vremenom kristalizira (sazrijeva) u kompaktnu masu koja se zatim sitni i granulira.

Superfosfat je sivkast proizvod u obliku praha ili granula kemijske formule $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4$. Kalcijev dihidrogenfosfat potpuno je topljiv u vodi, dok se gips (balast) praktično ne otapa. Prema standardima, fosforna komponenta superfosfata mora biti najmanje 90 % topljiva u vodi. Gotov proizvod je slabo higroskopan, ali dužim stajanjem se granule ipak slijepe. Sadrži najčešće 16-24 % P_2O_5 i 38-50 % CaSO_4 .

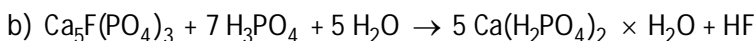
Sumarna reakcija dobivanja superfosfata je:



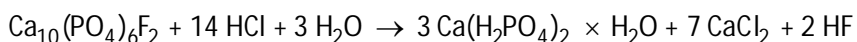
Reakcija zapravo teče u dvije faze:



Nakon potpunog utroška sulfatne kiseline, preostala sirovina reagira s nastalom fosfatnom kiselinom:



Primarne kalcijeve fosfate moguće je dobivati i razgradnjom sirovih fosfata, npr. apatita, klorovodičnom (solnom) kiselinom:

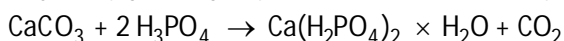
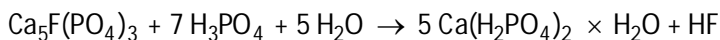


U postupku granulacije superfosfata dodaje se obično usitnjeni vapnenac za snižavanje sadržaja slobodnih kiselina, posebice fosfatne, koje može biti do 5 %.

Trostruki superfosfat (tripleks, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$)

Razlaganjem mljevenih sirovih fosfata s ortofosfatnom kiselinom (H_3PO_4) dobije se trostruki superfosfat koji sadrži kalcijev dihidrogenfosfat, ali za razliku od superfosfata, sadrži vrlo malo gipsa (balast). Zbog toga je koncentracija tripleksa znatno viša, uglavnom 38-48 % P_2O_5 uz svega 5-15 % CaSO_4 .

Trostruki superfosfat dobiva se na sljedeći način:



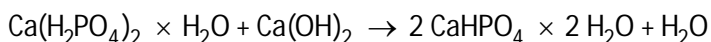
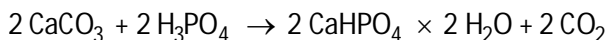
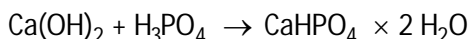
Razlaganjem mljevenih sirovih fosfata smjesom sulfatne i fosfatne kiseline dobije se gnojivo pod nazivom obogaćeni superfosfat s 22-34 % P_2O_5 .

Fosforna komponenta trostrukog superfosfata djeluje jednako kao kod superfosfata. Oba gnojiva su kemijski kisela zbog prisustva slobodnih kiselina i disocijacije $\text{H}_2\text{PO}_4^- \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HPO}_4^{2-}$. Fiziološka reakcija običnog i trostrukog superfosfata je neutralna, jer biljke podjednako ili više koriste fosfatne ione od iona Ca^{2+} , iako ima i mišljenja da im je fiziološka reakcija slabo kisela.

10.5.4. Sekundarni kalcijevi fosfati

Precipitat (taložnik), $\text{CaHPO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$

Precipitat je sekundarni kalcijev fosfat (kalcijev hidrogenfosfat) koji sadrži do 40 % P_2O_5 topljivog u 2 %-noj limunskoj kiselini, najčešće 27-31 %. Dobiva se taloženjem iz otopine H_3PO_4 s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ili vodene suspenzije mljevenog vapnenca, ali neutralizacijom kalcijevog dihidrogenfosfata. Nastali bijeli talog se odvaja, suši, usitnjava i granulira. Kemijske reakcije dobivanja su sljedeće:



Precipitat ima dobra fizikalno-kemijska svojstva, praktično nije higroskopian, neutralne je fiziološke reakcije i visoko je koncentrirano fosforno gnojivo. Ipak, malo se proizvodi zbog visoke proizvodne cijene. Djeluje slično primarnim kalcijevim fosfatima koji, premda su topljivi u vodi, u tlu prelaze u sekundarne fosfate u prisutnosti kalcija (retrogradacija fosfora). Smatra se da precipitat ipak bolje djeluje na kiselim, degradiranim i tlima slabo opskrbljenim fosforom, a superfosfat i tripleks na neutralnim, slaboalkalnim tlima i černozeu. Hidrati

sekundarnog kalcijevog fosfata topljiviji su u tlu od bezvodne soli (anhidrida) pa se uglavnom $\text{CaHPO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ i upotrebljava kao gnojivo.

Topljeni i termofosfati

Topljeni i termofosfati su grupa fosfornih gnojiva koja se dobiva na visokim temperaturama iz različitih sirovina koje sadrže fosfor, netopljiva su u vodi i zbog potrebe za bržim djelovanjem najčešće su to praškasta gnojiva.

- Topljeni fosfati: Dobivaju se topljenjem sirovih fosfata s kremenom, magnezijevim ili aluminijevim silikatima na 1.400-1.500 °C. Fosforna komponenta je citrat topljiva.
- Termofosfati (glijhofosfati): Proizvod su sinteriziranja sirovih fosfata s NaOH, Na_2SO_4 itd. Sinteriziranje se izvodi u rotacijskim pećima na 1.100-1.200 °C, a fosforna komponenta je djelomično topljiva u amonijevom citratu. U prodaji su ranije dolazili pod različitim komercijalnim imenima, a vrlo poznato je bilo gnojivo Rhenania fosfat s 28 % P_2O_5 .

Tomasfosfat (Tomasovo brašno): Tomasfosfat je gnojivo koje se dobiva kao nusproizvod u procesu proizvodnje čelika ako željezna ruda sadrži barem 1 % P. Fosforna komponenta je u obliku kalcijevog fosfata (siliko-karnotit: $\text{Ca}_5[\text{SiO}_4(\text{PO}_4)_2]$) topljivog u 2 %-tnoj limunskoj kiselini. Gnojivo sadrži još kalcijeve silikate, Mn, Cu i druge metale. Ohlađena troska iz Bessemerovih peći ili konvertora se melje tako da prolazi kroz sito od 0,18 mm, tamnosive je do smeđe boje i velike nasipne mase ($3,2 \text{ g cm}^{-3}$). Proizvodi se s 8-14 % P_2O_5 ovisno o koncentraciji fosfora u željeznoj rudi. Radi visokog sadržaja CaO ne smije se miješati s amonijskim gnojivima. Tomasfosfat je sporodjelujuće fosforno gnojivo s izrazitim produženim djelovanjem koje se koristi isključivo na kiselim tlima.

10.6. KALIJEVA GNOJIVA

Više od 90 % kalijevih gnojiva dobiva se oplemenjivanjem sirovih kalijevih soli iz prirodnih nalazišta. To su bez izuzetka vodotopljiva gnojiva, ali kalijev ion u tlu se veže na adsorpcijski kompleks (ili se čak fiksira), pa djeluju produženo. Kalijeva gnojiva dijele se na:

- sirove kalijeve soli (mljeveni prirodni minerali):

Silvin	KCl
Silvinit	$\text{KCl} \times \text{NaCl}$

Karnalit	$\text{KCl} \times \text{MgCl}_2 \times 6 \text{H}_2\text{O}$
Kainit	$\text{KCl} \times \text{MgSO}_4 \times 3 \text{H}_2\text{O}$
Šeinit	$\text{K}_2\text{SO}_4 \times \text{MgSO}_4 \times 6 \text{H}_2\text{O}$
Polihalit	$\text{K}_2\text{SO}_4 \times \text{MgSO}_4 \times \text{MgSO}_4 \times 2 \text{CaSO}_4$
Ortoklas	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$
Muskovit	$\text{KAl}_2(\text{OH},\text{F})_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$

- koncentrirana K-gnojiva (dobiju se preradom sirovih soli) i
- smjese sirovih soli i koncentriranih K-gnojiva.

Prerada sirovih kalijevih soli u koncentrirana gnojiva izvodi se otapanjem u vodi i frakcijskom kristalizacijom što je omogućeno različitim temperaturnim koeficijentima topljivosti pojedinih komponenti. Treba napomenuti da kalij u prirodi dolazi u smjesi s radionuklidom ^{40}K (0,012 %) te mu je specifična aktivnost $31,200 \text{ Bq kg}^{-1}$ što u Njemačkoj čini 10 % prirodne radiokativnosti (0,17 do 2,1 mSv).

KCl se isporučuje s 40 ili 60 %, a K_2SO_4 s 50 % K_2O .

10.6.1. Kalijev klorid

Proizvodi se iz više prirodnih minerala, pretežito *silvinita* (smjesa *silvina* i *halita* $\text{KCl} + \text{NaCl}$, 20-42 % K_2O) i *karnalita* ($\text{KCl} \times \text{MgCl}_2 \times 6 \text{H}_2\text{O}$, 9-12 % K_2O). Do sada nije razvijena ekonomski isplativa proizvodnja gnojiva iz netopljivih kalijevih minerala (*glaukonit*, *leucit*, *feldspati* i *škriljci*) koji predstavljaju ogromnu rezervu kalija.

10.6.2. Kalijev sulfat

Izdvađa se iz *langbeinita* ($\text{K}_2\text{SO}_4 \times 2 \text{MgSO}_4$), *kainita* ($\text{KCl} \times \text{MgSO}_4 \times 3 \text{H}_2\text{O}$) i *šeinita* ($\text{K}_2\text{SO}_4 \times \text{MgSO}_4 \times 6 \text{H}_2\text{O}$).

10.7. SLOŽENA MINERALNA GNOJIVA

10.7.1. Kompleksna gnojiva

U ovu grupu gnojiva ubrajaju se kako pojedinačna gnojiva, čiji kation i anion sudjeluju u ishrani biljaka (npr. KNO_3 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), tako i kompozicije različitih soli koje sadrže dva ili tri osnovna hranjiva elementa (NP, NK, PK i NPK). Takve kombinacije dobiju se reakcijom nitratne (dušične), fosfatne (fosforne) i sulfatne (sumporne) kiseline s amonijakom, prirodnim fosfatima, kalijevim i amonijevim solima. U suvremenoj agrotehnici kompleksna gnojiva su najčešći oblik gnojiva i rabe se u granulama homogenog sastava. Sadržaj pojedinih elemenata izražava se kao maseni omjer $\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O}$ pri čemu se omjer naziva *formulacija gnojiva*, a ukupan sadržaj aktivne tvari *koncentracija mineralnog gnojiva*.

"Petrokemija" d.o.o. Kutina proizvodi vrlo širok asortiman kompleksnih gnojiva za različite primjene (tablica 10.6.).

Tablica 10.6. Asortiman gnojiva "Petrokemije" d.o.o. iz Kutine

Formulacije pogodne za osnovnu i melioracijsku gnojidbu				
formulacija	omjer hraniva	napomena	oblik dušika	topljivost P
5 : 20 : 30	1:4:6	bez klora	$\text{NH}_4\text{-N}$	vodotopljiv
6 : 18 : 36	1:3:6		$\text{NH}_4\text{-N}$	vodotopljiv
7 : 14 : 21	1:2:3	bez klora	$\text{NH}_4\text{-N}$ i $\text{NO}_3\text{-N}$	vodot. i citrot.
7 : 20 : 30	1:2,9:4,3		$\text{NH}_4\text{-N}$	vodotopljiv
7 : 20 : 30	1:2,9:4,3	+ 0,5 % B	$\text{NH}_4\text{-N}$	vodotopljiv
8 : 26 : 26	1:4,3:4,3		$\text{NH}_4\text{-N}$	vodotopljiv
12 : 52 : 0	1:4,3:0	MAP	$\text{NH}_4\text{-N}$	vodotopljiv
16 : 48 : 0	1:3:0	DAP	$\text{NH}_4\text{-N}$	citrotopljiv
Formulacije pogodne za predstjetvenu ili startnu gnojidbu				
formulacija	omjer hraniva	napomena	oblik dušika	topljivost P
7 : 14 : 21	1:2:3	bez klora	$\text{NH}_4\text{-N}$ i $\text{NO}_3\text{-N}$	vodot. i citrot.
7 : 20 : 30	1:2,9:4,3		$\text{NH}_4\text{-N}$	vodotopljiv
8 : 16 : 24	1:2:3	+ 2 % MgO	$\text{NH}_4\text{-N}$ i $\text{NO}_3\text{-N}$	vodot. i citrot.
10 : 30 : 20	1:3:2		$\text{NH}_4\text{-N}$	vodotopljiv
12 : 52 : 0	1:4,3:0	MAP	$\text{NH}_4\text{-N}$	vodotopljiv
13 : 10 : 12	1:0,77:0,92		$\text{NH}_4\text{-N}$ i $\text{NO}_3\text{-N}$	citrotopljiv
13 : 10 : 12	1:0,77:0,92	1 % phoxim	$\text{NH}_4\text{-N}$ i $\text{NO}_3\text{-N}$	citrotopljiv
15 : 15 : 15	1:1:1		$\text{NH}_4\text{-N}$	vodotopljiv
16 : 48 : 0	1:3:0	DAP	$\text{NH}_4\text{-N}$	citrotopljiv
13 : 13 : 21	1:1:1,62		$\text{NH}_4\text{-N}$ i $\text{NO}_3\text{-N}$	vodot. i citrot.
Formulacije pogodne za prihranu				
formulacija	omjer hraniva	napomena	oblik dušika	topljivost P
15 : 15 : 15	1:1:1		$\text{NH}_4\text{-N}$ i $\text{NO}_3\text{-N}$	vodot. i citrot.
18 : 9 : 9	1:0,5:0,5		$\text{NH}_4\text{-N}$ i $\text{NO}_3\text{-N}$	citrotopljiv
20 : 10 : 10	1:0,5:0,5		$\text{NH}_4\text{-N}$ i $\text{NO}_3\text{-N}$	citrotopljiv

Kalijev nitrat - KNO_3

Kalijev nitrat je vrlo dobro kompleksno gnojivo bez punila, bijele, sivkaste ili žućkaste boje, malo higroskopsko te neutralne do alkalne fiziološke reakcije. Sadrži 46,5 % K_2O i svega 14 % N. U prirodi ga ima malo, stoga se uglavnom sintetizira:

- 1) $NaNO_3 + KCl \rightarrow NaCl + KNO_3$ dvostruka zamjena
 $NH_4NO_3 + KCl \rightarrow KNO_3 + NH_4Cl$ " "
- 2) $KCl + HNO_3 \rightarrow KNO_3 + HCl$ iz nitratne kiseline
- 3) $KCl + 2 NO_2 \rightarrow KNO_3 + NOCl$ iz nitroznih plinova

Kalijev nitrat pogodan je za gnojidbu biljnih vrsta koje zahtijevaju dosta kalija (šećerna repa, krumpir itd.) i za slučajeve gdje je previše fosfora u tlu, ali zbog niskog sadržaja dušik je potrebno i posebno primjenjivati.

Amonijevi fosfati

Amonijevi i amonizirani fosfati proizvode se u znatnim količinama zbog jednostavnog postupka dobivanja i visoke koncentracije aktivne tvari. Služe i kao sirovina za proizvodnju trojnih kompleksnih gnojiva iz grupe *amofoski*.

$NH_4H_2PO_4$ MAP (mono-amonij fosfat) formulacije 12:52:0,

$(NH_4)_2HPO_4$ DAP (diamonij-fosfat) " 18:46:0,

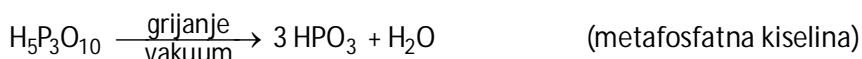
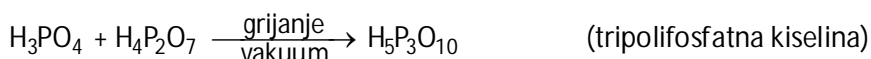
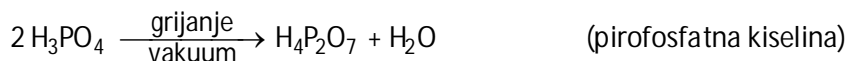
$(NH_4)_3PO_4$ ne koristi se zbog kemijske nepostojanosti i

$CaHPO_4 + (NH_4)_2HPO_4$ amonizirani superfosfat.

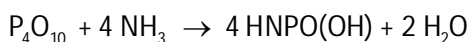
Amonijevi fosfati dobivaju se neutralizacijom ortofosfatne kiseline s amonijakom i sve više se koriste zbog visoke djelotvornosti, visoke koncentracije aktivne tvari i povoljne cijene. Nakon unošenja u tlo ova gnojiva brzo hidroliziraju što dovodi do lokalnog povećanja alkalnosti uz opasnost oštećenja korijena. Stoga se ne preporučuje startno unošenje ovih gnojiva u trake u blizini sjemena.

Amonijevi poli i metafosfati

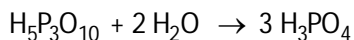
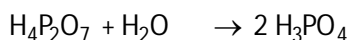
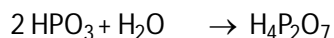
Amonijevi poli i metafosfati su najkoncentriranija gnojiva uopće, a dobivaju se neutralizacijom "superfosfatne" kiseline koja je smjesa više kiselina. Ortofosfati grade homologne nizove čija je strukturna jedinica tetraedar $PO_4 \times 6$ n, gdje n označava stupanj kondenzacije (1-106):



Neutralizacija tako dobivenih kiselina amonijakom izvodi se pod tlakom i na povišenoj temperaturi:



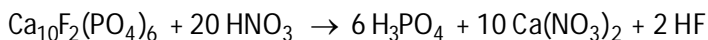
Ovako dobivena fosforna gnojiva temperaturno su dovoljno stabilna i nisu higroskopska. Sadrže obično 17 % N i 80 % P_2O_5 (zanimljivo je da zbog načina izražavanja fosfora i kalija kao oksida mogu sadržavati i više od 100 % aktivne tvari). Polifosfati su polimeri ravnih lanaca, dok metafosfati imaju cikličan i umrežen oblik. Sličnim postupcima mogu se proizvoditi kalijevi orto i metafosfati. *Kalijev metafosfat* (KPO_3) rabi se kao citrat topljivo kompleksno gnojivo (~ 50 % topljivo u vodi) koje sadrži 57 % P_2O_5 i 35 % K_2O . Polifosfati u tlu hidroliziraju i biljke lako usvajaju fosfor iz ovih gnojiva:



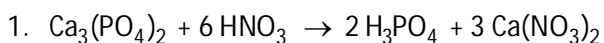
Polifosfati se komercijalno proizvode i kao tekuća gnojiva, npr. *amonijev-polifosfat* (APP) formulacije 10:34:0 s dodatkom mikroelemenata čest je u SAD-u. Efikasnost mu je slična MAP-u.

10.7.2. Proizvodnja kompleksnih gnojiva razlaganjem fosfata s HNO_3

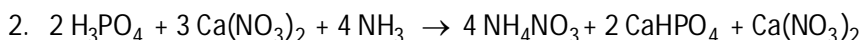
Ovim postupkom prirodni fosfati razlažu se nitratnom (dušičnom) kiselinom i iz dobivene otopine moguće je proizvesti pojedinačna dušična i fosforna gnojiva, ali i kompleksna dvojna i trojna gnojiva sa širokim rasponom omjera N, P i K (slika 10.2.). Za razliku od procesa proizvodnje u kojem se za razlaganje sirovih fosfata koristi sulfatna, odnosno fosfatna kiselina, ovim postupkom, pored kemijske energije, HNO_3 i dušik ulaze u sastav gnojiva. Nedostatak ovog procesa je u tome što fosforna komponenta gnojiva nije topljiva u vodi već u 2 %-tnoj limunskoj kiselini, a i ne mogu se dobiti sve formulacije koje omogućavaju drugi postupci dobivanja gnojiva. Taj nedostatak rješava se dodavanjem fosfatne kiseline ili trostrukog superfosfata u proizvodnji. Osnovna jednadžba postupka je:



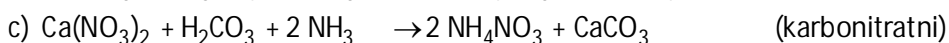
U proizvodnji gnojiva proces se odvija po fazama:



Zatim se u dobivenu smjesu uvodi amonijak i dobiva *nitrofos*:



Kalcijev nitrat je vrlo higroskopian i uklanja se iz otopine jednim od sljedećih načina ili pak hlađenjem otopine:



Tipične formulacije gnojiva prema opisanim reakcijama su:

a) 16:16:0, a uz dodatak KCl 12:12:12

b) 20:20:0 do 17:35:0

c) 16:13:0 ili 20:10:0, a uz dodatak KCl 13:10:12 ili 18:9:9.

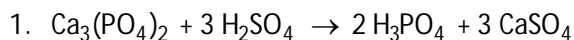
Posljednji postupak (c) je ekonomičan jer se koristi suvišni ugljikov(IV)-oksid iz sinteze amonijaka. Stabilizacija kalcijevog hidrogenfosfata u nitrofosu obavlja se dodatkom MgSO_4 . Dobivenoj pulpi dodaje se KCl ili K_2SO_4 pa se dobije kompleksno gnojivo općeg imena *nitrofoska*:



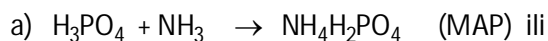
Opisani postupak dobivanja kompleksnih gnojiva provodi se u starim pogonima tvornice "Petrokemija" d.o.o. iz Kutine. U novim postrojenjima sirovi mljeveni fosfati razlažu se sumpornom kiselinom. Nitrofoske sadrže dušik u amonijskom i nitratnom obliku, sav kalij je topljiv u vodi, a fosfor djelomice ili isključivo u 2 %-tnoj limunskoj kiselini. To na neutralnim i alkalnim tlima smanjuje djelotvornost fosfora, ali samo u prvoj godini primjene.

10.7.3. Proizvodnja kompleksnih gnojiva razlaganjem fosfata s H_2SO_4

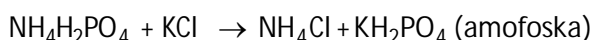
Razlaganjem sirovih mljevenih fosfata sumpornom ili fosfornom kiselinom dobiju se kompleksna gnojiva pod nazivom *amofosi*, a uz dodatak kalijevih soli *amofoske*. Tim postupkom moguće je dobiti viši sadržaj aktivne tvari prema prethodno opisanom postupku razlaganja sirovih fosfata dušičnom kiselinom. Fosfatna komponenta topljiva je u vodi, ali je dušik isključivo u amonijskom obliku. Kemijski proces se može prikazati sljedećim formulama:



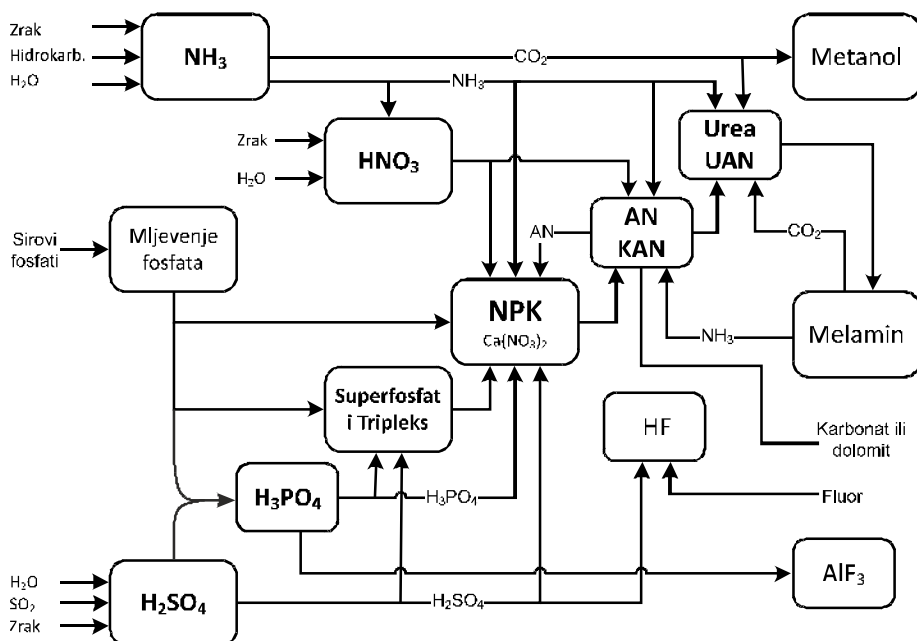
Zatim se fosfatna kiselina neutralizira amonijakom:



Dobivenoj pulpi dodaje se KCl ili K_2SO_4 :



U proizvodnji fosfornih gnojiva velik problem je *fosfogips*, "kabasti" industrijski otpad koji se generira ~ 5 t po toni proizvedenog P_2O_5 (kao fosforna kiselina) ili ~ 1,6 t po toni sirovog fosfata. To predstavlja ozbiljan problem odlaganja, s obzirom da je fosfogips nisko radioaktivan (ima nižu radioaktivnost od granične vrijednosti 500 Bq kg^{-1} po EU normama), a sadrži i toksične elemente (Cd, Hg, Zn, Cr, Ni, Pb, As), fosfornu kiselinu i fluor. Problemi s fosfogipsom mogu se riješiti njegovom primjenom za neutralizaciju (kalcizaciju) kiselih tala i za popravak (reklamaciju) alkalnih tala (npr. soloneca). Naime, radioaktivnost fosfogipsa ne predstavlja problem u dozama od nekoliko t ha^{-1} , a fosfogips je približno 100 puta topljiviji od CaCO_3 u neutralnoj sredini. Naravno, njegovo korištenje kao građevinskog materijala nije dopušteno u visokogradnji zbog prisutnosti radionuklida, posebice plinovitog radona. Radon (^{86}Rn) je jednoatomni plin bez boje i mirisa, osam puta veće gustoće od zraka pri sobnoj temperaturi, radioaktivan i kancerogen ako se udiše.



Slika 10.2. Shema procesa proizvodnje nitrofoski

10.7.4. Miješana gnojiva

Miješana mineralna gnojiva dobivaju se mehaničkim miješanjem krutih pojedinačnih gnojiva u praškastom ili granuliranom obliku. Po agrokemijskim svojstvima takva se gnojiva ne razlikuju od kompleksnih i mogu se dobiti različite formulacije za sve zahtjeve suvremene agrotehnike. Ipak, kompleksna gnojiva danas su gotovo potpuno istisnula primjenu miješanih gnojiva u Hrvatskoj. Naime u proizvodnji kompleksnih gnojiva koriste se i poluproizvodi, a u odnosu na miješana gnojiva imaju značajno veću koncentraciju aktivne tvari što snižava troškove prijevoza, skladištenja i raspodjele.

Prednost miješanih gnojiva je u tome što se miješanjem može postići formulacija primjerena potrebama biljaka i stanju raspoloživosti hraniva u tlu. Miješana gnojiva, osim glavnih hranjivih elemenata, sadrže kao punilo često veće količine kalcijevog karbonata koji povoljno djeluje na kemijsko-fizikalna svojstva tla, a kod miješanja mogu se dodati mikroelementi, zaštitna sredstva, stimulatori rasta i druge komponente u količini koja je primjerena nekom tlu, biljci ili etapi razvitka. Zbog takvih mogućnosti u nekim se zemljama vrlo često koriste miješana gnojiva, na primjer u SAD-u, gdje je ratarska proizvodnja pojedinih farmi usko specijalizirana pa miješana gnojiva čine 60-70 % ukupne potrošnje mineralnih gnojiva.

10.7.5. Sporodjelujuća kompleksna gnojiva

Sve češće se, pored dušičnih, koriste i druga sporodjelujuća gnojiva, pa i kompleksna. Osim kemijski teško topljivih soli, slično dušičnim sporodjelujućim gnojivima za *enkapsulaciju* granula konvencionalnih gnojiva primjenjuju se različite tvari koje sporo propuštaju vodu i usporavaju hidrolizu i difuziju mineralnih soli iz kapsula u vanjsku sredinu. Granule konvencionalnih mineralnih gnojiva najčešće se oblažu talinom sumpora, ali se sve češće koriste i drugi materijali (*4,4-difenilmetan di-izocijanat, dietilen-glikol, trietanolamin* i dr.). Otpuštanje hraniva, ovisno o materijalu za oblaganje granula i njegovoj debljini, može biti "programirano" u vremenu od 1 do 24 mjeseca, a primjenom etilen-ugljičnog monoksidnog kopolimera može se postići fotokemijski razgradiv premaz i ekološki prihvatljiva primjena sporodjelujućih gnojiva.

Produženo otpuštanje hranjivih tvari može se postići uz širok omjer gnojiva prema volumenu tla primjenom tzv. supergranula (zadržavanje hraniva unutar granule korištenjem ionoizmjenjivača), briketa, tableta, štapića i dr. Također, važno je naglasiti da sporim otpuštanjem hraniva iz granule efikasnost gnojiva znatno raste (tablica 10.7.).

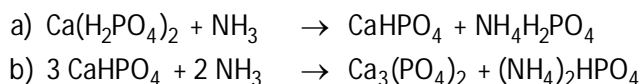
Tablica 10.7. Efikasnost konvencionalnih i sporodjelujućih gnojiva (istog sastava i koncentracije)

Hranivo	Konvencionalno gnojivo	Gnojivo s kontrolom otpuštanja hraniva
	Efikasnost (% iskorištenja)	
N	40 - 60	60 - 90
P	10 - 30	30 - 60
K	50 - 70	70 - 90

10.7.6. Antagonizam gnojiva

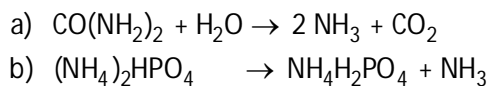
Miješanje gnojiva, zbog postizanja potrebne formulacije, ili miješanje kompleksnih i pojedinačnih gnojiva, zbog pojednostavljenja primjene, zahtijeva poznavanje kemijskih svojstava mineralnih gnojiva. Naime, neka mineralna gnojiva ne treba miješati jer dolazi do neželjenih kemijskih reakcija koje mogu utjecati na gubitak hraniva ili pogoršati kemijska i fizikalna svojstva u odnosu na polazne komponente. Takva pojava naziva se *antagonizam gnojiva*, a štetne posljedice izazivaju sljedeće kemijske reakcije:

Neutralizacija

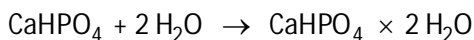


Gornji primjer pokazuje kako se miješanjem amonijevih gnojiva i kalcijevog dihidrogenfosfata dolazi do prevođenja primarnog kalcijevog fosfata koji je vodotopljiv, preko sekundarnog (kalcijev hidrogenfosfat) koji je citrat topljiv u tercijarni (kalcijev fosfat) netopljiv (*retrogradacija*).

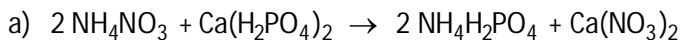
Dekompozicija



Razlaganjem gnojiva dolazi do gubitka aktivne tvari na povišenim temperaturama i uz prisutnost vlage. U prvom primjeru prikazana je dekompozicija uree. Proces je vrlo brz pri višim temperaturama, pa se tako na temperaturi od 65 °C za 30 dana razgradi sva urea. U drugom slučaju prikazano je raspadanje DAP-a do MAP-a uz gubitak dušika volatilacijom.

Hidratacija

Hidratacijom se pogoršavaju fizikalna svojstva gnojiva pa može doći do sljepljivanja granula ili zgrudnjavanja što predstavlja veliki problem za ravnomjernu raspodjelu gnojiva.

Dvostruka dekompozicija

U prva dva primjera prikazane su reakcije miješanja amonijevog nitrata sa superfosfatom (ili tripleksom) gdje se miješanjem mijenjaju kemijska svojstva uz nastanak kalcijevog nitrata, što zbog njegove higroskopsnosti je pogoršanje fizikalnih osobina prema početnim komponentama. U drugom slučaju slobodne kiseline u kalcijevim dihidrogenfosfatima dovode do gubitka dušika u obliku nitroznih para, a u trećem primjeru dolazi do kemijskih promjena. Tablica 10.8. pokazuje mogućnosti miješanja pojedinačnih gnojiva.

Tablica 10.8. Mogućnost miješanja gnojiva

	Gnojivo	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.
1.	Ca(NO ₃) ₂													
2.	NaNO ₃	⊕												
3.	(NH ₄) ₂ SO ₄ × 2 NH ₄ NO ₃	×	+											
4.	KAN	×	+	⊕										
5.	(NH ₄) ₂ SO ₄	×	+	+	⊕									
6.	NH ₄ Cl	×	+	⊕	+	+								
7.	CO(NH ₂) ₂	×	×	×	×	⊕	⊕							
8.	CaCN ₂	⊕	+	×	×	×	×	⊕						
9.	CaHPO ₄	⊕	+	+	+	+	+	+	+					
10.	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ + CaSO ₄	×	⊕	⊕	⊕	+	+	×	×	+				
11.	termofosfati	⊕	+	×	×	×	×	⊕	+	+	×			
12.	K ₂ SO ₄ i MgSO ₄	⊕	+	+	+	+	+	+	⊕	+	+	⊕		
13.	KCl	×	+	+	+	+	+	×	⊕	+	+	⊕	+	
14.	CaCO ₃	⊕	+	⊕	⊕	×	+	⊕	+	+	×	+	⊕	⊕

(Miješanje: + dopušteno, × zabranjeno, ⊕ dopušteno za kraće vrijeme)

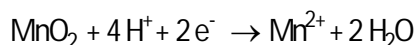
10.8. MIKROGNOJIVA

Više biljke zahtijevaju, osim makroelemenata, i esencijalne mikroelemente od kojih su Fe, Mn, Zn, Cu i Ni teški metali ($\rho > 5 \text{ g cm}^{-3}$), Mo prijelazni element, Cl halogen, a B nemetal. Biljke usvajaju teške metale u obliku kationa ili metalnih kelata, dok se ostali usvajaju kao anioni. Zbog male količine koje biljke zahtijevaju, mikroelementi se uglavnom dodaju konvencionalnim mineralnim gnojivima ili rabe kao otopine za folijarnu ishranu, za vlaženje sjemena ili kao dodatak otopinama za zaštitu bilja. Mikrognojiva sadrže do 500 g ha^{-1} aktivne tvari.

Od Fe-gnojiva pretežito se rabe vodotopljive tvari, soli ili kelati u količini do 5 kg Fe ha^{-1} :

$\text{FeSO}_4 \times 7 \text{ H}_2\text{O}$	Sadrži 20 % Fe.
Fe-EDTA	Fe-kelat je Na sol <i>etilendiamintetraacetata</i> . Komercijalna gnojiva sadrže 5-9 % Fe (<i>Fetrilon</i> , <i>Sequestren</i> itd.). Koristi se otopina za folijarnu ishranu koncentracije 0,1-0,2 %.
Fe-oksalat	Sadrži oko 22 % Fe.

Manganova mikrognojiva također su vodotopljive soli ili kelati. Gnojidbene količine su $300\text{-}1.000 \text{ g Mn ha}^{-1}$, a kod izraženog manjka primjenjuje se $10\text{-}30 \text{ kg Mn ha}^{-1}$. Mogu se koristiti i netopljivi spojevi tako da se u pripremi gnojiva provodi redukcija kiselinama do aktivnog (dvovalentnog mangana):



Kao Mn-gnojiva koriste se najčešće:

$\text{MnSO}_4 \times 4 \text{ H}_2\text{O}$	Sol s 24 % Mn. Otopina za folijarnu ishranu je koncentracije 0,5 % (hortikultura) do 2 % (žitarice).
$\text{MnSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$	Sol s 32 % Mn.
Mn-EDTA	Kelat s 13 % Mn.
MnO	Sadrži 48 % Mn kojeg treba aktivirati (reducirati) kiselinom.

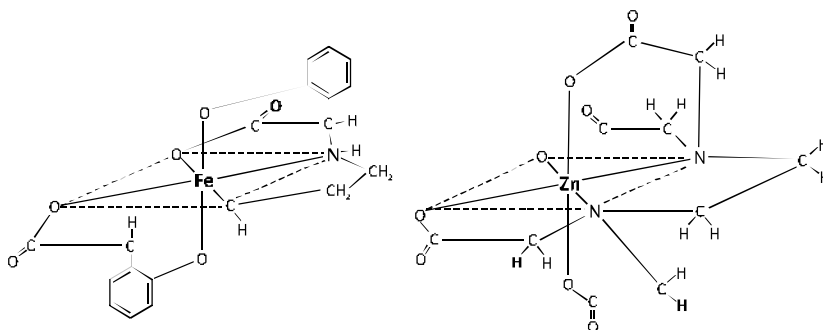
Cinkova mikrognojiva su sljedeći spojevi:

$\text{ZnSO}_4 \times 7 \text{ H}_2\text{O}$	Sol s 23 % Zn. Otopina za folijarnu ishranu je koncentracije 0,2 % (hortikultura) do 0,5 % (žitarice).
$\text{ZnSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$	Sol s 36 % Zn.
$\text{ZnSO}_4 \times 4 \text{ Zn(OH)}_2$	Alkalni cinkov sulfat s 55 % Zn.

Zn-EDTA

Kelat cinka s oko 14 % Zn (slika 10.3.).

ZnO

Sadrži oko 70 % Zn. Priprema se tako da 2 mg ZnO dolazi na dm³ vode koja sadrži CO₂.

Slika 10.3. Prostorna struktura kelata željeza i cinka

Cink se rabi u količinama od 100 do 400 g ha⁻¹, a kod izraženog manjka čak i do 10-20 kg ha⁻¹.

Mikrognojiva bakra koriste se u vodotopljivim i netopljivim oblicima u količini 30 do 100 g Cu ha⁻¹, a kod jake deficijencije i do 10 kg Cu ha⁻¹. Netopljivi oblici imaju izraženo produžno djelovanje i otapaju se u tlu pod utjecajem korijenskih izlučevina u dužem vremenskom razdoblju. Kao Cu-gnojiva koriste se sljedeće tvari:

CuSO₄ × 5 H₂OSol s 25 % Cu (*modra galica*). Otopina za folijarnu ishranu je koncentracije 0,2 % (hortikultura) do 0,5 % (žitarice).CuSO₄ × H₂O

Sol s 36 % Cu.

Cu₂Cl(OH)₃Sol s 48 % Cu (*zeleni bakar*, *Cupravit* itd.). Otopina za folijarnu ishranu je koncentracije 0,1-0,3 %.

CuO

Netopljiva sol sa 71 % Cu.

Vinogradska tla mogu često imati suvišak bakra zbog njegove primjene u zaštiti loze od fitopatogenih gljivica.

Borna mikrognojiva se sve češće koriste za šećernu repu:

Na₂B₄O₇ × 10 H₂O

Boraks (natrijev tetraborat) s 11 % B. Za folijarnu ishranu šećerne repe otopina je koncentracije do 1 %, a za voće do 0,5 %.

Na₂B₄O₇*Anhidrirani (bezvodni) boraks* s 22 % B.H₃BO₃*Borna kiselina* s 18 % B.Na₂B₈O₁₃ × 4 H₂O*Solubor, polyborat, borsol* s 21 % B.

$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \times 5 \text{H}_2\text{O}$ *Kolemanit* s 9-14 % B, netopljiv u vodi s izraženim produženim djelovanjem.

Vodotopljiva borna gnojiva koriste se kao dodatak krutim mineralnim gnojivima i unose u tlo ($2-4 \text{ kg B ha}^{-1}$) ili kao otopine za folijarnu ishranu ($0,05-0,1 \%$).

Molibdenova mikrognojiva najčešće su dodatak konvencionalnim gnojivima, npr. $0,05 \%$ Mo dodaje se superfosfatu. Molibden se upotrebljava u količinama $5-20 \text{ g ha}^{-1}$, a kod jako izraženog manjka do $0,5 \text{ kg Mo ha}^{-1}$. Koriste se:

$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ Sol s 40 % Mo.

$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \times 4 \text{H}_2\text{O}$ Sol s 54 % Mo.

CaMoO_4 Netopljiva sol u vodi s 48 % Mo.

10.9. KRISTALONI

Kristaloni su zbirno ime posebne vrste gnojiva koja su u potpunosti topljiva u vodi (ne sadrže balast, odnosno punilo ili u vodi netopljive hranjive elemente). Kristalone proizvode različiti proizvođači, a ime su dobili (1996.) prema patentiranim proizvodima norveške firme *Norsk Hydro* (vlasnik patenta trenutno je belgijska firma *Nu3 NV*).

Najčešće se koriste u hortikulturi uz fertigaciju ili kao folijarna gnojiva, a sadrže često mikroelemente i hormone rasta. Također, mogu se primijeniti i za gnojidbu usjeva, voća, povrća i cvijeća na otvorenom, ili u kontroliranim uvjetima, uz navodnjavanje kap po kap, orošavanje, prskanje, ili uz neki drugi sustav.

Primjena kristalona najčešće je ograničena na visoko profitabilnu proizvodnju (voće, povrće, cvijeće, vinova loza i dr.) i zahtijeva posebnu tehnologiju (sustave za fertigaciju ili folijarnu primjenu), a mogu se primjenjivati i u kombinaciji sa zaštitnim sredstvima (kemigacija). Ubrajaju se u brzodjelujuća gnojiva, tzv. HFRF (*Hydrosoluble Fast Release Fertilizers*), a formulacija kristalona naglašava se vrlo često bojama (npr. *Kristalon orange* - 6:12:36, *Kristalon white* - 15:5:30, *Kristalon red* - 12:12:36 itd.) radi boljeg raspoznavanja.

10.10. ORGANSKA I PRIRODNA GNOJIVA

Organska gnojiva su po svom sastavu i svojstvima vrlo raznolika skupina koja obuhvaća uglavnom različite otpatke biljnog i životinjskog podrijetla.

Organska gnojiva, sa ili bez dodatka mineralnih gnojiva, dijele se u nekoliko grupa:

- Gnojiva bazirana na tresetu (ili tvarima slične stabilnosti): treset, kompostirana kora drveća, lignit i sl., minimalne konc. hraniva 1 % N, 0,5 % P, 0,8 % K i 30 % organske tvari,
- Otpad životinjskog podrijetla kao što su rogovi, koštano brašno, krvno brašno (9-13 % N), perje i sl.,
- Gnojiva na bazi otpadnog materijala biljnog ili industrijskog podrijetla: pivarska pulpa, uljne pogače soje, uljane repice, masline ili suncokreta, vinska pulpa i dr.
- Gnojiva na bazi komunalnog otpada, npr. muljevi iz otpadnih voda, biogeni i vrtni komposti, komercijalni komposti i sl. kod kojih treba paziti da ne prelaze dopuštenu koncentraciju teških metala, naročito Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg i Zn. U suprotnom, ne smiju se upotrebljavati u proizvodnji hrane već samo za parkove, sportske terene, uzgoj cvijeća i sl.

Uporaba organskih gnojiva, ali samo dok traje njegova redovita primjena, povećava količinu humusa u tlu. Efekt je manje primjetan kod primjene tekućih organskih gnojiva. Važno je naglasiti kako primjena organskih gnojiva poboljšava svojstva tla, posebice strukturu što ima za posljedicu bolji vodnozračni odnos, veću retenciju vode, veću raspoloživost svih hraniva te jača otpornost na eroziju na nagnutim površinama. Također, primjena organskih gnojiva u razdoblju kad je tlo bez vegetacije ili kad biljke nemaju potrebu za usvajanje hranjivih tvari, može izazvati ekološke probleme (npr. ispiranje nitrata, na lakšim terenima i kalija, gomilanje fosfora u gornjem sloju koji je podložan eroziji i sl.).

10.10.1. Stajnjak

Stajnjak je smjesa različito razgrađenih čvrstih (*feces*) i tekućih izlučevina domaćih životinja i stelje (prostirke) koja služi za upijanje tekućeg dijela. Sastav stajnskog gnojiva ovisi o vrsti domaćih životinja, načinu njihove ishrane i vrste stelje, načinu čuvanja, duljini fermentacije i dr., stoga je stoga kemijski sastav i uporabna vrijednost stajnjaka vrlo različita.

Primjenom većih količina stajnjaka može se, dok traje primjena, osjetno povećati sadržaj organske tvari u tlu. Međutim, gubici hraniva iz stajnjaka su

također visoki, a jedan dio tih hraniva, u vidu tekućih izlučevina i/ili volatizacijom, nepovratno se izgubi zbog poteškoća u čuvanju. Značajni gubitci dušika događaju se pri spremanju i fermentaciji gnojiva. Dušik se gubi i isparavanjem nakon iznošenja i raspodjeli po tlu, ispiranjem nakon mineralizacije, u procesu humifikacije itd. Zbog toga se smatra da samo oko 1/4 cjelokupne količine dušika u stajnjaku biva iskorištena za ishranu bilja, a u višegodišnjoj primjeni zbog produžnog efekta i nešto više.

Svojstva stelje vrlo su značajna za kakvoću stajskog gnojiva, a posebno mjesto pripada sadržaju celuloze koja se brzo razlaže te uslijed povećanja temperature u hrpi stajnjaka, gubici dušika u obliku amonijaka mogu biti vrlo veliki. Brzina razlaganja stajnjaka u tlu utječe na mobilizaciju hraniva pa stelja s puno ugljikohidrata, iako sadrži manje dušika u konačnici pruža više dušika za ishranu bilja u odnosu na stelju koja se teško razlaže. Stanje razgrađenosti stelje određuje fizička svojstva stajnjaka što je vrlo značajno za raspodjelu gnojiva, ali i za svojstva humusa, npr. stelje od lišća i paprati daju kiseli humus.

Količina ekskrementa ovisi o vrsti životinja, njihove starosti i sastava stočne hrane. Koncentriranija hrana bolje se iskorištava od hrane s malo proteina. Međutim, povećanje proteina u hrani iznad određene granice smanjuje njihovu probavljivost pa im se sadržaj povećava u ekskrementima, naročito u obliku teško razgradivog lignoproteinskog kompleksa. Fosfor se izlučuje pretežito u krutom dijelu, a kalij i dušik u tekućem dijelu stočnih ekskremenata.

Godišnja količina stajnjaka ovisna je o vrsti i težini životinja. Tako govedo mase 500 kg ostavlja oko 15 t svježeg ili 11 t zrelog stajnjaka, a konj iste mase oko 10 t svježeg ili 8 t zrelog stajnjaka. Manje životinje proizvode proporcionalno manje količine stajnjaka: ovca (45 kg) oko 0,9 t svježeg ili 0,7 t zrelog, svinja (100 kg) 2,7 t odnosno 2,2 t. Podaci vrijede za neprekidan boravak životinja u staji, a kod ispaše količina je manja za ~ 1/3. Očekivana količina svježeg stajskog gnojiva može se izračunati:

$$\left(\frac{K}{2} + P \right) \times 4, \text{ gdje je } K \text{ količina suhe tvari u hrani i } P \text{ količina stelje}$$

Tijekom čuvanja stajnjaka događaju se određene promjene pod utjecajem različitih grupa mikroorganizama (gljive, aktinomicete, aerobne i anaerobne bakterije, protozoe itd.). Aktivnost mikroorganizama ovisna je o više čimbenika, npr. način čuvanja, vrsta stelje, pH reakcija sredine, temperatura, vlažnost, zbijenost stajnjaka i slično.

Neugodan miris stajnjaka potječe od *amina* i *tiola* (*merkaptana*) koji nastaju razgradnjom proteina bez prisustva kisika (truljenje). U oksidacijskim uvjetima krajnji produkti su CO₂ i H₂O pa slabo zbijene gomile stajnjaka imaju visoke gubitke na težini i u dušiku. U uvjetima dobre zbijenosti stajnjak za tri mjeseca izgubi ~ 30 % mase i 25 % N. Obično se smatra da je stajnjak nakon 3-4 mjeseca

poluzreo, a nakon 6-8 mjeseci potpuno zreo. Gubici hraniva također mogu nastati ispiranjem padalinama, posebice kod niskih i slabo zbijenih hrpa stajnjaka, pa je izgradnja gnojšta najbolje (u EU i obvezatno) rješenje čime se sprječava i onečišćavanje okoliša.

Zreli stajnjak ne sadrži slamnate dijelove, ima niži sadržaj ugljika, a budući da se dušik u toj fazi (sazrijevanje) manje gubi, ujednačeniji je i ima viši sadržaj fosfora i kalija. Svježem stajnjaku sastav se može popraviti dodavanjem mineralnih fosfornih i kalijevih gnojiva. Dodavanjem dušičnih mineralnih gnojiva popravljaju se i C : N omjer. Svježi stajnjak također ima i nepovoljna fizikalna svojstva, teško se raspodjeljuje po parceli, loše zaorava, a velika količina slame nakon zaoravanja odvađa oranični od podoraničnog sloja i dovodi do brzog isušivanja tla.

Stajnjak u prosjeku sadrži 75 % vode, 0,5 % N (0,2-0,6), 0,3 % P₂O₅ (0,1-0,7) i 0,6 % K₂O (0,1-0,7), 0,07-1,0 % Ca, 0,06-0,3 % Mg, 30-50 ppm Mn, 10-20 ppm Zn, 3-5 ppm B, 1-3 ppm Cu, 0,1-0,2 ppm Mo i ima C : N omjer približno 20 : 1. Sadržaj hraniva u stajnjaku može prilično varirati u odnosu na navedene vrijednosti ovisno o načinu uzgoja stoke i čuvanja gnoja (tablice 10.9. i 10.10.).

Tablica 10.9. Prosječni sadržaj makroelemenata u svježem stajnjaku (%)

Tip stajnjaka	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	Organska tvar
Goveđi	0,6	0,3	0,5	0,3	0,1	0,04	17
Konjski	0,6	0,3	0,6	0,3	0,1	0,04	27
Ovčji	0,9	0,5	0,8	0,4	0,1	0,06	30
Svinjski	0,6	0,5	0,4	0,5	0,1	0,10	16
Kokošji	1,5	1,3	0,5	3,0	0,3	0,40	30
Brojlerski	3,1	3,0	2,0	2,0	0,4	0,70	30

Tablica 10.10. Prosječni sadržaj mikroelemenata u svježem stajnjaku (%)

Tip stajnjaka	Mn	Zn	Cu	B	Fe	Vlaga
Goveđi	0,0030	0,002	0,0008	0,0020	---	80
Konjski	0,0030	0,002	0,0008	0,0020	---	70
Ovčji	0,0030	0,002	0,0008	0,0020	---	65
Svinjski	0,0005	0,010	0,0004	0,0003	0,03	80
Kokošji	0,0030	0,002	0,0006	0,0020	0,06	65

Gnojivo za primjenu na jednoj parceli treba biti ujednačenog sastava i stoga se izuzima redom iz gnojšta (ili hrpe). Raspodjeljuje se ravnomjerno i odmah zaorava što značajno snižava gubitke dušika. Količine stajnjaka manje od potrebnih pokazuju veće iskorištenje hraniva, premda se većim količinama postigne veće produženo djelovanje (približno 50 % od iskorištenja u prvoj godini). Prosječno se iz stajnjaka u prvoj godini nakon primjene iskoristi 20-30 % dušika (iz svježeg i do 50 %), 15-20 % fosfora i 50-60 % kalija.

Izvezeni stajnjak na parcelu treba odmah raspodijeliti i zaorati (ili zakopati u manjim vrtovima) i to u najkraćem mogućem vremenu. Naime, gubici dušika vrlo brzo rastu pa, ako je koeficijent djelotvornosti dušika iz stajnjaka u prvoj godini primjene 0,50 (50 % iskorištenja) kod zaoravanja u roku od dva dana nakon izvoženja na parcelu, on je tek 0,35 nakon 2-4 dana, a samo 0,20 nakon 7 dana ili malčiranja (primjena stajnjaka po površini bez zaoravanja).

Na težim tlima svježi stajnjak se mora primijeniti u jesen (i na svim parcelama za krumpir), a na lakšim tlima bolje je koristiti zreli stajnjak te ga unijeti pred sjetvu/sadnju. Svježi stajnjak, s dosta slame, rabi se znatno prije sjetve jer može izazvati "*dušični manjak*". Razlog je visoka mikrobiološka aktivnost i veliki broj mikroorganizama kod razgradnje organskih tvari stajnjaka, a uvjetuju "biološku" fiksaciju dušika koji je tada, tek izumiranjem mikroorganizama, na raspolaganju biljkama. Taj period traje 4-6 tjedana.

Količine stajnjaka za gnojidbu kreću se od 20 t ha⁻¹ naviše. Prosječne doze su od 20-40 t ha⁻¹ (u vrtu to odgovara količini od 200-400 kg ar⁻¹), a visoke su iznad te količine. Kod primjene stajskog gnoja svake godine doze su 10-25 t ha⁻¹. Također, treba voditi računa o *EU nitratnoj direktivi* koja ograničava primjenu dušika na 170 kg ha⁻¹ što uz 0,5 % N u stajnjaku smanjuje najveću dozu na 34 t ha⁻¹ god⁻¹.

Dubina zaoravanja stajnjaka ovisi o svojstvima tla. Na težim i vlažnim tlima stajnjak se zaorava na dubinu od 30 cm, odnosno svakako veću od 15 cm, a na lakšim tlima nešto pliće, ali dublje od 10 cm. Stajnjak pokazuje izrazito produženo djelovanje dušika (koje u slijedećim godinama progresivno opada), dok je iskorištenje fosfora i kalija u prvoj godini primjene slično mineralnim gnojivima.

Stajski se gnoj koristi isključivo za gnojidbu okopavina, a potrebna količina utvrđuje se na temelju potreba usjeva, kemijske analize tla, sastava gnoja i njegove učinkovitosti (u prvoj godini primjene). Npr., ako je sastav stajskog gnoja: N = 5,5 kg t⁻¹, P₂O₅ = 3,0 kg t⁻¹ i K₂O = 5,2 kg t⁻¹, predviđena doza 25 t ha⁻¹, koeficijenti učinkovitosti (f) po godinama N_{1g} = 0,50; N_{2g} = 0,25; P₂O₅ = 0,20_{1g} i K₂O = 0,50_{1g}), a potreba usjeva u hranivima 160 : 100 : 150, tada se izračuna količina hraniva u njemu:

$$\begin{aligned}
 \text{Raspoloživi N} &= \text{količina} \times \text{N} \times \text{N}_f \\
 &= 25 \times 5,5 \times 0,50 \\
 &= 68,75 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ u prvoj godini primjene} \\
 &= 25 \times 5,5 \times 0,25 \\
 &= 34,38 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ u drugoj godini primjene} \\
 \text{Raspoloživi P}_2\text{O}_5 &= 25 \times 3,0 \times 0,20 \\
 &= 15 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ u prvoj godini primjene} \\
 \text{Raspoloživi K}_2\text{O} &= 25 \times 5,2 \times 0,50 \\
 &= 65 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1} \text{ u prvoj godini primjene}
 \end{aligned}$$

Preostala količina hraniva podmiri se ovisno o rezultatima kemijske analize tla mineralnim gnojivom (za prvu godinu primjene stajskog gnoja):

Izvor hraniva	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Potrebna gnojidba	160	100	150
Kemijska analiza tla	-52	-150	-100
Hraniva u stajnjaku	-69	-15	-65
Rezidualna hraniva iz preth. godine	-21	-8	-32
Neto zahtjev za hranivima	18	-73	-47

Dakle, prema gornjem proračunu trebalo bi primijeniti samo 67 kg ha⁻¹ KAN-a (u startu ili u prihrani za proljetne usjeve) za podmirenje potreba za dušikom ($18 \times 100/27 = 67$), dok su potrebe za fosforom i kalijom potpuno zadovoljene (negativne vrijednosti "Neto zahtjev za hranivima").

Potrebne količine dušika za povrće uz primjenu stajskog gnoja mogu se procijeniti na temelju tablice 10.11.

Tablica 10.11. Potreba mineralnog dušika za povrće uz primjenu stajnjaka

Vrsta	kg N ar ⁻¹	KAN kg ar ⁻¹	Vrijeme i način primjene
Kupus	1,2 - 2,0	5 - 8	1/2 u sadnji, 1/2 nakon 5 tjedna
Cvjetača	0,5 - 1,0	2 - 4	1/2 u sadnji, 1/2 nakon 4 tjedna
Rajčica	0,5 - 1,0	2 - 4	1/2 u sadnji, 1/2 nakon 4-5 tjedna
Krastavci	0,5 - 1,0	2 - 4	1/2 u sjetvi, 1/2 u 6./7. mjesecu
Krumpir	0,8 - 1,2	3 - 5	1/2 u sadnji, 1/2 nakon zagrtanja

Primjenu stajskog gnoja neposredno pred sadnju dobro podnose kupusnjače i lisnato povrće (špinat, salata), dok za mrkvu, peršin, rajčicu, grah (i neke druge) stajnjak treba primijeniti ranije. *Kod lisnatog povrća neposredna primjena organskih gnojiva pred sadnju može biti opasna zbog prenošenja zaraznih klica lišćem* (npr. više serotipova *Salmonelle*).

U ekološkoj proizvodnji sve se više koristi kruti stajski gnoj obogaćen fino mljevenim sirovim fosfatima (*PROM - Phosphate Rich Organic Manure*, 24 % ili 34 % P₂O₅). Mineralna fosforna komponenta iz takvog gnojiva brže djeluje na kiselim tlama, ali pod utjecajem izlučevina korijena i mikroorganizama trikalcijev fosfat se polako razgrađuje te se efekt, naročito kod česte aplikacije, zapaža već nakon nekoliko godina.

10.10.2. Tekući i polutekući stajnjak (gnojnica i gnojovka)

Tekuće izlučevine domaćih životinja (preciznije suspenzija urina, neizbježnih dijelova krutog izmeta, drugih krutih čestica, razloženih mikroorganizma i kišnice) koje stelja ne upije, ili u modernim sustavima držanja stoke odvojene

nakon separacije krutih ekskremenata, nazivaju se *gnojnica*. Čuvanjem gnojnice u otvorenim jamama ili bazenima vrlo brzo se gubi dušik u obliku amonijaka, posebice pri višim temperaturama. Gnojnica sadrži prosječno 0,2 %N (0,1-0,5), 0,5 % K₂O (0,3-1,0) i fosfora u tragovima (0,01 % P₂O₅).

Dušik u gnojnici je 70 % u obliku amonijaka pa se lako gubi isparavanjem. Gubici dušika sprječavaju se dodavanjem formaldehida (0,1 %), gipsa ili sumporne kiseline pri čemu nastaje amonijev sulfat. Postupak sumporizacije (sulfatizacije) treba provoditi izvan staje zbog redukcije sumpora do sulfida koji su otrovni za stoku. Sulfatna kiselina i kalijeva gnojiva jako su korozivna pa se sve manje upotrebljavaju kao dodatak gnojnici. Dodavanjem superfosfata gnojnici (sadrži gips) snižava se pH i sprječava isparavanje amonijaka bez štetnih posljedica po stoku, a gnojnica se obogaćuje fosforom.

Količina gnojnice po govedu iznosi oko 15 kg dan⁻¹, a po jednoj svinji oko 4 kg dan⁻¹ što daje do 5 m³ gnojnice u jednoj godini po grlu, odnosno oko 10 kg N i do 25 kg K₂O.

Pod *gnojovkom* se podrazumijeva tekući stajnjak koji se dobiva u suvremenim stajama gdje se životinjski ekskrementi čuvaju bez primjene stelje. Sadržaj suhe tvari u gnojovci je do 15 %, odnosno produkcija po govedu je oko 50 kg dan⁻¹, a po svinji 4 kg dan⁻¹. Koncentracija hraniva u gnojovci može znatno odstupati od navedenih vrijednosti (tablica 10.12.), ovisno o načinu uzgoja, ishrani stoke i čuvanju gnojovke (otvorene lagune, anaerobna fermentacija itd.).

Goveđa gnojovka prosječno sadrži uz 5,5 % organske tvari oko 0,4 % N, 0,2 % P₂O₅ i 0,5 % K₂O, a svinjska uz 6,0 % organske tvari i oko 0,6 % N, 0,45 % P₂O₅ i 0,25 % K₂O. U gnojovci je oko 50 % dušika u amonijskom obliku, a C : N omjer varira između 5:1 do 8:1. Iskoristivost dušika iz gnojovke u prvoj godini nakon primjene nešto je veća u odnosu na stajnjak (30-50 %).

Tablica 10.12. Prosječne vrijednosti gnojovke (*Virginia Tech and research data from N.C State University, 1993.*)

Gnojovka	N	NH ₄	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	S	Mg	Zn	H ₂ O %
	kg m ⁻³								
Goveđa	2,76	1,13	1,68	2,52	1,20	0,37	0,58	0,03	93,0
Svinjska	3,72	2,40	2,64	2,04	1,03	0,56	0,35	0,05	95,0
Juneća	4,44	1,92	2,76	3,84	1,19	0,84	0,61	0,02	89,0

Primjena gnojovke, zbog niske koncentracije organske tvari, prilično je skupa pa se koristi uglavnom u blizini staja ili tamo gdje se očekuje rentabilna biljna proizvodnja. Gnojovku bi trebalo do primjene čuvati u posebnim bazenima-cisternama bez dodira sa zrakom, a unosi se posebnim aplikatorima ispod površine tla, jer površinska primjena dovodi do vrlo visokih gubitaka dušika. Primjenjuje se u količini 40-80 m³ goveđe gnojovke (za što je potrebno 2-4 krave za gnojidbu 1 ha oranice) ili 30-45 m³ svinjske (10-15 svinja po jednom ha

oranice). Uporaba gnojovke mora se obavljati u skladu s važećim propisima, u dopuštenim količinama prema teksturnoj klasi tla te samo u vegetacijskom dijelu godine (nikako zimi ili po snijegu).

10.10.3. Guano

Guano (*peruanski guano*, *fosfatni guano* i sl.) su nataloženi ekskrementi morskih ptica, usitnjeni do veličine granula pogodnih za raspodjelu, formulacije 3:8:1 do 8:4:1. To je prirodno gnojivo koje sadrži mikroelemente (posebice željezo i bor), kalcij, magnezij i sumpor, a zbog povoljnog djelovanja na fizikalno-kemijska svojstva tla koristi se i kao kondicioner (samo u Sjevernoj i Južnoj Americi zbog skupog prijevoza male količine aktivne tvari).

10.10.4. Gradski otpad

Prerađeni gradski otpad (poznat u SAD-u pod imenom *milorganite*) dobiva se djelovanjem mikroorganizama na organski dio gradskog otpada specijalnim postupkom u digestorima (prvo anaerobnom, a zatim aerobnom fermentacijom). Fermentirana masa se suši, smeđe je do tamne boje i ima približno formulaciju 5:2:5. Takav proizvod može sadržavati mikroorganizme, mikroelemente, ali i pesticide, teške metale te druge štetne tvari pa ga treba pažljivo ispitati prije uporabe u proizvodnji hrane (takvo gnojivo mora imati certifikat). Međutim, vrlo je pogodan za primjenu u hortikulturi i rasadnicima drveća.

Ako se sličnim postupkom prerađuje stajski gnoj, dobije se izvrsno gnojivo (u SAD-u poznato pod nazivom *tankage*) slično kompostu, a uz gnojivo se dobije i gorivi plin metan pogodan za različite energetske potrebe.

10.10.5. Zelena gnojidba (*sideracija*) i pokrovni usjevi

Zaoravanje zelene mase određenih biljnih vrsta naziva se *zelena gnojidba* ili *sideracija*. Provođenje zelene gnojidbe s namjerom obogaćivanja tla organskom tvari i dušikom je diskutabilno jer se porast sadržaja humusa u tlu najčešće postiže samo u razdoblju provođenja takve mjere. Naime, sadržaj organske tvari u tlu je karakteristična i stabilna veličina, ovisno o klimi i kemijsko-fizikalnim svojstvima tla, tipu te načinu uporabe tla, ali se zato zelenom gnojidbom znatno povećava biogenost tla. Stoga se svaki oblik zelene gnojidbe mora posebice

ocjenjivati, jer često je aktivna tvar iz mineralnih gnojiva niže cijene u odnosu na primjenu zelene gnojidbe. Ipak, sideracija ima značaj u povećanju dušika tla i to bez utroška energije jer leguminozne biljke simbiotski vežu molekularni dušik iz atmosfere. Ona također pomaže u sprječavanju površinske erozije, poboljšava fizikalne karakteristike tla (povećava retenciju za vodu i aeraciju), sprječava ispiranje hraniva (konzervacija hraniva) i intenzivira mikrobiološke procese u tlu. Stoga je zelena gnojidba vrlo dobar način povećanja produktivnosti tla, a posebno je interesantna njezina primjena u alternativnim sustavima biljne proizvodnje.

Biljne vrste koje se koriste za zelenu gnojidbu trebaju sadržavati veliku količinu lakorazgradivih tvari, najprije dušika i pepela te je poželjno da se proces njihove razgradnje nakon zaoravanja odvija što brže. Međutim, sastav biljaka mijenja se tijekom vegetacije pa starije biljke sadrže više lignina i celuloze, a manje pepela i dušika, teže se razlažu i imaju nepovoljniji C : N omjer. Nasuprot njima, kod mlađih biljaka koje se brzo razlažu mogući su gubitci u obliku amonijaka pa se u zelenoj gnojdbi pristupa kompromisnom rješenju te se zaoravaju biljke u fazi cvjetanja.

Za zelenu gnojidbu uzgajaju se biljke relativno brzog porasta, s dosta organske tvari i velikom apsorpcijskom moći korijena što im omogućuje razmjerno učinkovitu transformaciju nepristupačnih oblika hraniva u bioraspoloživa hraniva. Ponekad se u alternativnim sustavima biljne proizvodnje koriste *nematocidne biljke* (*Pangola digitgrass*, *Digitaria decumbens*, *Transvala digitgrass*, *Tagetes patula*, *Indigofera hirsuta*, *Crotalaria spectabilis* i dr.). Kod izbora usjeva (ili smjese usjeva) za zelenu gnojidbu treba znati da leguminoze sadrže razmjerno puno dušika uz niži sadržaj ugljikohidrata, dok je kod trava to suprotno. Količina zelene mase koja se zaorava je 10-20 t ha⁻¹ (ili 2-4 t ST ha⁻¹), zatim 0,7-3,0 t korijena po ha uz oko 100 kg N ha⁻¹ kod leguminoza. Zelenu masu prije zaoravanja potrebno je usitniti radi nesmetane obrade i pripreme tla za sjetvu.

Pokrovni usjevi neobično su važni u sustavima primarne organske produkcije, naročito s aspekta održive poljoprivredne proizvodnje. Pod izrazom pokrovni usjev podrazumijeva se više različitih mjera održavanja tla pod vegetacijom (zimski pokrovni usjevi, zelena gnojidba ljeti, "živi malčevi" (međususjevi), sjetva krmnog bilja iza glavnog usjeva i dr.), a s namjerom održanja ili povećanja organske tvari tla, poboljšanja fizikalnih svojstava tla (strukture, vodozračnog režima i dr.), akumulacije dušika leguminozama, poboljšanja mikrobiološke aktivnosti tla, suzbijanja korova, odnosno općenito podizanja plodnosti tla.

Dakle, zelena gnojidba podrazumijeva unos svježe, lakorazgradljive organske tvari u tlo (nakon cvatnje) s namjerom obogaćivanja tla hranivima, dok pokrovni usjevi imaju dodatnu funkciju "pokrivača tla" s namjerom sprječavanja erozije (vodom ili vjetrom) i ispiranja hraniva, prije svega nitrata (u tom smislu često se

nazivaju i "*usjevi hvatači*" ("*catch crops*", npr. raž poslije kukuruza koja će spriječiti ispiranje hraniva tijekom zime). Pokrovni usjevi mogu biti jednogodišnje, dvogodišnje ili višegodišnje zeljaste biljke, često i više vrsta biljaka združenih sjetvom.

Od zimskih pokrovnih usjeva često se koriste različite leguminoze (djeteline, grahorice i dr.), ali to može biti i raž (pa čak i mješavina raži, ječma i pšenice) ili neka druga žitarica koja dobro podnosi zimske uvjete uzgoja.

Pokrovni usjevi uzgajani ljeti uglavnom imaju namjenu siderata i koriste se u cilju popunjavanja plodoreda uz obogaćivanje tla hranivima, posebice na slabo plodnim tlima, ili kao priprema zemljišta za višegodišnji usjev ili zasnivanje trajnog nasada. Koriste se različite leguminoze, ali i druge biljne vrste kao što su proso, krmni sirak, sudanska trava, rauola, heljda i dr., koje će pomoći u poboljšanju fizikalno-kemijskih svojstava tla i "gušenju" korova.

Pod pojmom "*živi malč*" podrazumijeva se pokrovni usjev unutar godišnjeg ili višegodišnjeg usjeva ili trajnog nasada (međususjev) koji donosi dobit. Živim malčevima suzbija se korov, smanjuje ili sprječava erozija tla, poboljšava plodnost, zadržava voda i utječe na bolju kvalitetu podzemne vode (sprječavanjem ispiranja lakopokretnih iona). Primjerice, živi malč može biti grahorica u kukuruzu, djetelina u "*no-till*" povrću, različite trave ili leguminoze u voćnjacima, vinogradima i dr. Za suzbijanje korova koriste se biljke koje imaju naglašena *alelopatrska svojstva* (usporavaju ili inhibiraju rast drugih biljaka ili korova). Npr., mlada raž zaorana u punom busanju, a prije "*no-till*" sadnje povrća, može spriječiti pojavu korova za nekoliko tjedana, odnosno sve do trenutka kada usjev potpuno "pokriva" tlo. Osobno iskustvo autora sa sjetvom raži prije sadnje rajčice u Istri je izvrsno.

Efikasnost sideracije i uzgoja pokrovnih usjeva treba procjenjivati, s jedne strane kroz podizanje plodnosti i obogaćivanje tla hranivima, sprječavanje erozije, redukcije korova, zadržavanje hraniva i sprječavanje onečišćenja podzemnih voda, ali i s aspekta ekonomske isplativosti. Naime, kratkoročna korist često može biti niža od uloženi sredstava i rada te potrebu za zelenom gnojdbom i sjetvom pokrovnih usjeva treba razmotriti za svaki konkretni slučaj, posebice analizirajući dugoročnu korist (eliminacija erozije i onečišćenja okoliša, korova, podizanje produktivnosti tla i dr.). U ekološkoj proizvodnji hrane, sideracija i sjetva pokrovnih usjeva zapravo nemaju alternativu.

10.10.6. Komposti

Komposti su organska gnojiva dobivena kompostiranjem različitih organskih, prvenstveno biljnih ostataka, često izmiješanih s tvarima mineralnog podrijetla kao što su vapno, pepeo, mineralna gnojiva (organomineralni komposti) i dr. U

procesu kompostiranja, uz pomoć *termofilne mikrobiološke aktivnosti* i biokemijskih transformacija (egzoterman proces kontrolirane biooksidacije), svježa organska tvar podliježe prvo dekompoziciji (*katabolizam*), a zatim *anaboličkim* (sintetskim) procesima sličnim tvorbi humusa. Količina dobivenog komposta je 40-50 % od početne mase svježe organske tvari zbog gubitaka ugljika, vode i drugih tvari u procesu kompostiranja.

Manje količine komposta priređuju se u jamama ili većim posudama, a veće u hrpama. Optimalna vlažnost materijala je 50-55 %, a kod pripreme većih količina komposta potrebno je ostaviti otvore za ulaz kisika, izdvajanje CO₂ i vode te regulaciju temperature koja se provodi prisilnim ubacivanjem zraka kroz otvore ili miješanjem sadržaja cijele hrpe. Nedostatak kisika se najprije zapaža lošim mirisom zbog truljenja organskog materijala što rezultira lošim C : N, odnosom dobivenog komposta i povećanim gubitkom dušika volatizacijom amonijaka. Idealni C : N omjer mase za kompostiranje treba biti 25-30:1, a pH između 6 i 8. U gotovom kompostu C : N omjer je tipično 10:1, a postotak ugljika ili dušika u njemu može se procijeniti izrazom:

$$C \% = N \% \times C:N ; N \% = \frac{C:N}{C \%} ; C:N = \frac{C \%}{N \%}$$

Temperatura kompostiranja se održava između 48 i 65 °C, ali bi trebala barem 12 sati biti u granicama 65-71 °C radi učinkovitog uništavanja sjemena korova. Kompostiranje manjih količina traje oko 3 mjeseca, a kod većih hrpa i teško razgradivog organskog otpada često 2-3 godine.

Širenjem *ekološke poljoprivrede* razvijeno je više načina kompostiranja. Kemijski i mikrobiološki sastav komposta jako ovisi o načinu pripreme i vrsti organskih otpadaka koji se koriste za pripremu takvog gnojiva, dok industrijska priprema komposta podrazumijeva kontrolirani visokotemperaturni proces pa je proizvod relativno sterilan i bez sjemenki korova.

Kompostiranje se može provoditi na više načina, a prema *US Composting Council* pet je različitih tehnologija kompostiranja:

1. Pasivan proces (bez miješanja, podešavanja C : N omjera, podešavanja vlage, temperature ili pH) nezaštićenog materijala za kompostiranje (na otvorenom). Kompostiranje traje 12-14 mjeseci.
2. Kompostiranje u trakastim, uređenim hrpama na otvorenom uz preokretanje, prirodno osvjetljavanje i početno podešavanje C : N omjera, kontrolu vlažnosti (dodavanje vode) i kontrolu temperature miješanjem kompostne mase. Vrijeme kompostiranja je 2-12 mjeseci.
3. Kompostiranje zaštićeno od atmosferskih utjecaja (prekrivanje), sa statičnom strukturom kompostne mase, uz obvezno umjetno svjetlo, s početnim podešavanjem C : N omjera, uz kontrolu vlage i temperature upuhivanjem zraka. Vrijeme kompostiranja je 2-6 mjeseci.

4. Kompostiranje u posebno izgrađenim prostorima (rovovi ili bazeni), zaštićeno od atmosferskih utjecaja (prekrivanje ili dr.), s preokretanjem kompostne mase, uz umjetno osvjetljavanje, s početnim podešavanjem C : N omjera, kontrolom vlažnosti uz dodavanje vode i kontrolu temperature upuhivanjem zraka. Vrijeme kompostiranja je 2-5 mjeseci.
5. Aktivan proces kompostiranja (kao pod 4), ali uz primjenu mikroorganizama (*celulolizatori*, *N-fiksatori* i dr.) i dodavanje biogenih elemenata (najčešće samo dušika). Vrijeme kompostiranja je 2-4 mjeseca.

U ekološkoj poljoprivredi često se priprema *indorski kompost* (naziv potječe od mjesta *Indore* u Indiji gdje je razvijena tehnologija njegove pripreme, prema *Howardu*, 1873.-1947.). Materijal za kompostiranje može biti vrlo različit, npr. suha ili svježa trava, slama i svaki drugi organski otpad (manje od 10 % tvrdog drvenastog otpada). Materijal za kompostiranje slaže se u slojeve debele oko 20 cm preko čega se stavlja sloj 7-10 cm svježeg stajnjaka (bilo kojeg, ali najkvalitetniji je kokošji gnoj) i tanak sloj fino samljevenog vapnenca te potom polijeva vodom. Postupak se ponavlja sve dok hrpa ne bude visoka 1,5-2,0 m koja se zatim pokrije slojem zemlje debelim ~ 15 cm. Širina hrpe ne treba prijeći 1,5 m dok dužina ovisi o potrebi. Na svaki metar dužine izbuši se otvor za zrak tako da se prvi mjesec kompostiranja razvijaju *aerobne bakterije*. Nakon 4-6 tjedana materijal se dobro izmiješa, pokrije iznova zemljom i ostavi još 4-6 tjedana kompostirati bez utjecaja zraka. Nakon 3-4 mjeseca kompost se može koristiti za ekološku proizvodnju hrane, a u klasičnoj poljoprivrednoj produkciji dobro je na 1 m³ komposta dodati 2-3 kg dušičnog ili, još bolje, NPK mineralnog gnojiva.

U povrćarstvu se primjenjuje do 5 cm god⁻¹ komposta po površini i unese (ili još bolje izmiješa frezom) na dubinu 15-20 cm. Kompost nije djelotvoran protiv korova kao malč i ne treba ga na taj način koristiti.

10.10.7. Zemljišni crvi i vermikomposti

Zemljišni crvi su vrlo velika grupa zemljišne faune. Najčešći reprezentanti su gujavice (*Lumbricidae*) s oko 160 vrsta, dužine 2-30 cm, ali i do 3 m (*Megascolides australis*). Oni su općenito žderači organske tvari koja prolazi kroz njihov probavni sustav zajedno s tlom i transformira se do oblika koji lako podliježu humifikaciji. Pri tome se obavlja i dezinfekcija tla, npr. populacija nematoda biva smanjena do 60 %. Budući da gujavice preferiraju organsku tvar koja sadrži veću količinu žive mikrobiološke mase (neki istraživači misle da su oni esencijalni u njihovoj ishrani), u tlu dolazi do redukcije pojedinih štetnih vrsta mikroorganizama.

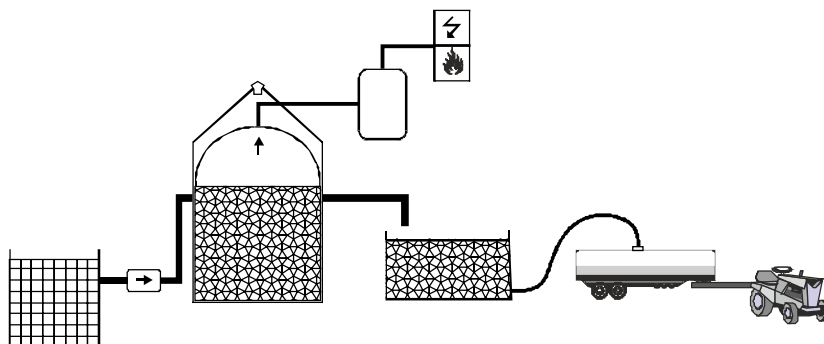
Zemljišni crvi sadrže oko 80 % vode i vlažnost tla je vrlo važna za njihov život jer dnevno gube do 15 % vode. Aktivni su u rasponu temperature 0-30 °C i učinci njihovog djelovanja su:

- biološki (utjecaj na promjenu mikroflore),
- kemijski (razgradnja organske tvari, veća raspoloživost biljnih hraniva) i
- fizikalni (aeracija tla, premještanje hraniva iz dubljih slojeva u zonu korijena).

Vermikomposting je iskorištavanje gujavica (i drugih zemljišnih organizama, npr. nematoda) za ubrzavanje procesa kompostiranja i povećanje efikasnosti kompostiranja. *Vermikompost* (*lumbripost*, *biohumus*, *biotop*) je vrlo fine strukture, C : N omjera vrlo sličnom humusu (9:1 do 15:1), sadrži 1,5-2,5 % N, a zreo je i ugodnog mirisa na prirodno tlo.

10.10.8. Bihugnoj

Bihugnoj (*Biogas Manure = BgM*) je gusta, polutekuća tvar koja zaostaje u digektorima za proizvodnju bioplina (metanska fermentacija) iz različitih organskih tvari. Fertilizacijska vrijednost bihugnoja je znatno veća od stajnjaka jer sadrži više biogenih elemenata (prosječno 2,0 % N, 1,0 % P₂O₅ i 1,5 % K₂O) pH-vrijednost je alikalna (7-9), a sadrži do 10 % organske tvari. Bihugnoj proizveden iz komunalnog otpada nije primjenjiv u proizvodnji hrane. Svježi, žitki bihugnoj (slika 10.4.) primjenjuje se slično gnojovki.



Slika 10.4. Shematski prikaz digestora za proizvodnju bioplina i bihugnoja

10.11. VODENE KULTURE (HIDROPONI) I HRANJIVE OTOPINE

Hranjive otopine, kao supstrat biljne ishrane, koriste se u *hidroponima*, a priređuju po različitim "receptima" visno o biljnoj vrsti. To nipošto nije novi način proizvodnje (primjenu započinje *Woodward u Engleskoj u 1699.*) i još od vremena *Sachsa (1860.)*, *Knopa (1865.)* i *Pffefera (1900.)* poznate su metode uzgoja u vodenim kulturama, a danas su obogaćene najnovijim saznanjima o usvajanju hraniva. Međutim, većina biljaka zadovoljava se standardnim otopinama kao što su *Hoagland broj 2*, *Pennigfeld ili Gericke* (tablica 10.13.). Osmotski tlak hranjivih otopina za uzgoj biljaka u hidroponima obično je između 0,5 i 1,5 bar, a pH-vrijednost se mora češće nadzirati i održavati na oko optimalnih 5,5.

Uzgoj biljaka u velikim *hidroponik* sustavima nadziran je automatskim uređajima za prilagođavanje koncentracije hranjivih elemenata, pH-vrijednosti i uz uvođenje kisika u otopinu (prozračivanje), a većina hidroponskih načina uzgoja kombinirana je sa stakleničkim uzgojem uz nadzor temperature, svjetlosti, vlažnosti zraka pa čak i uz prilagođavanje (povećanje) koncentracije CO₂, a koriste se različite vodene otopine hranjivih tvari, prilagođenog sastava za određenu proizvodnju (tablica 10.14.). Time je omogućen uzgoj u svim razdobljima godine pod najpovoljnijim uvjetima, visina prinosa je višestruko veća u odnosu na poljske uvjete, kakvoća proizvoda je visoka i moguće je detaljno planirati marketing proizvoda.

Pored hidroponik sustava, ali dosta rijetko, primjenjuje se i *aeroponik* tehnika gdje se korijen biljaka u pravilnim vremenskim razmacima uranja u hranjivu otopinu ili njome prska. Takvi sustavi su eksperimentalni, skupi, uvijek stakleničkog tipa i s različitim konstrukcijskim rješenjima. Npr. biljke su ukorijenjene u rastresit sintetski supstrat velike retencijske sposobnosti za vodu, smještene u rešetkaste nosače pričvršćene na beskrajnu traku koja kružno pomjera biljke (približno jedan okret po satu) tako da se na donjoj točki korijen potapa u hranjivu otopinu, a podizanjem prema gore i nakon dostizanja gornje točke spuštaju se iznova sjevernom stranom visokog staklenika (> 10 m) do otopine pa sve biljke dobivaju podjednaku količinu i kvalitetu svjetlosti.

Danas se sve češće biljke uzgajaju na tzv. NFT ili *hranjivim filmovima*. Takav sustav temelji se na kružnom strujanju hranjive otopine (zatvoreni sustav bez onečišćavanja okoline) iznad plitkih bazena prekrivenih PVC folijom, malo nagnutih (~ 2,5 cm pada na 30 m), bez supstrata za ukorjenjivanje. Temperatura otopine regulira se na 35 °C, a za salatu počinje uzgoj na 20 °C. Proračuni pokazuju da je cijena uspostavljanja *NFT hidroponik sustava* 81.500 \$ ha⁻¹ (ne računajući investiciju u staklenik i laboratorij) uz godišnju investiciju u proizvodnju od približno 22.000 \$ ha⁻¹.

Tablica 10.13. Priprema i sastav nekoliko hranjivih otopina (*Finck, 1982.*)

Priprema hranjivih otopina	Hoagland 2.	Pennigsfeld	Gericke
	destilirana voda		vodovodna voda
	(mg dm ⁻³)		
KNO ₃	500	426	460
Ca(NO ₃) ₂ × 4 H ₂ O	118	868	-
KH ₂ PO ₄	136	284	105
NH ₄ NO ₃	-	-	105
(NH ₄) ₂ SO ₄	-	10	-
MgSO ₄ × 7 H ₂ O	493	378	216
Mg(NO ₃) ₂ × 6 H ₂ O	-	-	25
CaCO ₃	-	-	(85)
Fe-citrat/Fe-EDTA 20 % Fe	5	-	-
*FeSO ₄ × 7 H ₂ O	-	20	15
MnSO ₄ × 4 H ₂ O	2	5	2
ZnSO ₄ × 7 H ₂ O	0,2	0,04	0,8
CuSO ₄ × 5 H ₂ O	0,08	0,04	0,6
Na ₂ B ₄ O ₇ × 10 H ₂ O	2	10	1,7
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	0,1	-	-
Sastav hranjivih otopina (ppm ili mg dm ⁻³)			
N	212	192	93
P	32	64	24
K	234	248	210
Ca	200	178	34
Mg	48	37	24
Fe	1*	4	3
Mn	0,5	1,2	0,5
Zn	0,05	0,01	0,2
Cu	0,02	0,01	0,15
B	0,5	1	0,2
Mo	0,01	-	-
Početni pH otopine	4,5	5,5	5,5
Koncentracija soli %	1,7	2,0	0,9
Prva hranjiva otopina se zbog prilagođavanja biljaka priprema s 1/2 navedene koncentracije, a zatim se nastavlja s punom koncentracijom hrana.			
*Željezo se zbog problema s precipitacijom ponovljeno dodaje svaka tri dana, a od 1950. kao EDTA (etilendiamintetraoctena kiselina).			

Agregirani hidroponik sustavi podrazumijevaju približno 20-litarske plastične kontejnere (UV rezistentan PVC) napunjene nekim inertnim medijem visokog retencijskog kapaciteta za vodu, npr. kamenom vunom ili nekim drugim medijem koji pruža dobar oslonac korijenu, a mogu imati otvorenu ili zatvorenu cirkulaciju hranjive otopine. Kontejner se koristi 2 godine, nakon toga se mijenja ili se sterilizira kamena vuna, odnosno vermikulit, perlit ili njihova kombinacija. Kod otvorenih sustava primjenjuje se kapanje te je dnevno potrebno po kontejneru oko 2 dm³ hranjive otopine. Sustav je pogodan za uzgoj rajčica i krastavaca. Veći proizvođači koriste kamenu vunu (oko 96 % pora) u većim, otvorenim sustavima na crnoj PVC foliji.

Tablica 10.14. Priprema hranjive otopine za hidroponski uzgoj rajčice i krastavaca

Kemijski spoj	Otopina za rajčice				Otopina za krastavce			
	A		B		A		B	
	Od sadnje do prvih plodova		Od prvog ploda do kraja uzgoja		Od sadnje do prvih plodova		Od prvog ploda do kraja uzgoja	
	ppm	g m ⁻³	ppm	g m ⁻³	ppm	g m ⁻³	ppm	g m ⁻³
MgSO ₄ × 7 H ₂ O	Mg 50	500	Mg 50	500	Mg 50	500	Mg 50	500
KH ₂ PO ₄	K 77	270	K 77	270	K 77	270	K 77	270
0 : 22,5 : 28,0	P 62		P 62		P 62		P 62	
KNO ₃	K 77	200	K 77	200	K 77	200	K 77	200
13,75 : 0 : 36,9	N 28		N 28		N 28		N 28	
K ₂ SO ₄ * ili KCl 0 : 0 : 43,3	K 45	100	K 45	100	K 45	100	K 45	100
Ca(NO ₃) ₂	N 85	500	N 116	680	N 116	680	N 232	1357
15,5 : 0 : 0	Ca 122		Ca 165		Ca 165		Ca 330	
Fe-kelat ** ili Fe 330	Fe 2,5	25	Fe 2,5	25	Fe 2,5	25	Fe 2,5	25
Mikrohraniva***	-	150 ml	-	150 ml	-	150 ml	-	150 ml

* uporaba K₂SO₄ je opcija

** može biti dodano do 5 ppm Fe

*** vidi tablicu 10.15.

Za NFT i agregirane hidroponik sustave koriste se najčešće hranjive otopine po *Hoaglandu, Johnsonu, Jensenu, Larsenu* i *Cooperu* različitog N : K omjera (jer biljke ovisno o svojoj fotoperiodičkoj duljini dana zahtijevaju različitu količinu N, odnosno veći su im zahtjevi kod dužeg dana, više svjetlosti i više temperature). Kod zatvorenih sustava (NFT) potrebno je napraviti kemijsku analizu otopine na makroelemente svaka 2-3 tjedna, a na mikroelemente svakih 4-6 tjedana. Mjerenjem električne provodljivosti ili elektrokonduktiviteta (EC) otopine platinskom elektrodom moguće je utvrditi njezinu "iscrpljenost", a normalna vrijednost je 1 dS m⁻¹ (*deci Simens* po metru ekvivalentno je starijoj jedinici

mmho po cm). Dozvoljen je salinitet 0-2 dS m⁻¹, jer redukcija prinosa kod osjetljivih biljaka nastaje tek kad je EC = 2-4 dS m⁻¹, dok kod tolerantnih prinosa pada kad je EC između 4 i 8 dS m⁻¹. Osmotska vrijednost otopine i ukupne soli (*TDS = Total Dissolved Salts*) mogu se proračunati jednostavnim izrazima iz mjerenja elektrokonduktiviteta (EC):

$$\begin{aligned} \text{Osmotski tlak}_{\text{bar}} &= 0,36 \times \text{EC}_{\text{dS m}^{-1}} \\ \text{TDS}_{\text{mg dm}^{-3}} &= 560 \times \text{EC}_{\text{dS m}^{-1}} \end{aligned}$$

Hranjiva otopina za otvorene i zatvorene hidroponik sustave za uzgoj rajčice i krastavaca može se prirediti od mineralnih gnojiva i kemikalija za tehničku uporabu prema tablicama 10.14. i 10.15.

Tablica 10.15. Priprema otopine mikroelemenata za hidroponski uzgoj rajčice i krastavaca

Kemijski spoj	Element	ppm	g 450 ml ⁻¹
H ₃ BO ₃	B	0,44	7,50
MnCl ₂ × 4 H ₂ O	Mn	0,62	6,75
CuCl ₂ × 2 H ₂ O	Cu	0,05	0,37
MoO ₃	Mo	0,03	0,15
ZnSO ₄ × 7 H ₂ O	Zn	0,09	1,18

10.12. KONDICIONERI TLA

Pored klasičnih načina popravljivanja kakvoće tla, odnosno otklanjanja čimbenika neplodnosti (kalcizacija, humizacija, meliorativna gnojidba, meliorativna obrada tla i dr.), sve češće se za popravak strukture, ali i toplinskih svojstava, izmjenjivačkog kapaciteta te vlaženja tla, primjenjuju kondicioneri tla. To su organske i anorganske prirodne tvari ili pak sintetski proizvodi. Uglavnom se koriste u vrlo intenzivnoj i profitabilnoj proizvodnji (cvijeće, povrće) zbog skupoće. Dijele se uobičajeno na:

- tvari za povećanje hidrofilnosti tla (npr. poliakrilamid-PAM),
- tvari za povećanje hidrofobnosti tla (npr. bitumenske emulzije),
- tvari za povećanje temperature površine tla (npr. malč s bitumenoznim emulzijama),
- tvari za sprječavanje zbijanja tla, poboljšanje drenaže i aeracije,
- tvari za stabilizaciju strukture po dubini profila i lakše prodiranje korijena (npr. anorganski kondicioneri na temelju Fe, perlita i dr.) i

- tvori za povećanje kapaciteta izmjenjivačkog kompleksa tla (emulzije sa svojstvima jakih kiselina, zeoliti, glina, pa i čisti bentonit i vermikulit, lignitna prašina itd.).

U RH kakvoća poboljšivača tla (i gnojiva) regulirana je posebnim Zakonom o gnojivima i poboljšivačima tla (NN 163/03).

Aluminijev sulfat - koristi se za zakiseljavanje alkalnih tala (i kao koagulant u bazenima za plivanje).

Lumbripost (vermikompost, orbig) - organski proizvod dobiven upotrebom gujavica iz organskih otpadaka, najčešće stajnjaka. Koristi se općenito za povećanje plodnosti, a najbolje rezultate daje u uzgoju lončanica. Djeluje na poboljšanje strukture (rastresitost, bolja retencija vode), povećanje opće mikrobiološke aktivnosti tla i aktivaciju nepristupačnih hraniva u tlu.

Ugljena prašina - koriste se čestice promjera 0,15-1,25 mm za odstranjivanje različitih onečišćivača tla i vode (toksične tvari, boje, mirisi, kiseline, soli itd.).

Gips (CaSO_4) - koristi se kao sulfatno sredstvo za kalcizaciju bez podizanja pH-vrijednosti (često se koristi i *kalcijev polisulfid*). Neutralizira alkalnost tla izazvanu suviškom natrija (posebice Na_2CO_3), poboljšava strukturu (aeraciju i upijanje vode) jer uklanja natrij i zamjenjuje ga s kalcijem na adsorpcijskom kompleksu. Koristi se i kao umjereni zakiseljavač tla. Vapno ni u kom slučaju ne treba primjenjivati za uklanjanje natrija iz alkalnih tala jer mu je topljivost iznad pH 7 neznatna (~ 100 puta manja u odnosu prema gipsu) te još više podiže ionako visoku pH-vrijednost tla. Primjenu gipsa dobro je kombinirati s organskom i/ili zelenom gnojivom uz obvezno zaoravanje žetvenih ostataka radi popravke strukture i poroznosti alkalnih tala čime se pospješuje bolje ispiranje natrija. Duboka obrada uz primjenu gipsa često može izazvati još jaču disperziju čestica tla, stoga je način obrade, posebice duboke, dobro testirati na manjoj površini.

Glaukonit - prirodni sekundarni mineral prožet Fe-K-silikatima koji sadrži 6-7 % K, ali i 30-ak različitih elemenata. Koristi se kao kondicioner sa sporodjelujućim gnojidbenim učinkom kalija.

Hortikulturni pijesak - čisti, kremeniti (kvarcni) i sterilizirani pijesak koji se miješa s tlom za lončanice radi bolje aeracije i drenaže, obvezatno za sukulente i kaktuse.

Željezni sulfat (zelena galica, $\text{FeSO}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$) - sadrži do 20 % Fe i 11,5 % S. Koristi se kod nedostatka željeza (uklanja Fe-klorozu) i kao umjereno sredstvo za zakiseljavanje karbonatnih i neutralnih tala. Također, moguće je popraviti alkalna tla dodavanjem kiselih željeznih minerala kao što je pirit.

Komposti - pored fertilizacijske funkcije imaju i ulogu kondicionera tla s jakim djelovanjem na strukturu (aeraciju i retenciju vode), boju tla i povećanje biogenosti tla.

Kalcijev karbonat (CaCO_3) - koristi se za kalcizaciju (neutralizaciju kiselosti), ali u tlu djeluje i kao poboljšivač strukture tla (vidi poglavlje Makroelementi, kalcij).

Karbokalk (saturacijski mulj) - nusproizvod u proizvodnji šećera. Izvrstan kalcizacijski materijal za neutralizaciju kiselosti, sitne kristalinične strukture i stoga brzog djelovanja. Uvođenje sustava kontrole plodnosti na području Osječko-baranjske županije omogućilo je uvid u potrebe kalcizacije naših tala, a saturacijski mulj predstavlja izvrstan materijal za tu namjenu. Primjena Karbokalka za kalcizaciju kiselih tala na temelju kemijske analize tla, s jedne strane rješava problem zbrinjavanja saturacijskog mulja, a s druge podiže plodnost tla, povećava efikasnost gnojidbe i otklanja negativne efekte kiselosti tla. Karbokalk Tvornice šećera Osijek sadrži oko 30 % Ca ili 75 % CaCO_3 i ne treba ga za usjeve koristiti u dozi većoj od 10 t ha^{-1} .

Treset - koristi se sušeni prirodni, komprimirani, više ili manje razloženi (vlaknast) i preparirani (kemijski obrađen s različitim mineralnim dodacima) za posebne namjene. Treset povećava retenciju vode u tlu (5-15 puta na unesenu masu), čini tlo rahlim, toplijim (zbog velike količine organske tvari i povećanog kapaciteta za zrak uz tamniju boju). Često mu se dodaje CaCO_3 za smanjivanje kiselosti tla, perlit ili vermikuliti za povećanje adsorpcijskih svojstava i vezivanje mineralnih oblika hraniva u raspoloživom obliku.

Perlit - krut, svijetli sitnozrnati materijal (izgledom sličan vermikulitu) velike unutrašnje apsorpcijske površine, vulkanskog podrijetla (nastao na temperaturi oko $980 \text{ }^\circ\text{C}$), lagan, neutralne reakcije i sterilan. Primjenjuje se za poboljšavanje strukture (aeracije i vododrživosti tla), povećanja sorpcijskih svojstava, bolju drenažu i smanjivanje volumne gustoće tla.

Sumpor - koristi se za zakiseljavanje i *flokulaciju tla* (slično gipsu) čime se postiže bolja struktura tla (aeracija i vododrživost). Sumpor djeluje toksično na biljke i koristi se do 50 g m^{-2} najmanje 8 tjedana prije sadnje ili sjetve.

Vermikulit - ekstremno lagani, granularni prirodni sekundarni mineral, velike unutrašnje apsorpcijske moći, promjera čestica oko $0,15 \text{ mm}$. Sadrži malo kalija, kalcija i magnezija, a koristi se kao "nosač" mineralnih oblika hraniva koje postupno otpušta te čini tlo rahlim i lakšim povećavajući mu kapacitet za zrak i vodu.

Vodeni zemljišni kristali (*AgrosokeTM, Water Gels, P-4, Water-Grabber, TerraCottem, Aquagel i dr.*) - tvar koja se može okarakterizirati kao izvrsni apsorbirajući hidrogelni kristali (apsorbira do 500 puta veću količinu vode od svoje težine u 30 minuta). Aditiv je bezbojan ili svijetle boje, proziran, polimer koji nije toksičan ni biorazgradljiv, ima neutralnu pH-vrijednost, a vijek trajanja u tlu je oko 5 godina. Primjenjuje se najčešće u kontejnerima gdje učinkovito zadržava vlagu tla uz približno 50 % smanjenja potrebe za vodom.

Zeoliti - od kondicionera u posljednje vrijeme sve se više u stakleničkoj ishrani bilja koriste *zeoliti*, prirodni porozni minerali vrlo velikog ionoizmjenjivačkog kapaciteta. Dušična gnojiva sa zeolitima imaju izrazit produženi efekt, dušik se može visoko dozirati bez opasnosti od ispiranja i onečišćavanja okoline. Također, primijenjeni s fosfornim gnojivima zeoliti sprječavaju retrogradaciju i znatno povećavaju njihovu efikasnost. Mikrognojiva sa zeolitima su vrlo efikasna jer se tako postiže "sporotekući" izvor, odnosno otpuštanje mikroelemenata bez toksičnih efekata i s dugim djelovanjem.

Malčevi - malčevi se također mogu smatrati kondicionerima tla jer mijenjaju zemljišne uvjete u različitim vrstama biljne proizvodnje. Posebice se koriste u povrćarstvu, voćarstvu i sličnim "malim" proizvodnjama, a mnogo manje u ratarstvu. Koriste se različiti organski i anorganski malčevi čija funkcija je vrlo značajna, ponekad i dekorativna. Naime, malčevi povećavaju retenciju vode, štite tlo od isušivanja, zasjenjuju i zadržavaju rast korova, privlače zemljišne crve, povećavaju temperaturu tla u hladnijem periodu vegetacije i štite nagnuta tla od erozije i sl.

Malčevi od prirodnog materijala, osim funkcije prekrivanja tla, razgradnjom oslobađaju hraniva, posebno dušik. Od prirodnih malčeva koriste se vrlo različiti materijali, npr. slama žitarica, sijeno, kora drveta, različiti organski otpaci kao što je lišće i sl. Od anorganskih malčeva najčešće se koriste sintetske folije koje mogu biti crne, dekorativno obojene, prozirne, fotorazgradive, različitog sastava (PVC, polietilen, poliester), permeabilne ili potpuno nepropustljive za vodu i plinove, već prema namjeni. Od anorganskih malčeva mogu se koristiti i mljeveni minerali (granit, vulkanske stijene, šljunak i sl.), najčešće kao dekorativni malčevi u hortikulturi.

10.13. ANTITRANSPIRANTI (ANTIDESIKANTI)

Antitranspiranti su sintetski ili prirodni proizvodi. Dobivaju se iz prirodnih uljnih emulzija (npr. crnogorice) ili drugih biorazgradivih polimera u obliku koncentrata, aerosola ili otopine pripremljene za prskanje. Netoksični su, a neki sadrže spojeve koji izazivaju zatvaranje puči. Također, to mogu biti prašci i drugi spojevi koji stvaraju tanku, reflektirajuću opnu i na taj način smanjuju temperaturu lista, a propuštaju plinove i vodu.

Koriste se prskanjem ukrasnog bilja, posebice zimzelenog (npr. božično drveće) radi sprječavanja pretjeranog gubitka vode nakon presađivanja, tijekom transporta, zimi i tijekom skladištenja *dormantnih* gomolja, lukovica i dijelova korijena. Male biljke mogu se tretirati uranjanjem u otopinu. Također su učinkoviti protiv isušivanja uslijed vjetra ili djelovanja drugih čimbenika. Nakon

tretiranja bilja antitranspiranti djeluju nekoliko mjeseci. Koriste se i preventivno protiv fitoparazitskih gljivica na jednogodišnjim biljkama.

10.14. BIOLOŠKA GNOJIVA, BIOLOŠKI AGENSI I MIKORIZA

Biološka gnojiva, uključujući *mikorize*, vrlo su važan aspekt gnojidbe, posebice u ekološkoj proizvodnji hrane, *revitalizaciji* (*restoraciji*, *revegetaciji*) devastiranih i oštećenih površina (nakon obimnih zemljanih radova u eksploataciji mineralnih sirovina, zaštiti deponija industrijskog (deponije fosfogipsa, saturacijskog mulja, pepelišta termoelektrana i dr.) i komunalnog otpada i dr. Takva gnojiva sadrže žive organizme kao što su bakterije, mikorizne i saprofitske gljive, paprati (npr. *Azolla pinnata*), plavozelene alge (kao *Anabaena*, *Nostoc* i dr.) i ostali organizmi koji povećavaju mikrobiološku aktivnost u tlu, povećavaju raspoloživost hranjivih tvari u tlu, štite od patogenih organizama, popravljaju strukturu i dr. Često sadrže i organsku komponentu kao supstrat i nosač mikroorganizama. Tablica 10.16. pokazuje prosječnu gustoću populacije mikroorganizama u tlu.

Smatra se da primjena bioloških gnojiva povećava visinu prinosa do 30 % uz istovremeno smanjenje potrebe za mineralnim gnojivima do 25 %.

Biološka se gnojiva i agensi dijele na:

- 1) Dekompozere koji potpomažu razgradnju organske tvari, posebice kod kompostiranja (mezofilni i termofilni organizmi),
- 2) N-fiksirajuće bakterije (slobodnoživući i simbiotski organizmi),
- 3) Poboljšivače raspoloživosti fosfora (PSB) i kalija koji mobiliziraju organske rezerve fosfora kao i anorganske fosfora i kalija,
- 4) Mikorize koje povećavaju apsorpcijsku moć korijena viših biljaka,
- 5) Pesticidne biološke agense (biološki pesticidi) koji povećavaju otpornost biljke domaćina na patogene i štetnike:
 - a) bakterije: *Bacillus thuringiensis*, *Agrobacterium radiobacter*, *Pseudomonas fluorescens* i dr.,
 - b) gljive: *Paecilomyces fumosoroseus*, *Phlebia gigantea*, *Trichoderma harzianum*, *Verticillium lecani* i dr.,
 - c) virusi za kontrolu insekata: Granulovirus za *Adoxophyes orana* i *Cydia pomonella*, Nucleopolyhedrovirus za kontrolu *Helicoverpa armigera* i *Spodoptera exigua* i dr.) i
- 6) Bioremedijacijske agense za:
 - a) detoksikaciju zemljišta (nafta, toksične tvari i elementi i dr.),
 - b) razgradnju organskih tvari (muljeva, gradskog otpada i dr.),
 - c) poboljšivači okoliša ("super bube" i dr.).

Biološka gnojiva nisu opasna za okoliš, ali se u primjeni bioloških agensa moraju poštivati sigurnosni standardi koji se gradiraju u 5 klasa (1. bez rizika ili uz minimalni rizik, 2. potencijalno opasni, 3. posebno opasni koji zahtijevaju specijalan tretman, 4. vrlo opasni jer mogu izazvati epidemije i 5. zabranjeni za uporabu).

Tablica 10.16. Prosječna gustoća populacije i biomasa glavnih grupa mikroorganizama u tlu

Mikroorganizmi	Gustoća populacije			Biomasa	
	$n\ g^{-1}$	$n\ m^{-2}$	$n\ ha^{-1}$	$kg\ ha^{-1}$	% mase
Bakterije	10^8	10^{12}	10^{24}	2.000	0,100
Aktinomicete	10^6	10^8	10^{16}	2.000	0,100
Gljive	10^5	10^5	10^{15}	2.500	0,100
Alge	10^4	10^5	10^{15}	500	0,005
Protozoe	10^4	10^8	10^{14}	150	0,005

10.14.1. Bakterijska gnojiva

U praksi se primjenjuje više vrsta bakterija, a za fiksaciju dušika različiti sojevi nesimbiotskih bakterija kao što su *Acetobacter diazotrophicus*, *Azotobacter chroococcum* i *Azospirillum lipoferrum* i dr. Za poboljšanje raspoloživosti fosfora koriste se (*Phosphate solubilizing bacteria* = PSB) *Bacillus spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Penicilium spp.*, *Aspergillus awamori*, za bolje usvajanje kalija *Bacillus circulans* i dr. Također, sve se više koriste i plavozelene alge.

Od simbiotskih bakterija najčešći su sojevi iz roda *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* i *Sinorhizobium* koji žive u svim tlima od Arktika do tropa u simbiozi s ~ 18.000 različitih mahunarki. Kultivirani sojevi superiorni su autohtonim sojevima i znatno povećavaju biološku fiksaciju dušika, a zamijećena je i veća sinteza *flavonoida* kod mahunarki uz primjenu kultiviranih sojeva. Kao bakterijski nosač najčešće se koriste treset ili humus (i mnogi drugi razgradivi nosači, npr. alge i sl.) koji mogu biti sterilizirani, ali i ne moraju. Nesterilni nosači znatno pojeftinjuju proces proizvodnje *bakterijalnih inokulanata*, ali njihovo djelovanje u tlu je uglavnom kraće. Preživljavanje bakterija unesenih bakterijskim gnojivima ili kao inokulant sjemena leguminoza ovisi o biotskim (predatori, antagonisti, porast korijena i njegove izlučevine i dr.), ali i abiotskim čimbenicima (pH, temperatura, vlaga tla, biogeni elementi i dr.).

Na Poljoprivrednom fakultetu u Osijeku, Zavodu za kemiju, biologiju i fiziku tla, pod vodstvom *prof. dr. Zlate Milaković* od 2011. god proizvodi se *Nitrobakterin^S* koji se primjenjuje za bakterizaciju (inokulaciju) sjemena soje, a sadrži visoko učinkovite sojeve kvržičnih bakterija iz rodova *Rhizobium* i *Bradyrhizobium*.

Formiranje kvržica (nodula) i fiksacija dušika počinje već nakon 2-3 tjedna od sjetve, produžuje se često do zriobe, a N-fiksacija doseže maksimum na koncu cvatnje i s početkom formiranja mahuna. Bakterizacijom sjemena soje smanjuje se potreba N-gnojidbe soje, a dušik treba unijeti samo u količini koja mora zadovoljiti njezine potrebe za početni period vegetacije (40-90 kg dušika po hektaru). Bakterizaciju sjemena soje trebalo bi uvijek provoditi na tlu gdje soja nije uzgajana, ili je prošlo više od tri godine od posljednje sjetve, kad je pH-vrijednost tla ispod 6,0, na laganim tlima ili nakon ležanja vode (poplave, vodom zasićena ili zbijena tla).

10.14.2. Mikoriza

Većina biljaka udružuje se s mikoriznim gljivama te one u prirodnim ekosustavima (djevičanska tla) čine do 70 % biomase tla, a njihov odnos označava se kao *mutualizam* (simbiotski; jer gljiva koristi fotosintetske produkte biljke, a zauzvrat pomaže usvajanje mineralnih tvari iz tla, ponekad i vodu). Mikorizne gljive svojevrsan su "*interface*" između korijena i tla koji mobilizira i prikuplja hraniva iz rizosfere, prenosi ih u korijen te dramatično povećava volumen tla iz kojeg korijen može crpiti hraniva. Istraživanja pokazuju kako u poljoprivrednim tlima može biti do 50 hifa AM gljiva po gramu tla čiji domet (od korijena) može biti veći od 9 cm.

Infektivna rizosferna mikroflora dijeli se na *endomikorizu* (AM = *arbuscular mycorrhiza*) koja inficira koru korijena i micelij gljive se pruža izvan kore u tlo te *ektomikorizu*. Dakle, postoje dvije glavne vrste mikorize:

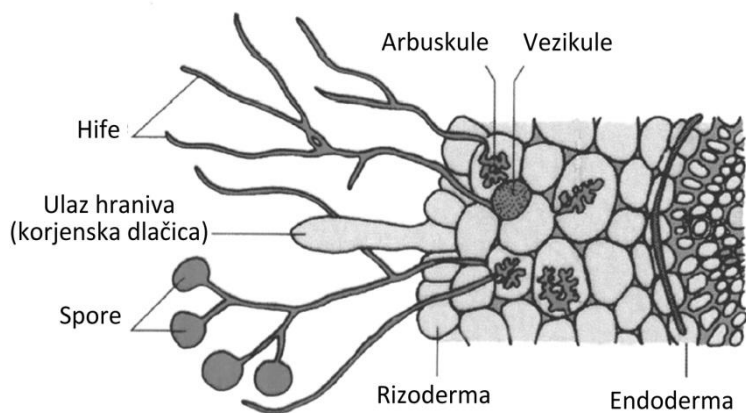
- Ektomikorizne gljive (Bazidiomicete, EM) i
- Endomikorizne gljive (*arbuscularne Zigomicete*, odnosno AM i vezikularno arbuskularne mikorizne, odnosno AM).

Dakle, obje vrste mikoriznih gljiva prodiru u korijen, ali ektomikorizne imaju hife između korijenskih stanica, dok endomikorizne hifama prodiru u stanice korijena (slika 10.5.). Ektomikorize su česte kod drveća (bor, hrast i bukva), ali i drugih biljaka, dok su endomikorize češće na korijenu povrća, grmlja, drveća, trava, ali i mnogih drugih biljaka.

Korijenje inficirano endomikoriznim gljivama puno bolje usvaja vodu, fosfor (do 60 %), cink (do 40 %) i bakar, ali i druge elemente, posredno preko intenzivnijeg metabolizma korijena ili neposredno kroz *hife* gljiva. Kod ektomikorize hife gljiva izvana penetriraju u intercelularne prostore kore korijena i grade *mrežu micelija* u njoj. Ekskrecijom u vanjsku sredinu, posebno oksalne kiseline, ektomikorizne gljive utječu na povećanu raspoloživost P, Ca, Fe, Cu i drugih elemenata ishrane,

a lučenjem enzima *celulolaza* i *proteolaza* utječu na bržu mineralizaciju organske tvari tla i veće usvajanje dušika.

EM gljive (ektomikorizne) su obično specifične za određenu vrstu domaćina, a AM (endomikorizne) će uspostaviti odnos s većinom biljaka domaćina. Međutim, poznato je kako biljke iz porodica poznatih korova (*Amaranthaceae*, *Brassicaceae*, *Chenopodiaceae* i *Zygophyllaceae*) nemaju mikorize što može inhibirati rast poželjnih vrsta i omogućiti brži porast nepoželjnih vrsta.



Slika 10.5. Endomikoriza

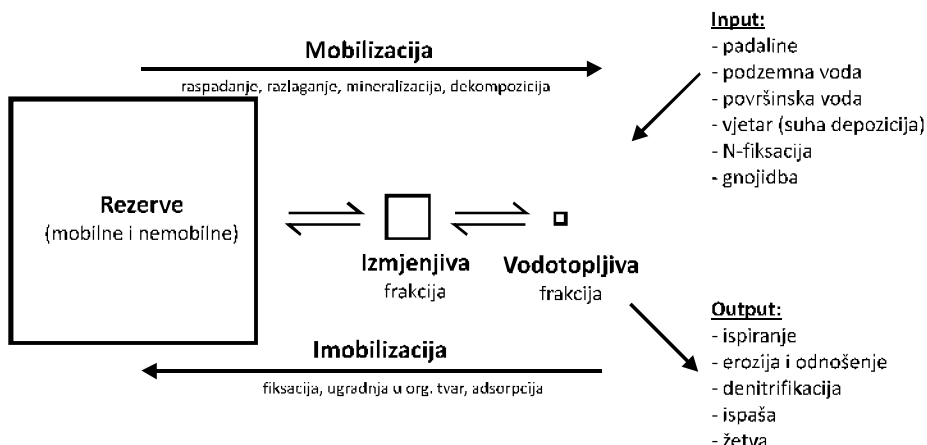
Vrlo korisno svojstvo AM mikorize je sposobnost transporta hraniva s velike udaljenosti, posebice teško pokretnih hraniva, npr. fosfora. Također, grade svojevrsni obrambeni štit korijena za štetočine, a utječu i na poboljšanje strukture (ljepljivi spojevi pod nazivom *glomalin* ugljikohidratne osnove), odnosno poboljšavaju vodnozračni režim u tlu.

11. UTVRĐIVANJE POTREBE U GNOJIDBI

Gnojidba osigurava poljoprivrednim usjevima ishranu biogenim elementima, kojih u tlu nema dovoljno, za postizanje visokih i stabilnih priroda. Dakle, gnojidba je agrotehnička mjera koja povećava produktivnost tla i uloženog rada u poljoprivrednoj proizvodnji.

U sastav biljaka ulazi čitav niz elemenata koje biljke usvajaju iz tla ili atmosfere. Neki od neophodnih elemenata, posebice dušik, fosfor i kalij, potrebni su u velikim količinama i obvezno se dodaju u tlo gnojidbom. Mnogi elementi vraćaju se prirodnim putem u tlo. Međutim, znatan dio se odnosi žetvom, jedan dio se ispire ili prelazi u nepristupačne oblike za biljke. Ako se tako izgubljeni dio hraniva ne nadoknađuje, tlo siromaši i prirod opada. Iz ukupnih rezervi jedan dio se neprekidno mijenja u kemijske oblike povoljne za ishranu bilja, ali se taj proces odvija uglavnom sporije od gubitaka pa se gnojidba javlja kao jedan od najvažnijih agrotehničkih zahvata za osiguranje visokih i stabilnih priroda uz očuvanje efektivne plodnosti tla.

Poznavanje raspoložive količine hraniva u tlu i potrebe biljaka za elementima ishrane omogućuje dobru procjenu doze gnojiva uz prihvatljiv rizik od ekološkog "opterećenja" okoliša. Tlo sadrži vrlo veliku količinu, biljkama uglavnom nepristupačnih, hraniva (slika 11.1.). Raspoloživa su samo ona hraniva u tlu koja se nalaze ili mogu prijeći u kemijski oblik koji biljke mogu usvojiti i moraju se nalaziti u zoni korijenovog sustava. Stoga se razlikuje *kemijska* i *fizička pristupačnost* hraniva ili, zajedno, *biološka raspoloživost hraniva* (bioraspoloživost, rječnikom poljoprivredne struke samo *raspoloživost*).



Slika 11.1. Podjela hraniva u tlu prema njihovoj bioraspoloživosti

U cilju utvrđivanja raspoloživosti hraniva koristi se čitav niz različitih metoda kao što su kemijska analiza tla i biljaka, mikrobiološke metode, poljski pokusi, pokusi

u nadziranim uvjetima i druge metode. Potrebno je naglasiti kako svaka metoda potpuno ili djelomično isključuje subjektivnu procjenu i proizvoljnost te uvodi sustav (otklanja proizvoljnost) u utvrđivanju potreba za gnojidbom preko praćenja intenziteta pojedinih indikatora efektivne plodnosti tla.

Određivanje doze gnojiva, njegove vrste i kemijskog oblika hraniva, vremena primjene i načina gnojidbe mora se temeljiti na znanstveno-stručnim spoznajama o raspoloživosti i odnosima hraniva u tlu, fiziološkim potrebama biljke, ekonomičnosti proizvodnje te intenzitetu i smjeru utjecaja pojedinog agroekološkog čimbenika.

Temeljna načela, prema suvremenom konceptu gnojidbe, mogu se vrlo jednostavno i razumljivo formulirati:

- Primjena potrebnog hraniva,
- i njegove adekvatne doze,
- u pravo vrijeme,
- na pravo mjesto i
- uz pravu cijenu.

Često se u suvremenom svijetu i uz sve veći pritisak alternativnih načina proizvodnje hrane postavlja jednostavno pitanje: Zašto se koriste gnojiva? Na to pitanje može se jednostavno odgovoriti:

- Uporaba gnojiva je neophodna radi postizanja visokih prinosa te isplativosti rada i ulaganja u biljnu proizvodnju.
- Moderna gnojidba temelji se na kemijskom konceptu ishrane bilja i značajno utječe na povećanje poljoprivredne produkcije uz bolju kvalitetu hrane.
- Povoljni nuzgredni efekt gnojidbe je povećanje plodnosti tla što rezultira visokim i stabilnim prinosima, većom otpornošću na bolesti i klimatske stresove.

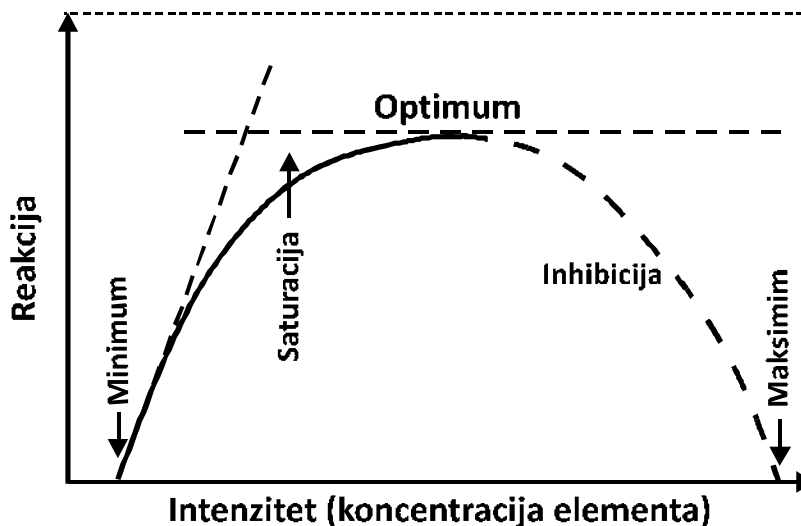
Svrha gnojidbe može se sažeti u nekoliko činjenica:

- dodatak i nadoknada prirodnom izvoru hraniva kako bi se zadovoljile potrebe biljaka za ostvarenje visokih prinosa;
- kompenzacija gubitka i odnošenja hraniva iz tla;
- poboljšanje nepovoljnih svojstava tla.

Stoga je problematika gnojidbe vrlo kompleksna te suvremena ishrana bilja zahtijeva puno više odgovora od primjene i tumačenja rezultata neke od metoda analize tla što je tek prvi korak u efikasnoj, ekonomskoj i ekološki prihvatljivoj gnojidbi. Naime, suvremeni trendovi (nova filozofija gnojidbe) pokušavaju zamijeniti visoko intenzivnu proizvodnju hrane visoko učinkovitim sustavom. Takav kvalitativan pomak u proizvodnji hrane zahtijeva od analize tla odgovore na sljedeća pitanja:

- Kolika je stvarno raspoloživa količina hraniva u tlu?

- Kojom brzinom se količina raspoloživih hraniva mijenja tijekom vegetacije zbog usvajanja, ispiranja, promjene oblika?
- Koliko je potrebno unijeti hraniva u tlo gnojidbom da bi se njihova raspoloživa količina povećala do tražene vrijednosti?



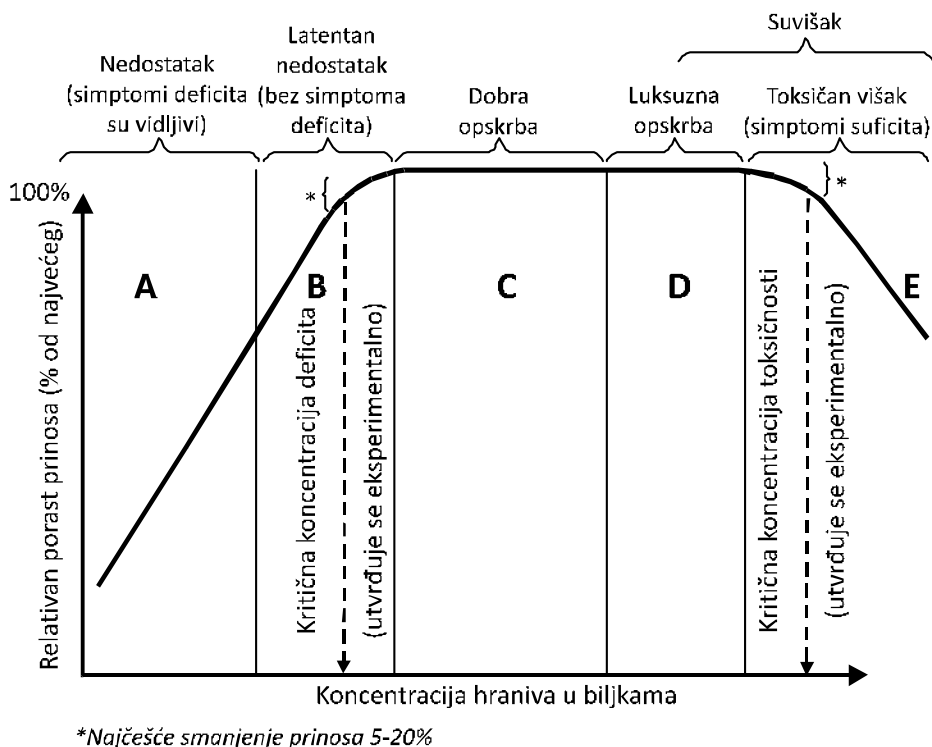
Slika 11.2. Reakcija biljaka na vanjske čimbenike (kardinalne točke)

Primjena ekstraktivnih kemijskih metoda analize tla, kao mjerila potrebe u gnojidbi, zbog gore navedenih zahtjeva, zahtijeva kalibraciju za svako agroekološko područje i način biljne proizvodnje, jer se u praksi često događa da između ocjene opskrbljenosti tla i reakcije biljaka na primijenjenu gnojidbu nema čvrste veze. Naravno, to ne znači da je rezultat kemijske analize tla loš, već uglavnom nije dobro protumačen. Stoga je zadatak kalibracije odrediti što za biljku znači utvrđeni sadržaj hraniva nekom od kemijskih ekstraktivnih metoda, ovisno o svojstvima tla i uzgajanoj biljnoj vrsti. Rezultat analize ne govori puno ako kemijska ekstraktivna metoda nije kalibrirana, odnosno "prevedena" na jezik preporuke za gnojidbu pa se kalibracija općenito svodi na utvrđivanje granica raspoloživosti nekog hraniva u tri ili više klasa opskrbljenosti. Dakle, rezultati analize tla moraju upućivati na djelovanje gnojiva, stoga se u tom smislu razlikuju:

- siromašna,
- srednje i
- dobro opskrbljena tla.

Klasifikacija opskrbljenosti tala podudara se sa specifičnom reakcijom biljaka (slika 11.2.), odnosno porastom intenziteta čimbenika rasta (ovdje hraniva) raste prirod, ali samo do određene mjere, nakon čega opada. Stoga se kod djelovanja svih čimbenika razlikuju kardinalne točke: *minimum*, *optimum* i *maksimum*.

Za utvrđivanje potrebe u gnojidbi koriste se adekvatne krivulje ovisnosti prinosa (rasta) o sadržaju elemenata u biljkama te detaljnija klasifikacija opskrbljenosti biljaka hranjivim elementima (slika 11.3.). Krivulje se (*skor funkcije*, slika 11.4.) konstruiraju za svaki element ishrane na temelju velikog broja eksperimentalnih ili proizvodnih rezultata, za različite agroekološke uvjete i na njima se ističu dvije kardinalne točke - *kritičan sadržaj (razina) nedostatka* i *kritičan sadržaj (razina) suviška* nekog elementa. U praksi, razmak između kritičnih točaka obuhvaća 90-95 % svih slučajeva (slika 11.3.).



Slika 11.3. Prikaz klasifikacije statusa hranjivih elemenata u tlu (*Plant Analysis: An Interpretation Manual*, 1997, Collingwood, Australia)

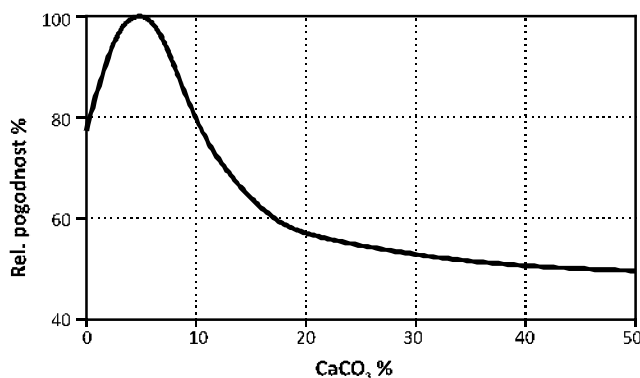
Kardinalne točke, odnosno granice kritične opskrbljenosti elementima ishrane, imaju samo fiziološko značenje, jer biljke koje imaju koncentraciju elemenata blizu ili izvan tih granica, imaju ozbiljne probleme u rastu što sigurno rezultira vrlo niskim prinosima uz nisku kakvoću proizvoda. Stoga se za potrebe utvrđivanja gnojidbe eksperimentalno pronalaze adekvatne granične vrijednosti, sve češće uz složenu kompjutorsku matematičko-statističku analizu i kreiranje nelinearnih skor funkcija, koje determiniraju područje raspoloživosti pojedinih hraniva unutar kojih ne dolazi do značajnog pada ili variranja prinosa. Npr., za mikroelemente granične vrijednosti prinosa su uske (vidi poglavlje 7.

Mikroelementi, slika 7.1.) i imaju približno faktor 2 prema kritičnom sadržaju elemenata. U tablici 11.1. prikazane su granične vrijednosti za neke usjeve.

Tablica 11.1. Granične vrijednosti važnijih usjeva (*Bergman, 1988. i 1992.*)

Biljni organ	% u suhoj tvari					ppm u suhoj tvari				
	N	P	K	Ca	Mg	B	Mo	Mn	Zn	Cu
Oz. pšenica (izd. 5-8 cm)	3,0-5,0	0,30-0,6	3,5-5,5	0,40-1,0	0,2-0,35	6-12	0,1-0,3	40-150	25-70	7-15
Jara pšenica (izd. 5-8 cm)	4,0-5,5	0,30-0,6	3,3-4,5	0,40-1,0	0,2-0,35	6-12	0,1-0,3	40-150	25-70	7-15
Oz. ječam (izd. 5-8 cm)	2,5-5,0	0,30-0,6	3,5-5,0	0,30-1,0	0,15-0,3	6-12	0,1-0,3	30-150	20-60	6-12
Jari ječam (izd. 5-8 cm)	2,8-5,0	0,35-0,6	3,0-5,5	0,50-1,0	0,15-0,3	6-12	0,1-0,3	30-150	20-60	6-12
Raž (izdanak 5-8 cm)	2,5-5,0	0,30-0,6	2,8-4,5	0,35-1,0	0,15-0,3	5-10	0,1-0,3	25-150	20-60	6-12
Zob (izdanak 5-8 cm)	3,0-5,0	0,35-0,6	4,5-5,8	0,50-1,0	0,20-0,4	6-12	0,2-0,4	40-150	25-70	6-12
Kukuruz (zreli list)	3,5-5,0	0,35-0,6	3,0-4,5	0,30-1,0	0,25-0,6	7-15	0,2-0,5	40-150	30-70	7-15
Suncokret (zreli list)	3,0-5,0	0,25-0,5	3,0-4,5	0,80-2,0	0,30-0,8	35-100	0,3-1,0	25-100	30-80	10-20
Soja (zreli list)	4,5-5,5	0,35-0,6	2,5-3,7	0,60-1,5	0,30-0,7	25-60	0,5-1,0	30-150	25-60	10-20
Šeć. repa (zreli list)	3,0-4,5	0,30-0,5	2,9-3,8	0,40-1,0	0,15-0,3	5-10	0,1-0,3	30-100	20-70	5-10
Lucerna (vršni dio)	3,5-5,0	0,30-0,6	2,5-3,8	1,00-2,5	0,30-0,8	35-80	0,5-0,2	30-150	25-70	6-15

Primjena kemijskih analiza tla pretpostavlja utvrđivanje i poznavanje graničnih vrijednosti pojedinih razina raspoloživosti hraniva. Tu nastaje veliki broj problema i nejasnoća jer opskrbljenost tla hranivima ovisi o velikom broju čimbenika (bioloških, kemijskih i fizičkih) čiji utjecaj na stanje raspoloživosti hraniva nije još dovoljno poznat. Stoga se rezultati kemijske analize tla tumače posredno pomoću klasa opskrbljenosti ili skor funkcija, uz približno predviđanje djelovanja gnojidbe, pa je stanje hraniva u tlu potrebno procjenjivati svakih nekoliko godina.



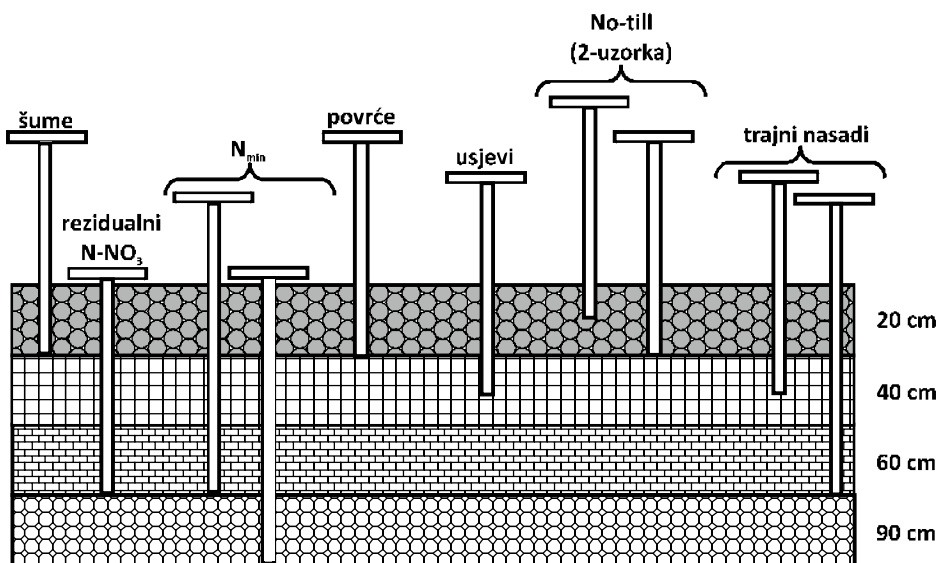
Slika 11.4. Primjer skor funkcije za karbonate u vinogorjima

Granične vrijednosti treba shvatiti kao referentne vrijednosti koje za različite produkcijske sustave (šume, travnjaci, usjevi, trajni nasadi, povrće i dr.) imaju samo orijentacijsku vrijednost u procjeni kapaciteta produkcije, s obzirom na primijenjenu razinu i tip (intenzitet agrotehnike) proizvodnje, agroekološke, ekonomske i druge uvjete. U Ishrani bilja i Fertilizaciji uglavnom se ograničavamo samo na procjenu efektivne plodnosti, a da pri tome ne uzimamo u obzir i ostale aspekte produktivnosti zemljišta koji su često jednako važni. Dakle, referentne vrijednosti su na neki način standard s primjenom za

specifične i konkretne uvjete proizvodnje (slika 11.6.), a to isključuje „šablonizirane recepture“ gnojidbe kojima se generalno i netočno utvrđuje potreba za gnojidbom.

Bez analize tla ne mogu se točno kvantificirati indikatori plodnosti tla, promjena njihovog intenziteta u vremenu s obzirom na agroekološke i druge uvjete proizvodnje, niti se mogu determinirati granične vrijednosti (kardinalne točke raspoloživosti hraniva), a te vrijednosti su temelj dobre procjene moguće visine prinosa i potrebe za hranivima.

Razumljivo je da se za šume koristi prirodni (inherentni) potencijal produkcije zemljišta, dok se za poljoprivredne potrebe, ovisno o funkcionalnoj razini određenog zemljišta, potencijal produkcije "podize" pomoću agrotehnike do razine koja će opravdati ulaganje i omogućiti profit konkretne proizvodnje.

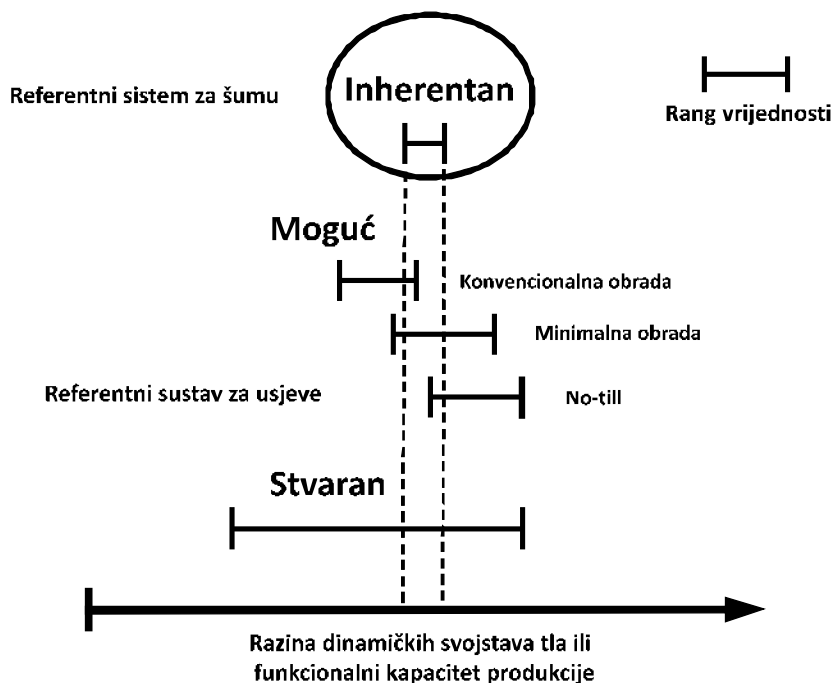


Slika 11.5. Dubine sondiranja za kemijsku analizu tla

Kemijska analiza tla predstavlja ključ za dobivanje visokih priroda uz racionalnu primjenu gnojiva. U tom smislu razvijeni *sustav kontrole plodnosti tla* podrazumijeva sustavno prikupljanje svih relevantnih fizikalno-kemijskih podataka o tlu (uključujući klimu) i njegovom korištenju, doprinosi boljoj raspodjeli mineralnih i organskih gnojiva, uklanjanju akutnih deficita hraniva, kemijskoj i fizikalnoj popravci tla, ekonomičnijoj proizvodnji, odnosno očuvanju i podizanju efektivne plodnosti tla čime su prirodi viši i stabilniji te manje podložni promjeni uslijed različitih vremenskih prilika.

Uzorke tla za kemijsku analizu potrebno je uzeti tako da prosječan uzorak dobro reprezentira proizvodnu površinu (parcelu), pazeći da se proporcionalno obuhvate manje nehomogenosti, a kod većih (razlika u boji, izgledu, nagibu itd.) moraju se uzeti posebni uzorci tla. Dubina uzorkovanja ovisi o tipu uzgoja (slika

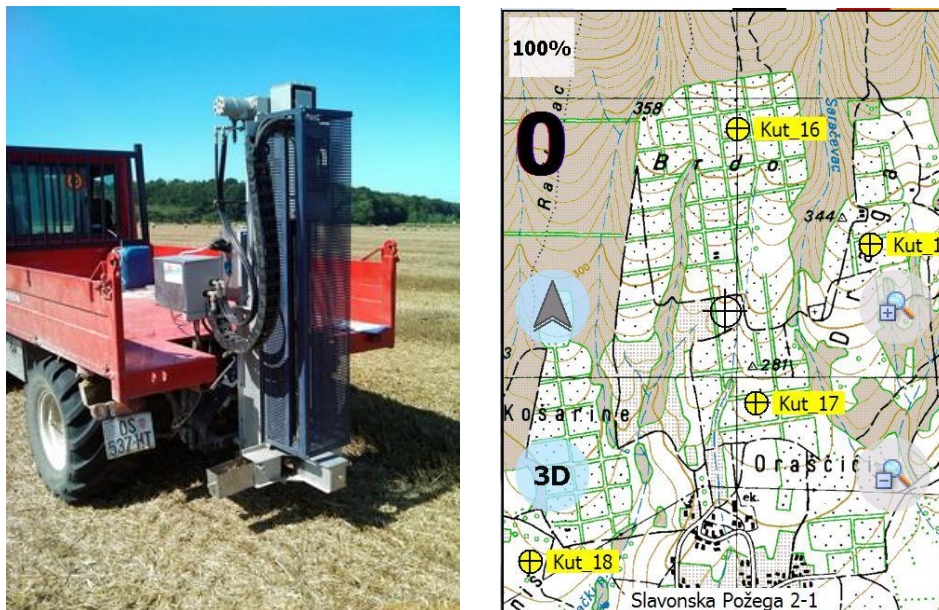
11.5.), za usjeve je 0-30 cm (rizosfera), a uzimanje uzoraka obavlja se agrokemijskim sondama.



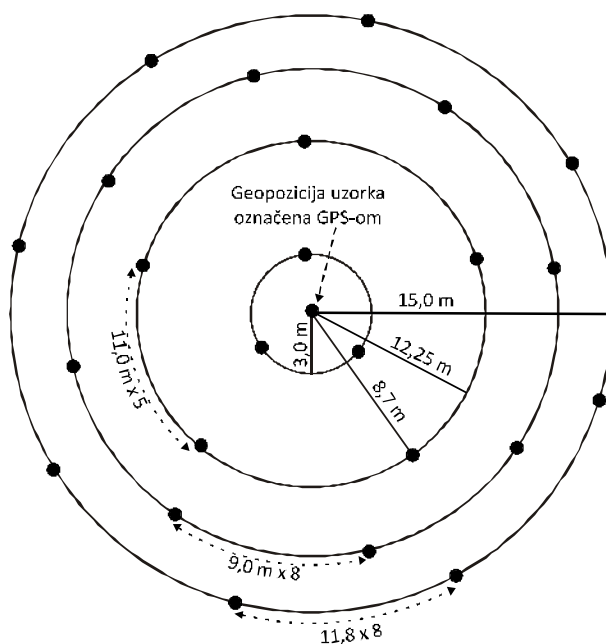
Slika 11.6. Definiranje standarda kakvoće tla za određeni tip korištenja i namjenu (Kuykendall, 2009.)

Pri dolasku na parcelu prvo se obavlja rekognosciranje terena i određuje način vađenja uzoraka. Na manjim parcelama, veličine od 0-5 ha, koje su homogene, uzima se jedan prosječni uzorak. Ako je parcela heterogena (različiti tip tla, druga predkultura, prisutne depresije, različiti nagib terena, različita boja tla i dr.) ili fizički podijeljena (cesta, kanal, prteni put), uzima se toliko prosječnih uzoraka koliko je različitih cjelina. Najmanja površina za uzimanje jednog prosječnog uzorka je 0,5 ha. Na većim homogenim površinama uzimaju se prosječni uzorci na svakih 3-5 ha po metodi kontrolnih parcela (slike 11.7. i 11.8.). Uzorci se ne smiju uzimati s uvratina i rubova parcela. Prosječni uzorak sastoji se od 20 do 25 pojedinačnih uboda sondom. Ukupna težina prosječnog uzorka je od 1,5 do 2,0 kg svježeg tla. Ako je uzorak prevelik, smanjuje se "metodom četvrtanja" prije sušenja.

Svaka manja, ali posebna parcela mora biti zastupljena barem jednim uzorkom. Uzorci se uzimaju po metodi "stalnih kontrolnih parcelica" što je vrlo značajno u sustavu kontrole plodnosti. Naime, kod takvog načina uzorkovanja u ponovljenom uzimanju se uzorak tla (nakon 4-5 god.) uzima na istom mjestu, uz vrlo malo odstupanje po GPS-u i tako se prate nastale promjene.



Slika 11.7. Uzimanje uzoraka tla hidrauličnom sondom (Tvornica Šećera, Osijek, 120 cm) i primjena GPS-a za geopozicioniranje mjesta uzorkovanja



Slika 11.8. Metoda kontrolne parcelice uz geopozicioniranje GPS-om

Kemijskom analizom biljne tvari (poljoprivrednog priroda i dijela koji ostaje na njivi) utvrđuje se količina biogenih elemenata koju je biljka usvojila kod određenog priroda. Budući da biljke iskoriste samo jedan dio hraniva iz gnojiva, a drugi dio potječe iz tla, mora se voditi računa o učinkovitosti gnojidbe, ovisno o svojstvima tla, ponašanju pojedinog elementa u tlu, njegovoj raspoloživosti, specifičnostima biljne vrste, kultivara ili hibrida itd. To su ujedno i razlozi zbog kojih se elementarni sastav biljaka mijenja u prilično širokim granicama pa, kad god je moguće, potrebno je koristiti podatke kemijske analize biljke (vrste, kultivara, hibrida) uzgajane na tlu za koje se utvrđuje potreba u gnojidbi. Stoga, tablične vrijednosti odnošenja elemenata prirodom imaju samo orijentacijski karakter. Još je 1945. god. švedski fiziolog *Lundegard* zaključio na temelju velikog broja pokusa da između sadržaja dušika, fosfora, kalija, kalcija i drugih elemenata u tlu i biljci postoji korelacijska veza. Uspoređujući točnost prognoze za gnojidbu pšenice pokazalo se da je analiza biljaka imala 60,5 % točnih, 34,3 % nesigurnih i svega 5,2 % netočnih prognoza, dok je kod analize tla bilo 40,0 % točnih, 36,4 % nesigurnih i 26,0 % netočnih prognoza.

Uvođenjem suvremenih analitičkih metoda (atomska apsorpcijska spektrofotometrija, rentgenska fluorescencija, emisijska spektralna analiza, neutronska aktivacijska metoda, primjena kompjutera u automatizaciji analitičkih postupaka i obradi podataka) analiza biljne tvari je brza, točna i nije skupa što uz mala ulaganja osigurava brzu intervenciju, posebice važnu kod prihrane usjeve. Npr. CNAL (*Cornell Nutrient Analysis Laboratories, The Cornell College of Agriculture and Life Science*) analizira tlo koristeći kompjutorizirane laboratorijske analizatore (ekstrakcija amonijevim acetatom, čiji je pH 4,8 uz dodatak EDTA) na N-NO₃, N-NH₄, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Mn, Fe, Zn, Mo, Na, Al, Co, Cd, Cr, Ni, pH (CaCl₂) i EC za ~ 100 kn a biljni materijal analiziraju rutinski na N, P, K, Ca, Mg, B, Cu, Mn, Fe, Zn, Mo, Na, Al, Co, Cd, Cr, Ni i Pb za ~ 125 kn po uzorku. Također, koriste i elektronsku mikroprobnu analizu (uključuje sekundarnu elektronsku emisiju: topografija, morfologija uzorka, povratno raspršenu elektronsku emisiju: atomski kontrastni broj, X-emisiju: distribucija elemenata i katodno luminiscentnu analizu: mikroelementi), X-fluorescentnu analizu (elementarna analiza gustih uzoraka: preciznost za većinu elemenata < 1 ppm) i X-difrakcijsku metodu uzoraka u prahu (mineraloški sastav uzoraka).

Sadržaj biogenih elemenata u biljkama ovisi o intenzitetu dvaju povezanih procesa: njihovog usvajanja i sinteze organske tvari (slika 11.9.). Iako su ti procesi međusobno povezani (porast biljaka ovisi o usvajanju hraniva, a zatim biljke većeg korijenovog sustava, asimilacijskog aparata i intenzivnijeg metabolizma lakše usvajaju hraniva), na sadržaj elemenata djeluju suprotno. Naime, povećanim usvajanjem biogenih elemenata raste sinteza organske tvari pa se uslijed "razblaženja" snižava koncentracija elemenata, ali je pritom njihov sadržaj (ukupna količina) u biljkama veći.

Kemijska analiza biljaka za utvrđivanje raspoloživosti hraniva iz tla obuhvaća više različitih metoda, od brzih testova nativnih biljnih dijelova do kemijskih i biokemijskih postupaka analize pojedinih biljnih organa. Najčešće se za utvrđivanje potreba u prihrani koristi folijarna (lisna) analiza. Folijarna analiza kod mlađih biljaka podrazumijeva analizu cijelih biljaka (npr. pšenica u busanju), a kasnije lišće ili samo peteljke ili samo određeno lišće (npr. vršni trolist kod soje u cvjetanju, list ispod klipa kukuruza u svilanju itd., tablica 11.2.).

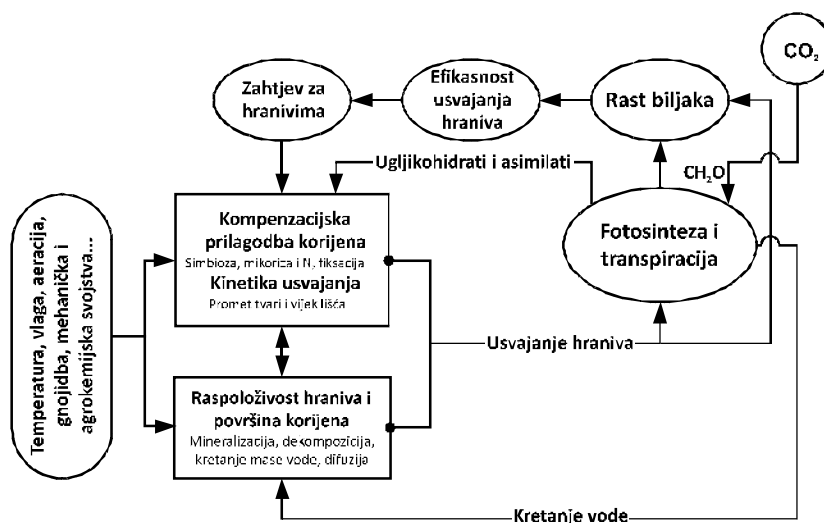
Tablica 11.2. Koncentracija kalija i magnezija u listu kukuruza i soje uzgajanih na jako K-fiksirajućem tlu bogatom magnezijem i siromašnom kalijem - utjecaj gnojidbe (Kovačević i Vukadinović, 1992.)

Gnojidba (kg ha ⁻¹)	Kukuruz			Soja		
	% u listu		Prinos zrna t ha ⁻¹	% u listu		Prinos zrna t ha ⁻¹
	K	Mg		K	Mg	
125	0,64	2,03	1,75	0,57	1,60	1,28
275	0,78	2,04	2,57	0,63	1,48	1,87
460	0,86	1,80	4,66	1,33	1,18	2,40
650	1,03	1,78	6,59	1,38	1,12	2,55
835	1,43	1,39	7,76	1,90	0,95	2,70
1580	1,71	1,29	8,98	2,13	0,88	2,65
2220	1,86	1,14	8,88	2,28	0,78	2,55

Vrlo je važno vrijeme i način uzimanja uzoraka za folijarnu analizu. Kod kukuruza uzorci se uzimaju od nicanja do trenutka polinacije. Kod mladih biljaka za analizu uzima se 15-25 cijelih biljaka, a nakon metličanja samo listovi ispod klipa. Kod soje je idealno vrijeme uzimanja uzoraka cvjetanje (~ 50 % procvjetalih biljaka), a uzima se potpuno razvijeni vršni trolist (s 35-50 biljaka), bez peteljki. Kod pšenice (uključujući sve sitnozrne trave) uzorci se uzimaju između nicanja i pojave klasa (50-60 biljaka), a kod travnih smjesa ili livada potrebno je napraviti poduzorke po vrstama ili prosječan uzorak proporcionalnog biljnog sastava. Uzorci lucerne ili djeteline uzimaju se u cvjetanju ili košnji i to samo vršnih 15 cm s 40-60 biljaka. Kod leguminoznih smjesa prave se poduzorci po biljnim vrstama ili prosječni uzorak proporcionalnog sastava. Kod sirka uzorke je potrebno uzeti prije polinacije i to drugi list (ispod vršnog) s 15-25 biljaka itd. Uzorci se kod svih usjeva uzimaju slučajnom odabirom biljaka (najbolje zaredom), stavljaju u papirnate vrećice (čiste, bez ostataka uzoraka ili kemikalija) i neposredno nakon uzorkovanja ili najkasnije nakon 24 sata, suše vrućim zrakom (30 min na 105 °C radi zaustavljanja enzimatske aktivnosti i dalje na 70 °C do konstantne mase).

Rezultati folijarne analize pokazuju samo trenutnu koncentraciju elemenata u biljci, ali ne i potrebne doze gnojiva koje treba primijeniti uvažavajući daljnje potrebe usjeva. Naime, iako između koncentracije pojedinog elementa u lišću i njegove raspoloživosti u tlu najčešće postoji pozitivna korelacijska sprema,

usvojena količina svakako je odraz prethodne raspoloživosti (do trenutka analize), pa u trenutku analize tog hraniva više ne mora biti dovoljno na raspolaganju u tlu, posebice za povećane potrebe u narednom razdoblju rasta.



Slika 11.9. Usvajanje i tok elemenata ishrane u biljci

U ranom porastu sadržaj hraniva najviše ovisi o intenzitetu njihovog usvajanja i tada je najveća koncentracija mineralnih hraniva (pepela) u biljkama, dok u kasnijim fazama koncentracija više ovisi o brzini akumulacije organske tvari. Zatim, potreban sadržaj nekog elementa može biti izazvan nedostatkom ili povećanim sadržajem nekog drugog (antagonizam i sinergizam). Zbog toga je potrebno kod primjene dušika razmotriti omjere N/P i N/K, kod gnojidbe fosforom N/P, K/P, P/Ca, P/Zn, P/Fe, P/Mn i P/Mg, a kod primjene kalija N/K, K/P, K/Ca, K/Mg i K/Na.

Na temelju omjera pojedinih elemenata *Beaufils* (1973.) je razradio *jedinstveni sustav dijagnoze i preporuka (DRIS - Diagnosis and Recommendation Integrated System)* čija je osnovna prednost u tome da se jednom utvrđeni odnosi elemenata u određenoj fazi vegetacije (ili "korekcijski" model za prosječnu suhu tvar biljaka) mogu koristiti neovisno o agroekološkim uvjetima proizvodnje (tablica 11.3.).

DRIS metoda je sve češće alternativa klasičnom CNL sistemu utvrđivanja potrebe za gnojidbom (*Critical Nutrient Level*) koji često daje bolje rezultate kod starijih biljaka, dok DRIS metoda točnije predviđa potrebe biljaka za hranivima kod mlađih biljaka.

Brze test-metode biljne tvari temelje se na karakterističnim obojenim produktima mikrokemijskih reakcija hraniva u iscijeđenom soku iz lišća (ili drugih organa). Danas se sve više rabe specijalni štapići ili trake koje navlažene iscijeđenim sokom pokazuju jednu ili više nijansi (više kemijskih reakcija)

određene boje koja se uspoređuje sa standardnom kartom boja i tako polukvantitativno utvrđuje koncentracija nekog hraniva, najčešće dušika (slika 11.10.). Ove su metode vrlo brze, niske cijene i pogodne za primjenu na terenu, svaki put kad postoji sumnja na manjak hraniva ili postoji potreba za određivanje trenutka prihrane i potrebne doze hraniva za prihranu. Ne treba zaboraviti da brza analiza obuhvaća mali broj informacija pa je dobro kod primjene brzih kemijskih metoda ispitati i svojstva tla.

Tablica 11.3. Omjeri N, P i K pri različitoj raspoloživosti tih elemenata za kukuruz (*Beaufils, 1973.*)

Opskrbljenost elementima	Omjer elemenata		
	N/K	N/P	K/P
Jak nedostatak	< 0,49	< 4,05	< 3,43
Nedostatak	0,49-0,97	4,05-8,08	3,43-6,85
Slab nedostatak	0,98-1,08	8,09-8,98	6,86-7,61
Normalan sadržaj	1,09-1,38	8,99-11,37	7,62-9,64
Mali suvišak	1,39-1,54	11,38-12,64	9,65-10,71
Suvišak	1,55-3,08	12,65-25,28	10,72-21,42
Jak suvišak	> 3,08	> 25,29	> 21,42
Normalan prosjek	1,23	10,11	8,57



Slika 11.10. Mjerenje koncentracije nitrata mobilnim aparatom *Reflectoquant*

Biokemijske metode koriste se za utvrđivanje razine opskrbljenosti biljaka hranivima mjerenjem promjene aktivnosti pojedinih enzima. Konstitucijski elementi (N, P i S) i neki metali (Fe, Mn, Mo, Cu, Zn i dr.) ulaze u sastav enzima, neki su metalni ioni njihovi aktivatori (K^+ , Mg^{2+} , Mn^{2+} itd.), dok naročito, teški metali mogu biti inhibitori (Cu, Pb, Hg, Cd itd.). Od biokemijskih metoda često se

koristi *utvrđivanje aktivnosti nitratne reduktaze* (NR) koja je tipičan *supstratno inducirani enzim*. Naime, porastom koncentracije NO_3^- u biljkama raste i aktivnost nitratne reduktaze te porast reduciranih oblika dušika u biljci uvjetuje sintezu proteina i brži porast biljaka. Stoga intenzivnija aktivnost nitratne reduktaze ukazuje na jače usvajanje N-NO_3 , ali i predstojeći brži porast biljaka. Ova metoda nema široku, niti univerzalnu primjenu jer na aktivnost NR jako utječu ekološki čimbenici kao što su promjena temperature i osvjetljenosti.

Dobro izvješće agrokemijskog laboratorija o izvršenoj analizi tla mora sadržavati sljedeće podatke:

- a) podatke o parceli (mjestu uzorkovanja) kao što su lokacija, naziv parcele, veličina, datum uzorkovanja, predkultura, prethodna mineralna i organska gnojiva i sl.,
- b) rezultate fizikalno-kemijskih analiza tla; osnovna analiza mora sadržavati rezultate o pH, sadržaju fosfora, kalija, kalcija, organske tvari i adsorpcijskom kompleksu, kao i rezultate analize drugih hraniva (mikroelementi, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ itd.), mehanički sastav, zaslanjenost i sl.,
- c) procjenu opskrbljenosti tla (uključujući napomene o manjku, suvišku ili drugim limitirajućim čimbenicima),
- d) preporuku gnojidbe (potrebnu količinu pojedinih hranjivih elemenata i doze gnojiva) za pojedine usjeve i njihove planirane visine prinosa,
- e) ciljnu visinu prinosa utemeljenu na agroekološkim uvjetima proizvodnje (tip tla, primijenjena agrotehnika, predusjev i sl.) te ekonomskim promišljanjima,
- f) preporuku eventualno potrebne kalcizacije i
- g) opaske i dopunsku interpretaciju fizikalno-kemijskih analiza.

Potrebno je još jednom naglasiti da uspješnost primjene bilo koje metode ovisi o eksperimentalno dobro utvrđenim graničnim vrijednostima elemenata ishrane u biljci i tlu, odnosno kritičnom sadržaju pojedinih hraniva u biljci. Kod primjene sofisticiranih kompjutorskih metoda utvrđivanja preporuke gnojidbe te granice nisu kruto determinirane jer se izračunavaju zasebno za pojedine agroekološke uvjete, biljnu vrstu i kultivar, ovisno o svim raspoloživim podacima o biljci, tlu, klimi i primijenjenoj agrotehnici.

Stoga se do sada opisane metode za utvrđivanje raspoloživosti hraniva mogu smatrati jednostranim testovima koji ne zadovoljavaju u potpunosti jer su procjene potrebe u gnojidbi na temelju kemijskih analiza tla, a i biljaka, često nesigurne. U posljednje se vrijeme razvijaju kompleksne metode uz korištenje kompjutorske tehnike. Prirodni procesi se matematički modeliraju, uzimajući u obzir sve djelujuće čimbenike i njihove interakcije, kompjutorski se simulira tijek vegetacije i utvrđuje potreba za gnojidbom. Kompjutorski modeli dijele se na *modele bilance* i *dinamičke modele*. Modeli bilance razmatraju čitavu godinu ili vegetaciju i obračunavaju sve dotoke i gubitke hraniva, dok dinamički modeli sustavom jednadžbi, formalnim matematičkim jezikom opisuju sve važne

processe i pokazuju stanje hraniva u tlu u kratkim vremenskim razmacima. Ako su takvi proračuni verificirani stvarnim stanjem, predstavljaju moćno sredstvo za dobru procjenu stvarnih potreba biljaka u elementima ishrane.

11.1. OPSKRBLJENOST TLA I ZADATAK GNOJIDBE

Ekonomski principi nalažu da se doza gnojiva povećava sve dok je rast priroda rentabilan. Dakle, racionalna proizvodnja hrane podrazumijeva količinu gnojiva koja odgovara potrebama biljke, stanju usjeva, plodnosti tla i istovremeno vodi računa o klimatskim uvjetima i mogućem prirodnom. Pri tome kemijske analize tla pomažu u procjeni količine hraniva koje biljka može usvojiti iz tla, a analize biljne tvari koliko hraniva biljke moraju usvojiti da bi postigle određeni prirodni. Zadatak utvrđivanja potrebe u gnojidbi nije nimalo jednostavan, jer potrebna količina hraniva koja se daje gnojidbom i njihov omjer mijenjaju se ovisno o biljnoj vrsti, kultivaru ili hibridu, stadiju razvitka biljke, dinamici hraniva u tlu i velikom broju drugih biotičkih i abiotičkih čimbenika.

Podjela tala u grupe na temelju opskrbljenosti hranivima ima praktičan značaj za klasičan pristup utvrđivanja potrebne gnojidbe što je prikazano tablicom 11.4.

Tablica 11.4. Opskrbljenost tla hranivima i zadatak gnojidbe

Opskrbljenost	Zadatak gnojidbe
Dobra	Očuvanje sadržaja hraniva na istoj razini; gnoji se količinom odnesenih elemenata dovoljnom za nadoknadu prirodnom.
Srednja	Podizanje razine opskrbljenosti hranivima; gnoji se nešto većim količinama od odnošenja prirodnom.
Niska	Podizanje efektivne plodnosti tla; gnoji se povećanim količinama hraniva zbog osiguranja visokog prirodna i obogaćivanja tla hranivima koja su u nedostatku.

Pitanje gnojidbe siromašnih tala visokim dozama, s ciljem postizanja visokih prirodna, mora se rješavati za svaki element posebno jer im je ponašanje u tlu i učinkovitost vrlo različita. Djelotvornost gnojidbe iskazuje se kao porast prinosa po jednom kg aktivne tvari i može biti agronomska ili fiziološka:

$$\text{Agronomska učinkovitost} = \frac{P_G - P_N}{G}$$

$$\text{Fiziološka učinkovitost} = \frac{P_G - P_N}{E_{UF} - E_{UN}}$$

(P_G = prinos kg ha^{-1} postignut na gnojenoj parceli, P_N = prinos postignut na negnojenoj parceli, G = aktivna tvar (hranivo u gnojivu) u kg ha^{-1} , E_{UF} = usvajanje hraniva u kg ha^{-1} na gnojenoj parceli i E_{UN} = usvajanje hraniva na negnojenoj parceli u kg ha^{-1}).

Prema klasičnom konceptu gnojidbe, tla siromašna organskom tvari ili ukupnim dušikom gnoje se dušikom toliko da se dobije zadovoljavajuće visok prirod, ili malo više od te količine, i kod njih treba računati s *priming učinkom*. Naime, dodani N gnojom stimulira usvajanje nativnog dušika što se naziva i ANI (*added nitrogen interaction*) i u sebi sadrži efekt NRE (*N-recovery efficiency*) koji se može dobro procijeniti samo tehnikom izotopa ^{15}N .

Tla bogata dušikom gnoje se nešto manjim dozama i to u više navrata (dušik se može dodavati u slučaju potrebe i tijekom vegetacije jer nagomilavanje u tlu može imati štetne posljedice za biljke uz povećane gubitke zbog ispiranja nitrata). Potrebna količina dušika ovisi o vrsti biljaka i mogućnosti iskorištavanja njihovog genetskog potencijala (najvećeg mogućeg prirod), broju biljaka po jedinici površine i odnošenju dušika žetvom. Biljke usvoje prosječno 50 % (ponekad do 70 %) od primijenjene količine mineralnog dušika gnojidbom, a kod organske gnojidbe i manje.

Nizak stupanj iskorištenja fosfora iz gnojiva zahtijeva da se tla siromašna fosforom gnoje s oko 50-100 % većom dozom od količine koja se odnosi prirodnom (klasičan koncept gnojidbe), a bogata količinom koja je jednaka sadržaju fosfora u prirodi. Iskorištenje fosfora iz gnojiva u prvoj godini primjene često ne prelazi 20 %, dok se ostatak transformira u manje pristupačne oblike (slabije topljive u vodi i korijenskim izlučevinama), a koriste ga postupno naredni usjevi. Kratkotrajno povećanje učinkovitosti P postiže se njegovom primjenom u trake (sužavanje omjera P/tlo), a sporija retrogradacija primjenom krupnijih granula (manja površina reakcije). Mikorizne gljive mogu imati učinak na pojačano usvajanje P (preko 30 %) i fiksaciju N_2 kod leguminoza uz veći prinos. U tu svrhu često se koristi gljiva *Glomus intraradices*.

Kalijeva gnojiva bolje se iskorištavaju od fosfornih, a nešto slabije od dušičnih (do 50 % u prvoj godini), ali njihova učinkovitost može biti vrlo niska na tlima slabo opskrbljenim kalijem i visoke fiksacijske moći. Stoga se tla siromašna kalijem gnoje s 25-50 % većom količinom hraniva od odnošenja prirodnom, a srednja i dobro opskrbljena dozom koja je jednaka odnošenju prirodnom (klasičan koncept gnojidbe).

Nasuprot gore navedenim principima gnojidbe, postoje sustavi gnojidbe koji teže postizanju najvećeg mogućeg prirod i kojima se postiže do 14 t ha^{-1}

pšenice i riže te 22 t ha⁻¹ kukuruza. Takva primjena gnojiva temelji se na spoznaji da je ekonomičan prirod vrlo blizak maksimalno mogućem. Visokoprinosni sustavi zahtijevaju visoka ulaganja, ali je i dobit visoka (istina, uz veći rizik), a i povećana produkcija hrane neminovno smanjuje njezinu cijenu.

Tablica 11.5. Prikaz Schleswig-Holstein i Laloux sustava uzgoja pšenice

Sustav:	Schleswig-Holstein	Laloux
Planirani prirod:	Vrlo visok: 8-10 t ha ⁻¹	Visok: 6-8 t ha ⁻¹
Sjetva:		
- vrijeme (mjesec)	Vrlo rana: početak X. mj.	Normalna: kraj X. mj.
- sklop (klasova po m ²)	Vrlo visok: 400-500	Nizak: 200-500
Gnojidba N:		
- početak proljet. porasta	80-110 kg N ha ⁻¹	30-50 kg N ha ⁻¹
- početak vlatanja	20-30 kg N ha ⁻¹	30-50 kg N ha ⁻¹
- vlatanje	1-2 male doze (svaka 20-30 N ha ⁻¹)	
- klasanje	60-80 kg N ha ⁻¹	50-70 kg N ha ⁻¹
Primjena CCC:		
- busanje	0,5-1,5 dm ³ ha ⁻¹	1,0 dm ³ ha ⁻¹
- vlatanje	0,5 dm ³ ha ⁻¹	
Zaštita bilja:	Potpuna zaštita pomoću herbicida, fungicida, insekticida	Primjena biocida prema potrebi
Elementi priroda:		
- broj klasova po m ²	Vrlo jako stimuliran	Smanjen
- broj zrna po klasu	Stimuliran	Jako stimuliran
- masa 1.000 zrna	Vrlo jako stimulirana	Jako stimulirana

Analiza čimbenika rasta kod postizanja maksimalno mogućih priroda pokazuje da je na prvom mjestu opskrbljenost usjeva vodom, zatim slijedi uporaba gnojiva, poboljšanje fizikalno-kemijskih svojstava tla i zaštita bilja. Od visokoprinosnih sustava uzgoja u Europi su poznati *Blue prints* (Engleska), *Schleswig-Holstein* (Njemačka) i *Laloux* (Belgija). *Blue prints* sustav uzgoja polazi od premise da samo raspoloživa sunčana energija može biti čimbenik minimuma, dok se potrebe biljaka za vodom i hranivima moraju potpuno podmiriti. *Schleswig-Holstein* (pokrajina u Njemačkoj s 780 mm oborina godišnje), kao način uzgoja vrlo je skup, dok belgijski *Laloux* ima nešto manje zahtjeve za visinom priroda i zato je jeftiniji. Osnovna razlika između njih je u broju biljaka po jedinici površine. *Schleswig-Holstein* zahtijeva velik broj klasova pšenice, a *Laloux* veći broj zrna po klasu. Gnojidba je osnovni čimbenik povećanja priroda (> 50 %) i u principu 1 kg NPK povećava prirod zrna za najmanje 10 kg pri čemu se polijeganje pšenice sprječava uporabom preparata

CCC (*klorkolinklorid*). U tablici 11.5. prikazane su osnove tih dvaju sustava uzgoja na primjeru pšenice.

Pored konvencionalnih i visokoproduktivnih sustava uzgoja biljaka koji se mogu označiti i kao *High Input Systems* sve češće se susreću tzv. *alternativni sustavi* koji polaze od koncepta *prirodne* ili *biološke produkcije* bez korištenja (ili u znatno smanjenom obimu) kemijskih sintetičkih tvari s ciljem proizvodnje "zdrave" hrane, a svrstavaju se u *Low Input Systems*. Međutim, potreba za prehranom svih stanovnika Zemlje i osiguranjem dovoljnih količina hrane daje danas još uvijek marginalan značaj alternativnim sustavima biljne proizvodnje. Ipak treba istaći da bi se povećanjem površina pod sustavima za navodnjavanje, boljim i većim korištenjem poljoprivredne mehanizacije, uzgojem novih biljnih vrsta koje se danas ne koriste za proizvodnju hrane, korištenjem visokoprinosnih kultivara, angažiranjem većeg broja ljudi u poljoprivredi te korištenjem sintetskih preparata samo kad je to stvarno potrebno i u najmanje potrebnim dozama, vjerojatno podmirile sve potrebe čovječanstva u hrani. U tablici 11.6. prikazane su osnovne karakteristike konvencionalne, organsko-biološke i biološko-dinamičke poljoprivrede.

Tablica 11.6. Osnove različitih sustava u proizvodnji hrane (*Finck, 1982.*)

Primjena agrotehnike	Konvencionalni uzgoj		Organsko-biološka poljoprivreda	Biološko-dinamička	
	Vrlo intenz. bez stočarstva	Umjereno intenz. sa stočarstvom		Umjerena	Originalna
Organska gnojiva	žetveni ostaci	umjereno	intenzivno	intenzivno	intenzivno
Mineralna N gnojiva	puno	umjereno	ne	ne	ne
Primjena P i K gnojiva	puno	umjereno	ekstenzivno	ne	ne
Prirodne P i K soli	vrlo rijetko	ponekad	umjereno	malo	ne
Mljevene stijene	ne	ne	malo	malo	umjereno
Kalcizacija	prema potrebi	umjereno	umjereno	malo	ne
Regulatori rasta	da	djelomično	ne	ne	ne
Uništavanje korova	pretežito kemijska	kemijski i biološki	kemijski i biološki	biološki i fizički	
Zaštita bilja	pretežito kemijska	pretežito kemijska	kemijska i biološka	skoro samo biološka	
Posebni preparati za aktivaciju rasta	ne	ne	ne	da (potrebno)	

Razlikuju se dva osnovna koncepta alternativne biljne proizvodnje: *organsko-biološka* (ili ekološka) i *biološko-dinamička agrikultura* (osnivač *Rudolf Steiner*, austrijski filozof i istraživač). Prvi način je donekle kompromisan i najčešće prakticiran u Europi i Dalekom Istoku, dok je drugi rjeđe u primjeni i zahtijeva potpuno poštivanje prirodnih uvjeta uzgoja biljaka te potpuno pridržavanje uputa za pripremu organskog gnojiva i komposta. Organska poljoprivreda isključuje upotrebu sintetskih gnojiva, pesticida, regulatora rasta i aditiva stočnoj hrani uz maksimalno korištenje rotacije usjeva, primjene različitih biljnih i životinjskih ostataka kao gnojiva, sjetve leguminoza, zelene gnojidbe, mehaničke kultivacije, mljevenih stijena koje sadrže neophodne elemente ishrane i primjenom različitih bioloških tehnika zaštite usjeva.

U posljednje se vrijeme u SAD-u (FACTA, 1990.) isključivo koristi izraz obnovljiva (održiva) agrikultura (*Sustainable Agriculture*) pod kojim se podrazumijeva poseban filozofsko-ekološki ("Moramo sačuvati resurse koji nas održavaju ..."), ekonomski ("Što nije isplativo, nije ni održivo") i sociološki aspekt ("Kakvoća života farmera, njegova obitelj i zajednica su važni...") integralne (integrirane) proizvodnje hrane. Prema definiciji Ministarstva poljoprivrede, ribarstva i ruralnog razvoja RH (2010.) *integrirana proizvodnja ratarskih kultura* sustav je uzgoja koji podrazumijeva primjenu agrotehničkih mjera uz uvažavanje ekonomskih, ekoloških i toksikoloških čimbenika, pri čemu se kod jednakog ekonomskog učinka prednost daje ekološki i toksikološki prihvatljivijim mjerama. Ekološka proizvodnja ima strože kriterije i zabranjuje korištenje sintetskih gnojiva i preparata te se temelji na uspostavljanju sklada između čovjeka i prirode, koj je uporabom "prljavih tehnologija" ozbiljno narušen.

Obnovljiva poljoprivredna proizvodnja temelji se na sljedećim praktičnim aspektima:

- Rotacija usjeva i obvezatno uvođenje leguminoza u plodored. Nakon leguminoza uzgaja se usjev s visokim potrebama dušika, a nakon usjeva slabijeg i sporog rasta uzgajaju se usjevi koji snažnije suzbijaju korove. U plodoredu se također naizmjenično kombiniraju usjevi slabije i jače razvijenog korijenovog sustava te, ako je izvor vode ograničen, i usjevi s visokim i niskim potrebama vode. Ponavljanje pojedinih usjeva u plodoredu može uslijediti tek nakon dovoljno dugog razdoblja s aspekta osjetljivosti usjeva na bolesti i štetnike. Rotacijom usjeva smanjuje se zakorovljenost, pojava bolesti, insekata i drugih zaštitarskih problema.
- Plan gnojidbe, pored obvezatnog uvođenja leguminoza u plodored, naglašava veću uporabu organskih gnojiva i popravlanje strukture tla uz smanjivanje količina mineralnih gnojiva. Time se smanjuju erozija i onečišćenja podzemnih voda s prvenstvenom namjerom popravljanja fizikalnih, mehaničkih i agrokemijskih svojstava tla.
- Strategija zaštite usjeva je prirodna i neškodljiva za farmera, susjede ili potrošače. To uključuje integralne tehnike zaštite (IPM - *Integrated Pest*

Management) kojima je ograničena (količinom i vremenom primjene) i reducirana uporaba pesticida uvođenjem monitoringa, odnosno praćenja i predviđanja pojave napada bolesti i štetnika, sjetvom otpornih kultivara, podešenim vremenom sjetve i korištenjem bioloških mjera zaštite. Pored rotacije usjeva, kao učinkovitog elementa zaštite, koristi se i rotacija mjera zaštite usjeva (mehaničke i biološke mjere), a kada je nužno i sintetske tvari niskog rizika za ljude, životinje ili okoliš. Takav pristup je ekološki prihvatljiv i smanjuje ulaganja jer se pesticidi koriste tek kao krajnje rješenje. Također, u plodored se uvode i usjevi koji suzbijaju korove alelopatskim djelovanjem (npr. zob i sirak).

Održivost podrazumijeva život u okviru prirodnih granica uz razuman komfor, odnosno živjeti s prirodom ne ostavljajući za sobom velike i nepopravljive tragove. Uvođenjem ekoloških načela u proizvodnju hrane napušta se intenzivna (konvencionalna) poljoprivredna proizvodnja i prelazi na alternativnu, odnosno održivu koja je mnogo manje rizična za životnu sredinu.

U održivoj poljoprivrednoj proizvodnji plodored ima najznačajniju ulogu jer se tako smanjuje napad štetočina, bolesti i korova. Osim toga, plodored djeluje povoljno na strukturu, vodnozračni režim, bilancu organske tvari, raspoloživost hraniva uz veću biogenost tla. Primjena organskih gnojiva nadoknađuje izostavljanje mineralnih, a rast usjeva se pospješuje prirodnim biostimulatorima te štiti od bolesti i štetočina (osim plodoredom) agrotehničkim i biološkim mjerama uz uporabu prirodnih preparata (dobiveni iz biljaka). Također, prednost u izboru kultivara dobivaju genotipovi tolerantni ili otporni na bolesti i štetnike koji su isto i konkurentni korovima.

Tablica 11.7. Bilanca hraniva

Pozitivna	$[A + B] > [C + D + E]$	$\Delta F > 0$	akumulacija hraniva
Negativna	$[A + B] < [C + D + E]$	$\Delta F < 0$	iscrpljivanje hraniva
Neutralna	$[A + B] = [C + D + E]$	$\Delta F = 0$	bez promjene

(ΔF = promjena rezerve hraniva u tlu, A = primjena gnojiva, B = unos organske mase i drugi načini inputa hraniva, C = iznošenje hraniva, D = odnošenje hraniva i E = ispiranje, imobilizacija, erozija i drugi gubici iz tla).

Svojevrsan kompromis između konvencionalne i ekološke, odnosno održive poljoprivredne proizvodnje je *integralna biljna proizvodnja* (često se naziva i *integrirana biljna proizvodnja*). To je sustav uzgoja koji primjenu agrotehničkih mjera usklađuje s ekonomskim i ekološkim načelima te se najlakše da opisati izrazom "dobra poljoprivredna praksa" zbog proklamiranih ciljeva integrirane proizvodnje:

- prihvatljivo ekološko opterećenje okoliša,
- očuvanje i podizanje plodnosti tla prirodnim putem i

- čuvanje i poticanje biološke raznolikosti.

Po pitanju gnojidbe, integrirana biljna proizvodnja dopušta primjenu mineralnih gnojiva, ali uz obveznu analizu tla, gnojidbenu preporuku i planiranje gnojidbe što podrazumijeva praćenje *budgeta i bilance hraniva* (tablica 11.7.), izbor hraniva, zabranu primjene gnojiva bez vegetacije ili tijekom zime kad je povećan rizik od ispiranja i dr. U tom smislu *budget hraniva* je tijekom hraniva unutar jedne farme koji čine:

- *Input hraniva* (primjena gnojiva, kondicionera tla, rezidue prethodnog usjeva, leguminoze, organski gnoj i dr.) i
- *Output hraniva* (iznošenje, ispiranje, erozija itd.) koje zajedno označavamo kao bilanca hraniva.

Management hraniva može biti osnovni (N, P, K, Ca, Mg i S) i potpuni koji obuhvaća sva hraniva (makro- i mikroelemente), odnosno podrazumijeva:

- 1) Djelomičnu procjenu bilance hraniva:
 - a) input hraniva (pool [A + B], tablica 11.7.)
 - b) output hraniva (pool [C + D]) = prinos × koncentracija (tablica 11.7.)
 - c) cijena nadoknade hraniva u tlu (skrivena u ruralnom gospodarstvu)
 - d) trend djelomične bilance hraniva (statistička obrada)
- 2) Procjena statusa hraniva:
 - a) biljci raspoloživa (kemijske ekstraktivne metode)
 - b) lakopristupačne rezerve (humus, potencijal mineralizacije, N_{org}, disanje tla i sl.)
- 3) Utvrđivanje gubitaka hraniva:
 - a) ispiranje, erozija, runoff, denitrifikacija, volatizacija, fiksacija i dr. (pool E, (tablica 11.7.)
 - b) monitoring on-site ili off-site

Planski management hraniva čini niz komponenata koje su zapravo suština integralne biljne proizvodnje i integralne gnojidbe bilja:

1. Karta tla s općim podacima kao što su veličina parcele, tip tla i dr.,
2. Analiza tla kao ključna komponenta za utvrđivanje doze, vremena i načina gnojidbe,
3. Rotacija (plodored) usjeva uz procjenu rezidualnih hraniva iz žetvenih ostataka pojedinih usjeva ili simbiozne fiksacije dušika leguminozama,
4. Realna procjena očekivanog prinosa (vrlo kompleksan problem) na koji utječu vremenske prilike, obrada tla, rok sjetve, sorta, bolesti, štetnici, korovi, rotacija usjeva itd. pa je dobro uzeti prosjek prinosa u posljednjih 5-7 godina.
5. Izvor i oblik hraniva koji može znatno varirati kod organskih gnojiva ovisno o načinu držanja stoke, prehrani i dr., te je potrebna njegova kemijska analiza.

6. Odlike područja (navodnjavanje, blizina vodocrpilišta, plitka tla na pijesku, veći nagib parcele, kanalska mreža, drenaža i dr.),
7. Preporučena doza mora uvažiti tehničko-tehnološke i stručno-znanstvene norme (npr.: sadržaj hraniva u biljci za ciljni prinos, dinamika usvajanja, kalcizacija).
8. Raspodjela na osnovnu gnojidbu, startnu i prihranu te oblik hraniva (npr. nitratni) ovisno o duljini vegetacije, potrebi biljaka, temperaturi, vlažnosti tla i dr.,
9. Preporuka načina primjene (omaške, inkorporacija, trake), ovisno o vrsti gnojiva, tehničkim mogućnostima, nagibu tla, oborinama, tipu tla, rotaciji usjeva i dr., kako bi se postigla najveća moguća efikasnost i
10. Godišnji pregled, ocjena i nadopuna plana managementa hranivima (za cijeli proizvodni sustav) kako bi bio aktualan, bolje prilagođen stvarnoj situaciji i postignutim rezultatima.

Tablica 11.8. Primjer osnovnog planskog managementa hraniva s prikazom petogodišnje bilance dušika (Vukadinović, 2011.)

Godina	Glavni usjev	Ciljni prinos t ha ⁻¹	Potreba N kg ha ⁻¹	Predkultura	Prinos predk. t ha ⁻¹	Žet. ost. t ha ⁻¹ ST	Organski gnoj t ha ⁻¹
2012	kukuruz	12,5	312	soja	4,25	5,0	35
2013	oz. pšenica	7,7	210	kukuruz	10,5	7,0	
2014	šeć. repa	72,5	290	oz. pšenica	7,2	5,0	
2015	kukuruz	11,0	275	šeć. repa	65,5	8,0	
2016	soja	4,5	270	kukuruz	10,5	6,0	

Godina	N u žet. ost. kg ha ⁻¹	N-miner. kg ha ⁻¹ god ⁻¹	*Bilanca N kg ha ⁻¹ god ⁻¹	Proračun (ALR) potreba gnojidbe (kg ha ⁻¹)			**Bilanca N kg ha ⁻¹ god ⁻¹
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
2012	60,0	267,8	38,6	110	150	102	-53,9
2013	52,5	210,9	-30,3	109	117	0	-22,7
2014	25,0	189,1	62,0	121	137	128	14,0
2015	36,0	177,0	34,5	134	115	60	27,5
2016	45,0	229,0	54,0	79	150	41	-58,0
Ukupno:	218,5	1073,8	158,7	553	669	331	-93,1

$$* \text{ Bilanca}_N = N_{\text{potreba}} - N_{\text{gnojidba}} + \frac{(N_{\text{rata min.}} + N_{\text{zet.ost.}}) \times 100}{50}$$

$$** \text{ Bilanca}_N = N_{\text{gnojidba}} - \frac{(N_{\text{rata min.}} + N_{\text{zet.ost.}}) \times 100}{50}$$

Planski management hraniva je u mnogim razvijenim zemljama obveza poljoprivrednih proizvođača, a radi nadzora i učinkovite zaštite okoliša propisane su metode i procedura proračuna bilance i managementa hraniva.

Budući da je bilancu hranjivih tvari, prije svega dušika, gotovo nemoguće apsolutno utvrditi, primjenjuje se niz različitih postupaka, od kojih je najveći dio empirijski te stoga primjenjiv samo za uže agroekološko i specifično proizvodno područje. Kao primjer, prikazan je osnovni petogodišnji management hraniva s djelomičnom bilancom hraniva, samo za dušik, izračunat na dva načina (tablica 11.8.).

Konkretan primjer iz tablice 11.8. pokazuje proračun bilance dušika s obzirom na input hraniva (N-gnojidba, žetveni ostaci predkultura, N-mineralizacija aktivnog dijela humusa i goveđi stajnjak 35 t ha^{-1} nakon ozime pšenice) te output hraniva iznošenjem i odnošenjem prinosom. Efikasnost dušika iz žetvenih ostataka, organskog gnoja i organskih rezervi tla računata je kao za N iz mineralnih gnojiva (50 %), ali nisu prikazani gubici N, s obzirom na agrotehničke, zemljišne i klimatske uvjete. Kod proračuna N-bilance, koja se temelji na potrebama biljaka (*bilanca), pojavljuje se suvišak N u ciklusu proizvodnje, dok je proračun obavljen ALR kalkulatora (**bilanca), koji uzima u obzir više dopunskih indikatora (tekstura tla, biogenost, uređenost, klima i dr.), negativan jer je potreba usjeva za dušikom zapravo manja, odnosno podmiruje se iz svih raspoloživih izvora.

11.2. METODE ZA UTVRĐIVANJE POTREBA U GNOJIDBI

Metode za utvrđivanje potreba u gnojidbi dijele se na *biološke* i *kemijske*. U obje grupe metoda postoji veliki broj različitih postupaka za utvrđivanje efektivne plodnosti tla. *Efektivnu plodnost tla karakterizira njegova sposobnost da osigura biljkama potrebne uvjete za rast i razvitak*. Tako definirana plodnost nekog tla podrazumijeva niz fizičko-kemijskih i bioloških svojstava tla, utjecaj klime i primijenjene agrotehnikе. S agrokemijskog gledišta, *plodno je ono tlo koje u tijeku čitave vegetacije osigurava biljkama dovoljno hraniva i na kome se trajno postižu visoki prirodni*. Kao sinonim za plodnost često se koristi izraz *kakvoća tla* koja se ne može vidjeti ili direktno mjeriti jer obuhvaća velik broj različitih svojstava tla i njegovih promjena pod različitim agrotehničkim i agroekološkim uvjetima. Ni zdravlje čovjeka ne može se apsolutno utvrditi pa, u prenesenom smislu, kvalitetno tlo odgovara ljudskom poimanju zdravlja. Zbog toga se pojedina svojstva tla koriste samo za procjenu njegove plodnosti, posebice raspoloživost hraniva.

11.2.1. Vegetacijski pokusi

Najpouzdanija metoda za određivanje stvarnih potreba za gnojidbom su vegetacijski pokusi na polju. Ako se oni provode dovoljno dugo, a postavljeni su tako da daju odgovore vezane za primjenu gnojiva, kao što je utjecaj pojedinog elementa ili uzajamni utjecaj na visinu priroda i njegovu kakvoću, djelovanje doze, vremena unošenja i slično, tada predstavljaju moćno sredstvo za veće iskorištenje genetskog potencijala rodosti poljoprivrednih biljaka.

Od kalibracijskih vegetacijskih pokusa očekuje se uglavnom omogućavanje ispravne interpretacije rezultata kemijske analize tla, iako se često nastoje utvrditi i optimalne doze u gnojidbi. Sva ispitivanja u tom pravcu daju dobru korelaciju gnojidbe i priroda na tlima niske opskrbljenosti pristupačnim hranivima. Na srednje i dobro opskrbljenim tlima veličina priroda često snažnije ovisi o drugim čimbenicima rasta (prinosa) nego o raspoloživosti hraniva, ali se uglavnom pronalazi čvrsta korelacija između količine pristupačnih hraniva u tlu i koncentracije tih elemenata u biljci. Zbog toga se iznošenje biogenih elemenata koristi kao mjerilo opskrbljenosti tla pristupačnim hranivima, stoga je kalibracijske pokuse potrebno postavljati na svaki tip tla i za svako proizvodno područje jer se pouzdani rezultati mogu očekivati samo kada su svi djelujući čimbenici uzeti u obzir.

11.2.2. Kemijske ekstraktivne metode

Utvrđivanje raspoložive količine hraniva u tlu predstavlja temelj za preporuku gnojidbe i primjenu gnojiva. U tu svrhu široko se upotrebljavaju različite kemijske ekstraktivne metode, ponekad nedovoljno kalibrirane ili s nekritički prihvaćenim (preuzetim iz strane literature) granicama opskrbljenosti, bez provjere u konkretnim agroekološkim uvjetima.

Primjenjuje se velik broj ekstraktivnih sredstava različite "moći" ekstrakcije, već prema tome da li se koriste kiseline (mineralne, organske, jake, slabe), soli, kelatizirajući spojevi, voda, struja, smjese otapala (obično pufernih svojstava). Cilj je utvrditi količinu raspoloživog hraniva, odnosno kojoj količini hraniva u tlu odgovara rezultat analize, a to se postiže samo kalibracijom pojedine kemijske ekstraktivne metode.

Jednostavni proračuni raspoloživosti hraniva nekalibriranih metoda nisu nimalo pouzdani na što ukazuju vrijednosti "raspoloživosti" hraniva za različite kemijske ekstraktivne metode (tablica 11.9.). Npr., AL metodom utvrđen je sadržaj od 12,5 mg P₂O₅ 100 g⁻¹ tla pa se u praksi često koristi vrlo pojednostavljeni i uglavnom netočan proračun:

$$P_{\text{raspoloživi}} = 12,5 \times 1,5_p \times 30 = 562,5 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$$

$$P_{\text{raspoloživi}} = 562,5 \times 0,20_{\text{Pef}} = 112,5 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$$

$1,5_p$ = volumna gustoća tla; $30 = (3 \times 10^6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ tla do } 20 \text{ cm})$; $P_{\text{ef}} = 0,20$ (efikasnost u prvoj godini primjene fosfora).

Tablica 11.9. Prosječni rezultati ekstrakcije fosfora različitim kemijskim ekstraktivnim metodama (Marschner, 1995.)

Ekstraktivna otopina	mg P 100 g ⁻¹
neutralni NH ₄ F (pH 7,0)	14,8
kiseli NH ₄ F (pH < 2,0)	7,4
H ₂ SO ₄ + (NH ₄) ₂ SO ₄ (pH 3,0)	3,6
CH ₃ COOH (pH 2,6)	2,5
NaHCO ₃ (pH 8,5)	2,4
CAL	1,2

Primjenom drugih metoda (CAL, DAL, Morganove, Bray itd.) dobit će se znatno drugačiji podatak o raspoloživoj količini hraniva. Zbog toga je potrebno znati granice opskrbljenosti ili kojoj količini raspoloživog hraniva odgovara dobiveni rezultat (prema gornjem primjeru 1 mg P₂O₅ analize odgovara 9 kg P₂O₅ ha⁻¹ raspoloživog hraniva: 112,5/12,5 = 9).

Moć usvajanja hraniva korijenom bitno je drugačija prema ekstrakciji hraniva kemijskom otopinom. Korijenske izlučevine su različitog kemijskog sastava i količine ovisno o vrsti i starosti biljke, njezinoj opskrbljenosti pojedinim elementima ishrane, vlazi tla itd. Zatim, masa korijena je oko 1 % od mase tla koju prožima pa se usvajanje hraniva, ovisno o njihovim kemijskim svojstvima, obavlja različitim mehanizmima (kontaktno, difuzija, kretanje mase i dr.). Stoga pojedine ekstraktivne metode koriste *višestruku ekstrakciju hraniva*, npr. EUF (elektro-ultra filtracija) metodu, kako bi se razlučila hraniva različite čvrstoće vezivanja u tlu (kemijska i fizička sorpcija) te, pored neposredno raspoložive količine, procijenila i puferna sposobnost tla.

11.2.3. Raspoloživost hraniva i visina priroda

Rast biljaka i tvorba priroda je paralelan proces koji se odvija prema složenim prirodnim zakonitostima i podlozan je djelovanju ekoloških čimbenika biotičke i abiotičke naravi. Kako odnose između organizama i biocenoza prema vanjskoj sredini te uzajamne odnose živih bića izučava ekologija, a mehanizme reakcije organizama na ekološke čimbenike izučava ekofiziologija, potrebno je dobro poznavati zakonitosti koji vladaju unutar agrofitecenoze (usjeva), a koji se bitno razlikuju od prirodnih fitocenoza. Rast biljaka (*neto produkcija*) odvija se u

funkciji vremena i ima oblik S krivulje. Budući da je vrijeme fizikalna veličina, ono za pojedine vrste ipak ima različito značenje koje ovisi o brzini, odnosno čimbenicima rasta. Od davnina je poznato da povećanjem gnojidbe raste visina priroda, ali je porast sve manji u odnosu na povećanje količine hraniva. Isprva je to formulirao *Turgot* kao *pravilo opadajućeg prirasta* priroda. Naime, nasuprot dodavanju sve većih količina gnojiva, dolazi do smanjenja priroda.

Sklonost kvantitativnom poimanju čimbenika rasta prisutno je dugo vremena u ishrani bilja. Težnja da se unaprijed utvrdi utjecaj nekog čimbenika na povećanje priroda sadržana je u velikom broju različitih "zakona" ili "pravila" čija je suština ipak više statistička i nema univerzalni značaj.

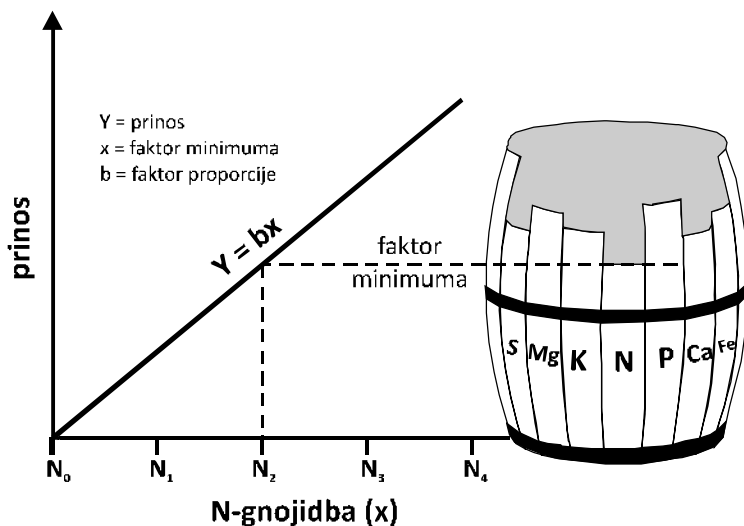
Proučavajući djelovanje vanjskih čimbenika na tvorbu priroda, *Liebig* je 1855. godine postavio *zakon minimuma* prema kojem je visina priroda ograničena čimbenikom u minimumu (slika 11.11.). To je matematički zapravo jednadžba pravca:

$$y = b_0 + b_1x$$

gdje je b_0 = prinos bez inputa, b_1 = nagib ili gradijent linearne relacije.

Liebigov zakon minimuma često se predstavlja kao bačva s dužicama različite visine pa se čimbenik u minimumu predstavlja najnižom dužicom koja određuje gornju granicu priroda. Ovaj "zakon" dobro objašnjava porast priroda, ali ima i više slabosti jer promatra linearno i neovisno djelovanje čimbenika na visinu priroda. Stoga je već 1895. doživio transformaciju koja je poznata pod imenom *Liebscherov zakon optimuma*. Zakon optimuma kaže da čimbenik u minimumu više djeluje ako su ostali čimbenici prinosa bliži optimumu. Međutim, na temelju ogromnog eksperimentalnog iskustva, poznato je da se krivulja rasta priroda povija na kraju. Za objašnjenje ove pojave predloženo je niz matematičkih modela, "zakona", čiji je karakter najprije statistički jer vrijede upravo onoliko koliko se precizno može utvrditi djelovanje nekog čimbenika rasta, odnosno priroda, npr. logaritamski (*Mitscherlichov*), hiperboličan (*Spillmannov*) itd.

Mitscherlich je pokušao uvažiti eksperimentalno utvrđenu činjenicu da na visinu priroda utječe niz biotskih čimbenika (vrsta, kultivar, nejednaka produktivnost fotosintetskog aparata, različita tolerantnost na nepovoljne uvjete rasta itd.) i abiotske prirode (klimatski i zemljišni uvjeti). Na tim postavkama razradio je metodu uzgoja biljaka u strogo nadziranim uvjetima rasta kako bi se sa sigurnošću mogao utvrditi utjecaj pojedinih čimbenika (doze hraniva) na visinu priroda. Metoda se temelji na uzgoju biljaka u posudama (često i u polju uz nešto izmijenjeni način izračunavanja potreba u gnojidbi), a gnojidba se postavlja po planu koji omogućuje utvrđivanje utjecaja svakog pojedinog elementa ishrane uz procjenu potrebne gnojidbe.



Slika 11.11. Liebigov "zakon" minimuma

11.2.4. Utvrđivanje potrebe u gnojidbi prema Mitscherlichu

Za izračunavanje potreba u gnojidbi prema *Mitscherlichu* koristi se sljedeća jednačba:

$$\log(A - y) = \log(A) - cx$$

A = najveći postignuti prirod kod potpune gnojidbe s NPK; c = čimbenik djelovanja hraniva; x = količina hraniva dodana gnojdbom; y = postignuti prirod kod doze gnojiva x.

Ako se s "a" označi prirod koji se postiže bez gnojidbe nekim elementom, tada je "b" pristupačna količina hraniva u tlu pa se "b" (u dt po ha) izračunava:

$$b = \frac{[\log A - \log(A - a)]}{c}$$

Porast prinosa proporcionalan je čimbeniku c, odnosno u ishrani bilja c je čimbenik djelovanja hraniva. Prema *Mitscherlichu* taj čimbenik ima različitu vrijednost, ovisno o tome da li se utvrđivanje potrebe za gnojdbom obavlja u posudama ili u polju, odnosno da li se koristi izvorni oblik jednačbe ili njezini izvodi. Za gore navedene jednačbe u nadziranim uvjetima su $c_N = 0,64$; $c_P = 2,00$ i $c_K = 1,33$, dok je u polju $c_N = 0,20$, $c_P = 0,60$ i $c_K = 0,40$.

Često se koriste i antilogaritmirani izvodi originalne jednačbe *Mitscherlicha*:

$$y = A(1 - e^{-cx}) \text{ ili derivirano } \frac{dy}{dx} = c(A - y)$$

Linearizacijom se mogu dobiti sljedeći korisni izvodi:

$$y = A(1 - e^{-cx})$$

$$\frac{Y}{A} = 1 - e^{-cx}$$

$$\frac{Y}{A} - 1 = -e^{-cx}$$

$$1 - \frac{Y}{A} = e^{-cx}$$

$$\ln\left(1 - \frac{Y}{A}\right) = -cx$$

Za dva ili više hranjivih elemenata gornji izrazi mogu se proširiti:

$$y = A \times \{1 - \exp(-c_N N)\} \times \{1 - \exp(-c_P P)\} \times \{1 - \exp(-c_K K)\}$$

Kod utvrđivanja potrebe u gnojidbi gornji matematički izrazi mogu se prilagoditi na sljedeći način:

$$Y_m = Y_p \left[1 - 10^{-K_i(x_0 + x_i)} \right]$$

gdje je Y_m = visina priroda, Y_p = potencijalni prirod, K_i = čimbenik djelovanja hraniva (npr., za kukuruz u sjev. Italiji uzimaju za čimbenike djelovanja N, P i K: $K_N = 0,008$, $K_P = 0,010$ i $K_K = 0,015$), x_0 = raspoloživost hraniva prije gnojidbe, x_i = gnojdbom dodana količina hraniva (doza).

Gornji matematički izraz može se "razviti" za praktičnu uporabu na sljedeće načine:

$$\log\left(\frac{Y_p - Y_m}{Y_p}\right) = -K_i \times (x_0 + x_i)$$

$$x_0 + x_i = -\left(\frac{1}{K_i}\right) \times \log\left[\frac{Y_p - Y_m}{Y_p}\right]$$

$$x_0 + x_i = \left(\frac{1}{K_i}\right) \times \log\left[\frac{Y_p}{Y_p - Y_m}\right]$$

Primjeri izračunavanja gnojidbe prema *Mitscherlichovom zakonu* (i formulama izvedenim iz tog zakona):

1. Koliki će se postići prirod zrna kod kukuruza ako je utvrđeno 50 kg N_{min} u tlu?

$$y_m = y_p(1 - 10^{-0,008 \times 50}) = 0,6$$

$$0,6 \times 100 \% = 60 \% \text{ (od najveće mogućeg priroda } y_p)$$

2. Uobičajeno se od potencijalnog priroda postiže u proizvodnim uvjetima 70 % ($y_m = y_p \times 0,70$), a može se računati s djelotvornom uporabom gnojiva do 20 % od y_m , odnosno od 84 % najvećeg mogućeg priroda za date uvjete ($0,70 \times 1,2 = 0,84$ %). Kolika je potreba za dušikom za taj prirod zrna kukuruza?

$$(x_0 + x_i) = \frac{\log \left[\frac{1}{(1 - 0,84)} \right]}{K_i} = \frac{0,796}{0,008} = 99 \text{ kg N ha}^{-1}$$

3. Najveći mogući prirod zrna kukuruza za određene agroekološke uvjete je 15 t ha^{-1} . Kolika je potreba za dušikom uz 70 % potencijalnog priroda?

$$b = \frac{\log(15) - \log(15 - 10,5)}{0,2} = 2,61 \text{ dt ili } 261 \text{ kg N ha}^{-1}$$

Brayeva modifikacija Mitscherlichovog proračuna:

$$\text{Log}(A - y) = \text{Log}(A) - cb - c_1x$$

A = maksimalni prinos

y = prinos postignut na razini b

b = indeks opskrbljenosti tla

c = faktor učinkovitosti (konstanta) za b

x = doza primijenjenog gnojiva

c_1 = faktor učinkovitosti za x (metoda prostora)

11.2.5. Metoda procjene potrebe u gnojidbi po Friedu i Deanu

Budući da biljke uzimaju hranjive tvari kako iz gnojiva tako i iz prirodnih izvora (rezidualna hraniva, mineralizacija i dr.), može se primijeniti sljedeći izraz:

$$A = \frac{B \times (1 - y)}{y}$$

A = raspoloživa hraniva u tlu

B = standardna doza gnojiva

y = proporcionalna količina usvojenih hraniva ostvarena standardnom gnojidbom

U proizvodnim, konkretnim agroekološkim uvjetima, biljka je jedina koja može pokazati koliko je hraniva iz tla raspoloživo.

Za specifične agroekološke uvjete i promatrani usjev, vrijednost je konstantna i neovisna o dozi primjene gnojiva, veličini posuda u kojima se testira efikasnost gnojidbe i brzini porasta biljaka. Vrijednost A prvenstveno je testirana kako bi se utvrdila raspoloživost P u tlu.

Uz primjenu gnojiva u trake, vrijednost A se povećava s povećanjem doze fosfora. To sugerira kako je raspoloživost P konstantna bez obzira na povećanje doze. *Fried and Dean* (1951.) naglasili su kako se može pretpostaviti da način primjene gnojiva ne utječe na raspoloživost fosfora, jer se niže vrijednosti dobivene s primjenom u trake mogu pripisati većoj dostupnosti i u odnosu na standardnu gnojidbu.

11.2.6. Druge metode procjene potrebe u gnojidbi

Potencijalni prirod može se procijeniti temeljem više biotičkih i abiotičkih čimbenika, npr. preko potencijalne evapotranspiracije, intenziteta sunčeve radijacije, parametara pojedinog usjeva i potrebe za hranivima:

$$Y_p = K_c \times c_H \times F_c \times \sqrt{\Sigma ETP} \times \frac{\Sigma R_s \times 0,47}{\Sigma T} \times \Pi_1 \left[1 - 10^{-K_i(x_0 + x_i)} \right] \times \Pi_1 10^{-h_i x_i}$$

(gdje su K_c , c_H i F_c parametri usjeva, ΣETP = potencijalna evapotranspiracija, $\Sigma R_s \times 0,47$ = fotosintetski aktivna radijacija, ΣT = suma prosječnih temperatura vegetacije).

Općenito, produktivnost nekog tla može se prema *Boguslawskom* prikazati djelovanjem sljedećih čimbenika:

f	fizikalni čimbenici	x	anorganski kemijski čimbenici	x	organski biološki čimbenici	x	vodni režim tla	x	klima x rotacija x gospodarenje

Pod fizikalnim čimbenicima tla podrazumijevaju se njegova tekstura, poroznost, sklonost prema eroziji itd.; pod anorganskim kemijskim čimbenicima pH-vrijednost, sadržaj makro i mikroelemenata itd.; pod organsko-biološkim čimbenicima sadržaj humusa, zemljišna fauna, mikroorganizmi, intenzitet disanja tla itd.; pod čimbenicima vodnog režima retencija, infiltracija, konduktivitet, razina podzemne vode itd., a moraju se uzeti u obzir klima, rotacija usjeva i općenito način gospodarenja tlom.

11.2.7. Ekonomski pristup u procjeni potrebe gnojidbe

Ekonomska efikasnost gnojidbe jednostavno se može prikazati kao:

$$PR = \frac{\text{Cijena jedinice gnojiva}}{\text{Cijena jedinice proizvoda}}$$

Optimalna doza primjene gnojiva može proizvesti maksimalni ekonomski efekt (prinos) ovisno o cijeni gnojiva, vrijednosti prinosa i veličini fiksnih troškova

proizvodnje. Vrijednost proizvodnje definirana je kao funkcija visine prinosa i doze gnojiva:

$$V = Y \times P_y = F(x) \times P_y$$

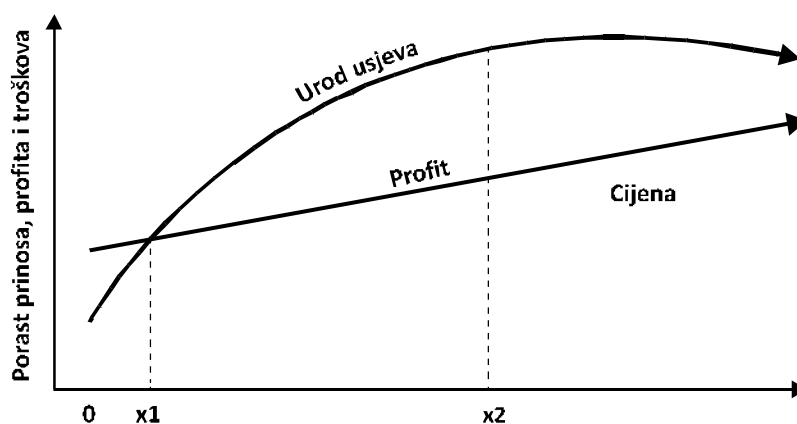
Y = prinos kod primijenjene doze gnojiva; P_y = cijena gnojiva po jedinici prinosa; $F(x)$ = funkcija fiksnih troškova; P_x = cijena gnojiva; X = doza gnojiva

Ukupna cijena gnojidbe može se izračunati izrazom:

$$T = F + P_x \times X$$

T = ukupna cijena koja je linearna funkcija primijenjene doze gnojiva, a nagib linije pokazuje cijenu gnojiva koja započinje od visine fiksnih troškova (F).

Grafikon (slika 11.12.) je funkcija koja pokazuje ekonomski isplativu dozu gnojiva. Jasno je kako se neto dobit može ostvariti kada je trošak za gnojivo veći od $0 - x_1$, a vrijednost usjeva premašuje troškove. Dobit gnojidbom može se povećati do vrijednosti $0 - x_2$ kad je dostignut najveći profit (razlika između vrijednosti prinosa i troškova je maksimalna).



Slika 11.12. Odnos porasta prinosa, visine ulaganja i profita (Barreto and Westerman, 1985.)

11.2.8. Utvrđivanje gnojidbe uz pomoć AL-metode i koncept ciljnog prinosa

Konvencionalno utvrđivanje potrebe u gnojidbi podrazumijeva poznavanje graničnih vrijednosti svakog pojedinog hraniva, odnosno utvrđene razrede pristupačnosti za njih, koeficijente učinkovitosti gnojiva i planiranu (moguću) visinu prinosa. Uvođenjem matematičkog modela broj parametara može biti znatno veći, a njihovo djelovanje tada se procjenjuje kvantitativno matematičkim funkcijama uz utvrđivanje interakcija čime se izbjegava kruto razvrstavanje tala u razrede opskrbljenosti pa se dobiju preporuke za niz različitih proizvodnih situacija. Otuda se rezultati kemijske analize tla mogu

iskoristiti na *klasičan* (konvencionalan), ali i *suvremen način procjene potrebne gnojidbe*.

Najveći broj podataka kontrole plodnosti tla u Hrvatskoj dobiven je AL-metodom (varijanta *Egnér-Riehm-Domingo*) pa će ona biti iskorištena u tekstu ispod za prikaz procjene (proračun preporuke) potrebne gnojidbe na klasičan (konvencionalan ili standardan) i suvremen način uz pomoć kompjutera.

Konvencionalni način proračuna gnojidbene preporuke AL-metodom

Ako je planirani prirod pšenice $6,0 \text{ t ha}^{-1}$ (koncept ciljnog prinosa ili *Targetted yield concept*), na tlu koje je srednje raspoloživosti dušikom, siromašno fosforom i srednje opskrbljeno kalijem, najprije se utvrdi količina tih elemenata potrebna za dobivanje planiranog priroda koristeći tablice koje pokazuju sadržaj elemenata uključujući i pripadajući dio žetvenih ostataka (tablica 11.10.). Važno je naglasiti kako zbog genetske specifičnosti mineralne ishrane i interakcije s agroekološkim uvjetima, elementarni sastav različitih kultivara ili hibrida može znatno varirati. Stoga je dobro rabiti kemijsku analizu uzgajanih sorti s proizvodnih površina za koje se planira gnojidba, a u tablici 11.10. prikazan je uobičajen raspon variranja odnošenja glavnih hranjivih elemenata.

Tablica 11.10. Odnošenje elemenata u kg t^{-1} priroda (s pripadajućim ostacima)

Biljna vrsta	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Pšenica	25 - 35	10 - 15	20 - 30
Ječam ozimi	20 - 25	8 - 12	20 - 30
Ječam jari	15 - 25	8 - 12	20 - 25
Raž	20 - 30	10 - 15	20 - 30
Zob	20 - 30	10 - 15	30 - 40
Kukuruz	25 - 30	10 - 15	30 - 40
Šećerna repa	4,0 - 5,5	1,5 - 2,0	6,0 - 10,0
Lucerna	20 - 30	5 - 10	20 - 25
Krumpir (kasni)	4,5 - 5,5	1,5 - 2,0	7,5 - 9,0

Ako je planirani prirod pšenice $6,0 \text{ t ha}^{-1}$, tada je ukupno potrebna sljedeća količina N, P i K:

$$30 \times 6 = 180 \text{ kg N ha}^{-1}$$

$$12 \times 6 = 72 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$$

$$20 \times 6 = 120 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$$

Uvažavajući potrebe biljaka i raspoloživost hraniva iz tla, potrebno je učiniti korekciju izračunate potrebe. Uobičajeno je u klasičnom proračunu potrebe gnojidbe da se korekcija obavlja množenjem potrebne količine hraniva koeficijentima za raspoloživost hraniva. Tablica 11.11. pokazuje postotak potrebne količine aktivne tvari gnojiva prema razredu opskrbljenosti tla

hranivima. U mnogim zemljama u uporabi su tablice koje dijele tla na više klasa, ali se koriste i tablice koje uvažavaju i neka druga svojstva tla presudna za raspoloživost određenog elementa. Npr., na raspoloživost fosfora utječe snažno pH-vrijednost tla (ali značajni su i teksturna klasa tla, sadržaj humusa i dr.), dok je za raspoloživost kalija značajnije koliko u tlu ima gline, odnosno dobro je poznavati fiksacijsku moć tla. Zbog toga gotovo svaka znanstvena poljoprivredna ustanova ima posebne tablice za izračunavanje potrebne količine hraniva u gnojidbi, koje su primjerene agroklimatskim uvjetima područja, ali sadrže i iskustvo stečeno u praksi. Za područje istočne Hrvatske najčešće se koristi tablica 11.12. prema Vladimiru Vukadinoviću koja za raspoloživost fosfora uzima u obzir pH, a za kalij teksturna svojstva tla.

Tablica 11.11. Potrebna količina aktivne tvari (%) ovisno o opskrbljenosti tla

Razred opskrbljenosti tla	Gnojdbom je potrebno dodati % od količine hraniva koja se odnosi prirodnom		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Niska	100 - 120 %	150 - 200 %	125 - 150 %
Srednja	80 - 100 %	100 - 150 %	100 - 125 %
Dobra	60 - 80 %	100 %	100 %

Dakle, ukupna potrebna količina hraniva za planirani prinos ispravlja se čimbenikom svakog elementa ovisno o njegovoj raspoloživosti (u primjeru:

$N = 0,90 \rightarrow$ srednja, $P_2O_5 = 1,75 \rightarrow$ niska i $K_2O = 1,25 \rightarrow$ srednja) u nekom tlu:

$$180 \times 0,90 = 162 \text{ kg N ha}^{-1}$$

$$72 \times 1,75 = 126 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$$

$$120 \times 1,25 = 150 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$$

Tablica 11.12. Granične vrijednosti AL-P₂O₅ i AL-K₂O za ratarske usjeve na području istočne Hrvatske (Vladimir Vukadinović)

Razred raspoloživosti	AL-P ₂ O ₅ mg 100 g ⁻¹		AL-K ₂ O mg 100 g ⁻¹ tla		
	pH < 6	pH ≥ 6	lako	srednje	teško
(A) jako siromašno	< 5	< 8	< 8	< 12	< 15
(B) siromašno	5 - 12	8 - 16	9 - 15	13 - 19	16 - 24
(C) dobro	13 - 20	17 - 25	16 - 25	20 - 30	25 - 35
(D) visoko	21 - 30	26 - 45	26 - 35	30 - 45	36 - 60
(E) ekstremno visoko	> 30	> 45	> 35	> 45	> 60

Količina hraniva (iskazana kao aktivna tvar) preračuna se u dozu gnojiva: Gnojivo kg ha⁻¹ = (a × 100)/b, gdje je a = potrebna količina hraniva, b = sadržaj aktivne tvari u gnojivu (%), npr. za dušik: (162 × 100)/46 = 352 kg/ha uree.

Primjer kompjutoriziranog određivanja gnojidbe AL-metodom

Koncept ciljnog prinosa zahtijeva poznavanje odnošenja elemenata ishrane prinosom, koji su prilagođeni agroekološkim uvjetima i kondicijama tla. Međutim, za razliku od konvencionalnog pristupa, kompjutorizirani pristup omogućava točnije izračunavanje potrebe u gnojidbi jer se koristi tzv. "ulazna baza" koja, osim podataka o kemijskoj analizi tla, sadrži i niz vrlo važnih dopunskih podataka o tlu (navodnjavanje, odvodnja, drenaža, obrada, biogenost, predkultura i njen prinos, organska gnojidba, žetveni ostaci, klima, nadm. visina, nagib, ekspozicija i dr.). Sve su to vrlo važne dopunske informacije koje se mogu uzeti u obzir i njima korigirati proračun gnojidbe tako da bude što bliže stvarnim potrebama usjeva.

Kompjutorska adaptacija i nadogradnja AL-metode za utvrđivanje potrebe u gnojidbi ratarskih usjeva, posebice u sustavu kontrole plodnosti, ima značajne prednosti u mogućnosti sistematizacije, čuvanja i pretraživanja raspoloživih podataka o plodnosti proizvodnih površina te racionalizaciji gnojidbe. Kvalitativni pomak u odnosu na konvencionalni način dobivanja preporuka sastoji se u korištenju funkcijskih povezanosti više varijabli (sadržaj hraniva i humusa, pH reakcija tla, broj teksturne klase i rata mineralizacije) koje kompleksno određuju preporuku gnojidbe. Time se izbjegava značajan nedostatak grube podjele tala u razrede (klase) opskrbljenosti fosforom i kalijem (gdje razlika unutar iste klase iznosi 5-10 mg hraniva na 100 g tla) uz ograničenu mogućnost (tablične vrijednosti) korištenja pH ili teksturne klase za korekciju sadržaja hraniva. Gnojidba utvrđena konvencionalnim načinom ne razlikuje se za tla unutar istog razreda opskrbljenosti za razliku od kompjutorske metode koja uzima u proračun numeričke vrijednosti analize tla (nasuprot razreda opskrbljenosti tla u konvencionalnom proračunu potrebe gnojidbe), isključuje mogućnost pogreške u računanju, izuzetno je brza u automatskom izdavanju gnojidbenih preporuka te čuva sve podatke o tlu u bazi čime je omogućeno dugoročno praćenje promjena plodnosti tla i poduzimanje mjera za zaštitu tla, ali i okoliša.

U daljem tekstu opisana je javna (public) verzija ALR kalkulatora (autor: Vladimir Vukadinović) za proračun gnojidbe usjeva. Kalkulator je po svom konceptu, načinu izvedbe i proračunu gnojidbe jedinstven, a po istom konceptu autor je kreirao ekspertnu verziju kalkulatora s mnogo većim mogućnostima. Obje vrste kalkulatora namijenjene su online korištenju preko interneta, a mogu se koristiti i *offline*, na svakom PC računalu čiji je operativni sistem Windows uz Internet Explorer. Kalkulator je napisan u JavaScriptu i HTML-u, otvorenog je koda i zbog toga ga je lako moguće prilagoditi za različite agroekološke uvjete (što je sukladno važećoj autorsko-pravnoj zaštiti dopušteno samo autoru). Rezultati analize tla i gnojidbene preporuke čuvaju se u Excel (csv) datotekama za naknadnu statističko-grafičku agroekonomsku analizu i management hraniva.

Naime, nakon žetve i utvrđivanja visine prinosa lako je utvrditi stupanj veze između gnojidbe i prinosa, odnosno profitabilnost gnojidbe, input i output hraniva, a u višegodišnjem proračunu gnojidbe i bilancu hraniva, sukladno EU normama.

Uvođenjem računalnog kalkulatora/modela za proračun gnojidbe uvažavaju se svi bitni aspekti suvremene primarne produkcije kao što su agrološki (vodi se računu o plodnosti, odnosno zdravlju tla i potrebama biljke), ekološki (smanjuje se opasnost od onečišćavanja okoliša, posebno podzemnih voda), ekonomski (zadovoljavaju se potrebe biljaka ovisno o stanju tla i usjeva, plodnosti tla, realno planira visina prinosa, uvodi bilanca hraniva, odnosno planira gnojidba za jedno ili višegodišnje razdoblje i izbjegava problem luksuzne ishrane usjeva uz opasnost onečišćenja podzemnih voda suviškom dušika), tehničko-tehnološki (gnojidba se usuglašava s agrotehničkim normama, odnosno način primjene gnojiva ovisi o njegovoj vrsti, mogućnosti miješanja i kombiniranja organske i mineralne gnojidbe itd.) i sociološki (poljoprivredni proizvođač postaje farmer koji se služi inženjerskim metodama u proizvodnji hrane, planira i ekonomski promišlja).

Kompjutorska adaptacija procesa gnojidbenih preporuka usjeva, ima nad konvencionalnim postupkom (analiza tla + čovjek + iskustvo + tablice graničnih vrijednosti + tablice iznošenja hraniva + vrijeme + moguća pogreška) značajne prednosti u brzini, točnosti, mogućnosti sistematizacije, čuvanja i pretraživanja raspoloživih podataka o plodnosti proizvodnih površina uz racionalizaciju gnojidbe koja je prilagođena potrebama biljke, agroekološkim uvjetima, visini ulaganja u proizvodnju i dr.

U ALR kalkulator potrebno je unijeti četiri grupe podataka:

- 1) Ime datoteke u kojoj će biti sačuvani podaci i rezultati proračuna gnojidbe, podaci o vlasniku, lokaciji/regiji i veličini parcele,
- 2) Tehnološki podaci (vrsta, planirana visina prinosa, predusjev i količina žetvenih ostataka, organska gnojidba i godina od njene primjene),
- 3) Rezultati analize tla (pH(KCl), humus %, AL-P₂O₅ i K₂O u mg 100 g⁻¹ tla i teksturna grupa tla) i
- 4) Raspoložive formulacije za kompleksna, pojedinačna mineralna i raspoloživa organska gnojiva (slika 11.13.).

Za unos podataka predviđena je posebna maska s poljima i padajućim izbornicima za unaprijed definirane vrijednosti ispod koje je tipka za proračun gnojidbe i spremanje podataka u csv datoteku (čitljivu Excelom). Uneseni podaci i rezultati proračuna osnovne gnojidbe ispisuju se u dva tekstualna polja s desne strane kalkulatora. Gnojidbena preporuka sadrži, pored potrebne doze (potrebna količina aktivne tvari u kg ha⁻¹) i količine kompleksnog i pojedinačnih gnojiva (po hektaru i za parcelu), "idealnu" formulaciju mineralnog gnojiva i "bilancu" zadovoljenja hraniva u odnosu na proračunatu potrebu. Doza N

iskazana je kao ukupna potreba kompleksnog gnojiva i uree, a količina N za prihranu u obliku KAN-a. "Idealna" formulacija pomaže kod izbora kompleksnog i pojedinačnih gnojiva (kad je to potrebno) kako bi se uz pomoć "bilance" NPK potreba NPK za planirani prinos i gnojidba uravnotežili (uz tehnološki prihvatljivo odstupanje).

Poljoprivredni fakultet u Osijeku ZAVOD ZA KEMIJU, BIOLOGIJU I FIZIKU TLA Trg sv. Trojstva 3 HR-31000 Osijek http://ishranabilja.com.hr e-mail: vladimir@ishranabilja.com.hr tel.: +385-31-224-248			ALR kalkulator Proračun gnojidbe ratarskih usjeva Vladimir Vukadinović [®] , HR-31000 Osijek, listopad 2009. god. Public ver. 5.00, rezolucija min. 1024x768		
Unos podataka:			PODACI O PARCELI:		
Ime datoteke:	Područje :		Vlasnik:	Vladimir Vukadinović	
Gnojdba šeć. repe	Osijek/B. Manastir		Adresa:	Trg Sv. Trojstva 3	
Prezime i ime:	Adresa:	Naziv parcele:	Naziv parcele:	T-012	
Vladimir Vukadinović	Trg Sv. Trojstva 3	T-012	Površina parcele:	25 ha	
Površina parcele ha:	Vrsta usjeva:	Planirani prinos:	Usjev:	Šećerna repa	
25	šećerna repa	65	Planirani prinos:	65 t/ha	
Org. gnojivo t/ha:	God. prim. stajnjaka:	Predusjev:	Začrano stajnjaka:	0 t/ha	
0	bez org. gnoja	kukuruz	God. prim. staj.:	bez org. gnoja	
Žetveni ostaci t/ha:	pH (KCl):	Humus %:	Žetveni ostaci:	4 t/ha	
4.0	6.25	2.45	pH (KCl):	6.25	
AL-P ₂ O ₅ mg/100g:	AL-K ₂ O mg/100g:	Tekstura tla:	Humus %:	2.45	
24.37	23.43	srednja	AL-P2O5:	24.37 mg/100g	
Formulacija NPK :	P ₂ O ₅ gnojivo :	K ₂ O gnojivo :	AL-K2O:	23.43 mg/100g	
6 : 18 : 36	Bez P-gnojiva	Bez K-gnojiva	Rata N-min:	158.2 Kg N/ha/god.	
<input type="button" value="Spremi u bazu i računaj gnojidbu"/> <input type="button" value="Briši ispis"/>			GNOJIDBENA PREPORUKA (kg):		
			Idealna formulacija:	12:7:26	
			Potreba akt. tvari:	175:51:195 kg/ha	
			NPK:	413, za 25ha 10325 kg	
			Urea:	163, za 25ha 4075 kg	
			KAN:	278, za 25ha 6950 kg	
			Bilanca NPK hraniva u kg/ha:		
			0 : 23+ : 46- => Nije izbalansirano!		
			bez P		
			bez K		

Slika 11.13. Izgled public verzije ALR kalkulatora usjeva (autor: V. Vukadinović)

Public verzija ALR kalkulatora uključuje modul za procjenu potencijala N-mineralizacije prema konceptu *Seligman and van Keulen, 1981*. (PAPRAN model) koji uzima u obzir tri tipa organskog N u tlu: a) svježi organski N (ostaci usjeva i mikroba masa), b) aktivni organski N u humusu i c) stabilni organski N u humusu koji zajedno čine ukupni organski dušik tla. Prvo se, prema originalnoj formuli autora ove knjige, procijeni faktor mineralizacije (fpH) ovisan o pH(KCl) tla te zatim ograniči najveća i najmanja količina mineraliziranog N-NO₃ (izbjegavanje ekstrema koji su inače u opoziciji s "normalnim" uvjetima). Obje korekcije su empirijske naravi, modelirane multiregresijskom analizom na temelju baze podataka Zavoda za kemiju, biologiju i fiziku tla iz Osijeka pa je primjena izvan agroekološkog područja istočne Hrvatske moguća, ali uz nešto veći rizik. Zatim se utvrde konstante mineralizacije organske tvari ovisne o prosječnoj temperaturi tla i raspoloživoj vodi kroz vegetaciju usjeva (veza s klimatskim i zemljišnim podacima), intenzitet N i P-mineralizacije žetvenih ostataka ovisno o C:N i C:P omjeru, odnosno C:N:P združenom omjeru (uzima se da je mineralizacija najveća kada je C:N < 25:1, odnosno C:P < 200:1). Konačno se utvrdi ukupna, odnosno vegetacijska rata mineralizacije N i P, preračuna na

bioraspoloživu količinu (efikasnost) za što se umanjuje potrebna doza N i P koju treba unijeti gnojidbom.

Potrebna količina P izračunava se na temelju iznošenja planiranim prinosom uz dvostruku korekciju učinkovitosti P-gnojidbe nelinearnim skor funkcijama s obzirom na utjecaj pH-vrijednosti i AL-raspoloživost fosfora. Ukupno potrebna količina kalija korigira se, prvo nelinearnom skor funkcijom s obzirom na njegovu AL-raspoloživost i još jednom, ali samo za $\pm 20\%$ s obzirom na teksturnu grupu (fiksacijsku moć tla). Kada se ne primjenjuju pojedinačna P ili K gnojiva, moguće odstupanje od potrebe usjeva za P i K ravnomjerno se raspoređuje na P i K, dok se kod primjene pojedinačnih gnojiva proračun obavlja uz dopušteno odstupanje (ukupno odstupanje sva tri glavna hraniva $\pm 15 \text{ kg ha}^{-1}$). Kako je već naglašeno, skor funkcije za P i K su oblikovane empirijski na temelju multiregresijske analize baze podataka o analizama tla s područja istočne Hrvatske, a validacija je obavljena kompjutorskom simulacijom primarne organske produkcije i praktično kroz višegodišnje gnojidbene preporuke za stvarne proizvodne uvjete, stoga ih je preporučljivo za druge agroekološke regije svakako provjeriti i korigirati.

Osnovna NPK gnojidba podrazumijeva unos cjelokupne doze P i K prije osnovne obrade radi homogene distribucije u oraničnom sloju (godišnja migracija P i K kroz solum je vrlo mala i treba je zanemariti ako se ne radi o ekstremno lakim tlima). Nasuprot P i K, pokretljivost N (posebno N-NO_3) je velika po profilu i vremenu te se njegovoj vremenskoj primjeni poklanja posebna pozornost, odnosno usklađuje se primjena s najvećim zahtjevom usjeva za N. Stoga se ALR kalkulatorom na srednje teškim tlima u osnovnoj gnojidbi proračunava 50 % ukupno potrebne količine N, na lakim tlima 35 %, a na teškim 65 % što se daje kompleksnim gnojivom (ekspertna verzija preporučuje još nižu primjenu N u jesen, pri čemu se mora naglasiti činjenica kako se u Hrvatskoj ne proizvode pojedinačna P i K gnojiva), a kad to nije dovoljno preporuka sadrži ostatak N u obliku uree za primjenu u osnovnoj gnojidbi. Ostatak dušika primjenjuje se u prihrani u obliku KAN-a prema proračunu ili se, što je bolje, korigira N-doza za prihranu na temelju N_{\min} metode. U slučaju da je nemoguće izvesti po tom načelu N-gnojidbu (situacije kada je kompleksno gnojivo s naglašenim N, npr. uporaba formulacije 15:15:15) nedostatak N do ukupne potrebe, nakon podmirenja P i K kompleksnim gnojivom, ravnomjerno se raspodjeli na ureu i KAN.

Pristupanjem Hrvatske EU morat će se usuglasiti osnovna primjena gnojiva s EU praksom (posebice "*Nitratnom direktivom*") što podrazumijeva izbjegavanje bilo kakve uporabe gnojiva tijekom zime (kad nema vegetacije) kao i smanjivanje doze, naročito dušika, ali i P i K. To će zahtijevati i ponovno uvođenje u proizvodnju "Petrokemije" d.o.o. pojedinačnih P i K mineralnih gnojiva, kojih sada nema u proizvodnom programu pa su trenutno poljoprivredni proizvođači

prisiljeni primjenjivati dušik u osnovnoj gnojidbi i kad to nije potrebno ili pak uvoziti pojedinačna gnojiva.

ALR kalkulator nudi više različitih formulacija kompleksnih gnojiva (prema asortimanu "Petrokemija" Kutina) i najčešća pojedinačna P i K gnojiva. Izbor gnojiva potpomognut je NPK "bilancom". Naime, uzima se da je gnojidba usklađena s potrebom usjeva kad ukupno odstupanje nije veće od 15 kg aktivne tvari po ha (oznaka OK!). U suprotnom ispisuju se oznake (+) za suvišak ili (-) za manjak pojedinog hranjivog elementa.

Ekspertna verzija ALR kalkulatora posjeduje i druga vrlo napredna i sofisticirana svojstva, npr.: daje pisana objašnjenja preporučene gnojidbe, upute i savjete kako otkloniti "uska grla" u proizvodnji, prikazuje proračun potrebe kalcizacije, izračunava potencijal mineralizacije organske tvari tla (humus, žetveni ostaci, organska gnojidba) i potrebu dušika za sprječavanje N-depresije. Osim toga, omogućava prikaz osnovnih rezultata gnojidbene preporuke u programu Google Earth i time ukazuje na prostornu varijabilnost potrebe u gnojidbi te sve podatke i rezultate računalne obrade "izvozi" u "izlaznoj interpretacijskoj bazi" (slika 11.15.) uz moguću vizualizaciju GIS-om, odnosno prikaz tematskim kartama (slike 11.14., 11.16., 11.17., 11.18. i 11.19.). Na taj je način otvorena mogućnost da se u sustavu kontrole plodnosti izvrši rajonizacija područja za različite razine agrotehnike, kao i različite proizvodne namjene (usjevi s posebnim zahtjevima, trajni nasadi, sjemenska proizvodnja i dr.). Također, proces izračuna potrebe u gnojidbi obuhvaća znatno više dopunskih indikatora o tlu, usjevu, agrotehnici i klimi, a kod potrebe hraniva uzima u obzir "dinamičko iznošenje" (veću učinkovitost korištenja hraniva kod visoke razine agrotehnike, priming i humat efekt, genetska svojstva i visoku fiziološku adaptabilnost modernih kultivara i dr.). Primjer konkretnog proračuna gnojidbe ALR_{xpd} ekspertnom verzijom prikazuje slika 11.15. (uvjetno ekspertnom, jer se novo pravilo ili *rules* za tumačenje rezultata analize tla i gnojidbene preporuke ne dodaje automatski kad program ustanovi da nema dobro rješenje za konkretnu situaciju).

Pored ostalog, ekspertna verzija ALR kalkulatora za izračun potrebe u gnojidbi usjeva uključuje procjenu relativne pogodnosti tla za usjeve kako bi se mogla realno procijeniti moguća visina prinosa šest najzastupljenijih usjeva istočne Hrvatske u narednom razdoblju, odnosno do nove analize tla za konkretnu parcelu. U tu svrhu koristi se više indikatora pogodnosti zemljišta koji uključuju raspoloživost hranjivih tvari, sadržaj humusa i karbonata u tlu, pH tla, ali su uključeni i podaci o biogenosti, uređenosti zemljišta, intenzitetu primjene agrotehnike, geopoziciji (nagib, ekspozicija, nadmorska visina) i klimatskim značajkama područja. Proračun se obavlja funkcijskim modelom u kojem su "relativne težine" indikatora predstavljene nelinearnim skor funkcijama, a njihov ukupni značaj, odnosno relativna pogodnost zemljišta za usjeve je vrijednost dobivena po principu *Liebscherovog "zakona optimuma"*:

$$\text{Relativna pogodnost \%} = \frac{\sum_1^n (I - I_{\min})}{(n - 1)} \times \frac{I_{\min}}{100}$$

Uzorak br.: 10366; RP% = 54,68; Potreba NPK kg/ha = 170:87:175; pH-KCl = 4,91; Hy = 2,93; Humus % = 1,43; AL-fosfor = 17,1; AL-kalij = 20,20; Šećerna repa 70 t/ha



Slika 11.14. Interpretacijska online baza podataka o tlu s prikazom osnovnih informacija o potrebi gnojidbe usjeva (prelaskom pokazivača miša preko lokacije uzorka pojavljuju se podaci analize tla i gnojidbena preporuka iznad karte; <http://ishranabilja.com.hr>)

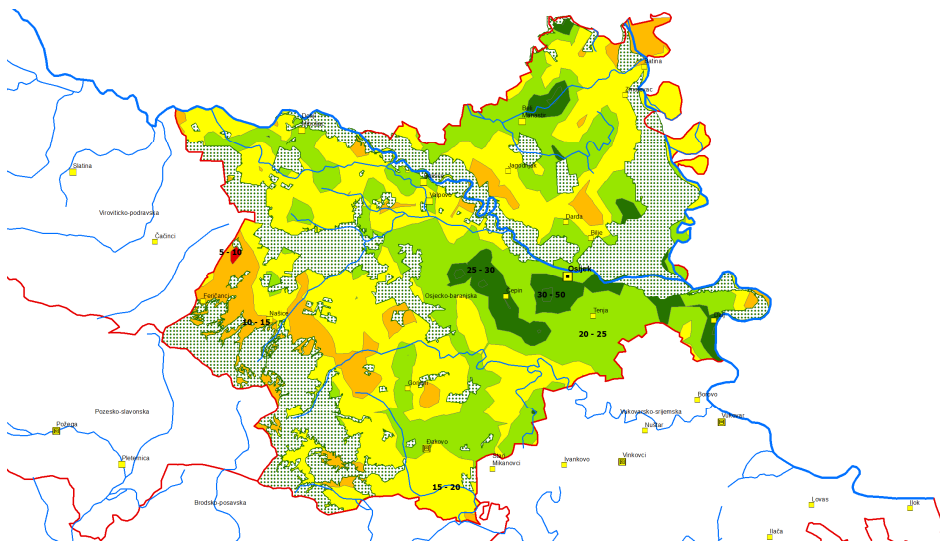
Zavod za kemiju, biologiju i fiziku tla Poljoprivrednog fakulteta u Osijeku
Kandid Premijer d.o.o., Sirovinska služba i laboratorij
Gnojdbena preporuka na temelju analize tla



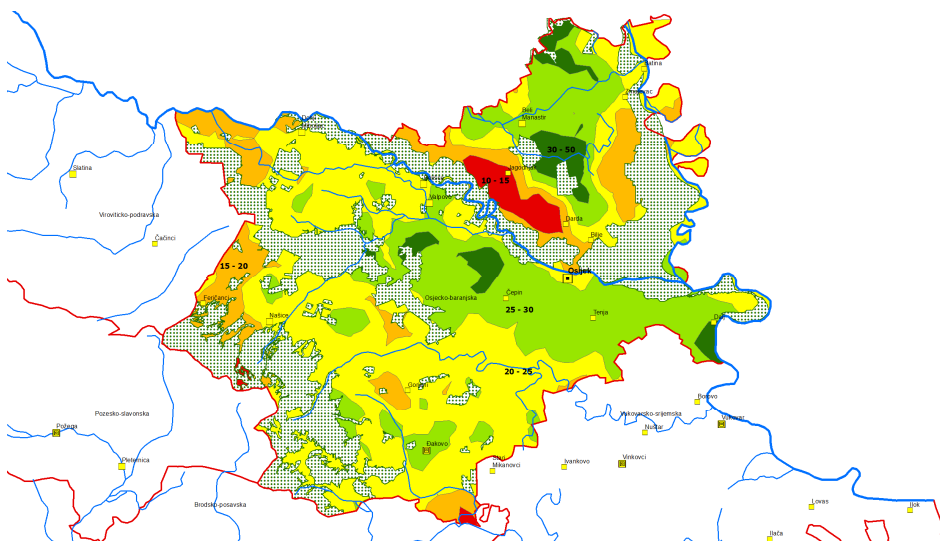
Podaci i kemijska analiza tla - Kandid Premijer d.o.o.			
Vlasnik:	Vučković Željko		
Adresa:	31554 Veliškovci Gat Kralja Zvonimira 8		
Parcela:	18.3174@45.71571	Geopozicija:	duljina = 18.3174 E; širina = 45.71571 N
Usjev:	Šećerna repa	RP%:	53.12% (srednje pogodno)
Plan. prinos:	80 t/ha	Površina:	5 ha
Predusjev:	Ječam ozimi	Žet. ostaci:	1 t/ha
Stajnjak:	0 t/ha	God. prim. staj.:	bez org. gnoja
Rezultati agrokemijske analize tla - Kandid Premijer d.o.o.			
pH _{KCl}	4.32	pH _{KOH}	5.58
Humus %:	1.86	AL-P ₂ O ₅	12.7 mg/100g
AL-K ₂ O	25.42 mg/100g	KIK:	11.54* cmol(+) kg ⁻¹
Hy:	4.36 cmol(+) kg ⁻¹	*	<i>približno izračunata vrijednost</i>
Preporuka gnojidbe - Poljoprivredni fakultet, KBF			
Mineralno gnojivo:	7:20:30	Potreba NPK:	170:96:108 (kg/ha)
Preporuka NPK:	420 (7:20:30 kg/ha)	Idealni omjer:	10:9:10 (NPK)
Urea:	92 (42 N kg/ha)	KAN:	365 (99 N kg/ha u startu i/ili prihrani)
P-gnojivo:	0 (Bez P-gnojiva kg/ha)	K-gnojivo:	0 (Bez K-gnojiva kg/ha)
NPK bilanca:	0 : 12- : 18+ (Nije izbalansirano!)		
Kalcijacija:	Saturacija bazama = 85%	Potreba Ca:	2051 kg/ha
Potreba CaO:	2871 kg/ha	Karbokalk:	6563 kg/ha
Oborine:	751 - 900* (mm/god.)	Temperatura:	10.5* (°C/god.)
Rata N-min:	23* (kg N/ha/god.)	N-deficit:	Nema žetvenih ostataka!
Približna potreba hraniva u narednoj godini (kg/ha aktivne tvari)			
Ozima pšenica:	124:78:90 za 5.05t/ha	Ječam ozimi:	96:53:92 za 4.78 t/ha
Soja:	132:93:128 za 3.19 t/ha	Suncokret:	110:78:127 za 2.92 t/ha
Kukuruz:	183:107:161 za 7.97 t/ha	Uljana repica:	103:91:121 za 2.92 t/ha
Gnojdbene doze mogu biti ograničene zbog ekonomskih, ekoloških i biljno-fizioloških razloga! Komputerski program: Prof. dr. sc. Vladimir Vukadinović			

U Osijeku 15.06.2011. god.

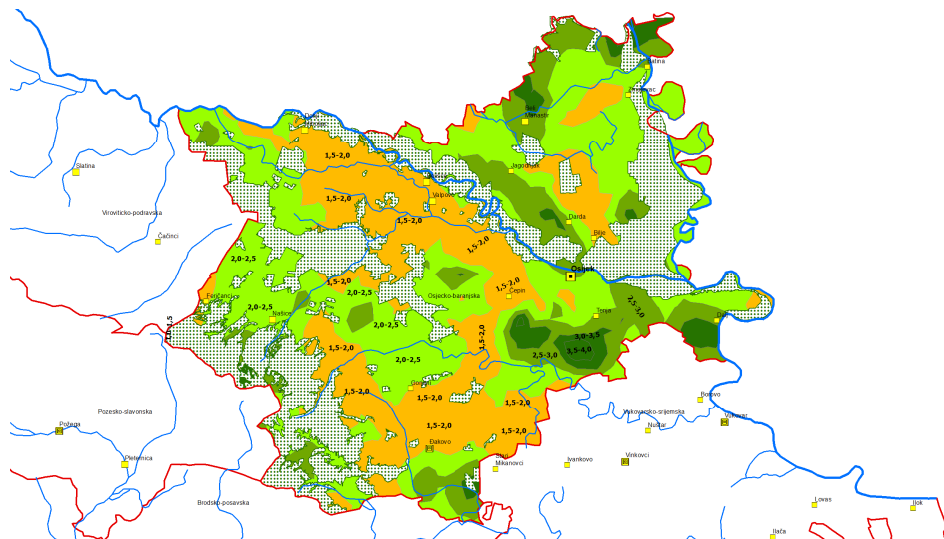
Slika 11.15. Komputerska gnojdbena preporuka (autor: Vladimir Vukadinović)



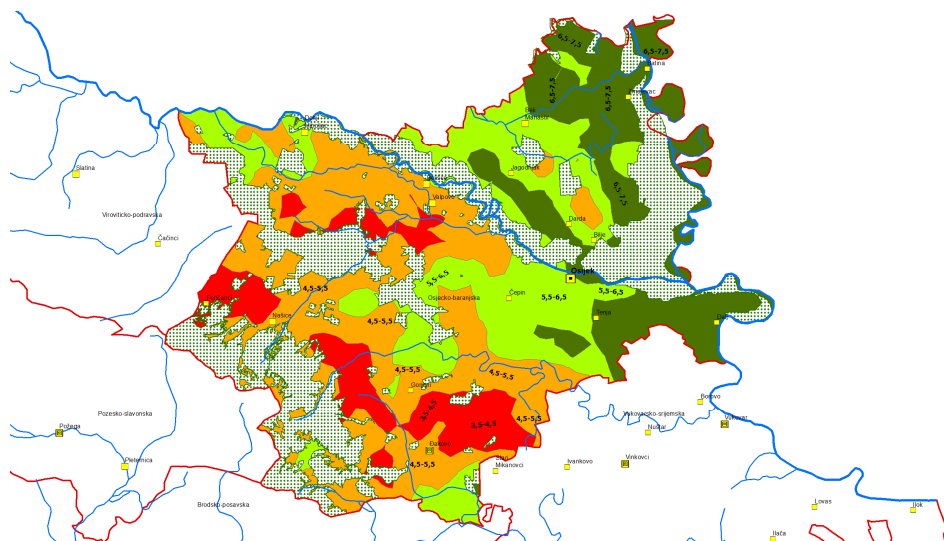
Slika 11.16. Predikcija AL-P₂O₅ Osječko-baranjske županije (kriging, ~20.000 uzoraka, Vukadinović, 2011.)



Slika 11.17. Predikcija AL-K₂O Osječko-baranjske županije (kriging, ~20.000 uzoraka, Vukadinović, 2011.)

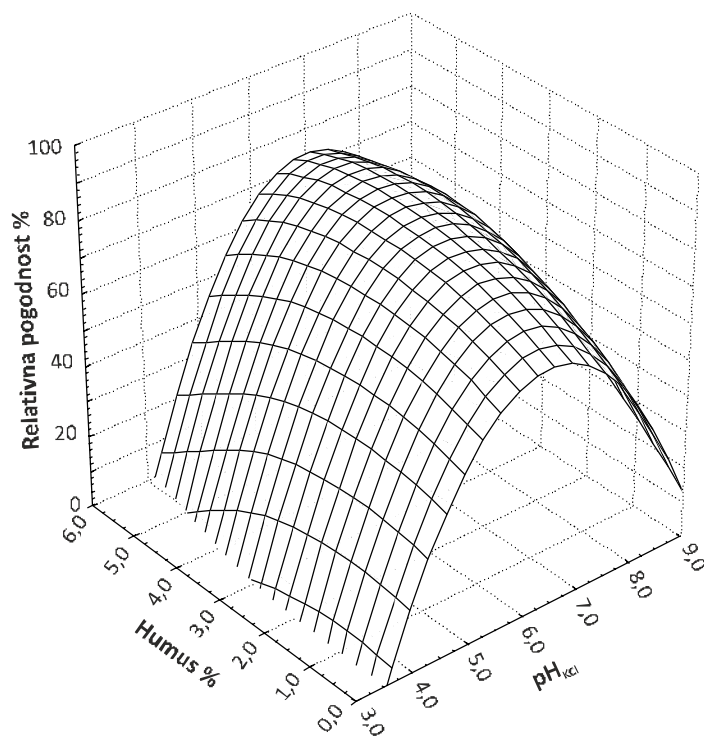


Slika 11.18. Predikcija humusa Osječko-baranjske županije (kriging, ~20.000 uzoraka, Vukadinović, 2011.)



Slika 11.19. Predikcija pH_{KCl} Osječko-baranjske županije (kriging, ~20.000 uzoraka, Vukadinović, 2011.)

Međusobna interakcija pojedinih indikatora relativne pogodnosti, sukladno prirodnim zakonitostima, nelinearnog je tipa, a model se neprestano usavršava uvođenjem novih indikatora i njihove povezanosti (slika 11.20).



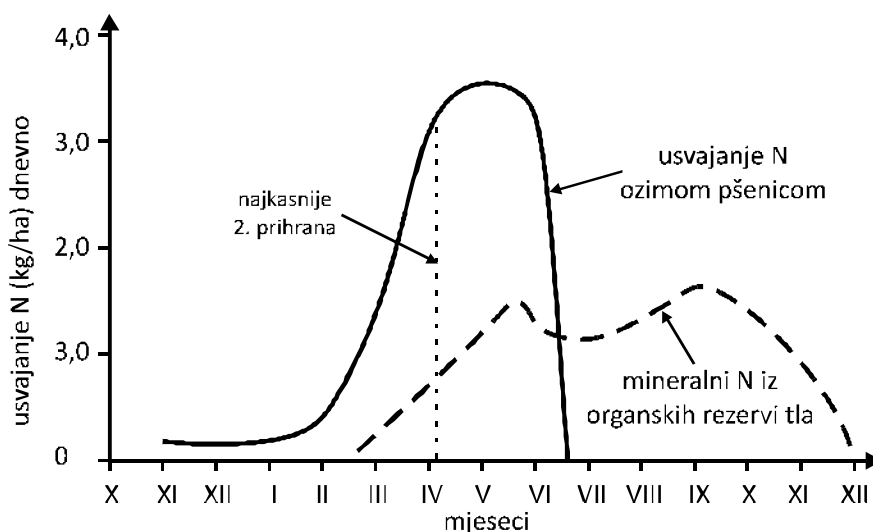
Slika 11.20. Interakcija koncentracije humusa i pH(KCl) kao indikatora relativne pogodnosti zemljišta za usjeve (Vukadinović, 2010.)

11.2.9. N_{min} metoda

Brza transformacija svih oblika dušika u tlu i intenzitet mobilizacije organskih rezervi ovisan je o aktivnosti mikroorganizama, odnosno velikom broju klimatskih, zemljišnih i bioloških čimbenika. Pored toga i velika pokretljivost nitrata konvekcijom (strujanje mase ili *massflow*) dugo vremena utvrđivanje potrebe za N-gnojibdom je isključivala iz grupe kemijskih analiza tla jer je metodologija bila vrlo nepouzdana. Stoga se doziranje dušičnih gnojiva do pojave N_{min} metode temeljilo uglavnom na iskustvima višegodišnjih pokusa pri čemu se polazilo od najnepovoljnijeg slučaja te unosile, vrlo često, prevelike količine. Bilo je i ranije različitih, manje-više neuspješnih pokušaja, prije svega s biološkim metodama, radi procjene mobilizacijske sposobnosti nekog tla. U tu svrhu korištene su različite inkubacijske metode u anaerobnim (za procjenu amonifikacijske) i aerobnim uvjetima (za procjenu nitrifikacijske sposobnosti

tla), zatim različite mikrobiološke pa i kemijske metode kao što je utvrđivanje lakohidrolizirajućeg dušika, odnosno kemijski labavo vezanog dušika koji tijekom vegetacije podliježe mineralizaciji i dr.

N_{min} metoda polazi od pretpostavke da se utvrđivanjem količine mineralnih oblika dušika prije sjetve za proljetne kulture ili pred busanje za ozima žita može utvrditi potrebna količina dušika. Zbog toga se uzorci tla za N_{min} metodu uzimaju iz zone do koje dopire korijenov sustav, a metoda uvažava potrebe biljaka tijekom vegetacije. Slika 11.21. prikazuje tipično usvajanje dušika pšenicom i ratu mineralizacije organske tvari iz čega je jasno kako je rata mineralizacije značajna nakon maksimalnih potreba pšenice za dušikom.



Slika 11.21. Dnevno usvajanje N ozimom pšenicom i intenzitet mineralizacije N iz organske tvari (Lowrison, 1989.)

Pri utvrđivanju potrebe N-prihrane ozime pšenice N_{min} metodom, pred prvu prihranu uzimaju se uzorci tla do 60 cm dubine. Iz svježih uzoraka (što podrazumijeva čuvanje uzoraka tla u hladnjaku ili kemijsku analizu neposredno nakon uzimanja uzoraka) ekstrahiraju se NH_4^+ i NO_3^- pomoću NaCl, KCl, $CaCl_2$ ili posebno nitrati vodom, a amonijski dušik u KCl te utvrdi količina mineralnog dušika (N_{min}) u ispitivanom sloju tla. Budući da su kod pšenice uobičajene dvije prihrane i to prva prije proljetnog kretanje vegetacije (u busanju), a druga prije najvećeg porast abiljaka (u početku vlatanja), prva prihrana obavlja se sredinom busanja (ne prerano dok pšenica još miruje). U prvoj prihrani primjenjuje se 2/3 nedostatka dušika potrebnog za ostvarenje ciljnog prinosa (jer korijen nije još dostigao punu dubinu), a pred drugu prihranu uzima se uzorak s dubine 60-90 cm i na temelju ustanovljenog sadržaja N_{min} prihrani s 1/3 N-doze. Kompjutorski model preporuke prihrane pšenice na temelju N_{min} metode (Vukadinović, 1993., public verzija: <http://ishranabilja.com.hr>) uzima u obzir sve potrebne parametre

(sadržaj mineralnih oblika N u tlu, vlagu tla, vrijeme uzimanja uzoraka i teksturnu klasu tla) za procjenu N-doze, kao što se vidi na slici 11.22. Metoda je izmijenjena u odnosu na originalnu jer je eksperimentalno utvrđeno za agroekološke uvjete istočne Hrvatske otežano usvajanje amonijevog dušika zimi te se učinkovitost njegovog usvajanja prilagođava ovisno o teksturi, a također se korigira i potreba N ovisno o fenofazi i sklopu ozimih žita.

Zavod za kemiju, biologiju i fiziku tla
PREPORUKA ZA PRIHRANU
na temelju N_{\min} metode

Parcela:	T - 04				
Broj uzoraka:	6	Broj analiza:	2	Analiza (1/2):	1
Tekstura tla:	srednja	Kemijaska analiza	dubina tla (cm)		
Fenofaza:	početak busanja		0 - 30	30 - 60	60 - 90
Sklop:	normalan	Vlaga tla (%)	22,80	19,90	18,70
Biljna vrsta:	pšenica	N-NH ₄ (ppm)	1,50	0,83	1,90
		N-NH ₄ (kg/ha)	8,16	4,33	9,47
		N-NO ₃ (ppm)	7,10	5,30	8,75
		N-NO ₃ (kg/ha)	38,63	27,79	40,23

Ne više od 50 kg N ha⁻¹

PRIHRANA kg/ha	Planirani prinos t/ha						
	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
Potreba N	43,0	52,0	61,0	70,0	79,0	88,0	97,0
KAN 28%	153,5	178,6	178,6	178,6	178,6	178,6	178,6
AN 33,5%	128,3	149,3	149,3	149,3	149,3	149,3	149,3

Slika 11.22. Primjer N_{\min} preporuke za prihranu pšenice

Gnojidba šećerne repe (i drugih proljetnih usjeva) na temelju N_{\min} metode mora uzeti u obzir i količinu mineralnog dušika iz procesa mineralizacije koji je intenzivan u tijeku vegetacije šećerne repe (proljeće/ljeto), za razliku od zimske vegetacije pšenice (vidi poglavlje Makroelementi, dušik). Naime, kod pšenice se prihrana dušikom odvija zimi ili u rano proljeće, bez mineralizacije organske tvari tla (slika 11.21.). Stoga, ako je ukupna potreba šećerne repe 250 kg N ha⁻¹, procijenjena mineralizacija 80 kg N ha⁻¹, a rezerva mineralnog N utvrđena analizom u proljeće (prije sjetve) 100 kg N ha⁻¹, preostaje da se predsjetveno ili prihranom doda 70 kg N ha⁻¹.

Primjer N - prihrane pšenice na temelju N_{\min} metode:

Za prinos od 6,0 t ha⁻¹ zrna pšenice potrebno je 162 kg N ha⁻¹ (6,0 t ha⁻¹ × 27 kg N ha⁻¹; vidi tablicu 11.10.). N_{\min} metodom je prije prve prihrane (0-60 cm) utvrđeno da u tlu ima 100 kg N_{\min} ha⁻¹, a prije druge (60-90 cm) 35 kg N_{\min} ha⁻¹. To znači da u prvoj i drugoj prihrani pšenice treba primijeniti:

$$1. \text{ prihrana: } (162 - 100) \times \frac{2}{3} = 41,3 \text{ kg N ha}^{-1}$$

$$2. \text{ prihrana: } (162 - 35) \times \frac{1}{3} = 42,3 \text{ kg N ha}^{-1}$$

Koristeći N_{\min} metodu s dva uzimanja uzoraka tla, u gornjem primjeru primijenjeno je ukupno prihranama $83,6 \text{ kg N ha}^{-1}$, ne računajući osnovnu gnojidbu. Ako se N_{\min} metoda za utvrđivanje potrebe prihrane pšenice provodi samo uzimanjem uzoraka tla 0-60 cm u busanju, tada se utvrđeni manjak od 62 kg N podijeli u dvije jednake rate, s tim što se u vlatanju može dodati do 30 % više od utvrđene količine (bez veće opasnosti od polijeganja pšenice).

Primjer N-prihrane šećerne repe na temelju N_{\min} metode:

Kod šećerne repe, ovisno o agroekološkim uvjetima, postoji više inačica primjene N_{\min} metode. Npr. u Nizozemskoj se uzorci tla uzimaju prije sjetve do 60 cm dubine i izračunava se potreba za N-gnojidbom prema izrazu:

$$N_{OP} = 220 - 1,7 \times N_{\min}$$

U Belgiji se često rabi izraz:

$$N_{OP} = 290 - 1,5 \times N_{\text{index}}$$

(gdje N_{index} uzima u obzir N_{\min} do 60 cm dubine, koncentraciju humusa, uporabu organskog gnoja, sadržaj gline i strukturu tla).

Kako je šećerna repa vrlo "senzitivna" na manjak ili suvišak dušika, u daljnjem tekstu detaljno je opisana procedura za provođenje N_{\min} metode.

Uzimanje uzoraka tla za N_{\min} za utvrđivanje N-potrebe šećerne repe:

Kako bi se pouzdano utvrdo status dušika šireg područja (npr. sirovinskog područja neke od šećerana), iskustvo pokazuje kako je prije proljetne primjene dušika potrebno izabrati približno 1/10 površina predviđenih za sjetvu šećerne repe, pazeći da su raspoređeni po cijelom proizvodnom području. Na homogenim parcelama, bez obzira na veličinu, odrede se dvije lokacije GPS-om, a na heterogenim najmanje tri (npr. ravno, depresija, uzvišenje, nagib i sl.). Na svakoj lokaciji treba uzeti uzorak tla s dvije dubine (0-30 cm Ø 2,5 cm, 30-60 cm Ø 2,0 cm) u krugu promjera 10 m s 3 uboda sondom. Sva tri uboda sondom iste dubine treba spojiti u jedan uzorak. Dakle, na homogenim parcelama su dvije lokacije × dvije dubine = 4 uzorka tla za analizu što daje dvije N_{\min} vrijednosti za proračun proljetne N-gnojidbe šećerne repe pri čemu je utvrđena i vertikalna raspodjela N_{\min} u profilu 0-60 cm. U slučaju kad preostane malo vremena do sjetve, obje dubine treba spojiti u jedan uzorak te u tom slučaju svaka homogena parcela ima samo dva uzorka tla, a nehomogena tri za analizu (ali je tada nepoznata vertikalna distribucija N_{\min}).

Proračun proljetne N-gnojidbe šećerne repe:

Rezultate analize (ppm) N_{\min} do 60 cm (veljača/ožujak) treba preračunati u $N-NO_3$ i $N-NH_4$ u $mg\ kg^{-1}$ svježeg tla ($N-NH_4 = NH_4 \times 0,778$; $N-NO_3 = NO_3 \times 0,226$), a zatim u $kg\ N\ ha^{-1}$ zračnosuhog tla te se izračuna potreba N-gnojidbe šećerne repe:

Niski prinos ($< 55\ t\ ha^{-1}$): $N\ kg\ ha^{-1} = 170 - N_{\min} \times 1,75$

Srednji prinos ($56-70\ t\ ha^{-1}$): $N\ kg\ ha^{-1} = 185 - N_{\min} \times 1,75$

Visoki prinos ($> 71\ t\ ha^{-1}$): $N\ kg\ ha^{-1} = 200 - N_{\min} \times 1,75$

Izračunatu potrebu treba pomnožiti sa 100/27 za potrebnu količinu KAN-a.

Primjer:

N_{\min} metodom za šećernu repu utvrđeno je $85\ kg\ N\ ha^{-1}$, stoga je za visok prinos korijena šećerne repe potrebno:

$$KAN_{kg/ha} = (200 - 1,75 \times 85) \times 100/27 = 189,8$$

$$AN_{kg/ha} = (200 - 1,75 \times 85) \times 100/33,5 = 153,0$$

Izračunata količina N se unosi isključivo u obliku KAN-a ili AN-a (u proljetnoj N-gnojidbi šećerne repe ne treba koristiti ureu zbog negativnog utjecaja na tehnološku kakvoću šećerne repe) i to:

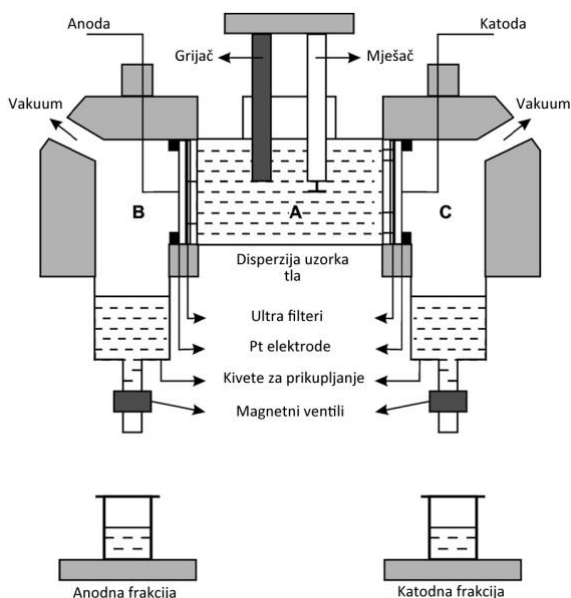
- Kad je utvrđena potreba N manja od $50\ kg\ ha^{-1}$ ($10-50\ N\ kg\ ha^{-1}$) gnojidbu treba obaviti ili samo startno ili ostaviti za prihranu.
- Kad je potreba $50-100\ N\ kg\ ha^{-1}$, treba primijeniti 50 % N predsjetveno, a 50 % u startu i/ili prihrani.
- Kad je potreba veća od $100\ N\ kg\ ha^{-1}$, ~40 % treba dati predsjetveno, ~30 % u startu (sa sjetvom) i ~30 % u prihrani.

Za parcele na kojima nije obavljena N_{\min} analiza tla, dušik treba primijeniti u proljeće analogno analiziranim sličnim parcelama (udaljenost, tip i plodnost tla, tehnologija, osnovna gnojidba). Opisana procedura izvrstan je pokazatelj koliko ima mineralnog dušika prije sjetve u zoni 0-60 cm i na kojoj se dubini nalazi. Nakon jeseni i zime s velikom količinom vodenog taloga mudro je jedan dio uzoraka tla za N_{\min} metodu uzeti s dubine 60-90 cm pa čak i 90-120 cm. Naime, na plodnim tlima dobre strukture (na kakvim se šećerna repa uglavnom uzgaja) može se očekivati u našoj agroklimatskoj zoni kako će se kapilarnim usponom vode, tijekom proljeća, mineralni dušik s te dubine premjestiti u zonu korijena.

11.2.10. EUF metoda

EUF metoda (elektroultrafiltracija) je metoda (Nemeth, 1976.) koja se temelji na ekstrakciji hraniva iz tla uz pomoć električnog jednosmjernog napona pri čemu se koloidi tla od vodene faze odvajaju pomoću specijalnih membranskih filtera (slika 11.23.). Aparatura omogućuje ekstrakciju kod različitih napona i

temperatura, a novi mikroprocesorski regulirani *EUF ekstraktori* održavaju jačinu struje konstantnom pa se može izdvojiti niz dobro definiranih frakcija, odnosno utvrditi neposredno pristupačna količina hraniva, kao i mobilne rezerve. Omjer mobilnih rezervi i hraniva u vodenoj fazi tla reprezentira puferni kapacitet tla i omogućava sagledavanje vremenske dimenzije raspoloživosti hraniva EUF metodom.



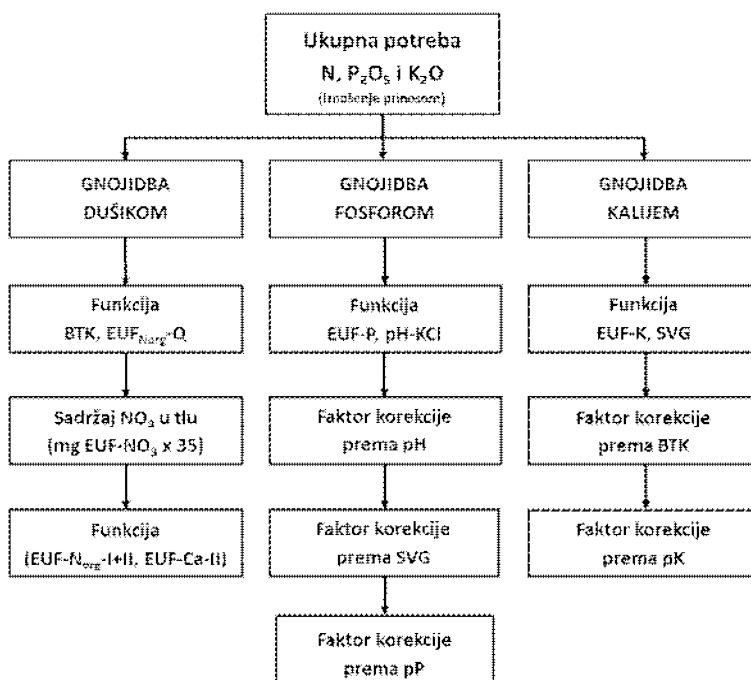
Slika 11.23. Shema rada EUF aparata

Raspoloživa hraniva EUF metodom ekstrahiraju se standardno u dvije frakcije, uvijek pri istom naponu i struji: prva kod 200 V, 15 mA i 20 °C u prvih 30 minuta ekstrakcije, dok se mobilne rezerve određuju kod 400 V, 150 mA i 80 °C u narednih pet minuta. Ovom metodom istovremeno se određuje raspoloživost P, K, N-NO₃, N-NH₄, mikroelemenata (Fe, Mn, B, Zn, Cu, "aktivne", odnosno "selektivno vezujuće gline", niskomolekularne frakcije dušika (EUF-N_{org}), Al itd. Organska, niskomolekularna frakcija tla čini prosječno 1-3 % ukupnih organskih rezervi tla i budući da samo ona podliježe mineralizaciji, zapravo predstavlja mobilnu rezervu dušika tla pa omjer između EUF-N_{org}/EUF-NO₃ karakterizira intenzitet mineralizacije dušika, odnosno mikrobiološku aktivnost tla.

Ekstrakcija EUF metodom obavlja se u vodenoj sredini pa se dvije dobro definirane frakcije (sukladno konceptu kemijskog potencijala hraniva, prva se smatra intenzitetom "I", a druga kvantitet hraniva "Q") mogu iskoristiti za izračunavanje potencijala (pP i pK) čime se uvodi dopunska mogućnost korekcije raspoloživosti hraniva, sukladno zakonitostima međusobnog odnosa iona u tlu.

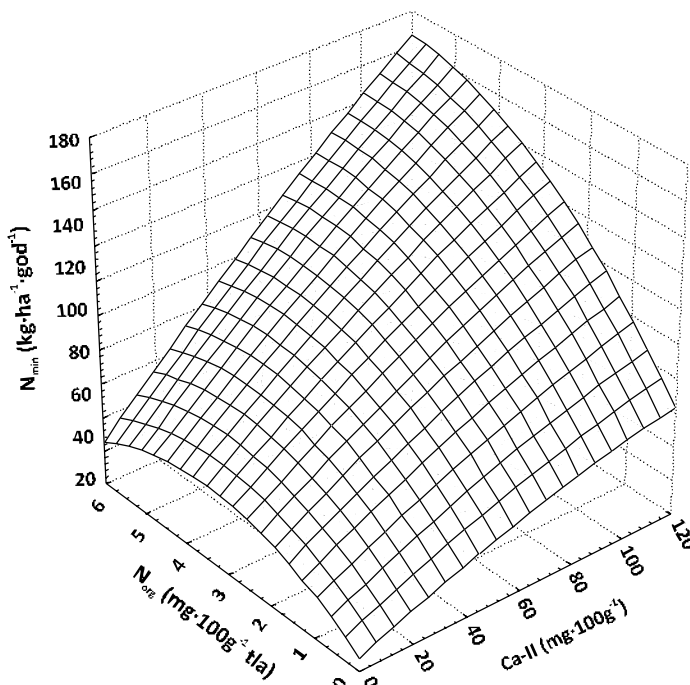
Rezultati EUF analize su vrlo brojni, a omjeri frakcija nekih elemenata (Q/I) međusobno i prema drugim parametrima analize vrlo su indikativni stoga je EUF

proračun preporuke gnojidbe ratarskih usjeva vrlo složen. Zapravo, kad se EUF preporuka gnojidbe obavlja konvencionalno, ona je uvijek djelomična, odnosno nepotpuna, jer je nemoguće bez kompjutera uzeti u obzir sve elemente analize i njihove međusobne odnose. Stoga je autor programa u suradnji s firmom DEMD Terra&Herba d.o.o. Osijek, kreirao kompleksnu kompjutorsku aplikaciju (Vukadinović, 1993.) koja se još uvijek razvija i nakon dulje pauze uvodi u primjenu na proizvodnom području Tvornice šećera Osijek. Princip proračuna gnojidbe ovim postupkom prikazuje shema na slici 11.24.



Slika 11.24. Shema proračuna gnojidbe šećerne repe na temelju EUF metode (SVG = selektivno vezujuća glina, BTK = broj teksturne klase tla; Vukadinović, 1993.)

Rezultati EUF i drugih potrebnih analiza uzoraka tla (volumna gustoća, pH, humus i teksturna klasa tla) čuvaju se u bazi podataka iz koje se preuzimaju prema jednoznačnom kodnom nazivu parcele (uz mogućnost postavljanja logičnih i matematičkih operatora za razgraničavanje nehomogenosti velikih parcela). Ekstrahirani podaci iz baze se pomoću složenog sustava matematičkih izraza i pomoćnih tablica preračunavaju u preporuku gnojidbe (slika 11.26.) koja uvažava pogodnost tla za šećernu repu kao i agrotehničke posebnosti te se, na temelju toga, izračunava doza i vrijeme unošenja pojedinih mineralnih i organskih gnojiva. Preporuka za gnojidbu dušikom za šećernu repu temelji se na konceptu ciljnog prinosa, a dobivena vrijednost se korigira s obzirom na teksturnu klasu tla, N_{org-Q} , sadržaj nitrata i očekivanu (potencijalnu) mineralizaciju organske tvari tla (slika 11.25.).



Slika 11.25. Mineralizacija dušika ovisno o $N_{\text{org I + II}}$ i Ca-II (Vukadinović, 2011.)

Ukratko, gnojidba dušikom šećerne repe uvažava sljedeće parametre:

- Prema *Németh i Wiklicky* (1982.) potreba šećerne repe za 9-10 t ha^{-1} šećera je $\sim 220 \text{ kg N}$, pri čemu se 1 mg $\text{EUF-NO}_3 100 \text{ g}^{-1}$ tla vrednuje kao 30 kg N ha^{-1} , a 1,0 mg $\text{EUF-N}_{\text{org}} 100 \text{ g}^{-1}$ tla kao 50 kg N ha^{-1} ;
- Németh et al.*, (1986.) smatraju da $\text{EUF-N}_{\text{org-Q}}$ upućuje na potencijal mineralizacije, ovisno o drugim uvjetima u tlu (humus, Ca, pH, tekstura tla, zastupljenost i aktivnost mikroorganizama i dr.);
- Model pomoću $N_{\text{org-Q}}$ korigira ukupne potrebe šećerne repe za dušikom ovisno o teksturnoj grupi tla;
- Kod $N_{\text{org-Q}} \approx 0,5$ potreba za N ovisi direktno o sadržaju nitrata i N_{org} , a kad je veći $N_{\text{org-Q}}$, veće je i naknadno dopremanje dušika (*Németh*, 1988.);
- Kasnije je utvrđeno kako 1 mg $\text{EUF-NO}_3 100 \text{ g}^{-1}$ tla znači $30\text{-}37 \text{ kg N ha}^{-1}$ (*Németh et al.*, 1991.), a da se 1 mg $\text{EUF-N}_{\text{org}}$ ne može jednako vrednovati s 50 kg N ha^{-1} na svim staništima. Što je niži ukupan sadržaj N_{org} , to je svaki mg N_{org} "vredniji", a veća opskrbljenost tla kalcijem daje rezultira s više mineraliziranog dušika.

Preporuka za gnojidbu šećerne repe na temelju EUF - metode

Parcela KTJ 08.95 Ovčara Šiljkovac Vlasnik: PPK "Kutjevo" d.d.

Uzoraka: 23

Prinos t/ha	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	B	Mn	CaO	Stajnjak
	Mineralna gnojidba (kg/ha)						t/ha
60	209	116	265		3,5	1,94	
55	189	106	243		3,5	1,90	
50	169	96	221		3,5	1,87	
45	149	87	199		3,5	1,84	
40	129	77	177		3,5	1,80	
Stajski gnoj (t/ha) + mineralna gnojidba (kg/ha)							
50 (1. god.)	119	66	161		1,5	1,39	20,0
50 (2. god.)	144	81	191		2,0	1,44	20,0
50 (3. god.)	154	87	205		2,5	1,46	20,0
50 (1. god.)	69	36	101		0,0	1,29	40,0
50 (2. god.)	119	66	161		0,5	1,39	40,0
50 (3. god.)	139	78	189		1,5	1,43	40,0
Fizikalno - kemijske				EUF analize makro			
Tip tla	Pseudoglej obron.		Analiza	20°C/200V	80°C/400V	Suma C 20°C+80°	Q C 80°C/20°
Tekstura	Glinasta ilovača			mg/100g			
VM + BTK	1,64	8	N - org	1,29	0,43	1,72	0,33
pH HOH	6,25		N - NO ₃	1,06	0,36	1,42	0,34
pH KCl	5,23		P	1,15	0,62	1,77	0,54
Humus %	1,47		K	8,36	3,04	11,40	0,36
Sel. vez. glina %	16,01		Ca	16,59	9,79	26,38	0,59
			Mg	2,61	1,07	3,67	0,41
Osn. gnojidba (kg/ha) gnojiva za prinos 60 t/ha korijena:			Na	2,30	0,35	2,65	0,15
			B				
7 - 20 - 30	589		Fe	1,05			
Urea	51	50% N	Mn	1,16			
P ₂ O ₅	- 41	Višak!	Zn	1,19			Relativna pogodnost tla za šećernu repu
			Cu				
KAN 27%	239		Al				slabo pogodno (38,4 %)
Mineralna gnojiva + stajnjak u 1. god. primjene s 40 t/ha za prinos 60 t/ha korijena:			Potencijal P i K				
			pK	1,9098			
			pP	6,2777			
7 - 20 - 30	189						
Urea	- 106	NE					
P ₂ O ₅	- 21	Višak!					
KAN 27%	54						

Slika 11.26. Preporuka za gnojidbu šećerne repe na temelju EUF – metode (Vukadinović, 1993.)

Proračun za gnojidbu fosforom i kalijem također se temelji na konceptu ciljnog prinosa, ali je korekcija dobivenih vrijednosti, s obzirom na velike razlike u kemijskim svojstvima tih dvaju elementa ishrane i specifičnim ponašanjem u tlu, bitno drugačija. Kod preporuke za fosfor početna vrijednost (odnošenje ciljnim prinosom) korigira se prvo trodimenzionalnom funkcijom raspoloživosti fosfora koja uzima u obzir obje frakcije fosfora i pH-vrijednost, zatim se korigira obzirom na izmjenjivi pH tla, sadržaj selektivno vezujuće gline i, konačno, prema potencijalu fosfora koji uzima u obzir pored P i intenzitet Ca i Mg. Temeljni principi EUF utvrđivanja potrebe šećerne repe za fosforom jesu:

- a) Prema *Wiklickom* (1982.) 1,5 mg P 100 g⁻¹ tla podmiruje potrebe šećerne repe, dok *Britton* (1988.) smatra dovoljnim 0,7-1,2 mg EUF-P-I;
- b) Topljivost i mobilizacija fosfata prema *Taha et al.*, (1982.) ovisi pored pH tla još i o teksturi tla (uglavnom glini) i karbonatima;
- c) Prema *Némethu* (1976.) glina značajno utječe na pristupačnost P te kad mu je sadržaj < 1,4 mg P 100 g⁻¹ tla, primjenjuje se korekcija na temelju sadržaja gline;
- d) Najvažniji čimbenik pristupačnosti fosfora je pH te je u modelu definirana njegova raspoloživost polinomijalnom funkcijom koja povezuje ukupni EUF-P, njegove frakcije i pH u KCl-u;
- e) U model je uključena i korekcija pomoću potencijala fosfora (pP) jer je utvrđeno da se dva tla, kod jednake količine ekstrahiranog fosfora, ipak razlikuju prema njegovoj pristupačnosti. Korekcijski faktor na temelju potencijala fosfora uzima u obzir utjecaj aktiviteta iona H⁺, Ca²⁺ i Mg²⁺ na pristupačnost fosfora u tlu i to u rasponu pP od 5,5 do 6,5, a faktor korekcije je najviše ± 25 % (0,75-1,25).

Osnovna preporuka gnojidbe kalijem korigira se prvo trodimenzionalnom funkcijom koja uzima u obzir obje EUF frakcije kalija i sadržaj selektivno vezujuće gline, zatim se korigira uz pomoć tabličnih vrijednosti prema teksturnoj klasi tla i konačno, korigira ovisno o potencijalu K. Kalij je neobično važan za "ugljikohidratne biljke", stoga kod šećerne repe može kompenzirati pojačanu gnojidbu dušikom kako bi se ostvario visok prinos korijena dobre tehnološke kakvoće. Temeljna načela EUF utvrđivanja potrebe šećerne repe za kalijem su:

- a) K-gnojidba polazi od ukupne potrebe koja se umanjuje za sadržaj pristupačnog K definiran polinomijalnom funkcijom, koja uzima obje frakcije EUF-K i sadržaj selektivno vezujućih glinenih minerala;
- b) Na srednje teškim tlima (glina 10-24 %; *Orlovius* 1987.), uz K-Q = 0,4-0,5 optimalan sadržaj K-I iznosi 8-17 mg 100 g⁻¹ tla (15 mg K 100 g⁻¹ podmiruje potpuno potrebe šećerne repe);
- c) Pristupačnost K korigira se prema teksturi tla, tako da je faktor korekcije za srednje teška tla (BTK = 8) jednak 1, stoga je za teža tla veća, a na lakšim tlima niža preporuka K-gnojidbe;
- d) Na usvajanje K značajno utječe Ca (*Ehrenbergov zakon*) što se temelji na potencijalu kalija (pK). Intenzitet odgovara EUF-I, a kvantitet EUF-II

frakciji, pa je otuda Q/I puferni kapacitet pojedinog hraniva (vremenska dimenzija opskrbe hranivima).

Potreba za kalcizacijom kiselih tala predviđenih za uzgoj šećerne repe (kad je $\text{pH(KCl)} < 6$) temelji se na potrebi planiranog prinosa korigiranog za raspoloživost kalcija koja ovisi o sadržaju obje frakcije kalcija i njihove funkcijske veze, sadržaju selektivno vezujuće gline u tlu i učinkovitosti materijala koji se koristi za kalcizaciju. Kalcizacija se, u opisanom modelu proračuna gnojidbe, shvaća kao gnojidba kalcijem te je dimenzionirana s učinkom na 2-3 godine, jer je neekonomično primjenjivati manje količine svake godine, a veće dovode do problema s raspoloživosti fosfora i mikroelemenata te znatno ubrzavaju razlaganje, odnosno smanjivanje organske tvari tla. Kad se u EUF ekstraktu određuje i aluminij, tada se za jako kisela tla ($\text{pH} < 5$) primjenjuje poseban proračun kalcizacije koji uzima u obzir, pored navedenih parametara, i koncentraciju Fe, Mn i Al. Vrlo kisela tla (koja imaju < 65 % baza na KIK-u) ne treba koristiti za uzgoj šećerne repe ili lucerne.

11.2.11. Suvremene, nedestruktivne (senzorske metode) utvrđivanja potrebe u gnojidbi

SPAD - Meter (ili N - tester)

Prijenosni, mali uređaji za utvrđivanje boje usjeva (koja najviše ovisi o koncentraciji klorofila) sve se češće koriste, posebice za prihranu usjeva (slika 11.27). Funkcioniraju tako da unutarnji izvor zračenja emitira svjetlo kroz list i mjeri njegovu apsorpciju u crvenom (650 nm) i infracrvenom (920 nm) dijelu spektra. Za vjerodostojno utvrđivanje potrebno je mjerenje 30-ak listova, a rezultati se uspoređuju s dijelom usjeva istog genotipa gdje je obavljena gnojidba dušikom potrebna za postizanje visokog prinosa.



Slika 11.27. SPAD Meter ili klorofilometar

Budući da koncentracija klorofila lišća znatno varira unutar usjeva (po površini parcele i vertikalno kroz profil usjeva), treba mjeriti na sredini najmlađih, ali potpuno razvijenih listova (~2/3 maksimalne veličine, odnosno fiziološki najaktivnijih listova). Preračunavanje u koncentraciju klorofila obavlja se indirektno, putem tablica i taj je podatak u čvrstoj korelaciji s opskrbom usjeva dušikom, odnosno lako se prevodi u potrebu gnojidbe dušikom.

LAI analizatori

LAI analizatori omogućuju utvrđivanje indeksa lisne površine (LAI = *Leaf Area Index* = m² lista po m² površine tla) bez uništavanja biljaka. Uglavnom se koriste metode mjerenja prolaska svjetla kroz usjev i na temelju pada intenziteta svjetlosti na tlu, koje ovisi o površini i slojevitosti lišća (slika 11.28). Naravno, postoji više različitih tehnika s jednim ili više senzora, pa procjena LAI može biti samo orijentacijska, što je uglavnom dovoljno pouzdano za utvrđivanje potrebe N-prihrane. Za usjeve koji se siju s većim razmakom između redova (npr. kukuruz, krumpir, šećerna repa) potrebno je obaviti više mjerenja za dobivanje prosječne vrijednosti LAI, ali je važna i pozicija senzora (između i unutar redova) kao i njihov tip (optički, mehanički, kombinirani i dr.).

Kada se koristi više senzora i uz dovoljan broj ponavljanja te uzima u obzir "arhitektura usjeva i/ili kultivara" i sklopa, podaci za LAI su relativno točni te se tada rezultati mjerenja mogu koristiti i za druge potrebe, npr. utvrđivanje biomase usjeva, utjecaja tipa, obrade, zaštite, sorte specifičnosti i dr. na porast usjeva.

Primjena LAI analizatora ograničena je na primjenu kod difuznog zračenja (bez izravnog djelovanja sunčeve svjetlosti), ujutro i navečer ili za oblačnog vremena i samo kad su usjevi suhi (kapi kiše na sensorima mogu jako utjecati na mjerna očitavanja).



Slika 11.28. Crop meter (Ehlert, Dammerand Voelker, ATB, 2003.)

Mjerenje refleksije usjeva

Refleksija usjeva, u određenom dijelu spektra, lako se može utvrditi uređajima koji su smješteni visoko na traktoru koji obavlja N-prihranu usjeva i na taj način, ovisno o boji usjeva, može se regulirati doza N-gnojiva. Mjerenje refleksije usjeva obično se obavlja u plavom (400-700 nm) i/ili crvenom (600-700 nm) dijelu spektra u kojem se apsorbira najveći dio FAR (fotosintetski aktivne radijacije Sunca). Kako biljke slabo apsorbiraju zeleni dio spektra, refleksija u tom segmentu spektra odgovorna je za zelenu boju usjeva.

Budući da raspoloživost dušika pokazuje čvrstu korelaciju s bojom, refleksija vidljivog dijela svjetlosti može se vrlo dobro iskoristiti za N-prihranu jer su razlike u refleksiji posljedica heterogenosti u boji i biomasi usjeva. Naime, veća biomasa intenzivnije reflektira u crvenom i bliskom infracrvenom dijelu spektra. Primjena uređaja za mjerenje refleksije usjeva ekonomski i ekološki je vrlo zanimljiva jer se doza N-gnojiva za prihranu utvrđuje na temelju boje usjeva, odnosno njegovoj potrebi za dušikom, uvažava se količina biomase u određenoj fenofazi, odnosno njegova sposobnost usvajanja dušika (kapacitet sinka) i ne daje suviše dušika (čime je uvažen ekološki aspekt N-prihrane) na dijelovima površine gdje to nije potrebno. Naravno, softver za regulaciju doze N mora biti sofisticiran, odnosno mora pravilno donositi odluku o dozi na dijelovima usjeva čija je biomasa znatno ispod prosjeka u određenoj fenofazi, jer intenzivnija N-prihrana tada neće rezultirati očekivanim povećanjem prinosa, odnosno prirast će biti niži od ulaganja u gnojidbu, a ekološko opterećenje nepotrebno visoko.

Mjerenje fluorescencije usjeva

Tehnika mjerenja fluorescencije usjeva (slika 11.29.), slično mjerenju refleksije, utvrđuje stanje ishranjenosti usjeva dušikom indirektnim i nedestruktivnim mjerenjem koncentracije fotosintetskih biljnih pigmenata, uglavnom klorofila.

Metoda se inače intenzivno koristi u biljnoj fiziologiji, posebice istraživanjima fotosinteze i u otkrivanju stresa. Usjev se osvjetljava laserom koji inducira fluorescenciju klorofila (*fluorescencija* je emitiranje viška energije u obliku svjetlosti kada se elektron brzo vraća iz pobuđenog stanja, tzv. *singleta*, dok je *fosforescencija* pojava kada se elektron zadrži izvjesno vrijeme na višoj energetskej razini, a zatim se vraća u osnovno stanje emitirajući svjetlost) te se na taj način može utvrditi koncentracija klorofila, odnosno dušika, ali i biomasa usjeva i to u terenskim uvjetima.



Slika 11.29. Mjerenje fluorescencije laserskim uređajem MiniVeg N (Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG)

Mjerenje prinosa

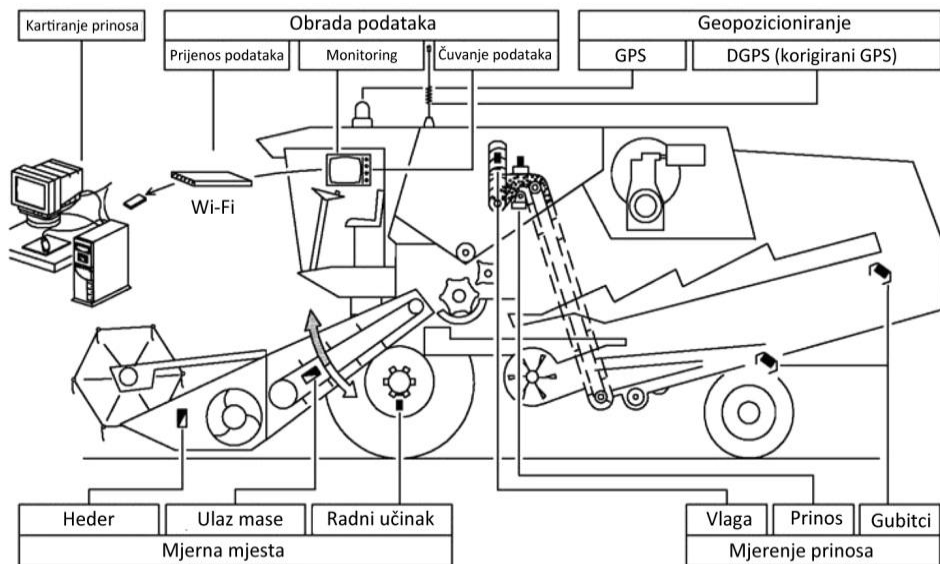
Sustavi za kontinuirano mjerenje prinosa, instalirani na uređajima za berbu (slika 11.30.) i snabdjeveni GPS-om za povezivanje lokacije na parceli s prinosom, vrlo dobro mogu poslužiti za utvrđivanje potrebe u gnojidbi, posebice za kalibraciju metoda za utvrđivanje pojedinih svojstava tla, npr. raspoloživost hraniva, sadržaj organske tvari u tlu, pH i dr.

Uređaji za kontinuirano mjerenje prinosa obuhvaćaju:

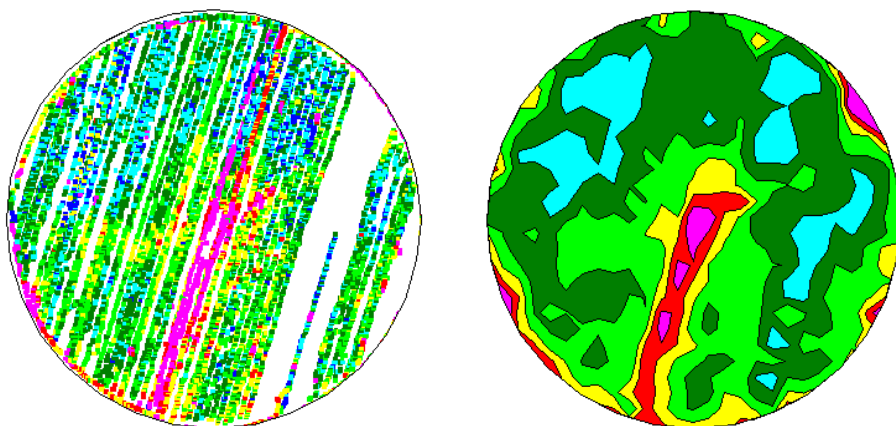
- Senzore za utvrđivanje protoka mase,
- Senzore radnog učinka (brzine, radnog zahvata i dr.),
- Senzor za detekciju pozicije (uobičajeno DGPS),
- Računalo za obradu, praćenje i pohranu podataka,
- Sučelje za prijenos podataka na računalo koje povezuje agrokemijsku kartu parcele s podacima o žetvi (ubiranju prinosa), odnosno na računalo za prostornu analizu prinosa i kartiranje (GIS).

Senzori za mjerenje prinosa (senzori prinosa) rade na principu kontinuiranog protoka i instalirani su najčešće na elevatoru očišćenog zrna. Princip rada tih uređaja je različit za mjerenje prinosa zrna i mase silaže i/ili krmne mase. Tako uređaji za mjerenje prinosa zrna mjere kontinuirano njegovu zapreminu (uz pomoć specifične mase ili gustoće - hektolitara). Mjerenje prinosa silaže, krmne mase ili korijena koristi drugačiji princip kontinuiranog registriranja prinosa.

Na temelju kontinuiranog mjerenja prinosa, georeferencirani podaci vizualiziraju se GIS alatima kao karte prinosa za pojedinu parcelu, dodaju "slojevi" produktivnih svojstava tla, topografija i dr. i dobije detaljan uvid u razloge varijacije prinosa. Uobičajeno, to su tzv. "grid karte" (mrežni sustav ćelija različite boje, ovisno o visini prinosa), slika 11.31.



Slika 11.30. Komponente kontinuiranog utvrđivanja prinosa na uređaju za žetvu

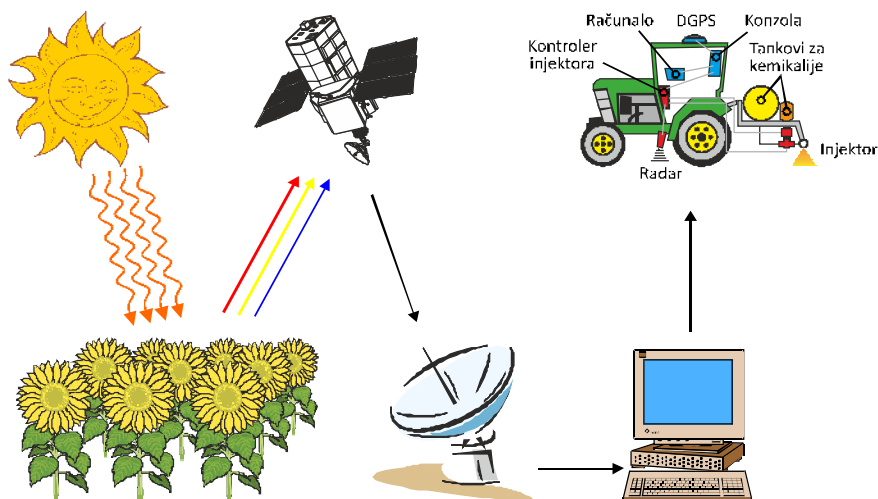


Slika 11.31. Karta prinosa (grid) i njena interpolacija (kriging)

Određivanje produktivnih svojstava tla beskontaktnim tehnikama

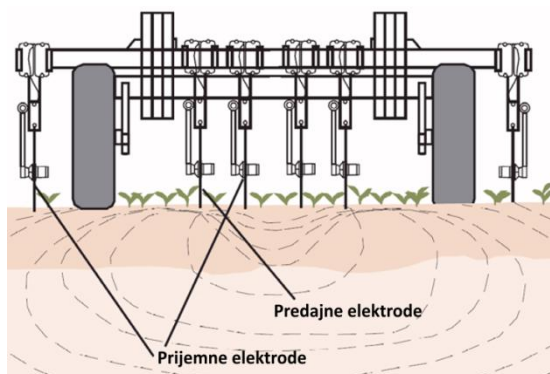
Brzim razvojem različitih beskontaktnih senzora za "daljinska mjerenja" ("Remote sensing") (slika 11.32.) moguće je determinirati produktivna svojstva tla kao i stanje usjeva (i prirodne vegetacije) dovoljno točno za utvrđivanje, ne samo potrebe u gnojidbi, već i potrebu za popravkama (humizacija, kalcizacija, sulfatizacija i dr.), odnosno procjenu pogodnosti zemljišta kao univerzalnog načina interpretacije zemljišta u različite svrhe, npr. pogodnost zemljišta za

uzgoj pojedinih kultura (rajonizacija), navodnjavanje, odvodnja, agromelioracije i dr.



Slika 11.32 Shematski prikaz daljinskih mjerenja uz vizualizaciju GIS-om

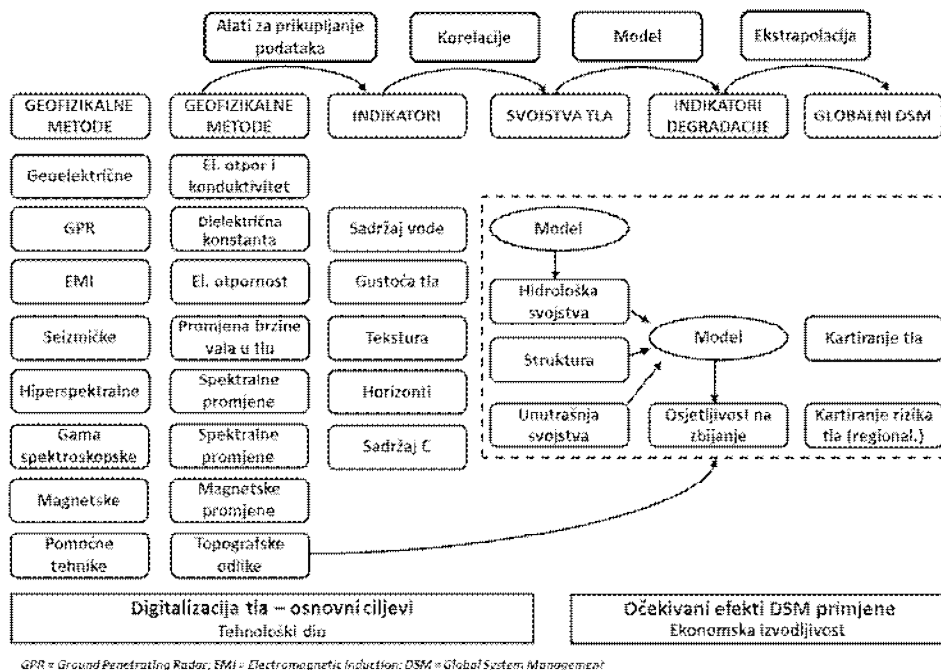
Daljinsko istraživanje je metoda prikupljanja i interpretacija informacija o udaljenim objektima bez fizičkog dodira s objektom. Zrakoplovi, sateliti i svemirske sonde su uobičajene platforme za ovu vrstu opažanja. Termin daljinsko istraživanje (daljinsko mjerenje) je obično ograničen na metode koje rabe elektromagnetsku energiju kao sredstvo za otkrivanje i mjerenje svojstava objekata. Takva definicija uključuje *električno-magnetsko induksijska (EMI)* i *gravitacijska mjerenja* (snaga polja) te općenito obuhvaćaju upotrebu različitih vrsta snimaka: fotografskih, termalnih, radarskih itd.



Slika 11.33. Mjerenje električnog konduktiviteta (EC) tla

Za utvrđivanje pojedinih svojstava koriste se različite EMI tehnike (elektromagnetska indukcija, slika 11.33.), spektralna analiza u vidljivom i infracrvenom dijelu spektra, kao i druge vrste senzora (slika 11.34.). Za

utvrđivanje teksture tla i sadržaja organske tvari najčešće se koriste tehnike infracrvene spektroskopije.



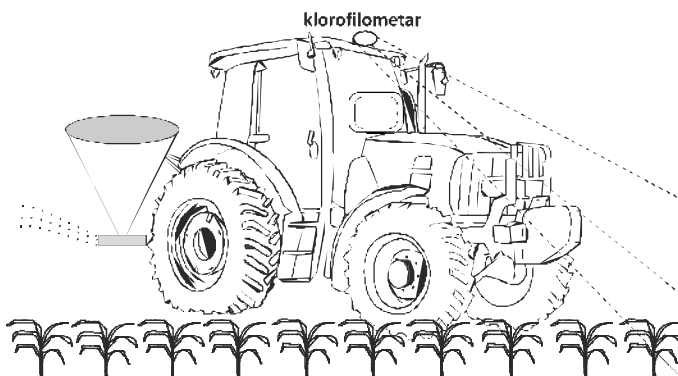
GPR = Ground Penetrating Radar; EMI = Electromagnetic Induction; DSM = Global System Management

Slika 11.34. Vrste geofizikalnih senzora za kartiranje tla

Primjena beskontaktnih tehnika sve je češća u tzv. *preciznoj poljoprivredi* (*precision farming* ili *precision agriculture*) i podijeljena je grubo na:

- 1) Sustavi temeljeni na kartama koji koriste satelitsku navigaciju kao što su GPS (ili druge sustave pozicioniranja: ruski *GLONASS* koji je već operativan, europski *Galileo*, kineski *Beidou*, japanski *QZSS* i indijski *IRNSS*). Ovi sustavi uključuju:
 - a) Pozicioniranje (senzori za detekciju),
 - b) Kontinuirano mjerenje prinosa (senzori za detekciju prinosa i svojstava tla),
 - c) Softver za kartiranje i
 - d) Softver za primjenu karata prinosa i zemljišnih svojstava (koji mora biti izvršan na terenu prilikom gnojidbe, sjetve i drugih agrotehničkih operacija).
- 2) Sustavi u stvarnom vremenu koji koriste aktualne informacije o tlu i parametrima usjeva (slika 11.35.). Oni ne zahtijevaju pozicioniranje ili kartiranje osim za izradu izvještaja (zapis akcije na karti parcele), a koriste se, npr. kod N-prihrane na temelju mjerenja boje (klorofila), količine biomase usjeva, primjene herbicida uz prepoznavanje korova u usjevu i sl.

- 3) Sustavi u stvarnom vremenu s primjenom karata koji kombiniraju mogućnosti karata i sustava u stvarnom vremenu. Ovi sustavi koriste različite karte (prinosa, agrokemijske karte raspoloživosti hraniva i drugih svojstava tla) kombinirajući ih s primjenom senzora u realnom vremenu za utvrđivanje uzrasta biljaka, vlažnosti tla, zakorovljenosti i sl. Budući da takvi sustavi zahtijevaju sve komponente prethodnih dvaju sustava, vrlo su složeni i zahtijevaju računala koja obrađuju potrebne informacije u realnom vremenu, ali zato omogućuju optimizaciju na terenu, posebno u primjeni gnojiva i pesticida.



Slika 11.35. Princip rada beskontaktnog sustava u stvarnom vremenu

11.3. PRIMJENA RAČUNALA U SIMULACIJI PRIMARNE ORGANSKE PRODUKCIJE

Smatra se da će ključnu ulogu u povećanju proizvodnje hrane imati biološke discipline i dvije tehnologije: biotehnologija i informacijska tehnologija. Računala danas imaju status koji pripada svakodnevnim i uobičajenim alatima, tako da se često govori o "informatičkom" društvu. Ipak, primjena računala je tek na početku u većem broju oblasti ljudske djelatnosti i ne donosi uvijek očekivane napretke i poboljšanja. Čini se da je najveća prepreka u uspješnom korištenju kompjutera prisutnost ogromnog broja informacija uz neadekvatnu programsku podršku za njihovu sintezu u novu kakvoću, odnosno primjenjivo znanje, ali često i niska ili nikakva informatička obučenosť potencijalnih korisnika.

Eksponencijalni razvoj računalne tehnike pretpostavka je tehničke i tehnološke revolucije u svim oblastima života i rada. Prisutno mišljenje da informatička znanost pripada samo nekim oblastima ljudske djelatnosti i užoj grupi profesionalaca je pogrešno i mistificira ulogu elektroničkih računala te objektivno koči njihovu široku primjenu. Suvremena poljoprivreda ima velike mogućnosti primjene računala u oblasti ratarske proizvodnje, jer prisutnost

velikog broja informacija o klimatskim, zemljišnim, biološkim, genetskim i drugim čimbenicima primarne organske produkcije nužno zahtijeva njihovu uporabu.

11.3.1. Matematičko modeliranje rasta i razvoja usjeva

Matematičkim metodama može se precizno i jednoznačno opisati svaki poznati sustav, uključujući i procese u živom organizmu. Danas je moguće prikupiti i koristiti ogroman broj podataka za sve okolnosti u kojima se odvija ratarska proizvodnja, proučavati brojne međusobne odnose i simulirati različite situacije uz pomoć računala pa se zahvaljujući brzini i preciznosti uspješno rješavaju i vrlo složeni problemi.

Pojam *model* (*matematički model*) označava matematičkim jezikom opisan sustav. Sukladno toj pojednostavljenoj definiciji, kako rast i razvitak svakog živog organizma uključuju etape razvitka, tako se i matematički model sastoji iz submodela koji opisuju konkretne procese. Modeli nisu nužno matematički (apstraktni) već mogu biti i realni (fizički) kada se želi provjeriti stvarno funkcioniranje konkretnog sustava. Na primjer, uzgoj biljaka u nadziranim uvjetima predstavlja simulaciju djelovanja nekog stvarnog čimbenika proizvodnje određenim intenzitetom ili u interakciji s drugim čimbenicima.

Matematički model implementiran na kompjutoru u nekom od programskih jezika predstavlja "računarski pokus", a kompjutorsko izvođenje takvog pokusa označava se pojmom "računarska simulacija". Simulacijski modeli sadrže uglavnom poznate zakonitosti, ali u kompleksnim modelima s nepoznatim ili nepredvidljivim događajima često prevladava empirijska osnova s elementima teorije vjerojatnoće. Formalni matematički opis modela se uz pomoć algoritma (simboličkog toka procesa) implementira kao kompjutorski program. U prirodnim znanostima računarski modeli čine most između pokusnog i teorijskog istraživanja. Posebno značenje imaju simulacijske tehnike u projektiranju različitih tehničkih sustava kao što su kompjutorski programi tipa CAM/CAD.

Kompjutorski model-sustavi omogućuju proučavanje i analizu stvarnih bioloških produkcijskih sustava u ratarstvu za sve vrijednosti parametara uz mogućnost da se na temelju boljeg poznavanja čimbenika proizvodnje, ali i prognoze o kretanju vegetacije, utvrde i pravovremeno primijene odgovarajuće agrotehničke mjere (prvenstveno iz područja zaštite i gnojidbe). To je i pretpostavka kvalitativnog skoka u proizvodnji hrane uz istovremenu zaštitu okoliša kroz racionalnu primjenu gnojiva, pesticida i efikasnije korištenje poljoprivredne mehanizacije.

Biološke sustave karakterizira visoka složenost pa kvantitativno određivanje, u smislu analize organske produkcije, zahtijeva visoko sofisticiran kompjutorski

model. On mora sadržavati dinamičan opis svih relevantnih čimbenika rasta i razvoja, njihove izravne i neizravne interakcije i simulirati širi sustav biljka-tlo-atmosfera prema osnovnim fizikalnim, kemijskim i biološkim zakonima. Budući da analizu svih mogućih "produkcijskih situacija" nije moguće ostvariti, pojednostavljivanje modela korištenjem samo aktualnih performansi biološkog sustava je kompromis između potpune vjernosti i neophodne jednostavnosti.

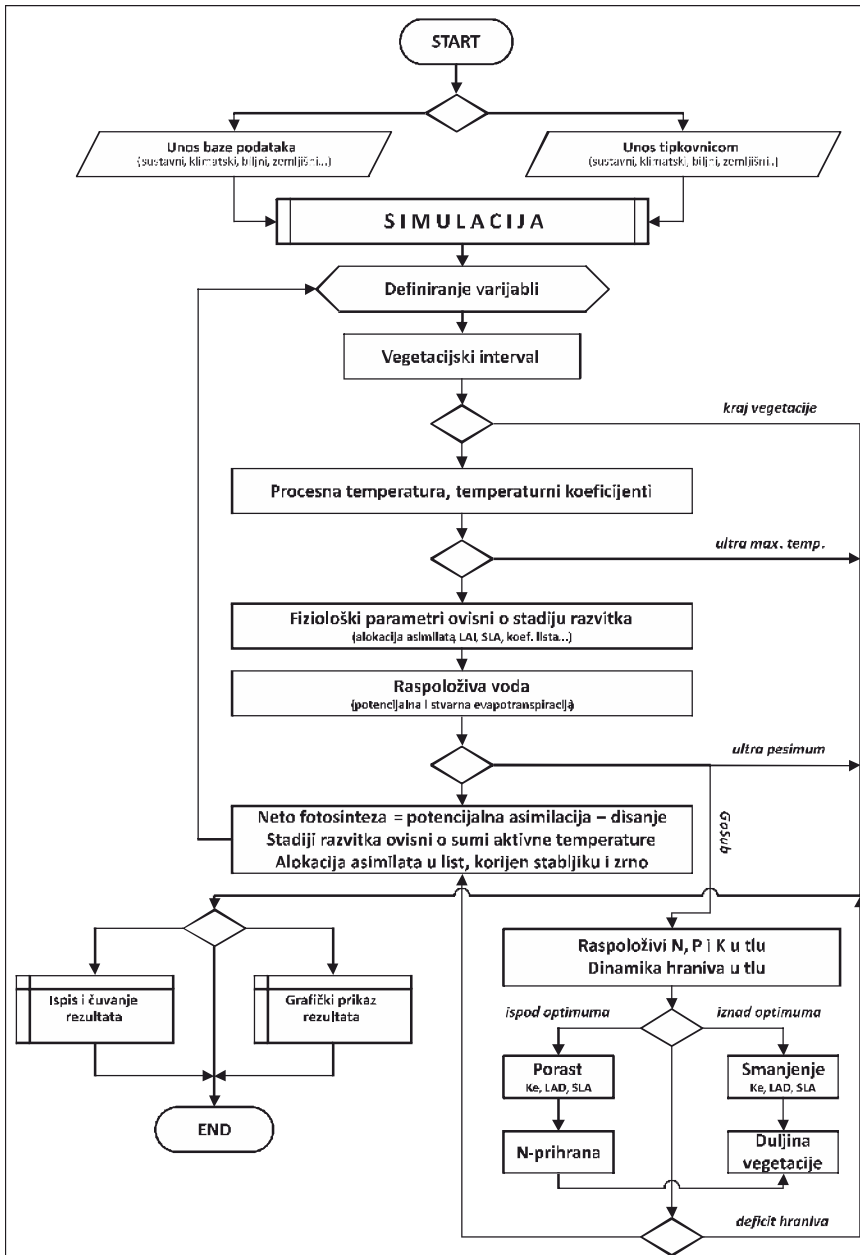
Posebnu grupu računarskih modela, od kojih je već jedan dio u komercijalnoj uporabi, čine takozvani prognozni modeli. Na temelju praćenja meteorološke situacije prognozira se tijek vegetacije pojedinih biljnih vrsta i određuje, ovisno o etapi razvitka i klimatskih prilika, potreba za gnojidbom, zaštitom od bolesti ili štetnika, navodnjavanjem itd. Pojedini modeli, naročito u oblasti navodnjavanja, fertirigacije i kemigacije, mogu biti samostalni sustavi kada su povezani s automatskim meteorološkim postajama, tenziometrima i drugim mjernim aparatima te tada reguliraju, neovisno o prisustvu čovjeka, pojedine agrotehničke zahvate. Preciznost kompjutorskih modela u eksploataciji još uvijek nije zadovoljavajuća. Npr., pogreške pri utvrđivanju potrebe za dušičnom prihranom kreću se u granicama $\pm 20 \text{ kg ha}^{-1}$, dok se pojave bolesti i štetnika prognoziraju s oko 80 % točnosti.

Primjer simulacije organske produkcije biljaka

Na Poljoprivrednom fakultetu u Osijeku *Vladimir Vukadinović* eksperimentira s primjenom vlastitih kompjutorskih programa za simulaciju organske produkcije pšenice, kukuruza, šećerne repe i soje s ciljem sveobuhvatne analize utjecaja agroekoloških čimbenika na tijek vegetacije, prognoze rasta i razvitka, procjene potencijala rodnosti te utvrđivanja potrebe za gnojidbom i prihranom pojedinih usjeva. U daljnjem tekstu opisan je kompjutorski program za simulaciju organske produkcije iz kojeg se vidi utjecaj i međusobna povezanost najznačajnijih agroekoloških čimbenika s rastom i razvitkom ozime pšenice. Koncept računalnog programa simulacije primarne produkcije usjeva temelji se na istraživanjima *Driessena* (1986.).

Modularna struktura modela sadrži više submodela u hijerarhijskom nizu (slika 11.36.). Najviše mjesto u hijerarhiji zauzima iskorištenje Sunčeve radijacije, temperatura i svojstva fotosintetskog aparata te simulacija u tom submodelu daje "potencijalnu produktivnost". Druga razina se odnosi na mogućnost korištenja vode iz tla u kojem se uspoređuje aktualna opskrbljenost s optimalnom. Pad raspoloživosti vode ili njen suvišak preko koeficijenta za vodu povratno djeluje na višu razinu modela. Submodel kojim se izračunava potreba za dušičnom prihranom je tek treća razina u hijerarhijskoj strukturi

kompjutorskog modela, ali je od prvorazrednog značaja s gledišta primjene agrotehnike i mogućnosti utjecaja na tijek vegetacije.



Slika 11.36. Model organske produkcije s vremenskim inkrementom (Vukadinović, Sarić, 1990.) i podmodelima u hijerarhijskoj strukturi

Osnovno svojstvo sustava biljka-tlo-atmosfera je promjena u vremenu. Razmatrajući samo aktualne performanse tog složenog sustava, varijable kao

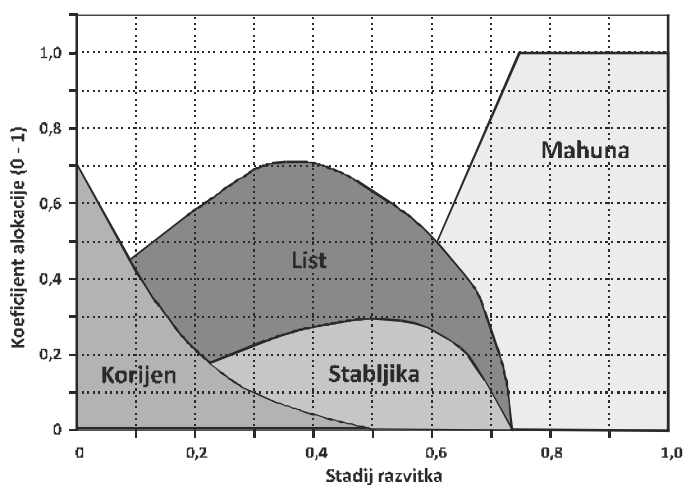
njegova mjerljiva svojstva, smatraju se konstantama u kratkom vremenskom razmaku i zatim iznova prilagođavaju svoje vrijednosti.

Rast biljaka utvrđuje se na temelju sume aktivne temperature pri čemu suma od 2.100 °C odgovara završetku vegetacije ozime pšenice. Ovisno o stadiju, određuje se translokacija asimilata prema tablici 11.13. za pšenicu.

Tablica 11.13. Raspodjela fotosintata kod pšenice u ovisnosti o sumi aktivne temperature (%)

Biljni organ	Suma aktivne temperature u %					
	< 11	11 - 20	21 - 35	36 - 47	48 - 50	> 57
Korijen	50	34	23	9	4	-
List	50	66	66	34	10	-
Vlat	-	-	11	57	86	-
Zrno	-	-	-	-	-	100

Unošenje podataka obuhvaća unos sustavnih konstanti i intervalnih varijabli. Za simulaciju su potrebni sljedeći podaci: datum sjetve, datum nicanja, količina zasijanog sjemena po ha, masa 1.000 zrna, poljska klijavost, planirani prirod, indikativna početna temperatura (0 °C), zatim sortno ovisne varijable kao što su koeficijent ekstinkcije lista (0,5-0,8) i specifična lisna površina, vlaga tla u sjetvi, teksturna klasa tla, vlaga tla kod trajnog uvenuća, vlaga tla u zraku suhom stanju i razina podzemne vode u sjetvi, a od intervalnih varijabli datum, prosječna temperatura, oblačnost (0-1) i količina padalina u promatranom intervalu.



Slika 11.37. Alokacija asimilata u biljne organe soje tijekom vegetacije

Procesna temperatura (prosječna iznad indikativne) koristi se za izračunavanje koeficijenta temperature (cft). Ako je procesna temperatura za pšenicu 0 °C, vegetacija miruje, od 0 do 15 °C cft raste za svaki stupanj 0,067, od 15 do 25 °C cft je 1,00 (optimalno) i od 25-35 °C cft je $3,5 - 0,1 \times$ procesna temperatura.

Iznad 35 °C temperatura je previsoka što izaziva prijevremeni završetak vegetacije (slika 11.38.).

Koeficijent lista (cfl) određuje njegovu fotosintetsku sposobnost. Izračunava se preko indeksa lisnatosti (LAI), dakle veličine asimilacijskog aparata i koeficijenta ekstinkcije (ke), odnosno sposobnosti lišća da apsorbira fotosintetski aktivnu radijaciju:

$$cfl = 1 - \exp(-ke \times LAI)$$

Indeks lisnatosti (LAI) izračuna se iz suhe tvari lišća i specifične lisne površine, koja je sortno svojstvo, ali vremenski promjenjivo i pod utjecajem gnojidbe, prije svega dušikom (SLA = površina lista u m² kg⁻¹ njegove suhe tvari).

$$LAI = ST \text{ lista kg ha}^{-1} \times SLA \times 0,0001$$

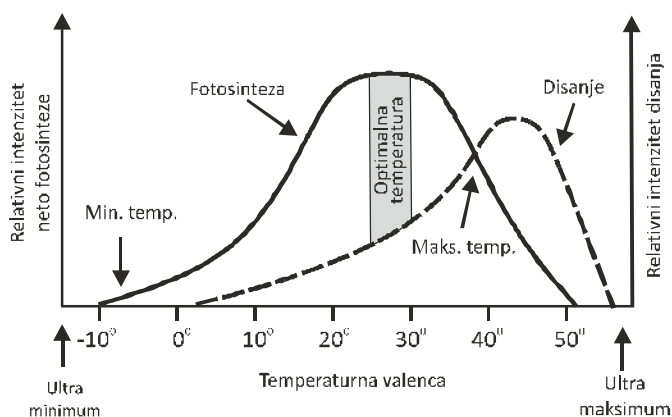
Koeficijent vode (cfv) izračunava se u posebnom submodelu i opisuje se kasnije.

Intenzitet asimilacije (I_A) izračunava se na temelju energetske vrijednosti Sunčeve radijacije za 45° sjeverne geografske širine (slika 11.39.) preračunatih u indikativnu veličinu kg CO₂ ha⁻¹ dan⁻¹ za C3 ili C4 tip fotosinteze pri punoj osvjetljenosti (S_V), odnosno oblačnom danu (S_O), uzimajući u obzir stupanj naoblake (O_S = 0 - 1).

$$I_A = O_S \times S_O + (1 - O_S) \times S_V$$

Potencijalna asimilacija (P_A) jednaka je:

$$PA = \frac{30}{44} \times I_A \times cfl \times cft \times cfv \quad \left(\text{gdje je } \frac{30}{44} = \text{CH}_2\text{O/CO}_2 \right)$$



Slika 11.38. Intenzitet fotosinteze i disanja u odnosu na temperaturu. Neto fotosinteza (prirast organske tvari - siva površina) je razlika fotosinteze i disanja (Larcher, 1994.)

Za izračunavanje neto fotosinteze potrebno je poznavati intenzitet disanja pojedinih organa i ukupno:

$$\text{disanje} = \text{cft} \times \sum [r(\text{org}) \times s(\text{org})]$$

gdje je $r(\text{org})$ indikativna respiracija organa (list, korijen, vlat i zrno) u $\text{kg } (\text{CH}_2\text{O})_n \text{ ha}^{-1} \text{ dan}^{-1}$, a $s(\text{org})$ trenutna masa tog organa u $\text{kg ha}^{-1} \text{ ST}$.

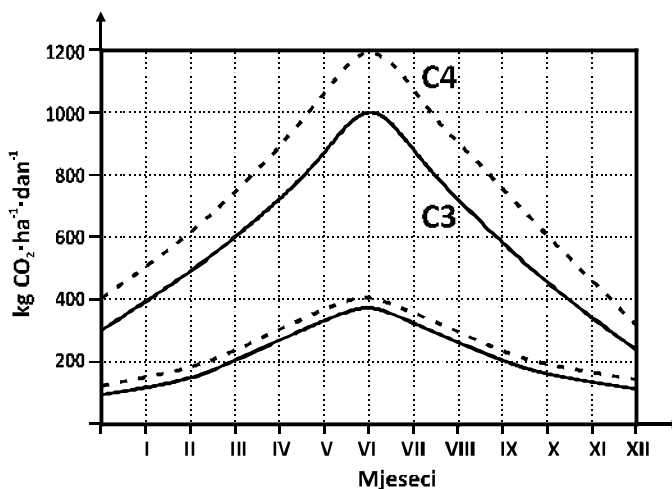
Neto fotosinteza je razlika između potencijalne asimilacije i disanja (prirast organske tvari), pri čemu se smatra da je kod pšenice učinkovitost konverzije za korijen i list 72 %, vlat 69 %, a zrno 73 %. Na taj način dobiva se prirast organske tvari pojedinih organa i cijele biljke.

Rezultati se čuvaju radi kasnijeg tiskanja i eventualne statističke obrade, uzimaju se podaci za slijedeći interval, izračunava duljina vegetacije u danima i duljina intervala ovisno o datumu promatranja te se ciklus ponavlja sve dok razvojni stadij nije $\geq 1,00$, odnosno do kraja vegetacije.

Evapotranspiracija se izračunava prema *Turcu*:

$$\text{ETO} = 0,13 \times (\text{lg} + 0,5) \times \left(\frac{t}{(t + 15)} \right) \quad (1)$$

ETO = evapotranspiracija mm po intervalu
 lg = ukupna radijacija $\text{cal cm}^{-2} \text{ dan}^{-1}$
 t = prosječna temperatura intervala



Slika 11.39. Indikativna asimilacija za vedrog i potpuno oblačnog dana (u $\text{kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ dan}^{-1}$)

Turcova formula, pored *Blaney - Crieddleove*, najčešće se koristi u poljoprivredi, iako bi s biološkog gledišta više odgovarala formula: $\text{ETP} = \text{fr} \times \text{Ec} + (1 - \text{fr}) \times \text{Es}$

gdje je f_r pokrivenost tla usjevom, E_s evaporacija golog tla i E_c transpiracija jedinice tla pod usjevom u mm dan^{-1} . Mali problem je što ovakva formula zahtijeva prethodno poznavanje E_s i početne vrijednosti E_c . Evaporacija (isparavanje vode s površine tla) u proizvodnim uvjetima čini oko 20-30 % evapotranspiracije.

U daljnjem tekstu predstavljen je matematički submodel kompjutorske simulacije raspoloživosti vode koji uzima u obzir klimatske, zemljišne i biljne čimbenike.

Potencijalna (najveća moguća) evaporacija je:

$$\text{EMT} = \text{ETO} \times \exp(-0,04 \times \text{LAI}) \quad (2)$$

Zadržavanje i otjecanje vode kod obilnih padalina na površini tla ovisi o nagibu terena, načinu obrade, intenzitetu infiltracije, pokrivenosti tla usjevom itd., dakle velikom broju parametara koje je teško dinamički pratiti, stoga je u ovom modelu izostavljeno, iako se računaju potencijalna (6) i stvarna infiltracija (7) zbog procjene promjene vlažnosti tla (20).

Kapilarni uspon vode od razine podzemne vode do donje granice korijenovog sustava računa se samo pod uvjetom da je potencijal vode u tlu (PSI) veći od razlike dubine podzemne vode (ZT) i donje granice korijenovog sustava (RD) te da je potencijal vode manji od granice teksturno - specifičnog upijanja teksturne klase promatranog tla (tablica 11.14.):

$$\text{CR} = \frac{\text{KO} \times (\exp(-\text{ALFA} \times \text{PSI}) - \exp(-\text{ALFA} \times \text{ZT} - \text{RD}))}{\exp(-\text{ALFA} \times \text{ZT} - \text{RD}) - 1} \quad (4)$$

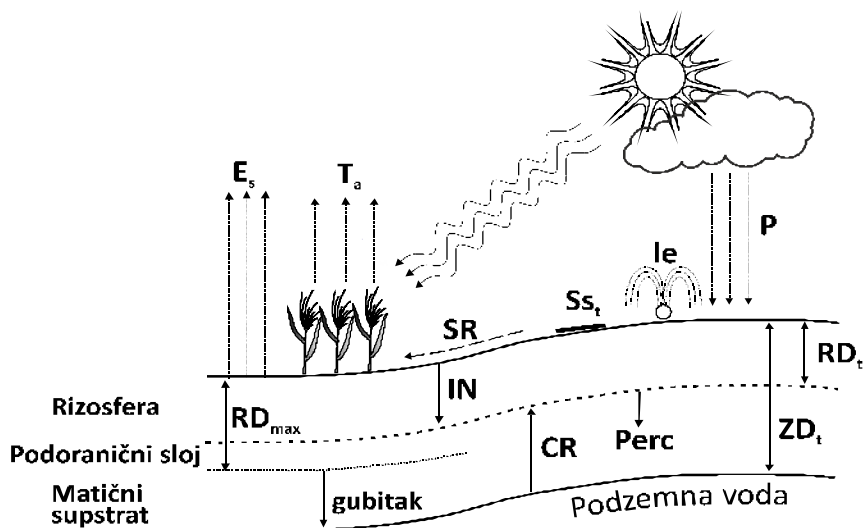
- CR = kapilarni uspon vode do korijena u cm dan^{-1}
- KO = hidraulička provodljivost saturiranog tla (tablica 11.14.)
- ALFA = teksturno empirijska konstanta tla (tablica 11.14.)
- ZT = razina podzemne vode u cm
- RD = trenutna dubina korijenovog sustava u cm
- PSI = negativan tlak vode ili tenzija vlažnosti (1 bar = 15 PSI)

Kapilarni uspon (CR) može se uzimati i iz posebnih tablica za svaku teksturnu klasu tla kada je poznat PSI i razina podzemne vode.

Stvarna evaporacija koja je potrebna za izračunavanje infiltracije, izraz (7) dobije se formulom:

$$\text{EAT} = \text{EMT} \times \frac{(\text{SMPSI} - \text{SMAD})}{(\text{SMO} - \text{SMAD})} \quad (5)$$

- EAT = izgubljena voda evaporacijom u cm dan^{-1}
- SMAD = vlaga zrakovih tla (kod $pF = 6$ u $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) i tipično je između 0,01 - 0,04.



Slika 11.40. Dinamika vode u pojednostavljenom sustavu atmosfera-tlo-biljka (Driessen, 1986.)

- CR = kapilarni uspon,
 RD = dubina korijena,
 ZDt = dubina podzemne vode,
 IN = infiltracija,
 Perc = perkolacija,
 SR = površinski runoff,
 Sst = površinska akumulacija,
 Es = evaporacija,
 Ie = efektivna irigacija,
 Ta = aktualna transpiracija

Tablica 11.14. Teksturno specifične konstante tala (Driessen, 1986.)

Teksturni razred tla	SMO	GAM	KO	PSIMAX	AK	ALFA	SO	KTR
Grubi pijesak	0,395	0,1000	1.120,0	80	0,08	0,244	50,16	119,23
Ilovasti pijesak	0,439	0,0330	26,5	200	16,40	0,0398	19,20	30,33
Fini pijesak	0,364	0,0288	50,0	175	10,90	0,0500	21,44	17,80
Fini praškasti pijesak	0,504	0,0207	12,0	300	26,50	0,0248	17,57	9,36
Praškasta ilovača	0,509	0,0185	6,5	300	47,30	0,0200	14,46	5,32
Ilovača	0,503	0,0180	5,0	300	14,40	0,0231	11,73	3,97
Prašk. glin. ilovača	0,455	0,0169	14,5	130	22,60	0,0490	13,05	8,88
Pjeskovita glina	0,432	0,0096	23,5	200	33,60	0,0353	19,05	16,51
Praškasta glina	0,475	0,0105	1,5	300	36,00	0,0248	6,15	1,18
Glinasta ilovača	0,445	0,0058	1,0	300	1,69	0,0248	4,70	0,76
Laka glina	0,453	0,0085	3,5	300	2,77	0,0274	10,74	2,66
Ilovasta glina	0,507	0,0065	1,3	50	28,20	0,0480	3,98	0,80
Teška glina	0,540	0,0042	0,2	80	4,86	0,0380	1,93	0,15
Treset	0,863	0,0112	5,3	50	6,82	0,1045	7,44	1,86

$$\text{IMMAX} \times \text{Dt} = \text{SO} \times \left(1 - \frac{\text{SMPSI}}{\text{SMO}}\right) \times \text{Dt}^{0,5} + \text{KTR} \times \text{Dt} \quad (6)$$

Potencijalna (IMMAX) i stvarna (IM) infiltracija vode u tlo izračunaju se na sljedeći način:

$$\text{IM} = \text{PREC} - \text{EAT} \quad (7)$$

IM = stvarna infiltracija u cm dan⁻¹

KTR = hidraulička propustljivost provodljive zone tla (tablica 11.14.)

PREC = količina oborina u cm dan⁻¹

Kada je poznata veličina infiltracije, moguće je izračunati provodljivost tla kod trenutnog potencijala vode:

$$\text{Ako je } \text{PSI} > \text{PSIMAX} \text{ tada je } \text{KPSI} = \text{AK} \times \text{PSI}^{-1,4} \quad (8)$$

U suprotnom slučaju koriste se tablične vrijednosti za svaku teksturnu klasu tla posebice:

KPSI = konduktivitet kod matriks PSI cm dan⁻¹

AK = teksturno specifična konstanta (tablica 11.14.)

Konačno je moguće izračunati gubitak vode infiltracijom kroz solum do podzemne vode:

$$D = \text{KPSI} \times \left(\frac{\text{PSI}}{(\text{ZT} - \text{RD})} - 1 \right) \quad (9)$$

D = gubitak vode perkolacijom do podzemne vode u cm dan⁻¹

Proračun promjene razine podzemne vode temelji se na sada poznatim vrijednostima CR (4) i D (9):

$$\text{ZT} = \text{ZT} + \text{DELZ} \quad (10)$$

$$\text{DELZ} = 2 \times (\text{CR} + D) \times \frac{\text{Dt}}{(\text{SMO} - \text{SMPSI})} \quad (11)$$

Budući da je parametar opskrbljenosti vodom omjer između aktualne i optimalne vlage, onda se može predstaviti omjerom stvarne i potencijalne transpiracije, odnosno transpiracije kod pune raspoloživosti vode (slika 11.41.). Potencijalna (12) i stvarna transpiracija (13) obično se predstavljaju sljedećim izrazima:

$$\text{TRM}_{(\text{cm dan}^{-1})} = (\text{ETO} - 0,1 \times \text{EMT}) \times \text{cfl} \quad (12)$$

$$\text{TR}_{\text{cm dan}^{-1}} = \frac{(\text{PSI}_{\text{list}} - \text{PSI}_{\text{biljka}})}{R_{\text{biljka}}} \quad (13)$$

cfl = korektni parametar asimilacijske površine iz glavnog programa

R_{biljka} = otpor kretanju vode kroz biljku

Kritičan sadržaj vode u tlu odgovara vlažnosti tla ispod koje je stvarna transpiracija manja od najviše moguće ($TR < TRM$):

$$SMCR = (1 - P) \times (SMO - SMPWP) + SMPWP \quad (14)$$

P je indikator "iscrpljenosti" vode, a ovisan je o biljnoj vrsti i potencijalnoj evapotranspiraciji, a njegova vrijednost uzima se iz posebnih tablica.

$SMPWP$ je sadržaj vode u tlu kod trajnog uvenuća ($cm^3 cm^{-3}$) i unosi se kao sustavna konstanta u glavnom programu.

Najveća moguća transpiracija, kod dovoljno vode u tlu, lako se izračuna prema izrazu (12), ali je stvarnu transpiraciju prema izrazu (13) teško dobro procijeniti. Stoga se za utvrđivanje TR koriste izrazi (15 do 19) ovisno o trenutnom statusu vode (slika 11.41.):

Ako je $SMPSI \geq (SMO - 0,04)$:

$$TR = 0 \quad (15)$$

Ako je $(SMO - 0,04) > SMPSI > (SMO - 0,08)$:

$$TR = TRM \times (SMO - 0,04 - SMPSI) / 0,04 \quad (16)$$

Ako je $(SMO - 0,08) \geq SMPSI \geq SMCR$:

$$TR = TRM \quad (17)$$

Ako je $SMCR > SMPSI > SMPWP$:

$$TR = TRM \times (SMPSI - SMPWP) / (SMCR - SMPWP) \quad (18)$$

I ako je $SMPWP \geq SMPSI$:

$$TR = 0 \quad (19)$$

Na kraju rutine za procjenu raspoloživosti vode izračunava se promjena vlage tla (RSM) i korekcijski čimbenik za raspoloživost vode (cfv):

$$RSM_{(cm^3 cm^{-3} dan^{-1})} = \frac{(IM + (CR + D) - TR)}{RD} \quad (20)$$

$$cfv = \frac{TR}{TRM} \quad (21)$$

Potrebno je još prilagoditi promjenu vlage tla (22) i dubinu korijenovog sustava (23) i potprogram vraća vrijednost cfv (21) glavnom programu dok se vrijednosti prilagođavajućih varijabli subrutine čuvaju:

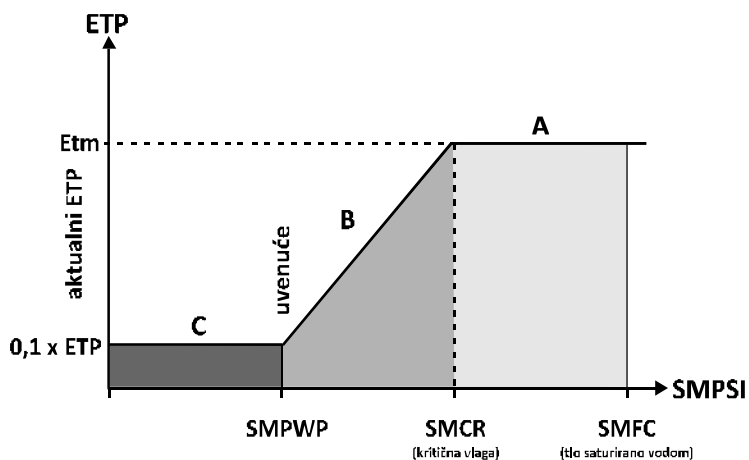
$$SMPSI = SMPSI + RSM \times Dt \quad (22)$$

$$RD = RD + RDI \quad (23)$$

RDI = porast korijena u cm u mjernom intervalu

Status vode u tlu uobičajeno se izražava pF vrijednošću koja predstavlja dekadski logaritam vodnog potencijala tla izraženog u cm vodenog stupca. Vrijednost pF u tlu kreće se 0 - 7. Trajno uvenuće nastupa kod većine biljaka kada je pF ~ 4,2, odnosno kada se voda u tlu drži silom od oko 15 bara (1,5 MPa), dok je ta sila kod poljskog kapaciteta za vlagu 1/3 do 1/10 bara. Slika 11.42. prikazuje odnos između pF vrijednosti i količine vode za različite teksturne klase tla.

Budući da, osim dušika, prihrana usjeva drugim hranivima nema značaja (može biti čak i štetna), utvrđivanje potrebe za fosforom i kalijem obuhvaća izračunavanje koncentracije P i K u biljnim organima (korijen, list, vlat i zrno) tijekom vegetacije i usporedbu s donjom kritičnom koncentracijom tih elemenata. Mala pokretljivost P i K u tlu dopušta da se koncentracija tih elemenata u biljci računa na temelju fizikalno-kemijskih svojstava tla (AL-metoda, pH i teksturna klasa tla) i uzrasta biljaka (dubina korijenovog sustava i količina organske tvari biljke).

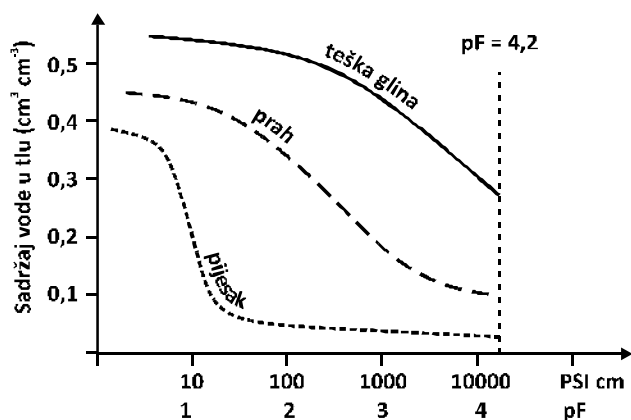


Slika 11.41. Evapotranspiracija i raspoloživost vode

Koncentracija dušika, do prve prihrane u busanju, utvrđuje se na temelju osnovne doze N i porasta biljaka ovisno o drugim čimbenicima vegetacije. Zatim se u simulaciju unose podaci sve više korištene N_{min} metode, izračunava kritična koncentracija N u pšenici, procjenjuje do kraja vegetacije mineralizacija organske tvari (pomoću sadržaja humusa u tlu, pH i vlažnosti tla) i uvodi stres čimbenik manjka dušika. Uvođenjem N_{min} metode u matematički model utvrđivanja potrebe za dušikom izbjegnute su poteškoće kod simulacije, transformacije oblika N u tlu i pokretljivosti nitratnog oblika, a uvedena je potreba utvrđivanja raspoloživog mineralnog N u rizosferi.

Rezultate simulacije organske produkcije ozime pšenice za stvarne agroekološke uvjete prikazuju tablice 11.15. do 11.18., te slike 11.43. i 11.44. Unoseći u simulaciju primarne organske produkcije nekog usjeva stvarne klimatske,

zemljišne i biološke (sortno specifične) parametre, može se analizirati protekla vegetacija i tako utvrditi djelovanje pojedinih čimbenika rasta, razvitka i agrotehničkih mjera (rokovi sjetve, količina sjemena, osnovna gnojidba, doza i vrijeme prihrane itd.). Ako se simulacija obavlja prije određene agrotehničke mjere, uzimajući u obzir stvarni dotadašnji tijek vegetacije, moguće je predvidjeti, naravno uz određeni rizik, daljnji rast i razvitak te učinkovitost poduzetih mjera, uz prihvaćanje klimatskih parametara u granicama prosječnih vrijednosti.



Slika 11.42. Povezanost vlažnosti tla (SMPSI) i vodnog potencijala (PSI) ovisno o teksturnoj klasi tla

Tablica 11.15. Kompjutorska simulacija organske produkcije ozime pšenice

Sistemske konstante: Pšenica

Datum sjetve	15.10.	Masa sjemena kg ha ⁻¹	225
Datum nicanja	04.11.	Klijavost sjemena 0-1	0.90
Spec. temp.	0	Planirani prinos t ha ⁻¹	7.50
SLA m ² kg ⁻¹	20	Koef. apsorbancije	0.60
Vlaga zr. suhog tla (0-1)	0.04	Vlaga tla 0-1	0.16
Razina podz. vode cm	100	Vlaga trajnog uvenuća	0.14
Tekstura tla	Prašk. ilovača	Dubina sjetve cm	5.0
pH-KCl	6.50	Broj prim. vlati m ⁻²	506
AL-P ₂ O ₅ mg 100 g ⁻¹	22.35	Humus %	2.24
Gnojidba N kg N ha ⁻¹	80	AL-K ₂ O mg 100 g ⁻¹	25.41
Gnojidba K ₂ O kg N ha ⁻¹	80	Gnojidba P ₂ O ₅ kg ha ⁻¹	80
Potreba P ₂ O ₅ kg ha ⁻¹	90	Potreba N kg ha ⁻¹	202
1. N-prihrana N kg ha ⁻¹	40 (25.02.)	Potreba K ₂ O kg ha ⁻¹	150
2. N-prihrana N kg ha ⁻¹	50 (10.04.)		

Tablica 11.16. Kompjutorska simulacija organske produkcije soje

Intervalne konstante (soja):

n	datum	dan	t °C	obl.	obor.	ETO	EAT	SMCR	SMPSI	TRM	TR
1)	25 4	5	12.60	0.41	24.20	25.91	200	27.07	26.21	0.18	0.07
2)	30 4	10	11.40	0.43	4.00	23.95	201	25.40	22.37	0.20	0.20
3)	5 5	15	15.30	0.49	1.30	30.42	202	25.40	17.15	0.37	0.28
4)	10 5	20	18.50	0.37	3.10	38.25	203	30.42	13.75	0.71	0.20
5)	15 5	25	19.30	0.70	4.00	25.01	205	25.40	14.16	0.56	0.07
6)	20 5	30	18.70	0.40	15.00	37.18	205	30.42	16.34	0.89	0.10
7)	25 5	35	17.70	0.56	2.50	29.76	206	27.07	14.86	0.80	0.23
8)	31 5	41	17.20	0.40	0.30	35.79	207	27.07	13.30	1.24	0.23
9)	5 6	46	16.00	0.68	24.90	25.01	209	25.40	17.97	0.99	0.09
10)	10 6	51	18.80	0.74	12.50	24.31	209	25.40	18.90	0.98	0.43
11)	15 6	56	16.90	0.68	34.80	25.67	210	25.40	23.15	1.45	0.75
12)	20 6	61	19.80	0.41	20.60	39.76	211	30.42	23.48	3.40	2.05
13)	25 6	66	21.30	0.40	8.60	41.47	212	30.42	21.98	6.23	3.88
14)	30 6	71	24.40	0.35	0.00	46.22	213	30.42	19.55	12.26	6.64
15)	5 7	76	20.80	0.52	22.90	34.23	214	25.40	20.22	14.16	7.98
16)	10 7	81	19.00	0.52	1.00	32.92	214	22.05	18.54	18.59	15.21
17)	15 7	86	20.20	0.40	4.30	39.07	217	18.70	16.67	29.80	29.13
18)	20 7	91	20.90	0.46	5.80	36.97	219	16.18	15.07	33.90	33.90
19)	25 7	96	21.10	0.43	2.20	38.45	221	16.18	13.71	37.17	27.30
20)	31 7	102	22.80	0.53	2.50	35.08	223	16.18	13.29	34.41	14.12
21)	5 8	107	23.20	0.29	0.00	40.68	225	16.18	12.71	39.89	12.37
22)	10 8	112	20.00	0.50	22.40	30.24	227	16.18	13.88	29.61	5.04
23)	15 8	117	21.90	0.30	0.20	39.35	229	16.18	13.01	38.32	17.21
24)	20 8	122	21.20	0.29	6.50	39.22	230	16.18	12.98	37.84	9.14
25)	25 8	127	18.60	0.33	15.90	35.59	232	16.18	13.56	33.95	7.95
26)	31 8	133	26.30	0.10	0.00	50.75	233	16.18	12.66	47.73	17.85
27)	5 9	138	18.80	0.47	14.00	24.30	235	16.18	13.40	22.39	3.56
28)	10 9	143	15.10	0.39	7.70	24.05	235	16.18	13.41	21.72	7.27
Prosjek:			19.20	0.44	9.32	33.91	216.00	22.49	16.65	16.78	7.97
Suma:			261.20	949.70						469.80	223.30

Tablica 11.17. Kompjutorska simulacija organske produkcije ozime pšenice

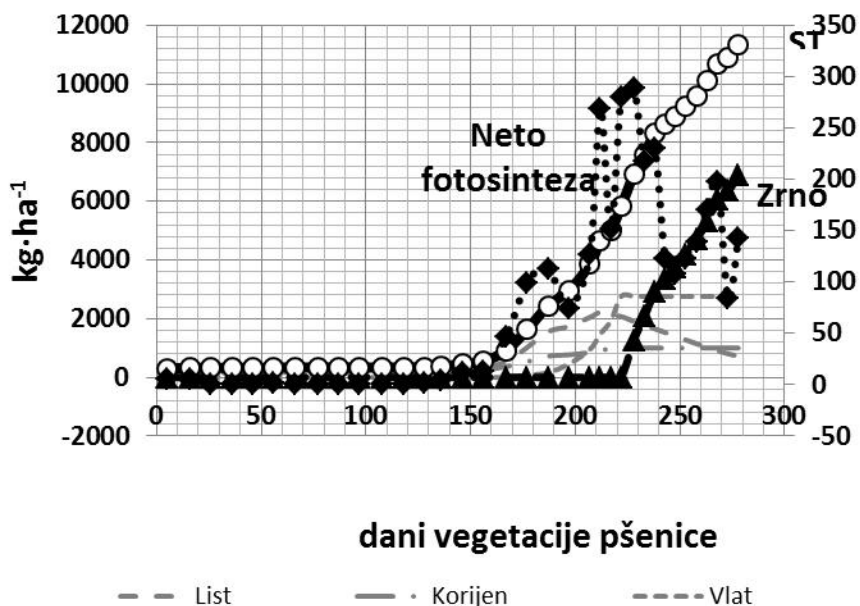
Rezultati simulacije ozime pšenice:

Dan	Tsum °C	Stadi 0-1	LAI m ²	Neto fot. kg ha ⁻¹	List	Korijen	Vlat	Zrno	Suha tvar	cfl	cft	cfv
					Suha tvar t ha ⁻¹					0-1		
5	54.8	0.02	0.31	5.686	0.168	0.136	0.0	0.00	0.305	0.	0.7	0.3
16	129.7	0.06	0.28	5.349	0.161	0.157	0.0	0.00	0.319	0.	0.4	1.0
26	129.7	0.06	0.32	0.000	0.161	0.157	0.0	0.00	0.319	0.	0.0	1.0
36	133.0	0.06	0.32	0.178	0.162	0.158	0.0	0.00	0.320	0.	0.0	1.0
46	133.0	0.06	0.32	0.000	0.162	0.158	0.0	0.00	0.320	0.	0.0	1.0
56	173.4	0.08	0.32	1.203	0.166	0.162	0.0	0.00	0.329	0.	0.2	1.0
66	173.4	0.08	0.33	0.000	0.166	0.162	0.0	0.00	0.329	0.	0.0	1.0
77	180.0	0.08	0.33	0.439	0.168	0.164	0.0	0.00	0.332	0.	0.0	1.0
87	180.0	0.08	0.33	0.000	0.168	0.164	0.0	0.00	0.332	0.	0.0	1.0
97	180.0	0.08	0.33	0.000	0.168	0.164	0.0	0.00	0.332	0.	0.0	1.0
108	180.0	0.08	0.33	0.000	0.168	0.164	0.0	0.00	0.332	0.	0.0	1.0
118	200.6	0.09	0.33	0.384	0.169	0.166	0.0	0.00	0.335	0.	0.1	1.0
128	220.3	0.10	0.33	1.850	0.176	0.172	0.0	0.00	0.348	0.	0.1	1.0
136	270.9	0.12	0.35	3.920	0.187	0.183	0.0	0.00	0.371	0.	0.4	1.0
146	327.0	0.15	0.37	11.354	0.241	0.211	0.0	0.00	0.453	0.	0.3	1.0
156	402.8	0.19	0.48	12.480	0.300	0.242	0.0	0.00	0.543	0.	0.5	1.0
167	517.0	0.24	0.60	46.887	0.545	0.368	0.0	0.00	0.914	0.	0.6	1.0
177	642.6	0.30	1.09	99.355	1.018	0.533	0.0	0.00	1.626	0.	0.8	1.0
187	765.5	0.36	2.03	113.186	1.555	0.720	0.1	0.00	2.437	0.	0.8	1.0
197	873.8	0.41	3.11	74.268	1.737	0.768	0.4	0.00	2.959	0.	0.7	1.0
207	971.9	0.46	3.47	126.507	2.047	0.850	0.9	0.00	3.849	0.	0.6	1.0
212	1053.	0.50	4.09	268.521	2.217	0.937	1.4	0.00	4.634	0.	1.0	1.0
217	1129.	0.53	4.43	151.346	2.120	0.959	1.9	0.00	5.008	0.	1.0	1.0
222	1197.	0.57	4.24	280.412	2.073	0.999	2.7	0.00	5.833	0.	0.9	1.0
228	1285.	0.61	4.14	289.226	1.907	0.999	2.7	1.26	6.934	0.	0.9	1.0
233	1369.	0.65	3.81	217.692	1.780	0.999	2.7	2.06	7.601	0.	1.0	1.0
238	1444.	0.68	3.47	230.468	1.653	0.999	2.7	2.90	8.315	0.	0.9	1.0
243	1524.	0.72	3.14	122.061	1.526	0.999	2.7	3.34	8.634	0.	1.0	1.0
248	1596.	0.76	2.82	108.281	1.398	0.999	2.7	3.74	8.902	0.	0.9	1.0
253	1684.	0.80	2.51	122.885	1.271	0.999	2.7	4.19	9.223	0.	1.0	1.0
258	1775.	0.84	2.22	139.320	1.144	0.999	2.7	4.70	9.604	0.	1.0	1.0
263	1875.	0.89	1.94	169.659	1.017	0.999	2.7	5.31	10.096	0.	1.0	1.0
268	1987.	0.94	1.72	197.830	0.904	0.999	2.7	6.04	10.705	0.	1.0	0.7
273	2091.	0.99	1.53	83.764	0.803	0.999	2.7	6.34	10.911	0.	1.0	0.7
278	2171.	1.03	1.36	142.390	0.714	0.999	2.7	6.86	11.341	0.	1.0	0.9

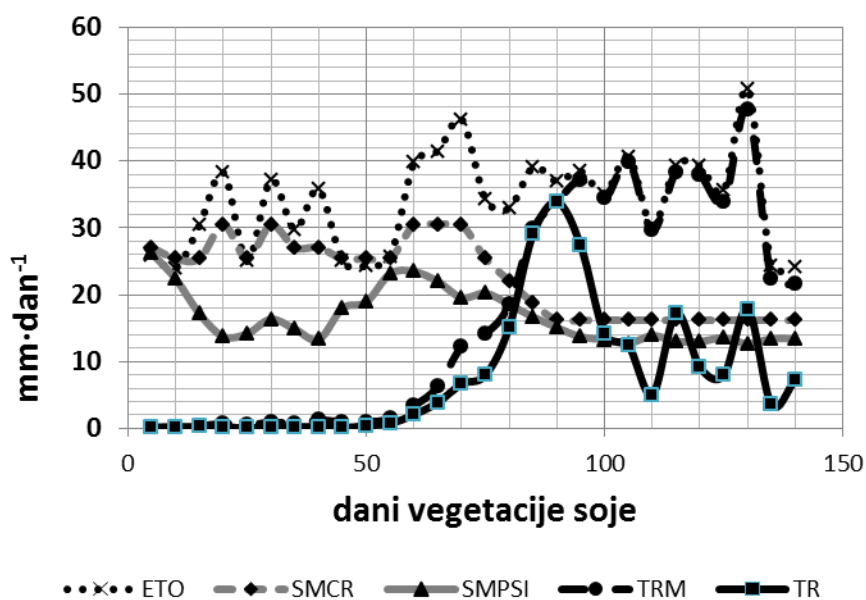
Tablica 11.18. Kompjutorska simulacija organske produkcije šećerne repe

Rezultati simulacije šećerne repe:

Dan	Tsum °C	Stadij 0-1	LAI m ²	Neto fot. kg ha ⁻¹ dan ⁻¹	List	Korijen	Suha tvar	cfl	cft	cfv
					Svježa tvar t ha ⁻¹					
9	89.60	0.02	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.00	0.66	0.00
14	133.20	0.04	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.00	0.58	0.00
19	199.90	0.06	0.13	33.42	2.282	0.910	3.193	0.08	0.88	1.00
24	293.00	0.09	0.19	44.70	3.160	1.057	4.218	0.11	1.00	1.00
29	380.90	0.11	0.26	67.69	4.826	1.281	6.107	0.15	1.00	1.00
34	473.50	0.14	0.39	96.49	7.044	1.695	8.739	0.22	1.00	1.00
39	563.00	0.17	0.57	145.71	10.433	2.320	12.753	0.31	1.00	1.00
44	637.20	0.19	0.83	162.44	13.782	3.017	16.799	0.41	0.98	1.00
49	724.50	0.22	1.08	222.13	19.590	3.969	23.560	0.50	1.00	1.00
54	806.80	0.25	1.51	264.68	26.057	5.280	31.337	0.62	1.00	1.00
60	937.30	0.29	1.97	175.93	29.911	6.325	36.236	0.72	0.82	0.90
65	1025.00	0.32	2.21	267.35	35.600	7.648	43.248	0.76	1.00	1.00
70	1117.60	0.34	2.58	276.20	40.488	9.562	50.051	0.81	1.00	1.00
75	1221.70	0.38	2.88	323.40	46.311	11.803	58.115	0.84	0.91	0.95
80	1330.00	0.41	3.22	284.35	50.539	13.774	64.313	0.87	0.83	0.91
85	1425.20	0.44	3.44	413.62	57.495	17.186	74.682	0.89	1.00	1.00
90	1535.60	0.47	3.83	340.60	61.900	19.996	81.897	0.91	0.79	0.88
95	1637.70	0.51	4.02	374.81	66.861	23.088	89.950	0.92	0.95	0.97
100	1737.80	0.54	4.24	354.09	69.703	27.061	96.764	0.93	0.99	0.99
105	1842.00	0.57	4.32	417.05	73.803	31.740	105.544	0.93	0.91	0.95
110	1959.80	0.61	4.46	247.80	73.541	34.521	108.062	0.94	0.64	0.80
115	2071.20	0.64	4.32	357.53	73.333	40.892	114.225	0.93	0.77	0.87
121	2222.70	0.69	4.19	152.90	69.038	44.162	113.200	0.93	0.47	0.68
126	2350.90	0.73	3.79	122.62	64.165	46.347	110.512	0.91	0.43	0.66
131	2463.40	0.76	3.41	232.17	60.841	51.173	112.015	0.89	0.75	0.86
136	2583.60	0.80	3.13	146.62	56.709	54.222	110.932	0.86	0.59	0.58
141	2702.60	0.84	2.82	117.53	52.435	56.820	109.255	0.84	0.62	0.55
146	2829.00	0.88	2.52	76.59	48.101	58.513	106.615	0.80	0.47	0.45
152	2922.00	0.91	2.23	313.10	46.792	66.821	113.614	0.76	1.00	1.00
157	3005.70	0.93	2.10	279.37	45.432	72.997	118.430	0.74	1.00	0.97
162	3099.70	0.96	1.99	137.25	42.519	76.032	118.552	0.72	1.00	0.58
167	3178.30	0.99	1.81	251.62	41.257	81.595	122.853	0.69	1.00	0.90
172	3263.10	1.01	1.71	220.58	39.751	86.472	126.224	0.67	1.00	0.86



Slika 11.43. Prinosi (ST/ha) i neto fotosinteza ozime pšenice (ST kg ha⁻¹ dan⁻¹)



Slika 11.44. Trenutna vlaga tla (SMCR), korisna vlaga (SMPSI) i transpiracija (TRM = najviša moguća, TR = trenutna) za vrijeme vegetacije ozime pšenice

12. GNOJIDBA USJEVA

Vrijeme i način primjene te oblik gnojiva moraju biti usklađeni sa zahtjevima usjeva i agroekološkim uvjetima (tlo, klima, vrsta, kultivar, namjena usjeva itd.). Kod izbora načina primjene i vrste gnojiva (element, kemijski oblik, agregatno stanje) moraju se uzeti u obzir agronomski i ekonomski razlozi (učinkovitost). Naime, gnojiva mogu biti kruta, tekuća i plinovita, različite koncentracije hraniva, načina apliciranja, ponašanja u tlu (produženog učinka, iskorištenja, utjecaja na tlo s obzirom na njegova fizikalno-kemijska svojstva itd.) i cijene po jedinici aktivne tvari. Bitno je naglasiti da temeljna funkcija gnojiva nije samo povećanje plodnosti tla, već osiguranje stabilnih i visokih prinosa biljaka uz veću profitabilnost njihovog sustava uzgoja. Također, važno je naglasiti kako se većina istraživača slaže s tvrdnjom da gnojidba prosječno utječe najmanje s 50 % na povećanje prinosa u odnosu na sve ostale agrotehničke mjere.

12.1. NAČINI PRIMJENE GNOJIVA

Oblik gnojiva diktira način njegove primjene:

- Kruta gnojiva mogu se primijeniti korištenjem raspodjeljivača po cijeloj površini ili u trake, zatim zaorati ili unijeti u tlo kod međuredne kultivacije te bez unošenja u tlo (omaške) kod prihrane usjeva.
- Tekuća gnojiva mogu se primijeniti po cijeloj površini prskalicama, u trake zajedno sa sjetvom, natapanjem površine otopinom gnojiva (gravitacijski) ili injektiranjem u tlo (u trake). Anhidrirani amonijak je pod normalnim tlakom plin i mora biti injektiran u tlo (kao i sva tekuća gnojiva koja isparavaju) radi sprječavanja gubitaka.

Kruta (konvencionalna) gnojiva raspodjeljuju se velikim brojem različitih, najčešće širokozahvatnih strojeva. Kvaliteta rada raspodjeljivača je vrlo važna, a nepravilan rad se najčešće zapaža u tamnozelenim (previše hraniva) ili žutozelenim (premalo hraniva) područjima (trakama) usjeva. Na taj način gubitci u prinosu su znatni, kako zbog nedostatka, tako i suviška hraniva u pojedinim dijelovima usjeva. Stoga je mehanički aspekt gnojidbe vrlo važan i mora mu se posvetiti dužna pozornost (izbor stroja, podešavanje, brzina rada i sl.). Npr. kod centrifugalnih raspodjeljivača važna je veličina granula i ujednačenost kemijskog sastava granule kompleksnog gnojiva, a kod miješanih gnojiva i homogenost smjese pojedinačnih gnojiva.

Tekuća gnojiva niskog tlaka (ili bez tlaka isparavanja), npr. UAN, raspodjeljuju se po parceli vrlo ujednačeno prskalicama, a hraniva se doziraju mnogo preciznije u

odnosu na primjenu krutih gnojiva. Međutim, prskalice moraju biti ispravne i dobro kalibrirane.

Anhidrirani amonijak se primjenjuje u jesen na poranu parcelu (ili ugar) ili prije sjetve. Koristi se specijalna oprema pod visokim tlakom od nehrđajućeg materijala s aplikatorima za unošenje u tlo, najbolje na dubinu od 15-25 cm na slabo kiselim i kiselim tlima kod povoljne vlažnosti da bi se izbjegli gubitci dušika volatilizacijom. Najveći broj metoda unošenja anhidriranog amonijaka u tlo podrazumijeva i njegovu obradu upotrebom "chisel" pluga (radna tijela kruta, elastična ili za uklanjanje korova). Izbor stroja (ili njegovo podešavanje) mora odgovarati dubini aplikacije dušičnog gnojiva, brzini rada, kondiciji i tipu tla te mikroteljefu (orografskim svojstvima parcele).

Gnojidba je složen problem (agrotehnički, ekofiziološki, agroekološki i agroekonomski) koji je i do sada svojom širinom i dubinom zaokupljao veliki broj istraživača i proizvođača hrane. Na temelju velikog broja eksperimentalnih podataka jasno je kako količina hraniva u tlu određuje visinu priroda, pri čemu je odnošenje elemenata žetvom uglavnom manje od onih dodanih gnojivima pa je učinkovitost i rentabilnost gnojidbe često nezadovoljavajuće niska. Zbog toga je potrebno dobro poznavati dinamiku i raspoloživost hraniva u tlu, posebice dušika, ali i primjenjivati gnojiva u skladu s biološkim, ekonomskim i ekološkim uvjetima. Tablica 12.1. pokazuje prosječno povećanje priroda pojedinih usjeva u kg po kg aktivne tvari iz mineralnog gnojiva.

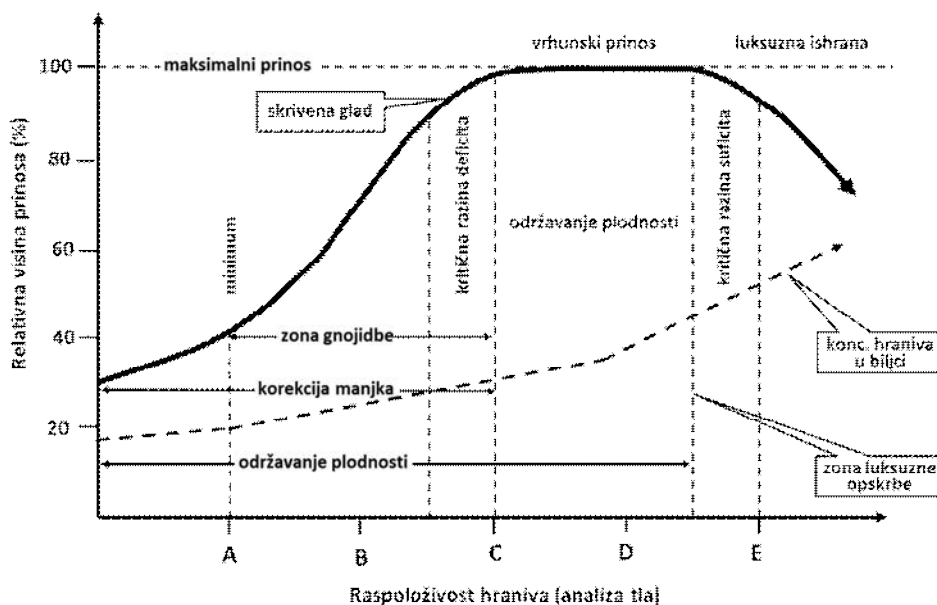
Tablica 12.1. Prosječno povećanje priroda u kg kg⁻¹ aktivne tvari (Gašpar, 1995.)

Element	Pšenica	Kukuruz	Krumpir	Šećerna repa	Sijeno
N	16-20	15-20	90	90	30
P ₂ O ₅	5-7	3-5	46	51	26
K ₂ O	2,5-3	3-4	19	29	12

Značaj pojedinih čimbenika mijenja se tijekom vegetacije, ovisno o vrsti i načinu uzgoja usjeva te su razlike u visini priroda rezultat ekspresije genotipa kroz morfološka, anatomska i biokemijsko-fiziološka svojstva u interakciji s agroekološkim kondicijama. Dakle, pojedini usjevi (i kultivari) imaju različite zahtjeve za ukupnom količinom hraniva, posebno dušika potrebnog za ostvarenje najviše mogućeg priroda, uz različitu reakciju ovisno o vremenskim i zemljišnim uvjetima, što se može označiti kao sortna specifičnost mineralne ishrane.

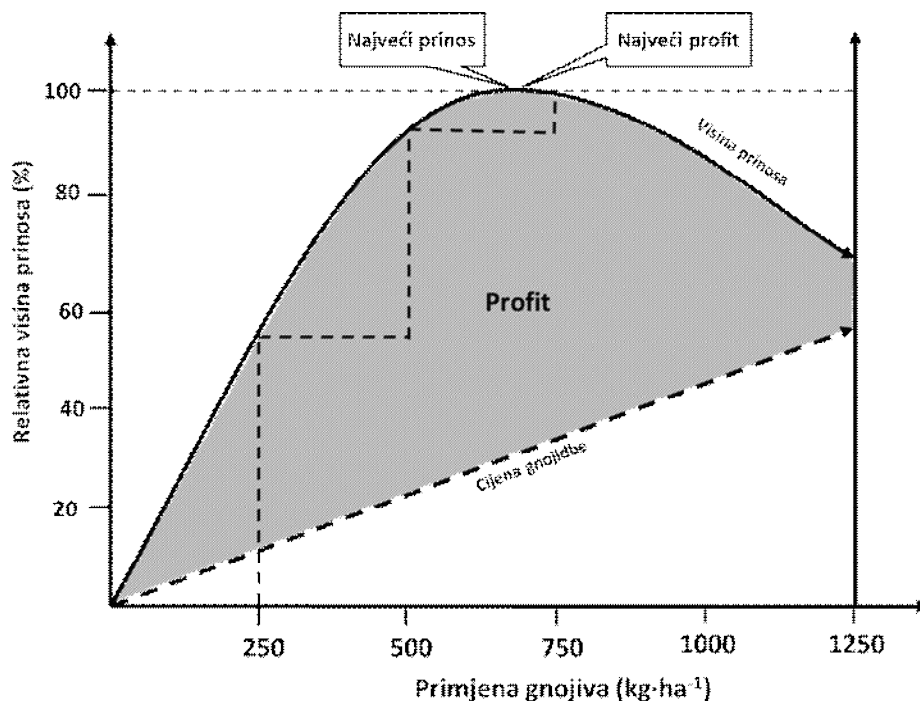
Ekonomski principi nalažu da se količina gnojiva povećava sve dok je rast prinosa rentabilan (slike 12.1. i 12.2). Dakle, racionalna gnojidba svih usjeva podrazumijeva količinu gnojiva koja odgovara potrebama biljke, stanju usjeva, plodnosti tla i istovremeno vodi računa o klimatskim uvjetima i mogućem prirodnom. Pri tome kemijske analize tla pomažu u procjeni količine hraniva koje

biljka može usvojiti, a analize biljne tvari o tome koliko hraniva biljke moraju usvojiti da bi postigle određeni prirod. Problem nije nimalo jednostavan, jer potrebne količine hraniva koje se daju gnojidbom i njihov omjer variraju ovisno o biljnoj vrsti, kultivaru, načinu uzgoja, stadiju razvoja i dinamici hraniva u tlu. Stoga se rast biljaka i tvorba priroda moraju shvatiti kao jedinstven proces koji se odvija prema složenim prirodnim zakonitostima i podložan je djelovanju niza agroekoloških činitelja biotičke i abiotičke prirode.



Slika 12.1. Zadatak gnojidbe i utjecaj raspoloživosti hraniva na visinu prinosa i koncentraciju elemenata u biljnoj tvari

Važno je podsjetiti kako na efikasnost gnojidbe snažno utječe doza primijenjene aktivne tvari, potreba usjeva, vrijeme i načina unošenja. Naime, povećanjem doze iznad stvarnih potreba usjeva, efikasnost svih gnojiva, posebice dušičnih, jako pada pa tako kod niske primjene N njegova efikasnost (usvajanje u prvoj godini primjene) može biti i 70 %, a kod luksuzne primjene efikasnost opada na ~ 30 %. Koristeći se analizom velikog broja eksperimentalnih podataka, može se zaključiti kako je usvajanje hraniva izrazito dinamičke prirode, a uvažavanje tog koncepta postiže se učinkovitije iskorištavanje primijenjenih gnojiva s porastom prinosa po principu složenog pravila trojnog i nelinearnog smanjivanja potrebe za tri glavna hranjiva elementa (Vukadinović, 2010.). Suštinu hipoteze promjenjivog usvajanja hraniva najbolje objašnjava tablica 12.2.



Slika 12.2. Povezanost intenziteta gnojidbe, visine prinosa i profita

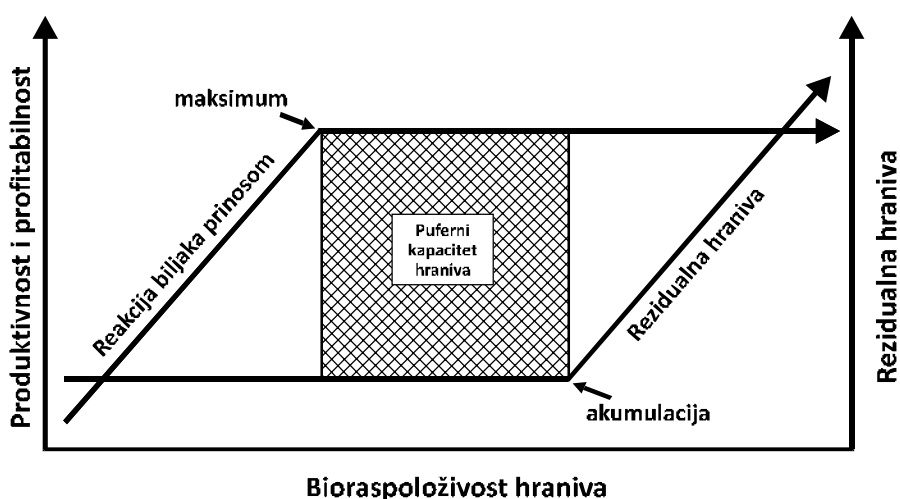
Tablica 12.2. Dinamička priroda iznošenja hraniva (Vukadinović, 2010.)

Usjev	Mogući prinos t ha ⁻¹		Ciljni prinos t ha ⁻¹	"Linearno" iznošenje kg t ⁻¹ prinosa			"Dinamičko" iznošenje kg t ⁻¹ prinosa		
	min.	max.		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Pšenica ozima	4,0	9,5	7,6	27,5	14,0	17,5	19,8	10,1	12,6
Kukuruz	5,0	15,0	12,0	25,0	12,0	20,0	19,0	9,1	15,2
Šećerna repa	40,0	90,0	80,0	4,0	1,5	5,5	2,6	1,0	3,6

Prije objašnjena hipoteze "dinamičkog usvajanja hraniva" treba istaći kako se ona može primjenjivati samo u intenzivnoj poljoprivrednoj proizvodnji uz postizanje visokih prinosa. Naime, uz višegodišnje iskustvo proizvođača i elementarno znanje o uzgoju usjeva, oni lako postižu ~60 % potencijalnog kapaciteta produkcije za konkretno agroekološko područje i pri toj razini proizvodnje (intenziteta agrotehnike i ulaganja) treba za proračun potrebe koristiti "linearne" podatke o iznošenju glavnih biogenih elemenata. Za postizanje 80 % od najvećeg mogućeg prinosa, ili više, potrebno je inženjersko znanje koje se temelji na laboratorijskim analizama tla, prognozi pojave i učinkovitoj zaštiti od bolesti, suvremenoj agrotehnici (uključujući i tehnike reducirane i konzervacijske obrade), navodnjavanju i dr., dakle znanje koje pruža fakultetsko obrazovanje. Inzistiranje na prinosima većim od 80 % od potencijala nekog proizvodnog područja, uglavnom ekonomski nije opravdano (o čemu

posljednju riječ ipak ima tržište, odnosno cijena proizvoda) jer ulaganje premašuje povećanje prinosa i/ili kakvoću proizvoda.

Na primjeru šećerne repe (tablica 12.2.) jasno se vidi kako kod prinosa od 80 t ha⁻¹ korijena potreba za N pada s 4,0 na 2,6 kg t⁻¹ korijena, potreba fosfora s 1,5 na 1,0, a kalija s 5,5 na 3,6 kg t⁻¹. Primjena originalnog koncepta "dinamičkog usvajanja hraniva" ugrađena je u ekspertnu verziju ALR kalkulatora (Vukadinović, 2010.) te se na temelju nekoliko tisuća proračuna gnojidbe može ustvrditi kako su gnojidbene preporuke sada bolje usklađene s ekonomskim i ekološkim principima te se dobro uklapaju u suvremene trendove "filozofije gnojidbe": Primjena potrebnog hraniva i njegove adekvatne doze u pravo vrijeme, na pravo mjesto i uz pravu cijenu.



Slika 12.3. Pufni kapacitet tla za hraniva

Visoke i stabilne prinose, bez većih oscilacija pod utjecajem vremenskih uvjeta (naročito suše), moguće je postići samo na plodnim tlima, dobro opskrbljenim hranivima i dobrim fizikalno-kemijsko-bioloških svojstava (slika 12.1.). U tom smislu rezidualna hraniva (zaliha hraniva u tlu) predstavljaju puffer (slika 12.3.) kojim se umanjuje manjak i/ili gubitak hraniva. Naravno, pufni kapacitet nekog tla ovisan je o njegovim fizikalno-kemijskim svojstvima, zalihama hraniva, strukturi (vodnozračnom režimu), biogenosti (aktivnosti mikroorganizama), pH-vrijednosti tla, količini i kvalitetu organske tvari, unošenju žetvenih ostataka i organskoj gnojidbi, obradi i dr. Potrebno je naglasiti kako suvremena filozofija gnojidbe razmatra visinu prinosa samo u funkciji profitabilnosti, ali uz očuvanje plodnosti tla i, kad je god moguće, primjenom takve agrotehnike koja će produktivnost tla povećati i zaštititi. Stoga je integrirana biljna proizvodnja sve više zastupljenija kao zalag očuvanja tla i sprječavanja njegove degradacije.

12.2. AGROEKOLOŠKI I EKOFIZIOLOŠKI TEMELJI GNOJIDBE NAJVAŽNIJIH RATARSKIH USJEVA

U daljnjem tekstu opisani su primjeri gnojidbe glavnih ratarskih usjeva: pšenice kao glavne strnine i ozimine, šećerne repe kao naše najvažnije industrijske biljke i okopavine te kukuruza koji zauzima najviše obradivih površina. Velike razlike u tehnologiji uzgoja, koje su rezultat agroloških i ekofizioloških posebnosti tih usjeva, dostatne su za prikaz najvećeg broja čimbenika koje treba poznavati i uvažavati kod utvrđivanja potrebe za gnojidbom svih usjeva. Također, obuhvaćena su znanstvena i proizvodna iskustva zemalja s visokorazvijenom ratarskom proizvodnjom, posebice SAD-a, s namjerom prikaza farmerskog sustava proizvodnje hrane kojoj teži i naša poljoprivreda.

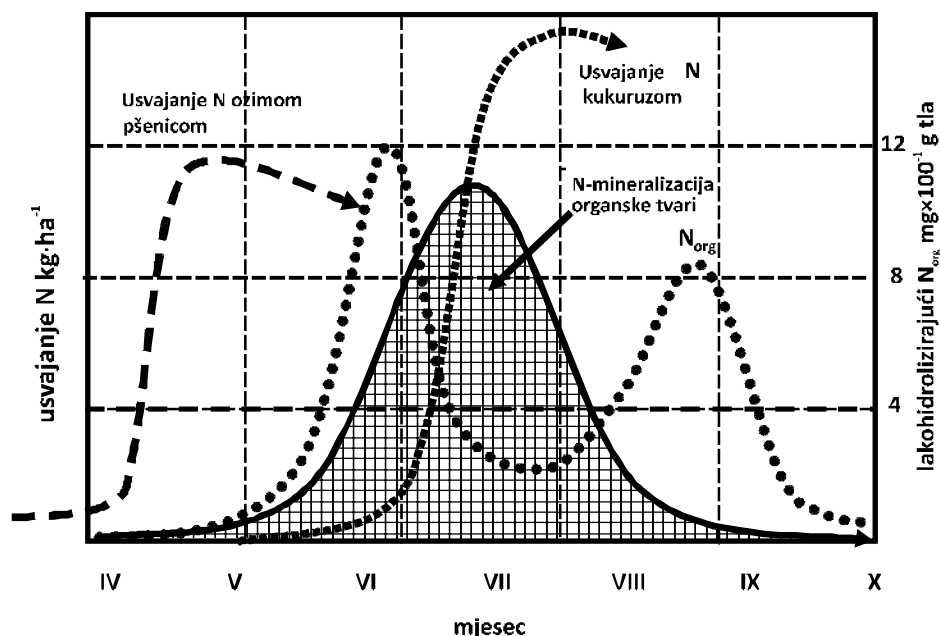
12.2.1. Pšenica

Pšenica do proljetnog kretanja vegetacije akumulira uglavnom "plastične" tvari, odnosno takve rezerve hraniva koje se lako transformiraju u građevne jedinice organske tvari. Naravno, kapacitet za akumulaciju (*sink*) najviše ovisi o dostignutoj veličini biljaka u kriptovegetaciji i temperaturi. Poznato je kako pšenica akumulira hraniva, prije svega nitrata, kada je temperatura 0 °C ili više. Kod temperatura bliskih indikativnoj temperaturi (za pšenicu to je 0 °C) usvajanje hraniva je najvećim dijelom iz vodene faze tla, pa kako je na koncentraciju fosfatnih i kalijevih iona u tlu teško utjecati zbog kemijske (fosfor) i fizičke sorpcije (kalij) koja ovisi prvenstveno o fizičko-kemijskim svojstvima tla, ta hraniva treba zaorati prije sjetve do dubine najvećeg rasprostiranja korijenskog sustava. Suprotno fosforu i kaliju, dušik u tlu ne može stvarati trajne rezerve. Njegov sadržaj je vrlo varijabilan po dubini profila i vremenu, mineralizacije gotovo da i nema tijekom zime (slika 12.4.), stoga se dušik mora dodavati u više navrata.

Plodna tla, pored povoljnih fizičko-kemijskih osobina, imaju veći puforni kapacitet, odnosno sposobnost održavanja ujednačene koncentracije iona u vodenoj fazi tla. Dobra opskrbljenost fosforom utječe na bolji rast korijena, pojačava busanje, povećava težinu klasova i zrna bez porasta mase nadzemnog dijela. Prihrana fosforom i kalijem se ne preporučuje zbog neznatnog premještanja tih hraniva u dubinu, pa korijen ostaje na površini, što smanjuje otpornost na polijeganje i sposobnost korištenja vode iz dubljih slojeva.

Za postizanje visokih priroda pšenice potrebna je povoljna mineralna ishrana od I-V etape organogeneze (nediferencirani rast vegetacijskog vrha do faze formiranja cvjetnih zametaka). Istraživanja pokazuju da visina priroda najviše ovisi o broju zrna u klasu (~ 90 %), ali je istovremeno i broj zrna u negativnoj

korelaciji s njihovom masom. Veći broj zrna daje visok kapacitet "sinka", odnosno predstavlja snažan akceptor asimilata. U početku proljetnog kretanja vegetacije neophodna je visoka koncentracija nitrata u tlu (20-30 ppm ili $\sim 12\text{-}20 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ u sloju 0-20 cm) što se postiže isključivo prvom N-prihranom. Nitratni oblik dušika ne sorbira se u tlu, podložan je ispiranju, stoga prihranjivanje, dok je kapacitet akumulacije biljaka mali, mora biti usklađeno s uzrastom biljaka, fizikalnim svojstvima tla i klimatskim prilikama.



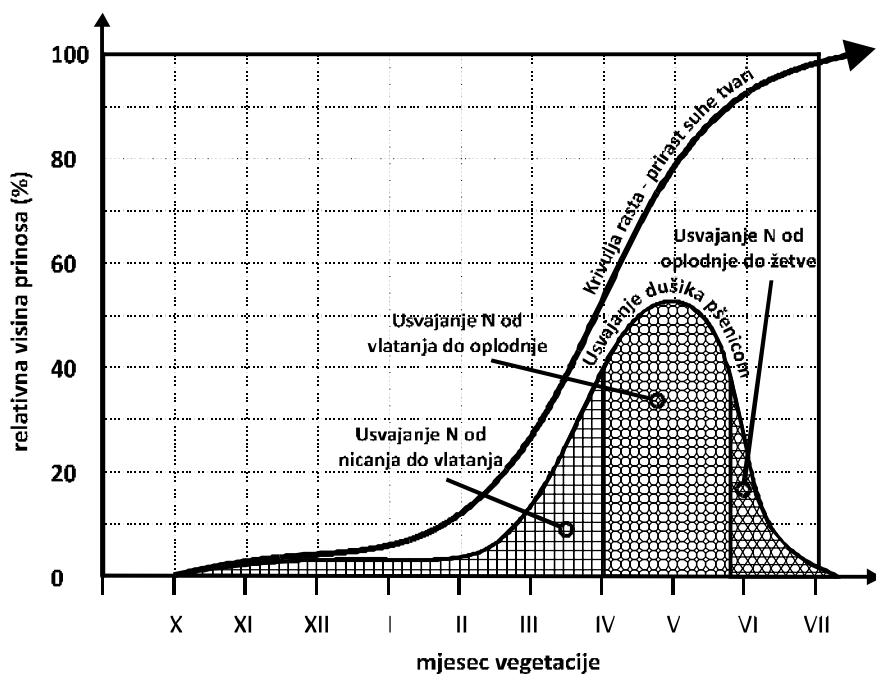
Slika 12.4. Sezonska dinamika N-mineralizacije

Previsoka koncentracija N-NO_3 u tlu također može biti štetna iz više razloga. Porast koncentracije iona u vodenoj fazi tla izaziva rast osmotskog tlaka (*solni udar*) pa je uz nizak intenzitet metabolizma korijena kod niskih temperatura tla zaustavljeno usvajanje vode (*fiziološka suša*) i otopljenih hraniva, a kod viših temperatura dovodi do produženja vegetacije uz nisku produktivnost transpiracije.

Suvišna količina dušika snažno utječe na porast nadzemnog dijela, a vrlo malo korijena pa se proširuje omjer korijena prema izdanku te smanjuje otpornost na niske temperature i bolesti, a biljke su plitko ukorijenjene što kod kasnije pojave suše može biti glavni uzrok podbačaja u prinosu. U hladnim tlima, posebno glinastim, humoznim i slabo aeriranim (zbijenim ili saturiranim vodom), povećana koncentracija nitrata može umanjiti štetne redukcijske procese. Povoljan oksidoredukcijski potencijal (iznad +300 mV) značajan je za aktivnost mikroorganizama i snabdijevanje biljaka dušikom, sumporom i drugim elementima pri čemu nema uvjeta za gubitak dušika procesima denitrifikacije.

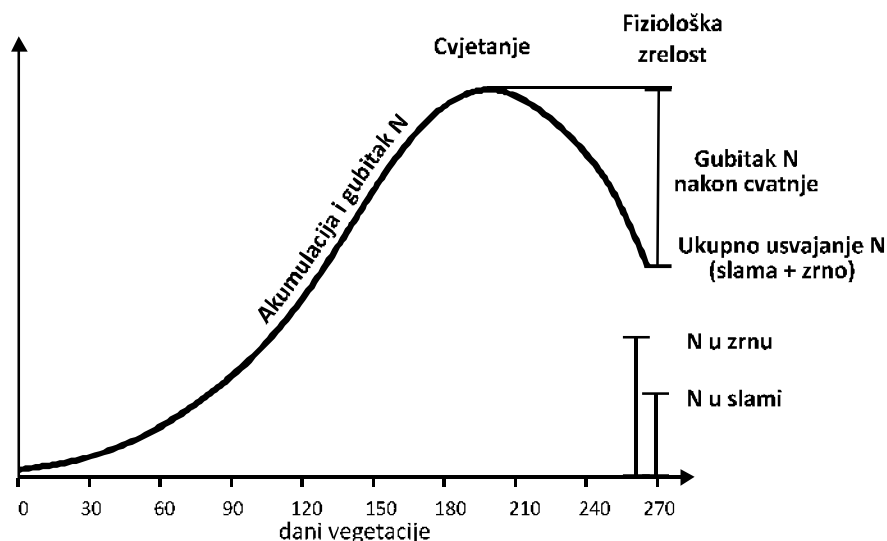
Primjena čistog amonijskog ili amidnog oblika dušika tijekom vegetacije pšenice, posebice folijarna aplikacija, opravdana je samo nakon proljetnog kretanja vegetacije kod visoke razine metabolizma (razvijena asimilacijska površina i temperature 5-10 °C) i mogućnosti brze ugradnje reduciranih oblika dušika u organsku tvar. Naime, kod niske razine metabolizma nedovoljna je produkcija keto kiselina potrebnih za vezivanje reduciranih oblika dušika u biljkama pa nagomilavanje amonijskog oblika dušika u biljkama izaziva zastoj u rastu. Stoga treba, posebice u prvoj prihrani pšenice, izričito izbjegavati primjenu uree i UAN-a.

Najveća količina hraniva usvoji se od početka vlatanja do početka klasanja. Istraživanja u istočnoj Hrvatskoj (Vukadinović, 2003.) pokazala su kako se u tom periodu usvoji oko 50 % N, 60 % P i 70 % K od iznesenih 200 kg N, 27 kg P (62 kg P₂O₅), 141 kg K (170 kg K₂O), 35 kg Ca i 21 kg Mg uz prirod od 7,83 t ha⁻¹ zrna (slika 12.5.). Do početka vlatanja pšenica je od ukupne količine hraniva usvojila tek 10 % N, 8 % P i 13 % K. Podaci se znatno razlikuju od zapadnoeuropskih gdje (slika 12.6. i tablica 12.3.) pšenica apsorbira u ožujku i travnju 70 % ukupnih potreba dušika, dok je u našim agroekološkim uvjetima usvajanje bilo produženo gotovo do kraja vegetacije.



Slika 12.5. Usvajanje dušika i akumulacija suhe tvari ožimom pšenicom na području istočne Hrvatske

Koncentracija dušika, izražena na suhu tvar, raste do busanja (4,5-5,5 %), a zatim opada sve do 1,00-1,25 % nakon formiranja zrna (tablica 12.4.). Visok sadržaj dušika u busanju (nitrata i lakotopljivih organskih oblika) predstavlja neophodnu rezervu za proljetno izduživanje (*filodistenziju*). Brz porast nadzemnog dijela započinje kad se minimalna temperatura ustali iznad 5 °C. Dolazi do povećanja volumena stanica, uglavnom na račun rezervi i usvajanja vode. To je trenutak kada naglo raste potreba za dušikom, što je pravi trenutak za drugu prihranu. Kod kasnijih rokova sjetve prisutna je opasnost od prekratke duljine *kriptovegetacije*, pa kod zatopljenja pšenica brzo prelazi u fazu izduživanja. Posljedica je smanjenje priroda jer je bio prekratak meristemski razvoj inicijalnih komponenti klasa (izduživanje i segmentacija vrha rasta, III i IV etapa organogeneze) koje određuju građu, odnosno broj klasića na klasu i broj začetaka cvjetića u klasiću.



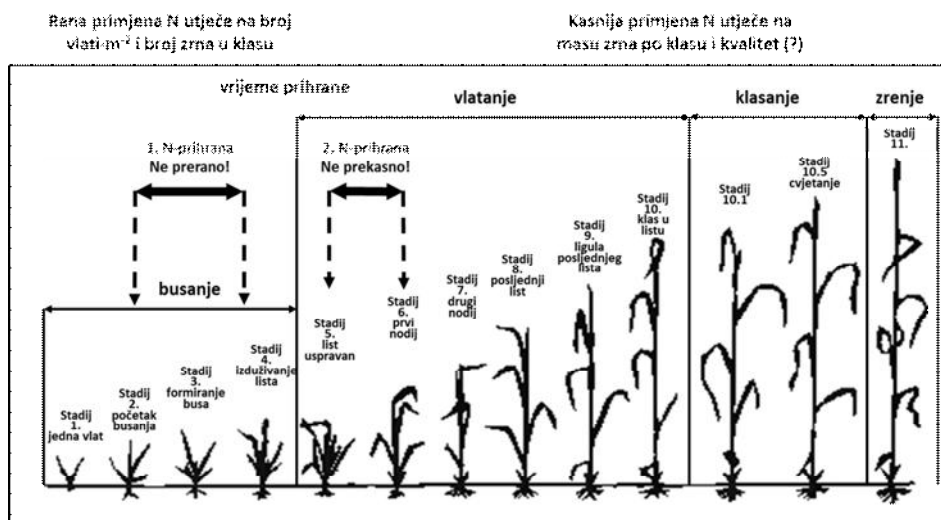
Slika 12.6. Ukupno usvajanje N ozimom pšenicom u zapadnoj Europi i procjena gubitka N nakon cvatnje (*Raun et al., 2007.*)

U daljnjem tijeku vegetacije pšenice pri temperaturi 5-10 °C dolazi do istežanja prvog i drugog internodija, a kad se temperatura ustali iznad 10 °C dolazi do distenzije preostalih internodija (3., 4. i 5.). Porast uzdužne osi biljaka reguliran je *β -indol octenom kiselinom (auksin)* za čiji je prekursor (*triptofan*) također potreban dušik. Pojavom četvrtog lista zametnut je klas i određen broj klasića. Dobra ishranjenost dušikom u toj etapi razvoja sprječava kasniju sterilnost klasića i povećava broj plodnih cvjetića (tri i više po klasiću). Smatra se da je razvoj komponenti klasa samo djelomice pod utjecajem nasljedne osnove (*neodređena inflorescencija*), stoga je dobra ishranjenost biljaka još značajnija.

Tablica 12.3. Relativno usvajanje N, P i K pšenicom (Aigner et al., 1988.)

Relativno usvajanje hraniva po fenofazama								
Fenofaza	Ozima pšenica			Biomasa (ST)	Jara pšenica			Biomasa (ST)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
	Relativno usvajanje hraniva u postotku od ukupnog usvajanja							
Rani porast	13	0	0	1	8	3	6	1
Busanje	24	9	10	4	25	17	36	2
Vlatanje - početak	38	27	22	16	49	47	72	9
Vlatanje - sredina	68	45	38	31	71	64	95	20
Klasanje	84	75	90	58	97	100	100	36
Cvjetanje	100	91	100	80	100	93	82	51
Formiranje pšena	100	100	89	100	100	90	72	78
Žetva - biomasa	95	90	77	100	100	86	68	100
Žetva - pšeno	70	71	20	49	78	86	20	50
Najveće usvajanje (kg ha ⁻¹) pojedinih hraniva i najveći prinos biomase i zrna (t ha ⁻¹)								
Cijela biljka	187	55	252	13,7	129	58	125	9,0
Samo zrno	130	39	51	6,7	100	50	25	4,5

Dozrijevanje pšenice odvija se poglavito na račun razgradnje rezervnih tvari (*reutilizacija*) uz njihovu alokaciju iz fotosintetski neaktivnih dijelova biljke (starije lišće i vlat) u klas i vršni list (zastavičar). Stoga je zapravo kritičan period tvorbe priroda znatno prije smjene vegetacijske u generativnu fazu razvitka (oplodnja) te se opravdano smatra kako je pravo vrijeme za prvu prihranu trenutak prelaska iz kriptovegetacije u proljetni porast, a za drugu početak izduživanja (vlatanja). Povoljan trenutak prve prihrane lako se indicira mjerenjem aktivnosti nitratne reduktaze. Naime, redukcija akumuliranog NO₃⁻ do NH₄⁺ uvjet je za intenzivnu sintezu proteina i porast biljaka.



Slika 12.7. Kada prihraniti ozimu pšenicu (Vukadinović, 2003.)

Tablica 12.4. Koncentracija primarnih i sekundarnih makroelemenata u ozimoz pšenici (po stadijima, slika 12.7.)

Dušik	Fosfor	Kalij	Sumpor	Magnezij	Kalcij
<u>Cijela biljka:</u> S 3 4,0-5,0 % S 4-6 3,5-4,5 % S 7-8 3,0-4,0 % S 9-10 2,5-3,5 %	<u>Cijela biljka:</u> S 3-5 0,4-0,7 % S 6-10 0,2-0,4 %	<u>Cijela biljka:</u> S 3-4 3,2-4,0 % S 5-8 2,0-3,5 % S 9-10 1,8-3,0 %	<u>Cijela biljka:</u> S 3 0,22-0,55 % S 4-6 0,19-0,55 % S 7-8 0,17-0,55 % S 9-10 0,15-0,40%	<u>Cijela biljka:</u> S 3-10 0,15-0,50 %	<u>Cijela biljka:</u> S 3-10 0,20-0,50 %
<u>Zastavičar:</u> S 10 3,5-4,5 %	<u>Zastavičar:</u> S 10 0,3-0,5 %	<u>Zastavičar:</u> S 10 2,0-3,0 %	<u>Zastavičar:</u> S 10 0,19-0,55 %	<u>Zastavičar:</u> S 10 0,20-0,60 %	<u>Zastavičar:</u> S 10 0,30-0,50 %

Dakle, prihrana pšenice, s obzirom na etape razvoja, mora se uskladiti s fiziološkom aktivnošću pšenice i raspoloživosti dušika tla. Prihranu dušikom treba obaviti u trenutku kada započinje meristemska aktivnost umnožavanja vegetacijskih organa (busanje) i kod zametanja komponenti klasa (početak vlatanja). Prva prihrana je važna za sve pšenice i u svim slučajevima (treći i četvrti list, slika 12.7.) jer se u II i III etapi razvoja izdužuje i segmentira budući klas. Ona utječe na koncentraciju klorofila u listu (boja usjeva), intenzivniju fotosintezu i na brži rast biljaka u vlatanju. Druga prihrana obavlja se u trenutku zametanja klasića (IV etapa razvoja, slika 12.7.) koja pada u početku vlatanja. Taj trenutak određuje se isključivo na temelju stanja razvoja usjeva pšenice bez obzira na "kalendar", odnosno kad se zametak klasa primjetno odvoji od čvora busanja (~2 cm). Treća prihrana u klasanju, ili pred oplodnju ima malo značenje za visinu priroda, ali često utječe na porast hektolitarske mase i veći sadržaj dušika u zrnu. Međutim, mnogi istraživači smatraju da treća prihrana nema utjecaja na kvalitetu zrna jer se tada pretežno akumuliraju niskomolekularni oblici dušika.

N_{min} metoda za utvrđivanje potrebe pšenice u skladu je s ekofiziološkim aspektom gnojidbe pšenice i treba je primjenjivati kako bi se izbjegle sve nedoumice oko vremena i količine dušika u prihrani, ne samo ozime pšenice, već i svih strnih žita.

12.2.2. Šećerna repa

Mineralna ishrana šećerne repe ima vidno mjesto u povećanju prinosa korijena i njegove tehnološke kakvoće. Međutim, velika varijabilnost pojedinih agroekoloških čimbenika na koje šećerna repa osjetljivo reagira, često ne osigurava optimalne uvjete uzgoja. Njih ipak možemo korigirati agrotehnikom,

prije svega gnojidbom. U tu svrhu izvedeni su mnogobrojni pokusi sa šećernom repom, posebice je poklonjena pozornost dušiku, jer je reakcija repe promjenom prinosa i tehnološke kakvoće na količinu i oblik dušika u tlu izrazita.

Produkcija organske tvari po jedinici površine šećernu repu svrstava u sam vrh ratarskih usjeva, a samim tim repa akumulira i veliku količinu hraniva. Poznato je da se visok prinos korijena i dobra tehnološka kvaliteta u većini slučajeva isključuju. To nije pravilo već posljedica odnosa hranjivih elemenata koje tlo nudi biljci i ona ih usvaja. Naime, apsolutno raspoloživa količina hraniva za repu ima manji značaj od međusobnog odnosa elemenata ishrane, što naravno jako ovisi o njihovoj koncentraciji, aktivitetu, dinamici usvajanja i dinamici njihove transformacije u tlu.

Gnojidbi šećerne repe dušikom poklanja se najveća pozornost jer jedinica aktivne tvari N nekoliko puta više djeluje prema djelovanju P i K. S druge strane, ne postoji mogućnost stvaranja dugotrajnijih mineralnih rezervi dušika u tlu pa uz njegovu veliku vremensku i prostornu varijabilnost (po parceli i dubini tla) dolazi do čestih situacija preniske ili prevelike raspoloživosti dušika. Procjena mineralizirajuće sposobnosti tla, pored dugotrajne i skupe laboratorijske procedure, još uvijek ne daje pouzdane vrijednosti, stoga se u posljednje vrijeme iznos mineralizacije simulira matematičko-kompjutorskim modelima (pretežito egzaktno-empirijski) u kombinaciji s N_{min} metodom kojom se utvrđuje ukupni mineralni dušik u tlu, uključujući i rezidualni. Također, koristi se i folijarna analiza peteljki koje su akumulator nitrata kod šećerne repe te mjerenje aktivnosti *nitratne reduktaze* u lišću kao pokazatelj intenziteta ugradnje reduciranog dušika u organsku tvar.

Omjeru dušika i kalija u gnojidbi šećerne repe poklanja se posebna pozornost jer povećanjem doze dušika raste usvajanje kalija i natrija uz pad tehnološke kvalitete korijena. To se može spriječiti samo povećanom K-gnojidbom što snižava sadržaj K, Na, *inverta* i *α-amino-N* u korijenu, koji se ne mogu u standardnom procesu dobivanja šećera (bez primjene ionoizmjenjivača) u značajnoj količini odstraniti (svega 30-40 %) i prelaze gotovo kvantitativno u gusti sok, a zatim u melasu vežući na sebe saharozu.

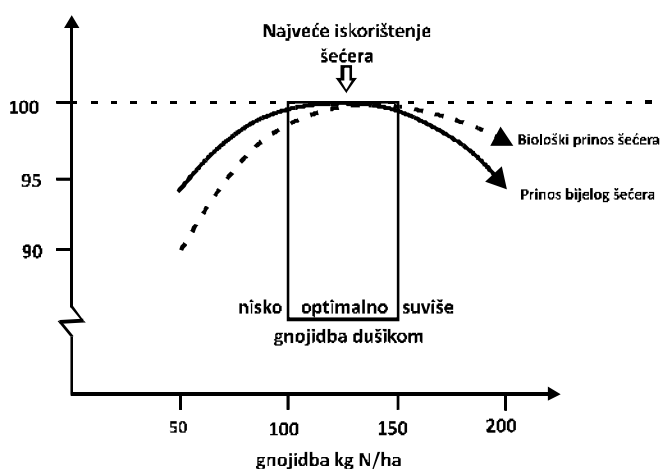
Može se reći kako je *tehnološka kvaliteta šećerne repe* određena sadržajem saharoze u korijenu (*polarizacija* ili *digestija*) i mogućnosti njegove ekstrakcije u procesu dobivanja "*bijelog šećera*" pri čemu sadržaj "*štetnog dušika*" (niskomolekularni spojevi s N, npr. slobodne aminokiseline, *betain*, *α-aminomaslačna kiselina* itd.) ima važnu ulogu.

Smatra se da je u vodenoj kulturi optimalan omjer $N:K_2O = 1:0,7$, ali u tlu to nije ni izbliza tako zbog različite učinkovitosti usvajanja tih elemenata iz tla pa se za repu uglavnom primjenjuju naglašene doze kalija. Nasuprot kaliju, fosforu se u gnojidbi šećerne repe poklanja znatno manja pozornost, jer je njegov utjecaj na

tehnološku kvalitetu šećerne repe znatno manji, ali ne i manji u prinosotvornom pogledu.

Šećerna repa preferira nitratni oblik dušika kojeg lako akumulira i zatim reducira ovisno o potrebi rasta lisšća i korijena, premda će usvojiti jednako dobro i amonijski oblik i odmah ga ugraditi u organsku tvar. Najviše nitratnog dušika akumulira se u peteljicama (55 %), plojkama (30 %) i korijenu (15 %) i nakon redukcije *nitratnom reduktazom* ugrađuje u organsku tvar (vidi poglavlje 6.1). Povećanje alkalnosti pri redukciji kompenzira se stvaranjem viška organskih kiselina (oksalna, limunska i jabučna) tako da se redukcija dušika i tvorba karboksilata odvija u gotovo stehiometrijskom omjeru. Povećani alkalitet stimulira *fosfoenolpirogrožđanu karboksinazu* što dovodi do povećane sinteze oksaloctene, odnosno jabučne kiseline, pa se malat uz ekvivalentnu količinu K i Na akumulira u vakuolama što rezultira do tri puta većim sadržajem kationa u odnosu na amonijsku ishranu šećerne repe.

Nakon usvajanja amonijskog oblika dušika ne dolazi do njegove akumulacije već se odmah sintetiziraju aminokiseline i amidi (ali moguće je i deponiranje u obliku amonijačnih soli u vakuolama gdje je $\text{pH} < 5$). Usvajanjem nitrata, zbog održavanja ionske bilance, izdvaja se ekvivalentna količina iona OH^- ili HCO_3^- pa nitratna ishrana šećerne repe ima fiziološki alkalni efekt, dok se za svaki usvojeni ion NH_4^+ izdvaja jedan ion H^+ , dakle prisutno je fiziološki kiselo djelovanje na supstrat ishrane. Amonijski dušik veže se na keto (okso) kiseline, najviše na α -ketoglutaminsku, što podrazumijeva razgradnju saharoze iz procesa fotosinteze, a kad to nije dostatno (visoka raspoloživost N ili preniska razina fotosinteze) troše se rezerve saharoze iz korijena (zapaža se visoka aktivnost *kisele i neutralne invertaze*). Pored toga, amonijski ion djeluje kao negativni modulator *saharozna sintetaze* što koči sintezu saharoze pa je jasno zašto topljivi dušični spojevi i sadržaj saharoze imaju signifikantno recipročan odnos.



Slika 12.8. Optimalna gnojidba šećerne repe

Tablica 12.5. Metode utvrđivanja tehnološke kakvoće korijena šećerne repe

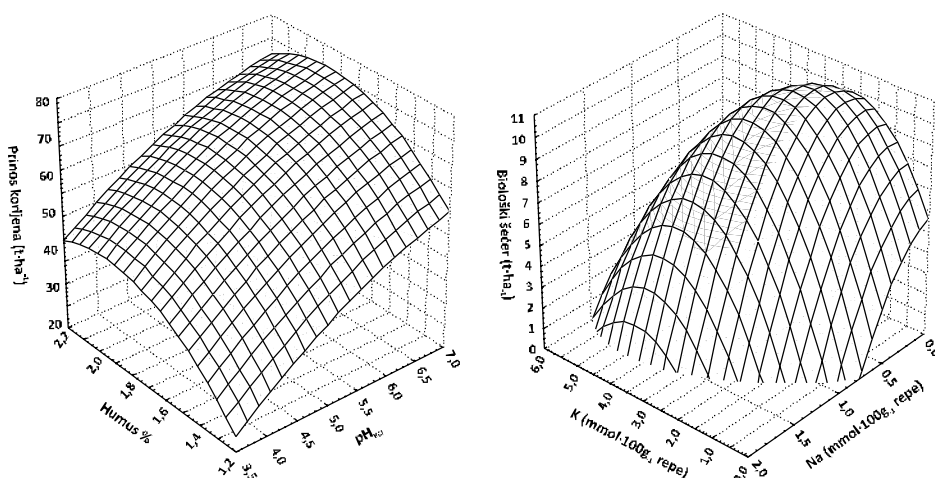
Biološki prinos šećera (BPŠ)	$(\text{Prinos korijena} \times \text{digestija})/100$
Gub. šeć. % na repu (Reinefeld)	$0,343 \times (K + Na) + \alpha\text{-N} + 0,29$
Gub. šeć. % na repu (Braunschweiger)	$0,117 \times (K + Na) + 0,241 \times \alpha\text{-N} + 1,08$
Bijeli šećer t ha ⁻¹ (PBS)	Prinos kor. t ha ⁻¹ x (digestija % - GŠ % - 0,6)

Tablica 12.6. Osnovni indikatori tehnološke kvalitete šećerne repe

Pokazatelj	Dobro	Zadovoljava	Loše
Digestija %	> 18	16 - 18	< 16
K mmol 100 g ⁻¹ saharoze	30 – 40 (4,5–5,1)*	40 - 50	> 50
Na mmol 100 g ⁻¹ saharoze	< 3 (0,3–0,65)*	3 - 7	> 7
α -amino N mmol 100 g ⁻¹ saharoze	8 – 12 (1,45–2,25)*	12 - 20	> 20
Iskoristivost na digestiju %	> 16	14 - 16	< 14
Gubitak šećera u melasi %	< 1,2	1,2 - 1,4	> 1,4

*mmol 100⁻¹g repe

Prisustvo veće količine niskomolekularnih oblika dušika u korijenu šećerne repe, pored problema s tehnološkom kakvoćom, utječe na prekomjeren rast nadzemne mase (lišća i glava) i to često pri kraju vegetacije uz intenzivno obnavljanje reducirane asimilacijske površine (suša, bolesti, štetnici). Ta pojava se označava kao *retrovegetacija*, a s obzirom da je fotosinteza u tom dijelu vegetacije uglavnom niža od potrebne količine ugljikohidrata za sintezu ketokiselina, troše se rezerve saharoze iz korijena.



Slika 12.9. Utjecaj pH-vrijednosti i sadržaja humusa u tlu na visinu prinosa te koncentracije K i Na u korijenu na visinu biološkog prinosa šećera šećerne repe (Vukadinović, 2011.)

Gnojidbu šećerne repe mora se uskladiti s njenim potrebama i agroekološkim uvjetima s ciljem da se dobije što veća količina biološkog šećera (prinos korijena \times sadržaj saharoze u njemu) i visoka tehnološka kakvoća (ekstraktivnost šećera u preradi $> 90\%$). Luksuzne doze dušika nesrazmjerno povećavaju količinu lišća i glava prema korijenu, što uz neminovni pad sadržaja šećera u korijenu (slika 12.8.) ne opravdava takvu gnojidbu, pa i onda kad se ostvari veća količina biološkog šećera. Naime, povećano ulaganje u N-gnojidbu, skuplje vađenje, veća cijena prijevoza korijena s malo šećera, smanjena sposobnost čuvanja do prerade (sklonost bolestima, pojačano disanje korijena), lošija fizikalna svojstva korijena (sklonost lomu, loše rezanje) i potreba za više energije u preradi uz nižu efikasnost ekstrakcije čine takav postupak neekonomičnim. Istovremeno, potrebno je pokloniti dužnu pozornost gnojidbi kalijem, posebice u odnosu na dozu dušika, rezidualni dušik i mineralizacijsku moć tla, te sadržaj gline (naročito K-fiksirajuće gline ili po EUF metodi, aktivne ili selektivno vezujuće gline) u tlu. U tablicama 12.5. i 12.6. prikazana je elementarna metodologija utvrđivanja tehnološke kakvoće korijena šećerne repe koju koriste tvornice šećera. Praćenje tehnološke kakvoće korijena šećerne repe ima veliku važnost jer se tako optimizira tehnološki proces ekstrakcije šećera iz korijena šećerne repe i istovremeno utječe na uzgajivače šećerne repe s ciljem osiguranja kvalitetne sirovine.

Fosforna i kalijaska gnojidba šećerne repe obavlja se u pravilu na jesen pod osnovnu obradu (zimsku brazdu), koja je za repu nešto dublja (≥ 30 cm), tako da ta dva elementa ishrane budu raspodijeljena u zoni najveće mase korijena. Dušik se dijelom primjenjuje u jesen u amonijskom obliku u količini koja ovisi najviše o pedofizikalnim svojstvima tla, odnosno riziku ispiranja (vidi poglavlje EUF-metoda), a predstjetveno (ili startno sa sjetvom) kao i u prihrani u amonijsko-nitratnom ili nitratnom obliku.

Od indikatora plodnosti tla, na visinu prinosa korijena šećerne repe, izuzetno pozitivan utjecaj imaju humus i pH-vrijednost tla (slika 12.9.). Naime, geostatističkom analizom indikatora plodnosti na području Osječko-baranjske županije (Vukadinović, 2011.) utvrđeno je kako se visoki prinosi korijena šećerne repe ne mogu očekivati kod niske koncentracije humusa ($< 1,8\%$) i niskog pH (pH(KCl) $< 5,5$).

12.2.3. Kukuruz

Raspoložive podatke o plodnosti tla za kukuruz (količine i oblici hraniva) treba razmatrati s gledišta prikladnosti analitičke metode za konkretne proizvodne uvjete i tip tla. Za dušik su potrebne nove analize svake godine jer čak i tada mogu postojati značajna odstupanja zbog eventualno velikih količina oborina, posebice na lakim ili slabo dreniranim tlima. Za fosfor, kalij i magnezij mogu biti

dostatne i analize provedene svake 3-4 godine. Za mikroelemente su optimalne kombinirane analize tla i biljnog materijala, ali i dobro poznavanje simptoma deficita mikroelemenata, posebice Zn na čiji je nedostatak kukuruz posebno osjetljiv i to na neutralnim i karbonatnim tlima, ali i ekstremno kiselim (slika 12.10.).

Kao temelj proračuna prinosa može se koristiti prosječan prinos prethodnih nekoliko vegetacija intenzivnog uzgoja kukuruza na konkretnim površinama. Pri tome treba uzeti u obzir eventualna kašnjenja, negativnu bilancu ili neadekvatnost u gnojidbi prethodnih vegetacija.

Istraživanja pokazuju da kukuruz postiže veći prinos u plodoredu, posebice s leguminozama, nego u monokulturi, a od pojave kukuruzne zlatice u našim krajevima monokultura kukuruza gotovo da je napuštena. Iako se mnogi nedostaci monokulturnog uzgoja kukuruza mogu ukloniti primjenom dušičnih gnojiva, ipak nije moguće u potpunosti ukloniti razlike prema uzgoju kukuruza u plodoredu.

Optimalna pH-reakcija tla za kukuruz je 6-7, što je vrlo značajno i za mikrobiološko oslobađanje hraniva iz organskih rezervi u tlu. Međutim, u kiselim uvjetima, uz suvišak vode u tlu i "hladnije proljeće" često zna doći do problema usvajanja fosfora u ranom porastu kukuruza (slika 12.10.). Preduvjeti su sljedeći:

- 1) Kiselo ili ekstremno kiselo tlo,
- 2) Saturirano vodom pa je:
 - a) kiselost tla još niža (reduktivniji uvjeti),
 - b) slobodni ion Al^{3+} (i Fe^{2+}) blokira fosfate,
 - c) korijen nema zraka (anaerobioza) i usvajanje se zaustavlja,
- 3) Što sve rezultira blokadom usvajanja fosfora (i drugih elemenata),
- 4) Raste sinteza antocijana (ali ne i klorofila) i
- 5) Kukuruz je ljubičast, a zastoj u porastu evidentan.

Rješenje, odnosno kontrola štete je u kultivaciji kukuruza (prozračivanje, odnosno prosušivanje površinskog sloja) uz primjenu KAN-a (N-NO_3 i Ca pod kultivator) i bez intervencije s kompleksnim NPK gnojivima (plitak unos P i K kasnije će zaustaviti porast korijena). Nakon kultivacije i sušenja površinskog sloja ubrzo će doći do nestanka simptoma deficita P (ali zastoj u vegetaciji svakako će odnijeti dio prinosa) i to čim korijen "probije" redukcijsku zonu koja je posljedica:

- a) saturacije tla vodom,
- b) tabana pluga,
- c) argiluvličnog horizonta ili
- d) visoke razine podzemne vode.



Slika 12.10. Simptomi deficita fosfora na kukuruzu u uvjetima niskog pH tla, "hladnog" i "vlažnog" proljeća (Vukadinović, 2010.)

Budući da biljke kukuruza usvoje više od 50 % dušika i fosfora te 80 % kalija prije ulaska u reproduktivni stadij, to je neophodna dobra raspoloživost i dovoljna količina tih hraniva već u početku vegetacije i tijekom čitavog razdoblja rasta. Iako se male količine hraniva usvoje u samom početku vegetacije, u zoni korijena je neophodna visoka koncentracija hraniva jer je korijenov sustav početkom vegetacije slabije razvijen, a često je i tlo hladnije.

Primjena dušičnih gnojiva za kukuruz je povoljnija što je vremenski bliža fiziološkim potrebama kukuruza. Stoga se na težim tlima dio dušičnih gnojiva dodaje u jesen s osnovnom obradom, a na lakšim veći dio treba dodati predstjetveno i startno uz prihranu u trake radi smanjenja ispiranja.

Na većini tala nema velikih opasnosti od gubitaka gnojidbom dodanih fosfora i kalija, pri čemu je povoljnija jesenska primjena gnojiva (pod osnovnu obradu), jer se time fosfor i kalij raspođjeljuju u zoni najvećeg rasprostiranja korijena. Izuzetak su laka, pjeskovita tla gdje je moguće ispiranje kalija iz zone korijenovog sustava, stoga je na takvim tlima kalijem bolje gnojiti pred sjetvu.

Različiti načini primjene gnojiva na tlima s optimalnim razinama hraniva uglavnom ne rezultiraju značajnim razlikama u visini prinosa. Nasuprot tome, na tlima slabo opskrbljenim hranivima kao i na tlima s jakom fiksacijom fosfora, najbolje rezultate daje primjena gnojiva u trake (zbog sužavanja odnosa gnojiva

prema tlu), a posebice ako su količine gnojiva niske. Pri polaganju gnojiva neposredno uz sjeme, ukupne količine dušika i kalija $12-15 \text{ kg ha}^{-1}$, uz normalnu vlažnost tla, neće djelovati štetno na klijavost sjemena (solni udar), ali uz suha proljeća i ovako niske količine gnojiva mogu značajno smanjiti klijavost i oštetiti tek isključale biljke.

Za predstjetvenu i startnu gnojidbu te prihranu kukuruza najpovoljnija su dušična gnojiva koja sadrže amonijski i nitratni oblik, tj. KAN, AN i UAN, a za osnovnu gnojidbu urea, anhidrirani amonijak i UAN (posebice je povoljan za prskanje žetvenih ostataka prije zaoravanja). Anhidrirani amonijak mora biti injektiran na $12-15 \text{ cm}$ kod povoljnog stanja vlažnosti radi sprječavanja gubitka dušika volatilacijom (na neutralnim i karbonatnim tlima). Iz istog razloga ureu i UAN je dobro zaorati odmah nakon raspodjele, a najkasnije nakon 3 dana kad temperature nisu visoke. AN i KAN su gnojiva iz kojih se dušik potencijalno može izgubiti ispiranjem ili denitrifikacijom u kiselim uvjetima, posebice kod suviška padalina neposredno nakon gnojidbe.

Primjer računanja gnojidbe za kukuruz prema *University of Missouri-Columbia, Department of Agronomy*, zbog jednostavnog, ali vrlo zanimljivog pristupa dat je u cijelosti:

Preporuka gnojidbe za N (kg ha^{-1}) temelji se na ukupnoj potrebi usjeva prema sklopu i očekivanom prinosu koja se umanjuje za procijenjeni stopu mineralizacije i količinu rezidualnog dušika od predusjeva:

Sklop (biljaka ha^{-1})	= 50.000
Potreba usjeva (1,8 kg N na 1.000 biljaka)	= $1,8 \times 50 = 90 \text{ N kg ha}^{-1}$
Očekivani prinos	= 10 t ha^{-1} zrna
Potreba prinosa (1,5 kg N na 100 kg zrna)	= $1,5 \times 100 = 150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$
<u>Ukupno potrebno N kg ha^{-1}</u>	= <u>$90 + 150 = 240 \text{ kg ha}^{-1}$</u>
Očekivana mineralizacija	= $45 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$
Rezidualni dušik (predusjev soja)	= $45 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$
N iz stajnjaka (odbiti u 1. god. $4,5-7,0 \text{ kg t}^{-1} \text{ N}$)	= $0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$
Ukupno N iz rezervi tla	= $45 + 45 + 0 = 90 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$
<u>Potreba u gnojidbi $\text{kg ha}^{-1} \text{ N}$</u>	= <u>$240 - 90 = 150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$</u>

Preporuka gnojidbe za P i K temelji se na namjeri podizanja razine pristupačnosti P i K u tlu na optimum kroz osmogodišnje razdoblje kako bi se mogla pratiti učinkovitost i ekonomska opravdanost takve mjere. Pored toga, potrebu P i K određuju ciljna visina prinosa i iznošenje P i K usjevom. Točan proračun nije prikazan zbog različitosti u metodologiji analize tla.

Preporuka gnojidbe za Zn i Fe temelji se na rezultatu DTPA ekstrakcije tla (tablica 12.7.). Kada je u tlu manje od 0,5 ppm Zn, treba aplicirati 11 kg Zn ha⁻¹, za raspon 0,5-1,0 ppm Zn treba gnojiti s 5,5 kg Zn ha⁻¹, a gnojidba nije potrebna na tlima s više od 1,0 ppm Zn. Ovakva gnojidba cinkom dostatna je za naredne 4 godine. Kad se Zn daje folijarno u obliku kelata, tada se primjenjuje 1/3 do 1/2 navedene količine godišnje. Fe se primjenjuje folijarno u količini 0,5-3,0 kg/ha, nikako u tlo, ali primjena stajskog gnoja dugogodišnje otklanja problem Fe-deficita.



Slika 12.11. Deficit cinka na karbonatnom (lijevo, *Vukadinović*, 2007.) i ekstremno kiselom tlu (desno, *Vukadinović*, 2011.)

Tablica 12.7. Granične vrijednosti mikroelemenata za kukuruz (DTPA ekstrakcija) u ppm

Rang	Zn	Fe	Cu	Mn
nisko	0,5	0-0,2	0-0,2	0-1,0
srednje	0,5-1,0	2,0-4,5	-	-
visoko	> 1,0	> 4,5	> 0,2	> 1,0

Problemi s deficitom cinka i željeza na kukuruзу (i drugim usjevima, kao i u vinogradima) vrlo su česti i zahvaćaju velike površine na najistočnijem dijelu Hrvatske, što je usko povezano s visokom pH-vrijednosti prapornih (lesnih) ravni tog područja i sadržajem karbonata > 20 % u matičnom supstratu (slika 12.11., lijevo). Na černozemima istočne Hrvatske štete od deficita cinka i željeza mogu biti visoke i značajno umanjiti prinos kukuruza. Rjeđe se deficit cinka može zapaziti na ekstremno kiselim tlima Slavonije, npr. na relaciji Donji Miholjac-

Našice (slika 12.11., desno), ali također i na kiselim tlima kao trake uz kanale, jer se kopanjem na površinu tla izbacuje velika količina karbonatnog matičnog supstrata.

12.3. IZNOŠENJE GLAVNIH HRANIVA USJEVIMA

Tablica 12.8. Iznošenje glavnih hraniva prinosom (kg t^{-1}), uključujući i pripadajući dio žetvenih ostataka

Usjev	Iznošenje N, P i K u kg t^{-1}			Indikativna razina prinosa (t ha^{-1})	
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Minimum	Maksimum
Pšenica ozima	27,5	14,0	17,5	4,0	9,5
Pšenica jara	30,0	15,0	19,5	3,5	8,0
Pšenica durum	22,0	12,0	22,0	3,0	7,5
Triticale	17,5	10,0	17,5	4,0	9,5
Raž	18,0	11,0	18,0	4,0	8,0
Kukuruz	25,0	12,0	20,0	5,0	15,0
Kukuruz sjem.	50,0	24,0	40,0	1,0	5,0
Kukuruz silažni	10,0	45,0	8,5	20,0	80,0
Ječam ozimi	22,5	10,0	19,0	4,0	9,0
Ječam jari	20,0	9,0	18,0	3,5	7,5
Ječam pivarski	17,5	8,0	17,0	3,0	7,0
Zob ozima	22,0	8,0	17,0	4,0	7,5
Zob jara	23,0	9,0	20,0	3,5	6,5
Šećerna repa	4,0	1,5	5,5	40,0	90,0
Soja	60,0	27,5	47,5	2,0	5,5
Suncokret	50,0	25,0	55,0	2,0	5,5
Uljana repica	45,0	30,0	50,0	2,0	5,5
Krumpir	4,5	2,5	6,0	15,0	50,0
Grah	30,0	17,5	30,0	3,0	9,5
Grašak stočni	20,0	17,5	27,5	3,5	12,0
Lucerna (ST)	30,0	15,0	35,0	3,0	20,0
Djetelina (ST)	25,0	13,5	30,0	3,0	17,5
Duhan Virginia	32,5	20,0	65,0	1,5	3,0
Duhan Burley	40,0	25,0	80,0	1,5	3,0
Djet. tr. smjesa (ST)	8,0	1,2	4,5	3,0	20,0
Rauola sjeme	14,5	4,7	25,5	10,0	30,0
Sudanska trava (ST)	16,0	11,0	22,0	8,0	25,0

Usvajanje biogenih elemenata i tvorba prinosa čvrsto su povezani. Zbog toga je vrlo važno poznavati:

1. bioraspoloživu količinu hraniva u tlu (uključujući i potencijal mineralizacije organske tvari),
2. koliko je hraniva primijenjeno gnojidbom (vrsta gnojiva, vrijeme i način primjene, svojstva tla),
3. koliko je usjev usvojio hraniva,
4. koji dio usvojenih hraniva je odnesen s njive merkantilnim dijelom i
5. koliko se hraniva vrati u tlo zaoravanjem žetvenih ostataka.

Iznošenje hraniva podrazumijeva njihovu ukupno usvojenu količinu iz tla (i/ili preko lista), dok se pod *odnošenjem hraniva* podrazumijeva količina hraniva u merkantilnom dijelu (koju odnesemo s parcele). U tablici 12.8. prikazano je iznošenje glavnih hraniva. Navedeni podaci su samo orijentacijski i preporuča se korištenje podataka dobivenih analizom za konkretne agroekološke uvjete proizvodnje (analiza tla, biljaka, uključujući i sortnu, odnosno hibridnu specifičnost mineralne ishrane pojedinih kultivara).

Pored iznošenja hraniva, tablica 12.8. sadrži i vrijednosti indikativnog minimalnog prinosa (koji se lako postiže bez gnojidbe) i indikativnog maksimuma, odnosno najveće mogućeg prinosa u agroekološkim uvjetima istočne Hrvatske. Ti podaci su vrlo važni za primjenu koncepta "dinamičkog iznošenja" elemenata ishrane (vidi poglavlje 12.1.). Također, u literaturi se često mogu naći nerealno visoke vrijednosti o maksimalno mogućem prinosu, a koji nisu mogući u našim agroekološkim uvjetima obzirom na količinu energije Sunca i potrebnu količinu vode tijekom vegetacije, bez obzira na intenzitet agrotehnike (gnojidbe, zaštite i dr.).

12.4. OSNOVE AGROKEMIJSKOG RAČUNANJA

Zadovoljavanje prehrane sve brojnije ljudske populacije na ograničenim i sve manjim poljoprivrednim resursima nameće potrebu sve veće primarne organske produkcije, a to je moguće jedino uz brz napredak u biološkim znanstvenim disciplinama, kao i suvremenoj, inženjerskoj tehnologiji proizvodnje hrane (biotehnologiji) uz intenzivnu primjenu informacijskih tehnologija. Inženjerski pristup proizvodnji hrane podrazumijeva, pored posjedovanja i primjene velike baze empirijskog znanja, korištenje egzaktnih znanstvenih metoda, odnosno poznavanje niza kvantitativnih pokazatelja (indikatora) kemijskih, fizikalnih i bioloških svojstava tla, potreba biljaka, tehnologije njihovog uzgoja i zaštite, učinkovitu brigu o okolišu i dr. Stoga je nemoguće učinkovito i profitabilno proizvoditi hranu bez kemijskih i drugih analiza, odnosno posjedovanja niza podataka o svim aspektima proizvodnje hrane i točnih proračuna. Primjena tuđih znanja i "receptura", bez provjere za konkretne agroekološke uvjete, rezultira niskom produktivnošću uz nedostatnu proizvodnju hrane.

U kratkom pregledu osnovnih agrokemijskih proračuna prikazano je nekoliko primjera proračuna gnojidbe na temelju kemijske analize tla kao i pripreme gnojiva te nekih drugih proračuna koji su često potrebni u biljnoj proizvodnji. Autori veći dio tih proračuna omogućuju putem Interneta na svojim web stranicama (<http://ishranabilja.com.hr> i <http://pedologija.com.hr>).

1. Koliko je potrebno kg KAN (27 % N), tripleksa ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$; 45 % P_2O_5), KCl (60 % K_2O) i CaCO_3 (balasta) za 10 t miješanog gnojiva 10:10:10. Ako nema balasta, koja je najveća moguća koncentracija aktivne tvari pri istom omjeru hraniva?

$$\begin{aligned} (10 / 27) \times 10.000 &= 3.704 \text{ kg KAN} \\ (8 / 45) \times 10.000 &= 1.778 \text{ kg tripleksa} \\ (10 / 60) \times 10.000 &= 1.667 \text{ kg KCl} \\ \text{Ukupno} &= 7.148 \text{ kg gnojiva} + 2.852 \text{ kg balasta} \\ 10.000 / 7.148, 148 &= 1,40 \text{ (faktor za najveću koncentraciju hraniva)} \\ 10 \times 1,40 &= 14:14:14 \\ \text{Najviše} &= 42 \% \text{ aktivne tvari} \end{aligned}$$

2. Koliko je potrebno kg NH_4Cl (25 % N), precipitata ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$; 40 % P_2O_5), K_2SO_4 (50 % K_2O) i CaCO_3 (balast) za 5 t miješanog gnojiva formulacije 10:8:12. Ako nema balasta na raspolaganju, koja je najveća moguća koncentracija aktivne tvari pri istom omjeru hraniva?

$$\begin{aligned} (10 / 25) \times 5.000 &= 2.000 \text{ kg } \text{NH}_4\text{Cl} \\ (8 / 40) \times 5.000 &= 1.000 \text{ kg } \text{CaHPO}_4 \\ (12 / 50) \times 5.000 &= 1.200 \text{ kg } \text{K}_2\text{SO}_4 \\ \text{Ukupno} &= 4.200 \text{ kg gnojiva} + 800 \text{ kg balasta} \\ 5.000 / 4.200 &= 1,19 \text{ (faktor za najveću koncentraciju hraniva)} \\ 10 \times 1,19 &= 11,9 \% \text{ N} \\ 8 \times 1,19 &= 9,52 \% \text{ P}_2\text{O}_5 \\ 12 \times 1,19 &= 14,28 \% \text{ K}_2\text{O} \\ \text{Najviše} &= 35,7 \% \text{ aktivne tvari} \end{aligned}$$

3. Potrebno je površinu od 25 ha pognojiti dozom 140:80:160, tako da 50 % N bude primijenjeno u osnovnoj gnojidbi kao urea, preostalih 50 % N u prihrani kao KAN, P_2O_5 kao tripleks i K_2O kao 60 % KCl. Koliko je potrebno kg navedenih gnojiva?

$$\begin{aligned} (140 \times 50) / 100 &= 70 \text{ kg N u obliku uree i isto toliko KAN-a} \\ ((70 \times 100) / 46) \times 25 &= 3.804 \text{ kg uree } (\text{CO}(\text{NH}_2)_2) \\ ((70 \times 100) / 27) \times 25 &= 6.482 \text{ kg KAN-a } (\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CaCO}_3) \\ ((80 \times 100) / 45) \times 25 &= 4.444 \text{ kg tripleksa } (\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2) \\ ((160 \times 100) / 60) \times 25 &= 6.667 \text{ kg 60 \% KCl-a} \end{aligned}$$

4. Koliko je potrebno MAP-a, KAN-a i K_2SO_4 za gnojidbu 160:80:120?

$$(80 \times 100) / 48 = 167 \text{ kg MAP čime je podmireno } 80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5 \text{ i}$$

- $(167 \times 11 \% N) / 100 = 18,37 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$. Preostala količina N izračuna se kao:
 $((160 - 18,37) \times 100) / 27 = 525 \text{ kg/ha KAN-a}$
 Također potrebno je i $= 240 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{SO}_4 ((120 \times 100) / 50)$
5. Za gnojidbu 150:120:80 raspolaže se kompleksnim gnojivom 10:30:20 i KAN-om. Koliko je potrebno gnojiva?
- Izračun se započinje s elementom čija je aktivna tvar najveća (najveći broj u formulaciji):
- $(120 \times 100) / 30 = 400 \text{ kg 10:30:20}$
 Čime je dano:
 $(400 \times 30) / 100 = 120 \text{ kg P}_2\text{O}_5$
 $(400 \times 10) / 100 = 40 \text{ kg N i}$
 $(400 \times 20) / 100 = 80 \text{ kg K}_2\text{O}$
 Potrebno je još:
 $((150 - 40) \times 100) / 27 = 407 \text{ kg KAN-a}$
6. Gnojidbom od 160 kg N ha^{-1} predviđeno je 40 % N u jesen u obliku UAN-a. Koliko treba primijeniti litara UAN-a po hektaru ako je volumni udio N u UAN-u 30 %, a njegova gustoća $1,3 \text{ dm}^{-3}$?
- $(160 \times 40) / 100 = 64,00 \text{ kg N u obliku UAN-a}$
 $(64 \times 100) / 30 = 213,33 \text{ litara UAN ha}^{-1}$
 $213,33 / 1,3 = 164,10 \text{ kg UAN ha}^{-1}$
7. Na temelju kemijske analize tla utvrđena je potreba gnojidbe nasada jabuke 130 : 75 : 180. Ako je broj stabala 1650 ha^{-1} (sadnja $3 \times 2 \text{ m}$), koliko treba primijeniti grama KAN-a (27 % N) po jednom stablu, MAP-a (12 % N i 52 % P_2O_5) i KCl-a (60 % K_2O)?
- $75 / (52 \times 100) = 144,23 \text{ kg MAP ha}^{-1} \text{ ili } 14,423 \text{ g m}^{-2}$
 $(144,23 \times 12) / 100 = 17,31 \text{ kg N sadržano je u MAP-u}$
 $(130 - 17,313) \times (100/27) = 417,38 \text{ kg KAN ha}^{-1} \text{ ili } 41,738 \text{ g m}^{-2}$
 $(180 \times 60) / 100 = 108,00 \text{ kg KCl ha}^{-1} \text{ ili } 10,8 \text{ g m}^{-2}$
 Dakle, za gnojidbu po jednom stablu jabuke potrebno je:
 $417,38 / (1.650 \times 1.000) = 253 \text{ g KAN stablo}^{-1}$
 $144,23 / (1.650 \times 1.000) = 87 \text{ g MAP stablo}^{-1}$
 $108,00 / (1.650 \times 1.000) = 65 \text{ g KCl stablo}^{-1}$
8. Koliku je količinu KCl 60 % potrebno otopiti u 400 litara vode za 1 ha kako bi otopina imala koncentraciju od 2 % K_2O ?
- Budući da 1 kg KCl u 400 dm^3 ima koncentraciju od 0,15 % ($1/400 \times 60 = 0,15$), a tražena koncentracija otopine je 2,0 %, potrebno je otopiti 13,33 kg KCl u 400 litara vode ($1,0 \times 2,0 \times 60/100$), odnosno folijarna gnojidbena doza iznosi $8,0 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$

Napomena: Folijarnom se gnojidbom može primijeniti vrlo ograničena doza aktivne tvari pa je takav vid gnojidbe rezerviran za mikroelemente, a makroelementi se mogu primjenjivati fertigacijom (gnojidba + navodnjavanje) ili kemigacijom (gnojidba + zaštita + navodnjavanje). Također, koncentracije otopine za folijarnu primjenu uglavnom su ispod 1 %, a primjena je ograničena na hladniji dio dana.

9. Koliko 200 litara UAN-a sadrži dušika ako je njegova gustoća $1,3 \text{ kg dm}^{-3}$, a konc. 30 % N volumno?

Kako je zapremina u litrama \times gustoća tekućine = masa u kg, onda je masa 200 litara UAN-a = 260 kg ($200 \times 1,3 = 260$), a sadržaj dušika = 78 kg ($260 \times 30 / 100 = 78$).

10. Postignut je prinos od $6,5 \text{ t ha}^{-1}$ pšenice uz vlagu od 18 %. Koliko je tim prinosom odneseno N, P_2O_5 , K_2O , Fe i Mn ako su u suhoj tvari (14 %) kemijskom analizom utvrđene sljedeće koncentracije elemenata: N = 2,23 %, P = 0,35 %, K = 1,20 %, Fe = 124 ppm i Mn = 65 ppm?

$$\begin{aligned} 6.500 - ((6.500 \times (18-14))/100) &= 6.240 \text{ ST kg ha}^{-1} \\ (6.240 \times 2,23) / 100 &= 139,2 \text{ kg N} \\ (6.240 \times 0,35) / 100 \times (142 / 62) &= 50,0 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \\ (6.240 \times 1,20) / 100 \times (94,2 / 78,2) &= 90,2 \text{ kg K}_2\text{O} \\ (6.240 \times 124) / 106 &= 0,774 \text{ kg Fe} \\ (6.240 \times 65) / 106 &= 0,406 \text{ kg Mn} \end{aligned}$$

11. Za elementarnu analizu uzeto je 1 g ST i razoreno smjesom kiselina i vodikovog peroksida u 100 ml osnovne otopine gdje je utvrđeno 8,4 ppm Ca i 3,65 ppm Fe. Koliko kg CaO i Fe_2O_3 sadrži prinos od 8 t ha^{-1} ST?

$$\begin{aligned} 8,4 \text{ ppm Ca} &= 8,4 \mu\text{g ml}^{-1} = 840 \mu\text{g g}^{-1} \text{ ST} = 840 \text{ mg Ca kg}^{-1} \text{ ST} \\ 840 \text{ mg} \times 8.000 \text{ kg ST} &= 6.720.000 \text{ mg, odnosno } 6,72 \text{ kg Ca ha}^{-1} \\ 365 \text{ mg} \times 8.000 \text{ kg ST} &= 2.920.000 \text{ mg, odnosno } 2,92 \text{ kg Fe ha}^{-1} \\ 6,72 \times (56,079 / 40,08) &= 9,40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ CaO} \\ 2,92 \times (158,971 / 110,974) &= 4,18 \text{ kg ha}^{-1} \text{ Fe}_2\text{O}_3 \end{aligned}$$

12. AL-metodom je utvrđeno kako tlo sadrži 12 mg P_2O_5 100 g^{-1} tla. Koliko je potrebno superfosfata kg ha^{-1} kako bi raspoloživost fosfora porasla na 15 mg P_2O_5 100 g^{-1} tla ako je volumna gustoća tla $1,45 \text{ kg dm}^{-3}$, a dubina oraničnog sloja 30 cm?

$$\begin{aligned} 1 \text{ m}^3 \text{ tla teži } 1.450 \text{ kg} & (10 \text{ dm} \times 10 \text{ dm} \times 10 \text{ dm} \times 1,45 = 1.450 \text{ kg}), \text{ dok } 0,3 \text{ m}^3 \text{ teži } \\ & 435 \text{ kg} (1.450 \times 0,3 = 435 \text{ kg}) \\ 435 \times 10.000 \text{ m}^2 &= 4.350.000 \text{ kg/ha (težina oraničnog sloja 1 ha)} \\ 12 \times 10 \times 4.350.000 \times 10^{-6} &= 522,0 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ (u tlu uz } 12 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}) \\ 15 \times 10 \times 4.350.000 \times 10^{-6} &= 652,5 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ (u tlu uz } 15 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}) \\ \text{Potrebno je dodati gnojidbom} &= 130,5 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} (652,5 - 450,0) \\ (130,5 \times 100) / 18 &= 725 \text{ kg ha}^{-1} \text{ superfosfata s } 18 \% \text{ P}_2\text{O}_5 \end{aligned}$$

Napomena: Uzimajući realnu učinkovitost gnojidbe fosforom od oko 20 % u prvoj godini primjene, količina superfosfata morala bi biti oko pet puta veća da se stvarno podigne raspoloživost fosfora za traženu veličinu. Učinkovitost gnojidbe

fosforom ovisi o više čimbenika: pH reakciji tla, humusu, trenutnoj raspoloživosti P, Ca i dr.

13. AL-metodom je utvrđeno kako tlo sadrži 15 mg K₂O 100 g⁻¹ tla. Koliko je potrebno KCl (60 %) u kg ha⁻¹ da raspoloživost kalija poraste na 20 mg K₂O 100 g⁻¹ tla ako je volumna gustoća tla $\rho = 1,50 \text{ kg dm}^{-3}$, a dubina oraničnog sloja 25 cm?

$$\begin{aligned}
 1 \text{ m}^3 \text{ tla teži } & 1.500 \text{ kg} \quad (10 \text{ dm} \times 10 \text{ dm} \times 10 \text{ dm} \times 1,50 = 1.500 \text{ kg}) \\
 0,25 \text{ m}^3 \text{ teži } & 375 \text{ kg} \quad (1.500 \times 0,25 = 375 \text{ kg}) \\
 375 \times 10.000 \text{ m}^2 \text{ (1 ha)} & = 3.750.000 \text{ kg/ha (težina oraničnog sloja 1 ha)} \\
 15 \times 10 \times 3.750.000 \times 10^{-6} & = 562,5 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1} \text{ (u tlu uz 15 mg 100g}^{-1}\text{)} \\
 20 \times 10 \times 3.750.000 \times 10^{-6} & = 750,0 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1} \text{ (u tlu uz 20 mg 100g}^{-1}\text{)} \\
 \text{Potrebno je dodati gnojdbom} & = 187,5 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1} \text{ (750,0 - 562,5)} \\
 (187,5 \times 100)/60 & = 312,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ KCl s 60 \% K}_2\text{O}
 \end{aligned}$$

Napomena: Uzimajući realnu učinkovitost gnojidbe kalijom od oko 50% u prvoj godini primjene, količina KCl-a morala bi biti oko dva puta veća da se stvarno podigne raspoloživost kalija za traženu veličinu. Efikasnost gnojidbe kalijom ovisi o više čimbenika: sadržaju i tipu gline, trenutnoj raspoloživosti K, količini Ca u tlu i dr.

14. Koncentracija humusa u tlu je 2,25 %. Ako je godišnja rata mineralizacije humusa 1 %, volumna gustoća tla 1,45 kg dm⁻³, a dubina oraničnog sloja 30 cm, koliko se može očekivati mineralnog dušika iz procesa mineralizacije humusa?

$$\begin{aligned}
 1 \text{ m}^3 \text{ tla teži } & 1.450 \text{ kg} \quad (10 \text{ dm} \times 10 \text{ dm} \times 10 \text{ dm} \times 1,45 = 1.450 \text{ kg}) \\
 0,30 \text{ m}^3 \text{ teži } & 435 \text{ kg} \quad (1.450 \times 0,30 = 435 \text{ kg}) \\
 435 \times 10.000 \text{ m}^2 \text{ (1 ha)} & = 4.350.000 \text{ kg/ha (masa oraničnog sloja 1 ha)} \\
 (4.350.000 \times 2,25 \% \text{ humus}) / 100 & = 97.875 \text{ kg humusa ha}^{-1} \\
 (97.875 \times 1 \% \text{ god.}) / 100 & = 978,75 \text{ kg god}^{-1} \text{ se razloži humusa} \\
 \text{Buduci da je omjer C:N u humusu } & \sim 10:1, \text{ humus sadrži prosječno 50 \% C i 5 \% N (4-6 \%)} \\
 \text{Otuda je količina mineraliziranog N} & \text{ ha}^{-1} \text{ god}^{-1}:
 \end{aligned}$$

$$(978,75 \times 5)/100 = 48,93 \text{ ili } \sim 50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ god}^{-1} \text{ (za uvjete istočne Hrvatske)}$$

Napomena: Učinkovitost mineraliziranog N iz organskih rezervi, odnosno tzv. aktivnog pula humusa, podjednaka je njegovoj primjeni iz organskog i mineralnog gnojiva, dakle 50 %.

15. Analizom je utvrđeno kako tlo s 22,5 % vlage sadrži 25 ppm nitrata. Koliko je to dušika u sloju do 30 cm dubine zračnosuhog tla čija je $\rho_v = 1,45 \text{ kg dm}^{-3}$?

$$\begin{aligned}
 0,3 \text{ m} \times 1,45 \times 10^6 & = 4.350.000 \text{ kg tla ha}^{-1} \text{ uz vlažnost 22,5 \%} \\
 4.350.000 - (4.350.000 \times 22,5/100) & = 3.371.250 \text{ kg zračnosuhog tla ha}^{-1} \text{ (0-30 cm)} \\
 3.371.250 \times 25 / 1.000.000 & = 84,28 \text{ kg NO}_3 \text{ ha}^{-1} \\
 84,28 \times 0,226 & = 19,05 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1} \text{ (zračnosuho tlo 0-30 cm)}
 \end{aligned}$$

Napomena: N-NO₃ = NO₃ × 0,226, jer je 14 (N) / 62 (NO₃) × 100 = 0,226

16. Koliko je potrebno dodati dušika (N kg ha⁻¹) za sprječavanje dušičnog manjka (N-depresije) nakon žetve uljane repice ako je količina žetvenih ostataka 5,0 t ST ha⁻¹, uz koncentraciju N = 0,75 % i C = 35,0 %?

100 kg žetvenih ostataka uljane repice sadrži približno 35 kg ugljika i 0,75 kg dušika. U procesu mineralizacije iz slame mikroorganizmi asimiliraju oko 35 % C pri čemu je njihova potreba za N oko 12 % na usvojenu količinu ugljika. Proračunom dušičnog faktora, kojim se množi količina žetvenih ostataka, procjenjuje se potrebna količina dušika za mineralizaciju:

$$\begin{aligned}
 (35 \text{ kg C} \times 0,35) &= 12,25 \text{ kg C } 100 \text{ kg}^{-1} \text{ iz žetvenih ostataka} \\
 \text{uzmu mikroorganizmi} & \\
 (12,25 \text{ kg C} \times 12 \% \text{ N}) / 100 &= 1,47 \text{ kg N (potreba mikroorganizama)} \\
 1,47 - 0,75 &= 0,72 \text{ (dušični faktor)} \\
 5 \text{ (t ha}^{-1} \text{ žet. ost.)} \times 10 \times 0,72 &= 36 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ za mineralizaciju ili } 36/46 \times 100 \\
 &= 78,3 \text{ kg uree ha}^{-1}
 \end{aligned}$$

17. Koliko je potrebno primijeniti kalcijevog karbonata kako bi se zasićenost bazama KIK-a podigla s 65 % na 80 % ako je vrijednost KIK-a $22,0 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1} \text{ tla}$, a masa oraničnog sloja 3 milijuna kilograma?

$$\begin{aligned}
 ((80 - 65) / 100) \times (22 / 2) &= 1,65 \text{ g CaCO}_3 \text{ kg}^{-1} \text{ tla (}\frac{1}{2}\text{ KIK-a jer je Ca dvovalentan)} \\
 1,65 \times 3 \times 10^6 &= 4.950.000 \text{ mg CaCO}_3 \text{ ha}^{-1} \text{ ili } 4,95 \text{ t CaCO}_3 \text{ ha}^{-1}
 \end{aligned}$$

Obrazloženje:

$$\begin{aligned}
 22 \times (80 - 65) / 100 &= 3,3 \text{ mekv } 100 \text{ g}^{-1} \text{ treba popuniti kalcijem} \\
 3,3 \times 20 \times 10 &= 660 \text{ mg Ca kg}^{-1} \text{ tla (~ 20 je ekvivalentna masa Ca =} \\
 &\quad 40,08/2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 660 \times 3 \times 10^6 &= 1.980.000.000 \text{ mg odnosno } 1.980 \text{ kg Ca ha}^{-1} \\
 1980 \times 100 / 40 &= 4.950 \text{ kg CaCO}_3 \text{ Ca ha}^{-1} \text{ (CaCO}_3 \text{ sadrži 40 \% Ca)}
 \end{aligned}$$

Napomena: U poglavlju o kalciju prikazan je pojednostavljen postupak proračuna potrebe u kalcizaciji.

13. TLOZNA NSTVENI POJMOVNIK

ABA - abscisinska kiselina je biljni hormon koji pretežno inhibira procese rasta, a uključen je i u regulaciju mehanizma rada puči.

abiotički stres - vanjski (neživi) čimbenik koji štetno utječe na biljke (npr. suša, ekstremne temperature i dr.).

abrazija - fizikalno vremensko trošenje stijena uz pomoć vode, ledenjaka ili vjetra.

apsorpcija (apsorpcija) - usvajanje tvari ili energije iz supstrata; ulaz vode i hranjivih tvari u korijen kao rezultat metaboličkih procesa (aktivno) ili na temelju razlike u difuznom gradijentu (pasivno).

acidifikacija (*zakiseljavanje*) - proces zamjene kationa na adsorpcijskom kompleksu tla vodikovim ionima. Acidifikacija poljoprivrednih tala je prirodni proces koji se događa kad je godišnja količina padalina > 630 mm (Slavonija). Zakiseljavanje tla može izazvati i industrijska polucija, posebice kisele kiše u širem području velikih energetske postrojenja, ali i dugotrajna primjena fiziološki kiselih gnojiva i sl.

aciditet tla (*kiselost tla*) - može biti: *aktualni* (pH u vodi), *supstitucijski* (pH u KCl-u) i *hidrolitički* ($\text{cmol}^{(+)} \text{dm}^{-3} \text{g}^{-1}$).

acidoidi - koloidi tla ukupno negativnog naboja.

adsorpcija - fizikalno, površinsko zadržavanje čestica, iona ili molekula, npr. adsorpcija Ca^{2+} na negativno nabijene koloide tla, glinu ili humus.

adsorpcijski kompleks - skup različitih tvari u tlu, pretežito koloida, sa sposobnošću adsorpcije; glina i humus tla.

aeracija - ulazak atmosferskog zraka u tlo. Intenzitet aeracije ovisi o broju, veličini i kontinuitetu pora, te njihovoj ispunjenosti zrakom, odnosno vodom. Optimalna aeracija tla je kod ~ 30 % zraka u tlu; 15-20 % je normalno, a < 10 % je loše za rast biljaka.

aerobni - uvjeti u kojima je neprekidan dotok molekularnog kisika; fiziološki procesi koji imaju neprekidnu potrebu za kisikom.

aerobni mikroorganizmi - organizmi kojima je za život neophodan molekularni kisik.

afinitet - svojstvo atoma da lako gradi kemijsku vezu s drugim atomima ili spojevima.

agregacija - procesi koji sjedinjuju ili sljepljuju pojedinačne čestice tla (pijesak, prah, glina) u formu agregata pomoću iona Ca^{2+} , kao koagulatora, organske tvari tla, seskvi oksida, CaCO_3 .

agregati tla - pojedinačne nakupine čestica (formirane prirodno ili sintetski) npr.: granule, grude, pelete gnojiva, konkrecije i sl. Mikroagregati su promjera < 0,25 mm, a makroagregati > 0,25 mm.

agrikulturna kemija (*agrokemija*) - znanost koja proučava uporabu kemijskih sredstava u poljoprivredi, u širem smislu znanstvena disciplina koja proučava odnose i zakonitosti između biljaka, tla i gnojiva radi povećanja prinosa i kvalitete poljoprivrednih proizvoda kao i svojstva i procese u tlu.

agrikulturni otpad - otpadni materijal nastao u biljnoj i stočarskoj proizvodnji. Uključuje stajski gnoj, žetvene ostatke (slama, pljeva, lišće), ostatke povrća itd.

agroekološka zona (AEZ) - manje poljoprivredno područje sličnih svojstava (okolišnih utjecaja), pogodnosti i potencijala produkcije.

agrofitocenozna - zajednica istovrsnih poljoprivrednih biljaka, kao što su ratarski ili povrtlarski usjevi, trajni nasadi i sl., u kojima vladaju specifični i pomoću agrotehnike nadzirani uvjeti (antropogeno djelovanje na biotop i biocenozu).

agronomija - poljodjelstvo, poljoprivreda, zemljoradnja, dio agrikulture.

agrosfera - mega agroekosustav; cjelokupni poljoprivredni prostor na Zemlji.

agrosustav - ograničen poljoprivredni prostor; dio agrosfere.

AlK (*AEC = anion exchange capacity*) - anionski izmjenjivi kapacitet tla; ukupna količina izmjenjivo vezanih aniona u tlu, izražava se u $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$ tla.

akropetalno (ascendentno) - smjer premještanja vode i hraniva u biljci od korijena prema izdanku. Uglavnom ne predstavlja poteškoću jer su svi hranjivi elementi u tom smjeru dobro pokretljivi.

aktinomicete - porodica mikroorganizama u evolucijskom nizu između bakterija i gljiva, posjeduju razgranati micelij.

aktivitet, aktivitetni omjer - djelatna koncentracija neke tvari koja je uvijek niža od koncentracije zbog međusobne sprege otopljenih čestica (međusobno ili s drugim česticama). Npr., aktivitetni omjer K^+ čvrsto je povezan s Ca^{2+} i Mg^{2+} :

$$AR_K = \frac{a_K}{\sqrt{a_{(\text{Ca}+\text{Mg})}}}$$

aktivni mangan - biljke lako usvajaju reducirani mangan (vodotopljivi Mn^{2+} , izmjenjivo sorbirani Mn^{2+} i lakoreducirajući MnOOH), dok su više oksidirani oblici kao Mn^{3+} i Mn^{4+} inaktivni oblici.

aktivno usvajanje hraniva - usvajanje tvari kroz žive membrane nasuprot difuzijskom gradijentu (od niže prema višoj koncentraciji hraniva) uz utrošak energije; aktivan transport hraniva.

akumulacija - nakupljanje jednog ili više konstituenata na određenoj poziciji kao rezultat translokacije, u tlu obično vodotopljivih tvari ili čestica gline; nakupljanje elemenata ishrane; općenito nakupljanje.

albedo - refleksija sunčeve radijacije (%). Albedo tamnog tla je 5-15 %, travnjaka 10-20 %, golog i vlažnog tla s malo organske tvari ~ 50 %.

aleopatija - međusoban utjecaj živih organizama jednih na druge pomoću kemijskih izlučevina ili produkata razgradnje.

alge - jedno- ili višestanični niži organizmi koji sadrže klorofil i žive u vodi ili vlažnim uvjetima.

alkalijski metali (alkalijske kovine) - elementi I grupe periodnog sustava (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr), mekani, male gustoće, nepostojani na zraku; jednovalentni kationi čije su soli topljive u vodi, grade jake baze.

alkalizacija - proces nastanka alkaliziranih tala (soloneca).

alkalizirana tla - tla čiji je $\text{pH} > 8,5$ i imaju više od 15 % Na na KIK-u.

alkalna (*bazična, lužnata*) tla - tla čiji je $\text{pH} > 7,3$.

AL-metoda - kemijska ekstrakcijska metoda za određivanje raspoloživog fosfora i kalija u tlu. Ekstrakcijska otopina je amonijev acetatlaktat ($\text{pH} = 3,75$); u RH se koristi varijanta Egnér-Riehm-Domingo.

alohtona flora - biljke koje su dospjele na različite načine iz drugih područja; uzgajane ili samonikle (neofiti); suprotno od autohtona flora.

alokacija – premještanje tvari, npr. fotosintata u biljci.

alternativna poljoprivreda - dijeli se na više tipova poljoprivrede: *ekološka ili organska, naturalna, biodinamička, održiva* ili obnovljiva, *integralna* itd. Zajedničko im je isključivanje ili drastično smanjenje primjene kemijskih sredstava za zaštitu, uporabe mineralnih gnojiva, regulatora rasta i aditiva stočnoj ishrani. Inzistira se na pravilnom plodoredu, korištenju biljnih ostataka, organskim gnojivima i zelenoj gnojidbi, uzgoju leguminoza i biološkim metodama zaštite od štetnika s ciljem održavanja i povećavanja efektivne plodnosti tla.

aluminij – ako je u tlu $\text{pH} < 5,0$ dolazi slobodan u formi $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ (Al^{3+} po konvenciji), a pri reakciji $\text{pH} < 4,5$ postaje fitotoksičan. Neutralizacija suviška aluminija u tlu obavlja se dodatkom CaSO_4 (sulfatizacija) pri čemu nastaju netoksični $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Zajedno sa željezom gradi seskviokside (Fe-Al-oksidi).

aluminijev hidroksid - $\text{Al}(\text{OH})_3$, amfoteran spoj neodređenog sadržaja vode, u tlu veže fosfate u

nepristupačan variscit ($\text{AlPO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$).

aluvij - sedimentni materijal nataložen u aluvijalnim (riječnim) dolinama izlivanjem rijeka iz korita.

aluvijalna tla - recentna tla nastala nanošenjem različitih materijala riječnim tokovima, pretežno plodna tla.

amensalizam - ekološki izraz za antagonizam (odnos u kojem jedan organizam šteti drugom).

amfistomalno - lišće koje ima puči (stome) s obje strane (epistomalno = puči samo gore, hipostomalno = puči samo dolje).

amfoliti - amfoterni elektroliti koji, ovisno o pH-vrijednosti, mogu reagirati kao kiseline ili baze (npr. aluminijev hidroksid).

amfoternost, amfoteran - sposobnost tvari da se ponaša kao kiselina i kao baza.

aminizacija - prvi stupanj razlaganja (mineralizacije) organske tvari u tlu do aminokiselina koji obavljaju mikroorganizmi pomoću enzima peptidaza:

organska tvar $\rightarrow \text{R-NH}_2 + \text{CO}_2 + \text{ostali produkti} + \text{energija}$

amofosi i amofoske - NP i NPK kompleksna gnojiva dobivena postupkom razlaganja sirovih fosfata sumpornom kiselinom. Opća formula: $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{KCl} \rightarrow \text{NH}_4\text{Cl} + \text{KH}_2\text{PO}_4 \rightarrow \text{NPK}$ (amofoska), amofosi ne sadrže kalij.

amonifikacija - drugi stupanj mineralizacije organske tvari u tlu koji obuhvaća izdvajanje amonijaka iz oslobođenih aminokiselina tijekom dezaminizacije pod utjecajem enzima dezaminaza: $\text{R-NH}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{R-OH} + \text{energija}$. Jako ovisi o C/N omjeru te organska tvar mora sadržavati 1,5-2 % N da bi u amonifikaciji došlo do oslobađanja amonijaka.

amorfan - kruta tvar nekristalinične građe.

AN - mineralno gnojivo amonijev nitrat, NH_4NO_3 . Sadrži 33,5 % N.

anabolizam - sintetski metabolički procesi (zahtijevaju energiju); sinteza organske tvari.

anaerobni organizmi - organizmi kojima za život nije neophodan molekularni kisik.

anaerobni uvjeti i anaerobioza - uvjeti bez ili s nedostatkom slobodnog molekularnog kisika; fiziološki procesi bez potrebe za kisikom, npr. anaerobna fermentacija, anaerobna faza kompostiranja i sl.

ANC ili pHBC – "Acid neutralizing capacity" ili puferni kapacitet tla protiv zakiseljavanja; kemijske reakcije koje do neke mjere mogu neutralizirati promjene pH-vrijednosti u tlu.

anion - ion ukupno negativnog naboja.

anizotropija – općenito to je posjedovanje nekih fizikalnih svojstava u različitim smjerovima; vektorska fizikalna svojstva; minerali ili dijelovi tla koji zakreću ravan polarizirane svjetlosti (dajući interferentne boje).

anoksija - uvjeti bez kisika kada je korijen u zbijenom ili vodom saturiranom tlu, sjeme ispod pokorice, smrznuta površina tla i sl. Nastupa kada je kapacitet tla za zrak < 4 %.

anorganska tvar - mineralna tvar; tvar u kojoj ne postoji veza između dva ugljikova atoma.

antagonizam - ekološki izraz za odnos u kojem jedan organizam šteti drugom.

antagonizam iona (hraniva) - konkurencija pojedinih iona (sličnih kemijskih svojstava, naboja, promjera itd.) na isti mehanizam usvajanja.

antiport (protutransport) - istovremeno premještanje dva iona kroz membranu u suprotnim smjerovima, npr. Na^+ - H^+ .

antitranspiranti - sintetski ili prirodni proizvodi za smanjivanje gubitaka vode transpiracijom; utječu na zatvaranje puči ili refleksijom svjetlosti snižavaju temperaturu lišća.

antropogen - nastao djelovanjem čovjeka.

antropogenizacija - proces promjene prirodnih (djevičanskih) tala pod utjecajem obrade,

fertilizacije ili melioracija.

apatit - kalcijev fosfat s fluoridnim, kloridnim ili hidroksidnim ionom: $\text{Ca}_5(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})(\text{PO}_4)_3$.

apikalna dominantnost - prevlađujući rast vrha biljke. Ako se odstrani vršak auksini će stimulirati razvoj bočnih izboja od kojih jedan preuzima dominantnu funkciju što je važno za formiranje različitih uzgojnih tipova u voćarstvu i vinogradarstvu.

apoplast - prividno slobodan prostor korijena; negativno nabijen prostor između stanica korijena ispunjen celuloznim fibrilama, kemicelulozom i pektinom; strukturno, apoplast čini kontinuum zidova susjednih stanica i izvanstaničnih prostorakoji olakšava transport vode s otopljenim tvarima kroz tkiva i organe biljaka.

apotomično disanje (OPP) - oksidacijski pentoza-fosfatni ciklus ili apotomično disanje; metabolizam povezan s glikolizom (oba se odvijaju u citoplazmi) bez potrebe za kisikom; kod životinja je OPP metabolizam značajan u sintezi masti.

argiluvlični horizont - iluvijalni horizont; u kom se akumulira glina iz gornjeg horizonta

aridan - sušan; područje s malo oborina za normalnu biljnu produkciju.

atmosfera - zračni omotač Zemlje sastavljen od smjese plinova (dušik, kisik, ugljikov(IV)-oksid, dušikovi oksidi, plemeniti plinovi, amonijak, ozon), prašine i mikroorganizama.

auksini - biljni hormoni koji djeluju stimulacijski na rast i razvitak biljaka, prekursor je aminokiselina triptofan, a najznačajniji auksin je indol- β -octena kiselina; drugi indolni auksini koji mogu stimulirati rast biljaka su indol-3-mliječna kiselina, indol- β -pirogroždana kiselina, indol- β -etanol itd.

autohtona flora - lokalna (izvorna), samonikla flora; biljke koje rastu u svom prirodnom okolišu.

automorfna tla - odjel tala u hrvatskoj klasifikaciji koja nastaju vlaženjem samo oborinama, uz slobodnu perkolaciju vode.

autotrofi (autotrofni organizmi) - fotosintetički (fototrofi) ili kemosintetični (kemotrofi) organizmi koji usvajaju ugljik iz CO_2 koristeći energiju Sunca ili iz procesa oksidacije anorganskih tvari koje sadrže sumpor, vodik, amonijeve ili nitratne soli i dr.

autotrofna nitrifikacija - oksidacija amonijevog iona u tlu preko nitrata do nitrata s dva kemoautotrofna mikroorganizma (Nitrosomonas sp. i Nitrobacter sp.).

bakterije - jedno- ili višestanični mikroskopski organizmi.

bakterijska ili mikrobiološka gnojiva - koristi se više vrsta bakterija i plavozelenih algi; posredna gnojiva koja služe za fiksaciju atmosferskog N_2 ili mobilizaciju rezervnih hraniva.

bakteriofagi (fagi) - specifični bakterijski virusi koji se razmnožavaju hraneći se bakterijama.

bar - jedinica za tlak: 1 bar = 10^5 Pa ili 0,987 atm ili 750,064 torr (mm Hg).

baza podataka - organizirani i uskladišteni skup podataka kojem se pristupa pomoću odgovarajućih kompjutorskih programa.

baze - hidroksidi metala; spojevi koji imaju tendenciju primanja protona; alkalijski i zemnoalkalijski metali adsorbirani na adsorpcijski kompleks tla.

bazična reakcija - lužnata, alkalna reakcija; $\text{pH} > 7,3$.

bazične stijene - eruptivne stijene koje sadrže 40-55 % SiO_2 .

bazipetalno, descendentno - transport hraniva od vrha izdanka prema korijenu. Većina elemenata je dobro do umjereno pokretljiva, ali ima i onih koji se teško premještaju, npr.: Ca i B.

bazoidi - koloidi tla ukupno pozitivnog naboja.

beneficijalni elementi - korisni elementi Co, Na, Si, Al, Se, V, Ti, La, Ce. Hraniva koja pod optimalnim uvjetima rasta biljaka nemaju fiziološku ulogu, ali utjecaj im je to povoljniji što su uvjeti rasta lošiji.

bentonit - sekundarni mineral u čijem sastavu prevladava montmorilonit, jak adsorbens. Primjena mu je različita: kao hidroizolacijski materijal, za bistrenje i stabilizaciju vina, kao kondicioner za

poboljšavanje adsorpcijskih svojstava tla (uglavnom lončanice), za pojačanu adsorpciju prostirke u stajama, za sprječavanje gubitaka amonijskog dušika i dr.

bihugnoj (BgM) – "*Biogas Manure*", gusta, polutekuća tvar koja zaostaje u digektorima za proizvodnju bioplina (metanska fermentacija) iz različitih organskih tvari. Fertilizacijska vrijednost mu je znatno veća od stajnjaka jer sadrži prosječno 2,0 % N, 1,0 % P₂O₅ i 1,5 % K₂O, pH-vrijednost je alkalna (7-9), a sadrži do 10 % organske tvari.

bilanca vode u tlu - količinski izraz vodnog režima tla.

biljke hiperakumulatori - biljke s izraženim specifičnim usvajanjem pojedinih elemenata, koriste se za uklanjanje štetnih tvari, najčešće teških metala iz tla. Postupak se naziva fitoremedijacija.

biocenoza ili biocen - karakteristična skupina živih bića.

biociklusi - integracija više bioma u samo tri biociklusa (mora, slatke vode i kopno) koji čine jedinstvo žive i nežive prirode.

biofizikalni modeli - pojednostavljeni proizvodni sustavi korištenja zemljišta (pokusi) koji omogućuju predviđanje i prije njihove stvarne primjene.

biogeni (esencijalni) elementi - esencijalni ili biogeni elementi (17): *makrolementi* (C, O, H, N, P, K, S, Ca i Mg), *mikrolementi* (Fe, B, Mn, Zn, Cu, Mo, Cl i Ni), vjerojatno još Na, Si, Co i V.

Neophodan element je: a) potreban tijekom cijelog životnog ciklusa biljaka, b) ima posebnu, nezamjenjivu funkciju i c) ima neposrednu ulogu, odnosno obavlja specifične fiziološke funkcije.

biogeokemija - znanstvena disciplina koja proučava djelovanje mikroorganizama na geološke transformacije, npr. izučavanje ciklusa N i S.

biološka gnojiva - sadrže žive organizme kao što su bakterije, mikorizne i saprofitske gljive, paprati (npr. *Azolla pinnata*), plavozelene alge (npr. *Anabaena*, *Nostoc*) itd.; povećavaju mikrobiološku aktivnost i raspoloživost hranjivih tvari u tlu, štite biljke od patogenih organizama, popravljaju strukturu; često sadrže organsku komponentu kao supstrat i nosač mikroorganizama; imaju važnu ulogu u ekološkoj proizvodnji hrane, revitalizaciji devastiranih i oštećenih površina (nakon obimnih zemljanih radova, u eksploataciji mineralnih sirovina, zaštiti deponija industrijskog (fosfogips, saturacijski mulj, pepelišta termoelektrana i dr.) i komunalnog otpada).

biološko-dinamička agrikultura - ekološka proizvodnja hrane koja zahtijeva potpuno poštivanje prirodnih uvjeta uzgoja biljaka te potpuno pridržavanje uputa za pripremu organskog gnojiva i komposta; osnivač Rudolf Steiner.

biom - integracija više ekosustava u velike zajednice (listopadna šuma, stepa, tajga i sl.).

biomasa - a) masa živih organizama u volumenu tla na površini od 1 m² do dubine koja omogućava život ili prodor živih organizama, b) masa živih organizama u jedinici volumena.

bioraspoloživa (*raspoloživa*) hraniva - kemijski i fizički pristupačna hraniva.

biorazgradiv - tvari koje se mogu razgraditi u jednostavnije spojeve pomoću enzimskih aktivnosti.

bioremedijacija - korištenje mikroorganizama ili biljaka za rješavanje (liječenje) ekoloških problema, uglavnom onečišćenja teškim metalima, naftom i dr.

biosfera - iako samo tanak sloj na površini Zemlje, nezamjenjiv je transformator energije Sunca u kemijsku energiju organskih (ugljičinih) spojeva.

biosinteza - sinteza organske tvari iz jednostavnijih kemijskih spojeva.

biosolid - mulj; kruti ostatak nakon prečišćavanja otpadnih voda.

biotehnologija - korištenje živih organizama za dobivanje složenih organskih tvari u većem, obično industrijskom, opsegu.

biotest - laboratorijski test koji koristi žive organizme.

biotit - silikatni mineral, Mg-Fe-liskun (K(Mg,Fe)₃(AlSi₃O₁₀)(OH,F)₂), primarni mineral vulkanskog ili metamorfnog podrijetla.

biotop ili abiocen - naseljeno stanište (biocen ili biocenoza = životna zajednica).

biotski stres - jak štetan utjecaj na biljke izazvan virusima, gljivicama, bakterijama i drugim štetnicima.

bitter pit - "gorke jamice" kod jabuke; simptom propadanja parenhima plodova (*blossom and rot* kod plodova rajčice i paprike) zbog pojačane aktivnosti enzima pektinaze i autolize staničnih stijenki; povezan s deficitom kalcija.

boja tla - boja ima tri komponente: osnovna boja, nijansa i zasićenost boje; endomorfološka oznaka pomoću koje se diferenciraju horizonti i očitava dinamika unutar profila tla; kemijski i mineraloški sastav tla određuju boju koja je kombinacija tri osnovne boje: crne, crvene i bijele.

bonitet zemljišta - pedološka i druga svojstva zemljišnih površina; odgovara međunarodnom pojmu "Land Capability Classification". Uobičajena je podjela u 8 klasa od kojih su prve 4 pogodne za obradu.

borna gnojiva - *boraks* (natrijev tetraborat dekahidrat), 11 % B ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \times 10 \text{H}_2\text{O}$); *anhidrirani (bezvodni) boraks*, 22 % B ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$); *borna kiselina*, 18 % B (H_3BO_3); *solubor* (polyborat, borsol), 21 % B ($\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13} \times 4 \text{H}_2\text{O}$); *kolemanit*, 9-14 % B ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \times 5 \text{H}_2\text{O}$, netopljiv u vodi).

BPO (BOD = Biological Oxygen Demand) - količina kisika potrebna za biološku oksidaciju organske tvari.

braunizacija - pojačano trošenje primarnih minerala uz intenzivnu tvorbu sekundarnih minerala (argilogeneza) i višak slobodnih hidratiziranih spojeva željeza.

budget hraniva - tok hraniva unutar jedne farme ili gospodarstva, a obuhvaća *input hraniva* (primjena gnojiva, kondicionera tla, rezidue prethodnog usjeva, leguminoze, organski gnoj i dr.) i *output hraniva* (iznošenje, ispiranje, erozija itd.) koje zajedno označavamo kao bilancu hraniva. Bilanca nekog hraniva može biti: pozitivna, negativna i neutralna.

C : N omjer - omjer mase ugljika prema masi dušika u organskoj tvari. Opisuje potencijal mineralizacije organske tvari u tlu (za amonifikaciju najpovoljniji omjer je 20-25 : 1).

ciklus ugljika - kruženje ugljika u prirodi; konverzija CO_2 u organsku tvar pomoću kemotsintetičnih ili fotosintetičnih organizama, recikliranje kroz biosferu s djelomičnom inkorporacijom u organsku tvar tla i vraćanje u atmosferu kroz proces disanja ili izgaranja (npr. paljenje žetvenih ostataka, požari).

citoplazma - polutekući, koloidni sadržaj žive stanice.

CNL - "Critical Nutrient Level"; sistem utvrđivanja potrebe za gnojidbom na temelju analize biljne tvari u kojem se kritičnom razinom smatra koncentracija nekog elementa pri kojoj dolazi do 10 % smanjenja prinosa.

cormophyta - više biljke; stablašice.

counter transport - kad je mehanizam usvajanja nekog iona spregnut s izdvajanjem drugoga, npr. K^+ - H^+ , OH^- - H_2PO_4^- .

c-razmak - ponavljajuća distanca slojeva kristalne rešetke sekundarnih minerala (kaoliniti = 0,7 nm, illiti ~1,0 nm, vermikuliti > 2,0 nm).

čilska salitra - mineralno gnojivo natrijev nitrat, NaNO_3 ; sadrži 15-16 % N.

dalton - unificirana atomska jedinica mase (znak: m_u u, Da) rabi se za izražavanje masa atoma, molekula i sličnih čestica; dvanaestina mase ^{12}C .

daljinska istraživanja - primjena različitih metoda prikupljanja i interpretacije informacija o udaljenim objektima bez fizičkog dodira s objektom pri čemu se koriste zrakoplovi, sateliti i svemirske sonde. Metode rabe električno-magnetsku indukciju (EMI), gravitacijska mjerenja te različite vrste snimaka (fotografskih, termalnih, radarskih itd.).

DAP - kompleksno mineralno gnojivo amonijev hidrogenfosfat ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) ili stari naziv diamonij-fosfat (DAP), formulacije 18:46:0.

deficit hraniva - općenito nedostatak biljnih hraniva u tlu uz pojavu brojnih simptoma nedostatka

- hraniva (usporen rast, kloroza, nekroza, niži prinos, loš kvaliteta proizvoda).
- defiksacija hraniva - proces suprotan fiksaciji hraniva.
- deflokulacija - odvajanje čestica; disperzija kemijska ili fizikalna.
- degradacija tla - pogoršavanje fizikalnih, kemijskih i bioloških svojstava tla; smanjenje kapaciteta proizvodnje. Intenzivna degradacija tla zahtijeva trenutnu promjenu načina korištenja tla radi njegovog očuvanja i zaštite od štetnih procesa.
- dehidratacija - suprotno hidrataciji ili kemohidrataciji; endoterman proces.
- dekarbonatizacija (*izluživanje*) tla - ispiranje CaCO_3 iz jednog ili više slojeva tla u niže horizonte.
- dekompozicija - a) početni stadij razgradnje organske tvari u tlu; b) razgradnja organske tvari pomoću mikrobiološke i/ili enzimске aktivnosti.
- denitrifikacija - redukcija N-NH_4 do molekularnog dušika (N_2) ili dušikovih oksida (NO_x), mikrobiološka i kemijska. Rezultira gubitkom dušika u atmosferu iz tla u redukcijским uvjetima.
- depozit - materijal smješten na novu poziciju uslijed aktivnosti ljudi ili prirodnim procesima (vjetar, voda, led, gravitacija).
- desalinizacija - ispiranje soli iz tla; uklanjanje soli iz morske vode.
- desertifikacija - širenje pustinje u aridnim i semiaridnim područjima na poljoprivredna tla kao posljedica promjene klimatskih prilika ili neadekvatne antropogene aktivnosti.
- desorpcija - oslobađanje iona iz električnog polja (npr. koloidne miecele).
- diazotrofi - mikroorganizmi koji mogu fiksirati atmosferski N_2 , a mogu biti simbiotski i nesimbiotski diazotrofi. To su neke vrste bakterija, plavozelenih algi (Coccogoneae i Hormogoneae) i možda gljivica, koje mogu uz pomoć energije oslobođene oksidacijom organske tvari tla vezati atmosferski N_2 i koristiti ga za svoje potrebe (nesimbiotski diazotrofi). Od aerobnih, slobodno živućih fiksatora dušika poznati su Azotobacter, Azospirillum i Beijerinckia (više vrsta), od anaerobnih Clostridium pasteurianum, a od fakultativno anaerobnih Klebsiella.
- difuzija - tendencija izjednačavanja koncentracije plinova ili otopina preko dodirnog sloja.
- digestija - razgradnja (mikrobiološka anaerobna i aerobna); varenje ili probava hrane; koncentracija saharoze u korijenu šećerne repe.
- dikotiledone - biljke dvosupnice.
- dinamički simulacijski modeli - modeli koji koriste vremenski slijed ulaznih podataka za simulaciju biofizikalnih mehanizama (npr. rasta, razvitka i tvorbe prinosa) i prema zakonima prirode daju odgovore za različite agroekološke uvjete.
- dinamika hraniva u tlu - promjene intenziteta i oblika raspoloživosti hraniva u tlu.
- disanje - metabolični proces uz usvajanje kisika.
- disperzija - razlaganje agregata tla do pojedinačnih čestica.
- distrična tla - kisela tla ($\text{pH}(\text{HOH}) \leq 5,5$) čiji je KIK slabo zasićen bazama ($V \leq 50\%$).
- dolomit - kalcijev magnezijev karbonat ($\text{CaCO}_3 \times \text{MgCO}_3$); glavni, lako lomljivi sastojak stijena dolomita i dolomitskih mramora.
- dominantan - vladajući; snažan; moćan; npr. u procjeni produktivnosti tla izbor usjeva je ključni ili dominantan atribut.
- Donnanov zakon ili ravnoteža - neravnomjerna raspodjela iona s dvije strane stanične stijenke; pasivno usvajanje hraniva.
- dormantnost - razdoblje u kojem biljke (sjeme) miruju čekajući povoljnije uvjete sredine, npr. temperaturu, vlagu, duljinu dana.
- doza - izraz za količinu hraniva na jedinicu površine u primjeni gnojiva, pesticida i sl.
- DRIS - "*Diagnosis and Recommendation Integrated System*", koncept jedinstvenog sustava dijagnoze i preporuka utemeljen na utvrđenim odnosima elemenata, koristi se neovisno o

agroekološkim uvjetima proizvodnje.

dušični manjak (*N-depresija*) - prolazni nedostatak dušika izazvan unošenjem u tlo svježe organske tvari širokog C/N omjera (npr. slame); mikrobiološka fiksacija dušika.

edafologija - znanost koja istražuje utjecaj koji tlo ima na sva živa bića, naročito biljke, uključujući i načine korištenja zemljišta pri uzgoju bilja.

edafon - živa faza tla, ukupno oko 5 t ha⁻¹. Čine ju: bakterije i aktinomicete (40 %), gljive (40 %), makrofauna (5 %), mikro i mezofauna (3 %) te crvi (12 %).

efektivna plodnost tla (*produktivnost biljnog staništa*) - složeno svojstvo tla koje definira količine organske tvari koju biljke mogu sintetizirati na nekom staništu tijekom vegetacijskog razdoblja.

egzergone reakcije - kemijske ili biokemijske reakcije koje oslobađaju energiju.

Ehrenbergov zakon - antagonizam Ca i K; omjer Ca/K.

ekologija - znanost koja proučava interakciju organizama - međusobno i s okolišem.

ekološka proizvodnja hrane - proizvodnja hrane bez korištenja mineralnih gnojiva i sintetskih preparata; temelji se na harmoniji čovjeka i prirode.

ekološko opterećenje okoliša = broj stanovnika × tehnologija × životni standard.

ekosustav ili biogeocenoza - biocenoza i biotop formiraju cjelinu višeg reda, tzv. ekosustav ili biogeocenozu što je temeljna jedinica ekologije i predstavlja izuzetno složen i dinamičan sustav u kojem se promjena bilo koje komponente (žive ili nežive) reflektira na čitav sustav. Utjecaj neživih komponenti ekosustava na žive nazivaju se akcije, a odgovor živih organizama na njih su reakcije, dok se međusobni utjecaji živih organizama označavaju kao koakcije.

ekspertni sustav (*ekspertni računalni model*) - kompjutorski model/program za rješavanja kompleksnih problema bez prisustva eksperata (npr. *ALRxp* kalkulator za utvrđivanje potrebe u gnojidbi na temelju podataka o tlu, klimi, uređenosti tla, agrotehnici i dr.); kompjutorski model rješavanja problema utemeljen na znanju.

ekstinkcija - apsorpcija svjetlosti; optička gustoća.

ekstravaskularno kretanje vode - kretanje vode u biljci od stanice do stanice kroz mikrokapilare staničnih stijenki, malog je intenziteta i temelji se na osmotskim silama.

ektodezme - sustav pora u celuloznoj građi stanične stijenke neplazmatičnog tipa.

ekvivalencija - jednakost vrijednosti. Primjer: zamjena iona na KIK-u moguća je samo u elektroekvivalentnim omjerima, npr. ion Ca²⁺ zamjenjuje 2 K⁺, 2 Na⁺ zamjenjuju Mg²⁺ itd.

elektroprovodljivost (*konduktivitet*) tla, EC - mjeri se konduktometrom u suspenziji tla i vode (1:5 ili 1:2,5), a izražava u dS m⁻¹ (1 S = 1 ohm⁻¹ = mho; S = Siemens). U hortikulturi i uzgoju u posudama koriste se fertometri, obično kalibrirani tako da pokazuju 620 ppm soli kad je očitavanje 1 mS cm⁻¹ pri 20 °C; 1 S = 1 Ω⁻¹ = 1 A/V = 1 A²/W = 1 kg⁻¹ m⁻² s³ A²

električno-magnetska indukcijaska, EMI - pojava nastanka elektromotorne sile u zavojnici koja obuhvaća promjenljivi magnetski tok; prijenos električne struje bez kontakta (indukcijom).

elektrogena ionska crpka - ionska crpka koja "ubacivanjem" iona u stanicu dovodi do promjene potencijala i formira proton-motornu silu (npr. sinteza ATP).

elektrokemijski gradijent - razlika u naboju uvjetovana razlikom u koncentraciji iona (npr. s dvije strane membrane = membranski potencijal = elektrokemijski gradijent). Nabijene čestice (ioni) kreću se niz elektrokemijski gradijent.

elektrokemijski potencijal, Eh - električni potencijal koji generiraju oksido-redukcijski procesi, izražava se u mV, vrijednosti u tlu od -300 do +700 mV.

Važan je u razgradnji organske tvari tla: Eh > +300 mV = aerobna respiracija, Eh -100 do +300 mV = fakultativno anaerobna respiracija, Eh < -100 mV = anaerobna respiracija.

elektroneutralna ionska crpka - ionska crpka koja "ubacuje" u stanicu jedan kation, a istovremeno se "izbacuje" drugi tako da se elektrokemijski potencijal stanice ne mijenja prema

vanjskom potencijalu.

eluvijacija - pedogenetski proces ispiranja gline, humusa ili seskvi oksida vodom iz gornjih horizonata u niže. Rezultira formiranjem iluvijalnog horizonta.

eluvijalni horizont, E - horizont u kojem se odvija eluvijacija.

empirijsko-statistički modeli - iskustveni modeli kreirani statističkom analizom velikog broja podataka, omogućavaju kvantitativnu predikciju prinosa usjeva.

endergone reakcije - kemijske ili biokemijske reakcije koje troše energiju.

endoderma (korijena) - endodermalni sloj suberiniziranih stanica s nepropusnim Kasparijevim pojasom.

endoplazmatski retikulum - složeni membranski sustav koji povezuje plazmalemu s membranom jezgre, tonoplastom, vakuolom i drugim organelama stanice.

eolski, eolski depoziti - akcija uzrokovana vjetrom; fini sedimenti (les, dine, pustinjski pijesak i fini vulkanski pepeo) premješteni vjetrom.

erozija – odnošenje materijala (kamenje, čestice tla) po površini tla djelovanjem gravitacije i niza klimatskih čimbenika (površinska voda, led kod topljenja, vjetar).

EUf-metoda - elektroultrafiltracijska metoda (Nemeth, 1976.) koja se temelji na ekstrakciji hraniva iz tla uz pomoć električnog jednosmjernog napona pri čemu se koloidi tla od vodene faze odvajaju pomoću specijalnih membranskih filtera.

eukarioti - organizmi koji posjeduju nasljedni materijal u jezgri obavijenoj jezgrinom membranom. U ovakvim stanicama su se razvile brojne stanične organele; viši organizmi.

eutrična tla - tla neutralne i alkalne reakcije ($\text{pH}(\text{HOH}) > 5,5$) čiji je KIK zasićen bazama ($V > 50\%$).

eutrofično tlo - sadrži optimalnu količinu biljnih hraniva.

eutrofikacija - obogaćivanje (onečišćavanje) prirodne vode hranjivim tvarima što izaziva bujanje algi, a nakon njihovog izumiranja nestanak kisika u vodi i smrt mnogih organizama (npr. riba).

evaporacija - gubitak vode isparavanjem iz tla u atmosferu.

evapotranspiracija - kombinacija procesa evaporacije i transpiracije; gubitak vode isparavanjem iz tla i biljaka.

fakultativno aerobni organizmi - mikroorganizmi koji su sposobni živjeti i funkcionirati u aerobnim i anaerobnim uvjetima.

feedback - princip povratne veze; povratno djelovanje, npr. kontrola biokemijske (enzimske) reakcije količinom produkata.

Feekes skala - stupnjevi vegetativnog razvitka, kod žitarica se koriste još Haun, Zadoks i BBCH skale.

Fe-kloroza - simptom nedostatka željeza; kloroza izazvana poremećajem u sustavu tlo-biljka-klima-agrotehnika, najčešće kod visokog pH tla i istovremeno niskog sadržaja kalija; naziva se i vapnena kloroza.

fertigacija - primjena gnojiva zajedno s navodnjavanjem ili irigacijom (rasprskivačima ili sustavom kap po kap).

fiksacija amonijaka - neizmjenjiva adsorpcija amonijevih iona unutar pojedinih minerala gline.

fiksacija dušika - transformacija molekularnog dušika iz atmosfere u organsku tvar mikroorganizama.

fiksacija hraniva - trajna ili tijekom dužeg vremena transformacija raspoloživih hraniva u nepristupačne oblike (biološka, kemijska i fizička); transformacija pokretnih hraniva u teško pokretne oblike.

filodstenzija - izduživanje biljaka, npr. proljetno izduživanje strnih žita.

filogeneza - razvoj živih bića (biološka evolucija) kroz povijest; filogenija.

fitinska kiselina (fitin) - Ca-Mg sol inozitolheksafosfata, bitna za metabolizam eukariota, rezerva znatnih količina fosfora.

fitocenozna - prirodna biljna zajednica; fitocenologija je znanost o biljnim zajednicama; asocijacija je fitocenozna kojoj je određen floristički sastav.

fitosiderofore - niskomolekularne izlučevine korijena u rizosferu (phyto = biljka, sider = željezo, phore = nosač), kao što su: šećeri, organske kiseline, aminokiseline i fenoli, uključujući i fitosiderofore kao kelatizirajuće agense.

fitotoksične tvari - tvari koje štetno djeluju na rast biljaka.

fitotoksin - tvar koja negativno ili smrtonosno djeluje na biljke.

fiziološka reakcija gnojiva - utjecaj gnojiva na promjenu pH-vrijednosti tla, izražava se kao potencijalni ekvivalent alkalnosti ili potencijalni ekvivalent zakiseljavanja.

fiziološka suša - nedostatak vode u biljkama koje transpiracijom gube vodu a ne mogu je usvajati iz tla zbog niske temperature tla ("hladna suša"); privremeno stanje u kojem biljke gube danju više vode transpiracijom zbog visokih temperatura nego što je mogu usvojiti korijenom iz tla koje sadrži dovoljno raspoložive vode ("vlažna suša").

flogiston - hipotetski element (Beker, 1667.) koji kod izgaranja organske tvari nestane, a zaostane samo pepeo.

flokulacija - taloženje (precipitacija) koloidnih sustava u obliku pahuljica; u tlu proces vezan za agregaciju čestica tla.

fluorescencija i fosforescencija - *fluorescencija* je emitiranje viška energije u obliku svjetlosti kada se elektron brzo vraća iz pobuđenog stanja, tzv. singleta; *fosforescencija* je pojava kada se elektron zadrži izvjesno vrijeme na višoj energetskej razini, a zatim se vraća u osnovno stanje emitirajući svjetlost.

formulacija gnojiva - omjer aktivne tvari (N : P₂O₅ : K₂O) u mineralnom gnojivu.

fosfati, Ca-fosfati - soli trobazične fosforne (ortofosforne) kiseline H₃PO₄ (hidrogenfosfati-sekundarni fosfati i fosfati-tercijarni fosfati).

Kalcijeve soli fosfatne kiseline: Ca(H₂PO₄)₂ - primarni kalcijev fosfat ili kalcijev dihidrogenfosfat (vodotopljiv); CaHPO₄ - sekundarni kalcijev fosfat ili kalcijev hidrogenfosfat (citrat topljivi) i Ca₃(PO₄)₂ - tercijarni kalcijev fosfat ili kalcijev fosfat (topljiv u jakim kiselinama).

fosfatizacija - melioracijska gnojidba fosforom; mjera popravke tala slabo opskrbljenih fosforom.

fosfogips - industrijski nisko radioaktivan otpad u proizvodnji mineralnih gnojiva kojeg se generira ~1,6 t po toni sirovog fosfata.

fosforit - kalcijev fosfat Ca₃(PO₄)₂, kalcijev tercijarni fosfat.

fotoautotrof - organizam koji uzima CO₂ iz atmosfere i uz pomoć sunčeve radijacije gradi organsku tvar.

fotobiološki efekt - štetno djelovanje ultravioletnog zračenja (uglavnom UV-B, 290-320 nm) na ljude, životinje te biljke i njihovu produktivnost.

fotofosforilacija - sinteza fosfornih spojeva bogatih energijom uz pomoć sunčeve radijacije (npr. ATP).

fotoheterotrofi - organizmi koji uz pomoć sunčeve radijacije i ugljika iz organske tvari tla iznova grade organsku tvar.

fotooksidacije vode - fotosintetska razgradnja vode (P680): 2 H₂O → 4 H⁺ + 4 e⁻ + O₂.

fotosinteza - sinteza ugljikohidrata iz CO₂ i H₂O pomoću svjetlosti; proces fotosinteze obavljaju isključivo fotosintetski organizmi uz pomoć zelenog pigmenta klorofila (primarni proizvođači organske tvari).

fototaksija - kretanje prema svjetlosti.

fragment - mala količina tvari nastala djelovanjem neke sile.

fulvo kiseline - komponenta humusa, žućkaste (otuda potječe naziv) ili crvenkaste boje, molekularne mase 1.000-5.000 kDa, a zaostaju u otopini nakon taloženja huminskih kiselina iz tla lužinom. Elementarni sastav je: C = 42-47 %, H = 3,5-5 %, O = 45-50 % i N = 2-4,1 %. Ciklične jezgre su manje kondenzirane od huminskih kiselina od kojih su kiseliije i topljivije u vodi.

funkcionalne grupe - atomske grupe koje određuju svojstva pojedinih organskih spojeva.

genetska specifičnost mineralne ishrane - različita reakcija biljaka (vrsta i kultivara) na uvjete ishrane i potrebnu količinu hranjivih tvari.

genetski inženjering - niz biokemijskih metoda kojima se na umjetni način stvaraju nove nasljedne kombinacije tako da se dio gena jednog organizma izdvaja i prenosi u drugi te na taj način nastaju "transgeni" organizmi čiji DNK ne postoji u prirodi.

genom - kompletan set gena nekog organizma.

geomorfologija - znanost koja se bavi pojavnim oblicima reljefa povezano s geološkom strukturom zemljine površine.

georeferencirani (*geokodirani*) podaci - prostorno definirani podaci; podaci kojima je pridružen digitalni prostorni entitet.

geostatistička analiza - skup metoda za analizu prostorne varijabilnosti podataka; grana primijenjene statistike koja se koristi za analizu različitih prostornih pojava u brojnim znanostima.

gips - kalcijev sulfat ($\text{CaSO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$).

glikoliza - anaerobni dio metabolizma razgradnje glukoze u živim organizmima (Emden-Meyerhof-Parnas).

glinene kiseline - pokretan oblik minerala gline u vrlo kiseloj sredini.

glineni minerali - kristalni ili amorfni mineralni materijal (sekundarni alumosilikati) promjera čestica < 2 μm : *kaolinit* ($\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$), *smektit* ($(\text{OH})_4\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{H}_2\text{O})_n$) i *iliti ili hidratizirani liskuni*. Slojevite su građe.

gljive - jednostavni biljni organizmi bez klorofila, građeni iz hifa koje tvore micelij. To su saprofitni ili paraziti organizmi važni za procese dekompozicije organske tvari tla i procese humifikacije.

GMO - genetički modificirani organizmi (GMO); organizam kreiran genetskim inženjeringom; transgeni organizam u koji su premješteni geni ili dijelovi gena iz DNK jednog organizma u DNK drugog organizma.

gnojiva - materijali koji uneseni u tlo osiguravaju jedno ili više biljnih hraniva u raspoloživoj ili mobilnoj formi; A) mineralna (sintetska): pojedinačna (dušikova, fosforna i kalijeva) i složena (miješana - smjesa pojedinačnih i kompleksna), B) organska (naravna), C) organomineralna i D) bakterijska; 1) kruta (praškasta, granulirana, peletirana, trionizirana), 2) tekuća (prave otopine i suspenzije) i 3) plinovita.

gnojivo osnovno - cjelokupna doza P i K gnojiva i jedan dio N gnojiva koja se dodaju pod osnovnu obradu tla kako bi se gnojivo jednakomjerno rasporedilo po cijeloj dubini najvećeg rasprostiranja gnojiva.

gnojivo startno - relativno mala količina gnojiva primijenjena zajedno sa sjetvom ili približno u vrijeme sjetve s namjerom ubrzanja ranog porasta usjeva.

gnojivo za prihranu - relativno mala količina gnojiva primijenjena tijekom ranih faza vegetacije (zima ili proljeće). Sadrže u tlu lakopokretljive mineralne oblike hraniva, kod usjeva su pretežno nitratna ili amonijeva nitratna. Prihrana voća, vinograda i povrća obavlja se na temelju potrebe biljaka tijekom vegetacije i može činiti jedini ili najveći dio gnojidbe.

gnojnica - organsko tekuće gnojivo; tekući ekskrementi; 0,2 % N (0,1-0,5), 0,5 % K_2O (0,3-1,0) i fosfor u tragovima (0,01 % P_2O_5).

gnojovka - organsko polutekuće gnojivo, tekući stajnjak. Goveda gnojovka sadrži prosječno uz 5,5 % organske tvari oko 0,4 % N, 0,2 % P_2O_5 i 0,5 % K_2O , a svinjska uz 6,0 % organske tvari i 0,6 % N, 0,45 % P_2O_5 i 0,25 % K_2O .

GPS - globalni pozicijski sustav (*Global Positioning System*); američki svemirski globalni navigacijski satelitski sustav koji omogućuje geopozicioniranje i navigaciju.

gram-ekvivalent - stara jedinica za ekvivalentnu masu izraženu u gramima, odnosno onoliko grama neke tvari koja se može spojiti ili zamijeniti s 1,008 g vodika ili 8 g kisika; atomska masa podijeljena s valencijom.

granit - eruptivna stijena koja sadrži kremen, feldspat i različiti udio biotita i muskovita.

gravitacijska voda - voda koja iz tla slobodno otječe porama pod utjecajem gravitacije; slobodna voda.

guano - peruanski guano, fosfatni guano i sl. su nataloženi ekskrementi morskih ptica, usitnjeni do veličine granula pogodnih za raspodjelu, formulacije 3:8:1 do 8:4:1

habitat - stanište; predstavlja mjesto na kojem žive organizmi.

halofite - biljke slanih staništa; biljke tolerantne na povećane koncentracije soli.

halofitna vegetacija - vegetacija slanih, saliniziranih, tala

halogeni elementi - elementi 17 skupine (po starom VII ili VIIA) periodnog sustava (F, Cl, Br, I i At) koji u vanjskoj ljusci imaju 7 elektrona. Izrazito su negativni te primanjem elektrona prelaze u monoanione ili jednovalentne anione.

halomorfna tla - odjel tala u hrvatskoj klasifikaciji koji čine: a) akutno zaslanjena tla ili solončaci (sadrže > 1 % soli za kloridno sulfatno zaslanjivanje ili > 0,7 % za sodno zaslanjivanje i b) alkalizirana tla ili soloneci s > 15 % iona Na⁺ vezanih na adsorpcijski kompleks tla.

hematit - mineral željeza Fe₂O₃, stijenama daje crvenu boju, lako se troši te prelazi u magnetit i limonit; daje boju crvenici (Terra Rosa).

heterotrofi - organizmi koji se opskrbljuju energijom razlažući organsku tvar.

hidratacija (solvatacija) - opći pojam za vezanje vode (otapala) na čestice tvari različitim fizikalno-kemijskim silama; adsorpcija vode (otapala) na električno nabijene čestice (ione, molekule, koloidne micle) ili površine.

hidrati - spojevi kristaliziranih soli s vodom, npr. CuSO₄ × 5H₂O.

hidraulički konduktivitet - mjera propusnosti tla za vodu (cm dan⁻¹); otpor tla provođenju vode razmjernan razlici potencijala vlažnosti tla; 0,15 cm dan⁻¹ za tešku glinu do ~ 120 cm dan⁻¹ za grubi pijesak.

hidridi - spojevi elemenata s vodikom (ionski NaH, metalni TiH₃ ili AlH₃).

hidrofilan - koji se veže s vodom ili ima jak afinitet prema vodi; suprotno je hidrofoban .

hidrogenizacija - specifična transformacija tla u anaerobnim uvjetima uz redukciju željeza(III) i tvorbu spojeva željeza(II) plavkaste do zelenkaste boje sa žučkasto-smeđim mrljama ili bez njih (oglejavanje) i tvorbu akvatičnog humusa.

hidrogenkarbonati (bikarbonati, kao stari naziv) - soli ugljične kiseline, npr. natrijev hidrogenkarbonat - NaHCO₃, kalcijev hidrogen karbonat - Ca(HCO₃)₂.

hidrolitička kiselost tla (H_v) - *ukupna potencijalna kiselost* nekog tla; utvrđuje se neutralizacijom tla višebaznim solima (npr. CH₃COONa, pH = 8,2) pri čemu se svi vodikovi atomi ne zamjenjuju lužinama kod iste pH vrijednosti sredine.

hidroliza - dekompozicija tvari u reakciji s vodom, kiselinama ili lužinama, disocijacija vodotopljivih soli; katalitička konverzija škroba do glukoze; u tlu je to proces koji uzrokuje zamjenu iona H⁺ drugim kationima.

hidrologija - znanstvena disciplina koja proučava svojstva, preraspodjelu i kretanje vode.

hidrološki ciklus - kruženje vode u prirodi obuhvaća: a) evaporaciju, b) transpiraciju, c) kondenzaciju, d) precipitaciju, e) površinsko otjecanje (runoff), f) perkolaciju i g) razinu podzemne vode.

hidromorfna tla - odjel tala u hrvatskoj klasifikaciji kojima je svojstveno povremeno ili stalno

suficitno vlaženje dijela profila ili cijelog soluma stagnirajućom oborinskom vodom ili dodatnom površinskom ili/i podzemnom vodom.

hidropni - sustav uzgoja biljaka u zaštićenom prostoru na hranjivoj otopini.

hidrosfera - vodeni omotač Zemlje; sva voda koja se nalazi na Zemljinoj površini (tlu), unutar tla i u šupljinama litosfere.

hidrostatski tlak - uzrokovan je tlakom tekućine (F) koji nastaje uslijed mase (gravitacije) ili inercije (kretanja), a djeluje na određenu površinu (A): $p(F/A)$; jedinica za tlak je Njutn po metru kvadratnom ($N\ m^{-2}$) ili kraće paskal (Pa).

hidrotermalni minerali - minerali nastali kristalizacijom iz vruće vode.

higroskopan - koji upija vlagu iz zraka.

higroskopna voda - dio kaplarnog vode u tlu čije opne ne prelaze debljinu 15-20 molekula vode visoke adsorpcije (do 1.000 bara); određuje se sušenjem na 105 °C i biljkama je potpuno nedostupna; količina higroskopne vode u nekom tlu upravo je proporcionalna njegovoj koloidnoj frakciji, a obrnuto proporcionalna veličini čestica.

hipoksija - snižavanje parcijalnog tlaka kisika u zoni korijena uslijed poplava, pokorica, ledene kore na površini i sl. praćeno snižavanjem metabolizma korijena i slabijim usvajanjem vode i hraniva; ekstremni slučaj se naziva anoksija.

histosoli ili treseti - tla koja sadrže > 30 % slabo razgrađene organske tvari u anaerobnim uvjetima u sloju debljem od 30 cm iznad oglejenog (G) horizonta.

holizam - pogled na svijet i filozofija koja u cjelini vidi nešto više od zbroja pojedinih njenih dijelova.

holocen - interglacijalno razdoblje započelo naglim zatopljenjem prije otprilike 10.000 godina, a traje sve do danas.

horizont - relativno uniformni sloj materijala u tlu koji je položen horizontalno, kontinuirano ili diskontinuirano kroz pedojedinicu, a razlikuje se od drugih horizonata kemijskim, fizikalnim i biološkim svojstvima; sloj tla karakterističnih svojstava nastalih kao rezultat zajedničkog djelovanja svih pedogenetskih čimbenika.

hranivo - neophodni elementi biljne ishrane; vidi esencijalni elementi.

humat efekt - kelatizacija teških metala uz sprječavanje kemijskog vezivanja fosfata (osobito u kiseljoj sredini gdje lako nastaju netopljivi i nepristupačni fosfati željeza i aluminija).

humidna klima - vlažna klima (humidus = vlažan); indeks aridnosti klime po De Martonneu > 20; Langov kišni faktor 100-159; Gračaninov indeks padalina 6,7-13,3.

humifikacija - dekompozicija svježeg organske tvari i mikrobiološka tvorba humusa kroz sintezu trodimenzionalnih organskih polimera u tlu. Sastoji se od nekoliko faza: a) predigestivna faza podrazumijava usitnjavanje (gljive, makro i mezofauna) i razlaganje rezistentnih organskih tvari (celuloza, lignin, hitin i dr.) uz izdvajanje CO₂; b) sinteza plazme tla; c) stabilizacija humusa tvorbom organomineralnog kompleksa tla.

humini - komponente humusa; otapaju se u toploj lužini (NaOH); često se smatraju reduciranim anhidridima humusnih kiselina.

huminske kiseline - komponente humusa. Tamno obojene otopine, koje se iz tla ekstrahiraju lužinama, a talože se kiselinama u obliku gela. Relativna molekularna masa im je 10.000-100.000, a elementarni sastav: C = 51-62 %, H = 2,8-6,6 %, O = 31-36 % i N = 3,6-5,5 %. Jezgre su ciklične i povezane mostićima tipa -O-, -N-, -NH- ili -CH₂- na koje su vezani polimerni ugljikovi lanci kao funkcijske skupine (-COOH, -OH, -OCH₃ i =CO) koje određuju karakter veze huminskih kiselina i čestica tla.

humus - a) "Humus je proizvod žive tvari i njen prirodni izvor, humus je rezerva i stabilizator organskog života na Zemlji" (Vaksman); b) humus je dormantna snaga tla ili uspavana moć i temelj prirodne plodnosti tla, odnosno izvor energije i plodnosti "Majke Zemlje"; c) humus je organska

tvar koja je u uvjetima nekog staništa teško razloživa što dovodi do njenog nagomilavanja u tlu.

humusna teorija - biljke se hrane humusom koji usvajaju korijenjem te nakon izumiranja iznova grade humus (Aristotel; 384.-322. pr.n.e.).

ilimerizacija ili lesiviranje - ispiranje gline iz površinskih horizonata tla u niže; proces tipičan za lesivirana tla (luvisole) i bitan za formiranje iluvijalnog argiluvličnog (Bt) horizonta.

ilovača - teksturna klasa tla s približno podjednakim udjelom čestica pijeska, praha i gline; tlo koje sadrži 7-27 % gline, 28-50 % praha i do 52 % pijeska (Kanadska podjela, 1999.).

iluvijacija - akumulacija materijala ispranog iz eluvijalnog horizonta, najčešće gline, humusa ili seskvi oksida.

iluvijalni horizont, B - horizont akumulacije materijala ispranog iz eluvijalnog horizonta (gline, humusa ili seskvi oksida).

imobilizacija hraniva - suprotan proces mobilizaciji; konverzija anorganskih elemenata u organsku formu biljaka ili mikroorganizama vremenski ograničena transformacija bioraspoloživog elementa u nepristupačan oblik.

indifuzibilni anioni - negativno nabijene krupne čestice koje ne mogu difundirati kroz semipermeabilne membrane (npr. molekule bjelančevina u protoplazmi).

indikativni minimum - minimalni zahtjev za korištenje tla; sadrži sve atribute tipa korištenja, a na prvom mjestu je zadovoljenje potreba biljne vrste – usjeva.

indikator kvalitete tla - pojedina, mjerljiva (kvantitativna) ili opisna (kvalitativna) kemijska, fizikalna i biološka svojstva tla; funkcije ili stanje koje pokazuju produktivnost (plodnost) tla.

indorski kompost - kompost nazvan prema mjestu Indore u Indiji (sir Albert Howard, 1873.-1947.)

infiltracija vode - brzina prodiranja vode u tlo; I_v = oborine – evapotranspiracija – površinsko otjecanje (cm dan⁻¹).

inflorescencija - cvat; smatra se da je razvoj komponenti klasa žitarica samo djelomice pod utjecajem nasljedne osnove (neodređena inflorescencija), pa je time dobra ishranjenost biljaka još značajnija.

infracrven, IR - dio elektromagnetnog spektra između 0,75 μ i 1 mm.

infrastruktura - trajne instalacije izgrađene za potrebe poljoprivredne (ili neke druge) aktivnosti, kao što su putovi, sustavi za navodnjavanje, skladišta i dr.

inokulacija - unos mikroorganizama ili komposta u sirovi materijal za ubrzanje dekompozicije organske tvari; bakterizacija sjemena leguminoza kvržičnim bakterijama.

integralna ili integrirana biljna proizvodnja - kompromis između konvencionalne i ekološke, odnosno održive poljoprivredne proizvodnje (naziva se i integrirana biljna proizvodnja). Predstavlja sustav uzgoja koji primjenu agrotehničkih mjera usklađuje s ekonomskim i ekološkim principima i najlakše se da opisati izrazom "dobra poljoprivredna praksa" jer su proklamirani ciljevi integrirane proizvodnje: prihvatljivo ekološko opterećenje okoliša, očuvanje i podizanje plodnosti tla prirodnim putem i čuvanje i poticanje biološke raznolikosti.

interkostalna kloroza - međužilna kloroza lišća; vrlo čest simptom nedostatka elemenata ishrane.

intermicelarni - između micela; vodena faza koloidnog sustava.

intracelularan – unutarstaničan.

ioni - električni nabijeni atomi ili molekule, nastaju u otopinama kao posljedica elektrolitičke disocijacije

ionofora - spojevi različite kemijske građe i mase koji imaju ulogu prenositelja iona.

ionska crpka - elektrokemijski mehanizam prolaženja tvari kroz žive membrane koji uključuje i neki aktivan prenositelj (elektroneutralni i ionogeni tip).

ionska veza - kemijska veza koja nastaje uz primanje ili gubljenje elektrona kod spajanja suprotno nabijenih iona npr. NaCl.

- ionski aktivitet - efektivna koncentracija pojedinih iona; izražava se analogno potencijalu iona (pCa, pNa).
- ionski kanali - makromolekularne pore kroz koje se pasivno odvija kationski transport (uvjetno jer se gradijent potencijala uspostavlja kao rezultat metabolizma) i izuzetno su važni za održavanje ionske ravnoteže stanica i njihovu osmoregulaciju.
- irigacija - navodnjavanje; namjerno unošenje vode u tlo.
- ispiranje - ispiranje elemenata ishrane iz oraničnog sloja do razine podzemne vode; ispiranje topljivih dijelova tla u otopini ili suspenziji.
- izmjenjivi kation - kation vezan na KIK koji se može zamijeniti s drugim kationom/kationima u ekvivalentnom iznosu ($2K^+ \leftrightarrow Ca^{2+}$).
- iznošenje hraniva - ukupno usvojena količina hraniva (iz tla i/ili preko lista); odnošenjem hraniva je količina hraniva biogenih elemenata u merkantilnom dijelu (koji se odnosi s proizvodne parcele).
- izomerija - postojanje dva ili više spojeva iste empirijske formule i mase.
- izomorfija - postojanje dvije ili više kemijskih tvari iste kristalne strukture.
- izomorfna zamjena - zamjena atoma u kristalnoj rešetki glinenih minerala nekim drugim, sličnog promjera, niže valencije, bez promjene strukture minerala, ali uz promjenu naboja.
- izotopi - atomi istog elementa (imaju jednak broj protona i jednak broj elektrona) koji imaju različite mase jer imaju različit broj neutron.
- izotropan - identičan u svim smjerovima; nevidljiv u polariziranom svjetlu; suprotno je anizotropan.
- jedinica pogodnosti - osnovna zemljišna jedinica u kategorizaciji pogodnosti tla.
- jednogodišnje biljke - biljke čiji je kompletan životni ciklus unutar jedne godine.
- kalcifikacija - a) prirodan proces tvorbe sekundarnih kalcijevih minerala i soli u tlu; b) akumulacija kalcija u životinjskim ili biljnim tkivima.
- kalcij-cijanamid - mineralno gnojivo $CaCN_2$; sadrži 18-22% N.
- kalcit - kristalni $CaCO_3$ (kristalizira u heksagonalnom sustavu; glavni tipovi kristala u tlu su zupčast, prizmatični, nodularni, vlaknasto granularni i kompaktni), sastojak vapnenca, mramora, vapnenačkih pješčenjaka i lapora.
- kalcizacija - vapnjenje; unošenje u tlo materijala koji sadrži dosta kalcija u svrhu podizanja pH.
- kalij-nitrat - kompleksno mineralno gnojivo KNO_3 ; 46,5% K_2O i 14% N.
- kalijska gnojiva – kalijev klorid (60% K_2O); kalijev sulfat (50% K_2O).
- kaliofilne biljke - biljke koje zahtijevaju veće količine K u ishrani (npr. šećerna repa, krumpir itd.).
- Kalvinov (Calvin-Bensonov) ciklus - tamni dio fotosinteze; redukcijski-pentoza-fosfatni put ili RPP; fiksacija CO_2 .
- kambični horizont, (B) - horizont smješten između humusno akumulativnog (A) horizonta i matičnog supstrata (C ili R), obično je smeđe, crvenkaste ili žute boje s višim sadržajem glinaste frakcije zbog procesa argilosinteze (sinteza minerala gline).
- kamen - odlomljeni dio stijene.
- KAN - mineralno gnojivo vapnenasto-amonijski-nitrat - $NH_4NO_3 + CaCO_3$; sadrži 27% N.
- kaoliniti - sekundarni minerali gline tipa 1:1 ($Si_4Al_4O_{10}(OH)_8$); sposobnost adsorpcije kaolinita je mala ($3-15 \text{ cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$), a njegova specifična površina iznosi svega $5-20 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$.
- kapacitet tla za raspoloživu vodu - težinski postotak vode tla raspoloživ za usvajanje korijenom; PVK – TU (vlažnost kod poljskog vodnog kapaciteta umanjena za vlažnost točke uvenuća).
- kapacitet zamjene korijena - mogućnost usvajanja hraniva u dodiru korijena s adsorpcijskim kompleksom tla; leguminoze općenito imaju visok kapacitet zamijene ($40-60 \text{ cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ ST}$), a

biljke iz porodice trava upola niži.

kapilarna voda - količina vode koju tlo može zadržati nakon ocjeđivanja suvišne vode. Drži se u tlu adhezijskim i površinskim silama kao film oko čestica tla i popunjava kapilare.

kapilarni uspon - kretanje vode kroz kapilare naviše uvjetovano kohezivnim i adhezijskim silama.

kapilarnost - svojstvo (kvaliteta) tla koje dopušta kretanje vlage u tlu kroz fine pore.

Karboalkal - komercijalno ime za saturacijski mulj (Tvornica šećera Osijek).

karbonatna kiselina - ugljična kiselina H_2CO_3 , slaba kiselina koja se odmah raspada na vodu i ugljikov dioksid, soli su karbonati i hidrokarbonati.

karbonatna tla - tla koja sadrže $CaCO_3$ ili $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ u tolikoj količini da se to može utvrditi kapanjem 10% HCl (pjenjenje i šum).

kartografska jedinica - homogena površina označena/omeđena na karti (ili jedan tip tla).

katabolizam - fiziološki procesi uključeni u razgradnju organske tvari i povezani s oslobađanjem energije.

kation - ion ukupno pozitivnog naboja.

kelati (helati, šelati) - organometalni molekularni kompleksni spojevi; kompleksni heterociklični spojevi s metalima, organska komponenta je ligand; biogeni metali u bioraspoloživom obliku koji se mogu primjenjivati u ishrani bilja preko lista ili korijena.

kemigacija - primjena gnojiva, insekticida, fungicida, nematocida i herbicida kroz sustav za navodnjavanje.

kemijska potreba kisika (KPK) - količina kisika ekvivalentna dijelu organske tvari koja je podložna oksidaciji jakim kemijskim oksidansom.

kemijski vezana voda - voda ugrađena u različite hidratizirane kemijske spojeve tla i nije raspoloživa za usvajanje.

kemisorpcija, kemosorpcija - adsorpcija plinovite ili otopljene tvari na površini adsorbenta uz kemijsku reakciju.

kemoautotrofi - organizmi koji svoje energetske potrebe zadovoljavaju oksidacijom ili redukcijom različitih anorganskih spojeva, a C uzimaju iz CO_2 .

kemoheterotrofi - organizmi koji svoje energetske potrebe zadovoljavaju oksidacijom organske tvari; kemosintetski organizmi.

kemohidratacija - polarno (na temelju električnog potencijala) vezanje vode; egzoterman proces pri kojem se oslobađa toplina ($\sim 8,5 \text{ kJ mol}^{-1}$ vode).

kemoproteini - proteini koji sadrže Fe u formi kema; sadrže ga citokromi, peroksidaze, katalaze, bakterijski leghemoglobin, ljudski i životinjski kemoglobin krvi i dr.

kemotaksija - kretanje živih organizama u pravcu određenog kemijskog spoja (pozitivna) ili suprotno (negativna).

ketokiseline (oksokiseline) - organski spojevi koji sadrže dvije karboksilnu i keto funkcionalnu skupinu; dijele se na: α -keto (npr. pirogroždana i glikolna), β -keto kiseline i γ -keto kiseline.

KIK (CEC = Cation Exchange Capacity) - ukupan potencijal tla za adsorpciju kationa; kationski izmjenjivački kapacitet tla; izražava se u $\text{cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$ (ili $\text{meqV}/100 \text{ g tla}$), a iznos mu je proporcionalan sadržaju gline i humusa u tlu; visok KIK korespondira s visokom moći sorpcije kationa.

kinetička energija - energija koju tijelo ili čestica ima zbog svog gibanja; energija koja pokreće čestice u pravcu manje koncentracije; kinetička energija (tijela m i brzine v) je:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

kisela tla - tla čiji je $\text{pH-H}_2\text{O} < 6,5$.

kiselina - spojevi s jednim (jednobazične) ili više atoma vodika (višebazične) koji se mogu zamjenjivati s atomima metala pri čemu nastaju soli; jake kiseline u vodi potpuno disociraju (kloridna, nitrarna, sulfatna).

klasifikacija tala - dogovorna sistematizacija tala u grupe ili kategorije prema njihovim svojstvima; postupak sistematskog grupiranja i razvrstavanja pojedinih tala prema morfološkim, kemijskim i fizikalnim značajkama; pedotaksonomija ili sistematika tala.

klimaks - prirodni ekosustav čiji se sastav vrsta značajno ne mijenja u duljem vremenskom periodu (200-500 god.) naziva se *zreo ekosustav* ili *klimaks zajednica*; posljednji stadij sukcesije.

klimaks vegetacija - prirodni ekosustav čiji se sastav vrsta značajno ne mijenja u duljem vremenskom periodu (200-500 god.); zreo ekosustav.

klimat - prosječni vremenski uvjeti nekog područja u dužem razdoblju (najčešće više od 70 godina).

kloridi - soli klorovodične (solne) kiseline koja s metalima gradi soli kloride.

kloroza - svijetla boja lišća ili dijelova lista uslijed nedostatka klorofila (simptom nedostatka esencijalnih elemenata).

kohezija - privlačna sila između spojeva ili molekula (krutih ili tekućih).

koloidi - disperzni dvofazni ili polifazni sustavi u kojima krutu fazu predstavljaju vrlo fine čestice (<2 μm) suspendirane u tekućem mediju; koloidna otopina je sol, a koagulirana forma gel.

koloidna frakcija tla - čine ju sekundarni minerali (glina) i humus.

koluvij, koluvijalna tla - zemljišni materijal, sa ili bez skeleta, koji se procesima erozije vodom, vjetrom ili gravitacijom neprekidno nagomilava u podnožju uzvišenja (brežuljci, brda, planine); nerazvijena koluvijalna tla.

komensalizam - ekološki izraz za odnos organizama u kojem jedan ima koristi, a drugi nema niti štete, niti koristi.

kompeticija - borba dvije vrste organizama za isti ekološki faktor, npr. element ishrane, svjetlost i dr.

kompjutorska simulacija - matematički model implementiran na kompjutoru u nekom od programskih jezika predstavlja "računarni pokus", a kompjutorsko izvođenje takvog pokusa označava se pojmom kompjutorska simulacija.

kompleksna gnojiva - gnojiva čiji kation i anion sudjeluju u ishrani biljaka (npr. KNO_3 , $NH_4H_2PO_4$, itd.) kao i kompozicije različitih soli koje sadrže dva ili tri osnovna hranjiva elementa (NP, NK, PK i NPK).

kompost - razloženi biljni i životinjski ostaci do stabilne organske forme, ponekad pomiješani s mineralnim gnojivima; C:N omjer je tipično 10:1.

kompostiranje - biodegradacija različitih krutih organskih ostataka, obično aerobna i termofilna koja rezultira stabilnom organskom tvari uz izdvajanje CO_2 , vode i minerala.

koncept zemljište - multidisciplinarna kvantitativna determinacija i analiza produktivnosti zemljišta, koje za razliku od tla, obuhvaća vegetaciju, hidrologiju, fiziografiju, infrastrukturu, klimu itd.

kondicioneri tla - aditivi tlu za poboljšanje pojedinih svojstava; poboljšivači tla; dodaci tlu za smanjivanje erozije, povećanje termičkih, vododržnih, adsorpcijskih i drugih svojstava tla.

konduktivitet - električna provodljivost tla; mjera topljivih soli u tlu; opći pokazatelj razine makro- i mikrohraniva u tlu.

konglomerat - sedimentna stijena sastavljena pretežno iz sferičnih dijelova/oblutaka.

konkrecija - mala, tvrda lokalna koncentracija materijala kao npr. kalcita, gipsa, željeznog ili aluminijevog oksida, obično sferična ili subsferična, ali može biti i nepravilnog oblika.

konsolidacija - izraz se obično odnosi na kompaktne ili cementirane stijene.

konstituent – sastavnica.

kontaminacija, kontaminant - onečišćenje; polucija; kemijski ili fizikalni onečišćivač, nečistoća u primarnom materijalu.

kontrola plodnosti tla - sustavno prikupljanje svih relevantnih fizikalno-kemijskih podataka o tlu (uključujući klimu) i njihovo korištenje za potrebe gnojidbe i kondicioniranja tla doprinosi efikasnijoj uporabi mineralnih i organskih gnojiva, uklanjanju akutnih deficita hraniva, kemijskoj i fizikalnoj popravci tla, smanjenju ekološkog opterećenja, ekonomičnijoj proizvodnji, odnosno očuvanju i podizanju efektivne plodnosti tla čime su prirodni viši i stabilniji, te manje podložni promjeni uslijed različitih vremenskih prilika.

konvekcija - prijenos energije strujanjem (npr. zagrijanog, lakšeg zraka).

konvencionalan - standardan; uobičajen; tradicionalan.

konzistencija - stanje tla ovisno o sadržaju vlage, a određeno je intenzitetom djelovanja kohezije i adhezije; stanja konzistencije tla su: koherencija, zbijenost, ljepljivost, plastičnost.

koordinacijska veza - kemijska veza atoma ili atomskih grupa na središnji atom ili ion pomoću glavnih (kovalentnih) i sporednih ionskih (koordinativnih) valentnih veza.

koordinacijski broj - broj liganda u kompleksnom spoju.

kovalentna veza - veza između dva atoma preko zajedničkih parova elektrona, veza između neutralnih atoma nemetala i u organskim spojevima.

kremen, kvarc - silicij-dioksid SiO_2 ; glavni sastojak pijeska.

kriptovegetacija - mirovanje ili vrlo nizak metabolizam biljaka na niskim temperaturama bez posljedica u nastavku vegetacije; latentan život; većina ozimih kriofilnih biljaka zaustavlja disanje na -10°C , premda ozima raž izdrži -30 , pšenica -20 , a repa samo -7°C .

kristali, kristalizacija - tvari geometrijski pravilnih oblika kao posljedica pravilnog unutarnjeg poretka čestica (iona, atoma ili molekula); kristalni oblik karakterističan je za minerale; proces tvorbe kristala.

kristaloni - zbirno ime gnojiva koja su u potpunosti otapaju u vodi (ne sadrže balast), koriste se u fertigaciji i kemigaciji.

krška topografija - neregularna površina u vapnenačkoj regiji s izraženim dolinama i podzemnim tokovima vode.

kutikula - tanak (1-13 μm), zaštitni sloj stanica na površini lišća građen iz matriksa koji čini kutin (polimer) u koji je ugrađen kutikularni vosak (ugljikovodici dugog lanca, alkoholi, masne kiseline i esteri), a na površini je sloj hidrofobnog epikutikularnog voska sličnog sastava.

kvaliteta tla - analitičko-kvantitativna svojstva tla s posebno definiranom vezom na funkcije kvalitete tla.

kvartar - period geološkog vremena nakon tercijara koji uključuje pleistocen i holocen (2.000.000 god. od sadašnjosti unazad).

LAI - LAI = *Leaf Area Index* = m^2 lista po m^2 površine tla; indeks lisnatosti.

lako tlo - tla srednje grube strukture; tla laka za obradu.

lapor - klastična sedimenta stijena promjera zrna $<0,002$ mm; smjesa gline (25-75%) i kalcita (rjeđe dolomita).

laterizacija - formiranje laterita ili crvenih i žutih tropskih i suptropskih tala.

les, prapor - eolski praškasti depozit (0,01-0,06 mm), potječe iz aridnih regija, a nastao je tijekom glacijacija; pretežno svijetlo žute boje; sadrži do 35% CaCO_3 .

ligand - molekule ili ioni koji imaju slobodne elektronske parove, a s centralnim metalnim ionom vezuju se u kompleks (s jednim potencijalnim donatorom elektrona su monodentatni, a s više polidentatni ligandi); kelatni ligandi su polidentatni ligandi koji posve obuhvaćaju centralni atom.

lignin (lignen) - složen kemijski spoj koji najčešće potječe od drveta, a sastavni je dio sekundarne

stanične stjenke biljaka; jedan od najzastupljenijih organskih polimera, vrlo heterogene građe i bez definirane osnovne strukture; necelulozni polisaharid; organska tvar otporna na dekompoziciju; koeficijent humifikacije >75%.

lipidi - masti, ulja, voskovi, fosfolipidi i steroidi; netopljivi su u vodi, a topljivi u organskim otapalima; glavne uloge: 1. uskladištenje energije, 2. izgradnja bioloških membrana i 3. prijenos signala između stanica.

litosfera - (grčki lithos = stijena + sphaera = sfera); stjenoviti površinski Zemljin pokrivač debljine 10-70 km koji čini više od 2.000 različitih minerala.

lizimetar - aparatura smještena u tlo za mjerenje perkolacije vode i ispiranja hraniva.

Loewov zakon - antagonizam Ca i Mg; omjer Ca/Mg.

luksuzna ishrana - prekomjerna ishrana, uglavnom dušikom koja rezultira intenzivnim porastom vegetacijskih organa uz modrozelenu boju lišća te više negativnih posljedica., npr. strna žita jače busaju, formiraju preveliku masu lišća, slabe su mehaničke čvrstoće i velike mase pa lako poliježu, biljke su neotporne na bolesti i sušu te kasnije sazrijevaju.

magmatske stijene, eruptivne ili vulkanske stijene - stijene formirane hlađenjem magme: a) efuzivne stijene – nastale izlivanjem i hlađenjem lave na površini Zemljine kore; b) intruzivne stijene –nastale sporom kristalizacijom u unutrašnjosti litosfere.

makroagregati - strukturni elementi tla promjera >0,25 mm.

makroelementi - C, O, H, N, P, K, S, Ca, Mg i Fe; koncentracija se izražava u postotku na suhu biljnu tvar (>0,1%).

makroergijska veza - kemijska veza bogata energijom (≥ 30 kJ·mol⁻¹, npr. ATP).

makrofauna - organizmi koji žive u tlu, duljine između 2 i 20 mm (dulji od 20 mm ponekad se nazivaju megafauna).

makropore - pore >100 μ m u promjeru.

mal - smjesa usitnjenog mineralnog i organskog materijala nastala uglavnom djelovanjem gujavica.

malč (mulch) - poseban površinski horizont/presvlaka iz prirodnog anorganskog ili organskog, odnosno sintetskog materijala; prikladan privremeni zaštitni sloj iznad tla s namjenom poboljšanja mikroklimatskih uvjeta, spriječavanja erozije, smanjivanja evaporacije, kontrole korova i dr.

malčiranje - postavljanje malča na površinu tla.

management hraniva - upravljanje količinom, izvorima, mjestom primjene, oblikom i vremenom aplikacije biljnih hraniva i promjenama u tlu; podrazumijeva bilancu hraniva (input i output), procjenu statusa i utvrđivanje gubitaka hraniva; predstavlja temelj integralne biljne proizvodnje i integralne gnojidbe bilja.

MAP - kompleksno mineralno gnojivo (amonijev dehidrogenfosfat = NH₄H₂PO₄) formulacije 12:52:0.

mass flow - transport hraniva konvekcijom (kretanjem vode) u tlu; strujanje ili konvekcija mase.

matični supstrat - a) relativno nepromijenjen materijal iz kojeg se formiraju gornji horizonti tla; b) rastresit nepovezan materijal od kojeg je nastao solum tijekom pedogenetskih procesa.

matriks - fini materijal (općenito <2 μ m) koji čini kontinuiranu fazu obuhvaćajući grublji materijal i/ili popunjava pore; povezujući materijal; osnovna supstanca nečega.

mazotine - mrlje različite boje i oblika nastale u tlu pod uvjetima djelomične anaerobioze.

mehanička, teksturna analiza tla - analitička metoda određivanja masenog udjela pojedinih frakcija mehaničkih (teksturnih) elemenata u tlu.

mehanički element (čestica) tla - svaka zasebna čestica čvrste faze tla: 1) skelet (šljunak i kamen promjera >2 mm); 2) krupni i sitni pijesak, 3) prah i 4) glina.

metabolizam - zbir svih biokemijskih reakcija stanice ili cijelog organizma uključujući katabolizam

(oslobađanje energije razlaganjem molekula) i anabolizam (sinteza složenih molekula).

metalna veza - veza između atoma metala koja rezultira kristalnom rešetkom pravilno razmještenih iona i atoma između kojih se kreću slobodni elektroni zbog čega su metali vodiči struje.

metaloide - polukovine; polumetali; čine prijelaz između metala i nemetala; bor (B), silicij (Si), germanij (Ge), arsen (As), antimon (Sb), telurij (Te) i polonij (Po).

metamorfne stijene - magmatske, sedimentne ili druge metamorfne stijene promijenjene djelovanjem temperature i/ili visokog tlaka.

mezofauna - mali organizmi tla, npr. crvi i insekti, duljine 100 µm do 1 mm.

mezoklima - prosječno stanje atmosfere manjih područja (šuma, ravnica, grad, jezero i dr.); pod utjecajem je topografije, ekspozicije, nagiba, barijera kretanju zraka (*mrazni džepovi*) i u manjoj mjeri zemljišnog pokrivača (golo tlo, trava i dr.), tipa tla i vlage u tlu.

micela - složena struktura koloidnih čestica (micela) koja omogućuje sorpciju na vanjskim i unutarnjim površinama pri čemu veličina unutarnjih prostora omogućava ulaz samo pojedinim ionima.

micelij - vegetativno tijelo mnogih gljiva u tlu, hife.

miješana gnojiva - mineralna gnojiva dobivena mehaničkim miješanjem krutih pojedinačnih gnojiva u praškastom ili granuliranom obliku.

mikoriza - simbiotska zajednica gljiva i viših biljaka u kojoj su hife gljiva invadirane (prodrle) u korijen i potpomažu usvajanje vode i hraniva; 1) infektivna (a) endomikoriza ili AM -arbuscular mycorrhiza i b) ektomikoriza) i 2) neinfektivna mikoriza.

mikovirus - virusi koji izazivaju infekciju gljiva.

mikroagregati - strukturni elementi tla promjera $\leq 0,25$ mm.

mikrobiološki - povezano s mikroorganizmima.

mikroflora - mali biljni organizmi vidljivi mikroskopom (alge, gljive, bakterije i dr.), duljine između 1 µm i 100 µm.

mikrognjiva - gnojiva koja sadrže mikroelemente; ≤ 500 g·ha⁻¹ aktivne tvari.

mikroklima - klima manjih područja, razlike su uglavnom uvjetovane reljefom ; fitoklima je mikroklima unutar vegetacije i ovisi o strukturi biljnog pokriva, visini biljaka, površini lista, gustoći i sklopu.

mikroelementi - B, Mn, Zn, Cu, Mo, Cl i Ni; koncentracija se izražava u mg kg⁻¹ (ppm) na suhu biljnu tvar (<0,1 % ili 100 mg·kg⁻¹).

mikroorganizmi, mikrofauna - mali životinjski organizmi vidljivi mikroskopom (protozoe, nematode i dr.) duljine između 1 µm i 100 µm (organizmi kraći od 1µm, uglavnom virusi, ponekad se označavaju kao nanofauna).

mikropore - pore promjera 5-30 µm.

mikroreljef - male razlike u reljefu kad je elevacijska razlika manja od 2 m.

miliekvivalent (meqv) - tisućiti dio ekvivalentne mase; cmol·kg⁻¹.

milorganit - prerađeni gradski otpad koji se dobiva djelovanjem mikroorganizama na organski dio gradskog otpada specijalnim postupkom u digestorima (prvo anaerobnom, a zatim aerobnom fermentacijom).

minerali - prirodni sastojci od kojih je izgrađena čvrsta Zemljina kora, fizikalno i kemijski homogeni pa im se sastav može izraziti kemijskom formulom, a odlikuju se pravilnom unutrašnjom građom.

mineralizacija - stupnjevana enzimatska konverzija organske tvari uz oslobađanje mineralnih elemenata ishrane; faze: a) aminizacija (Organska tvar \rightarrow R-NH₂ + CO₂ + produkti razlaganja + energija); b) amonifikacija (R-NH₂ + H₂O \rightarrow NH₃ + ROH + energija); c) nitrifikacija (2NH₄⁺ + 4O₂ \rightarrow

$2\text{NO}_3^- + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{H}^+$).

mineralna gnojiva - pretežito soli dobivene preradom prirodnih minerala, ali se proizvode i iz atmosferskog dušika; često se nazivaju i sintetička ili pogrešno umjetna.

mineralna hraniva - biljke usvajaju u mineralnom obliku; anorganski ioni, soli ili molekule; obuhvaćaju i mineralne oblike dušika (NO_3^- i NH_4^+) u kojem se dušik pretežito i usvaja, premda oni potječu iz organskih spojeva koji se mikrobiološkom dekompozicijom i mineralizacijom organske tvari transformiraju do mineralnih oblika.

mineralno tlo - tlo iz pretežito mineralnog materijala.

mineralogija - znanstvena disciplina koja istražuje minerale, njihov kemijski sastav, strukturalna i fizikalno-mehanička svojstva, oblik, unutrašnju građu i način tvorbe.

mobilizacija hraniva - svi procesi koji uzrokuju prijelaz nepristupačnih u raspoložive (pokretljive) oblike hraniva.

moć usisavanja vode - vodni potencijal (S), odnosno sila kojom biljka ili pojedina stanica može usvajati vodu.

moder - tip dekompozicije organske tvari i tvorba humusa koja rezultira nekompletnom humifikacijom u uvjetima dobre aeracije.

molekularna genetika - znanstvena disciplina koja proučava tok i regulaciju genetskih informacija između DNA, RNA i proteinskih molekula.

molekulska veza - veza između polarnih molekula (dipola) pravilno razmještenih u prostoru, neutralne molekule vežu se van der Waalsovima silama.

monitoring - sustavno praćenje stanja okoliša.

monokotiledone - biljke jednosupnice.

monokultura - sjetva istog usjeva u višegodišnjem razdoblju na istoj površini.

montmoriloniti (smektiti) - sekundarni minerali građeni iz dva sloja tetraedara silicija između kojih je umetnut jedan sloj oktaedara aluminija pa se ubrajaju u tip sekundarnih minerala 2:1, lako bubre gubitkom vode se skupljaju, specifična površina im je $700\text{-}800\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$.

mor - površinski organski materijal kisele pH reakcije nastao akumulacijom lišća u šumi.

mramorizacija - rđaste ili sive zone u pedološkom horizontu nastale pod utjecajem promjene oksido-redukcije.

mucilage, mucigel - korijenske želatinozne izlučevine veće molekularne mase; polisaharidi, poliuronske kiseline (20-50%) i ektoenzimi (kisela fosfataza, polifenol oksidaza i dr.).

mutagen - svaki agens ili proces koji izaziva mutacije.

mutualizam - ekološki izraz za pravu simbiozu (oba organizma od zajednice imaju korist).

nekonsolidiran - rastresiti; sipki, nestvrdnuti sedimenti.

nekroza - pojava mrtvih dijelova lišća ili drugih dijelova biljke kao posljedica manjka ili suviška elemenata ishrane.

nematode - izduženi, cilindrični nesegmentirani crvi, često paraziti biljaka, životinja i ljudi.

nepolarne molekule - hidrofobne molekule (odbijaju vodu), molekule teško topljive u vodi.

nepristupačna hraniva - biljna hraniva koja se nalaze u tlu ali ih biljke ne mogu usvojiti; lako ili teško mobilne rezerve hraniva u tlu.

nepristupačna voda - voda u tlu adsorbirana silom koja ne dopušta usvajanje (higroskopna voda) ili kemijski vezana voda.

neto produkcija - rast biljaka odvija se u funkciji vremena i ima općenito oblik S krivulje; prirast organske tvari ili neto fotosinteza.

neutralizam - ekološki izraz u kojem živi organizmi nemaju koristi jedan od drugog niti prouzrokuju štetu.

neutralno tlo - tlo čiji je pH 6,5-7,3.

niša - funkcionalna veza između pojedinog organizma i staništa.

nitratna redukcija - biološka redukcija nitrata do amonijaka u biljkama i mikroorganizmima; prvi stupanj redukcije do nitrita obavlja nitratna reduktaza (NRaza) u citoplazmi, a drugi dio nitritna reduktaza (NiRaza) u kloroplastima; NRaza je adaptivni enzim i za njegovu sintezu potrebno je prisustvo nitrata. Sadrži FAD, Mo i aktivnu grupu SH. Donor elektrona u procesu nitratne redukcije je NADH koji potječe iz procesa glikolize, a kod redukcije nitrata u korijenu egzistira nefotokemijski sustav.

nitifikacija - mikrobiološka oksidacija amonijaka u tlu do nitrata; vidi mineralizacija

nitrofos i nitrofoske - kompleksna gnojiva dobivena postupkom razlaganja sirovih fosfata dušičnom kiselinom; opća formula: $\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CaHPO}_4 + \text{KCl} \rightarrow \text{NPK}$ (nitrofoska); nitrofos ne sadrži kalij.

nitrogenaza - enzimski kompleks potreban za biološku fiksaciju N_2 ; sastoji se od dva proteina od kojih je prvi relativne molekularne mase oko 220.000-245.000 i sadrži željezo, molibden i sumpor $2 \text{ MoFe}_8\text{S}_6$, a drugi mase 50.000-70.000 s jednim atomom željeza.

N_{min} metoda - utvrđuje količinu mineralnih oblika dušika prije sjetve za proljetne kulture ili pred busanje i vlatanje za ozima žita.

nodule - nakupine bakterija roda Rhizobium, Sinorhizobium i Bradyrhizobium na korijenu leguminoza.

norveška salitra - mineralno gnojivo kalcijev nitrat, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; 13-16% N.

nukleoproteidi (nukleini) - bjelančevine sastavljene od nukleinskih kiselina i jednostavnih bazičnih proteina (histona).

obligatan - obvezan; biogen ili faktor bez kojeg je nemoguć život.

obligatno aerobni organizmi - organizmi koji za život zahtijevaju prisutnost kisika.

obligatno anaerobni organizmi - organizmi koji za život zahtijevaju odsutnost kisika.

obrađivo tlo - poljoprivredno tlo koje se obrađuje oranjem najmanje na dubinu 20-30 cm.

odron - pomak veće količine tla ili stijena niz nagib.

održivo korištenje tla - način korištenja tla s ciljem očuvanja ili povećanja njegovog produktivnog kapaciteta (plodnosti); Sustainable Land Use.

oglejavanje - redukcija željeza u anaerobnoj sredini uz nastanak sive ili plave boje; uvjeti u tlu koji rezultiraju gleizacijom koja se manifestira neutralno sivom, plavkastom ili zelenkastom bojom horizonta ili pojavom takvih površina (mrlja ili crta).

oksidacija - proces u kojem dolazi do oslobađanja energije uz uklanjanje elektrona iz tvari; u živim organizmima općenito se uklanja vodik (ponekad uz spajanje s kisikom); kemijski i/ili biološki proces vezanja ugljika i kisika uz nastanak CO_2 .

oksidacijski broj - oksidacijski stupanj, oksidacijsko stanje; broj elektrona koji treba dodati ili oduzeti da se element vrati u elementarno stanje, npr. u CaCl_2 za Ca = +2, a za Cl = -1.

oksidoredukcija - reakcija u kojoj je oksidacija jedne tvari (gubitak elektrona) vezana za istovremenu redukciju druge (prijem elektrona).

oksidoreduksijski uvjeti - vidi redoks potencijal tla; $E_h \geq +300$ mV (aerobna respiracija), $E_h = +100$ do $+300$ mV (fakultativna aerobna respiracija, redukcija nitrata i Mn^{4+}), $E_h = 100$ do $+100$ mV (fakultativna anaerobna respiracija, redukcija Fe^{3+}), $E_h = 200$ do -100 mV (anaerobna respiracija, redukcija sulfata) i $E_h \leq -200$ mV (anaerobna respiracija, nastanak metana).

ontogeneza - kratka rekapitulacija filogeneze; rast i razvitak jedinke kroz njen život; ontogenija.

operon - genski klaster (gen) čija je ekspresija kontrolirana jednim promotorom.

organometalni kompleksni spojevi - kelati (sinonimi: chelate, šelati, helati); vrlo pogodan oblik biljnih hraniva jer tako vezani teški metali ne sudjeluju u drugim kemijskim reakcijama koje ih

mogu prevesti u teže ili nepristupačne oblike, ne ispiru se iz rizosfere, a biljke ih lako usvajaju korijenom i listom.

organska gnojiva - vrlo raznolika skupina koja obuhvaća uglavnom različite otpatke biljnog i životinjskog podrijetla; stajnjak, gnojovka, gnojnica, komposti, bihugnoj i dr.; sintetska organska gnojiva, npr. urea.

organska tla - tla čiji je dominantan sastav organska tvar; obično se misli na tresetišta; vidi histosol.

organska tvar - općenito dio tla koji uključuje živu i mrtvu mikrofloru i mikrofaunu, djelomično razgrađene dijelove biljnog i životinjskog tkiva i humus; ugljikovi spojevi u tlu (isključujući karbonate); primarno sadržaj humusa u tlu.

organski - tvar koja uključuje vezu između dva ili više ugljikovih atoma.

organski dušik - dušik u organskoj tvari.

organski kontaminant (onečišćivač) - sintetski organski ostaci u tlu (pesticidi, poliklorirani bifenili=PCB, i dr.).

oroografija - izgled terena obzirom na nadmorsku visinu; reljef.

osmotski potencijal - dio ukupnog potencijala vode tla ovisan od koncentracije otopljene tvari.

osmotski tlak (OT) vodene faze tla - ovisi od koncentracije iona u vodenoj fazi tla (100 do 1000 ppm), prosječno 0,34 bar; $OT_{\text{bar}} = 0,36 \cdot EC \text{ (dS m}^{-1}\text{)}$; hranjive otopine u hidroponima imaju OT između 0,5 i 1,5 bar; izravno je proporcionalan broju čestica u jedinici zapremine.

osmoza - prolazak (difuzija) vode kroz polupropusnu (semipermeabilnu) membranu u cilju izjednačavanja koncentracije otopine.

paleo-tla - jako stara tla; tla prekrivena mlađim sedimentima (najčešće u pleistocenu ili holocenu), što je usporilo ili potpuno zaustavilo dalji razvitak tla.

parazitizam - ekološki izraz za odnos dva organizma u kojem jedan živi na račun drugoga (u organizmu ili na njemu te uzima od njega metabolite).

partenokarpija - zametanje i razvoj ploda bez oplodnje; plodovi bez sjemena.

pasivno usvajanje hraniva - temelji se na fizikalnim zakonima difuzije i osmoze, odnosno odvija se bez utroška energije.

patogen - organizam, većinom mikroorganizam uključujući viruse, bakterije, gljive i druge životinjske parazite i protozoe, sposoban za infekciju i izazivanje bolesti domaćina.

PCB - poliklorirani bifenili; klasa kloriranih aromatskih hidrokarbonata termički i kemijski vrlo stabilnih i dokazano karcinogeni.

ped, makrostrukturni - jednostavni, pojedinačni, granularni ili prizmatični agregat tla.

pedogenetski procesi - skup svih transformacija i premještanja mineralne i organske tvari, te energije u procesu nastanka tla (soluma), a zatim daljnjim odvijanjem u tlu upravljaju njegovom evolucijom.

pedogeneza - prirodan proces nastanka tla.

pedologija - znanost o tlu; tloznanstvo; uključuje sastav, distribuciju i genezu tla.

pedološka karta tla - geografska karta koja pokazuje tipove tla i/ili druge podatke o tlu koji korespondiraju s tipom tla; detaljna (1:10000 do 1:25000) itd.

pedološki profil - presjek tla kroz sve horizonte sve do matičnog supstrata.

pedološko kartiranje - znanstveno-stručna inventarizacija tala i sistematizacija jedinica tala ili zemljišta.

pedosfera - dio Zemljine kore u kojem se odvijaju pedogenetski procesi (nastanak tla).

pedoturbacija - biološko i fizikalno miješanje, odnosno homogeniziranje tla.

peptizacija - prijelaz koloida iz stanja gela u stanje sola, u tlu uz raspadanje agregata tla.

perenijalan - rast koji se nastavlja iz godine u godinu; višegodišnji rast.

perkolacija - vertikalno ili lateralno premještanje vode kroz tlo do razine podzemne vode; potpuna infiltracija.

permeabilno – propusno.

permeaze - proteini male molekularne mase (~30.000 kDa) koji omogućuju usvajanje aniona olakšanom difuzijom.

perzistentna tvar - tvar koja se teško razgrađuje; tvar čiji su ostaci u prirodnom okruženju u dužem periodu prisutni/aktivni.

pH - negativan dekadski logaritam aktiviteta H^+ iona u otopini ($pH = -\log[H^+]$); stupanj kiselosti ili alkalnosti tla u granicama 2-10;

- aktualni pH (mjeri se elektrometrijski u vodenoj suspenziji tla)
- izmjenjivi pH (mjeri se elektrometrijski u 1 M suspenziji KCl)
- Hidrolitska kiselost (H_y =potencijalna kiselost).

pHBC - puferni kapacitet protiv zakiseljavanja (pHBC ili ANC = Acid-neutralizing capacity); kemijske reakcije koje do neke mjere mogu neutralizirati promjene pH u tlu.

pijesak - mineralni dio tla promjera čestica 2-0,02 mm (USDA 2,0-0,05 mm).

pirogeni minerali - svi minerali koji kristaliziraju iz lave, odnosno magme.

pješčenjak - vezana, pretežno slojevita klastična stijena nastala cementacijom pijeska.

plagioklimaks - biljna zajednica koja se održava kontinuirano uslijed specifičnog antropogenog djelovanja (npr. pašnjaci, požarišta.)

plan managementa hranivima - odnosi se na management organskim gnojivima, a primjenjuje se s ciljem minimiziranja neželjenih efekata gnojidbe na okoliš, optimizacije produkcije i povećanja profita jednog poljoprivrednog gospodarstva ili čitave regije.

plastičnost - vlažno ili suho tlo koje se može svinuti bez prijeloma; sposobnost tla za modeliranjem (deformacijama) bez lomljenja.

plazma tla ili "krv tla" - vodena faza tla nakon razgradnje svježe organske tvari iz koje se sintezom "de novo" obrazuje plazma tla tekuće konzistencije; sadrži proteine, soli, druge razložene organske fragmente i krute čestice u vodi (analogno pravoj krvi).

plazmalemata - plazmatska stanična membrana lipoproteidske građe, debljine ~10 nm; važne za selektivno usvajanje iona i transfer tvari u tkivima živih organizama.

pleistocen ili diluvij - period nakon pliocena (geološko razdoblje kvartara); period između 2.000.000 do 10.000 god. prije sadašnjosti; u Europi 4 ili 5 perioda intenzivnog zahlađenja - glacijacija, između njih otopljenja – interglacijacije.

plodnost tla - stanje tla u odnosu na bioraspoloživost esencijalnih elemenata ishrane.

pluvial - geološki period s velikim oborinama.

pneumatogeni minerali - minerali nastali kristalizacijom iz plinova i para.

podzolizacija - formiranje podzola koje obuhvaća kiselu hidrolizu i destrukciju aluminosilikatne jezgre, stvaranje kelata i migraciju željeza, aluminija i humusa u iluvijalni horizont uz nakupljanje silicija u eluvijalnom horizontu.

pokorica - redistribucija površinskih čestica uslijed jakih oborina (pljusak) uz nastanak kompaktnog površinskog zbijenog sloja.

pokrovni usjevi - imaju funkciju "pokrivača tla" s namjerom sprječavanja erozije (vodom ili vjetrom) i ispiranja hraniva, prije svega nitrata (često se nazivaju i „usjevi hvatači” ili „catch crops”; mogu biti jednogodišnje, dvogodišnje ili višegodišnje zeljaste biljke, često i više vrsta biljaka združenih sjetvom; pokrovni usjevi uzgajani ljeti uglavnom imaju namjenu siderata.

polarizirane tvari - tvari koje imaju sposobnost polarne sorpcije zbog suprotnog ili neravnomjerno raspodijeljenog naboja; dipoli = polarne molekule.

polder - ratarske površine ili pašnjaci u Nizozemskoj dobivene isušivanjem dijelova mora ili jezera.
poliploidija - genetska anomalija; posjedovanje više od dva potpuna seta kromosoma.

polutant - proizvod, antropogeni (proizvodiljske aktivnosti) ili prirodni (npr. vulkanska erupcija) koji onečišćuje okoliš (atmosfera, tlo i vodu).

poljski kapacitet vlažnosti - ukupna vlaga preostala u dobro dreniranom tlu nakon njegove saturacije vodom; retencijski kapacitet tla za vodu; kapilarna voda ili kapilarni kapacitet tla (33 kPa, odnosno 0,33 bara za glinasto-ilovasta tla, a 10 kPa za pjeskovita tla).

popravke tla - kondicioniranje; primjena kondicionera za popravljivanje kemijskih, fizikalnih i bioloških svojstava tla; restauracija degradiranih površina nastalih erozijom, rudokopima ili čišćenjem tla.

pore - diskretni prostori u tlu popunjeni zrakom ili vodom.

porozitet - dio volumena tla ispunjen porama ili većim prazninama; izražava se u postotku.

posredna gnojiva - neizravna gnojiva; sadrže biogene elemente, ali u kemijskom obliku koje biljke ne mogu odmah usvojiti (npr.: humus, vapno i dr.) te utječu posredno (npr. potiču mikrobiološku aktivnost, neutraliziraju kiselost, djeluju preko poboljšanje strukture tla i dr.) ili direktno nakon mikrobiološke ili kemijske transformacije.

potencijal hraniva - koncept koji bioraspoloživost hraniva objašnjava parcijalnom energijom svake komponente unutar ravnotežnog sustava tla (tekuća - čvrsta faza), odnosno njenim kemijskim potencijalom.

potencijal vode u tlu (PSI) - negativan tlak vode ili tenzija vlažnosti (1 bar = 15 PSI); čista voda ima PSI = 0.

površinsko otjecanje - otjecanje dijela oborinske vode s nagnute površine koju tlo ne može upiti (runoff).

prah - mineralni dio tla (mehanički element tla) promjera čestica 0,02-0,002 mm (USDA 0,05-0,002 mm).

pravilo opadajućeg prirasta priroda - povećanjem doze gnojiva raste visina priroda, ali je porast sve manji u odnosu na povećanje količine hraniva.

precipitacija - taloženje; proces taloženja često se događa u otopinama pri čemu nastaje talog diskretnih čestica.

precipitat - mineralno gnojivo $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; sekundarni kalcijev fosfat (kalcijhidrogenfosfat); do 40 % P_2O_5 topljivog u 2 % limunskoj kiselini.

precizno ratarenje (Precision Agriculture) - moderna biljna proizvodnja koja koristi visoko precizne i znanstvene metode u biljnoj proizvodnji (komputeri, GPS, GIS, daljinski EM senzori za procjenu pojedinih svojstava tla, mjerenje prinosa kod berbe/zetve i dr.).

prenositelji (carrier) - organske molekule koje se vežu s ionima i u obliku nastalog kompleksa putuju od vanjske do unutrašnje strane membrane; aktivno usvajanje hraniva.

primarna hraniva, glavni elementi ishrane - N, P i K.

primarna organska produkcija - proces fotosinteze; autotrofni organizmi su primarni organski proizvođači, odnosno zelene biljke transformiraju neorgansku (neživu) tvar u organsku (živu) potrebnu svim živim bićima na Zemlji koristeći energiju Sunčeve radijacije; proces primarne organske produkcije, osim organogenih elemenata (C, O i H), zahtijeva i više mineralnih elemenata.

primarni minerali - a) neizmijenjeni minerali tla, izvorno magmatske stijene; b) svaki mineral koji čini matičnu stijenu ili matični supstrat iz kojeg je nastalo tlo; prosječno 80% krute faze tla.

priming efekt - poticajni efekt; kod unošenja svježije organske tvari (npr. žetvenih ostataka) raste mobilizacija dušika i iz postojane, teško razložive organske tvari, npr. humusa i efikasnost usvajanja dušika.

- prioni - proteinske infektivne čestice izazivači BSE (kravljeg ludila).
- prividno slobodan prostor korijena - vidi apoplast.
- produžni učinak gnojiva - djelovanje gnojiva tijekom jedne cijele ili kroz više vegetacija/godina; sporodjelujuća gnojiva također djeluju produžno ali na drugačiji način (omotačem granula, dodatkom inhibitora mikrobiološke aktivnosti, posebnim kemijskim postupcima i dr.).
- profil tla - vertikalni presjek tla od površine do matičnog supstrata ili relativno nepromijenjenog sloja; služi za utvrđivanje endomorfoloških svojstava tla.
- prokarioti - primitivni organizmi bez jedarne membrane.
- protoplast - kompletna živa stanica kojoj je uklonjena vanjska (stanična) membrana.
- protoplazma - živi sadržaj stanice unutar plazmaleme (jedro, citoplazma, organele, citoplazmatski retikulum).
- protozoa - jednostanični, eukariotski mikroorganizmi (npr. amebe, flagelati, ciliati) koji se hrane bakterijama, virusima ili česticama organske tvari.
- pseudomorf - mineral čiji vanjski izgled sliči drugom mineralu ili objektu s kojim se može lako zamijeniti.
- pseudoglejavanje - specifična tvorba sivih i rđastih mikro zona tla koje se izmjenjuju s mazotinama i eventualno konkrecijama kao rezultat alternacije mokre i vlažne faze stagnirajuće vode.
- pufer - supstanca koja sprječava brzu promjenu pH tla (uključuje glinu, humus, karbonate i dr.).
- putrefakcija - nastanak metana, formaldehida, hidrogen sulfid, fosfina i dr. u tlu u nepovoljnim uvjetima (suvišak vode, anaerobioza) kad su prvi razarači organske tvari u procesu humifikacije anaerobne bakterije.
- radijacija - prijenos energije u okolni prostor zračenjem.
- rajonizacija - geografsko područje (agricultural region) koje karakteriziraju slična zemljišna, klimatska i druga svojstva neophodna za uspješan uzgoj, npr. vinove loze; kriteriji rajonizacije mogu biti klimatski, zemljišni, ekonomski, tradicijski i dr.
- raspoloživa voda - dio vode tla koji može biti usvojen korijenom biljaka; voda vezana u tlu silom od 1/10 do 15 bara; raspoloživa voda = (sadržaj vode u tlu - točka uvenuća) × dubina korijena.
- raspoloživi element - općenito element koji biljke mogu usvojiti iz tla; element koji se nalazi u tlu u vodotopljivoj ili izmjenjivo vezanoj formi, a ujedno je u zoni korijena ili se može uskoro premjestiti u nju.
- razina podzemne vode - gornja površina podzemne vode.
- recentan - mlad, nov.
- recentna tla - tla koja se razvijaju u skladu sa sadašnjom konstelacijom (kombinacijom) pedogenetskih faktora. Po stupnju razvoja mogu biti mlada tla, evolucijski jače razvijena ili u klimaks stadiju (postignuta dinamička ravnoteža u skladu sa sadašnjom konstelacijom faktora).
- red tla - U.S. klasifikacija tala sadrži 11 redova: 1) Entisols, 2) Inceptisols, 3) Spodosols, 4) Ultisols, 5) Alfisols, 6) Vertisols, 7) Oxisols, 8) Histosols, 9) Andisols, 10) Aridosols, and 11) Mollisols.
- redoks potencijal tla - elektromotorna sila (Eh); u tlu između +700 mV (suvišak elektrona, oksidacijski uvjeti) i -300 mV (manjak elektrona, redukcijski uvjeti); redoks potencijal: $pE = -\log[e^-]$.
- redukcija - procesi u kojima elementi ili tvari primaju elektrone u kemijskoj reakciji; potencijal redukcije (vidi Eh) mjeri se u mV.
- reduktivni uvjeti - anaerobni uz nizak pH.
- regolit - nekonsolidirani površinski sloj raspadnutih stijena na čvrstoj podlozi.
- reliktna tla - tla sa značajkama prijašnjih konstelacija pedogenetskih faktora i procesa čija su svojstva vidljiva po profilu, npr. černozem.

respiracija – disanje.

restriktivni horizont - horizont u tlu koji ograničava vertikalno kretanje vode i zraka ili sprječava prodor korijena u tlo.

retencija vode - vododrživost tla; funkcija teksturne klase tla, ali i velikog broja drugih parametara, npr. zbijenost tla, prisutnost nepropusne zone, nagib tla, visina podzemne vode, homogenost soluma itd.

retrogradacija fosfora - transformacija primarnih fosfata iz gnojiva u tlu, koji su potpuno topljivi u vodi, preko sekundarnih, topljivih u slabim kiselinama do tercijarnih fosfata koji su s aspekta ishrane bilja zanemarljivi jer su topljivi samo u jakim kiselinama.

reutilizacija i remobilizacija - premještanje tvari/elemenata ishrane iz starijih u mlađe, aktivnije organe biljaka nakon hidrolize organske tvari (remobilizacija) i transporta do mjesta resinteze (retranslokacija); pokretljivi (N, P, K, Mg, Cl, Mn) i nepokretljivi elementi (Ca, S, Fe, Cu, Zn, B, Mo).

rizosfera - dio tla koje prožima korijen sa specifičnom biološkom i mikrobiološkom populacijom (rizoflora i rizofauna).

rotacija usjeva - smjena različitih usjeva na istoj površini po unaprijed poznatoj smjeni; plodored

rubifikacija - ocrveničenje; dehidracija željeza i tvorba kambičnog horizonta.

sadržaj vlage u tlu - masa vode koja se sušenjem na 105 °C ukloni iz tla; minimalna vlaga tla potrebna za biološku aktivnost je 12-15%.

salinizacija - pedogenetski proces potpomognut akumulacijom lakotopljivih soli u dijelovima profila tla karakterističan za područja aridne ili semiaridne klime; nastajanje zaslanjenih tala (solončak).

saturacija bazama - popunjenost KIK-a baznim kationima u postotku.

saturirano tlo - tlo čije su sve pore kroz cijeli profil ispunjene vodom.

Schulze-Hardy zakon - disperzija (deflokulacija) aglomeriranih čestica gline, odnosno strukturna degradacija to je jače izražena što je valentnost kationa viša.

sedimentne, taložne stijene - stijene nastale iz sedimenata različitog stupnja konsolidacije uključujući pješčenjake, konglomerate, neke vapnence i sl.; stijene nastale taloženjem u vodi ili na kopnu: a) klastične (mehaničke) – taloženjem čestica pod utjecajem gravitacije, b) kemijske – taloženjem koje je posljedica kemijskih reakcija u vodi i c) organogene – taloženje ostataka životinjskih i biljnih organizama.

sekundarna hraniva - Ca, Mg i S.

sekundarni minerali - minerali nastali trošenjem primarnih minerala, većinom minerali gline i različiti oksidi u tlu; približno 20% krute faze tla.

sekundarni simptomi nedostatka - naknadna, multipla pojava simptoma deficita ili suficita elemenata ishrane, a kod oslabljenih biljaka često dolazi do napada bolesti što dalje komplicira vizualnu dijagnostiku "maskiranjem" primarnog uzroka pojave simptoma.

sekvestracija C - fiksacija atmosferskog ugljičnog dioksida u biološkim (uglavnom fotosintetskim) ili fizičkim procesima.

sekvestren (sequestrene) - mikrognjivo koje sadrži mikroelemente u kelatnoj formi, npr.: sequestrene Fe-330 Fe (DTPA), sequestrene HFe-138 (EDDHA), Mn-EDTA; Zn-EDTA i dr.

selektivna sorpcija - specifična ili selektivna sorpcija je pojava zadržavanja iona u unutarnjim prostorima koloidne čestice; ioni unutar koloidne čestice mogu ostati "zarobljeni" nakon smanjivanja količine vodene faze pa dolazi do pojave koja se uobičajeno naziva fiksacija.

semipermeabilan - polupropusan, npr. polupropusna membrana sa selektivnom propustljivošću.

seskvioksidi - zajednički amorfnj oksidi željeza i aluminija; oksidi kod kojih je omjer metala i kisika 1:1,5 (npr. Fe₂O₃ ili Al₂O₃).

sideracija, siderati - zelena gnojdba; biljke za zelenu gnojdbu; unos (zaoravanje) svježe,

lakorazgradljive organske tvari u tlo (nakon cvatnje usjeva) s namjerom obogaćivanja tla hranivima.

silikati - stijene koje sadrže pretežno silicij; najznačajnija skupina petrogenih minerala čiju osnovu strukturne građe čine SiO_4 tetraedri, a odlikuju se velikom tvrdoćom, teškom topljivošću i taljivošću.

simbioza - dva organizma koja zajedno žive na uzajamnu korist, npr. gljive i alge u lišaju (individualni organizmi su simbionti).

simplast - unutarnji prostor stanica; put vode po simplastu je višestruko sporiji od kretanja po apoplastu jer svaka stanica pruža znatan otpor (procijenjen na 10 kPa).

simport - transport iona u parovima (kotransport ili simport) i uključuje različite ionske parove, npr. $2\text{H}^+\text{-Cl}^-$, $\text{Cl}^-\text{-H}^+$, $2\text{H}^+\text{-H}_2\text{PO}_4^-$.

simptomi deficita - kloroza i nekroza lišća te slab rast biljaka prouzročen nedostatkom esencijalnih elemenata ishrane; simptomi deficita hraniva ponekad mogu biti zamijenjeni za simptome suficita.

sinergizam - simultana akcija odvojenih procesa koji zajedno imaju veći efekt od zbira pojedinačnih efekata; ekološki izraz za zajednicu organizama koja komplementarno djeluje.

sink - uvirište; kapacitet za akumulaciju (sink) najviše ovisi o dostignutoj veličini biljaka ili pojedinih organa; suprotno je source = izvor.

sirovi humus - nepotpuno humificirana organska tvar koja sadrži djelomično razložene fragmente.

skor funkcija - krivulja kojom se rangira (boduje) intenzitet nekog indikatora, na skor funkciji se ističu tri kardinalne točke: minimum, optimum i maksimum; matematička funkcija (linearne ili nelinearna) kojom se procjenjuje utjecaj nekog parametra.

slano tlo - tlo smanjene plodnosti koje sadrži dosta topljivih soli.

solni udar - pojava znatnog porasta osmotskog tlaka kod unošenja većih količina mineralnih gnojiva u suho tlo što sprječava biljke da uzimaju vodu i hranjive tvari u njoj.

solum - dio tla iznad relativno nepromijenjenog materijala; u pedološkom smislu uključuje sve genetske horizonte tla bez matičnog supstrata.

sonda - alat za uzimanje uzoraka tla (pedološka, agrokemijska, ručna, hidraulička i dr.).

sondiranje - terensko uzorkovanje tla sondom pomoću karte (pedološke ili topografske) ili uz pomoć GPS uređaja.

sorpcija - zadržavanje tvari bez implikacije o vrsti mehanizma zadržavanja. Ovaj termin uključuje *adsorpciju*, *apsorpciju*, *taloženje (precipitaciju)* i *površinsko taloženje*.

specifična lisna površina (SLA) - površina lišća u $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ njegove suhe tvari.

spodični horizont - podpovršinski horizont karakterističan po akumulaciji aluminija (također i željeza) i organske tvari.

sporodjelujuća gnojiva - gnojiva, dušična i kompleksna, s produžim učinkom zbog sporog otpuštanja hraniva ili spore razgradnje u tlu.

stajnjak, stajski gnoj - smjesa različito razgrađenih čvrstih i tekućih izlučevina domaćih životinja i stelje (prostirke) koja služi za upijanje tekućeg dijela; sastav stajskog gnoja ovisi od vrste domaćih životinja, načinu njihove ishrane i vrste stelje, pa je kemijski sastav i uporabna vrijednost stajnjaka vrlo različita.

struktura tla - prostorni raspored teksturnih čestica (mehaničkih elemenata) tla vidljiv kroz stupanj i tip agregacije, izgled, veličinu i raspored pora tla.

subakvalna (subhidrična) tla - odjel tala koji obuhvaća pedosferne mase čiji se postanak i razvitak odvijaju pod plitkim vodnim pokrivačem stajaćica (plićaci jezera, bara i priobalja).

suho ratarenje - biljna proizvodnja u aridnim i semiaridnim uvjetima bez irigacije uz tehnike konzerviranja vlage u tlu (obrada, malč, kultivacija, uklanjanje korova i dr.).

superfosfat - mineralno gnojivo kalcijev dihidrogenfosfat, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4$; 16-19% P_2O_5 .
 supstratno inducirani enzim - enzim čija aktivnost raste s porastom koncentracije supstrata, npr. nitratna reduktaza (NRaza).

šljunak - nevezani klastični sediment izgrađen od krupnih zaobljenih fragmenata (valutica, oblutaka) istog ili različitog petrografskog sastava.

talk ili milovka - prirodni magnezijev silikat $\text{Mg}_3(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$; mineral metamorfnih stijena, najčešće u lističastim nakupinama; vatrostalni materijal često korišten u papirnoj i kozmetičkoj industriji.

talofite (tallophyta) - niže biljke koje imaju talus (nediferenciran oblik); bakterije, alge, gljive i lišaji.

tekstura; mehanički ili granulometrijski sastav tla - udio pojedinih čestica (% mase) u građi krute faze tla ovisno o njihovoj veličini.

teksturna svojstva tla - poroznost, sposobnost upijanja (sorptivnost) i provođenja vode (konduktivitet).

teksturni trokut tla - 3-fazna skala za determiniranje teksturne grupe tla.

tektonski - stjenovita struktura nastala pomjeranjem u Zemljinoj kori.

tenzija vlažnosti - sile koje vodu drže uz čestice tla, a s druge strane osmotski tlak vodene faze tla.

terasa - prirodni fenomen ili posebno konstruirana stepenasta površina nagiba zbog obrade, sprječavanja erozije, zadržavanja oborina i obrade tla.

tercijar - geološki period između 75 mil. i 2 mil. godina prije sadašnjosti.

termofilne bakterije - bakterije čija je optimalna aktivnost između 45° i 55°C .

ternarni kompleks - trojni kompleksi tla koji omogućavaju istovremenu polarnu adsorpciju kationa i aniona u tlu na dva načina: a) $\text{AK-O-M-A} + \text{H}^+$; b) $\text{AK-A-M} + \text{OH}^-$ (AK=adsorpcijski kompleks tla; M=metal; A=anion).

terroir - izvorno francuski izraz [тeррoаp] koji se koristi za označavanje posebnih geografskih, geoloških i klimatskih značajki nekog terena/lokacije; suština izraza je pretpostavka kako određeni lokalitet za uzgoj vinove loze ima jedinstven kvaliteta koji je specifičan za tu regiju; mudar vinogradar svakako razumije interakciju terena i kakvoće grožđa, odnosno vina.

teška tla - tla s visokim sadržajem gline; tla teška za obradu.

teški metali ili teške kovine - metali čija je gustoća $> 5 \text{ kg dm}^{-3}$; toksični elementi za ljude, životinje i biljke iznad određene koncentracije; Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn.

tinjci ili liskuni - minerali magmatskih, metamorfnih i sedimentnih stijena koji se kalaju u tanke listiće (npr. muskovit i biotit).

tip korištenja zemljišta - godišnji – usjevi, višegodišnji – nasadi, pašnjaci; suvremena tipizacija uzima u obzir biološke, sociološko-ekonomske, tehničko-tehnološke i druge aspekte koji su relevantni za promjene u produktivnosti zemljišta.

tlo -

- dinamičan, polifazan prirodni supstrat biljne ishrane građen iz krutog (mineralni ~95% mase) i organskog dijela (~5% mase), ukupno ~50% zapremine, tekuće (~25%), plinovite (~25%) i žive faze (nekoliko t ha^{-1});
- trošina stijena izmiješana sa organskom tvari i akumulirana na Zemljinoj površini (geološka definicija);
- trodimenzionalno dinamično prirodno tijelo, rastresit sloj Zemljine površine, izmijenjen zajedničkim djelovanjem pedogenetskih faktora (matični supstrat, klima, reljef, organizmi, vrijeme i čovjek).

točka trajnog uvenuća - postotak vlage u tlu kod kojeg nastupa nepovratno uvenuće biljaka.

točka venuća - postotak vlage u tlu pri kojem biljka više ne može usvajati vodu i vene, ali

dodavanjem vode biljke nastavljaju rast.

toksični elementi - Cr, Cd, U, Hg, Pb, As i dr.

toksičnost - nepovoljan biološki efekt prouzročen otrovima ili drugim tvarima

Tomasfosfat, Tomasovo brašno - mineralno sporodjelujuće fosforno gnojivo kalcijev fosfat (siliko-karnotit: $\text{Ca}_5[\text{SiO}_4(\text{PO}_4)_2]$); 8-14% P_2O_5 topljivog u 2 % limunskoj kiselini; sadrži još Ca-silikate, Mn, Cu i druge kovine.

transfer funkcija - funkcijska veza između pojedinih svojstava tla opisanih varijablama u odnosu na mjerljiva svojstva sustava.

transgene biljke - nove biljne vrste ili kultivari dobiveni introdukcijom strane DNA u biljno tkivo iz kojeg se regeneracijom (kultura tkiva) dobiju biljke koje sadrže stranu DNA i drugačija svojstva (željena, često uz neželjena).

translokacija - premještanje tvari s jedne na drugu lokaciju; premještanje zemljišnog materijala u otopini ili suspenziji iz jednog u drugi horizont tla.

transpiracija - gubitak vodene pare u atmosferu s površine živih biljaka koja podliježe regulaciji (puči).

trijas - geološki period između 190 mil. i 150 mil. godina prije sadašnjosti.

trostruki superfosfat, tripleks - mineralno gnojivo kalcijev dihidrogenfosfat bez gipsa, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$; 42-48% P_2O_5 .

UAN - mineralno gnojivo urea + NH_4NO_3 + voda, tekuće dušično gnojivo s $30 \pm 0.5\%$ N i $\text{pH} \approx 7$.

ubrzana erozija - erozija ubrzana ljudskim djelovanjem.

ukupni vodni potencijal tla - suma matriks, osmotskog, hidrostatskog, pneumatskog i gravitacijskog potencijala (prva dva su najvažnija).

ultramikroelementi - elementi u tragovima za koje još nije utvrđena fiziološka funkcija.

ultramikropore - pore čiji je promjer $< 5 \mu\text{m}$.

urea - mineralno gnojivo $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$; 46% N.

uređenje zemljišta - krčenje, čišćenje, zaštita od poplava, izgradnja sustava za navodnjavanje, odvodnja, ravnanje, terasiranje i dr.

vapnena ili karbonatna tla - tla koja sadrže dosta CaCO_3 pa tretman s HCl izaziva burno izdvajanje CO_2 .

vapno - kalcijev hidroksid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

vaskularno kretanje vode - kretanje vode kroz provodna tkiva, najčešće ksilem.

vegetacijski period - dio godine kad je temperatura tla iznad "biološke nule" što omogućava rast biljaka ($> 4^\circ\text{C}$).

vektor - životinja ili insekt prijenosnik organizama koji izazivaju bolest.

vermikultura - kompostiranje uz pomoć zemljišnih crva pod uglavnom aerobnim uvjetima; vermikompost.

volatizacija - plinoviti gubitak tvari u atmosferu.

volumna gustoća (ρ) - masa prirodnog tla po jedinici zapremine (g cm^{-3}); masa suhog tla u prirodnom stanju po jedinici volumena (g cm^{-3}).

vrednovanje zemljišta (bonitiranje) - ocjenjivanje pogodnosti zemljišta za određenu namjenu (Land evaluation) na temelju većeg broja indikatora pogodnosti (klimatskih, pedoloških, agrokemijskih, hidroloških i dr.); klasifikacija zemljišne pogodnosti („Land Suitability“) obično je u 5 klasa (prve 3 pogodne i 2 nepogodne za poljoprivredno korištenje).

waterlogging (vodolež) - zadržavanje vode iznad nepropusne zone tla uz štetne posljedice, pa i propadanje korijena; "zacementiran" (hardpan) podoranični sloj, osobito na na aluvijalnim terasama, koji sprječava infiltraciju vode ili plitak solum iznad čvrste stijene.

zaslanjivanje - proces akumulacije soli u tlu.

zbijanje - porast volumne gustoće tla kao posljedica mehaničkih sila (np. gaženja traktorom).

zdravlje tla - kapacitet specifičnih funkcija tla unutar prirodnog ili ograničeno uređenog ekosustava koji podržava biljnu i animalnu produkciju, održava ili povećava kvaliteta vode i zraka i potpomaže zdravlje i stanovanje ljudi.

zemljišna svojstva - pojedina svojstva (atributi) tla koja mogu biti jednostavna (npr. pH) ili složena (npr. retencijski kapacitet tla za vodu), a moraju biti mjerljiva (analizom, daljinskim mjerenjem i sl.) ili predvidljiva (npr. terenskim istraživanjem, proračunima itd.).

zemljište - geodetsko-tehnički ekvivalent za tlo; obuhvaća vegetaciju, geološko/orografsku, hidrolološku i klimatsku osnovu nekog područja; širi pojam od tla koje podrazumijeva samo supstrat biljne ishrane.

zemnoalkalne kovine, zemnoalkalni metali - elementi II-A grupe periodnog sustava (Be, Mg, Ca, Sr, Ba i Ra), dvovalentni kationi (oksidacijski broj +2), postojaniji i manje reaktivni od alkalnih metala, u prirodi se nalaze samo u obliku spojeva, hidroksidi zemnoalkalnih metala topljivih u u vodi (izuzev berilijevih), ali slabije od alkalnih metala.

zeoliti – natrijevi ili kalcijevi alumosilikati (rjeđe Ba, Sr i K-alumosilikati) vrlo velike adsorpcijske sposobnosti, primjenjuju se kao ionski izmjenjivači, kondicioneri tla za povećanje sorpcijske moći, kao dodatak stelji za vezivanje amonijaka, pročišćivači otpadnih i kanalizacijskih voda, te radioaktivnog otpada, za čišćenje dimnih plinova; za industrijske potrebe koristi se sintetski zeolit. zlatotopka - smjesa koncentriranih kiselina HCl i HNO₃ (3:1).

zreli kompost ili stajnjak - stabilan dobro fermentirani kompost/stajnjak; stajnjak ili kompost niskog sadržaja ugljika i visokog sadržaja bioraspoloživih hraniva.

živi malč - pokrovni usjev unutar godišnjeg ili višegodišnjeg usjeva ili trajnog nasada (međuusjev) koji donosi dobit; svrha je suzbijanje korova, smanjivanje ili sprječavanje erozije tla, uz povećanje plodnosti, zadržavanje vode i sprječavanje ispiranja lakopokretnih iona.

14. OPĆA LITERATURA

- Abrol, Y.P. (1990): Nitrogen in Higher Plants. Research Studies in Botany, Vol. 6. Research Studies Press LTD, Somerset, England. 492 p.
- Arnold, P.W. (1962): The Potassium Status of some English Soils Considered as a Problem of Energy Relationships. Proceedings No.72, The International Fertilizer Society, York, UK. 25-43.
- Arnon, D.I., Stout, P.R. (1939): The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiology*. 14(2): 371-375.
- Bergmann, W. (1983): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Entstehung und Diagnosen. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena.
- Chen, Y., Avnimelech, Y. (1986): The role of Organic Matter in Modern Agriculture. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 306 p.
- Driessen, P.M. (1986): The Q.L.E. primer. A first introduction to quantified land evaluation procedures. Lecture Notes for JO50-140 „Land Evaluation II“. Agricultural University Wageningen Centre for Food Studies. The Netherlands.
- Epstein, E. (1972): Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspective. New York, USA. John Wiley and Sons, Inc.
- Faller, N. (1972): Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff, nitrose Gase und Ammoniak als ausschließliche S-bzw. N-Quellen der höheren Pflanzen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 131: 120-130.
- FAO (1976): A Framework for Land Evaluation. *FAO Soils Bulletin* 32. Rome.
- FAO (1996): Agro-ecological Zoning Guidelines. *FAO Soils Bulletin* 73. Rome.
- Finck, A. (1969): Pflanzenernährung in Stichworten. Verlag Ferdinand Hirt, Kiel.
- Finck, A. (1982): Fertilizers and Fertilization. Introduction and Practical Guide to Crop Fertilization. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim. 455 p.
- Hall, R. (2008): Soil Essentials: Managing your Farm's Primary Asset. Landlinks Press. CSIRO Publishing. 192 p. <http://www.landlinks.com.au>
- Halliday, D.J., Trenkel, M.E. (1992): IFA World Fertilizer Use Manual. International Fertilizer Industry Association, Paris.
- Holzer, U., Döhler, H., Aldag, R. (1988): Ammoniakverluste bei der Rindergülleausbringung im Modellversuch. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 23, Kongressband 1987. 265-278.
- Hoskins, B.R. (1997): Formerly "Soil Testing Handbook for Professional Agriculturalists". Maine Forestry & Agricultural Experiment Station. University of Maine.
- ISU, USDA, NRCS (2006): Iowa Soils Properties and Interpretations Database, ISPAID Version 7.2. Prepared by Gerald A. Miller, Thomas E. Fenton, and Brian J. Tiffany - Department of Agronomy. http://extension.agron.iastate.edu/soils/SSDS_maps.html
- Jones, J.B. (2003): Agronomic handbook: management of crops, soils, and their fertility. CRC Press LLC. 450 p.
- Kastori, R. (2005): Azot: agrokemijski, agrotehnički, fiziološki i ekološki aspekti. Naučni institut za ratarstvo i povrtarstvo, Novi Sad. 419 p.
- Kastori, R., Maksimović, I. (2008): Ishrana biljaka. Vojvođanska akademija nauka i umetnosti, Novi Sad. 237 p.
- Kastori, R. (1983): Uloga elemenata u ishrani biljaka. Matica Srpska, Novi Sad. 350 p.

- Kastori, R. (1990): Neophodni mikroelementi: fiziološka uloga i značaj u biljnoj proizvodnji. Naučna knjiga, Beograd. 267 p.
- Kastori, R. (1998): Fiziologija biljaka. Feljton, Novi Sad.
- Kochian, L.V. (1991): Mechanisms of micronutrient uptake and translocation in plants. In JJ Mortvedt, ed, Micronutrients in Agriculture. Soil Science Society of America, Madison, WI. 251-270.
- Lal, R., Shukla M.K. (2004): Principles of Soil Physics. The Ohio State University Columbus, Ohio, USA. Marcel Dekker Inc. 699 p.
<http://www.scribd.com/doc/48277460/Principles-of-Soil-Physics>
- Leskošek, M. (1993): Gnojenje. Kmečki glas, Ljubljana.
- Leskošek, M. (1989): Gnojila in gnojenje. ČZP, Ljubljana.
- Lowrison, G.C.(1989): Fertilizer Technology. Ellis Horwood Limited, Halsted Press, New York, Chichester. 406 p.
- Marschner, H. (1986): Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press. San Diego, California, USA. 461 p.
- Marschner, H. (1990): Nutrient Dynamics in the Rhizosphere. III Simposio Nacional Nutrición Mineral de las Plantas: tema, nutrición mineral bajo condiciones de stress : Palma de Mallorca, 18-20 de septiembre de 1990.
- Marschner, H. (1991): Root-induced changes in the availability of micronutrients in the rhizosphere. In: Plant roots: the hidden half, 3rd edition, Y. Waisel, A. Eshel & U. Kafkaki (eds.). Marcel Decker, Inc., New York. 503-528.
- Marschner, H. (1995): Mineral nutrition of higher plants: second edition. Academic Press, London. 889 p.
- Martinović, J. (1997): Tloznanstvo u zaštiti okoliša: priručnik za inženjere. Državna uprava za zaštitu okoliša. Zagreb. 288 p.
- McBride, M. B. (1994): Enviromental Chemistry of Soils. Oxford University Press, New York. 406 p.
- Mengel, K. (1985): Dynamics and availability of major nutrient in soils. Advances in Soil Science. 2: 65-131.
- Mengel, K., Kirkby E.A. (1987): Principles of Plant Nutrition: 4th edition. International Potash Institute. Bern. 687 p.
- Mengel, K., Kirkby, E.A., Kosegarten, H., Appel, T. (2001): Principles of Plant Nutrition: 5th edition. Springer. 849 p.
- Millthorpe, F.L., Moorby, J. (1979): An introduction to crop physiology. Cambridge University Press, New York. 244 p.
- Müntz, K. (1984): Stickstoffmetabolismus der Pflanzen. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena. 331 p.
- Nemeth, K. (1982): Odredjivanje stvarne i potencijalne raspoloživosti hranjivih elemenata u zemljištu pomoću metode elektroultrafiltracije (EUF). Poljoprivredno-šumarski centar, Beograd.
- Popović, Ž. (1985): Agrohemija i fertilizacija. Poljoprivredni fakultet, Beograd.
- Popović, Ž., Stikić, R. (1986): Sadašnje predstave o uzimanju hraniva biljkama. Agrohemija. 4: 235-257.
- Rajković, Ž. (1978): Značaj i osobenosti azota u sistemu kontrole plodnosti zemljišta i primena đubriva. Bilten za kontrolu plodnosti zemljišta i upotreba đubriva, Novi Sad. 2: 5-49.
- Raun, W.R, Johnson, G.V., Mullen, R.W., Freeman, K.W., Westerman, R.L. (2007): Soil-Plant Nutrient Cycling and Environmental Quality. Department of Plant and Soil

- Sciences, Oklahoma State University.
- Rayment, G.E., Lyons D.J. (2011): Soil chemical methods- Australasia. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia. 496 p.
- Rayment, G.E., Lyons, D.J. (1996): Soil Chemical Methods – Australasia. CSIRO Publishing, Melbourne. 495 p.
- Rengel, Z. (2007): Cycling of Micronutrients in Terrestrial Ecosystems. Marschner, P. and Rengel Z. (eds.), Soil Biology. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 10: 93-113.
- Rengel, Z. (1999): Mineral Nutrition of Crops: Fundamental Mechanisms and Implications. Food Products Press, New York, London, Oxford. 399 p.
- Resulović, H., Čustović, H., Čengić, I. (2008): Sistematika tla/zemljišta: nastanak, svojstva i plodnost. Poljoprivredno-prehrambeni fakultet Univerziteta u Sarajevu. Sarajevo. 231 p.
- Römheld, V., Marschner, H. (1991): Functions of micronutrients in plants. In: Micronutrients in Agriculture, edited by Mortvedt, J.J., Cox, F.R., Shuman, L.M., Welch, R.M. SSSA, Madison. USA. 297-328.
- Rossiter, D.G. (1994): Land Evaluation: Lecture Notes. Cornell University College of Agriculture & Life Sciences, Department of Soil, Crop & Atmospheric Sciences. <http://www.itc.nl/~rossiter/teach/le/s494toc.htm>
- Salisbury, F.B., Ross, C.W. (1986): Plant Physiology: 3th edition. Wadsworth Publishing Company, Belmont.
- Salisbury, F.B., Ross, C.W. (1992): Plant Physiology: 4th edition. Wadsworth biology series. Wadsworth Publishing Company. 682 p.
- Sarić, M. (1982): Genetic specificity of mineral nutrition of plants. Scientific assemblies. Vol. XIII, No. 3. Beograd.
- Sarić, M., Stanković, Ž., Krstić, B. (1987): Fiziologija biljaka. Naučna knjiga, Beograd. 539 p.
- Scharrer, K., Linser, H. (1966): Handbuch der Pflanzenernährung und Düngung (Band 1-3). Springer-Verlag, Wien, New York.
- Schmidhalter, U., Maidl, F.X., Heuwinkel, H., Demmel, M., Auernhammer, H., Noack, P., Rothmund, M. (2008): Precision Farming - Adaptation of Land Use. Management to Small Scale Heterogeneity. Perspectives for Agroecosystem Management: balancing environmental and socio-economic demands. Edited by P. Schröder, J. Pfadenhauer, J. C. Munch, Elsevier. 121-199.
- Schofield, R.K. (1955): Can a Precise Meaning be given to "Available" Soil Phosphorus? Soils and Fertilizers. 18: 373-375.
- Schultz, J. (2005): The Ecozones of the World. The Ecological Divisions of the Geosphere. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 255 p.
- Škorić, A. (1977): Tla Slavonije i Baranje. JAZU, Zagreb. 256 p.
- Teklić, T. (1996): EUF-metoda u kontroli plodnosti pseudoglejnih tala. Doktorska disertacija, Poljoprivredni fakultet u Osijeku. Osijek. 124 str.
- Thornley, J.H.M. (1976): Mathematical Models in Plant Physiology. Academic Press Inc., London. 331 p.
- Vukadinovic, V., Rengel, Z. (2007): Dynamics of sodium in saline and sodic soils. Communications in Soil Science & Plant Analysis. 38(15-16):2077-2090.
- Vukadinović, V. (1990): Primjena kompjutera u poljoprivredi. Znanstveno-stručno savjetovanje, Osijek.
- Vukadinović, V. (1999). Ekofiziologija. Poljoprivredni fakultet u Osijeku, skripta. 75 p.
- Vukadinović, V., Teklić, T., Lončarić, Z. (1996): The implement of the AL-method in

- fertilizer recommendations in agriculture. ITI 96, Proceedings of the 18th International Conference on Information Technology Interfaces, Pula.
- Vukadinović, V., Bertić, B. (1989): Praktikum iz agrokemije i ishrane bilja. Poljoprivredni fakultet u Osijek. Osijek.
- Walsh, L.M., Beaton, J.D. (1973): Soil Testing and Plant Analysis (Revised). Soil Science Society of America, Madison. USA. 491 p.
- Welte, H., Timmermann, F. (1982): Über den Nährstoffeintrag in Grundwasser und Oberflächengewässer aus Boden und Düngung. VDLUFA – Schriftenreihe 5, Darmstadt. 236 p.
- Woodruff, C.M. (1955a): Energies of replacement of calcium and potassium in soils. Soil Science Society of America, Proceedings, 19: 167-171.
- Woodruff, C.M. (1955b): Ionic equilibria between clay and dilute salt solutions. Soil Science Society of America, Proceedings 19: 36-40.

