

## PEDOLOŠKA ISTRAŽIVANJA

dr MIRZA TVICA, dr VESNA TUNGUZ





**Univerzitet u Sarajevu  
Poljoprivredno - prehrambeni fakultet**

**PEDOLOŠKA ISTRAŽIVANJA**

**MIRZA TVICA  
VESNA TUNGUZ**

**Sarajevo 2023.**

**Naslov: PEDOLOŠKA ISTRAŽIVANJA**

**Autori:** dr Mirza Tvica i dr Vesna Tunguz

**Izdavač:** Poljoprivredno-prehrambeni fakultet Univerziteta u Sarajevu

**Recezenti:** dr Hamdija Čivić, dr Jovica Vasin i dr Josip Jurković

**Tehnički urednik:** Biljana Miovčić

**CIP zapis dostupan u COBISS sistemu Nacionalne i univerzitetske biblioteke BiH pod ID brojem 57295366:**

**Pedološka istraživanja [Elektronski izvor]**

*Tvica, Mirza ; Tunguz, Vesna*

**Vrsta građe** - udžbenik

**Izdavanje i proizvodnja** - Sarajevo : Poljoprivredno-prehrambeni fakultet Univerziteta, 2023

**Jezik** - bosanski

**ISBN** - 978-9958-597-83-1

**COBISS.BH-ID** - 57295366

**Link(-ovi):**

<https://ppf.unsa.ba/uploads/ebiblioteka/Pedoloska%20istrazivanja.pdf>

## SADRŽAJ:

Predgovor.....	10
1 UVOD.....	12
1.1. ZEMLJIŠTE KAO PRIRODNO TIJELO U EKOSISTEMIMA .....	14
1.2. EKOLOŠKE FUNKCIJE ZEMLJIŠTA.....	15
1.3. PEDOGENETSKI FAKTORI.....	17
1.3.1. Matični supstrat kao pedogenetski faktor.....	17
1.3.1.1. Najvažniji matični supstrati u našoj zemlji.....	18
1.3.2. Reljef kao pedogenetski faktor.....	22
1.3.3. Klima kao pedogenetski faktor.....	24
1.3.4. Organizmi kao pedogenetski faktor.....	26
1.3.5. Čovjek i upravljanje zemljишtem.....	26
1.3.6. Vrijeme kao pedogenetski faktor.....	27
1.4. ZEMLJIŠTE KAO TROFAZNI SISTEM .....	29
2 ISTRAŽIVANJE ZEMLJIŠTA I UPRAVLJANJE ZEMLJIŠTEM.....	38
2.1. VRSTE ISTRAŽIVANJA ZEMLJIŠTA I ONI KOJIMA SU TA ISTAŽIVANJA POTREBNA .....	38
2.2. PROCJENA KVALITETA ZEMLJIŠTA.....	42
2.3. PREDSTAVLJANJE REZULTATA ISTRAŽIVANJA KVALITETA TLA I ZEMLJIŠNI INFORMACIONI SISTEMI – ZIS .....	45
3 KAMERALNO ISTRAŽIVANJE ZEMLJIŠTA .....	47
3.1. KAMERALNO ISTRAŽIVANJE VEĆ POSTOJEĆIH PODATAKA O KARAKTERISTIKAMA ISTRAŽIVANOG PODRUČJA I PREDMETU ISTAŽIVANJA .....	47
3.1.1. Izvori podataka u kameralkim istraživanjima .....	48
3.2. PLAN I DINAMIKA ISTRAŽIVANJA .....	50
4 TERENSKA ISTRAŽIVANJA .....	55
4.1. OPREMA I PRIBOR ZA ISTRAŽIVANJA NA TERENU .....	55
4.2. PRVI ILI PRELIMINARNI IZLASCI NA TEREN I REKOGNOSCIRANJE TERENA.....	58
4.2.1. Sondiranje zemljишta u sklopu rekognosciranja terena.....	59
4.3. GLAVNO ISTRAŽIVANJE NA TERENU-UZORKOVANJE ZEMLJIŠTA .....	61
4.3.1. ISKOP PEDOLOŠKIH PROFILA .....	62
4.3.2. OPIS UNUTRAŠNJIH I VANJSKIH MORFOLOŠKIH OBILJEŽJA PEDOLOŠKOG PROFILA.....	65
4.3.2.1. Genetski horizonti .....	67
4.3.2.2. Sklop profila ili slijed horizonata - Klasifikacija zemljишta .....	72
4.3.2.3. Vlažnost zemljишta .....	76
4.3.2.4. Tekstura ili mehanički sastav .....	77
4.3.2.5. Struktura tla .....	78
4.3.2.6. Prisustvo karbonata u profilu tla.....	80
4.3.2.7. Reakcija ili pH vrijednost tla.....	83
4.3.2.8. Specifične pedodinamske tvorevine .....	85
4.3.3. UZIMANJE POJEDINAČNIH UZORAKA IZ PROFILA.....	86

4.3.3.1.	Uzimanje pojedinačnih uzoraka iz profila u poremećenom stanju u vrećice .....	86
4.3.3.2.	Uzimanja pojedinačnih uzoraka iz profila u neporemećenom stanju u cilindre .....	87
4.3.4.	UZIMANJE POJEDINAČNIH UZORAKA ZEMLJIŠTA I FORMIRANJE PROSJEČNIH UZORAKA .....	90
4.3.4.1.	Određivanje mjesta uzimanja pojedinačnih uzoraka - Plan uzorkovanja tla.....	90
4.3.4.2.	Uzimanje pojedinačnog i prosječnog uzorka hašovom .....	92
4.3.4.3.	Uzimanje pojedinačnog i prosječnog uzorka sondom .....	93
4.3.5.	UZORKOVANJE POVRŠINSKOG ORGANSKOG HORIZONTA ŠUMSKIH TALA .....	95
4.3.6.	UZIMANJE MONOLITA.....	97
4.3.7.	Dnevnik terenskih istraživanja .....	98
5	ISTRAŽIVANJA ZEMLJIŠTA U LABORATORIJI .....	99
5.1.	ORGANSKA MATERIJA TLA .....	103
5.1.1.	Porijeklo i vrste organske materije u tlu.....	104
5.1.1.1.	Količina organske materije u tlu.....	106
5.1.2.	Značaj organske materije u tlu .....	108
5.1.3.	Klimatsko regulacijska uloga (organske materije) tla .....	110
5.1.3.1.	Određivanje gubitaka karbona u obradivim zemljištima .....	112
5.1.3.1.1.	Kvantifikacija organskog karbona tla (OKT).....	114
5.1.4.	Određivanje sadržaja organske materije u tlu.....	117
5.1.4.1.	Određivanje odnosa mineralnog i organskog dijela tla metodom žarenja/ ili Određivanje sadržaja pepela (engl: ash content)..	117
5.1.4.2.	Kvalitativno određivanje karaktera humusa .....	119
5.1.4.3.	Kolorimetrijska metoda određivanja sadržaja organske materije u K-bihromatu (bihromatna metoda po Tjurinu).....	119
5.1.4.4.	Određivanje sadržaja organske materije s K-permanganatom (permanganatna metoda po Kotzmann-u) .....	121
5.1.4.5.	Određivanje koncentracije ugljika i azota suhim spaljivanjem u automatskom elementarnom C i N analajzeru .....	124
5.1.4.6.	FIZIČKO FRAKCIJONIRANJE RAZLIČITIH FORMI ORGANSKE MATERIJE TLA .....	125
5.2.	FIZIČKE OSOBINA TLA .....	134
5.2.1.	FIZIČKE OSOBINE PRIMARNIH ČESTICA TLA.....	134
5.2.1.1.	Oblik čestica tla .....	135
5.2.1.2.	Tekstura ili distribucija čestica tla prema veličini .....	137
5.2.1.2.1.	Određivanje teksture ili mehaničkog sastava tla .....	144
5.2.1.2.2.	Mehanička analiza skeleta u tlu.....	144
5.2.1.2.3.	Mehanička analiza fine zemlje - sitnice .....	147
5.2.1.2.3.1.	Načini pripreme uzorka za izvođenje mehaničke analize.....	147
5.2.1.2.3.2.	Mehanička analiza po modificiranoj Međunarodnoj B metodi 149	
5.2.1.2.3.3.	Specifičnosti norme ISO 11277 u odnosu na tradicionalnu Pipet B metodu [120] .....	153

5.2.1.2.3.4. Trokut za određivanje teksturne klase fine zemlje -sitnice ..	155
5.2.1.2.4. Ostale metode određivanja teksturnog sastava .....	158
5.2.1.3. Specifična površina čestica tla.....	158
Specifična gustina primarnih čestica tla .....	160
5.2.1.4. 160	
5.2.2. STRUKTURA ZEMLJIŠTA.....	171
5.2.2.1. Agregacija čestica tla.....	174
5.2.2.1.1. Hijerarhijski nivoi agregacije kao model prostorne organizacije čestica tla [163] .....	174
5.2.2.1.2. Faktori koji utiču na agregaciju .....	180
5.2.2.1.3. Značaj agregatne strukture tla .....	184
5.2.2.2. Strukturalna analiza zemljista.....	185
5.2.2.2.1. Kvalitativna karakterizacija strukture.....	185
5.2.2.2.2. Analiza struktturnih agregata po veličini.....	185
5.2.2.2.3. Suho prosijavanje struktturnih agregata po metodi Savinova [88] .....	187
5.2.2.2.4. Mokro prosijavanje struktturnih agregata [88, 118] .....	188
5.2.2.2.5. Određivanje stabilnosti struktturnih agregata.....	189
Određivanje stabilnosti struktturnih agregata u vodi .....	190
5.2.2.2.6. 190	
5.2.2.3. Volumna (zapreminska) gustina tla – VSG .....	192
5.2.2.4. Porozitet tla (P).....	194
5.2.2.4.1. Određivanje ukupne poroznosti tla.....	195
5.2.2.4.2. Određivanje diferencijalne poroznosti zemljista .....	197
5.2.3. VODNO-FIZIČKE OSOBINE TLA .....	199
5.2.3.1. Količina vode u tlu ili vlažnost tla.....	201
5.2.3.1.1. Određivanje trenutne vlažnosti gravimetrijski .....	201
5.2.3.1.2. Mjerenje/praćenje trenutne vlage u poljskim uslovima.....	203
5.2.3.1.3. Mjerenje/praćenje vlažnosti tla metodom dielektrične konstante 204	
5.2.3.2. Vodni bilans .....	206
5.2.3.3. Karakteristični sadržaji (kapaciteti) vode u tlu .....	207
5.2.3.3.1. Higroskopska vlažnost tla - Hy .....	207
5.2.3.3.2. Retencioni kapacitet tla (Rk).....	209
5.2.3.3.3. Poljski vodni kapacitet - PVK .....	210
5.2.3.3.4. Vlažnost trajnog venuća - VTV .....	212
5.2.3.3.5. Pristupačna voda biljci (Pv) .....	213
5.2.3.3.6. Određivanje kapaciteta za zrak (Kz) .....	216
5.2.3.4. Sile držanja vode u tlu .....	217
5.2.3.5. Vodni potencijal .....	220
5.2.3.5.1. Mjerenje vodnog potencijala tla tenziometrima .....	225
5.2.3.5.2. Mjerenje vodnog potencijala tla gipsanim blokovima.....	226
5.2.3.5.3. Hidrološke konstante ili vodni kapaciteti tla – pF kriva različitih teksturnih klasa.....	230
5.2.3.5.4. Određivanje hidroloških konstanti tla u aparatu pod pritiskom ili tlačnom ekstraktoru.....	230

5.2.3.5.5. Konstruisanje pF krive .....	235
5.2.3.5.6. Određivanje kapilarnog penjanja vode.....	237
5.2.3.6. Kretanje vode u tlu .....	239
5.2.3.6.1. Slobodno kretanje vode u zasićenom tlu - filtracija .....	240
5.2.3.6.2. Infiltracija – upijanje vode nezasićenog tla .....	249
5.2.3.6.3. Praćenje nivoa podzemne vode u buštinama (pijezometrima) .....	255
5.2.3.6.4. Određivanje smjera i brzine kretanja podzemne vode.....	257
5.2.3.7. KONZISTENCIJA TLA .....	259
5.2.3.7.1. Određivanje zbijenosti (tvrdine) tla penetrometrom- Mehanički otpor prodiranju.....	261
5.2.3.7.2. Određivanje plastičnosti tla (PT) po Atterbergu.....	262
5.2.3.7.3. Određivanje ljepljivosti tla [88] .....	264
5.2.3.7.4. Određivanje granice skupljanja tla metodom M. M. Filatova [88] .....	266
5.2.3.7.5. Određivanje koeficijenta bubreњa tla metodom S. Rutkovskog [88] .....	267
5.3. HEMIJSKE OSOBINE TLA .....	269
5.3.1. KARBONATI ( $\text{CaCO}_3$ ) U TLU .....	271
5.3.1.1. Kvantitativno određivanje sadržaja $\text{CaCO}_3$ [88, 125] .....	272
Volumetrijsko određivanje sadržaja $\text{CaCO}_3$ pomoću Scheiblerovog.....	273
5.3.1.2. kalcimetra .....	273
5.3.1.3. Određivanje sadržaja aktivnog $\text{CaCO}_3$ u tlu po metodi Droineau – Galet [88, 125] .....	275
5.3.2. pH REAKCIJA TLA .....	276
5.3.2.1. Određivanje aktivne kiselosti tla (pH u $\text{H}_2\text{O}$ ) .....	277
5.3.2.2. Određivanje supstitucijske kiselosti tla (pH u $\text{KCl}$ ) .....	278
5.3.3. KONCENTRACIJA SOLI U ZEMLJIŠNOM RASTVORU I ELEKTRIČNI KONDUKTIVITET (EC) .....	280
5.3.4. ADSORBTIVNI KOMPLEKS TLA .....	283
5.3.4.1. Kapacitet izmjenjivih kationa - KIK (engl. Cation Exchange Capacity - CEC) .....	286
5.3.4.1.1. Metode određivanje CEC tla .....	290
5.3.4.1.2. AA (amonijum acetat) metoda sa marker zamjenskim kationom za mjerjenje CEC pri pH 7, (Chapman, 1965 [19]) .....	291
5.3.4.1.3. Metode za određivanje $\text{CEC}_{\text{sum}}$ - zbrajanjem izmjenjivih kationa u nekom ekstrakcionom sredstvu.....	293
5.3.4.1.3.1. Obračun $\text{CEC}_{\text{sum}}$ zbrajanjem izmjenjivih kationa u nekom ekstrakcionom sredstvu.....	294
5.3.4.1.3.2. AA (amonijum acetat) metode za mjerjenje $\text{CEC}_{\text{sum}}$ pri pH 7 .....	295
5.3.4.1.4. Ostale metode za određivanje CEC .....	297
5.3.4.2. Analiza adsorptivnog kompleksa tla po Kappenu .....	301
5.3.4.2.1. Određivanje hidrolitičke kiselosti po Kapennu (H).....	301

5.3.4.2.2. Određivanje sume adsorbovanih baznih katjona u beskarbonatnom tlu - metoda Kappena-a .....	302
5.3.4.2.3. Obračun totalnog kapaciteta adsorbcije – T [125, 158, 88]:..	304
5.3.4.2.4. Obračun stepena zasićenosti bazama – V.....	305
5.3.5. KALCIZACIJA S HUMIZACIJOM .....	305
5.3.5.1. Određivanje potrebne doze za kalcifikaciju.....	307
5.3.6. ODREĐIVANJE SADRŽAJA LAKOPRISTUPAČNIH FORMI KALIJA I FOSFORA U TLU – AL metoda .....	310
5.3.7. OKSIDOREDUKCIIONI POTENCIJAL TLA.....	314
LITERATURA.....	319
PRILOZI.....	333

## Predgovor

Fakultetski udžbenik Pedološka istraživanja, prilagođen je prije svega dijelu silabusa koji se odnosi na na terenska i laboratorijska istraživanja zemljišta u okviru predmeta Pedologija, Osnovi pedologije i Opća pedologija koji se predaju na I i II ciklusu studija na Poljoprivredno-prehrambenom fakultetu Univerziteta u Sarajevu. Kako je sam uvodni dio u Udžbenik kao i u pojedina istraživanja, nešto detaljnije i opširnije opisan od uobičajenog, to se ovaj udžbenik može koristiti i kao dopunski udžbenik za teoretski dio u okviru ovih predmeta.

Udžbenik se sastoji iz nekoliko poglavlja. U uvodnom dijelu bavi se osnovnim saznanjima o zemljištu kao prirodnom tijelu i njegovim funkcijama u kopnenim ekosistemima. U uvodnom dijelu obrađeni su i faktori postanka zemljišta i kratko opisano zemljište kao trofazni sistem.

U nastavku udžbenika se obrađuje veza između upravljanja zemljištem i pedoloških istraživanja, pojašnjavajući koje su to vrste pedoloških istraživanja potrebne pojedinim korisnicima zemljišta, onim na aplikativnom nivou – farmerima, kao i institucijama koje se bave odlučivanjem o korištenju, zaštiti i uređenju zemljišta.

Na kraju su obrađene praktične aktivnosti povezane sa pedološkim istraživanjem koje se realiziraju kroz pripremni kameralni rad, terenska istraživanja vezana za obilazak i uzorkovanje zemljišta i na kraju, laboratorijske analize organske materije, fizičkih, vodno-fizičkih i hemijskih osobina zemljišta. Sam uvodni teorijski dio u svaku od analiziranih karakteristika/osobina zemljišta, a koji se odnosi na definiciju, značaj, ekološku ulogu, tumačenje rezultata, podjele i sl., je nešto šire obrađen, što ovaj udžbenik stavlja izvan uobičajenog sadržaja u pedološkim praktikumima.

Sadržaj udžbenika vezan za laboratorijska istraživanja dijelom obrađuje tradicionalnu pedološku praksu u našim laboratorijama opisanu u priručnicima i praktikumima iz Pedologije cijenjenih profesora Husnije Resulovića i ost. - Mali pedološki priručnik iz 1982. [125], Arse Škorića - Priručnik za pedološka istraživanja iz 1982. [158] i Rastislava Korunovića i Stojana Stojanovića - Praktikum Pedologije iz 1989. [88]. Nadalje, sadržaj je prilagođen tehničkim mogućnostima same Pedološke laboratorije PPF-UNSA, tako da su shodno tome i laboratorijske analize koje smo u mogućnosti izvesti na fakultetu i detaljnije objašnjane od drugih. Pored toga, neke laboratorijske analize su u međuvremenu osavremenjene, druge dopunjene ili izmjenjene u odnosu na tradicionalne metode tako da je i njima posvećen nešto detaljniji pristup. Također, u udžbeniku su opisane i praktične aktivnosti iz hidropedoloških istraživanja koje nisu sadržane u

silabusu pomenutih predmeta ali koje se često izvode na terenu ili laboratoriji u okviru pedoloških istraživanja. Neke od ovih praktičnih aktivnosti su opisane detaljno dok je za neke opisan samo princip određivanja.

U knjizi su, kao primjer očekivanih rezultata, prikazani i rezultati vlastitih istraživanja fizičkih i hemijskih karakteristika tri vrlo zastupljena zemljišta u našoj zemlji (Pseudoglej, Distično smeđe tlo na pješčaru i Crvenica) koja su urađena u laboratoriji Instituta za ishranu šuma (ibw) George-August Univerziteta u Goettingenu u Njemačkoj. U knjizi je predstavljen i metod fizičkog frakcioniranja organske materije tla proveden na istom Institutu.

Kako se primarna ekološka funkcija zemljišta odnosi na proizvodnju biomase u poljoprivredi i šumarstvu, sasvim je razumljivo da se od samog svog postanka Pedologija kao naučna disciplina razvija i izučava na poljoprivrednim i šumarskim fakultetima. Ovaj udžbenik iz tog razloga pored studenata poljoprivrednih mogu koristiti i studenti šumarskih fakulteta koji slušaju predmet Pedologija u okviru svog naučno nastavnog programa.

Zemljište, kao jedan od najvažnijih faktora stabilnosti kopnenih ekosistema, vrši i ekološko-regulacijsku funkciju u kopnenim ekosistemima, a koja se ogleda u priјemu, transformaciji i transferu različitih (štetnih) materija, zatim u filtraciji voda i klimatsko regulacijskoj funkciji tla. U tom smislu, Pedologija kao nauka sve češće postaje predmet proučavanja srodnih prirodno tehničkih nauka koje se bave ovom problematikom, tako da se ovaj udžbenik može koristiti i u tim istraživanjima.

## **1 UVOD**

Zemljište ili tlo u tradicionalnom smislu predstavlja medij za ukorjenjavanje i snabdijevanje biljaka hranivima i vodom. Preciznije, zemljište predstavlja biološki aktivno, porozno i strukturno prirodno tijelo sastavljeno od niza horizontata ili slojeva, čiji se postanak vezuje za površinski rastresiti sloj zemljine kore koji se naziva pedosfera (grč. *pedon* = tlo, zemlja i grč. *sphaîra* = kugla, lopta), a izgrađeno je od čvrste faze koju čine mineralni i organski dio, te tečne faze koju čini vodenim rastvorom i gasovite faze koji zajedno ispunjavaju pore tla. Nadalje, tlo ili zemljište je i historijsko tijelo dinamičnog karaktera koje se stalno mijenja, a nastalo je i evoluira kao prosljedica uticaja klime, reljefa i organizama na matični supstrat (matičnu stijenu) i uopšte procesima pedogeneze (od grč. *pedon* = tlo, grč. *genesis* = postanak, stvaranje, razvitak), a definiše se na osnovu njegovih morfoloških, fizičkih i hemijskih osobina.

Međutim, zemljište ili tlo (engl. *soil*) je ujedno i sastavni dio zemljišnog prostora. U tom smislu, zemljišni prostor (engl. *land*) prema definiciji FAO [43] predstavlja fizičko okruženje ili prostor koji uključuje klimu, reljef, tlo, hidrologiju i vegetaciju u mjeri u kojoj oni utiču na mogućnost korištenja zemljišta, te rezultate prošle i sadašnje aktivnosti čovjeka. Zemljišni prostor je stoga širi pojam od tla ili terena. Čisto ekonomске i socijalne karakteristike, međutim, nisu uključene u koncept zemljištnog prostora; oni čine dio ekonomskog i društvenog konteksta. U široj regiji, na pr. u Hrvatskoj često se koriste odvojeni izrazi tlo i zemljište, gdje se tlo odnosno njegov postanak povezuje sa pedosferom a zemljište označava širi prostor zajedno sa reljefom, klimom, vegetacijom i tlom.

Nauka koja se bavi proučavanjem zemljišta ili tla naziva se Pedologija (grč. *pedon* = tlo, zemlja i grč. *λόγος* - logos = nauka, znanje, znanost, izučavanje). Tradicionalno, Pedologija proučava nekoliko izdvojenih poglavljaja vezanih za zemljište. To su: Porijeklo i osobine mineralnog dijela zemljišta; Organska materija zemljišta; Organizmi u zemljištu; Fizika zemljišta; Hemija zemljišta; Morfologija i Sistematika zemljišta; i Distribucija i kartiranje zemljišta. Međutim u novije vrijeme Pedologija se kao posebna disciplina proučava u okviru Nauka o zemljištu (engl. *Soil science*) kao njen integralni dio zajedno sa Fizikom tla, Hemijom tla, Mineralogijom zemljišta te Biologijom i Biohemijom tla. U tom kontekstu kroz Pedologiju se proučavaju sljedeće discipline: Tlo i geomorfologija, Pedogenetski procesi, Klasifikacija tala – različiti sistemi, Hidropedologija, Upravljanje zemljištem, Evaluacija tala i Digitalno mapiranje i korištenje različitih geografskih sistema i modela u Nauci o tlu [74].

Pedologija je relativno mlada nauka, a zaslužan za njen izdvajanje kao naučne discipline smatra se ruski agronom i geolog Dokučajev (1846–1903), koji je prvi dao naučnu sistematizaciju zemljišta na osnovu njihove geneze, te prvi naglasio značaj faktora nastanka zemljišta - pedogenetskih faktora. U pedogenetske faktore ubrajamo: (1) Matični supstrat odnosno materijal koji nastaje fizičkim i hemijskim trošenjem matične stijene na licu mjesta (lat: *in situ*) ili je kao produkt trošenja transportovan i istaložen a koji ulazi u sastav mineralnog dijela tla; (2) Reljef koji svojim formama (makroreljef, mezoreljev, mikroreljev) te nagibom, ekspozicijom, nadmorskom visinom utiče na pedogenetske procese: distribuciju vode i topote, migracijske procese, eroziju; (3) Klima sa svojim elementima, padavinama, temperaturom, vjetrom, osunčavanjem, vlažnosti zraka... utiče na sve važnije pedogenetske procese, od trošenja stijene, procesa transformacije mineralnog i organskog dijela, procesa ispiranja, oglejavanja i dr.; (4) Organizmi tla, među njima i vegetacija koja definiše input (unos) organskih ostataka i sastav organske materije tla; tu je i nezamjenjiva uloga organizama u razgradnji biljnih i životinjskih ostataka kao i mineralnog dijela tla, predstavljajući tako ključnu kariku u kruženju elemenata u prirodi; (5) Vrijeme ili geološka starost područja promatranog tla, upućuje na dinamičnost tla kao prirodne tvorevine koja nije vječno zadata nego prolazi kroz različite faze tokom vremena. U novije vrijeme, naročito prilikom promatranja umjetnih ekosistema kakav je i poljoprivredni ekosistem, po značaju se izdvojio još jedan faktor formiranja zemljišta a to je upravljanje zemljištem (engl. *soil management*) koje uključuje korištenje, uređenje i zaštitu zemljišta, a koji je postao značajan intenzifikacijom poljoprivredne proizvodnje u zadnjih nekoliko decenija [83].

Zemljište kao jedan od osnovnih faktora svih kopnenih ekosistema obavlja određene ekološke servise ili funkcije u tom istom ekosistemu. Primarna ekološka funkcija zemljišta je u proizvodnji biomase. U tom kontekstu, zemljište biljci pored mjesta ukorijenjavanja obezbjeđuje kontinuirano snabdijevanje vodom, hranivima, zrakom i toplotom. Ovo se u pedologiji smatra plodnošću zemljišta. Da bi mogli procijeniti ovako definisanu plodnost zemljišta vrše se analize fizičkih, vodnofizičkih, hemijskih i bioloških karakteristika zemljišta koji tako postaju indikatori plodnosti.

Kontrola plodnosti tla u kontekstu prve ekološke funkcije tla – proizvodnje biomase je ujedno i najčešće tražena analiza zemljišta. Naravno da to nije i jedini cilj istraživanja zemljišta. U tom kontekstu treba poznavati i promatrati sve ekološke i tehničke funkcije tla.

## **1.1. ZEMLJIŠTE KAO PRIRODNO TIJELO U EKOSISTEMIMA**

U novije vrijeme pojavljuju se nešto šire i sveobuhvatnije definicije zemljišta. Zemljište ili tlo je prirodno, 3D tijelo (sastoji se od pedona – čestica zemlje), obično debljine do ~1-2 m (debljine mogu značajno varirati), od nekonsolidovanih minerala i organskog materijala, koje pokriva površinu zemlje i koje može podržati ukorijenjivanje kopnenih biljaka, i koje:

- karakteriše jedan ili više horizonata tla (slojeva) koji su evoluirali ulaskom, gubitkom, prijenosom i transformacijom energije i materije kroz interakciju klime, organizama (biote), reljefa i matičnog supstrata tokom vremena, a koji se razlikuju od materijala iz kojih potiču,
- sadrži čvrste materije (mineralne ili anorganske i organske), tečnosti i gasove,
- neophodan je za život kroz recikliranje hranljivih materija (N,P,S i ostala hraniva), ugljenika i kiseonika, i
- nije obnovljiv u ljudskim vremenskim okvirima [87].

Kako god, većina definicija tla ne uspijeva da obuhvati i prepozna njegovu složenost kao najkompleksnijeg ekosistema na Zemlji i kao biološkog staništa i kritično važnog spremišta za gene.

Zemljište kao prirodno tijelo je sastavni element kopnenih ekosistema (poljoprivrednog, livadskog, šumskog, močvarnog ekosistema). Pojam ekosistem u ekologiju je uveo engleski naučnik Sir Alfred Tensley (1935), metodološki i konceptualno postavio Lindeman (1942.), a konačnom usvajanju termina pomogle su knjige: „Opšta teorija sistema“ *Bertalanffyja* (1950) i „Osnovi ekologije“ *Oduma* (1953) [26]. Termin potiče od riječi: eko (grč. *oikos*) - stan, stanište i sistem - sastav, određen poredak. Danas postoje različite definicije i shvatanja ekosistema. Prema Konvenciji o biodiverzitetu potpisanoj na UN konferenciji o okolišu održanoj u Rio de Jeneiru 1992. ekosistem označava dinamički kompleks zajednice biljaka, životinja i mikroorganizama i njihovog neživog okoliša, koji međusobno djeluju kao jedna ekološka cjelina. U praksi se najčešće vrši podjela ekosistema prema: porijeklu, staništu, vegetaciji i čovjekovom uticaju [37]:

- prema porijeklu eksistemi mogu biti prirodni (izvorni, netaknuti ili divlji) i kulturni (djelimično antropogeni ili potpuno antropogeni),
- prema staništu ekosistemi mogu biti: kopneni, vodenici i spiljski,

- prema vegetaciji ekosistemi mogu biti: šumski, travnati i močvarni.

Živi i neživi svijet unutar ekosistema egzistiraju u složenim odnosima međuzavisnosti. Život organizama u potpunosti zavisi od fizičkog okoliša, ali s druge strane organizmi također djeluju na neživi svijet. Ekološki faktori se dijele u dvije grupe abiotičke i biotičke:

1. abiotički ili neživi faktori na kopnu: klima, reljef i edafski faktori. Edafske faktore predstavljaju zemljište i matična stijena (geološki supstrat);
2. biotički ili živi faktori – organizmi i njihovi međuodnosi.

**Agroekosistem** ili poljoprivredni ekološki sistem je složena, ali usklađena cjelina agrobiocenoze i agrobiotopa. U njemu postoje čvrsti uzajamni odnosi i uticaji između zemljišta, reljefa i klime s jedne strane te životne zajednice kulturnih biljaka i životinja, čovjeka i sporednih članova biocenoze s druge strane. U agrosferi čovjek svjesno i planski organizuje biljnu proizvodnju. Prenamjena prirodnih šumske i livadskih zemljišta u poljoprivredna analizira se kao promjena načina korištenja zemljišta a naziva se kultivacija. Kad čovjek napusti poljoprivredni proizvodni prostor, taj prostor postepeno opet postaje dio slobodne prirode [26].

Kada govorimo o kreiranju politika vezanih za upravljanje zemljištem tlo se sve više razmatra, kao pružalac „usluga ekosistema“ i kao „prirodni kapital“ (zaliha biotičke i abiotičke mase koja sadrži energiju i organizaciju).

## 1.2. EKOLOŠKE FUNKCIJE ZEMLJIŠTA

Kao i svi drugi faktori u ekosistemu zemljište obavlja svoje funkcije ili uloge. Poznavajući obim i značaj tih usluga kažemo da je zemljište jedan od najvažnijih faktora stabilnosti svih kopnenih ekosistema. U tom kontekstu, potrebno je poznavati najvažnije ekološke funkcije zemljišta:

- proizvodnja biomase ili organske materije,
- ekološko regulacijska uloga tla,
- tlo kao mjesto genskog bogatstva i zaštite biodiverziteta.

Tu su i ostale funkcije tla kao što su socijalno-prostorna uloga, zemljište kao izvor sirovine (materijal za proizvodnju cigle, blokova i crijepe, ili materijal za eksploataciju minerala gline ili pjeska) i tlo kao mjesto konzervacije arheoloških nalazišta i artefakata. U okviru tehničkih funkcija tla, tlo se posmatra kao podloga za građevinske radove ili materijal za ugradnju u nasipe i brane.

Glavna ekološka uloga tla u proizvodnji biomase u prirodnim i kulturnim ekosistemima. Proizvodnjom biomase ili organske materije u poljoprivredi i šumarstvu čovjek podmiruje potrebe u ishrani, energiji, vlaknima, lijekovima, začinima, sirovinama za drvnu i prehrambenu industriju, industriju krznom, kožom i sl.

Pored svoje uloge u proizvodnji biomase tlo je mjesto života brojne flore i faune tla, postajući tako jedan od najznačajnijih faktora u održavanju bioraznolikosti svih kopnenih ekosistema. Pored toga, rastvorljivi zemljišni materijal koji se erozijom odnosi sa površine zemljišta a vjetrom i riječnim nanosima unosi u vodne ekosisteme (bare, rijeke, jezera, mora i okeane) predstavlja takođe jedan od najznačajnijih izvora hraniva za život u vodi. Na ovaj način zemljište igra važnu ulogu i u biodiverzitetu vodnih ekosistema.

Nadalje, u kontekstu multifunkcionalnosti zemljišta u ekološko regulacijske uloge spadaju:

- Zemljište kao prijemnik, transformator i medij transfera različitih materija među kojima i onih štetnih: kao površinski rastresiti dio zemljine kore i kao trofazni sistem sastavljen od čvrste, tečne i gasovite faze, zemljište je mjesto fizičkog nakupljanja ili akumulacije različitih materija, mjesto njihove biološke, hemijske ili fotolitičke izmjene ili transformacije, te medij prijenosa ili transporta ili transfera različitih materija. Ova uloga naročito je značajna u kontekstu prevencije i saniranja negativnih posljedica onečišćenja okoliša štetnim materijama;
- Zemljište kao filter ili prečistač vode - ova uloga tla je povezana prvo sa porozitetom koji vrši fizičku filtraciju različitih primjesa među kojima i onečišćivača, a zatim i sa koloidnim polimerima humusnih kiselina i sekundarnim slojevitim mineralima - mineralima gline, koji zahvaljujući svojoj velikoj aktivnoj površini sa električnim nabojem, prije svih hemijskom adsorpcijom vežu na svojoj ogromnoj površini onečišćujuće materije i na taj način ih inaktiviraju;
- Klimatsko regulacijska uloga zemljišta – povezana je sa dinamikom organske materije zemljišta kao najvećeg kopnenog aktivnog izvora ugljika/karbona. Organska materija tla ima golemu ulogu u tzv. malom ciklusu karbona. Globalno, u zemljištu karbona u formi organske materije ima približno 1.500 Gt, duplo više nego u atmosferi i gotovo tri puta više nego vegetacijskom prekrivaču [137]. Zemljištem može da se upravlja na način da postane mjesto emisije karbona u atmosferu kao CO<sub>2</sub> koji se oslobađa biohemijском mineralizacijom organske materije tla ili da postane mjesto pohranjivanja atmosferskog karbona u tlo opet u formi organske materije tla (povećanjem prinosa i većim inputom biljnih ostataka u tlo, konzervacijskom obradom zemljišta...).

Npr.: Korištenje prirodne plodnosti zemljišta na način da se povećava mineralizacija organske materije i oslobođanje hraniva oranjem tla, zatim odnošenje ostataka usjeva, neprimjena organskih đubriva, monokulturni uzgoj... uzrokuje smanjenje organske materije tla i povećanu emisiju CO<sub>2</sub> i drugih stakleničkih gasova (N<sub>x</sub>O) u atmosferu, što može uzrokovati tzv. "efekat staklenika" i globalno zatopljenje. S druge strane konzervacijsko upravljanje zemljištem na način da se smanji mineralizacija organske materije tla i poveća unos i skladištenje organske materije (smanjenom obradom, povećanjem produkcije biomase, zaoravanjem biljnih ostataka, organskim đubrenjem, međuredni uzgoj, uvođenjem djetelinsko travne smjese u plodored...) može povećati pohranjivanje karbona iz atmosfere (CO<sub>2</sub>) u zemljište u formi organske materije, umanjiti efekat staklenika i dati vremena drugim tehnologijama na suzbijanju klimatskih promjena.

### **1.3. PEDOGENETSKI FAKTORI**

Kako zemljište obavlja svoje funkcije u svakom kopnenom ekosistemu tako je i sam postanak zemljišta nezaobilazno povezan i uslovjen sa tim istim ekosistemom i interakcijom biotskih i abiotiskih faktora. Faktore koji utiču na nastanak i razvoj zemljišta nazivamo pedogenetskim faktorima. U faktore postanka i razvoja zemljišta ubrajamo (MRKOV):

1. matični supstrat (M),
2. reljef (R),
3. klimu (K),
4. organizme (O) i
5. vrijeme (V).

Već je pomenuto da se u novije vrijeme intenzifikacijom poljoprivredne proizvodnje Čovjek i upravljanje zemljištem (korištenje, uređenje i zaštita zemljišta) izdvojio kao još jedan faktor formiranja zemljišta. U ovom prikazu uticaj čovjeka će biti obrađen u oviru pedogenetskog faktora Organizmi.

#### **1.3.1. Matični supstrat kao pedogenetski faktor**

Matični supstrat daje materijal za mineralni dio zemljišta. Matični supstrat je prirodni materijal nastao trošenjem/raspadanjem matične stijene (geološke podloge). Slikovito govoreći matični supstrat se može formirati na licu mjesa (*in situ*) raspadanjem matične stijene na kojoj leži zemljište, zatim može biti nanesen sa strane, kada se produkti trošenja stijena i minerala transportuju i deponuju različitim agensima i procesima (obrušavanjem niz

padinu, vodom, vjetrom, radom ledenjaka...), ili se može nakupiti kombinacijom ova dva procesa.

Matični supstrat se izdvaja po svom značaju kao pedogenetski faktor jer u najvećoj mjeri određuje morfološka, fizička, vodno - fizička, hemijska i biološka svojstva zemljišta. Npr., dubina zemljišta kao jedna od najvažnijih morfoloških osobina zemljišta direktno je povezana sa vrstom matičnog supstrata i njegovoj sklonosti ili otporu raspadanju pod uticajem atmosferilija. Nadalje, raspadanjem ili trošenjem minerala oslobađaju se makroelementi (Ca, Mg, K, P) i mikroelementi (Fe, Mn, Zn, B, Mo, Cu...) koji zatim prelaze u rastvor tla ili bivaju privučeni na adsorptivni kompleks tla odakle ih biljka usvaja. Ovo predstavlja jedan od glavnih mehanizama snabdijevanja biljaka hranivima u svim kopnenim ekosistemima. Kojim od hranjivih (mikro)elemenata će tlo biti dobro snabdjeveno, kojeg hraniva će nedostajati a koje mikroelemente ćemo moguće naći u tlu u količinama koje prelaze dozvoljene vrijednosti za sigurnu biljnu proizvodnju, direktno zavisi od vrste geološke podloge odnosno matičnog supstrata. Prisustvo ili odsustvo baza (Ca, Mg, K i Na) u matičnom supstratu odnosno tlu direktno utiče i na pH vrijednost tla. Nadalje, tekstura tla ili procenat učešća frakcija skeleta - kamena i šljunka i fine zemlje - pjeska, praha i gline u mehaničkom sastavu tla, kao najvažnija i teško promjenjiva fizička karakteristika, najdirektnije je povezana sa prirodnom matičnog supstrata. Jednako tako kretanje, čuvanje i obezbjeđivanje biljci pristupačne vode ali i zraka je povezano sa svojstvima tla nasljeđenim od matičnog supstrata. Čuvanje hraniva od ispiranja i agregacija zemljišta povezani su sa koloidnim svojstvima zemljišta što nas dalje upućuje na količinu i vrste minerala gline i oksida Fe i Al koje opet zavise od matičnog supstrata.

U Pedologiji se često koristi podjela matičnih supstrata na (1) karbonatne: krečnjak, dolomit, lapor, fliš, karbonatni pijesci, les, karbonatne gline, karbonatne breče i (2) silikatne matične supstrate: magmatske stijene i pripadajući sedimenti, škriljci (beskarbonatni), pješčari, gline i sl. uglavnom beskarbonatni supstrati.

### ***1.3.1.1. Najvažniji matični supstrati u našoj zemlji***

Površina Bosne i Hercegovine iznosi 5.125 km<sup>2</sup>. Smještena je u središnjem dijelu Dinarida koji predstavljaju sistem vjenčanih planina u tzv. južnoj grani velikog alpskog orogenog pojasa. Iako relativno mala, kao posljedica duge i dinamične geološke prošlosti, njena površina je predstavljena raznolikim vrstama stijena: (1) sedimentnim stijenama, nastalih taloženjem produkata trošenja površinskih stijena (glinci, pješčari, konglomerati, breče), te biogenog taloženja (krečnjaci i dolomiti, rožnjaci); (2) magmatskim stijenama, nastalih hlađenjem utisnute magme u zemljinu koru (peridotit,

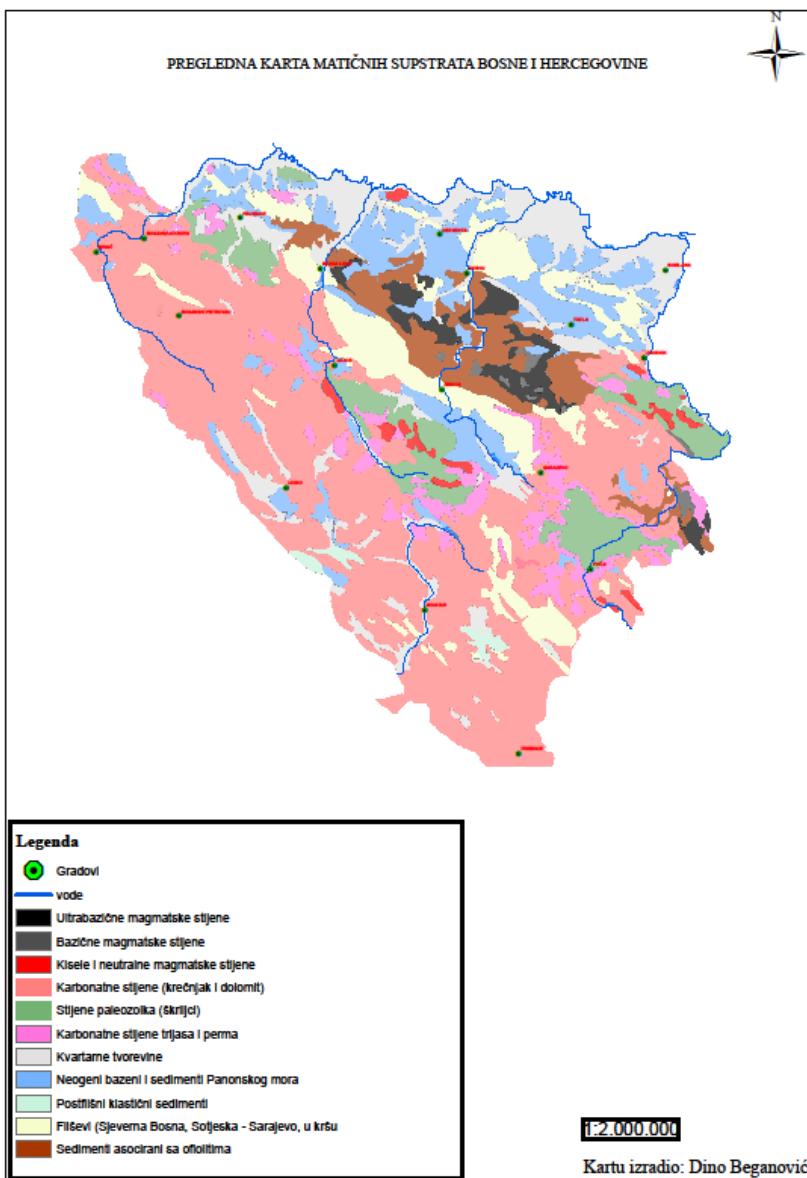
gabro) ili hlađenjem vulkanske lave; i (3) metamorfnim stijenama, nastalih metamorfozom sedimentnih stijena u unutrašnjosti kore uslijed povećanog pritiska i temperature (škriljci). Geološka građa BiH je rezultat [114]:

- pucanja i razdvajanja jedinstvene kontinentalne ploče tj. superkontinenta Pangea, što je dovelo do stvaranja pramediteranskog mora iz okeana Tetisa (na prelazu iz paleozoika u mezozoik),
- procesa sedimentacije, magmatizma i metamorfoze koji su se kroz mezozoik i paleogen odigrali u „mediteranskom“ dijelu Tetisa,
- uzdizanje planinskog vijenca Dinarida u paleogenu; Sudar Afričke i Euroazijske tektonske ploče doveo je do izdizanja dijela dna Tetisa u tzv. alpskoj orogenezi i do nastanka južnog krila Alpa - Dinarida, orijentisanih u pravcu sjeverozapad- jugostok,
- nastanka Panonske potoline, zajedno sa alpskom orogenezom, koja se ispunjava Panonskim morem,
- nastanka brojnih jezera koja zaostaju zarobljena u planinskim kotlinama nakon uzdizanja dna Tetisa; U početku su slana, pa bočata i na kraju slatkovodna, koja zajedno sa Panonskim morem tokom neogena postaju sedimentacioni bazeni,
- period djelovanja eroziono-denudacionih procesa koji su doveli do razvoja i modeliranja ranije nastalih tvorevina i stvaranja mlađih neogeno kvartarnih naslaga.

Na ovaj način se izdvaja nekoliko velikih i jasno izdvojenih kompleksa stijena u geološkoj građi BiH:

- Najstarije **paleozojske** tvorevine koje su predstavljale podlogu na kojoj je obrazovan Tetis. Paleozojske stijene grupisane su u tri veća područja: Srednjebosansko škriljavo gorje - zona oko planine Vranice, Drinska zona koncentrisana oko rijeke Sutjeske i Srebrenice, i područje oko rijeke Sane. Paleozojske tvorevine su predstavljene i sa metamorfnim (škriljavim) i sa magmatskim i sa sedimentnim stijenama.
- Marinske **mezozojske** tvorevine izgrađuju najveći dio reljefa Bosne i Hercegovine, oko 70 %. Formirane pod različitim uvjetima u različitim dijelovima dinaridskog dijela svrstavaju se u tri grupe:
  - a) dominantni dolomitsko-krečnjački kompleks taložen u priobalnom dijelu; Dolomitsko-krečnjački masivi su najzastupljenije matične stijene u našoj zemlji. Za razliku od starijih trijaskih krečnjaka koji su nešto masivniji i tvrđi, jursko-kredski krečnjaci su manje kompaktni i okršeni, stvarajući tako specifičan oblik reljefa holokarst; Najveće mase okršenih krečnjačko-dolomitskih stijena vezane su za jugozapadne dijelove zemlje, tzv. vanjske Dinaride.

- b) flišni kompleksi (složene formacije gdje se na maloj površini i u malim debljinama smjenjuju najčešće meki krečnjaci, lapori, karbonatne gline i karbonatni pijesci) koji su uglavnom taloženi u području kontinentalne padine; Jugozapadna granica flišne zone Sutjeska – Sarajevo – Banja luka – Bosanska Krupa (vidi kartu) predstavlja granicu unutrašnjih Dinarida (sjeverno) i vanjskih Dinarida (južno).
- c) ofiolitski kompleks (bazama bogate magmatske stijene) s pratećim sedimentima, koji je nastao u okeanskom području Tetisa; Flišno-ofiolitski kompleksi su vezani za središnje i sjeverne dijelove zemlje, tzv. unutrašnje Dinaride. Sjeverni kompleks (na karti smeđa i siva boja), tzv. Krivaja - Konjuh ofiolitski kompleks (peridotit, serpentinisani peridotit i gabro) sa svojih (procjenjuje se)  $500 \text{ km}^2$  jedan je od najvećih u Europi. Zajedno sa flišno ofiolitskim kompleksima dolaze zajedno i paleozojske i trijaske karbonatne tvorevine.
- **Neogene** marinske, brakične i slatkovodne tvorevine vezane za Panonsko more i njegovo zatrpanjanje kao i slatkovodni jezerski (tercijarni) sedimenti (bazenski) pretežno neogene, rjeđe oligocenske starosti.
  - **Kvartarne** kao najmlađe rastresite tvorevine mogu se naći u dolinama svih naših rijeka, naročito na sjeveru oko ušća u rijeku Savu gdje prekrivaju starije marinske sedimente Panonskog mora i u kraškim poljima gdje prekrivaju neogene sedimente. Takođe i materijal transportiran padinskim procesima istaložen u podnožju padina (koluvij, deluvij) spada u najmlađe kvartarne sedimente.



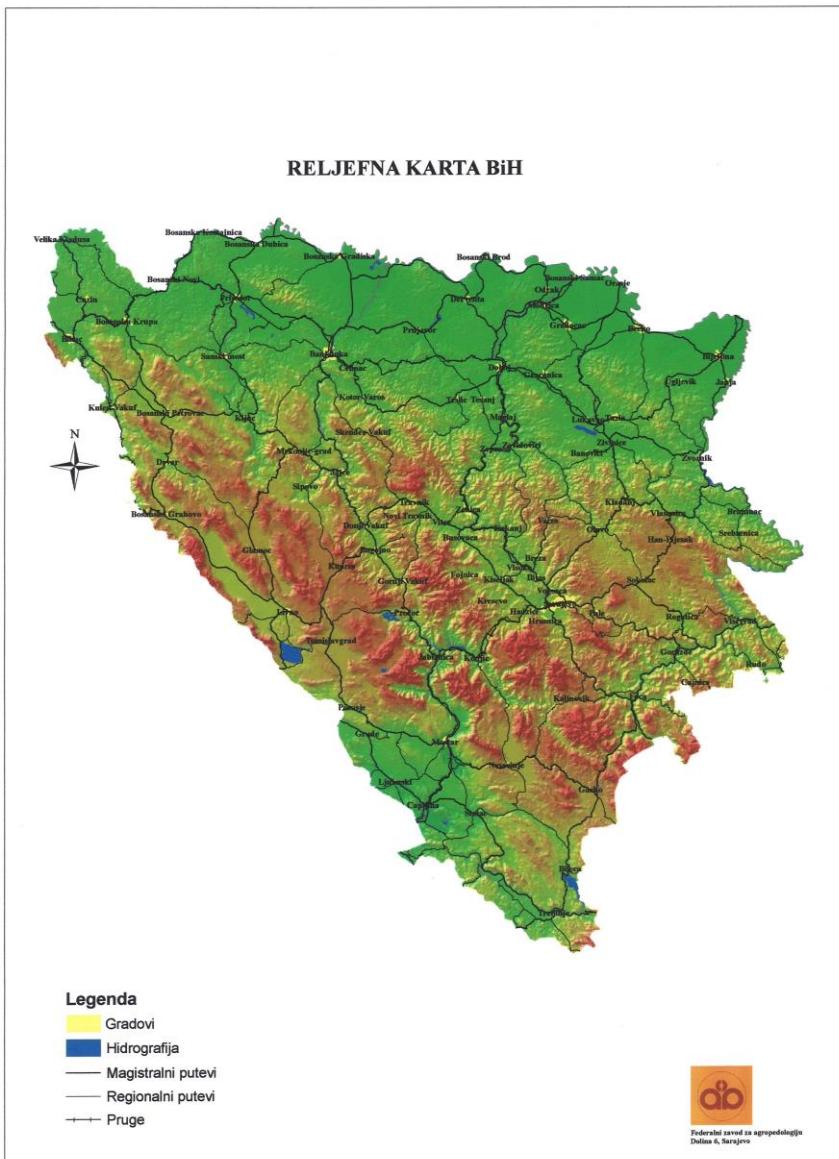
**Slika 1. Matični supstrati u Bosni i Hercegovini,**  
izvor [114]

### **1.3.2. Reljef kao pedogenetski faktor**

Reljef sa svojim udubljenjima i uzvišenjima na zemljinoj površini, preko svojih makro, mezo i mikro formi (visije i nizije, planine i kotline, brda i široke i uske riječne doline, kraška polja, obale, terase u dolinama, nanosi plavljenjem, ravnice, vrtače i uvale, padine, podnožja padina, mikrodepresije i uzvišenja utisnuti u veće forme reljefa...), zatim sa svojim elementima (nadmorskom visinom, nagibom, eksponicijom) jedan je od najznačajnijih faktora postanka i razvoja tla. Prema silama koje utiču na nastanak reljefa razlikujemo:

- tektonske forme reljefa - nastale djelovanjem unutarnjih ili endogenih sile: konvekcijsko kretanje užarene magme u unutrašnjosti zemlje (tektonika ploča), zemljina teža, sunčeva toplota, okretanje Zemlje oko Sunca i oko svoje osi. Ove sile se povezuju sa tektonikom ploča, zemljotresima i eurupcijom vulkana. Njihovim djelovanjem nastaju veliki oblici na zemljinoj površini: tektonske ploče, kontinenti, okeanski bazeni, planine, vulkani, visije, nizije...
- erozioni oblici reljefa - nastali djelovanjem spoljašnjih ili egzogenih sile: sunčeve radijacije te gravitacionim dejstvom Sunca, mjeseca i Zemlje. Najvažniji agensi koji učestvuju u stvaranju erozionih formi na zemljinoj površini su voda, led i vjetar. Postanak formi reljefa se povezuje sa kombinovanim djelovanjem više sile.

Bosna i Hercegovina je većim dijelom planinska zemlja, koja zauzima prostor centralnog dijela planinskog vijenca Dinarida. Na sjeveru, teritorij Bosne i Hercegovine je dio Panonske potoline i taj pojas uz Savu predstavlja zaravnjeni ravnicački dio Bosne i Hercegovine. Teritorij Bosne i Hercegovine može se podijeliti u 4 agroekološke regije od sjevera prema jugu: (1) Ravnicački sjeverni dio uz rijeku Savu i ušća naših najvećih rijeka sa umjereno kontinentalnom klimom, sa najvećim površinama obradivog zemljišta, pogodan za uzgoj ratarskih kultura (kukuruz i pšenica); (2) Nešto južnije uzdiže se brdovita regija oko obronaka Majevice, Trebavca i Kozare i zapadnog dijela Bosne pogodna za uzgoj voćarskih kultura; (3) Visoki planinski lanac Dinarida koji se nastavlja od brdovite regije prema jugu i zauzima središnje dijelove BiH. Karakteriše ga planinska klima, pokrivenost šumama i pašnjacima i pogodan je za stočarsku proizvodnju. Veoma je visok sa prosječnom visinom za našu zemlju od 625 m n.m.. Planinski vijenci orijentisani su u pravcu sjeverozapad-jugoistok i raščlanjeni su kotlinama naših velikih rijeka Drina, Bosna, Vrbas, Una sa nešto blažom klimom, koje su orijentisane u smjeru sjever-jug; Tu su smješteni naši najveći gradovi pa se doline rijeka mogu koristi za plasteničku proizvodnju.



**Slika 2. Reljefna karta Bosne i Hercegovine,**  
(izvor: Federalni zavod za agropedologiju FBiH)

(4) Južni dio naše zemlje oko donjeg toka rijeke Neretve sa Popovim poljem predstavlja Mediteransku Hercegovinu pogodnu za uzgoj mediteranskih kultura (vinova loza, maslina, citrusi). Nešto sjevernije oko gornjeg toka Neretve Hercegovina je dosta visočija i predstavlja tzv. visoku Hercegovinu.

Reljef kao pedogenetski faktor djeluje: preko nagiba i ekspozicije na vodno-zračni režim tla; površinsko i podpovršinsko tečenje vode; preko ekspozicije na količinu toplove koja dospijeva na tlo (topljeni režim); te na intenzitet padinskih procesa (koluvijalni procesi, erozija), počev od raspadanja stijena pa do obrušavanja ili transporta vodom ili ledom produkata trošenja matične stijene i zemljavičnih čestica niz padinu. Pojava klizišta na velikim površinama, sa pokrenutom огромnom masom zemljavičta, pored padavina te vrstom i slijedom geoloških slojeva (porozni vodonosni sloj na nepropusnom glinovitom sloju), povezana je i sa nagibom terena.

Pored direktnog uticaja, reljef djeluje i posredno na postanak i razvoj zemljavičta, svojim uticajem na klimu (prosječno svakih 150 m povećanja nadmorske visine temperatura zraka se smanjuje za 1°C, planinski lanci predstavljaju fizičku branu kretanju vazdušnih masa i sl.), uticajem na hidrografiju (formiranje riječne mreže ili manjih ili većih depresija ispunjenih vodom), uticajem na vrstu i stanje vegetacijskog prekrivača i sl.

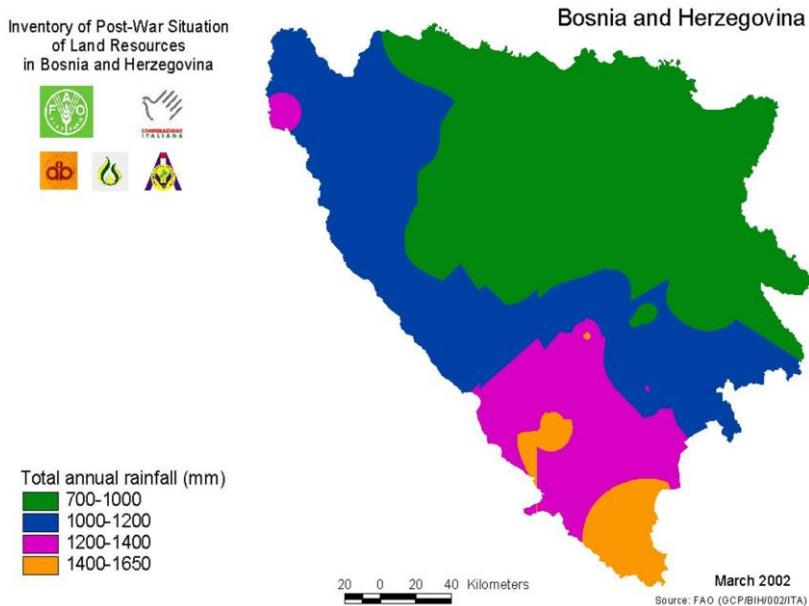
### **1.3.3. Klima kao pedogenetski faktor**

Zagrijevanje atmosfere, vode i tla infracrvenim sunčevim zračenjem upravlja cijelim globalnim klimatskim sistemom. Zagrijevanje atmosfere i mora je najveće u tropskom pojasu i tu se akumulira najveća toplota na Zemlji. Kretanjem toplih vazdušnih masa kao i toplih morskih struja ta akumulirana toplina prenosi se od ekvatora prema polovima, te u interakciji sa drugim faktorima stvara različite klime. Klima preko svojih najvažnijih elemenata: sezonski karakter, količina i raspored padavina, temperatura zraka, vjetrovi, vlažnost zraka, pritisak zraka, trajanje sunčevog sjaja i dr. takođe utiče na sve najznačajnije pedogenetske procese od trošenja, akumulacije humusa, migracije materije i redukcionih procesa u tlu. Vodno-zračni i toplinski uslovi u tlu direktno ovise o klimi. Zemljavičte se zagrijava sunčevim zračenjem utičući tako na intenzitet pedogenetskih procesa i na život organizama tla.

Za fizičko raspadanje stijena i minerala najvažnijim se smatra temperaturno kolebanje na dnevnom i sezonskom nivou. Ono uzrokuje stvaranje pukotina u stijeni na granici uticaja temperaturnih kolebanja (smjena toplo-hladno uzrokuje širenje-skupljanje minerala koji uz to mogu biti i različito obojeni), te posljedično ljuštanje (trošenje) površinskog sloja stijena. Smrzavanjem

vode u pukotinama stvara se led koji ima veću zapreminu i vrši pritisak na okolne stijene što izaziva njihovo fizičko trošenje (sitnjjenje). Vjetrovi mogu da prenose čestice pijeska i praha velikim brzinama i da njihovim sudaranjem sa stijenama utiču na njihovo mehaničko trošenje. Kretanje ledenjaka uslijed smjene ledenih i međuledenih doba i globalnim zatopljenjem uzrokuje fizičko trošenje stijena na tom putu ledenjaka i transport njihovih produkata trošenja do mjesta zaustavljanja ledenjaka.

Hemijsko trošenje minerala najčešće se odvija dejstvom vode (ili vode zajedno sa CO<sub>2</sub>) kada jednostavno rastvara površinske stijene ili hidrolitički preko agresivnog H<sup>+</sup> jona koji istiskuje katione iz kristalne rešetke minerala i uzrokuje njihovo raspadanje.



**Slika 3. Bosna i Hercegovina - Raspored padavina prema količini (mm godišnje)** (Izvor: FAO (GCP BIH/002/ITA))

Padavine su izvor vode u tlu neophodne za biljke i organizme u tlu. Procijedivanjem, vode od padavina ispiru različite zemljишne čestice i rastvorenu materiju u dublje slojeve. Pri slaboj dreniranosti tla padavine površinski oticu niz padinu i učestvuju u odnošenju zemljишnih čestica (erozija) ali i produkata trošenja stijena i minerala. Procijedna voda zaustavljena u profilu tla zbog nepropusnog horizonta ispunjava sve pore (stagnirajuća voda) i stvara anaerobne uslove u tlu uzrokujući redukcione procese u tlu.

### **1.3.4. Organizmi kao pedogenetski faktor**

Organizmi kao faktor nastanka zemljišta djeluju na direktni i indirektni način. Direktno utiču na trošenje matične stijene i minerala. Svjedoci smo u zadnje vrijeme nakon globalnog otopljenja i nestajanja velikih ledenjaka, da na ogoljenim stijenama koje zaostaju nakon povlačenja ledenjaka prve znake života na njima predstavljaju lišajevi, zajednice gljivica i fotosintetskih algi ili cijanobakterija gdje gljivice razlažući stijensku podlogu na kojoj se nalaze obezbjeđuju neophodne nutrijente ovoj zajednici. Nadalje, korijen biljaka prodire u pukotine i širi se stvarajući pritisak na okolne stijene što izaziva njihovo pucanje i sitnjenje ili luči organske kiseline i rastvara okolne minerale.

Direktno uloga organizama kao pedogenskog faktora najbolje se ogleda u procesima humizacije, mineralizacije i humifikacije. Humizacija predstavlja input (unos) životinjskih i biljnih (nadzemnih i podzemnih) ostataka u tlo koji se dalje dijelom mikrobiološki mineralizuju (razlažu do krajnjih produkata  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  i mineralnih tvari) i na taj način obezbjeđuju kruženje hraniva u prirodi (azot N, fosfor P i sumpor S) ili se biohemski humificiraju i tako grade najzastupljeniju formu organskog dijela zemljišta – humus.

Indirektno organizmi djeluju tako što modificiraju djelovanje klimatskih elemenata. Tako, zadržavaju vodu na nadzemnim dijelovima vegetacijskog pokrivača, smanjuju zagrijavanje površine zemljišta i isparavanje, generalno modificiraju prizemnu klimu ali i štite zemljište od erozivnog dejstva pljuskovitih kiša i sl.

### **1.3.5. Čovjek i upravljanje zemljištem**

Naravno, u organizme kao pedogenetski faktor spada i čovjek i njegov uticaj kroz upravljanje zemljištem. Čovjek kultivacijom odnosno kroz prenamjenu prirodnih livadskih, šumskih i močvarnih ekosistema u poljoprivredni mijenja interakciju između svih biotskih i abiotskih faktora unutar ekosistema te direktno mijenja i faktore i procese pedogeneze. Nadalje, korištenjem zemljišta u poljoprivredi čovjek vrši antropogenizaciju poljoprivrednih zemljišta. Monokulturom ili rotacijom usjeva koristi dosta manji broj kultura u odnosu na prirodne ekosisteme; odnošenjem usjeva i paljenjem ostataka usjeva smanjuje input biljnih ostataka u tlo; oranjem i generalno obradom tla homogenizira i prozračuje oranični sloj i pospješuje mineralizaciju organske materije; odvodnjavanjem i navodnjavanjem mijenja vodni režim; aplikacijom mineralnih i organskih đubriva mijenja hemizam zemljišta i njegovu plodnost; primjenom pesticida utiče na život u tlu, hemizam tla ali i generalno na širi okoliš; kalcizacijom mijenja pH,

agregaciju, biološku aktivnost... Na ovaj način čovjek stvara jedan poseban površinski antropogeni površinski horizont koji se označava sa Ap i poseban antropogeni tip tla.

U okviru čovjekovog upravljanja zemljištem treba istaći i aktivnosti koje imaju za cilj pozitivne promjene u njegovoj genezi kroz poslove uređenja, čuvanja (zaštite) i korištenja zemljišta. Takve aktivnosti se provode s ciljem smanjenja degradacije i rekultivacije oštećenih zemljišta. Prije svih, dobre poljoprivredne prakse odnosno konzervacijske mjere korištenja zemljišta (smanjeno ili nikakvo oranje, generalno smanjena obrada i primjena teških mašina, aplikacija organskih đubriva, uvođenje u plodore djetelinsko-travnih smjesa, konturna obrada na padinama, međuredni usjevi, stalna pokrivenost zemljišta, zaoravanje ostataka usjeva, izbjegavanje golog ugara i sl.) sprovode se s ciljem smanjenja degradacije i očuvanja fizičkih, hemijskih i bioloških osobina zemljišta.

Takođe, sanacijom i rekultivacijom degradiranih zemljišnih površina korištenih za površinske kopove rudnika, kamenolome, ili za odlaganje tehnogenih supstrata, čovjek utiče na pedogenezu stvarajući ponovo uslove koji će ovim zemljištima vratiti njihovu prirodnu ekološku funkciju koliko je to moguće.

Generalno za održivo upravljanje zemljištem kao ograničenim i teško obnovljivim prirodnim resursom odgovornost je na svim segmentima društva. Od onih kojih odlučuju tj. vode politike upravljanja zemljištem (na pr. kreiranje zakonske regulative vezane za korištenje, uređenje i zaštitu zemljišta, izrada prostornih planova - definisanje poljoprivrednih površina, izdavanje dozvola za prenamjenu poljoprivrednog u građevinsko zemljište i sl.), preko školskih, visokoškolskih i naučnih ustanova vezanih za zemljište i poljoprivredu, šumarstvo i vodoprivredu, pa do farmera koji primjenjuju različitu agrotehniku i koriste zemljiše za poljoprivrednu proizvodnju i na kraju od krajnjih potrošača poljoprivrednih proizvoda. Svi pobrojani snose dio odgovornosti za održivo upravljanje zemljištem i da ga sačuvaju za buduće generacije koje dolaze.

### 1.3.6. Vrijeme kao pedogenetski faktor

Vrijeme ili **geološka starost područja** važan su faktor postanka tla. Nije isto da li se tlo formira na mladoj vulkanskoj lavi ili površinskim vulkanskim stijenama starim milionima godina. Kada govorimo o našoj zemlji, nije isto da li se tlo formira na mladim kvartarnim sedimentima (fluvijalni i koluvijalni nanosi) ili starijim marinskim sedimentima ili zaravnjenim jezerskim tercijarnim površinama. Naravno da će neka zemljišta u

evolucijskom smislu ili po razvijenosti pedogenetskih procesa biti nerazvijena, neka razvijenija. To upućuje na dinamičnost tla kao prirodne tvorevine. Zemljište sa svojim osobinama (dubina tla; boja, debljina i slijed horizonata; količina organske materije; odnos primarnih i sekundarnih minerala; prisustvo hraniva; prisustvo karbonata; pH vrijednost) nije vječno zadato prirodno tijelo, nego prolazi kroz različite faze tokom vremena. Često se susreće izraz evolucija ili faza razvoja zemljišta. Taj slijed promjena se odvija djelovanjem pedogenetskih procesa uslovjenih uticajem pedogenetskih faktora. I to nikad nije uticaj jednog faktora i odvijanje samo jednog procesa nego je uvjek prisutan uticaj svih pedogenetskih faktora i odvijanje više pedogenetskih procesa istovremeno ali među kojima je određeni proces u nekom vremenskom intervalu najizraženiji ili dominantan. U najvažnije pedogenetske procese u kontekstu evolucije zemljišta od nerazvijenog do razvijenog, ubrajamo:

- fizičko i hemijsko trošenje matične stijene,
- akumulacija organske materije tla i stvaranje organo-mineralnog kompleksa,
- ispiranje karbonata i baza i zakiseljavanje tla,
- intenzivno trošenje primarnih minerala i sinteza sekundarnih minerala, prije svih minerala gline - argilogeneza,
- posmeđivanje podpovršinskog horizonta uslijed izdvajanje dijela Fe iz primarnih silikata (žuto smeđa crvenkasta nijansa podpovršinskog horizonta potiče od novoformiranih Fe oksida getita i hematita),
- migracija minerala gline, humusa, te Al i Fe oksida i hidroksida iz površinskih u dublje slojeve,
- antropogenizacija poljoprivrednih zemljišta,
- oksido-reduktioni procesi u tlima zasićenim padavinskom ili podzemnom vodom, i dr.

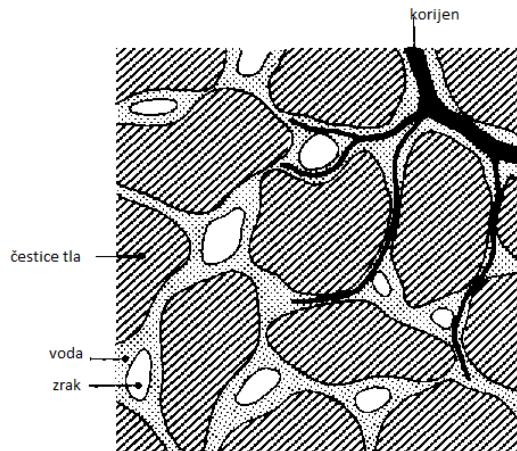
Ovdje treba istaći da koluvijalni procesi, fluvijalni (aluvijalni), eolski i glacijalni procesi iako su značajno uključeni u genezu zemljišta pripadaju geološkim procesima a ne pedogenetskim procesima koji se odvijaju u samom zemljištu.

## 1.4. ZEMLJIŠTE KAO TROFAZNI SISTEM

Sam sastav tla ali i mjesto u prirodi upućuje na to da je zemljишte mjesto susreta i interakcije četiri omotača ili sfere Zemlje: litosfere, biosfere, hidrosfere i atmosfere. Naime, zemljишte je složeni polifazni, polidisperzni sistem izgrađen od tri faze:

1. čvrste faze koju čine mineralni i organski dio,
2. tečne faze koju čini zemljишni rastvor i
3. gasovite faze koju čini zemljishni zrak.

Čvrsta faza zauzima oko 50% zapremine zemljista, dok ostalih oko 50% predstavljaju pore ispunjene tečnom i gasovitom fazom. Tako ukupnu zapreminu zemljista čine zapremina čvrste faze plus zapremina pora. Čvrstu fazu sačinjavaju mineralni dio koji vodi porijeklo iz matičnog supstrata (Litofera) i organski dio koji vodi porijeklo od biljnih i životinjskih ostataka (Biosfera). Tečna i gasovita faza ispunjavaju pore tla. Zrak u tlu je sistemom povezanih pora u kontaktu sa atmosferskim zrakom (Atmosfera). Tečnu fazu tla čini voda (Hidrosfera) i u njoj rastvorene mineralne i organske materije.



**Slika 4. Kompozicija zemljista**  
(izvor: <https://www.fao.org/3/r4082e/r4082e03.htm>)

**Čvrstu fazu tla** čine mineralna faza i organska faza. Fizičke, vodnofizičke i hemijske analize zemljista se bave posebno sa sve četiri faze, međutim, čvrsta faza najvećim dijelom određuje hemijske osobine tla i ona je većim dijelom predmet analiza tla. Najveći dio čvrste faze mineralnih zemljista čini mineralni dio (mineralna faza) sa oko 95 %<sub>mas</sub>, dok organski dio čini oko 5 %<sub>mas</sub>. Izuzetak su organska zemljista, u sistematici tla nazvani Histosoli,

kao i organski horizonti koje često susrećemo u šumskim tlima (Oh) u kojima je udio organske materije veći od 30%<sub>mas</sub>.

**Mineralna faza** zemljišta, koja čini 95%<sub>mas</sub> mineralnih tala, vodi porijeklo iz matičnog supstrata. Predstavlja produkte trošenja matične stijene (geološke podloge) nastao na licu mesta ili nanešen sa strane. Mineralni dio čvrste faze tla čine različiti primarni minerali (porijeklom iz matične stijene) i sekundarni minerali (nastali u zemljištu). Mineralne čestice su različitih dimenzija (tekstura tla), oblika i hemijskog sastava (na pr. silikatni ili karbonatni minerali).

U fizičkom smislu, mineralni dio tla predstavljen je različitim primarnim elementarnim česticama tla koje se ne mogu dalje usitnjavati lakim mehaničkim silama. Prema svojoj veličini elementarne čestice su svrstane u sljedeće frakcije:

- skeleta – čestice veće od 2mm:
  1. kamenje (veće od 20 mm) i
  2. šljunak (20-2 mm)
- fine zemlje ili sitnice – manja od 2 mm:
  1. pijeska (2-0,02 mm),
  2. praha (0,02-0,002 mm)i
  3. gline (čestice manje od 0,002 mm ili 2 mikrona).

Kompozicija ovih primarnih čestica u velikoj mjeri zavisi od matičnog supstrata odnosno tipa tla, ali se razlikuje i po slojevima i horizontima u okviru jednog tla. Primarne čestice ne nalazimo u tlu odvojene jedne od drugih nego skupljene u sekundarne čestice tzv. strukturne aggregate zemljišta različitih veličina i oblika.

Kada govorimo o **prirodi mineralnog dijela zemljišta** on gotovo u cijelosti zavisi od matičnog supstrata od koga vodi porijeklo. Silikati su daleko najzastupljeniji ali i najznačajniji u hemijskom sastavu kontinentalne kore pa tako i u sastavu najvažnijih matičnih supstrata. Od vrste i količine primarnih silikata u matičnom supstratu, dobrim dijelom zavisi opskrbljenošt tla biljnim hranivima jer silikatni matični supstrat može biti bogat ili siromašan akcesornim kationima-bazama (K, Na, Ca, Mg, Fe kao i mikroelementima) i iz kojih se oslobođaju trošenjem a koji u okolišu tla predstavljaju biljna hraniva. Pjeskoviti matični supstrati u kojima dominira inertni anhidrit silicijumove kiseline – mineral kvarc ( $\text{SiO}_2$ ) predstavljaju primjer matičnih supstrata siromašnih hranivima.

Vidimo da jedan dio minerala ulazi u sastav čvrste faze zemljišta preko matičnog supstrata (primarni minerali) dok se drugi dio minerala stvara u tlu tokom pedogenetskih procesa raspadanjem primarnih minerala i sintezom novih minerala od tih produkata raspadanja (sekundarni minerali). Pojednostavljeno govoreći o mineralnom odnosno hemijskom sastavu pojedinih teksturnih frakcija zemljišta, može se reći da u izdvojenim zemljišnim frakcijama preovladava sljedeći mineralni sastav:

- u frakcijama kamenja i šljunka (skeleta) preovladavaju fizički odlomci matičnih stijena od kojih vode porijeklo (sedimentnih, magmatskih, metamorfnih) i krupnijih minerala koji grade te stijene (karbonatni ili silikatni minerali).
- u frakcijama pijeska i praha preovladavaju sljedeći primarni i sekundarni minerali otporniji na raspadanje :
  - *kvarc* –  $\text{SiO}_2$ , koji je otporan na hemijsko raspadanje (hemijski inertan) i samo se fizički usitnjava, može biti primarni (iz matične stijene) i sekundarni (nastao u tlu);
  - *muskovit* -  $\text{KAlSi}_3\text{O}_{10}\text{Al}_2(\text{OH})_2$  (iz grupe liskuna) i
  - *ortoklas* –  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  (iz grupe feldspata) kao primarni K-alumosilikati, minerali koji su takođe otporniji na raspadanje;...

...u mlađim zemljištima ili onim koji nisu izloženi ili skloniji raspadanju pod uticajem vanjskih agenasa, mogu se naći i primarni i sekundarni minerali koji su slabo otporni na raspadanje:

- *plagioklasi* (alumosilikati iz grupe *Ca-Na feldspata*);
  - *feromagnezijski silikati*: *biotit* (iz grupe liskuna), *pirokseni*, *amfiboli* i rjeđe *olivini*;
  - primarni minerali iz grupe sporednih minerala (ruda) koji se nisu raspali: *pirit* ( $\text{FeS}_2$ ), *apatit*  $\text{Ca}_5(\text{F},\text{Cl},\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ , te *magnetit* ( $\text{FeO}$ ) i *primarni hematit* ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )
  - minerali iz grupe karbonata: *kalcit* ( $\text{CaCO}_3$ ), *dolomit* ( $\text{CaCO}_3 \times \text{MgCO}_3$ ),
- u frakciji gline najfinijoj i hemijski najaktivnijoj preovladavaju tzv. sekundarni alumosilikati ili zemljišni minerali i krajnji produkti trošenja primarnih minerala:
    - sekundarni alumosilikati (zemljišni minerali): minerali gline (*kaolinit*, *ilit* i *montmorionit*), *serpentin* i *hlorit*, koji su po hemijskom sastavu listasti alumosilikati sa karakterističnom slojevitom gradom i velikom aktivnom površinom, nastali

- raspadanjem gore pomenutih primarnih silikata i alumosilikata, i
- krajnji produkti raspadanja primarnih minerala:
    - oksidi i hidroksidi Fe: *getit* ( $\text{alfa-FeOOH}$ ), sekundarni *hematit* ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), i *limonit* ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{nH}_2\text{O}$ ),
    - oksidi i hidroksidi Al: *džibosit* (gama- $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), *boksit* ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{nH}_2\text{O}$ ); Oksidi i hidroksidi Fe u odnosu na one Al su nešto zastupljeniji u tlu. Razlog tome je što je veći dio koloidnih i jonskih formi Al oksida i hidroksida zajedno sa jonskim i koloidnim formama oksida i hidroksida Si, resintetisano u sekundarne alumosilikate tj. u minerale gline, serpentin, hlorit i talk [87]; minerali gline i oksidi i hidroksidi Fe i Al se uglavnom javljaju u kristalnim formama, međutim u tlu su prisutne i nihove slabije kristalisale forme minerala,
    - sekundarne soli alkalnih i zemnoalkalnih metala:
      - minerali iz grupe karbonata: *kalcit* ( $\text{CaCO}_3$ ), *dolomit* ( $\text{CaCO}_3 \times \text{MgCO}_3$ ),
      - sulfati: *gips* ( $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ), *anhidrit* ( $\text{CaSO}_4$ );
      - fosfati - *fosforit* ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ),
      - hloridi.

Generalno kada govorimo o opskrbljenosti tla hranivima i prirodi matičnog supstrata važno je prisustvo primarnih minerala fosfata – (mineral apatita) i sulfida (mineral pirita) koji u tlu raspadanjem prelaze u lakše rastvorljive sekundarne fosfatne minerale (fosforit) i sulfatne minerale (gips i anhidrit i dr.) koji uglavnom predstavljaju prirodne izvore neophodnih biljnih hraniva fosfata i sulfata te su tako povezani sa prirodnom plodnošću tla.

Kada govorimo o prirodi matičnog supstrata, pored silikatnih minerala, po svom značaju i složenom uticaju na hemijske osobine zemljišta izdvajaju se karbonatni minerali (najčešće kalcit  $\text{CaCO}_3$  i dolomit  $\text{CaCO}_3 \times \text{MgCO}_3$ ) i produkti njihovog trošenja  $\text{Ca}^{2+}$  ion i hidrogenkarbonatni  $\text{HCO}_3^-$  ion. U zemljištu uglavnom dolaze kao primarni minerali iz matičnog supstrata, a mogu nastati i sekundarno taloženjem iz zemljišnog rastvora. Njihovo prisustvo u većim količinama, kada je pH tla veća od 7, može predstavljati značajan ograničavajući faktor u biljnoj proizvodnji. Mogu izazvati u zemljištu nedostatak nekih važnih biljnih hraniva (fosfata, Fe, mikroelemenata).

Nadalje sekundarni slojeviti alumosilikati posebno minerali gline i njihovi amorfni oblici alofani i imogolit, imaju koloidna svojstva, a to znači veliku aktivnu površinu sa negativnim nanelektrisanjem i sposobnošću da adsorbuju suprotno nanelektrisane katione-hraniva ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) iz rastvora tla

i čuvaju ih od ispiranja. Takođe koloidna gline u prisustvu polivalentnih kationa imaju veliki afinitet i u stvaranju glineno-humusnog kompleksa.

Oksidi i hidroksidi Fe i Al i njihovi slabije kristalni oblici takođe imaju koloidna svojstva (veliku aktivnu površinu, naelektrisanje, sposobnost adsorpcije...). Međutim, za razliku od minerala gline koji imaju negativno nanelektrisanje, Fe i Al hidroksidi, u intervalu pH koji najčešće susrećemo u našim zemljištima, imaju pozitivno nanelektrisanje. Međutim, afinitet privlačenja suprotно nanelektrisanih aniona ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) iz zemljišnog rastvora tla je puno manji nego što je slučaj sa negativnim humusno glinenim koloidima i adsorpcijom kationa ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}^+$ ). Izuzetak je veliki afinitet i specifična adsorpcija fosfatnog ili molibdatnog aniona kojom mogu, iako značajna hraniva, postati nepristupačna biljci. Kao pozitivni koloidi Al i Fe hidroksidi imaju prirodni afinitet u stvaranju kompleksa sa humusnim i mineralnim anionima i utom pogledu igraju značajnu ulogu kako u hemizmu tla tako i u agregaciji čestica tla.

***Organski dio (faza)*** zemljišta vodi porijeklo od biljnih i životinjskih ostataka u i na tlu. Najvažniji input organskih ostataka u tlu je u vidu biljnog korijena. Čovjek takođe unosi organske ostatke u poljoprivredno tlo primjenom organskih đubriva (stajsko i zelenišno đubrivo, kompost). Organsku materiju tla nalazimo u različitim formama ili da kažemo, predstavljena je sa različitim stadijima transformacije biljnih i životinjskih ostataka. Laganu frakciju čine svježi biljni ostataci čije tkivo od kojeg potiče možemo prepoznati golin okom ili pod mikroskopom. Težu frakciju organske materije tla čini biohemski transformisana specifična organska materija crne boje – humus koja je najvećim dijelom vezana sa mineralnom fazom (minerali gline) u organo-mineralni kompleks. U biohemskoj transformaciji organskih ostataka u humus pripremnu ulogu ima fauna tla (naročito gliste) koja se hrani ovim ostacima, usitjava je, probavlja i izlučuje, te na kraju mikroorganizmi tla (gljive, bakterije, alge) kao „transformacione stanice“ zaduženim za nastanak humusa, koje u konačnici nazivamo humifikatorima.

Organsku materiju tla najvećim dijelom (oko 70-90%) čini biohemski transformisani humus. U hemijskom smislu humus predstavlja polimere organskih kiselina sa koloidnim osobinama. U strukturnom smislu formiraju makro molekule sastavljene od centralnog spužvastog jezgra izgrađenog od cikličnih ugljovodonika međusobno povezanih mostićima i sa funkcionalnim grupama, najviše karboksilnim -  $\text{COOH}$  i fenolnim -  $\text{OH}$ . Na spužvasto jezgro vežu se alifatična (lančasta) ugljikova jedinjenja (aminokiseline, aminošećeri). U elementarnom sastavu humusa dominira ugljik/karbon (C) sa masenim udjelom od 52-60 %. Humus kao i glina ima koloidne osobine:

veliku aktivnu površinu, negativno naelektrisanje i sposobnost adsorpcije i čuvanja od ispiranja suprotno naelektrisanih kationa (hraniva).

Humus u tlu se najčešće nalazi vezan za mineralne čestice tla, prije svih za koloidne minerale gline gradeći glineno-humusni kompleks. Na taj način igraju značajnu ulogu u stvaranju povoljne agregatne strukture koja je nosilac svih pozitivnih osobina u tlu. Takođe, u tom kontekstu, značajan je i njihov afinitet za stvaranje organo-mineralnih kompleksa sa Al i Fe (oksi)hidroksidima i sa metalnim jonima (Fe), s kojima može da gradi složene organomineralne komplekse – helate. Sa alkalnim i zemnoalkalnim metalima humusne kiseline grade soli koje se nazivaju humati.

Organska materija u tlu odnosno humus ima pozitivan uticaj na sve osobine zemljišta:

- fizičke osobine – učestvovanjem u agregaciji zemljišnih čestica, odnosno kompleksiranju ili usložnjavanju primarnih elementarnih čestica u tlu i stvaranju povoljne agregatne strukture tla koja je nosilac svih pozitivnih osobina tla; humus se bolje zagrijava zbog karakteristične crne boje,
- vodno-fizičke i zračne osobine – aktivnim učešćem u stvaranju povoljne agregatne strukture i dobre diferencijalne poroznosti (povoljan odnos mikropora, srednjih i makropora) omogućava čuvanje pristupačne vode biljci u srednjim kapilarnim porama ali i procjeđivanje vode u dublje slojeve, kao i prisustvo neophodnog zraka sa O<sub>2</sub> u krupnim porama,
- hemijske osobine – kao izvor važnih biljnih hraniva: azota, fosfora i sumpora (N, P i S) koji se oslobađaju mikrobiološkom mineralizacijom organske materije; nadalje, svojim koloidnim svojstvima povezan je kako sa koagulacijom i agregacijom, tako i adsorpcijom suprotno naelektrisanih iona tj. čuvanjem hraniva od ispiranja, i
- biološke osobine u tlu jer organska materija tla, od svježih organskih ostataka do biohemski transformisanog humusa predstavlja izvor energije (hranu) za organizme u tlu.

**Tečnu fazu** predstavlja u stvari voda sa rastvorenim mineralnim i organskim materijama i koja ispunjava pore tla. Voda u zemljišnim porama najvećim dijelom vodi porijeklo od padavina, navodnjavanja i poplava ili se kapilarno uzdiže iz podzemne vode. Može djelomično ili potpuno da ispunjava pore tla što se izražava kao procenat vlažnosti tla ili vodni potencijal. U normalnim procijednim mineralnim tlima pri retencionom kapacitetu ili kapacitetu zemljišta za držanje (vezanje) vode, procijedne krupne (gravitacijske) pore ispunjava zrak a vezana voda tla se nalazi u sitnim i srednjim ili kapilarnim porama. Voda u srednjim porama koja se drži kapilarnim silama je

uglavnom i voda pristupačna biljkama. Voda se gravitacijski procjeđuje kroz krupne pore.

Voda tla nikad nije u čistom stanju nego se u tlu pojavljuje kao zemljjišni rastvor ili otopina. U zemljjišnom rastvoru koji ispunjava pore se nalaze rastvorene mineralne i organske materije:

- kationi ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ , i dr.) i
- anioni ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  i dr.), koji sa vodom grade pravi rastvor, zatim
- koloidne čestice minerala gline, humusnih kiselina, humusno-glinenog kompleksa, oksida i hidroksida Fe i Al; znači čestice čvrste faze tla u vidu koloidnog rastvora,
- molekule plinova  $\text{O}_2$  i  $\text{CO}_2$  i
- rastvorena organska jedinjenja (produkti razgradnje organskih ostataka i izlučevine korijena).

Kada koncentracija pojedinih soli pređe tačku zasićenja ili pri promjeni redoks uslova može doći do taloženja zemljjišnih minerala (oksidi i hidroksidi Fe, Al i Mn, karbonati, sulfidi) na postojećim mineralnim i organskim površinama u tlu stvarajući obloge ili prevlake.

Tečna faza je zasluzna i za transport rastvorenih materija duž profila tla.

Oblici vode u tlu su:

Higroskopna voda – nastala kondenzacijom vodene pare na površini zemljjišnih čestica. To je najtanji sloj nepokretnih i zgusnutih molekula vode koja okružuje čestice tla i paralelna je s njenom površinom. Karakteristična je za vazdušno suho tlo. Oslobađa se tek zagrijavanjem uzorka tla u peći na  $105^\circ\text{C}$  poslije čega govorimo o absolutno suhom tlu. To je vezana voda koju tlo drži adsorpcijskim silama.

Oprena voda koja kao tanki film obavlja čestice tla unutar nekapilarnih pora. To je sloj molekula vode koji se nastavlja na molekule higriskopske vlage. Takođe je vezana voda i slabo pokretna voda, jakim adsorpcijskim silama se veže za čestice tla, ali kako su molekule oprene vode nešto udaljenije od same čestice tla u odnosu na kapilarnu vlagu, tako su i sile držanja ove vode su našto slabije. Uglavnom nepristupačna voda biljci.

Kapilarna voda - ispunjava uske kapilarne pore, kapilarne fragmente na uglovima pora. To je vezana voda ali i pokretna voda u tlu. Drži se i kreće pod uticajem kapilarnih sila. Ove sile su dosta slabije od adsorpcijskih sila što biljnom korijenu omogućava usvajanje ove vode. Pristupačna voda bljci.

Gravitacijska voda ili slobodna voda, koju tlo ne drži svojim silama (adsorpcijskim i kapilarnim), pokretna je jer na nju djeluju gravitacione sile. Tako se procjeđuje kroz makropore u descedentnom smjeru (prema dole).

Podzemna voda koja se nakuplja na nepropusnom sloju ili horizontu iznad kojih ispunjava sve pore. Nalazimo je na različitim dubinama  $< 2 - 4$  m (6m) od površine tla (bunarska voda), na dubini 1 – 2 m od površine tla i unutar 1 m od površine tla, znači u samom profilu kada izaziva procese oglejavanja zemljišta. [175]. Podzemna voda je slobodna voda koja se slobodno kreće u zavisnosti od nagiba nepropusnog sloja i propusnosti (veličini) pora i u njoj ne djeluju privlačne adsorbciione i kapilarne sile matriksa tla (čestica tla potopljenih u vodi).

Stagnirajuća voda porijeklom od padavina koja se zadržava u profilu tla ili na površini tla. Stagniranje vode izaziva nepropusni horizont ili sloj u profilu tla unutar 80 cm od površine. Pojavljuje se u vlažnim periodima godine kada izaziva procese pseudooglejavanja.

Voda u tlu u obliku leda pripada čvrstoj fazi, i ima uticaja na stvaranje agregatne strukture tla i generalno stvaranja pukotina u tlu.

Voda u obliku vodene pare, koja ne spada u tečnu fazu nego je nalazimo u zraku tla, tj. u porama koje nisu ispunjene tekućom vodom.

**Plinovita (gasovita) faza** predstavlja zrak u tlu, sastavljen od različitih plinova, koji ispunjava pore. Pri kapacitetu tla za držanje vode plinovita faza ispunjava samo krupne pore. Preko pora tla koje su međusobno povezane i možemo da ih posmatramo kao složeni sistem sitnih cjevčica, zrak u tlu je povezan sa atmosferskim zrakom. Ipak po hemijskom sastavu razlikuje se od atmosferskog. Ima manji udio  $O_2$  koji se troši na disanje korijena i organizama te na mineralizaciju biljnih ostataka. Nadalje, zrak u tlu ima veći udio  $CO_2$  u odnosu na atmosferu, a koji se oslobađa disanjem organizama tla i pomenutom mikrobiološkom krajnjom razgradnjom biljnih ostataka - mineralizacijom.

Udio  $CO_2$  u zraku tla ima i pozitivni i negativan ekološki značaj, u zavisnosti od njegove koncentracije u zraku tla. Tako koncentracija  $CO_2$  do 1 % u površinskom horizontu u uslovima normalnog vlaženja poboljšava asimilaciju  $CO_2$  od strane biljaka i tako povećava prinos biljaka. S druge strane visoka koncentracija  $CO_2 > 3\%$ , negativno djeluje na klijanje sjemena, korijen i posljedično prinos. Prisustvo  $CO_2$  u zraku tla značajan je za procese trošenja (karbonatnih) minerala pospješujući njihovo rastvaranja u vodi i

ispiranje nastalih produkata. U jako karbonatnim tlima  $\text{CO}_2$  s vodom stvara  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , smanjuje alkalinost i omogućava prevođenje nekih teško rastvorljivih soli fosfata -  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  u lakše topive i biljkama pristupačne oblike.

Azot ili dušik (N) u zraku tla je značajan za nitrogene bakterije – koji žive u simbiozi sa biljkama (leptirnjače) i one nesimbiotske (slobodne u tlu) koji vrše njegovu fiksaciju u tlu. Sadržaj u tlu minimalno varira zbog uravnoteženih procesa azotofiksacije s jedne strane i procesa denitrifikacije, s druge strane, tj. redukcije nitratnih oblika ( $\text{NO}_3^-$ ) do azotnih oksida ( $\text{N}_x\text{O}$ ) i elementarnog azota ( $\text{N}_2$ ) koji se kao plinovite forme gube iz tla.

Uloga vodene pare u zraku tla je da štiti od sušenja korijenje biljaka i mikroorganizme tla. Osim u plitkom površinskom sloju jako isušenih tala, u ljetnim mjesecima ili u periodima suše, zrak tla je uvijek maksimalno zasićen vodenom parom. Apsolutni sadržaj vodene pare ovisi o njenoj temperaturi, a maksimalno iznosi 4 % vol [175].

Izjednačavanjem parcijalnih pritisaka  $\text{O}_2$  i  $\text{CO}_2$  se stalno uspostavlja dinamička ravnoteža između atmosfere i zraka tla. Pri tome zemljište ispušta višak  $\text{CO}_2$  u atmosferu a iz atmosfere usvaja neophodan kisik  $\text{O}_2$ . Taj proces, sličan disanju živih organizama, naziva se disanje tla ili aeracija.

## **2 ISTRAŽIVANJE ZEMLJIŠTA I UPRAVLJANJE ZEMLJIŠTEM**

U konačnici istraživanja zemljišta se sprovode u cilju podrške onima koji donose odluke vezane za upravljanje zemljištem. Poslovi upravljanja zemljištem podrazumijevaju poslove vezane za korištenje, uređenje i zaštitu zemljišta.

Brojne su skupine ljudi i institucija koje su zainteresirane ili se u svom radu susreću sa potrebom za analizom zemljišta i uopšte pedološkim istraživanjima. Naravno, najčešće su to farmeri koji koriste analize zemljišta na aplikativnom nivou, u okviru redovne periodične kontrole plodnosti tla (svake 2-3 godine), a koja im pomaže u doноšenju odluka o korištenju zemljišta (odabir vrste usjeva: ratarski, povrtlarski, voćnjaci, livade...), te odabir agrotehnike: obrada zemljišta, meliorativna i redovna gnojidba, pedomeliorativne i melioracijske mjere....).

Pored farmera tu su različite političke, tehničke i edukativne institucije koje se bave politikom ili projektovanjem vezanim za upravljanje zemljištem a za donošenje odluka potrebne su im analize zemljišta.

### **2.1. VRSTE ISTRAŽIVANJA ZEMLJIŠTA I ONI KOJIMA SU TA ISTRAŽIVANJA POTREBNA**

Kada govorimo o korisnicima istraživanja zemljišta to su znači prije svih farmeri koji žele zasnovati neki novi poljoprivredni zasad i oni iskusniji farmeri u okviru redovnih periodičnih kontrola plodnosti zemljišta koje već godinama provode na svojim poljoprivrednim parcelama. Kontrola plodnosti podrazumijeva aktivnosti kojima se utvrđuje stanje plodnosti tla i predlaže plan gnojidbe kako bi se ostvario optimalan prinos, a da se pri tome ne ugrozi okoliš tla ali i ispiranjem da gnojiva ili njihovi dijelovi ne dođu do podzemne vode ili drugih površinskih vodenih tijela. Za potrebe kontrole plodnosti tla uzimaju se tzv. prosječni uzorci zemljišta a njihove analize tradicionalno podrazumijevaju pregled stanja osnovnih hemijskih karakteristika tla tj. pokazatelja (indikatora) plodnosti tla kao što su pH vrijednost, prisustvo karbonata, sadržaj organske materije zemljišta - humusa, sadržaj pristupačnih formi hraniwa N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> i K<sub>2</sub>O. Izvještaj o izvršenim analizama u pisanoj formi najčešće prati preporuka meliorativnog i redovnog đubrenja ili gnojidbe na osnovu dobivenih rezultata i poznatih potreba poljoprivredne kulture predviđene za uzgoj ili koja već postoji na analiziranoj parseli.

Nadalje, tu su i zahtjevi za istraživanjem zemljišta onih koji se na drugi način bave problematikom zemljišta. Tu se prije svega misli na one koji se bave aktivnostima vezanim za upravljanje zemljištem tj. poslovima uređenja, korištenja i zaštite poljoprivrednog zemljišta, kako stoji u Zakonu o poljoprivrednom zemljištu [149] a koji podrazumijevaju istraživanje zemljišta u okviru:

- izrade Projekta višenamjenskog vrednovanja kao dijela procesa planiranja korištenja zemljišta i bazne podloge za razvoj poljoprivrede; Projektom višenamjenskog vrednovanja vrši se analiza sadašnjeg načina korištenja, te procjena sadašnje i potencijalne pogodnosti tla/zemljišta za višenamjensko korištenje u poljoprivredi (povrćarstvo, voćarstvo, vinogradarstvo, ratarstvo, stočarstvo, ribarstvo ili dr.), u okviru kojeg se izdvajaju rejoni i podrejoni prioritetnog korištenja i daju se preporuke za uređenje i zaštitu.; Karta pogodnosti zemljišta za višenamjensko korištenje u poljoprivredi sa izdvojenim rejonima sastavni je dio Projekta višenamjenskog vrednovanja zemljišta.
- izrade Karte upotrebine vrijednosti zemljišta koja prije svega podrazumijeva određivanje kvaliteta zemljišta prema bonitetnim kategorijama (od latinske reči *bonitas / bonus*, što u prevodu znači – dobar, vrijedan, kvalitetan, valjan), zatim prema pogodnosti i načinu korištenja zemljišta, uz izdvajanje agrozona prema bonitetu zemljišta. Bonitetne kategorije su definisane prema mogućnosti korištenja zemljišta za poljoprivrednu proizvodnju, uzimajući u obzir njegove prirodne osobine, plodnost i zdravstveno stanje;

Ovdje će se ukratko pojasniti i pojmovi kategorizacija zemljišta te katastarske kulture i klase:

- Pojam kategorizacija zemljišta se odnosi na procjenu upotrebe vrijednosti zemljišta i pri tome se zemljišta svrstavaju u VIII kategorija prema Uputstvu o jedinstvenoj metodologiji za razvrstavanje poljoprivrednog zemljišta u Bonitetne kategorije. Najbolje kategorije ili kategorije najvećeg boniteta označavaju se sa I, a najgore (kamenjari) sa VIII. Na kategorizaciju najviše utiče pored kvaliteta zemljišta, nagib terena i pokrivenost stijenama. Posebno se vrši kategorizacija poljoprivrednih a posebno šumskih tala. Namjena zemljišta u projektima prostornog uređenja utvrđuje se na osnovi Karte upotrebe vrijednosti poljoprivrednog zemljišta i to:
  - zemljište od 1-4. bonitetne kategorije utvrđuje se jedino kao poljoprivredno zemljište;
  - zemljište 5. i 6. bonitetne kategorije utvrđuje se kao poljoprivredno i iznimno, kao zemljište za ostale namjene;

- zemljište 7. i 8. bonitetne kategorije utvrđuje se kao zemljište koje će se prema potrebama koristiti i za druge namjene.
- trstici, močvare, neplodne površine i zemljišta koja služe za posebne namjene se ne bonitiraju.
- Pojmovi katastarske kulture tla i katastarske klase (prema biz. grč. κατάστιχον: popis, registar) se odnose na procjenu porezne osnovice (za oporezivanje prihoda od zemljišta) odnosno na katastarsko klasiranje zemljišta. Tako su zemljišta poredana u 8 katastarskih kultura prema načinu korištenja i proizvodnoj vrijednosti: njiva, vrt, voćnjaci, vinogradi, livada, pašnjaci, šume te na kraju ribnjaci, jezera, bare i trstici. Sljedeće površine se ne klasiraju jer nemaju proizvodne vrijednosti: goleti, sprudovi, majdani kamena, šljunkare, nasipi. U okviru pojedinih kultura postoji i podjela na klase, jer u okviru jedne kulture npr. njiva imaju različite klase tala na osnovu proizvodnih sposobnosti koje se različito oporezuju. Zemljišta pod određenom katastarskom kulturom po svojim proizvodnim sposobnostima mogu biti klasirana u najviše 8 klasa u okviru jedne katastarske opštine i to najčešće na osnovu dubine tla i prinosa koji se može ostvariti na tim parcelama. Na pr.: Katastarska kultura njiva, I klase.

Nadalje, istraživanja zemljišta se rade i u svrhu:

- izvođenja pedoloških i drugih studijsko-istraživačkih radova;
- izvođenja radova na poboljšanju kvaliteta obradivog poljoprivrednog zemljišta (pedomeliorativne mjere kalcizacija i gipsovanje);
- izgradnje meliorativnih sistema na poljoprivrednom zemljištu (hidromeliorativne mjere odvodnje, navodnjavanja i konzervacije zemljišta);
- rekultivacije poljoprivrednog zemljišta koje je korišteno za eksploataciju mineralnih materija (rudnici, kamenolomi) ili odlaganje jalovine i krovinskog materijala sa površinskih kopova rudnika uglja, odlaganje pepela i šljake iz termoelektrana i drugih tehnogenih supstrata;
- utvrđivanja količina opasnih i štetnih materija u poljoprivrednom zemljištu i vodi u sistemima za navodnjavanje i odvodnjavanje;
- pretvaranja neobradivog poljoprivrednog zemljišta u obradivo; Ovdje je važno napomenuti da se poljoprivredno zemljište ne može koristiti u nepoljoprivredne svrhe niti mu se može promijeniti namjena (na pr.: poljoprivredno u građevinsko zemljište) ukoliko nije usaglašena prostorno-planska dokumentacija Federacije i kantona u skladu sa odredbama Zakona o prostornom planiranju i korištenju zemljišta na nivou Federacije Bosne i Hercegovine [150] i ako nije pribavljen

poljoprivredna saglasnost na osnovu Zakona o poljoprivrednom zemljištu [149].

- zaštite zemljišta od erozije vodom i vjetrom, zaštita od klizišta;
- naučnog istraživanja te edukacije i stručnog osposobljavanja koje sprovode poljoprivredni i šumarski fakulteti i srednje škole.

Kvalitet zemljišta se istražuje i za potrebe korištenja zemljišta u tehničke svrhe kao građevinske podloge ili kod izgradnje odbrambenih nasipa, brana i sličnih objekata u koja se ugrađuje zemljišni materijal.

Poseban pristup u zemljišnom istraživanju se vrši u okviru trajnog praćenja kvaliteta poljoprivrednog zemljišta (monitoringa), što podrazumijeva sistemsko i kontinuirano praćenje stanja indikatora kvaliteta tla i promjena u zemljištu i na zemljištu. Monitoring zemljišta vrše specijalizirane ustanove ovlaštene od vlade neke administrativne jedinice. Najčešće se u okviru takvih institucija ili više njih, uspostavlja i održava zemljišno-informacionog sistema (ZIS). ZIS predstavlja sistem registriranja (skupljanja i razvrstavanja), analize i obrade numeričkih baza podataka vezanih za određene zemljišne površine. U okviru ZIS-a skupljaju se podaci iz Geodetske uprave, Federalnog zavoda za agropedologiju, Hidrometeorološkog zavoda, Zemljišno-knjiskog ureda i dr. na bazi tehnologije geografskih informacionih sistema (GIS). Kada se radi o zemljištu tu ulaze podaci: iz pedološke karte, zračni fotosnimci i postojeći satelitski snimci i podaci o sistemskom praćenju i analizi plodnosti poljoprivrednog zemljišta, te podaci o zagađenju i oštećenju zemljišta iz podataka sistemskog praćenja poljoprivrednog zemljišta, poljoprivrednih biljaka i podzemnih voda i sl..

Izdvaja se nekoliko institucija koje u okviru ovih aktivnosti imaju potrebu za pedološkim istraživanjima:

- Ministarstva poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede ili druge organizacione jedinice na državnim, srednjim i lokalnim nivoima vlasti koji donose različite odluke i politike vezane za upravljanje zemljištem, u formi zakona i drugih pravnih akata vezanih za zemljište. Njima rezultati pedoloških istraživanja u vidu procjene kvaliteta tla služe kao podrška u odlučivanju o načinu upravljanja zemljištem u skladu sa specifičnim ciljem i zadacima. Bave se između ostalog izradom strateških planova, prostornih planova, finansiranjem kategorizacije, uređenja i zaštite zemljišta te izradom ZIS-a, prometom državnog zemljišta, izdavanjem okolišnih i građevinskih dozvola, ubiranjem poreza i drugim aktivnostima povezanim sa procjenom kvaliteta zemljišta.
- Agropedološki zavodi ili poljoprivredni instituti koje se između ostalih projektno-istraživačkih radova vezanih za kvalitet tla i upravljanje tlom

vrše i kontrolu plodnosti na aplikativnom nivou. Tu se ističu i poslovi redovnog periodičnog praćenja stanja zemljišnih karakteristika (indikatora kvaliteta) tj. monitoringom zemljišta (monitoring tipološke pripadnosti zemljišta, fizičkih i hemijskih karakteristika zemljišta, ispiranja hraniva, acidifikacije, kao i prisustva različitih zagađivača/polutanata u zemljištu: teških metala i toksičnih elemenata, policikličnih aromatičnih ugljovodonika – PAH-ova, ukupnih naftnih ugljovodonika - TPH, ostataka pesticida ili nekih drugih zagađivača;

- Projektni uredi koji su osposobljeni kadrovski i opremom da se bave specifičnom problematikom vezanom za različite oblike korištenja, uređenja i zaštite zemljišta ili uopšte, procjenom različitih aspekata kvaliteta zemljišta kao jednog od glavnih prirodnih resursa koji se koristi za proizvodnju biomase u poljoprivredi i šumarstvu ali i jednog od primarnih komponenti i elementa stabilnosti svih kopnenih ekosistema. Ovакви uredi se bave i ulogom zemljišta u širem aspektu ekoloških funkcija tla a vezano za šira i specifična okolišna ispitivanja
- Visokoškolske ustanove ili naučni instituti koji pored istraživanja vezanih za procjenu kvaliteta tla i upravljanje zemljištem, između ostalog sprovode naučna istraživanja u smislu održavanja i unapređenja nauke o zemljištu na nacionalnom nivou u koraku sa najnovijim svjetskim trendovima u istraživanju zemljišta;

Zahtjevi pobrojanih institucija u smislu navedenih istraživanja podrazumijevaju puno detaljniju, sveobuhvatniju i pregledniju karakterizaciju istraživanog zemljišta i područja (geografske karakteristike istraživanog područja) koja obično pri uzorkovanju zemljišta pored prosječnih podrazumijeva uzimanje i pojedinačnih uzoraka iz otvorenih pedoloških profila, a najčešće zahtijeva 30 ili više analiza morfoloških, fizičkih, vodno-fizičkih, hemijskih i bioloških karakteristika zemljišta. Takođe i prezentacija ovih rezultata istraživanja uz tabelarni prikaz numeričkih podataka i stručno tumačenje istih, traži i izradu preglednih tematskih karata u GIS tehnologiji.

## **2.2. PROCJENA KVALITETA ZEMLJIŠTA**

Teško je pobrojati sve koji su zainteresirani za analize zemljišta. Ono što je zajedničko svima je potreba za procjenom kvaliteta zemljišta.

Kada govorimo o procjeni kvaliteta zemljišta tražimo odgovor na pitanje: Kako zemljište obavlja svoje funkcije? Tu odmah treba napomenuti da je važno sagledati kako zemljište obavlja sve ekološke funkcije a ne

samo pojedine, recimo ne samo one vezane za proizvodnju biomase nego i one ekološko-regulacijske.

Npr. ne možemo donositi odluke o korištenju zemljišta samo s jednim ciljem, recimo, povećanje pristupačnih hraniva u tlu uz što manje troškove ulaganja. Na osnovu tog jednog cilja može se odabratи sljedeća agrotehnika: intenzifikacija obrade tla, paljenje biljnih ostatka sa parcele, izostavljanje aplikacije organskih đubriva, monokulturni uzgoj... a što za posljedicu ima ubrzavanje mineralizacije organske materije zemljišta i oslobađanje hraniva. Međutim, ovako samo s jednim odabranim ciljem, ne vodimo računa o posljedičnom smanjenju zaliha organske materije koja će u budućnosti izazvati niz negativnih pojava u samom zemljištu - degradaciju zemljišta ali i okoliša kao što su: smanjenje prirodne plodnosti, kvarenje strukture tla, smanjenje vodnog i zračnog kapaciteta, pogoršanje toplotnih svojstava zemljišta, smanjenje kapaciteta čuvanja hraniva od ispiranja, smanjenje pufernih svojstava zemljišta, povećanje emisije stakleničkih plinova u atmosferu prije svih CO<sub>2</sub>, smanjenje moći filtriranja vode koja se procijenjuje kroz tlo kao i smanjenje mehanizama transformacije i imobilizacije u i na zemljište dospjelih štetnih tvari. Na ovaj način zemljište će vrlo ubrzo značajno umanjiti ne samo svoju proizvodnu sposobnost, nego i obavljanje svojih ostalih ekoloških servisa. Kažemo zemljište će izgubiti na kvaliteti.

Vidimo da oni koji odlučuju o korištenju zemljišta da li na aplikativnom nivou kao što su sami poljoprivredni proizvođači - farmeri, ali i oni koji vode politike ili tehničke institucije koje učestvuju u strateškom planiranju ili projektovanju upravljanja zemljištem, moraju uvijek imati na umu multifuncionalnu ulogu zemljišta odnosno sve ekološke funkcije ili servise (usluge) koje zemljište pruža u okolišu.

U ovom kontekstu, jedan od glavnih ciljeva upravljanja kvalitetom zemljišta je naučiti: Kako upravljati zemljištem na način da se ekološke funkcije zemljišta poboljšaju? Prateći promjene u kvaliteti zemljišta (prateći indikatore kvaliteta zemljišta), farmer ili onaj koji odlučuje o korištenju zemljišta može procijeniti da li je primijenjena poljoprivredna praksa ili generalno upravljanje na određenom zemljištu održivo ili ne. Pojednostavljeno, dobija saznanje je li to dobra poljoprivredna praksa ili nije.

Generalno govoreći kvalitativne i kvantitativno mjerljive karakteristike zemljišta, kao indikatori procjene kvaliteta tla, grupisane su u okviru sljedećih osobina (svojstava) zemljišta: morfološke, fizičke, vodno – fizičke (hidropedološke), hemijske i biološke osobine.

O morfološkim osobinama koje predstavljaju vanjska morfološka obilježja (reljef, vegetacija i ost.) i unutrašnja morfološka obilježja (dubina zemljišta, granice i boja horizonata, znaci oglejavanja – mramoriranje, specifične pedodinamske tvorecine i ost.) biće govora u okviru dijela Terenska istraživanja. Fizičke, vodno-fizičke odnosno hidropedološke i hemijske osobine zemljišta obradiće se u dijelu Laboratorijska istraživanja zemljišta, s tim da se pojedina istraživanja vezana za vodno-fizičke karakteristike izvode na terenu u poljskim uslovima.

Fizička komponenta zemljišta povezana je sa teksturom, strukturom i specifičnim gustinama tla, koje određuju, između ostalog, poroznost, sposobnost zadržavanja vode i ukorijenjenost tla [113].

Hemijska komponenta se odnosi na elementarni sastav čvrste, tečne i plinovite faze tla i na interakcije između ovih faza, uključujući pH vrijednost, salinitet, elemente adsorptivnog kompleksa tla, redoks procese u tlu... Hemijska komponenta zajedno sa fizičkim i biološkim komponentama, određuju 'stanje plodnosti' tla.

Biološka komponenta se odnosi na raznovrsnost, brojnost i interakcije organizama u tlu, koje utiču na sposobnost tla za suzbijanje bolesti, na transformaciju organske materije i kruženje hraniva (nutrijenata) u tlu i prirodi, te na agregaciju zemljjišnih elemenata u okviru strukture tla.

Svakodnevno raste svijest da su za upravljanje tlom i proizvodnjom usjeva na održiv način biološke i fizičke komponente plodnosti tla jednako važne kao i hemijska komponenta tla [138]. Međutim, u dosadašnjoj praksi (tradicionalno) samo se nekoliko (uglavnom hemijskih) karakteristika tla koristi u rutinskom ispitivanju tla (često pH, pristupačne forme N, P i K, kao i organska materija tla), uglavnom iz razloga troškova analiza. Više puta se sugeriralo da kombinacije fizičkih, hemijskih i bioloških karakteristika tla i različitih frakcija nutrijenata (hraniva) mogu pružiti bolji uvid u vremensku dinamiku i dostupnost biljnih hranjivih tvari u tlu, a time i više uvida u reakciju (odgovor) usjeva na gnojidbu i upravljanje tlom nego što bi jedna tradicionalna hemijska analiza tla mogla pružiti [27, 89, 101, 174]

Kada govorimo o Procjenama plodnosti tla potrebno je naglasiti da se one uobičajeno temelje na praćenju 'statističkih korelacija' između vrsta analiza, primjenjenih đubriva i visine prinosa. Rezultati ispitivanja plodnosti tla i na osnovu toga primjenjenih vrsta i količina đubriva, moraju biti statistički povezani s rezultatima odgovora tj. prinosima usjeva, mjerena u višegodišnjim poljskim eksperimentima [20, 44, 176]. Ovo posljednje, ispitivanje na terenu, je dosta zahtjevno i stoga često predstavlja prepreku za uvođenje novih, poboljšanih koncepata za ispitivanje tla.

## **2.3. PREDSTAVLJANJE REZULTATA ISTRAŽIVANJA KVALITETA TLA I ZEMLJIŠNI INFORMACIONI SISTEMI – ZIS**

Vidimo da se zbog potrebe za što preglednijim predstavljanjem rezultata istraživanja i procjene kvaliteta zemljišta u okviru finalnog izvještaja, kao i zbog daljnje manipulacije istim u različite svrhe, javila potreba za izradom različitih digitalnih preglednih karata sa pratećim tumačima karata i numeričkim bazama podataka vezanih za morfološke, fizičke i hemijske karakteristike zemljišta i to korištenjem geografskih informacionih sistema GIS-a. Na taj način za određene zemljišne površine, najčešće različite administrativne ili socio-agroekološke cjeline, formiraju se svojevrsni Zemljišni informacioni sistemi ZIS. Ovi numerički podaci i karte sa tumačima mogu da se koriste i na aplikacionom nivou pri korištenju zemljišta od strane farmera ali i u planiranju upravljanjem ili korištenjem zemljišta na nivou onih koji vode politike ili tehničkih institucija.

Tako se pristupa izradi sljedećih preglednih karata:

- Pedoloških karata za predmetno područje, različitog razmjera 1:25.000 i još detaljnijih, sa definisanim granicama i opisom pedosistematskih jedinica.

Za područje Bosne i Hercegovine postoji urađena Pedološka mapa BiH u razmjeri 1:50.000 koja je rađena u periodu od 1964. do 1991. godine. Osnovna pedološka karta BiH se sastoji iz 116 listova koji su podijeljeni u 38 sekcija. Na samim listovima Pedološke mape BiH su izdvojene i označene granice tipova tala ili nižih klasifikacijskih jedinica (označene posebnom bojom) sa mjestima otvorenih pedoloških profila, te sa opisanim dubinama zemljišta, matičnim supstratom, prisustvom karbonata, zadržavanjem vode. Na karti su zadržani prikazi reljefa sa izohipsama i toponimima, naselja, putna mreža, hidrografija i sl. Svaki list Pedološke mape BiH prati Tumač sa opisom karakteristika ispitivanog područja - pedogenskih faktora (geologija, reljef, hidrografija, klima, vegetacijski prekrivač, način korištenja zemljišta), te tabelarni numerički prikaz rezultata analiza fizičkih i hemijskih karakteristika tala u otvorenim profilima. Pedološka mapa BiH postoji i u digitalnom obliku.

- Karte pogodnosti zemljišta kao sastavni dio Projekta višenamjenskog vrednovanja, sa prijedlogom uređenja i zaštite;

- Karte upotrebne vrijednosti zemljišta sa pratećim tumačima u kojima su zemljišta razvrstana u bonitetne kategorije (od najbolje I do najlošije VII kategorije) prema njihovom proizvodnom kvalitetu;
- Karta procjene ugroženosti od erozije zemljišta na osnovu karakteristika zemljišnog prostora (karakteristike reljefa, klime i tla, korištenje, te mjerama uređenja i zaštite tla);
- Različitim Tematskim karata vezanih za prikaz samo pojedine karakteristike zemljišta kao što su pH vrijednost, sadržaj organske materije zemljišta, sadržaj hraniva i sl.

Karte sa pratećim tumačima i numeričkim bazama podataka, koje su rezultat procjene kvaliteta zemljišta, najčešće služe kao podrška onim koji na razne načine odlučuju o upravljanju zemljištem, ali se mogu i preko savjetodavnih službi njihovi podaci kristiti i na aplikativnom nivou u polju.

### **3 KAMERALNO ISTRAŽIVANJE ZEMLJIŠTA**

Generalno kad se govori o pristupu analizi prirodnih resursa pa tako i zemljista na većim površinama (država, entitet, kanton, opština, agroekološka cjelina ili poljoprivredna regija) ono se može razvrstati u nekoliko grupa aktivnosti:

1. kameralkno (kancelarijsko) skupljanje postojećih podataka,
2. preliminarno istraživanja na terenu (rekognosciranje terena),
3. glavno terensko istraživanje – opis, uzorkovanje zemljista i sl.,
4. istraživanja u laboratoriji i
5. pisanje finalnog izvještaja, izrada tematskih karata i formatiranje.

#### **3.1. KAMERALNO ISTRAŽIVANJE VEĆ POSTOJEĆIH PODATAKA O KARAKTERISTIKAMA ISTRAŽIVANOG PODRUČJA I PREDMETU ISTRAŽIVANJA**

Kameralno istraživanje ima preliminarni karakter što znači da predstavlja uvodno tj. istraživanje koje prethodi glavnom istraživanju. Ono je ujedno i kameralno tj. uredsko ili kancelarijsko skupljanje postojećih podataka o opštim karakteristikama istraživanog područja, kao i dosadašnjim istraživanjima zemljista vezanih za specifični cilj aktuelnih istraživanja kako na postojećim površinama tako i uopšte, kako u zemlji tako i na internacionalnom nivou.

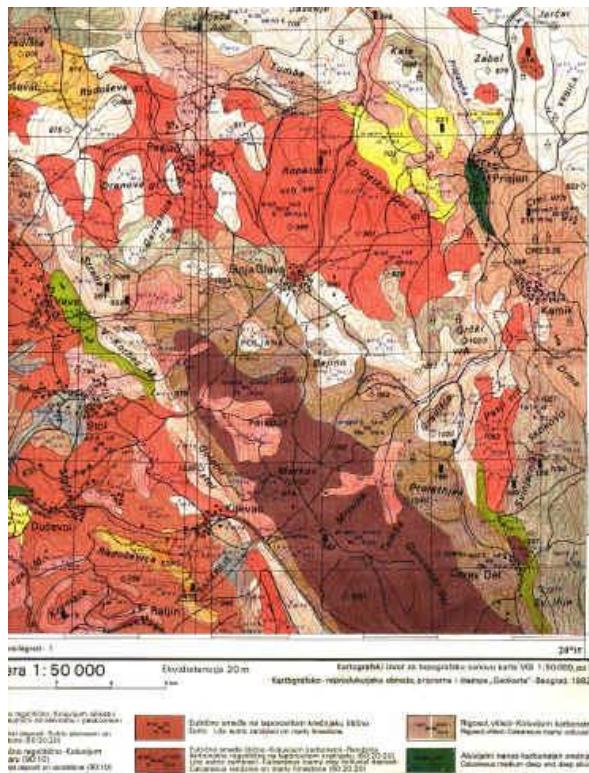
Kada govorimo o karakteristikama istraživanog područja tu se skupljaju podaci vezani za ono što mi u Pedologiji zovemo pedogenetski faktori ili faktori formiranja (postanka i evolucije) zemljista. To podrazumijeva podatke o:

- matičnom supstratu tj. geologiji istraživanog područja,
- reljefu sa hidrografijom,
- tipovima zemljista na istraživanom području,
- klimi,
- vegetacijskom prekrivaču i
- načinu korištenja zemljista.

### 3.1.1. Izvori podataka u kameralnim istraživanjima

Kada se govori o izvoru podataka vezanih za karakteristike istraživanog područja odnosno pedogenetske faktore u tu svrhu koristimo se dostupnima kartama:

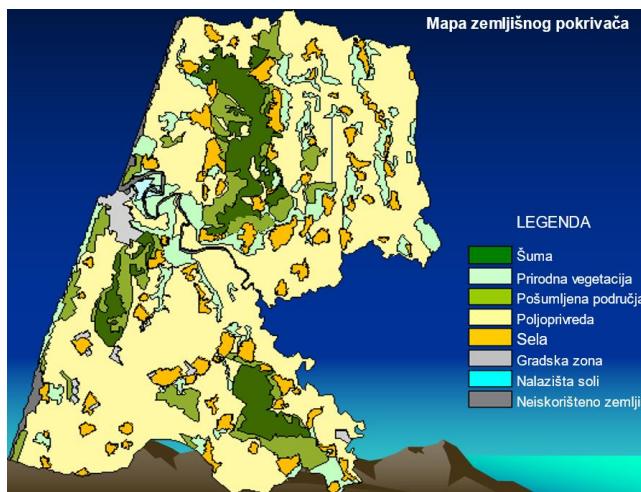
1. Pedološka karta BiH 1:50.000 sa svojih 117 listova organiziranih po sekcijama, na kojima su izdvojene pedosistematske jedinice (tipovi zemljišta), matični supstrat, topografija, sa Tumačem pojedinih listova koji sadrži i opis geologije, klime, načina korištenja zemljišta te numeričke podatke o fizičkim i hemijskim karakteristikama u otvorenim profilima;
2. Detaljnije pedološke karte (razmjera 1:10.000 za nivo kantona ili opštine), ukoliko postoje, sa izdvojenim pedosistematskim jedinicama i njihovim morfološkim, fizičkim i hemijskim karakteristikama, a koje pokrivaju istraživano područje i izrađene su u okviru nekih ranijih studija, projekata ili naučnih radova.;



**Slika 5. Pedološka mapa BiH, sa legendom (photo)**  
(Izvor: Federalni agropedološki zavod)

3. Geološke karte BiH (Osnovna geološka karta BiH; Papeš 1997);
4. Karte reljefa i topografske karte 1:25.000 i detaljnije;
5. Meteorološki godišnjaci u kojima s sakupljeni svi ili samo dio meteoroloških podataka po godinama i to za sve meteorološke stanice u BiH;
6. Karte načina korištenja zemljišnih površina ili karte pokrivenosti zemljišta, ukoliko postoje, na nivou svih administrativno-teritorijalnih cjelina, sa izdvojenim površinama poljoprivrednog, šumskog, močvarnog i zemljišta pokrivenog travnom vegetacijom, zatim površinama pod goleti, vodnim površinama i urbanim područjem a koje takođe pokrivaju istraživanu područje i izrađene su u okviru nekih ranijih studija, projekata ili naučnih radova. Za nivo Bosne i Hercegovine urađena je Karta pokrivenosti zemljišta M 1:200.000 realizirana kao Corine Land Cover (Karta pokrivenosti zemljišta prema Corine metodologiji) [185];

Vrlo je važno imati kartu pokrivenosti zemljišta prilikom planiranja istraživanja. Ukoliko ona ne postoji za ispitivano područje, najčešće se pristupa izradi Karte pokrivenosti zemljišta ili načina korištenja zemljišta. U tu svrhu se prikupljaju satelitski snimci ili avionski snimci ispitivanog područja a zatim se pristupa digitalizaciji na ovim snimcima, pri čemu se izdvajaju površine pod različitim načinima korištenja zemljišnih površina. Na taj način primjenom geografskih informacionih sistema (GIS) se izrađuju digitalne karte pokrivenosti zemljišta za ispitivanu područje.



**Slika 6. Digitalna karta pokrivenosti zemljišta** (Izvor: [24])

U novije vrijeme u praksi se primjenjuju i snimci terena obavljeni sa kamerom instaliranom na dronovima, koji se kasnije mogu koristiti i za digitalizaciju karata ali i generalno za sticanje što kvalitetnijeg i kompletnejeg uvida u stanje i pogotovo na glavne karakteristike istraživanog terena/parcele (reljef, hidrologija, poljoprivredne površine).

Takođe u ove svrhe mogu se koristiti sve detaljnije slike terena i podaci dostupni preko Google Earth aplikacije. Takođe i Geodetski zavodi odnosno ZIS u okviru različitih državnih institucija predstavljaju infrastrukturu geoprostornih podataka o veličinu, obliku i granicama svake katastarske parcele.

Kada se govori o izvoru opisnih i numeričkih podataka o dosad izvršenim analizama zemljišta vezanim za njegove morfološke, fizičke i hemijske karakteristike, tu se pored Pedološke mape BiH takođe koriste analize zemljišta izvršene u okviru:

- ranijih studija,
- projekata,
- naučnih radova vezanih za procjenu kvaliteta istraživanog zemljišta i
- sve dostupne naučne i stručne literature vezano za temu istraživanja.

Sa sakupljenim informacijama detaljnije se upoznajemo sa ispitivanim područjem, pedogenetskim faktorima i osobinama zemljišta. Sa rezultatima sličnih istraživanja kod nas i u svijetu i sa njihovim iskustvima i saznanjima dobijamo još širu sliku o predmetu i cilju istraživanja koja će nam u konačnici pomoći da što bolje dizajniramo metodiku istraživanja, prije svega određivanje mjesta i načina uzorkovanja te vrsta analiza koje ćemo uraditi.

### **3.2. PLAN I DINAMIKA ISTRAŽIVANJA**

Vrlo je važno u okviru preliminarnih istraživanja, a pogotovo kada se radi o obimnim istraživanjima na velikom području, sastaviti i plan i dinamiku istraživanja odnosno popis vrste potrebnih radova i vremenske okvire za realizaciju istih. To je u prvom redu povezano sa samim ciljem istraživanja i površinom istraživanog područja kao i ugovornim obavezama preuzetim od finansijera.

Međutim, kada su u pitanju analize vezane za redovnu kontrolu plodnosti tla na manjim zemljišnim parcelama na kojima će se tek zasnovati zasad ili imamo već zasnovan zasad planirane aktivnosti su dosta kraće i uključuju:

- uzorkovanje prosječnog uzorka; farmer najčešće uz prethodna telefonska uputstva onoga ko će izvršiti analizu (agropedološki zavodi, poljoprivredni instituti, poljoprivredni fakulteti, ovlašteni uredi i agencije za analizu zemljišta) ili uputstva od savjetodavne službe ili agronoma sam uzorkuje svoju parcelu i donosi prosječni uzorak,
- priprema uzorka za izvođenje analiza (evidentiranje, sušenje, sitnjenje, prosijavanje i čuvanje),
- laboratorijske analize osnovnih elemenata plodnosti tla (pH vrijednost u vodi i 1M KCl-u, sadržaj organske materije zemljišta i N, prisustvo karbonata, sadržaj pristupačnih formi hraniva  $K_2O$  i  $P_2O_5$ ) i
- pisanje izvještaja o glavnim elementima plodnosti sa preporukom meliorativnog i osnovnog đubrenja.

Kada govorimo o dinamičkom planu vrijeme potrebno za sušenje uzorka je tri dana i zavisi od stanja vlažnosti uzorka donijetog sa terena kao i od tekture (mehaničkog sastava) zemljišta. Potrebno vrijeme za analiziranje uzorka je dva do tri dana dana (s tim da se analize mogu istovremeno raditi za seriju uzoraka) i jedan dan za tabelarno predstavljanje i tumačenje rezultata analiza kao i preporuku đubrenja, znači ukupno 5 ili 6 dana, uvezvi u obzir i dane vikenda to bi bilo najčešće i najviše 7 dana od donošenja uzorka.

Kada se radi o pedološkom istraživanju na većim površinama, tipa izrada studija i velikih projekata, ili u okviru naučnih radova, plan istraživanja sadrži sljedeće aktivnosti:

- Prikupljanje postojećih podataka o opštim karakteristikama istraživanog područja, rezultata dosadašnjih istraživanja vezanih za sam cilj istraživanja kao i naučne i stručne literature, i to kako na istraživanim površinama tako i uopšte. Pomaže nam u boljem sagledavanju predmetne problematike i preciznijem usmjeravanju plana istraživanja;
- Prikupljanje i pripremu karata neophodnih za istraživanja pogotovo na terenu. Tu su naročito važne: Pedološka karta i Karta pokrivenosti zemljišta. Preklapanjem ovih karata u GIS tehnologiji vidimo koliko ima izdvojenih tzv. specifičnih poljoprivrednih cjelina te koji su najzastupljeniji tipovi zemljišta na tim površinama. Specifične poljoprivredne cjeline predstavljaju u stvari grupisane parcele prema svojim prostornim, reliefskim, hidrološkim ili vegetacijskim osobinama. Ovo preklapanje karata je pogotovo važno za određivanja okvirnog broja i vrste uzorkovanja;

Npr.: uvidom u Kartu pokrivenosti zemljišta na području određene opštine izdvajaju se dvije prirodne poljoprivredne cjeline, poljoprivredno zemljište na nešto višem brežuljkastom terenu okruženo šumama i planinskim

goletima gdje od načina korištenje preovladavaju livade i voćnjaci, te poljoprivredno zemljište u nizini, u dolini rijeke, okruženo vodotocima i urbanim površinama gdje od načina korištenja preovladavaju njive i vrtovi. Preklapanjem karte pokrivenosti zemljišta sa pedološkom kartom otkrivamo da na pr. na 2.500 ha poljoprivrednih površina u dolini rijeke imamo izdvojena 4 tipa zemljišta prema zastupljenosti: Pseudoglej 40%, Humofluvigelj-Livadsko tlo 25%, Eutrično smeđe 20% i Fluvisol 15 %, dok na brežuljkastom terenu dominiraju: Distrično smeđe zemljište 60%, Eutrično smeđe 30% i Pseudoglej 10% od ukupnih poljoprivrednih površina koje iznose 1.500 ha.

- Određivanje mjesta, vrste uzorkovanja (profil, poluprofil, jama, bušotina, prosječan uzorak) i ukupnog broja uzorkovanja: u smislu daljnog planiranja, obaveza nam je unaprijed definisanim mjestima uzorkovanja prekriti sve izdvojene poljoprivredne cjeline i što više ili sve posebne površine u okviru njih. Jedan od glavnih principa planiranja je da se otvoriti pedološki profil na svim pedosistematskim jedinicama evidentiranim na poljoprivrednim površinama i na svakom karakterističnom obliku reljefa. Međutim to znatno poskupljuje troškove istraživanja, pa u tom slučaju treba, po mogućnosti, planirati otvoriti pedološki profil barem na onom tipu tla koji je dominantan ili najzastupljeniji u promatranoj poljoprivrednoj cjelini. Također jedan od ciljeva je i otvaranje poluprofila ili pedoloških jama na manje zastupljenim pedosistematskim jedinicama ili specifičnim površinama.

Sva planirana mjesta i vrsta uzorkovanja unesu se u radne karte koje će se koristiti na terenu.

Npr.: To znači da ako nam finansijske mogućnosti dozvoljavaju otvaranje 4 pedološka profila, mi bi u gore pomenutom primjeru, pedološke profile otvorili na Pseudogleju i Humofluvisolu u dolini rijeke te na Distričnom i Eutičnom smeđem tlu na brežuljkastom području kao najzastupljenijim tipovima tala. Ukoliko finansijski i vremenski uslovi to omogućavaju, dobro bi bilo otvoriti i profil na Eutričnom smeđem u dolini rijeka, a u svakom slučaju otvoriti poluprofil ili pedološku jamu na svim ostalim evidentiranim tipovima tla na poljoprivrednim površinama.

U tom kontekstu u okviru daljnog planiranja aktivnosti definiše se:

- određivanje broja i mjesta preliminarnog sondiranja zemljišta,
- određivanje okvirnog broja i mjesta otvaranja pedoloških profila (ucrtaju se na radnoj karti, najčešće preklopljenoj Karti načina korištenja zemljišta ili Pedološkoj karti i geografskim kartama sa ucrtanom putnom mrežom),
- određivanje broja i mjesta otvaranja poluprofila i jama (ucrtaju se na radnoj karti),

- određivanje broja uzoraka u poremećenom i neporemećenom stanju koji bi se uzeli po genetskim horizontima otvorenih profila, poluprofila i pedoloških jama,
- određivanje broja i mesta uzimanja prosječnih uzoraka (ucrtaju se na radnoj karti),
- određivanje broja i mesta uzimanja pojedinačnih uzoraka iz bušotina sondom,
- vrsta vanjskih i unutarnjih morfoloških osobina koje se traže sa terena,
- vrste analiza fizičkih i hemijskih osobina koje bi se uradile na uzorcima uzetim iz profila, prosječnim uzorcima i uzorcima iz bušotina, posebno naglasiti one koje bi se izvodile na terenu a koje bi se izvodile u laboratoriji,
- formiranje terenskih grupa (ukupni broj grupa i broj članova svake grupe), obezbjeđenje njihovog prevoznog sredstva, opreme za uzorkovanje i terenski rad, te obezbjeđenje smještaja; Uvijek je važno da vođa grupe bude pedolog sa iskustvom u pratnji mlađih kolega,
- podjela pojedinih lokaliteta istraživanog područja po formiranim grupama, na način da se sve grupe podjednako opterete po vrsti i broju uzoraka,
- određivanje laboratorijske ili više laboratorijske za suksesivno vršenje pojedinih analiza zemljišta, te
- podjela zadatka u obradi dobivenih podataka, izradi finalnih mapi i baze podataka te pisanju finalnog izvještaja.

Kada govorimo o dinamičkom planu istraživanja on se odnosi na okvirno ali ipak što je moguće preciznije definisanje datuma i vremenskih intervala potrebnih za izvršenje pojedinačnih aktivnosti vezanih za istraživanje. Kada se radi o velikim istraživanjima tipa izrada studija i velikih projekata za velike teritorijalne celine, ili kada se radi o izradi naučnih radova, zbog obima i složenosti poslova i broja učesnika u projektu dinamički plan treba sadržavati što je preciznije datume i vremenske intervale.

Tu generalno treba voditi računa da se preliminarna kancelarijska istraživanja i priprema karata odvija u vremenski nepovolnjim prilikama za rad na terenu, znači u kasnu jesen-zimu, dok izlazak na teren treba planirati odmah u proljeće kad vremenske prilike to omoguće, sa sedmičnom dostavom uzoraka laboratorijsama za analizu zemljišta. U tom smislu potrebno je redovno pratiti i višednevnu vremensku prognozu (moguće ekstremne padavine ali i ekstremne temperature) s ciljem što preciznijeg planiranja Paralelno sa laboratorijskim analizama, potrebno je vršiti i suksesivnu obradu dobivenih rezultata odmah po završetku analiza. Pisanje izvještaja, izrada karata se najčešće vrši po kompletno obavljenom uzorkovanju i analizi zemljišta, s tim da se ostavi vremena za dodatna detaljnija ili ponovljena uzorkavanja i analize ukoliko se za to ukaže potreba.

To se najčešće radi kada dobiveni rezultati odudaraju od očekivanih ili uobičajenih ili pokazuju neke nove trendove pa se javlja potreba za ponovljenim ili dodatnim detaljnijim istraživanjima.

Kod izrade plana i dinamike istraživanja jedan od ključnih faktora su i ugovorne obaveze o dinamici finansiranja i rokovima završetka između onog ko finansira istraživanje – naručitelja i onog ko to istraživanje provodi. To se prije svega odnosi na broj i vrstu uzorkovanja, vrste analiza, vrsta preglednih karata kao i sam krajnji rok dostave finalnog Izvještaja o provedenim istraživanjima. Naravno, vrlo važnu ulogu ima i dostava prvih finansijskih sredstava za početak istraživanja.

## **4 TERENSKA ISTRAŽIVANJA**

Postoje dvije vrste obaveznih radnji vezanih za rad na terenu kada su u pitanju obimnija pedološka istraživanja na većim ispitivanim površinama. To su:

- prvi ili preliminarni izlasci na teren radi upoznavanja i rekognosciranja terena, i
- glavno terensko istraživanje ili u užem smislu izlasci na teren radi otvaranja pedoloških profila, opisa morfoloških obilježja i uzorkovanja zemljišta.

### **4.1. OPREMA I PRIBOR ZA ISTRAŽIVANJA NA TERENU**

U svakom slučaju neophodni su oprema i pribor za istraživanja na terenu. U opremu i pribor za terenska istraživanja odnosno za sondiranje zemljišta, iskop profila, uzimanje pojedinačnih i prosječnih uzoraka tla spadaju:

- GPS (Geographic Position System) uređaj za određivanje geografske pozicije tj. geografskih koordinata, najčešće mjesta uzorkovanja zemljišta,
- topografske, pedološke, karte pokrivenosti i radne karte zavisno od vrste istraživanja,
- sonde i svrdla sa nastavcima za bušenje i uzimanje/izvlačenje jezgra ispitivanog zemljišta, čekić (bat) za nabijanje sondi u zemljište, postoje specijalne sonde za pjeskovita, organska, skeletna ili zemljišta pod vodom.



**Slika 7. Sonde (odozdo prema gore): sonda za uzorkovanje obala i terena sa visokim nivoom podzemne vode, Edelmanovo svrdlo sa produžetkom i obična sonda sa čekićem za nabijanje (photo: Tvica M.)**

- alat za kopanje pedoloških profila, poluprofila i jama: hašov, lopata i kramp,
- pribor za uzimanje uzoraka u neporemećenom stanju, iz profila zemljišta po genetskim horizontima: metalni cilindri/prstenovi za uzimanje jezgra zemlje sa kutijom, nosač ili držač cilindra i njegov stabilizator, te gumeni čekić za nabijanje nosača cilindra u zemlju. Najčešće su u upotabi cilindri Kopeckog zapremine 100 cm<sup>3</sup> a mogu i veće zapremine naročito za uzorkovanje treseta.
- pedološki nož i lopatice,
- vrećice za spremanje uzoraka u poremećenom stanju uzetih iz profila po horizontima (plastične, platinene),
- o broju, profilu, dubini i ostalim specifičnostima uzorka (gotov formular) koji se ispunjava grafitnom olovkom i ubauje u vrećicu sa uzorkom.
- etikete sa odštampanim podacima za označavanje broja uzorka, broja profila, horizonta, dubine, parcele i lokaliteta sa kojeg je uzet. Papirić se kao gotov formular ispunjava grafitnom olovkom i ubacuje u plastičnu kesu sa uzorkom u poremećenom stanju. Ukoliko bi koristili hemijsku olovku oznake bi se razmazale uslijed vlage u zemljištu,
- marker crni, za označavanje broja uzorka, broja profila, dubine sa koje je uzet i parcele, na vanjskoj strani plastične kese,
- plastificirani papir na kojim je velikim slovima napisan broj profila, poluprofila ili jame. Koristi se za fotografisanje tek otvorenog profila tako da broj profila bude jasno vidljiv na fotografiji. Olakšava kasnije memoriranje i manipulaciju sa fotografijama sa terena.
- pribor za uzimanje monolita (epruvete i vata), u epruvetu se stavljuju uzorci tla iz pojedinih horizonata a između njih vata, tako da dobijemo slikovit prikaz sklopa profila,
- drveni metar za određivanje dubine i debljine genetskih horizonata (mjerna traka),
- zastavice koje se zabijaju na granicama parcela ili klasifikacionih jedinica zemljišta,
- boćica sa razblaženom HCl (1:3 ili 10%) radi utvrđivanja prisustva karbonata u profilu ili u uzorku,
- univerzalni indikator za mjerjenje pH vrijednosti sa keramičkom pločicom na kojoj se vrši tretiranje uzorka tla po horizontima sa univerzalnim indikatorom,
- teka ili rokovnik sa vodootpornim koricama za vođenje evidencije i zabilješki svih zapažanja na terenu: mjestu i broju profila, datumu, vlasniku parcele i lokalitetu, vremenskim prilikama, vlažnosti

zemljišta po horizontima, učesnicima u uzorkovanju, vanjskim obilježjima (način korištenja zemljišta i reljef) i unutarnjim obilježjima otvorenih profila, slijedu horizontata, brojevima cilindara po horizontima i brojevima uzoraka u plastičnim kesama uzetih u 3 ili 4 ponavljanja po genetskim horizontima, specifičnim pedodinamskim tvorevinama;

Treba uvijek imati na umu da ništa što se desi na terenu ili prilikom uzorkovanja nije nepotrebno i nevažno za zapisati kako nam se u trenutku može učiniti, nego baš naprotiv, sve je važno za zapisati u dnevnik terenskog rada jer sve napisano se kasnije koristi i može puno pomoći pri tumačenju rezultata analiza,

- Munselov katalog boja za određivanje boje horizontata,
- terenski auto za prevoz sa spremištem za pribor i uzorke,
- pametni mobitel ili fotografski aparat jer se svaka radnja ili zanimljivost moraju dokumentirati fotografijom i
- veliki kišobrani.



**Slika 8. Oprema i pribor za sondiranje zemljišta, iskop profila, uzimanje pojedinačnih i prosječnih uzoraka tla** (photo: Tvica M.)

## **4.2. PRVI ILI PRELIMINARNI IZLASCI NA TEREN I REKOGNOSCIRANJE TERENA**

Nakon kancelarijske obrade podataka, prvi ili preliminarni izlasci na teren i rekognosciranje terena odnosno zemljишnog prostora koji je predmet istraživanja i na kojima će se izvršiti uzorkovanje vrše se iz nekoliko razloga:

- Upoznavanje sa područjem istraživanja i njegovim karakteristikama: matičnim supstratom, tipovima tala, reljefom, klimom, hidrografijom, podzemnim vodama, vegetacijom (pokrivenosti zemljišta), ljudskim zahvatima na terenu, načinom korištenja zemljišta. Ključno preliminarno istraživanje terena se obavlja uvidom u matični supstrat i tipove tla koje utvrđujemo zapažanjima na usjecima puteva, iskopima, gradilištima, kanalima, odronima gdje god je moguće stići uvid u sklop profila i matični supstrat njegovim neposrednim osvježivanjem tj. skidanjem površinskog sloja izloženog vremenskom uticaju;
- Istovremeno sa upoznavanjem sa karakteristikama istraživanog područja na licu mesta provjeravamo i tačnost podataka koje imamo u prikupljenim pedološkim, geološkim, topografskim kartama, te kartama pokrivenosti zemljišta (sve karte nosimo na teren) tako što ih usporedimo sa podacima koje zateknemo na terenu, jer moguće da je u međuvremenu došlo do izmjene stanja na terenu ili jednostavno prikupljene karte su u sitnom mjerlu (1:100.000 ili više) i ne daju detaljne i precizne podatke o istraživanom području.

Posebne aktivnosti u okviru rekognosciranja terena predstavlja i sondiranje istraživanih zemljишnih površina. Sondiranje terena predstavlja uzimanje uzoraka tla sondom a može i svrdлом sa poznatih dubina. Cilj sondiranja zemljišta je da se utvrdi tipološka pripadnost sondiranog tla te zastupljenost i rasprostranjenost pojedinih pedosistematskih jedinica tala na istraživanoj površini kao i granice između pojedinih jedinica. Takođe rezultate sondiranja poređimo sa podacima o tipološkoj pripadnosti na dostupnim pedološkim kartama, i na kraju ta opažanja koristimo za opreciznije određivanje granica između sistematskih jedinica tala te definisanje mjesta, vrste i broja uzorkovanja.

- Preliminarnim izlaskom na teren pored upoznavanja sa istraživanim područjem i provjerom prikupljenih podataka sa karata sa stanjem na terenu, stičemo i neophodna iskustva za što je moguće preciznije i kvalitetnije definisanje mjesta, vrste i broja uzorkovanja
- Razgovori/intervjui sa mještanima, farmerima, koncesionarima i uopšte korisnicima poljoprivrednog zemljišta o historijatu korištenja parcele i

uopšte o upravljanju ispitavanim zemljištima predstavlja jednu od najvažnijih i nezaobilaznih aktivnosti rada na terenu. Skupljaju se podaci o istraživanoj parceli vezani za: smjenu usjeva, primjenjenoj agrotehnici, vrstama i količini đubrenja (posebno obratiti pažnju na primjenu organskih đubriva - stajnjaka čija količina se može povezati sa vrstom i brojem domaćih životinja na mješovitoj farmi), zatim tu su podaci o prinosima, kvalitetu, sigurnosti proizvodnje, melioracijskim zahvatima, načinu obrade...

Jednako tako razgovorom/intervjuom se skupljaju se i podaci o širim aspektima problematike vezane za ispitivanje zemljišta (strategije, planovi i akcije na ispitivanim površinama) razgovori se vode sa odgovornim ljudima iz javnog i političkog života: nevladine organizacije vezane za zaštitu okoliša, lokalne razvojne agencije i akcijske grupe, političari...

Važno je napomenuti da sva ova zapažanja sa preliminarnih izlazaka na teren detaljno zapisujemo u dnevnik terenskih istraživanja.

Tumačenjem sakupljenih saznanja sa terena na prikupljenim kartama skiciramo mjesta za uzimanje uzoraka zemljišta za detaljnije analize.

#### **4.2.1. Sondiranje zemljišta u sklopu rekognosciranja terena**

Bušenja tla različitim vrstama sondi ili svrdla na površinama izdvojenim na osnovu postojećih karata, reljefa, matičnog supstrata, pokrova ili neke druge specifičnosti i uzimanje/izvlačenje uzorka u obliku zemljišnog jezgra koje se naziva jednim imenom sondiranje vrši se najčešće zbog jednog od ova tri razloga:

- u okviru rekognosciranja terena,
- uzimanja pojedinačnih uzorka i
- uzimanja prosječnih uzoraka.

Prva uzorkovanja zemljišta najčešće se vrše sondiranjem u okviru rekognosciranja terena. U okviru preliminarnog terenskog istraživanja kako je već opisano, sondiranje terena se izvodi radi utvrđivanja o kojim tipovima tla na određenom području se radi i granicama njihove rasprostranjenosti i usporedba ovih zapažanja sa granicama na postojećoj pedološkoj karti.

Sam postupak uzorkovanja zemljišta sondom je nešto lakši i jednostavniji nego uzorkovanje hašovom. Prvo se uklanjuju biljni ostataci sa površine zemljišta a potom utiskujemo ili zabijamo sondu čekićem ili utiskujemo svrdlo kružnim okretanjem do željene dubine. Tokom zabijanja sonde u tlo, povremeno, vršimo kružno okretanje sonde u zemljištu. Izvlačenje sonde zajedno sa jezgrom zemljišta u njoj vrši se pažljivo uz kružno okretanje sonde.

Na uzorku zemljišta iz sonde vidimo debljinu (moćnost) površinskog humusno akumulativnog horizonta, njegovu boju, strukturu, mehanički sastav, zatim može se ispitati pH vrijednost, prisustvo karbonata,... isto tako i za podpovršinske horizonte (zavisi od dužine sonde ili od mogućnosti da se što dublje zabije u tlo), što nam u konačnici daje uvid u stvarno stanje o sklopu profila tj. slijedu horizonata i kojim tipovima zemljišta se radi i njihovo rasprostranjenosti na terenu.



**Slika 9. Sondiranje zemljišta, na jezgru tla izvučenog sondom  
vidi se slijed površinskih horizonata** (photo: Tvica M.)

Ukoliko se radi u bušenju svrdlom, sukcesivnim slaganjem pojedinačnih izvadaka iz svrdla po dubini takođe stičemo sliku o broju i vrsti genetskih horizonata te sklopu profila (na osnovu gore pomenutih unutarnjih morfoloških obilježja).



**Slika 10. Uzorkovanje Tresetnog tla-Histosola svrdlom sa poznate dubine, vidi se kontakt tresetnog horizonta (crna boja tla) sa glinovitom podlogom (bijela boja)** (photo: Tvica M.)

Uvid u sklop profila ili slijed pedogenetskih horizonata, te uvid u ostale fizičke i hemijske karakteristike stećeno sondiranjem, pomaže nam u određivanju tipološke pripadnosti te se nakon toga utvrđeno stanje sa terena poredi se sa pedološkim kartama i pristupa se preciznijem određivanju granica među različitim tipovima zemljišta te određivanju lokacija za otvaranje profila, poluprofila i pedoloških jama i uopšte uzorkovanje zemljišta u okviru istraživanja.

#### **4.3. GLAVNO ISTRAŽIVANJE NA TERENU- UZORKOVANJE ZEMLJIŠTA**

Nakon rekognosciranja terena, u dalnjem istraživanju, obaveza nam je preciznije definisati mesta uzorkovanja na samom terenu, vodeći računa da ona budu u okviru prethodno planiranog broja, mesta i vrste uzorkovanja označenim na radnim kartama. Naravno minimalna odstupanja u broju i vrsti uzorkovanja su dozvoljena, jer nakon rekognosciranja i obilaska terena uvijek se uvide neke specifičnosti koje nisu bile vidljive na kartama, što produbljuje ili pojednostavljuje istraživanja i mijenja broj uzorkovanja. Cilj

nam je dakle, kako smo naveli u planu i dinamici rada, prekriti sve izdvojene poljoprivredne cjeline istraživanog područja i što više ili sve posebne površine u okviru njih: različite sistematske jedinice zemljišta, površine pod različitim načinom korištenja zemljišta (oranice, voćnjaci, travnate površine, u zavisnosti od vrste istraživanja i šumsko zemljište), površine sa posebnostima u reljefu, hidrologiji i svakoj drugoj specifičnosti evidentiranoj na karti ili na terenu.

Ukupan broj iskopanih/otvorenih profila ovisi o pedosistematskoj raznolikosti terena ali i o potrebi za što preciznijim dijagnosticiranjem terena koji je definisan ciljem istraživanja ili preuzetom ugovornom obavezom. Kako se pedološki profil otvara i proučava se da se stekne opšti dojam o tipološkoj pripadnosti zemljišta, osnovno proučavanje pri kojem se određuju podtipovi zemljišta podrazumijeva otvaranje 1 profila najčešće na 100 ha (po nekim autorima do 400 ha), dok detaljnija proučavanja zemljišta (na nivou varijeteta) podrazumijeva otvaranje jednog profila na 5-10 ha [118].

Nakon što su precizno određena mjesta za uzimanje uzoraka zemljišta pristupa se glavnom terenskom istraživanju – uzorkovanju zemljišta ili postavljanju ogleda, zavisno o vrsti istraživanja koje se provodi.

Uzorkovanje zemljišta se vrši kroz:

- iskop pedoloških profila (poluprofila i jama) i opis unutrašnjih i vanjskih morfoloških osobina,
- uzimanje pojedinačnih uzoraka u poremećenom i neporemećenom stanju iz otvorenog profila po genetskim horizontima,
- uzimanje pojedinačnih uzoraka sondom ili hašovom sa istraživanih površina,
- uzimanje prosječnih uzorka tako što se sa više mjesta uzmu pojedinačni uzorci hašovom ili sondom i nakon toga se homogeniziraju miješanjem na čistoj podlozi.

#### **4.3.1. ISKOP PEDOLOŠKIH PROFILA**

Nakon obavljenog rekognosciranja terena i sondiranja, te saznanja o raznolikosti i granicama tipova tala na ispitivanom području, određuje se reprezentativno mjesto (bez zanemarljivih lokalnih uticaja), na kojem ćemo iskopati pedološki profil. Pedološki profil se otvara do pojave čvrstog matičnog supstrata (čvrste stijene) ili podzemne vode ili do dubine od 2 m i služi za određivanje:

- unutarnjih morfoloških obilježja ispitivanog tla, prije svih identifikacija i određivanje granice između genetskih horizonata ili slojeva koja se

obilježava pedološkim nožem povlačenjem crte na manje ili više jasnom prijelazu između dva horizonta. Horizoniti ili slojevi su najčešće paralelni ili približno paralelni sa zaravnjenom površinom terena ali ne moraju biti.

- uzimanje pojedinačnih uzoraka zemljišta po genetskim horizontima u poremećenom stanju u plastične vrećice i u neporemećenom stanju u metalne cilindre. U literaturi se ovi uzorci uzeti iz pedološkog profila često nazivaju i pojedinačni uzorci u poremećenom i neporemećenom stanju da bi ih razlikovali od prosječnih uzoraka koji se uzimaju sa više mjesta i poslije izmiješaju radi homogeniziranja.
- fotografisanje otvorenog profila zemljišta i postupka uzorkovanja. Vrlo je važno dokumentovati fotografijama svaku fazu istraživanja a naročito su važne fotografije otvorenih pedoloških profila sa njegovim vanjskim i unutrašnjim morfološkim obilježjima. Važno je fotografirati i sve radnje po fazama u vezi sa uzorkovanjem. Pored dokumentovanja samog procesa istraživanja, ove fotografije nam pomažu i u naknadnom tumačenju morfoloških obilježja ali i generalno rezultata istraživanja na način da se prisjetimo nekih interesantnih zapažanja sa terena ili da neke detalje čak bolje promotrimo (npr. granicu među horizontima nekad je lakše odrediti naknadno sa uvečane fotografije pogotovo kada je na terenu zbog specifičnosti boje supstrata, vidljivosti zbog oblačnosti ili jednostavno zbog umora, to bilo otežano).
- u svrhu posebnih istraživanja tla kada je potrebna analiza procijedne vode kroz profil tla, ispod efektivne dubine profila postavljaju se tzv. lizimetri koji skupljaju procijednu vodu. Uzorci vode iz lizimetara spremaju se u dobro zatvorene plastične boce i prethodno konzerviraju s 2-3 kapi toluola.
- uzimanje monolita (i o ovome će biti govora u nastavku), koji se u praksi uzimaju dosta rijetko a najčešće se koriste u nastavne svrhe.

Prema dubini iskopa razlikujemo:

1. Pedološki profil osnovnog tipa koji se kopa do matičnog supstrata ili čvrste matične stijene ili do pojave podzemne vode ili do 2 m dubine, služi za precizno određivanje pedosistematske jedinice ili tipološke pripadnosti ispitivanog tla preko istraživanja morfoloških obilježja i karakteristika zemljišta u otvorenom profilu kao i za uzorkovanje zemljišta radi analize fizičkih – vodnofizičkih i hemijskih osobina,
2. Pedološki poluprofil koji se kopa do dubine od 1m, takođe se može koristiti za određivanje pedosistematske pripadnosti i uzorkovanje

zemljišta ali pošto je jeftiniji jer traži manje vremena za iskop i uzorkovanje često se koristi u praksi,

3. Pedološku jamu koje se kopaju oko pola metra dubine – koristi se za nešto brže uzorkovanje iz površinskog (Ah) horizonta i podpovršinskog horizonta uglavnom iz rizosfernog sloja.

Pedološki profili imaju oblik pravougaonika dimenzija dužine 170-200 cm i 100 cm širine, s tim da jedna od užih strana predstavlja mjesto ogledanja unutarnjih morfoloških obilježja i mjesto uzimanja pojedinačnih uzoraka tako da mora biti pažljivo iskopana, njena površina ravna i dobro osvjetljena. Nasuprot oglednoj strani su stepenice koje služe za silazak u profil. Vrijeme potrebno za iskop pedološkog profila od strane dva ili tri radnika je najšće oko 2-3 sata. Treba voditi računa da u trenutku završetka iskopa ogledna strana ili strana za uzorkovanje mora biti direktno osvjetljena sunčevim zrakama a ne u sjeni, radi preciznog utvrđivanja granice između horizonata na osnovu boje, strukture, tekture, dubine prostiranja korijena i sl.. Treba voditi računa i da pri samom iskopu zemљa iz površinskog Ah horizonta se baca na jednu stranu profila a iskopana zemљa iz dubljih horizonata na drugu stranu profila. To je vrlo važno, jer ćemo nakon završenog uzorkovanja i fotografisanja, prilikom zatrpanjavanja iskopane jame prvo u dubinu vraćati zemlju iz dubljih slojeva a na kraju zemљu iz površinskog Ah horizonta.

U novije vrijeme, gdje to uslovi dozvoljavaju, iskop pedoloških profila se vrši i mašinskim putem – bagerom. Širina kašika bagera treba biti što bliža odgovarajućim dimenzijama profila (oko 80 cm) da bi se remetila što manja površina ispitivanog tla. Nakon iskopa profila kašikom bagera, oglednu stranu profila je potrebno osvježiti da bi bila „čitljivija“, na način da se hašovom skinu (zasijeku) 2-3 cm zemlje od površine do dna, kako bi se uklonile mazotine nastale pritiskom kašike bagera na oglednu stranu profila prilikom iskopa.

Iskusni pedolog uz asistenciju suradnika koji vrši upis podataka u terensku svesku, postavlja metar za mjerjenje dubine odnosno debljine horizonata u profilu, pri čemu je oznaka 0 cm u ravni površine terena. Potom određuje granicu između pedogenetskih horizonata/slojeva tako što će pedološkim nožem povući crtu po manje ili više vidljivom prijelazu između dva susjedna horizonta, a zatim fotografiše sam profil i okolinu. Poslije tih radnji pristupa se uzimanju pojediničnih uzoraka tla u poremećenom i neporemećenom stanju po horizontima. Najbolje je kada uzorkovanje vrše tri radnika. Jedan vrši uzorkovanje, drugi pomaže pri uzorkovanju i spremi uzorke, a treći vodi evidenciju i zapisnik. Broj otvorenih i uzorkovanih profila po jednoj grupi ne bi trebao biti veći od tri po jednom danu, a zavisi od udaljenosti profila

jednog od drugih, o dužini dana, radnom iskustvu, dubini profila, vrsti istraživanja.



Slike 11. i 12.. Pedološki profil otvoren na tipu tla Pseudoglej u hrastovoj šumi, dolina Spreče (foto: Tvica M.)



Slika 13. Crvenica, Dubravska Visoravan (foto: Tvica M.)

Slika 14. Distrični kambisol na pješčarima, Nišići (foto: Tvica M.)

#### 4.3.2. OPIS UNUTRAŠNJIH I VANJSKIH MORFOLOŠKIH OBILJEŽJA PEDOLOŠKOG PROFILA

Razlikujemo morfološka obilježja svakog otvorenog pedološkog profila.

U **vanjska morfološka obilježja** ubrajaju se reljef te živi i mrtvi pokrov:

- reljef: u okviru pedogenetskih faktora precizirane su karakteristike makro reljefa planinski, brežuljkasti, ravnica, visoravan, uska riječna dolina, široka riječna dolina; Mezorelief opisujemo kao ravan, padina (% nagiba padine), podnožje padine, udubina ili uzvišenje sa vrhom i stranama koje mogu imati različitu eksponiciju; Mikrorelief opisuje mikrodepresije (dolje) ili mikrouzvišenja (grede) visine desetak cm..., te nadmorsku visinu, eksponiciju

- živi pokrov; tu opisujemo način korištenja zemljišta na mjestu otvaranja profila (njiva ili vrt; preciznije oranica sa vrstom usjeva ili gola, zatim voćnjak, vinograd, livada, pašnjak, šumsko tlo...), obavezno se upisuje i vrsta kulture,
- mrtvi pokrov; odnosi se na kamenitost tj. prisustvo šljunka i kamenja na površini zemljišta ili na mrtvi organski prekrivač tj. ostatke usjeva kod neobrađenih tla.

Kamenitost tla odnosno prisustvo kamenja na površini zemljišta (treba razlikovati ovo obilježje od tekture tla koja se odnosi na udio kamenja u mehaničkom sastavu mase tla u dubini profila) takođe je značajna morfološka osobina koja značajnu ulogu ima u zaštiti finih čestica zemlje ispod kamena od erozije. Ovo je naročito važno u područjima gdje je izražena erozija vjetrom (npr. tla na krečnjačkim supstratima u Hercegovini).

- promatra se i postoji li zadržavanje vode na površini ukoliko je nedavno bila kiša, što ukazuje na normalno procjeđivanje vode (nema zadržavanja vode) ili postojanje nepropusnog horizonta (stagniranje padavinske vode),
- prisustvo pokorice ili pukotina na površini zemljišta,
- prisustvo erozionih oblika na površini (brazdasta erozija, klizišta).

**Unutrašnja morfološka obilježja** se formiraju kao refleksija djelovanja pedogenetskih faktora odnosno dominantnih pedogenetskih procesa. Proučavaju se čitavom dubinom profila da bi se stekao opšti dojam o tipološkoj pripadnosti zemljišta (tip, podtip, varijetet).

Već smo istakli da je **dubina profila** određena djelovanjem faktora klime, organizama i reljefa na proces trošenja matičnog supstrata tokom vremena. Logično svi pobrojani faktori, od intenziteta vanjskog uticaja (temperaturna kolebanja, temperatura, padavine, nagib, vrsta organizama, erozija..), pa do prirode gološkog supstrata i njegove otpornosti trošenju, utiču na dubinu tla. Značaj dubine tla je najbolje opisati kao obilježje koje smanjuje (neutrališe) negativni uticaj pojedinih zemljišnih karakteristika dok istovremeno povećava pozitivan uticaj drugih karakteristika tla. Npr. velika dubina kod pjeskovitih tala može smanjiti generalno slabu plodnost ovih tala što se javlja kao posljedice male obezbjeđenosti hranivima i malu sposobnost pjeskovitog tla da drži vodu (retencioni kapacitet) i obezbjedi je biljci. Ili npr. veliki sadržaj organske materije (karbona) u crnicama na krečnjaku dijelom gubi na ekološkom značaju (ciklus karbona i plodnost) zbog najčešće male dubine (nekoliko centimetara) ovog tipa tla. U ovom kontekstu dubina zemljišta može se promatrati kao vrlo važno unutrašnje morfološko obilježje svakog tla.

Tradicionalno, u unutrašnja morfološka obilježja se ubrajaju: genetski horizonti, sklop profila ili slijed horizonata, boja horizonata, prijelaz/granica između horizonata, prisustvo mramoriranog pseudoglejnog ili glejnog horizonta (površina na kojoj se smjenjuju izbjeljene, crvenkaste i plavičaste mazotine), tekstura, struktura, specifične pedodinamske tvorevine, prisustvo karbonata i sl..

#### **4.3.2.1. Genetski horizonti**

Genetski horizonti predstavljaju trodimenzionalna tijela određene debljine unutar pedosfere koja su najčešće paralelna sa površinom zemljišta. Vide se u vertikalnom presjeku zemljišta najčešće kao različito obojeni, što je refleksija djelovanja pedogenetskih faktora i dominantnih procesa pedogeneze. Mogu biti mineralni i organski a karakterišu se određenom bojom, debljinom, granicom ili prijelazom između dva susjedna horizonta, strukturom, teksturom, prisustvom karbonata, specifičnim pedogenetskim tvorevinama.

Genetski horizonti se označavaju velikim slovima abecede na pr A ili B ili C a dopunske oznake u indeksu pobliže označavaju karakter horizonata i obilježavaju se malim slovima na pr. Ah ili Brz ili Et. Prijelazni horizonti se nazivaju oni horizonti koji se formiraju kao kombinacija dva susjedna horizonta, na pr. gornjeg Ah i nižeg Bv horizonta između kojih leži prijelazni ABv. Složeni horizonti su oni koji imaju vidljive refleksije dva ili više pedogenetskih procesa i označavaju se sa kosom crtom između na pr.:A/B ili B/C.

Slijede oznake i kratki opis nekih najznačajnijih horizonata koje susrećemo kod nas:

- O - organski površinski horizont sa preko 30% organske materije koji leži preko mineralnog horizonta,
- L – organski površinski horizont, listinac ili šumska prostirka, sastavljen od nerazloženih ili djelomično razloženih biljnih ostataka (lišće, iglice, grane, grančice, plodovi, kora),
- nH - organski površinski horizont nastao nakupljanjem manje ili više humificiranog organskog materijala uslijed nepotpunog i sporog razlaganja biljnih ostataka najčešće trske i šaši u uslovima dužeg zadržavanja vode u močvarama - tresetni horizont (Histsol),
- Ai - površinski horizont u inicijalnoj, početnoj fazi formiranja i akumulacije humusa, humus se pojavljuje samo u vidu fleka ili nevidljiv golim okom, nalazi se u mineralnim tlima,

- Ah - površinski akumulativno humusni horizont, formiran, sa izgrađenim organo-mineralnim (humusno - glinenim) kompleksom, strukturran, u mineralnim tlima,
- Bv - podpovršinski kambični horizont; horizont u kome se dešava niz promjena u mineralnom dijelu zemljišta: ispiranje karbonata i baza, zakiseljavanje, intenzivno hemijsko raspadanje primarnih minerala na okside i hidrokside Si, Al i Fe i nakon toga tvorba sekundarnih minerala gline (argilogeneza), posmeđivanje - izrazita obojenost u karakteristične žute, smeđe, te crvenkaste nijanse Fe-oksida getita i hematita,
- Brz - kambični horizont karakterističan za kambična ili smeđa tla na krečnjaku i dolomitu, gdje mineralni dio tla koji je glinovite teksture, nastaje tj. vodi porijeklo od nerastvornog ostatka ili reziduma (Brz) zaostalog prilikom rastvaranja krečnjaka; Ovaj proces se zove ogljavljivanje.,
- E - eluvijalni horizont, eluvijacija tj. premještanje ili ispiranje gline, humusa ili seskvioksida iz viših u niže horizonte; nalazi se ispod O ili Ah horizonta,
- Bt,h,s - iluvijalni horizont, hor. iluvijacije tj. nakupljanja gline koja se označava sa slovom t (*njem ton = glina*) ili/i humusa (h) ili/i seskvioksida (s), nalazi se ispod eluvijalnog E horizonta,
- C - matični supstrat iz kojeg je nastao mineralni dio tla, nalazi se ispod površinskih i podpovršinskih horizonata,
- G - glejni horizont, nastao pod uticajem stalne ili kolebajuće podzemne vode u dijelu profila, gdje se dešavaju periodične smjene redukcijskih uslova (kada su pore zasićene podzemnom vodom) i oksidacijskih uslova (pore ispunjene zrakom), te redoks procesa koji stvaraju specifičnu prošaranost bojama plavičaste, zelenkaste i sive – koje nastaju redukcijom, te crne i rđaste mazotine koje nastaju oksidacijom,
- S - pseudoglejni horizont, za razliku od glejnog horizonta koji se razvijao pod dejstvom visokog nivoa podzemne vode, pseudoglejni horizont (Sw) je nastao periodičnim stagniranjem površinskih voda porijekлом od padavina u gornjem dijelu profila, a koje se zadržavaju na nepropusnom horizontu (Sd); Karakteriše ga smjena suhe faze (ljeto) kada u tlu vladaju oksidacioni uslovi i mokre faze kada u tlu vladaju redukcioni uslovi, što poslijedično izaziva karakterističnu prošaranost – mramoriranost kao kod glejnog horizonta,



**Slike 15. i 16. Prošaranost ili mozaičnost Pseudogleja, Sprečko polje**  
(foto: Tvica M.)

- P - vertični horizont sa sadržajem gline, montmorionit, većim od 45%,
- Arig, Ap ili Aor - antropogeni horizont; poljoprivredna tla za razliku od prirodnih tla imaju antropogeniziran površinski sloj nastao dugogodišnjom kultivacijom (rig- rigovanje, p ili or - oranični hor.),
- Y- tehnogeni sloj, nastao deponovanjem različitih tehnogenih materijala, na pr. jalovina i pokrov kod površinskih rudnika uglja, deponije pepela i šljake iz termoelektrana, površine kamenoloma i sl.,
- I, II, III – rimskim brojevima označavaju se zemljjišni slojevi (a ne horizonti) koji su nastali kao posljedica geoloških a ne pedogenetskih procesa. Nalazimo ih kod Fluvisola, tipa tala nastalih na riječnim nanosima ili aluvijalnim površinama i kod Koluvisola nerazvijenih tala nastalih na obrušenim ili erodiranim nanosima od matične stijene ili zemljjišta u podnožju padina. Oznake za različite slojeve taloženja riječnih i koluvijalnih nanosa (kamenje, šljunak, pijesak, glinoviti materijal...) predstavljaju rimski brojevi.

**Debljina ili moćnost horizonata** zavisi od prirode pedogenetskih faktora i intenziteta pedogenetskih procesa, prije svega od vrste matične stijene (otpornosti na raspadanja), reljefa (intenzitet erozije-fizičkog odnošenja čestica zemlje) te klime (temperaturna kolebanja i količina padavina i njihov uticaj na trošenje geološke podloge). Naravno da značajnu ulogu ima i starost geološke podloge područja odnosno vrijeme kao pedogenetski faktor. Na stijenama sklonijim raspadanju kao što su pješčari, škriljci te peridotit i gabro, koja se stvaraju na zaravnjenim reljefskim oblicima gdje nema erozije nastala zemljjišta će biti dublja. Jednako tako i na zaravnjenim mjestima taloženja različitih nanosa kao što su doline rijeka, delte, podnožja padina kao i na eolskim nanosima - lesu imaćemo dublja zemljjišta i vjerovatno će i debljina genetskih horizonata biti veća. S druge strane na stijenama koje se

sporo troše kao što su krečnjak i dolomit, koja su uz to na nagibima te sklona i eroziji vjetrom i vodom i vertikalnoj pukotinskoj eroziji, te na zemljjištima koja se formiraju teškim glincima i laporcima koji su otporniji na trošenje, debljina horizonata i tla će biti manja. Vidimo da pored otpornosti geološkog supstrata na trošenje pod uticajem vremenskih prilika, veliki uticaj imaju i zaravnjenosti terena odnosno intenzitet erozionih procesa.

**Granica ili prijelaz** između dva susjedna horizonta rijetko može biti predstavljen ravnom crtom kao granicom između dva različito obojena horizonta. U stvarnosti on je u našoj pedološkoj praksi najčešće predstavljen kao prijelaz nastao miješanjem boja ili promjenom teksture i kao takav u kontekstu debljine prijelaza može biti oštar (unutar 3 cm), izrazit (unutar 3-5 cm) ili postepen (nije vidljiv ni u 5 cm). Prijelaz odnosno crta može biti paralelna sa površinom (horizontalna), a može biti i pod nekim uglom.

**Boja horizonta** je najvažnije morfološko obilježje kojim razlikujemo genetičke horizonte. U svjetskim okvirima tradicionalno je u upotrebi i davanje naziva zemljiju koja u korijenu naziva ima boju tla: crnica, crvenica, černozem, smeđe tlo, pepeljuša, kestenozem... (naravno, ovakvu podjelu na boje treba shvatiti uslovno, jer tri su osnovne boje crvena, žuta i plava, dok je bijela prisustvo svih osnovnih boja a crna odsustvo boja). Boja zavisi od sadržaja humusa, mineralnog sastava tla, vlažnosti, vrste pedogenetskih procesa. Dešava se u praksi da, u nekim specifičnim slučajevima, kada čitavom dubinom profila dominira boja matičnog supstrata ili zbog oblačnog vremena ili prisustva sjene od vegetacije, ili jednostavno zavisno od oka posmatrača, ne vide se jasne razlike u bojama između dva susjedna horizontata tj. dešava se da se boja jasnije prepoznaje na urađenim fotografijama, pogotovo onim sa blicom (bljeskalicom). U takvim slučajevima su moguće naknadne izmjene u ovim morfološkim obilježjima (slijed horonata i njihova debljina) u odnosu na zapise sa terena. Sve nijanse obojenosti tla su izraz kombinacije crne, bijele i crvene:

Crna uglavnom, te siva i rjeđe smeđa potiču od prisutnog humusa (najčešće površinski Ah horizont).

Crvenasta boja ili preciznije žute, žuto smeđe, smeđe i crvenaste nijanse (najčešće u podpovršinskom B horizontu), kao uostalom i u petrosferi potiču od dva oksida trovalentnog oksida željeza getita i hematita  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ili njegovog hidratisanog oblika limonita  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times n\text{H}_2\text{O}$ . (Bv ili Brz horizont kod kambičnih tala).

Bijela potiče od prisutnog primarnog ili sekundarnog kvarca -  $\text{SiO}_2$ , minerala gline - kaolinita, kalcita -  $\text{CaCO}_3$ , te (oksi)hidroksida aluminija  $\text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$ . Izbijeljene površine (jezičci ili mazotine) u mramoriranom prošaranom izgledu pseudogleja su posljedica ispranog Fe i zaostajanja Si i Al.

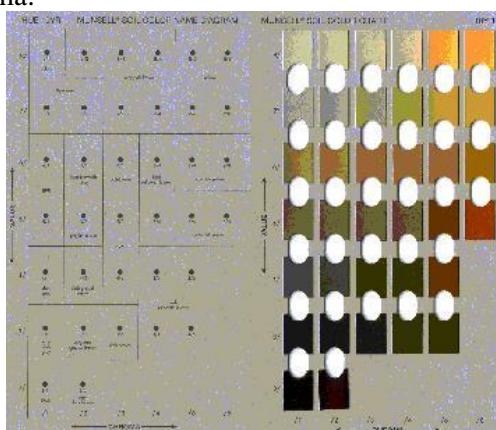
Plavičasto - zelenkaste ili sive nijanse u glejnom horizontu potiču od rastvorenih redukovanih oblika  $\text{Fe}^{2+}$  i  $\text{Mn}^{2+}$ , (S ili G horizont).

Crvenkasto - smeđe mazotine kod pseudogleja i glejnih tala nastaju nakon uspostave oksidacionih suhih uslova u profilu, kada se redukcioni oblici  $\text{Fe}^{2+}$  ponovo oksidišu do  $\text{Fe}^{3+}$  odnosno  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  koji je crvenkaste ili rđaste boje.

Organo-mineralni kompleks Fe i Mn - humata koji nastaju u redukcionim saturisanim uslovima mogu oksidacijom u suhim uslovima dati crne nakupnine-nodule (čagljevi), ako u humatima dominira Mn, ili crvenkaste nakupine ako u humatima dominira Fe, a koje su karakteristične za glejni S horizont kod pseudogleja i G kod glejnih tala.

Zbog raznih kombinacija pomenutih i ostalih spojeva koji stvaraju razne nijanse napravljen je atlas boja **Menselova karta boja** (**Munsell soil color charts**) čijom uporedbom sa prirodnim stanjem stičemo objektivniju ocjenu boja i uvid u dinamiku procesa u tlu. Prilikom određivanja boje uzme se mala količina tla i njegova boja se upoređuje sa bojama iz atlasa. Prilikom toga se mora ubilježiti stanje vlage u tlu. Isto tako treba zabilježiti prisustvo više boja kao i razne fleke, konkrecije i dr. Menselov atlas boja se može koristiti i na terenu i u laboratorijskim uslovima, uporedbom boje u atlasu sa bojom vazdušno suhog tla ali i pri prisustvu vlage u tlu, što je potrebno naznačiti.

U ovome atlasu, vrsta osnovne boje označena je sa "HUE", jačina (jasnoća) boje sa "VALUE", a za izraženost (intenzitet) boje, oznaka je "CHROMA". U odnosu na "HUE", izdvojene su 24 tabele osnovnih boja. Pojedina slova označavaju: R – crvena, Y – žuta, YR – žućkasto-crvenkasta, G – zelena, GY – zelenkasto-žućkasta, B – plava, P – violetna (ljubičasta-purpurna), s ostalim prijelazima.



**Slika 17 Atlas boja: engl: Munsell Soil color charts, tabela za određivanje boje tla [103]**

U vertikalnom pravcu na stranici atlasa svjetlijе nijanse boje nalaze se gore a tamnije nijanse dole. Izraženost boje data je u horizontalnom smislu, a zavisi od stepena zasićenosti boje ili njenog relativnog intenziteta. Kod označavanja boje se koriste određeni simboli, n.pr. 10 YR 5/3, gdje je 10 YR – vrsta boje, 5 – jačina boje i 3 – izraženost boje.

#### **4.3.2.2. Sklop profila ili slijed horizonata - Klasifikacija zemljišta**

Sklop profila ili slijed horizonata predstavlja osnovni kriterij u klasifikaciji tala. Definišu ga vrste i raspored genetskih horizonata tj. slijed horizonata u profilu tla od površine tla prema dubini do matičnog supstrata. Vidi se na vertikalnom presjeku zemljišta u iskopanom pedološkom profilu. Sklop profila ili slijed horizonata je karakterističan za pojedinu klasu i tip tla.



**Slike 18. i 19. Sklop profila ili slijed horizonata na Distričnom kambisolu Ah- AhB-B-C (lijevo) i na Crvenici antropogeniziranoj na krečnjaku Ap-ApBrz-Brz-C, (foto Tvica M.)**

Sklop profila ili slijed horizonata je jedan od glavnih elemenata za sistematizaciju zemljišta u nacionalnim klasifikacijama.

Tako, u pojednostavljenom prikazu, razlikujemo klase i tipove zemljišta sljedećeg sklopa profila ili slijeda horizonata [127]:

1. RAZDJEL - Automorfna zemljišta, nastala normalnim vlaženjem padavinskim vodama:
  - I. klasa nerazvijenih tala: Ai - C, (Kamenjari na jedrim krečnjacima i dolomitima, Regosoli na rastresitim stijenama, Koluvisoli na materijalu koji se zaustavio u podnožju padine nakon obrušavanja ili ispiranja i Arenosoli na eolskim pijescima)
  - II. klasa humusno-akumulativnih tala: Ah - C, (Crnica na krečnjaku, Rendzine na rastresitim karbonatnim supstratima, Rankeri na silikatnim supstratima, Černozem na lesu i Vertisol na montmorionitnim glinama)
  - III. klasa kambičnih ili smedih tala: Ah - Bv - C, Ah – Brz - C, (Smeđe tlo na krečnjaku, Eutrično smeđe tlo na bazama bogatim supstratima, Distrično smeđe tlo na supstratima siromašnim bazama, Crvenica na krečnjaku i dolomitu, Pelosoli na glincima)
  - IV. klasa eluvijalno-iluvijalnih tala: Ah - Et,h,s - Bt,h,s - C, (Lesivirano tlo sa ispranom glinom iz E hor., Vrištinsko tlo i Podzol sa pod površinskim pepeljastim hor.)
  - V. klasa pseudoglejnih tala: Ah - Sw - Sd - C (Pseudoglej)
  - VI. klasa antropogenih tala: Ap - C
  - VII. klasa tehnogenih tala: Y1 - Y2,
  
2. RAZDJEL - Hidromorfna zemljišta, nastala u uslovima gdje pored normalnog vlaženja padavinskim vodama postoji povremeno ili stalno pretjerano vlaženje podzemnom vodom i to jednog dijela ili čitavog profila:
  - I. klasa, nerazvijeno tlo na recentnom riječnom nanosu: Ai-I-II, Fluvisol -Aluvijalno tlo
  - II. klasa, stagnoglejna tla Ah-E-Btg-C-G
  - III. klasa, semiglejna tla ili livadsko tlo: Ah - C – G (Humofluvisol ili Fluvijalno livadsko tlo)
  - IV. klasa, glejna tla: Ah – CG; Ah - G,..., (Ritska crnica ili Humoglej i Močvarno glejno tlo ili Euglej)
  - V. klasa, Tresetna tla ili Histosoli: nH - G

U našoj Sistematički tla/zemljišta [127] postoje još dva razdjela ali nisu zastupljena u našoj zemlji ili nemaju veći značaj. To su 3. RAZDJEL Halomorfnih tala sa dva tipa tla Solončak (akutno zaslanjeno tlo) i Solonec (alkalno tla), te 4. RAZDJEL Subhidričnih tala i to klasa nerazvijenih (Protopedon) i klasa razvijenih subhidričnih tala (Sapropel, Dy i Gyttja).

Razvojem Nauka o tlu i Pedologije razvila se i potreba za svima razumljivoj međunarodnoj klasifikaciji zemljišta. Klasifikacija zemljišta prema međunarodnoj tzv. Svjetskoj Referentnoj Osnovi (WRB) nema za cilj zamjeniti postojeće nacionalne klasifikacije. Ona služi kao sredstvo razumijevanja u međunarodnoj komunikaciji vezanoj za sistematiku tla i osobine tla. Klasifikacija tala bazirana je na vidljivim i mjerljivim osobinama tala koja su definisana dijagnostičkim horizontima, dijagnostičkim osobinama i materijalom tla. Izbor karakterističnih dijagnostičkih osobina zemljišta uzima u obzir njihov odnos s dominantnim pedogenetskim procesima. Razumijevanje pedogenetskih procesa pomaže kvalitetnijem opisu tala, ali oni se ne koriste kao kriterij klasifikacije. Klimatski parametri se koriste samo u interpretacijske svrhe, oni nisu dio definicija tala. Klasifikacija zemljišta u The World Reference Base for Soil Resource (WRB) se izražava kroz dva nivoa:

1. prvi nivo je Referentna osnova – čine je 32 referentne grupe zemljišta koje se određuju pomoću WRB ključa,
2. drugi nivo je WRB klasifikacijski sistem – čine ga kombinacije grupe kvalifikatora (prefiksa i sufiksa) koji se pridodaju imenu Referentne grupe zemljišta (prvi nivo) i omogućuju vrlo precizan opis i klasifikaciju pojedinačnih profila tla.

Klasifikacija zemljišta se vrši u 3 koraka:

1. određivanje dijagnostičkih horizonata, osobina i materijala,
2. određivanje Referentne grupe zemljišta na osnovu poređenja dijagnostičkih horizonata, osobina i materijala s WRB ključem i
3. određivanje kvalifikatora; prefiksa (karakterističnih za određenu Referentnu grupu) i sufiksa (ostalih kvalifikatora), te njihovih specifičnosti (stepena izraženosti).

Može se desiti recimo da sam horizont nije lako definirati na terenu i da su potrebni detaljniji rezultati laboratorijskih analiza za njihovo precizno određivanje.

**Tabela 1. Popis Referentnih grupa zemljišta prema pojednostavljenom WRB ključu [97]**

Red. br.	Setovi tala	Referentna grupa	Glavne osobine
1.	Tla s debelim organskim slojem	HISTOSOLS	Debeo organski sloj
2.	Tla s jakim uticajem čovjeka	ANTHROSOLS TECHNOSOLS	Intenzivna poljoprivr.; Puno artefakata;
3.	Tla s ograničenom dubinom zakorjenjavanja zbog leda ili stijena	CRYOSOLS LEPTOSOLS	Uticaj leda; Uticaj stijena;
4.	Tla pod utjecajem vode	VERTISOLS FLUVISOLS SOLONETZ SOLONCHAKS GEYSOLS	Tla bogata glinom; Plavna područja; Alkalna tla; Tla bogata solima; Podzemna voda;
5.	Tla karakterizirana Fe i Al jedinjenjima	ANDOSOLS  PODZOLS  PLINTHOSOLS  NITISOLS  FERRALSOLS	Alofani/Al-humusni kompleksi;  Eluvijacija i iluvijacija; Akumulacija željeza u hidromorfnim uvjetima; Gлина male aktivnosti, jaka struktura; Dominacija kaolinita i seskvioksida;
6.	Tla sa stagnirajućom vodom	PLANOSOLS  STAGNOSOLS	Nagli teksturni diskontinuitet strukturni ili Umjereni teksturni diskontinuitet
7.	Tla s akumulacijom organske tvari, visoka saturacija	CHERNOZEMS KASTANOZEMS PHAEZOZEMS	Tipično molični hor.; Prijelaz u suhlju klimu; Prijelaz u vlažniju klimu

	bazama		
8.	Tla s akumulacijom gipsa, silicijevog oksida i kalcijevog karbonata	GYPSISOLS DURISOLS CALCISOLS	Gips; Silicijev oksid; Kalcijev karbonat;
9.	Tla s podhorizontom bogatim glinom	ALBELUVISOL  ALISOLS  ACRISOLS  LUVISOLS  LIXISOLS	Ispiranje izbljedjelog materijala u pukotine iluvijalnog horizonta; Gлина velike aktivnosti, niska saturacija bazama; Gлина male aktivnosti, niska saturacija bazama; Gлина velike aktivnosti, visoka saturacija bazama Gлина male aktivnosti, visoka saturacija bazama
10.	Relativno mlada tla sa slabim ili nikakvim razvojem profila	UMBRISOLS ARENOSOLS CAMBISOLS REGOSOLS	Kiseli tamni površ. hor.; Pjeskovita tla; Umjereno razvijena tla; Slabo izraženi razvoj profila

#### 4.3.2.3. Vlažnost zemljišta

Vlažnost zemljišta predstavlja masu vode u tlu u odnosu na masu suhog tla ili u odnosu na zapreminu (volumen) tla. Izražava su u %<sub>masenim</sub> ili %<sub>volumnim</sub>. Vlažnost se takođe utvrđuje u trenutku iskopa profila. Značajna je za određivanje boje horizonata ali i za sam kvalitet procesa uzimanja uzoraka tla.

Najčešće korištena i najbrža metoda za trenutno određivanje sadržaja vode u tlu u polju je direktno ili neposredno određivanje vlažnosti. Metoda se temelji na osjećaju koji se dobije kada se zemlja drži u ruci. Tako ako je tlo mokro onda sadrži procjednu gravitacijsku vodu, a ako je tlo svježe i vlažno sadrži vezanu kapilarnu vodu. Ako je suho i ako se pri trljanju mrvi sadrži jedino higroskopnu vlagu.

Ova metoda je dobra zbog brze procjene vlažnosti tla, ali rezultat uvelike ovisi o iskustvu i znanju procjenitelja.

#### **4.3.2.4. Tekstura ili mehanički sastav**

Tekstura predstavlja odnos ili procentualno učešće pojedinih frakcija elementarnih čestica zemljišta određenih na osnovu njihove veličine (kamenja i šljunka kao frakcije skeleta veće od 2mm, te pjeska, praha i gline kao frakcije unutar fine zemlje ili sitnice manje od 2 mm. Tekstura ili mehanički sastav predstavlja morfološko obilježje koje se na terenu određuje kvalitativnom metodom Kačinskog u suhom i vlažnom stanju. Na osnovu tektturnog sastava zemljište dobija teksturnu oznaku skeletno, glinovito, ilovasto, praškasto ili pjeskovito zemljišta. Ukoliko ima puno kamenja i šljunka što je vidljivo golim okom i u profilu i u uzorku, zemljište dobija teksturnu oznaku skeletno zemljište sa više od 50% skeleta ili skeletoidno zemljište sa manje od 50% skeleta.

Metoda Kačinskog se koristi za približno i brzo kvalitativno određivanje teksturne klase tla. Ona se može koristiti na terenu i u uslovima kada treba brzo ali manje precizno odrediti teksturnu klasu tla. Princip se zasniva na opipu tla prstima u suhom stanju - „finger metoda“ i mogućnošću formiranja prstena od vrpce izvaljane od ispitivanog tla u vlažnom stanju.

#### ***Određivanje teksture na terenu metodom Kačinskog - Postupak***

Pri određivanju teksture opipom **u suhom stanju**, grudvicu zemlje drobimo prstima i procjenjujemo koliko je opip tvrd i uglast. Ukoliko je sastav elementiranih čestica teži tj. glinovitiji utoliko je opip tvrdi i uglastiji kao posljedica stvrdnutih poliedričnih agregata/grudvica sa dominantnom frakcijom gline. Uz jači gotovo bolan pritisak između prstiju grudvice bi se raspale. Poznato je i da praškasto zemljište ima opip sličan opipu brašna dok su pjeskulje sipke, jednočestične i bez agregata a zrna pjeska se osjete pod prstima. Uz to zrnca pjeska su najmanja fizička tijela koja možemo vidjeti golim okom.

Pri određivanju teksturnog sastava **u vlažnom stanju**, uzorak zemljišta polako miješamo s vodom i navlažimo ga do plastične konzistencije što podrazumijeva mogućnost formiranja loptice od navlažene zemlje koja je malo manja od one za stolni tenis. Ovako navlaženu lopticu gnječimo i dalje prstima i između dlanova dok se ne prestanu osjećati agregati (grudvice) pod prstima. Od ovakve mase valjanjem po ravnoj površini ili između dlanova se pokuša oformiti vrpca dužine 10-15 cm promjera oko 3-4 mm. Ukoliko se formira vrpca (bez raspadanja) pokušamo od nje na ravnoj podlozi obrazovati prsten tako što ćemo savijanjem spojiti krajeve vrpce. Kriteriji za

određivanje teksturne oznake po metodi Kačinskog određeni su od mogućnosti:

- obrazovanja vrpce - kod pjeskulja ne možemo formirati vrpcu jer se još prilikom valjanja vrpcu raspada,
- pojave pukotina na vrpcu u formiranom prstenu - na lakšim ilovastim tlima se pojavljuju pukotine na prstenu, i
- obrazovanja prstena bez pukotina na vrpcu - kod glinovitih zemljija lako se od vrpcu formira prsten bez pukotina.



**Slika 20. Lijevo: formirana vrpca koja pri formiranju prstena puca (laka ilovača); desno formiran prsten od vrpcu bez pukotina (glinovita ilovača) (foto: Tvica M.)**

#### **4.3.2.5. Struktura tla**

Struktura tla površinskog horizonta i generalno struktura u profilu tla se takođe utvrđuje i na terenu u trenutku uzorkovanja. Struktura je posljednja hijerarhijska organizacija čestica tla u vremenu i prostoru i kvalitativno je predstavljaju oblik, veličina i izražajnost (slaba, srednja ili jaka) strukturnih agregata. Agregati nastaju povezivanjem elementarnih zemljjišnih čestica (dominantno gline i praha i manje pijeska) zajedno sa humusom, mikroorganizmima i biljnim ostacima u mikro ili makro agregate koji se razlikuju po obliku. Struktura površinskog sloja tla je jedna od najvažnijih fizičkih karakteristika ta.

## **Kvalitativno određivanje strukture**

Za **površinski horizont** najznačajniji su kockasti i sferoidni agregati koji se po obliku i veličini dijele na praškaste (do 0,5 mm), mrvičaste (0,5-5 mm), graškaste (5-10 mm), orašaste (1-3,5 cm), te grudvaste (veće od 3,5 cm).

Za određivanje **oblika pojedinih strukturalnih jedinica** vidljivih na terenu koriste se sljedeći pojmovi.

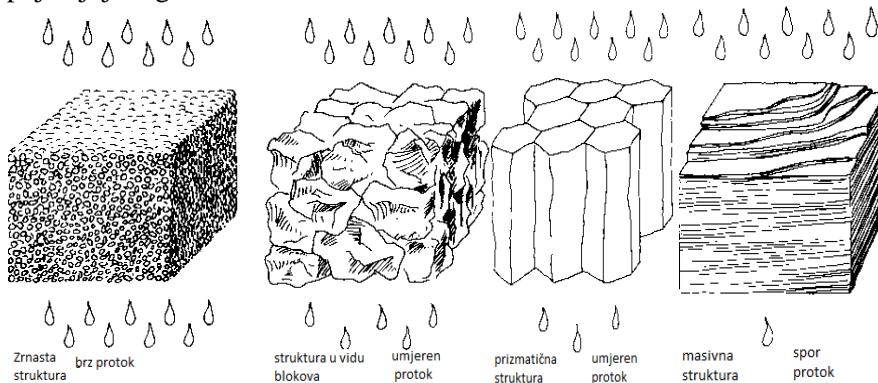
**Zrnaste strukturne jedinice:** Slični su kockastim jedinicama, osim što su čestice zaobljenije a površine nisu uskladene s površinama susjednih jedinica.

**Poliedarske jedinice ili one u vidu blokova:** poliedarske strukturne jedinice sa ravnim ili blago zaobljenim površinama. Površine ovih jedinica su za razliku od zrnastih uskladene s površinama susjednih jedinica.

**Prizmatične:** izdužene strukturne jedinice s ravnim okomitim stranicama koje se podudaraju s licima susjednih strukturalnih jedinica. Vrhovi su obično ravni.

**Stupaste:** Slični su prizmatičnim jedinicama, osim što su vrhovi zaobljeni, a okomite stranice su također blago zaobljene.

**Slojevite i masivne:** ravne i vodoravne strukturne jedinice koje se često pojavljuju u glinastim tlima.



**Slika 21: Struktura tla i s njom povezani protok vode**

(izvor <https://www.fao.org/3/r4082e/r4082e03.htm>)

Za ocjenu strukture potrebno je iskustvo. Humusom bogata zemljišta imaju finu mrvičastu strukturu, glinovita zemljišta poliedričnu i grudvastu strukturu, pjeskovita zemljišta nestabilnu sipku jednočestičnu strukturu, dok glejna tla imaju masivnu stubastu strukturu a halomorfna ili slana tla bogata Na-solima predstavljaju bestruktturnu masu.

Tekstura i struktura zemljišta su nosioci gotovo svih fizičkih, vodnofizičkih, zračnih i topotnih svojstava tla. Utiču na ukupni porozitet, zastupljenost krupnih, srednjih i sitnih pora, držanje vode i na prirodnu dreniranost, prozračnost i zagrijavanje tla te na mikrobiološku aktivnost. Sve su to nezaobilazni i značajni indikatori kvaliteta zemljišta. Dobra agregatna struktura (mrvičasta) je preciznije nosioc svih pozitivnih osobina tla i svojim postojanjem može da ublaži negativna inherentna svojstva teških glinovitih i lakih pjeskovitih zemljišta. Analiza tekture i strukture tla će se vršiti i u laboratoriji.

#### **4.3.2.6. Prisustvo karbonata u profilu tla**

Prisustvo karbonata je jedno od važnijih karakteristika zemljišta koja se reflektuje na gotovo sve osobine i funkcije zemljišta. Generalno, prisustvo karbonata predstavlja ograničavajući faktor u poljoprivrednoj proizvodnji. Kada govorimo o prisustvu karbonata u tlu naravno da se to najčešće odnosi na prisustvo kalcita  $\text{CaCO}_3$  i nešto manje dolomita  $\text{CaCO}_3 \times \text{MgCO}_3$ , čija mineralna zrnca su najčešće usitnjena do dimenzija pijeska ili praha, a koji ipak u konačnici predstavljaju ograničavajući faktor u poljoprivrednoj proizvodnji. Rijetko, i to u slanim tlima, moguće je i prisustvo  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ali tada se već radi o izuzetno velikim vrijednostima pH, gdje pH iznosi 8,5 i više i u tom slučaju govorimo o jako ograničavajućem faktoru u kontekstu proizvodnih svojstava zemljišta.

Prisustvo karbonata u zemljištu prati pH tla oko neutralnih do slabo alkalnih vrijednosti. Šta to znači u praksi? Kada izmjerimo kiselost zemljišta i vidimo da je pH u  $\text{H}_2\text{O} \geq 7$ , ili pH u 1M KCl  $\geq 6,2$  to nas odmah upozorava na prisustvo karbonata u tlu i potrebu za njihovom dalnjom kvalitativnom i kvantitativnom analizom. Obrnuto, kada utvrdimo prisustvo karbonata u tlu reakcijom zemljišta sa 10% HCl u vidu pjenušanja i šumljenja, očekujemo da vrijednost pH takvog zemljišta bude neutralna do slabo alkalna.

Ovdje je potrebno naglasiti da pored uticaja na pH vrijednost, prisustvo karbonata utiče i na inaktivaciju nekih važnih hraniva kao što su Fe i mikroelementi (Zn) koji najčešće u takvim zemljištima grade nerastvorne karbonate, zatim na smanjenje pristupačnosti fosfatnog i molibdatnog iona koji grade sa kalcijem teško rastvorljive Ca-soli odnosno inaktiviraju se specifičnom adsorpcijom. Nadalje, prisustvo  $\text{Ca}^{2+}$  jona u većim koncentracijama utiče antagonistički na usvajanje nekih drugih hraniva, na pr.  $\text{K}^+$  ili  $\text{Mg}^{2+}$ .

Treba napomenuti i pozitivan uticaj  $\text{Ca}^{2+}$  na agregaciju zemljišnih čestica kroz mehanizam koagulacije koloida. Veća vrijednost pH i prisustvo karbonata utiču generalno na obaranje toksičnih vrijednosti teških metala

kroz već spomenuti mehanizam nastajanja teško rastvorljivih karbonata ali i hidroksida teških metala u neutralnim i slabo alkalnim tlima. Otud je jedno od ispitivanja koje se vrše u profilu tla i kvalitativno dokazivanje prisustva karbonata u uzorcima odnosno duž profila zemljišta. Princip određivanja je na osnovu intenziteta pjenušanja i šumljenja kao rezultata oslobođanja  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$  iz  $\text{CaCO}_3$  nakon tretiranja zemljišta sa razblaženom HCl:



### **Kvalitativno određivanje karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ) u profilu tla**

Uzme se uzorak zemljišta, najčešće izdvojimo jednu grudvu veličine oraha iz svakog horizonta, te dok je držimo u ruci, prelijemo kapaljkom sa nekoliko kapi razblažene HCl koju smo prethodno pripremili u laboratoriji i to u omjeru 1:3 (1 volumen HCl i 3 volumena vode). Reakcija na prisustvo karbonata u grudvi tla je početak šumljenja i pjenušanja na mjestu gdje smo nanijeli razblaženu HCl. Ovo je praktičan način jer se grudva zemljišta može prinijeti uhu da se čuje ima li šumljenja ukoliko pjenušanje nije vidljivo. Tretiranje zemljišta sa razblaženim HCl-om može biti i na način da razblaženu HCl stavimo u špric plastičnu bočicu i onda pritiskom na bočicu i jednim mlazom pošpricamo zemljište od površine profila prema dubini pa onda analiziramo intenzitet pjenušanja duž profila (naravno ukoliko ga uopšte bude). Naime, prisustvo karbonata nije podjednako zastupljeno duž cijelog profila. Najčešće je u porastu sa dubinom jer se vremenom karbonati nakon rastvaranja iz gornjih horizonata ispiru u niže horizonte. Međutim, kod slojevitih zemljišta na aluvijalnim ili koluvijalnim nanosima to ne mora biti slučaj, jer samo pojedini istaloženi slojevi na različitim dubinama mogu biti karbonatni. Prisustvo karbonata u nekom tlu može biti i posljedica eolskog (vjetrovom) nanosa karbonatnog materijala. Skelet u tlu takođe može biti karbonatan (krečnjak, dolomit) ili nehomogen tj. i silikatan i karbonatan kakav je često slučaj na zemljištima formiranim na riječnim nanosima (Fluvisol, Humifluvisol-Livadsko tlo), tako da se istovremeno sa tretiranjem tla vrši i špricanje skeleta sa razblaženom HCl, a rezultate treba unijeti u zapisnik..

Kvalitativno određivanje prisustva karbonata može se vršiti i u laboratoriji u donešenom prosječnom uzorku. U tom slučaju prije određivanja kvantitativnog sadržaja (količinskog), određuje se kvalitativni sadržaj tj. prisustvo  $\text{CaCO}_3$  u tlu. Na komad stakla se stavi 1-2 g uzorka tla i prelige kapaljkom sa razblaženom 10% HCl-om i promatra šumljenje ili pjenušanje uzorka. Pojava pjenušanja i šumljenja je znak da tlo sadrži karbonate koji reagiraju sa razblaženim HCl-om. Što je jače i dugotrajnije pjenušanje veće je prisustvo karbonata. Nekad može izostati intenzivnije pjenušanje te je potrebno grumen zemlje pošpricati sa razblaženim HCl-om prinijeti uhu da

bi se čulo postoji li šumljenje koje je takođe posljedica oslobađanja CO<sub>2</sub> ali u uslovima količine CaCO<sub>3</sub> u tlu manjeg od 1%. Znači intenzitet pjenušanja ali i šumljenja direktno je proporcionalan prisustvu karbonata u tlu. Prema stepenu pjenušanja približno određujemo sadržaj CaCO<sub>3</sub>.



**Slike 22. i 23.Pjenušanje karbonatnog zemljišta (lijevo) i karbonantnog skeleta (desno)** (foto: Tvica M.)

**Tabela 2: Opis intenziteta pjenušanja i sadržaja karbonata u tlu na terenu** (Izvor: [34])

Terenska klasifikacija	Intenzitet pjenušanja	Karbonati (%)
nekarbonatno	nema	< 0,5
vlo siromašno	vrlo slabo, pjenušanje jedva primjetno	0,5 - 1
siromašno	slabo do umjereno čujno, lako pjenušanje pojedinih zrna	1 - 2
	umjereno do jasno čujno, isprekidano i vidljivo pjenušanje	2 - 5
jako i kratko	jasno čujno, umjereno pjenušanje s mjeđurićima promjera do 3 mm	5 - 10
jako i dugo	jasno čujno, jasno uočljivo, mnogobrojni mjeđurići promjera do 7 mm	>10

#### **4.3.2.7. Reakcija ili pH vrijednost tla**

Reakcija ili pH vrijednost tla je jedno od najznačajnijih karakteristika odnosno indikatora kvaliteta tla. On ukazuje na smjer i intenzitet pedogenetskih procesa u tlu. Tako npr. kod kiselih zemljišta ukazuje na procese ispiranje karbonata, ispiranje baza, zakiseljavanje, humifikaciju bazama siromašnih biljnih ostataka. Na ovaj način se stvaraju uslovi za intenzivno raspadanje primarnih minerala.

Nadalje, pH ukazuje na vrstu matičnog supstrata. Tako kod kiselih zemljišta sa pH u  $H_2O < 5,5$  najčešće upućuje na beskarbonatne silikatne supstrate - kvarcne pješčare, gline, škriljce ili granit i pripadajuće sedimente, a kod pH zemljišta iznad 5,5 najčešće upućuje na karbonatne supstrate (krečnjak, lapor) ili bazama bogate silikatne supstrate kao što su recimo gabro ili peridotit. Već smo rekli da pri neutralnoj pH u  $H_2O$  imamo obavezno prisustvo karbonata u zemljištu kao što je često slučaj sa zemljištima na karbonatnim glinama, karbonatnim pješčarima, laporovitim supstratima i flišu. Smeđa tla na krečnjaku i dolomitu i Crvenice na krečnjaku i dolomitu su uglavnom beskarbonatne iako su nastale na karbonatnim supstratima jer su karbonati u njihovom slučaju isprani. Izuzetno nasnosi čestica kalcita mogu biti nanijeti na ova tla erozionim procesima (vjetrom).

Vrijednost pH djeluje i na stanje fizičkih i hemijskih osobina tla. Kisela tla su najčešće slabije strukturna i posljedično lošijih vodnofizičkih i topotnih svojstava od slabo kiselih i neutralnih tala u kojima peovladava  $Ca^{2+}$  ion.

Nadalje pH utiče na pristupačnost hraniva. Koncentracija rastvorenih baznih soli u tlu ( $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $NH_4^+$ ) je proporcionalna visini pH. Tako za većinu poljoprivrednih kultura najbolja su umjereno kisela do neutralna tla znači pH u vodi od 5,5 – 7 jer u tom intervalu je najveća i koncentracija pristupačnih hraniva ali je najveća i rastvorljivost većine hraniva.

Više vrijednosti pH utiču na smanjenje rastvorljivosti toksičnih teških metala pri njihovim koncentracijama koje prekoračuju prag dozvoljenih vrijednosti, jer u tom slučaju teški metali će graditi teško rastvorljive hidrokside i neće biti pristupačni biljkama.

Danas se za određivanje pH reakcije tla na terenu koriste različiti autonomni prenosni ručni pH-metri sa pufernim rastvorima (pH 4 i pH 7) i posudicom za uzorak prilagođeni za rad u terenskim uslovima.



**Slika 24. Prijenosni pH-metar pogodan za rad na terenu (foto: Tvica M.)**

Tradicionalno se za određivanje reakcije tla na terenu koristi tečni univerzalni indikator (ili neki drugi) prethodno pripremljen u laboratoriji. Princip rada je da nakon reakcije uzorka zemljišta sa indikatorom dolazi do različitog obojenja u zavisnosti od kiselosti, koje zatim upoređujemo sa standardnim bojama koje odgovaraju uz razne pH vrijednosti.

#### ***Kvalitativno određivanje pH reakcije zemljišta u profilu***

Postavimo keramičku pločicu na ravnu površinu. Uzorci zemljišta iz različitih horizonata se postave u udubinu na keramičkoj pločici jedni ispod drugih po slijedu horizonata i doda im se nekoliko kapi univerzalnog indikatora da ih prekrije i malo izmiješa čistim vrhom pedološkog noža. Očitanje boje se ne vrši odmah nego najbolje je nakon 15-tak minuta, i gleda se boja indikatora oko uzorka zemljišta tj. po obodu udubljenja na keramičkoj pločici. U zavisnosti od reakcije zemljišta indikator će se obojiti u:

- crveno (kiselo tlo),
- žuto (neutralno) ili
- zelenu boju (alkalno zemljište).



**Slika 25. Kvalitativno određivanje reakcije tla pomoću univerzalnog indikatora**  
(foto: Tvica M.)

Priprema univerzalnog indikatora: U odmjernej tirkvici od 200 ml, u 100% alkoholu rastvoriti: 40 mg fenolftaleina; 80 g metil crvenog; 120 mg dimetil žutog; 160 mg brom timol plavog i 200 mg timol plavog. Na kraju, do pojave žute boje dodati 6-7 kapi n NaOH. Ovako pripremljen univerzalni indikator čuvati u tamnoj boci i na hladnom mjestu.

#### **4.3.2.8. Specifične pedodinamske tvorevine**

Takođe predstavljaju unutrašnje morfološko obilježje profila tla. Nastaju u tlu kao posljedica specifičnih pedodinamskih procesa u zemljištu. To su:

- nakupnine kalcij karbonata (pjege i mrlje dubljih slojeva ispranih tla; pseudomicelije i lesne lutkice u černozemima i degradirnim černozemima),
- nakupnine i izlučevine seskvioksida (željeza i aluminija) i mangana u hidromorfnim tlama (pjege, jezičci i mazotine rđasto smeđe ili žućkasto rđe boje);
- crne konkrecije - crni čagalj u težim hidromorfnim tlama od Fe i Mn humata a u pjeskovitim čitave ploče takvih taloga u vidu cementiranih ploča sa nazivom sljepenac, ortštajn ili hardpen;

- tamne prevlake (opne) oko strukturnih agregata;
- iscvjetanje vivijanita plavkaste boje naočito u barskim zemljištima (glej);
- nakupnine  $\text{SiO}_2$  u vidu bijele kvarcne prašine, na površini strukturnih agregata ili u obliku bjelkastih jezičaka i džepova,
- organske tvorevine (izlučevine, nakupnine) korijenja, miceliji gljiva, pjege i jezičci humusnih kiselina, tamne korice i sedimenti humata,
- razne tvorevine zemljišne faune (vijugavi hodnici crva, hodnici i kanali raznih rovilica - krotovine, ekskrementi faune tla).

### **4.3.3. UZIMANJE POJEDINAČNIH UZORAKA IZ PROFILA**

Uzorkovanje zemljišta se obavlja po horizontima u tri ili četiri ponavljanja. Uzimaju se tri ili četiri uzorka u poremećenom stanju u vrećicama plus tri ili četiri uzorka u neporemećenom stanju u metalnim cilindrima po jednom horizontu. Izuzetak su slučajevi kada su horizonti velike debljine (najčešće Ah ili B hor.) kada ih onda podijelimo u dva ili više podhorizonata radi reprezentativnijih uzoraka, a onda pojedinačne u ponavljanjima uzimamo po podhorizontima.

#### ***4.3.3.1. Uzimanje pojedinačnih uzoraka iz profila u poremećenom stanju u vrećice***

Pojedinačni uzorci u poremećenom stanju u plastičnim vrećicama uzimaju se od donjih horizonata prema gornjim. U suprotnom mijesala bi se zemlja iz gornjih horizonata sa onim iz nižih zbog obrušavanja.

Ukoliko se uzimaju recimo tri ponavljanja, širina horizonta (1 m) u otvorenom profilu se podijeli u tri dijela i iz svakog dijela pedološkim nožem i palcem zemlja se zahvaća sa više mjesta i stavlja u vrećicu s tim da uzorkovana zemlja ne smije prijeći graničnu crtu između horizonata. Težina uzetog uzorka je oko 0,7-1,0 kg. To znači ponovimo tri puta, u svakom horizontu.

U poremećenom stanju se može uzeti i jedan pojedinačni uzorak za cijeli horizont ali tada se uzima veća količina zemlje čitavom širinom horizonta. Pomoćnik upisuje brojeve pojedinačnih uzoraka i profila, oznaku horizonta i dubinu (cm) na kesama markerom. Isto zapiše i grafitnom olovkom na papiriće (ili pripremljene formulare) koje ubaci u plastične kese i zaveže zajedno sa uzorkom. Istovremeno u terensku svesku skicira i unosi brojeve uzoraka u vrećicama i cilindara po profilu i po horizontima.

#### **4.3.3.2. Uzimanja pojedinačnih uzoraka iz profila u neporemećenom stanju u cilindre**

Uzimanje pojedinačnih uzoraka u metalnim cilindrima počinje od gornjih horizonata prema donjim. Cilindar se utiskuje u zemlju otprilike u sredini horizonta. Tako ako je debljina horizonta 25 cm cilindar s utiskuje negdje u zoni od 8-20 cm. U našoj pedološkoj praksi se najčešće koristi cilindar Kopeckog. To je metalni prsten poznate zapremine od  $100 \text{ cm}^3$ , sa ugraviranim brojem cilindra i jednom naoštrenom stranom, onom koja se utiskuje u zemlju.



**Slike 26. i 27. Uzorkovanje cilindrom iz profila, držač cilindra sa utisnutim cilindrom (slika desno) (foto: Tvica M.)**

Prvo se ukloni vegetacija i kamenje a potom se hašovom skloni površinski sloj zemlje sa najviše korijena (nekoliko cm) praveći jednu ravnu površinu u koju će se utiskivati cilindri. Najbolje je uzorkovanje vršiti u tlu sa vlažnošću približno retencionom (poljskom) kapacitetu. Cilindar se izvadi iz kutije, skinu se poklopci i asistentu se pročita broj cilindra koji on upiše u radnu svesku uz broj profila, horizont i dubinu (debljinu) horizonta. Zatim se cilindar stavlja u držač (nosač) cilindara, tako da naoštreni dio cilindra viri iz držača i on će se zabijati u zemlju. Postavimo stabilizator cilindra na očišćeno mjesto desetak cm od ivice ogledne strane profila, umetnemo nosač sa cilindrom u stabilizator i lagano gumenim čekićem udaramo po drški držača i zabijamo cilindar u zemljiste do oznake - ugravirane crte na držaču cilindra. Zatim se lopaticom ili pedološkim nožem cilindar vadi iz zemlje tako što se prvo okruni zemlja od ivice do cilindra. Potom lijevom rukom držimo držač sa cilindrom, a desnom rukom se zabije/podvuče pedološki nož ispod cilindra (do 1 cm) pa se pomjeri tri četiri puta lijevo desno i u takvom položaju kao da se nožem u desnoj ruci podiže/nosi cilindar (lijeva ruka je na držaču), vadi se iz zemlje. Drška držača se okreće prema dole tako da cilindar, s uzorkom koji viri iz cilindra, bude u višem položaju (da se zemlja ne prosipa ako je suha ili rastresita) i onda se pedološkim nožem pomalo

skida taj višak zemlje koja „viri“ iz cilindra i to rezanjem od ivice cilindra prema sredini tako da jezgro zemlje na kraju bude u poravnato sa ivicama prstena. Na tu stranu cilindra se stavlja poklopac. Potom se cilindar okreće tako da cilindar sa poklopcem bude okrenut dole, i izvlači se cilindar iz nastavka tj. držača i sa druge strane cilindra se ponovi postupak skidanja viška zemlje koji viri iz cilindra i stavlja se poklopac. Takav uzorak u cilindru se stavlja u kutiju. To se ponavlja i u narednim, dubljim horizontima s tim da se svaki put mora na granici između horizonata hašovom skinuti preostali sloj zemlje iz gornjeg horizonta i ponovo u sljedećem nižem horizontu napraviti jednu ravnu površinu u koju će se utiskivati cilindri. Cilindri sa uzorcima se slažu u metalne kutije po redu, po profilima i genetskim horizontima kako se i uzimaju.

#### **Napomena:**

Ako je zapremina tla u cilindru manja od zapreme cilindra, ili ako je uzorak oštećen tokom transporta, uzorak ne treba koristiti za analizu.

Ako je moguće, neporemećene uzorce u cilindru treba uzimati samo sa zemljišta u kojima procenat skeleta nije veći od 10 do 15%.

Uzorci sa velikim izbočenim kamenjem će se morati odbaciti.

Ako uzorci tla imaju manji volumen od cilindra tj ukoliko je tanak sloj tla, potrebno je uzeti plitke uzorce ( $h < 51$  mm) tj. koliko je moguće, s tim što treba izračunati ili izmjeriti visinu uzorka u cilindru odnosno preciznije: izmjeriti slobodni dio u prstenu i taj broj oduzeti od visine cilindra.

Brojevi uzoraka na plastičnim vrećama kao i ugravirani brojevi metalnih cilindara, razvrstani po otvorenim profilima i genetskim horizontima, upisuju se i u terensku svesku.

Podaci o broju profila, lokaciji te morfološkim obilježjima profila mogu se evidentirati i u posebnom formularu.

Uzorkovanje iz profila se prema potrebi, a najčešće kada se radi o detaljnim i specifičnim naučnim istraživanjima, mogu raditi i mnogo detaljnije svakih 10 cm ili 15 cm (npr. kod kvantifikacije karbona). Svaka podjela i uzorkovanje se mora vršiti u okviru jednog horizonta. Isto tako horizonti velike debljine (na pr. najčešće 50 cm i više) mogu se podijeliti u dva dijela (2 x 25cm) i iz svakog dijela treba izvršiti posebno uzorkovanje.

**Tabela 3. Primjer vođenja evidencije u terenskoj svesci pri uzorkovanju profila**

29.09.2022. Uzorkovanje izvršili: Damir i Tvrtko. Vrijeme sunčano. PROFIL 1. njiva nepoznatog vlasnika, ostaci kukuruza, ravan teren, vlažnost 30%						
Oznaka horizonta	Dubina (cm)	Broj uzorka u poremeć. stanju	Broj cilindra - ugraviran	Struktura/ Specifične pojave	Tekstura	Napomena
Ah (tamniji)	0-30 cm	1	68	mrvičasta	ilovača	hodnici glista
		2	7			suha zemlja, uzorak u cilind. se rasipao
		3	11			Rizosferni sloj
B (žuto smeđa boja)	30-67	4	5	Mramoriran izgled na dubini od 60 cm (pseudo-oglejavanje)	Glinovita ilovača	prijelaz između horizonta jasan
		5	99			
		6	36			

Predstavljanje rezultata u tabelama, nakon izvršenih analiza takođe se vrši po genetskim horizontima. Kvantitativni pokazatelji pojedinih karakteristika za genetske horizonte u preglednim tabelama predstavljaju prosječne rezultate za tri ponavljanja. Prethodno su u statističkoj obradi urađeni standardna devijacija i koeficijent varijacije za tri ponavljanja.

Važno je znati da tumačenje rezultata istraživanja obavezno počinje sa tumačenjem pojedinih karakteristika i svojstava prvo po horizontima (na pr.: U Ah horizontu sadržaj organske materije iznosi 2,7 % i on je umjereno humozan a pH reakcija u 1MKCl je 5,6 (umjereno kisela). U B horizontu je sadržaj organske materije je 0,35% (slabo humozno) a pH u 1M KCl 5,3 (umjereno kisela) i onda se vrlo oprezno tumačenje rezultata referira na cijeli profil odnosno tip tla.

Vrlo je važno nakon izvršenog uzorkovanja iskopani profil ponovo zatrpati i to tako da se prvo vrati u profil iskopana zemlja iz dubljih slojeva a na kraju i najplodniji površinski Ah horizont, i da koliko je to moguće mjesto uzorkovanja ostavimo u stanju kakvom je i bilo prije iskopa profila.

#### **4.3.4. UZIMANJE POJEDINAČNIH UZORAKA ZEMLJIŠTA I FORMIRANJE PROSJEČNIH UZORAKA**

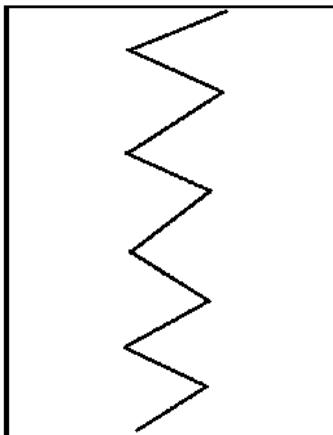
Uzorkovanje zemljišta iz profila tla odnosno genetskih horizonata propisano je normama ISO 18400-102:2017 - *Soil Quality-Sampling*, te ISO 1840-104:2018, ISO 1840-202:2018 i ISO 1840-205:2018 (*Soil Quality-Sampling*) [196].

Za razliku od pojedinačnih uzoraka u poremećenom i neporemećenom stanju uzetih iz profila koji se koriste za izvođenje najvećeg broja fizičkih, vodnofizičkih i hemijskih analiza zemljišta, prosječan uzorak za neku parcelu se uzima najčešće za tzv. hemijsku analizu tla ili kontrolu osnovnih elemenata plodnosti tj. opskrbljenosti tla pojedinim elementima. Najčešće su to osnovna biljna hraniva i organski karbon (humus). Prosječni uzorci se uzimaju i za analizu teških metala i drugih onečišćivača u tlu (PAH-ovi, naftni derivati, ostaci pesticida). Naziv prosječan proizilazi iz potrebe da uzorak reprezentira prosječne vrijednosti sadržaja elemenata ili tvari na ispitivanoj homogenoj parseli. Takođe naziv prosječan uzorak za razliku od pojedinačnog uzorka asocira na uzimanje više pojedinačnih uzoraka sa više mjesta koji se poslije homogeniziraju miješanjem.

##### ***4.3.4.1. Određivanje mesta uzimanja pojedinačnih uzoraka - Plan uzorkovanja tla***

Za ratarske kulture kao i za one žbunaste uzima se prosječni uzorak sastavljen od više pojedinačnih uzoraka uzetih sa dubine od 0 – 30 cm. Za voćnjak se uzimaju dva prosječna uzorka i to jedan koji se formira od više pojedinačnih uzorka uzetih sa dubine od 0-30 cm i drugi prosječni uzorak od više pojedinačnih uzetih sa dubine od 30-60cm. U proizvodnji povrća i cvijeća na otvorenom uzorak tla se uzima iz dvije dubine: 0-15 i 15- 30 cm, a u plasteničkoj proizvodnji samo na dubini od 0 do 25 cm.

Pojedinačni uzorci od kojih se formiraju prosječni uzorci za neku parselu a koji se koriste za izvođenje tzv. hemijskih analiza zemljišta ili kontrolu osnovnih elemenata plodnosti tla najčešće se uzimaju sa 15-20-tak mjesta zavisno od veličine parcele, određenih cik-cak metodom ili sa više mjesta sa zamišljenih linija kojim se formiraju slova N, X ili W. Često se koristi kod uzorkovanja tla na manjim parcelama. Koristi se i kod monitoringa tla.



**Slika 28. Određivanje mesta uzimanja pojedinačnih uzoraka hašovom ili sondom cik-cak metodom radi formiranja prosječnog uzorka**

Naročito je važno da se pojedinačni uzorci ne uzimaju u blizini građevinskih objekata, ograda, puteva, stubova i dalekovoda, iz depresija, uz rub parcele ili sa mesta gdje je ležao stajnjak. Ukoliko se radi o nagibu uzimati uzorke i sa vrha i sa sredine i podnožja parcele. Ukoliko je veća parcela na nagibu ili veći nagib, podijeliti parcelu i uzeti dva prosječna uzorka sa višeg i nižeg dijela. Ukoliko su na ispitivanoj većoj parceli evidentne razlike u reljefu ili mehaničkom sastavu, boji tla, ili višegodišnjem načinu korištenja... znači ukoliko se radi o nejednoličnoj ili neuniformnoj ispitivanoj parceli, onda se i površina sa koje se uzima prosječan uzorak treba podijeliti na više manjih ali ovaj put jednoličnih parcela, a prosječni uzorak se uzima sa svake od njih.

Razlikuju se uzorkovanje male parcele od 0,5 do 5 ha od onih većih površina iznad 5 ha. Preporuka je da se na većim površinama prosječni uzorci najčešće uzimaju na svakih 3 do 5 ha [121].

Kada je za tumačenje dobivenih rezultata analize na prosječnom uzorku potrebno poznавanje i detaljnijih karakteristika zemljišta dobivenih analizom pojedinačnih uzoraka iz profila tla, najčešće se oko otvorenog pedološkog profila formira mreža kvadrata vanjskih dimenzija 5 x 5 metara. Potom se sa tačaka ukrštanja vertikalnih i horizontalnih linija unutar mreže uzimaju pojedinačni uzorci (25-35 kom) od kojih se formira prosječni uzorak.

Za uzorkovanje veće parcele mreža kvadrata može biti i veća (200 x 200 m) a tačke uzorkovanja se moraju precizno odrediti.


**Slika 29. Mreža kvadrata za prosječni uzorak**

Jednako tako u sistematičnom pristupu pri uzimanju uzoraka mogu se koristiti koncentrični krugovi, počev od manjih prema većim radiusima, gdje bi se sa svake zamišljene kružnice uzimali uzorci (na pr. 8 ili 10 uzoraka sa svake kružnice, s tim da se uzorci sa pojedinih kružnica ne mješaju). Ovo se preporučuje kada se vrši ispitivanje tla na potencijalno onečišćenje oko nekog tačkastog izvora onečišćenja (na pr. fabrika, cementara, željezara ili termoelektrana).

Takođe se može koristiti i slučajno ili randomizirano uzimanje uzoraka sa istraživane površine ukoliko uslovi na terenu ne dozvoljavaju sistematičniji pristup.

Uzorkovanje za kontrolu plodnosti tla može obavljati tokom cijele godine, ali najbolje je po skidanju gajenih biljaka a kod višegodišnjih biljaka u toku mirovanja vegetacije. Ne treba se provoditi u slučaju izvršene kalcizacije, zatim u periodu od 60 dana nakon gnojidbe, kada tlo svojim stanjem onemogućuje uzorkovanje tj. kad je tlo smrznuto, zbijeno, presuhlo ili prevlažno [175].

Prosječni uzorak se može uzeti na dva načina, hašovom iz iskopanih rupa ili sondiranjem tla tj iz tzv. bušotina.

#### **4.3.4.2. Uzimanje pojedinačnog i prosječnog uzorka hašovom**

Najčešće se prosječni uzorak za neku parcelu na kome će se izvršiti kontrola plodnosti tla formira od više pojedinačnih uzoraka uzetih hašovom i to od strane samog farmera vlasnika parcele.

**Postupak:** Na više mjesta određenih cik-cak metodom (najčešće 15-20 po 1ha) odstrani se vegetacija sa površine i iskopa manja rupa dimenzija 30 x 50 cm i 30 cm dubine, a zatim se hašovom uzima jedna glatka vertikalna kriška debljine 5-6 cm iz svake rupe i stavlja u veću kesu za prosječni

uzorak. Kada se skupi tih 15-20 jednakih kriški zemljišta, ili već u vrećici sjedinjeni uzorci se istresu na čistu i ravnu površinu (može i na platno ili karton) i dobro izmiješaju (homogenizira se prosječni uzorak). Zatim se od homogeniziranog uzorka formira krug koji se podijeli na četiri dijela. Od dva nasuprotna dijela uzorka (trouglja) formira se prosječni uzorak (0,5 - 1,0 kg tla). Prosječan uzorak se stavlja u čistu kesu na koju se napiše broj uzorka (ukoliko ih ima više), ime vlasnika parcele, naziv parcele, površina i dubina uzorkovanja. Taj uzorak predstavlja reprezentativni prosječan uzorak za ispitivanu površinu.

Kod skeletnih i skeletoidnih tala se ne izbacuje kamenje nego spremu zajedno sa finom zemljom kao jedinstven reprezentativan uzorak koji se šalje u laboratoriju.

Za voćarske kulture uzima se i prosječni uzorak sa dubine od 30-60 cm. Ove radnje se ponove u istim rupama ali ovaj put se uzimaju kriške hašovom sa dubine 30-60 cm. Prilikom označavanja vrećica ili unaprijed spremljenih etiketa koje se ubacuju u vrećicu zajedno sa uzorkom, jasno se naglasi dubina uzorkovanja, s tim da je očigledna razlika u boji (zbog humusa u površinskom horizontu), prisustvu korijenja i po zrnastoj strukturi u površinskom prosječnom uzorku.

#### **4.3.4.3. Uzimanje pojedinačnog i prosječnog uzorka sondom**

Sondiranje terena, pored onog u svrhu rekognosciranju terena, podrazumijeva i bušenje terena sondom ili svrdлом i izvlačenje jezgra zemljišta radi uzimanja pojedinačnih ili prosječnih uzoraka za analizu karakteristika zemljišta.

**Pojedinačni uzorci iz sondi** se uzimaju radi brzog određivanja osnovnih fizičkih i hemijskih osobina zemljišta na terenu. Uzimaju se kao i u slučaju rekognosciranja terena s tim da može da se koristi specijalna manja sonda sa nogarom za lakše utiskivanje. Svakom izvatu jezgra tla određen je broj uzorka, upisane su koordinate te datum sondiranja. Ovi uzorci najčešće se analiziraju odmah na terenu kada se na licu mjesta na osvježenom jezgru tla, (nakon odstranjivanja nožem vanjskog dijela jezgra tla u sondi), utvrđuje boja i dubina horizonata (najčešće dva površinska horizonta Ah i B), boja, struktura, tekstura, pH vrijednost, prisustvo karbonata te se podaci upisuju u poseban formular [82]. Ovi uzorci mogu i da se naknadno analiziraju u laboratoriji.

**Prosječni uzorci zemljišta** mogu se formirati i od pojedinačnih uzoraka iz sondi. Prosječni uzorci se koriste za naknadno analiziranje u laboratoriji. Na terenu se jezgra tla iz sondi ili svrdla, uzetih sa više mjesta i određenih

dubina (po istim principima kao i kod uzimanje uzoraka hašovom), skupljaju u plastičnu kesu te se od njih naknadno miješanjem i homogeniziranjem formira prosječni uzorak za istraživanu parcelu uz precizno označavanje dubina iz kojeg su uzeti uzorci. Prosječni uzorak se može uzimati i posebnim manjim sondama ili pomenutim sondama sa nogarom, naročito iz oraničnog ili rizosfernog sloja (0-30 cm) zbog lakšeg utiskivanja sonde u zemlju.

Važno je napomenuti da se po izvlačenju sonde iz tla s jezgrom tla, prvo vertikalno nožem odstrani vanjski dio jezgra radi vjerovatne kontaminacije jezgra (miješanje tla iz različitih slojeva, najčešće dubljih slojeva sa onim plićim) prilikom vrtenja i izvlačenja sonde, a onda jezgro spremi u vrćicu.

**Postupak:** Prvo se uklanjuju biljni ostataci sa površine zemljišta a potom utiskujemo sondu rukama ili zabijamo čekićem uz povremeno okretanje sonde u tlu ili utiskujemo svrdlo kružnim okretanjem do 30 cm dubine. Nakon što smo zabili sondu do željene dubine vršimo kružno okretanje sonde u zemljištu a potom pažljivo izvlačenje sonde zajedno sa jezgrom zemljišta u njoj. Vertikalno nožem odstranimo vanjski kontaminirani dio jezgra. Zemljišno jezgro istiskujemo šipkom ili nožem u kesu za prosječni uzorak od 0-30 cm. Sve uzorke kao i u slučaju uzorkovanja hašovom stavljamo na čistu podlogu te rukom sitnimo i miješamo stvarajući homogenizirani, reprezentativni prosječni uzorak.

**Mašinsko uzimanje uzorka sa parcele** - Kod svih uzorkovanja preporučeno je koristiti GPS tehnologiju određivanja tačnih koordinata mjesta uzorkovanja. Pomoć GPS tehnologije koriste i specijalni strojevi za mnogo detaljnije sistematsko uzorkovanje jezgra tla sa dvije dubine u zavisnost od zahtjeva kulture koja će se uzbunjati. Često ovi strojevi koriste i satelitske snimke na kojima je izvršena digitalna analiza slika koja upućuje na razlike u dijelovima gole parcele na osnovu boje tla, odnosno koji dijelovi usjevom pokrivene parcele imaju veću produktivnost biomase (gustina i boja zelene mase). Na ovaj način ciljano se uzimaju i analiziraju uzorci tla a na osnovu rezultata može se dosta preciznije i detaljnije skicirati opskrbljeno tla hranivima po pojedinim dijelovima parcele. Na osnovu ovih rezultata opekrbljenosti pristupa se odgovarajuće (različito) doziranom đubrenju po pojedinim površinama unutar iste parcele a ne ujednačenim dozama po cijeloj površini kao u ostalim slučajevima.

Podaci koji se uzimaju za prosječni uzorak koji će se koristiti za analizu kontrolu plodnosti tla sadrže i kratki opis i historijat korištenja parcele:

1. ime i prezime, adresa i telefon vlasnika parcele,
2. naziv parcele, njena površina, katastarska čestica i katastarska opština,
3. usjev ili zasad koji se namjerava zasnovati,
4. sadašnji usjev na ispitivanoj parseli i usjevi u zadnjih 3-5 god.,

5. tip tla,
6. da li se navodnjava,
7. čime i koliko je gnojeno u zadnjih 3-5 god.,
8. opis površine tla (brežuljkasta, valovita ili ravna), nadmorska visina, ekspozicija, nagib, blizina vodotoka,
9. prirodna ili vještačka drenaža, (zadržava li se voda na površini parcele),
10. matični supstrat,
11. tvrdoću tla,
12. dubinu tla,
13. sklonost eroziji i ostale karakteristične osobine.

#### **4.3.5. UZORKOVANJE POVRŠINSKOG ORGANSKOG HORIZONTA ŠUMSKIH TALA**

Postoje neke specifičnosti uzimanja uzoraka šumskih zemljišta. Prije svega tu se radi generalno o uzorkovanju površinskog organskog O horizonta (sadržaj organske materije veći od 30%) šumskih tala. Taj horizont se formira od nadzemnih biljnih ostataka šumskih ekosistema (lišće, iglice, kora, grane, grančice) koji se nalaze u manje ili više humificiranom stanju i koji kao takvi predstavljaju različite podhorizonte. To stanje ide u rangu od suhog lišća na površini tla, pa preko prepoznatljivih biljnih ostataka u L horizontu - listincu ili preciznije šumskoj prostirci (engl. *litter* = prostirka), pa preko prelaznog podhorizonta sa izmješanim prepoznatljivim i humificiranim ostacima (podhorizont Of), i na kraju do podhorizonta izgrađenog od dominantno humificiranih ostataka tamne boje (podhorizont Oh) različite debljine koji neposredno leži na mineralnom tlu.

Ono što je najvažnije kod uzorkovanja ovog horizonta je stroga pažnja da bi se uzeo samo čist uzorak iz površinskog organskog horizonta bez kontaminacije sa mineralnim dijelom zemljišta, znači strogo pazeći da ne dođe do miješanja ovog uzorka organskog O horizonta sa mineralnim Ah horizontom na kojem leži.

Pošto se sam O horizont sastoji od podhorizonata tako se uzimaju i uzorci, znači po podhorizontima. Ovdje je jako bitno precizno odrediti površinu sa koje se uzorkuje O horizont i to su najčešće dimenzije 25 x 25 cm, te debljinu podhorizonata L, Of i Oh. Ovo je posebno važno kada se u svrhu istraživanja zemljišta vrši i kvantifikacija zaliha karbona u tlu. Radi velike razlike u koncentraciji karbona (%C) u ovim podhorizontima i potrebe za što preciznijim obračunom zaliha karbona moraju se što je preciznije moguće odrediti debljina pojedinih podhorizonata i sprečiti miješanje uzoraka iz podhorizonata. Iz istog razloga potrebno je i uzeti što više pojedinačnih uzoraka radi dobivanja što realnije prosječne vrijednosti.

Kod uzorkovanja mrtvih ostataka (suhog lišća) na površini šumskih tala koristi se metalni ili drveni ram poznatih dimenzija ( $25 \times 25$  cm) koji se stavlja na površinu tla i potom se u plastičnu vreću pokupi svo suho lišće koje leži unutar rama. Potrebno je uzeti što više ovakvih uzoraka radi dobivanja što reprezentativnijih prosječnih vrijednosti za datu šumsku površinu.

Kada se radi o dalnjem uzorkovanju podhorizonata L, Of i Oh, postupak je sljedeći. U šumskoj prostirci se hašovom usijeće kvadrat (najčešće na površini iskopanog profila) i zatim se pažljivo u posebnu posudu skidaju prvo L horizont, zatim u posebnu kesu Of horizont i na kraju opet u posebnu kesu Oh horizont. Posebno kod uzorkovanja humificiranog Oh horizonta koji je izrazito tamne boje treba voditi računa da se uzorak ne kontaminira sa mineralnim dijelom zemljišta (Ah horizont na kome leži organski O horizont). To se u iskopanom profilu ponovi tri ili četiri puta i na kraju se iz dobivenih rezultata laboratorijskih analiza obračunavaju prosječne vrijednosti.

Uzorci u neporemećenom stanju u cilindru se uzimaju samo ukoliko debljina Oh horizonta i stanje organske materije to dozvoljavaju. Već je napomenuto da ukoliko je tanak sloj tla koji treba uzorkovati, potrebno je uzeti plitke uzorce ( $h < 51$  mm) tj. uzeti koliko je moguće, s tim što treba izračunati ili izmjeriti visinu uzorka u cilindru odnosno preciznije: izmjeriti slobodni dio u cilindru i taj broj oduzeti od visine cilindra. Takođe u nekim posebnim slučajevima cilindar se može ispuniti zemljišnim materijalom, pazeći koliko je moguće da gustina uzorka u cilindru odgovara stvarnom stanju u ispitivanom (pod)horizontu.

Posebnu pažnju zahtjeva i površinski mineralni Ah horizont šumskih tala. U njemu je prisutna velika razlika u koncentraciji organskog karbona po dubini. Tako u plitkom površinskom dijelu Ah horizonta šumskih tala uglavnom se nalazi najveća koncentracija organske materije odnosno organskog karbona (C %). To je logično jer taj plitki površinski dio je u stalnom kontaktu sa humificiranim organskim materijom iz Oh horizonta koji leži na njemu i s kojom se vremenom miješa. Debljina tog sloja sa većom koncentracijom C se određuje na licu mjesta jer je vidljiva razlika u boji. Najčešće je do dubine od 8 cm, nekad i do 12 cm i to se određuje na licu mjesta u iskopanom profilu. Ispod ide dio mineralnog Ah horizonta sa nešto manjom koncentracijom karbona. Njegova dubina je znači najčešće od 8 – 12 cm a može ići i od 12 – 22 cm. Iz tog razloga se Ah horizont šumskih tala podijeli u dva dijela po dubini i posebno se uzorkuje svaki dio (uzorci u poremećenom i neporemećenom stanju).

#### 4.3.6. UZIMANJE MONOLITA

Monolit predstavlja prizmatičan prirodan uzorak (otisak) profila tla od površine do matičnog supstrata. Monolit preslikava stvarno stanje morfoloških obilježja tla kako vidimo u trenutku otvaranja profila. Uzima se radi dopunskih morfoloških istraživanja i za upoređivanje različitih tipova, podtipova, varijetata i vrsta tla na jednom mjestu. Koristi se i za zbirke, izložbe i naravno u edukativne svrhe.

**Postupak [125]:** Debljina otiska iznosi oko 2 cm s tim da mu je površina impregnirana lakovima i ljepilima. Prirodne prizme uzimaju se u sanduke duge 100–150 cm, 20 cm široke i 8 cm debljine. Prvo se na zaglađenoj strani profila ucrtava okvir i ureža prizma tla čije sve tri dimenzije odgovaraju sanduku za uzimanje monolita. Skinemo poklopce s već pripremljenih sanduka i utisnemo okvir u urez prizme, tako da je vanjska strana prizme u visini ivica sanduka. Zatim pričvrstimo poklopac na ovu stranu sanduka. Ona strana sa kojom se cijeli monolit sa sandukom drži za profil tla oslobođi se kopanjem jame sa obje strane sanduka i odozdo, te pažljivo odvali od ostatka zemljišta. Višak zemlje se precizno odreže i sanduk zaklopi drugim poklopcem.



Slika 30. Monoliti tipova tala Podzol (lijevo) i Černozem (desno), Poljoprivredni fakultet u Bonu (foto: Sijahović E.)

#### **4.3.7. Dnevnik terenskih istraživanja**

Čitavo vrijeme rada na terenu, od prvog preliminarnog izlaska i rekognosciranja, preko sondiranja i određivanja mjesta uzimanja uzoraka, zatim otvaranja profila i uzimanja pojedinačnih i prosječnih uzoraka tla, pored obaveznih evidencija koje prate uzorkovanje tla, mora da se vodi dnevnik svih zapažanja koja se dese na terenu.

Prvo i osnovno je da se zapisuje svaki izlazak na teren, označi datum, vrijeme, kolege i cilj izlaska na teren.

Zatim se redovno unose opisi svih zapažanja vezanih za karakteristike istraživanog područja (geologija, hidrologija, specifičnosti reljefa, pokrivenost zemljišta vegetacijom, način korištenja zemljišta).

Naravno, da su najvažnije zabilješke o zapažanjima koja prate određivanja vanjskih i unutrašnjih morfološka obilježja i evidentiranje uzoraka. Za to se koristi dnevnik pedoloških istraživanja koji može biti sistematski sadržan u formi formulara-zapisnika. Formular može da sadrži: redni broj profila (svaki profil ima svoj broj), lokalitet, datum, sistematska oznaka tla, nadmorska visina, inklinacija, eksponicija, erozija, reljef, matični supstrat, vegetacijski pokrov, klimatske i hidrološke prilike, te morfološki opis profila po horizontima.

Morfološki opis je jako značajan za klasifikaciju i tu posebno treba voditi računa o: dubini tla, sklopu profila – slijedu horizonata, boji genetičkih horizonata, teksturi i teksturnoj diferencijaciji po horizontima ili slojevima, strukturi, poroznosti, dreniranosti, koherenciji, vlažnosti, dubini prodiranja najveće mase korijena, specifičnim pedo dinamskim tvorevinama, reakciji tla i prisustvu  $\text{CaCO}_3$ , znači sve o čemu je bilo prethodno govora.

Drugi najvažniji podaci su vezani za samo uzorkovanje, koje je puno svojih specifičnosti, od evidencije pa preko prisustva skeleta, kvaliteta pojedinih uzoraka jer nije uvijek koncentracija onoga koji vrši uzorkovanje na istom nivou. Neki podaci se mogu i naknadno unijeti.

Razgovore koji su se vodili na terenu sa domaćim stanovništvom takođe treba zapisivati. Tu naravno spada i kratak istorijat gnojidbe, plodoreda, obrade, melioracijskih zahvata i sl. Nijedan podatak nije suvišan ili nepotreban. Sva zapažanja treba zapisivati.

Ukoliko ne postoji zapisnik u formi formulara, zapažanja ovim redom se upisuju u običnu teku. Dobro je da sam dnevnik istraživanja ima vodotporne korice.

## **5 ISTRAŽIVANJA ZEMLJIŠTA U LABORATORIJI**

Za detaljniju procjenu kvaliteta ispitivanih zemljišta koriste se rezultati laboratorijskih analiza izvedenih na uzorcima zemljišta donijetim sa terena. Rezultati laboratorijskih analiza imaju kvantitativni karakter i njihove vrijednosti u odnosu na slična terenska istraživanja daju precizniji uvid u pojedine karakteristike tla. Na ovaj način, zajedno sa opisom morfoloških osobina tla sa terena, stiče se kompletniji i jasniji uvid u stanje fizičkih, vodno-fizičkih i hemijskih osobina zemljišta neophodnih za konačnu procjenu tipološke pripadnosti i kvalitet tla povezanu sa ciljem istraživanja.

Najčešći ciljevi su, kako je već navedeno, procjene kvaliteta tla u kontekstu proizvodnje biomase i ekološko - regulacijske uloge tla. Takođe, kompletirajući sve rezultate istraživanja, počev od onih kameralnog tipa o pedogenetskim faktorima, zatim istraživanja na terenu, uzorkovanje i rezultate laboratorijskih analiza dobivamo sveobuhvatniji uvid u karakter i intenzitet pedogenetskih procesa što predstavlja ključ određivanja tipološke pripadnosti ispitivanog zemljišta.

Laboratorijska istraživanja odnosno analize sadržane u ovom priručniku najčešće su opisane kroz: uvod, definiciju i značaj ispitivanih karakteristika; princip i postupak određivanja mjerljivih karakteristika tla; te obračun, uobičajene vrijednosti i opis rezultata analiza.

Sve ispitivane karakteristike tla mogu se grupisati u posebna poglavlja:

1. Organska materija tla (humus)
2. Fizičke osobine tla,
3. Vodno-fizičke osobine tla i
4. Hemijske osobine tla

### ***PRIPREMA UZORAKA TLA ZA IZVOĐENJE LABORATORIJSKIH ANALIZA***

Uzorci sa terena transportovani u laboratoriju prvo dobijaju svoj laboratorijski broj prilikom evidencije u knjigu uzorka, gdje se unose i podaci o: datumu evidencije, broju uzorka sa terena, dubini uzorkovanja, datumom uzorkovanja, vrsti analize, podacima o proizvodnoj površini, vlasniku i osobi koja je uzorkovala tlo. Praksa je i da se uzorak prebac u plastičnu ili kartonsku ambalažu (kutiju) u kojoj će se čuvati u laboratoriji i da se na njoj zalijepi etiketa, odnosno upiše laboratorijski broj, broj uzorka sa terena i sl.

Prije samog početka izvođenja pojedinih laboratorijskih analiza moramo izvršiti pripremu uzorka donijetog sa terena u poremećenom stanju radi dalnjeg izvođenja analiza. Priprema uzorka za analizu uobičajeno se izvodi na osnovu ISO 11464:2009 (engl. *Pretreatments of samples for physico-chemical analysis*).

**Postupak [88, 125, 158]:** Priprema uzorka u poremećenom stanju se sastoji u sljedećim radnjama:

1. **Sušenje uzorka i izdvajanje srednje probe,** obavlja se u laboratoriju na sobnoj temperaturi razastiranjem uzorka na plastičnoj tacni ili papiru. Pojedinačni ili prosječni uzorak u poremećenom ili rastresitom stanju donijet sa terena u vrećici se istrese na tacnu a zatim rukama raspodjeli po čitavoj površini tacne u sloju debljine manje od 2 cm. Istovremeno krupnije grudve (veće od 1,5 cm) se usitne rukom što je važno pogotovo kod glinovitih zemljišta jer bi one nakon sušenja postale tako tvrde da bi to znatno otežalo sitnjenje uzorka u avanu ili bi morao da se koristi specijalni mlin za mljevenje uzorka zemljišta. Takođe, uklanaju se ostaci živog korijenja koji se nalazi u razastrtom uzorku ili kišne gliste koje se često tu nađu. Sušenje zemlje traje nekoliko dana, najčešće tri četiri dana, na sobnoj temperaturi pri čemu treba paziti da ne dođe do izloženosti uzorka suncu ili peći. Ovako osušen uzorak nazivamo vazdušno ili zračno suhi uzorak. Za sušenje uzorka tla sa terena mogu se koristiti i vitrine sušionice u kojima se sušenje vrši na temperaturi koja ne prelazi 40°C, što značajno ubrzava sušenje a i smanjuje mogućnost promjena na uzorku tokom sušenja (mikrobiološka razgradnja organske materije).

Prije sitnjenja uzorka ukoliko je uzorak veliki (više od 1kg) treba odvojiti jedan dio vazdušno suhog uzorka tzv. srednju probu od 500 g. Cijeli uzorak se razastre na ravan, dijagonalno presječe na 4 trokutasta djela s tim da se za srednju probu uzima zemlja iz dva nasuprotna trokuta.

Takođe se, prije sitnjenja, izdvoji jedan dio uzorka za analizu strukture tla.

2. **Sitnjenje ili mljevenje vazdušno suhog uzorka,** vrši se gumenim tučkom u avanu pazeći da se pri tome ne usitni skelet ili krupni pijesak, znači krupnije primarne granulometrijske čestice. Prvo se izdvoji vidljivi skelet a potom se uzorak sa tacne prespe u avan a zatim se lakim mehaničkim silama sa tučkom kombinirano izvode trljanje i blagi udarci po grumenima zemlje te na taj način razbijaju krupni agregati i sitni uzorak. Udarac tučka u skelet stvaraće metalni zvuk i u tom slučaju

treba odmah izvaditi kamen ili šljunak iz avana. Izvađeni skelet skupljati na jednom mjestu.

Poslije svakog prosijavanja avan i tučak se moraju očistiti, najbolje suhom krpom.

Već smo pomenuli da se za sitnjenje uzoraka pogotovo onih tvrdih i kada se radi o velikom broju pristiglih uzoraka, može koristiti i mlin za mljevenje i sitnjenje uzorka zemljišta. Ovim putem se priprema uzorka znatno ubrzava. Takođe, ovako usitnjeni uzorci mogu dati reprezentativnije uzorku sitnice za daljnje analize jer će se usitniti ispod 2 mm i svi otporniji na sitnjenje glinoviti agregati (što je u avanu često teško postići u punoj mjeri), s tim da treba voditi računa ukoliko je prisutan skelet u uzorku.

3. **Prosijavanje uzorka i izdvajanje skeleta**, vrši se kroz čisto sito od nehrđajućeg čelika promjera 2 mm. Uzme se sito od 2 mm i ispod stavi hvatač uzorka, a potom se uzorak iz avana ili nakon mljevenja presipa u sito i rukom se vrši miješanje i protresanje sita da bi sitnica prošla kroz sito. Tako se vrši odvajanje:

- frakcije skeleta (šljunak i kamenje), > 2 mm koja se zadržava na situ
- frakcije fine zemlje - sitnice, < 2 mm, koja je prošla kroz sito.

Poslije svakog prosijavanja sito se mora očistiti.

**Izdvajanja skeleta sa sita od 2mm** - Teoretski, sadržaj na situ od 2mm nakon sitnjenja i prosijavanja predstavlja skelet, međutim u praksi to i nije tako. Iz jednostavnog razloga jer se među skeletom nalaze i grudvice zemlje koje nisu usitnjene u prethodnom sitnjenju uzorka u avanu. To se ne može dobro vidjeti jer su i čestice šljunka i kamenja okružene opnom od finih čestica gline pa i one imaju zemljjanu boju i izgled. To se najbolje provjeri tako što se grumenje zemlje zadržano na situ od 2 mm uzme između dva prsta i pokuša se zdrobiti, što se nerijetko i događa. Takođe, grumen zemlje kad ga bacimo na površinu laboratorijskog stola ima tupi zvuk, za razliku od skeleta koji pravi metalni zvuk.

**Postupak [35, 118]:** Iz gore opisanog razloga se tlo zadržano na situ od 2 mm prebaci u posudu sa vodom zajedno sa prethodno ručno izdvojenim skeletom i zagrijava na rešou do ključanja, dok ne ostane čist skelet (oko 45 minuta). Naime, tokom prokuhavanja će se sve grudvice ili grumenje zemlje raspasti a istovremeno se sa površine skeleta ispere opna od gline. Tako na kraju imamo čist skelet i zamućenu vodu tj. suspenziju gline i praha.

Nakon završenog kuhanja izdvoji se prosijavanjem na situ od 2 mm čist skelet i ostavi na sušenje baš kao što se i zamućena voda ostavi na isparavanje. Nakon isparavanja i sušenja, fina frakcija zemlje koja je ostala u posudi se vrati u vrećicu i promiješa zajedno sa ostalom finom zemljom-sitnicom, koja je na ovaj način kompletirana i spremna za daljnju analizu.

Poslije toga posebno vagamo osušeni skelet a posebno finu zemlju - sitnicu. Ukupni skelet nakon sušenja, po potrebi, spreman je za analizu sadržaja pojedinih frakcija unutar skeleta.

4. **Čuvanje pripremljenog uzorka**, ovako izdvojene frakcije skeleta i sitne zemlje čuvaju se posebno i posebno analiziraju. Čuvanje pripremljenog uzorka vrši se u označenim kutijama ili čašama od plastike ili papirnim vrećicama. Treba voditi računa da ne dođe do zagadjenja uzorka.

Dio uzorka za analizu strukture tla, izdvojen prije sitnjenja, se stavi u posebnu vrećicu i čuva u vrećici zajedno sa finom zemljom - sitnicom. Jednako tako i skelet koji je sadržan na situ prespe se u posebnu vrećicu i drži u istoj vrećici zajedno sa ostalim uzorkom do analize skeleta. Uzorci u kutijama/vrećicama se čuvaju šest godina nakon uzorkovanja i izvršenih analiza.



**Slike 31., 32. i 33. Sušenje uzorka na tacni, avan s tučkom i sito od 2 mm za prosijavanje uzorka**

## **5.1. ORGANSKA MATERIJA TLA**

U čvrstu fazu zemljišta, pored mineralnih čestica, ulaze i čestice organske materije tla koje se manjim dijelom nalaze slobodne u masi tla ili rastvorene u tečnoj fazi a većim dijelom vezane u organomineralni kompleks najčešće u formi humusno-glinenog kompleksa.

U svim definicijama organskog dijela čvrste faze razlikuju se dva pristupa [55,126]. Onaj u širem smislu, koji u definiciji obuhvata cjelokupnu organsku materiju tla zajedno, znači i slobodne nevezane čestice nerazloženih i slabije razloženih organskih ostataka prepoznatljivih golinom ili pod mikroskopom i s druge strane biohemski transformisanu, specifičnu organsku materiju - humus koja je najvećim dijelom vezana za mineralni dio tla. Drugi uži pristup definira organsku materiju (OM) samo kao humus i to kao specifični dio organske materije tla nastao u procesu humifikacije. Razlog tome je i činjenica da najveći dio organske materije u tlu čini humificirani dio.

Novije definicije organske materije tla imaju i drukčiji pristup, tako se OM može definisati kao sav mrtvi materijal u ili na površini tla koji sadrži organski ugljik [154], ili kao ukupna biološki izvedena organska materija prisutna unutar matriksa tla i na njegovoj površini uključujuću termalno promijenjen materijal [2].

### **5.1.1. Porijeklo i vrste organske materije u tlu**

Organska materija u zemljištu potiče od biljnih i životinjskih ostataka. Ovi organski ostaci su generalno prisutni u tlu u različitim stadijima dekompozicije i to u obliku onih svježe dospjelih organskih ostataka (laka frakcija) pa do dobro razloženog humusa tla vezanog za čestice gline i praha (stabilna ili teška frakcija). U poljoprivrednim ekosistemima unos biljnih ostataka u tlo uglavnom je vezan za odumrli korijenov sistem kao unos podzemnih dijelova biljaka (izuzev u rasadnicima ili kod kultura kod kojih se vrši uzgoj radi korijena ili generalno podzemnih dijelova biljaka – šećerna repa), dok je input površinskih dijelova biljaka uglavnom manji pošto se dio nadzemnih dijelova uglavnom odnosi sa polja u vidu prinosa. Zato je vrlo važno zaoravanje a ne paljenje žetvenih ostataka na polju. Jedan od načina **humizacije** (unos organskih ostataka u tlo) poljoprivrednih tala je i unos organskih đubriva i to kao stajnjaka ili zaoravanjem zelenišnog đubriva - sideracijom (poljoprivredne kulture sa visokom produkcijom biomase).

Jedinjenja organskog karbona/ugljika unesenog u tlo nalaze se u formi lako razgradivog organskog materijala porijeklom iz citoplazme, te komponenti jače otpornih na biorazgradnju porijeklom iz ćelijskog zida i to počev od nešto lakše razgradivih hemiceluloze i celuloze, do lignina koji je jako otporan na biorazgradnju [58, 162]. Svježe unesena organska materija razgrađuje se jako brzo od strane organizama u tlu i iako predstavlja samo malu frakciju C u tlu (veći dio je u formi humusa). Tako, oko polovine od ukupne emisije CO<sub>2</sub> iz tla dolazi upravo od razgradnje jednogodišnjih biljnih ostataka sa mnogo lakorazgradivog materijala, dok se istovremeno stabilna organska materija, nasuprot tome, razlaže vrlo sporo i to stoljećima i milenijima, ali je veličina te frakcije vrlo velika. Razgradnja odloženih organskih ostataka predstavlja složene procese i odvija se kroz dva procesa:

- **mineralizacija**, kojom se vrši potpuno razlaganje lako razgradive organske materije od strane organizama tla (mikrobi i fauna tla) do krajnjih produkata razgradnje - neorganskih jedinjenja: CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O uz oslobođanje neorganskih biogenih elemenata koji predstavljaju hraniva za biljke u tlu (N, P, S) i
- **humifikacija**, ovim procesom se odvija biohemička transformacija otpornijih organskih jedinjenja i produkata razgradnje u specifičnu stabilniju organsku materiju u vidu humusa tla.

Uloga faune tla (kišne gliste, stonoge, trčibube, češljevi, mravi, stonoge) u razgradnji organskih ostataka je uglavnom pripremnog karaktera, a sastoji se u sitnjenu i drobljenju svježeg organskog materijala, zatim miješanju tih produkata sa mineralnim dijelom tla, što olakšava rad mikroorganizmima

humifikatorima (gljive, bakterije, aktinomicete, alge). Na kraju po izumiranju organizmi tla ulaze u sastav organske materije tla. Po značaju među faunom tla tuse naročito ističu kišne gliste (*Lumbricus terrestris*) [164].

Uslovi za razlaganje organskih ostataka na površini nisu povoljni kao u samom zemljištu, jer je organska prostirka na površini izložena mogućnostima lakog isušivanja i jakim temperaturnim kolebanjima, a to je nepovoljno za aktivnost faune. Da bi se normalno razlagala, šumska prostirka mora biti unesena u zemljište, što u prirodnim uslovima obavljuju izvjesni predstavnici zemljišne faune, dok u poljoprivredi to obično čini čovjek obradom zemljišta.

S druge strane na aktivnost mikroorganizma u razgradnji organskih ostataka, pored inputa organskih ostataka u tlo, utiču i uslovi koji vladaju u okolišu tla. Mikrobima odgovara najviše slabo kiselo do neutralno tlo. Izuzetak su gljive koje su vrlo aktivne i u kiselim tlima, te aktinomicete koje su aktivne i u alkalnoj reakciji tla. Optimalna vlažnost tla za mikrobnu aktivnost ja kada su pore ispunjene vodom nešto manje od vrijednosti kapaciteta za držanje vode, dok su optimalne temperature oko 25 °C. U slučaju da se radi o unosu svježe organske materije sa visokim odnosom C:N = 30 (npr. slama) zbog manjeg sadržaja neophodnog im azota (N) mikrobi će posegnuti za azotom iz zemljišta, što će privremeno izazvati njegov nedostatak u tlu a ova je pojava poznata kao azotni šok u zemljištu.

Biljni ostaci koji dospiju u tlo sadrže 60-90 % vode a ostatak je suha materija. Suhu materiju, u težinskim procentima, čine C i O sa po 40 %, te H i anorganski elementi sa po 10 %. Tako C, H i O dominiraju u organskoj materiji tla. Ostali, neorganski elementi kao N, P, S, K, Ca i Mg, te mikrohraniva, takođe su prisutni u malim ali značajnim količinama jer organska materija tla je primarni izvor prirodnih hraniva u tlu koja se oslobođaju biohemijskom razgradnjom do krajnjih produkata tzv. mineralizacijom.

Postoji nekoliko glavnih produkata razgradnje biljnih i životinjskih ostataka [122]:

1. ugljen dioksid ( $\text{CO}_2$ ) - oslobođeni  $\text{CO}_2$  kao produkt oksidacije ugljika iz organskih jedinjenja se lako opaža i završi u zraku tla pa u atmosferi. Nivo dekompozicije ili mikrobiološke aktivnosti se mjeri nivoom nastalog  $\text{CO}_2$ .
2. voda ( $\text{H}_2\text{O}$ ) - oslobađa se kao produkt oksidacije organskih jedinjenja pomoću nekoliko enzima,
3. biljna hraniva ili neorganski elementi ili kako se često kaže mineralna materija - oslobođeni N, P, S, K, Ca i Mg, te mikrohraniva prelaze u

rastvor tla ili bivaju adsorbovani od koloidne frakcije tla. Oslobađanje hraniva mineralizacijom je i jedan od glavnih ciljeva dubrenja zemljišta organskim dubrивима. Neki od oslobođenih nutrijenata mogu ponovo biti imobilizirani ili fiksirani udruženim mikrobiološkim i hemijskim reakcijama.

4. humus tla - je kombinacija biohemijski transformisanih biljnih ostataka kao i resintetiziranog mikrobiološkog tkiva koje je otporno na mikrobiološku aktivnost.
5. toplota ili energija - oslobođena energija se koristi od strane mikroorganizama tla.

Humusna materija tla zapravo je neogenetska specifična konstanta tla, koja se, iako usporeno, također transformira i u krajnjoj liniji završava mineralizacijom [159]. Humus se dalje tradicionalno dijeli na:

- *huminske kiseline* koje su topive u alkalijama ali koaguliraju acidifikacijom alkalnog ekstrakta (povoljna frakcija, velike makromolekule sa većim sadržajem N od 3-5%),
- *fulvo kiseline* koje zaostaju u alkalnom ekstraktu poslije acidifikacije (jako kisele, rastvorljive u vodi i destruktivno djeluju na mineralnu fazu učestvujući u njenom raspadanju i migraciji u dublje slojeve tla), i
- *humine* koji se u tlu nalaze čvrsto vezani za mineralnu fazu i koji ne mogu biti ekstrahovani iz tla niti bazama niti kiselinama [136].

Huminske i fulvo kiseline su slične građe i predstavljaju polimere prirodnih organskih kiselina. U zemljištu se nalaze u obliku dominantno negativno nanelektrisanih koloidnih micela ili grupa micela koje grade aggregate amorfne građe.

#### **5.1.1.1. Količina organske materije u tlu**

Kvantitet organske materije u većini tala je ekvivalentan razlici (bilansu) između s jedne strane:

- unosa organskog materijala (humizaciji) i s druge strane
- gubitka organske materije iz tla kroz biološku i hemijsku razgradnju (mineralizacija) i ispiranjem rastvorene organske materije.

Na intenzitet ovih procesa utiču i vrsta ekosistema (šumski, livadski, močvarni, poljoprivredni), klima, tekstura i agregacija (fizička zaštita organske materije vezane za prah i glinu i okružene u mikroagregatima), kultiviranje i antropogenizacija.

**Tabela 4. Klasifikaciji tala prema % humusa, [136]**

Oznaka humoznosti	% humusa
Slabo humozno	<2
Umjereno humozno	2,1–4
Jako humozno	4,1–10
Vrlo jako humozno	>10

Prirodna mineralna tla imaju sadržaj organske materije u površinskom akumulativno humusnom Ah horizontu najčešće od 1% u pjeskovitim do 4 % u glinovitim tlima. Pod sličnim klimatskim uslovima količina organske materije u tlima težeg teksturnog sastava (glinovita tla) iznosi dva do četiri puta iznosa za tla lakšeg (pjeskovita tla) teksturnog sastava. Pored povećane oksidacije u tlima lakšeg teksturnog sastava ovo se može objasniti kao posljedica zaštite humusa od razgradnje formiranjem kompleksa gлина-humus i formiranjem kompleksa metala i organske materije (helati). Takođe, tla sa većim sadržajem minerala gline tipa 2:1 nego onih tipa 1:1 imaju veći sadržaj organske materije tla. [122].

Najzastupljenija forma vezivanja humusnih materija sa mineralnim dijelom je humusno-glineni kompleks, jer se računa da je sa mineralima gline povezano oko 70 % humusnih materija. Humusne kiseline, čvrsto vezane sa mineralima gline i tako ugrađene u mikroaggregate, otpornije su prema mikrobnom razlaganju i mogu se zadržati u zemljištu i 2000 godina, dok je vijek trajanja ostalih frakcija humusnih kiselina 50 – 200 godina.

U istraživanju sprovedenom u BiH na dominantnim tlima različite teksture [171], u površinskom sloju od 10 cm, udio organskog ugljika vezanog za prah i glinu (humificirana organska materija) rastao je kako je u teksturnom sastavu tla rastao i udio frakcija praha i gline. Tako je udio organskog C vezanog za prah i glinu iznosio u prosjeku u pjeskovitoj ilovači (distični kambisol) 66%, u ilovači (pseudoglej) 77% i u glinovitoj ilovači (crvenica) 82%.

Tla težeg teksturnog sastava imaju veći sadržaj organske materije nego tla lakše teksture pri podjednakom unosu organskog materijala zbog veće fizičke zaštite organske materije okružene u mikroagregatima u teškim tlima [63]. Brojni su dokazi koji indiciraju da jedan od glavnih faktora očuvanja organske materije u tlu je njena sposobnost da se veže sa česticama gline i praha. Nekoliko studija pokazuje da je količina C i N udruženih s česticama gline i praha uglavnom pod uticajem teksture tla a ne inputa organskog materijala u tlo, dok je organska materija vezana za krupnije teksturne elemente uglavnom pod uticajem unosa organskog materijala a ne teksture tla [21, 63]. Ne samo tekstura tla nego takođe i tip minerala gline može

uticati na kapacitet tla da zaštititi organsku materiju. Specifična površina minerala gline varira od  $6\text{--}39 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$  kod kaolinita pa do  $800 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$  kod smektičita i vermekulita. Minerali gline sa većom specifičnom površinom, očekuje se, adsorbovati će više humusnih jedinjenja [2, 63].

Ovdje potrebno napomenuti da su u mnogim šumskim i livadskim tlima gubitak površinskog sloja tla erozijom i frekventna obrada tla nakon kultivacije, smanjili nivo organske materije na manje od pola od njihove prirodne vrijednosti [80].

Poseban pokazatelj kvaliteta humusa predstavlja odnos C i N. Odnos ugljik : azot (C:N) kod mnogih mineralnih tala u površinskom humusno akumulativnom horizontu je približno 10:12:1. U svježim organskim ostacima ovaj odnos je veoma širok (30:1 do 100:1). Temperatura i padavine utiču na odnos C/N. Brojna istraživanja potvrđuju da u uslovima ujednačenih padavina, C/N je manji u toplijim nego u hladnijim regionima u kojima se razgradnja odvija usporeno zbog nepovoljne niže temperature za mikrobiološku aktivnost. Slično, kada su približno iste srednje godišnje temperature, C/N ima tendenciju biti manji u suhljim regionima gdje se biohemskijska organskih razgradnja ostataka odvija kraće ali intenzivnije.

### 5.1.2. Značaj organske materije u tlu

Organska materija tla ulazi u sastav čvrste faze tla i daleko je nestabilnija i mlađa od mineralnog dijela. Mali procentualni sadržaj organske materije u odnosu na mineralni dio nije srazmjeran njenom ogromnom značaju u tlu, koji se u ogledu u gotovo svim procesima u tlu. Kroz svoje funkcije organska materija tla igra presudnu i najvažniju ulogu u razvoju i održavanju plodnosti tla, uglavnom kroz kruženje, zadržavanje i dostupnost biljnih hranjiva, te kroz formiranje i održavanje strukturnih agregata u tlu. Organska materija tla (OMT) kao najznačajniji činilac plodnosti tla pozitivno djeluje slobodno možemo reći na sva fizička, hemijska i biološka svojstva tla.

**Fizička svojstva** tla OMT poboljšava posredno povoljnim utjecajem na proces stvaranja agregata i njihovu stabilnost. Neka jedinjenja humusa imaju ulogu kao ljepak a i sami organski ostaci su mjesta/centri buduće aggregacije. Agregati su ključni za stvaranje povoljne mrvičaste strukture u površinskom sloju tla koja je nosilac svih pozitivnih vodno fizičkih, zračnih i topotnih osobina tla. Tako pojačanom aggregacijom glinovita tla čini rastresitim, prozračnim, toplijim i propusnim za vodu, a kod pjeskovitih tala smanjuje vodopropusnost i povećava kapacitet držanja vode. Generalno i sam humus ima veliki kapacitet držanja vode, nekoliko puta veći od njegove težine.

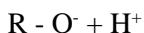
Kada govori o prometu organske materije Christensen [21] upućuje na tri nivoa strukturnih i funkcionalnih kompleksa u tlu:

- 1) Primarni kompleksi su jednostavniji kompleksi organske materije sa glinom, prahom i pijeskom tj. primarni organo-mineralni kompleksi. Ovi kompleksi se mogu izolirati iz tla nakon izvršene dezagregacije. U ovim primarnim kompleksima glavni mehanizmi kompleksiranja su površinske reakcije između organske materije, organizama i minerala. Funkcionalne karakteristike ovih primarnih kompleksa su hemijska stabilizacija organske materije tla, velika reaktivnost vlastite površine i adhezija (prianjanje) mikroba na površinu; Takođe, i čestice slobodne organske materije tla koje nisu vezane u organomineralne komplekse pripadaju primarnom nivou kompleksnosti.
- 2) Sekundarni kompleksi u tlu su agregati tj. agregatni organomineralni kompleksi. Funkcionalne karakteristike na ovom nivou kompleksnosti (u regulisanju prometa materija) su fizička zaštita čestica nevezane organske materije tla i organizama tla inkorporiranih u aggregate, te kreacija vodno-vazdušnog režima tla;
- 3) Treći nivo kompleksnosti ustanavljava samo strukturno netaknuto tlo *in situ*, čije se karakteristike odnose na transport i razmjenu rastvorenih materija i gasova, specijalnu distribuciju biljnih ostataka i produktivnost tla.

Humus svojom tamnom bojom pomaže boljem zagrijavanju tla, tj. poboljšava njegov topotni režim. Osim toga OMT smanjuje djelovanje erozije i ublažava oštećenja tla.

U **hemijskom** pogledu humusne kiseline predstavljaju negativne koloide koje imaju veliku moć adsorpcije suprotno nanelektrisanim čestica-kationima iz rastvora tla i na taj način ih čuvaju od ispiranja. Koloidna micela humusnih kiselina je izgrađena od sljedećih mikrogradivnih jedinica [24]:

- a) koloidnog jezgra, koje ima cikličnu (aromatičnu) prirodu. Izgrađeno je od mnoštva, od 400 – 30.000 atomskih jedinica, prstenastih C jedinjenja - benzola, fenola, pirola... i perifernog alifatičnog (lančastog) niza sa aminokiselinama, amino-šećerima i uronidima.
- b) mostića između cikličnih ugljikovodonika: O, N, NH, CH<sub>2</sub>
- c) funkcionalnih grupa, koje se nalaze u perifernom dijelu koloidne micele. Njih čine kao najvažnije COOH karboksilna grupa te OH fenolna ili alkoholna grupa. Ionizacijom karboksilnih i fenolnih grupa organski koloidi dobijaju negativno nanelektrisanje na svojoj površini:



Humus ima dva do tri puta veći kapacitet adsorpcije kationa nego najbolji minerali gline, (200–400 mekv/100 g humusa). Humus takođe adsorbuje anione, ali oslobađa fosfate mnogo lakše nego neorganski koloidi tla. S metalima gradi jedinjenja tipa helata i na taj način povećava dostupnost Fe biljkama.

Sljedeća ne manje važna uloga organske materije tla je oslobađanje hraniva (N, P i S), mikrobiološkom mineralizacijom organskih ostataka. Humus je glavni prirodni rezervoar azota (N) u tlu.

**Biološka svojstva:** Organska materija predstavlja izvor hrane i energije za organizme tla. Fauna i mikrobi tla mineralizacijom organske materije pored CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O oslobađaju njene mineralne konstituente: N i ostale hranjive materije prije svih P i S zatim Ca, K i mikroelemente i na taj način se obezbeđuje kruženje ovih elemenata u prirodi.

### 5.1.3. Klimatsko regulacijska uloga (organske materije) tla

Kako je zemljište najveći „aktivni“ kopneni izvor ugljika C na zemlji u obliku organske materije tla (nasuprot „pasivnom“ geološkom rezervoaru C najčešće u karbonatnim stijenama), koji je dva puta veći od atmosferskog C-CO<sub>2</sub> i gotovo tri puta veći od ugljika u vegetacijskom omotaču, to u prvi plan stavlja i njegovu klimatsko regulacijsku ulogu. Zemljište, s jedne strane, može kroz intenzifikaciju mineralizacije organske materije biti izvor emisije stakleničkih plinova prije svih CO<sub>2</sub> u atmosferu, ali, s druge strane, pravilnim upravljanjem zemljištem ono može postati i mjesto pohranjivanja CO<sub>2</sub> iz atmosfere u organsku materiju tla.

U glavne izvore emisije stakleničkih plinova iz poljoprivrednog sektora ubrajaju se: a) mineralizacija organske materije tla i emisija CO<sub>2</sub> uslijed obrade tla i drugih tipova remećenja tla u okviru poljoprivrednih aktivnosti, b) emisija CO<sub>2</sub> uslijed erozije tla i erozijom inducirane degradacije tla c) prirodni nivoi emisije N<sub>2</sub>O i NO<sub>x</sub> sa tla, i emisija uslijed primjene azotnih đubriva, d) emisija metana sa rižinih polja, močvara i deponija organskog materijala [92]. Dostupne informacije o uticaju korištenja tla na sadržaj organske materije i pristupačnost N upućuju da [122]:

- sve vrste oranja dovode do opadanja u tlu organskih C i N u poređenju sa prirodnim tlima; oranje generalno s jedne strane povećava količinu kisika u zraku tla a s druge strane izlaže zaštićenu organsku materiju tla mikrobiološkoj aktivnosti; N taj način, što su tla više orana, veći su gubici organske materije.
- inkorporacija (zaoravanje) ostataka usjeva u tlo u poređenju sa njihovim premještanjem, obično povećava sadržaj organske materije u tlu;

- ostavljanje ostataka usjeva po površini zemljišta dovodi do akumulacije organske materije i ukupnog N na površini tla; i
- spaljivanje ostataka usjeva često producira različite efekte na količinu organske materije tla, zavisno od dubine tla, prakse obrade, stepena paljenja, vremena i drugih faktora.
- većina podataka o uticaju konzervacijske obrade tla na količinu organske materije pokazuju veći sadržaj karbona u tlima pod konzervacijskom obradom (sistemi sa smanjenom obradom ili bez obrade tla, stalna pokrivenost tla usjevima, međuredni usjevi) u odnosu na sisteme sa konvencionalnom obradom.

Gubici karbona sa poljoprivrednih zemljišta su najintenzivniji u prvoj dekadi poslije kultivacije. Vremenom, nivo gubitaka se smanjuje uslijed smanjenja lakše dostupnog karbona za razgradnju i postepenog poboljšanja prakse upravljanja tlom. Posljedično, većina poljoprivrednih zemljišta sada je neutralna sa gledišta emisije CO<sub>2</sub>, znači niti se pojavljuju kao izvori antropogene emisije CO<sub>2</sub>, niti kao mjesto pohranjivanja CO<sub>2</sub> iz atmosfere. Godišnji porast koncentracije CO<sub>2</sub> u atmosferi iznosi 3,4 Gt (milijardi tona) C. Izvori ekstra emisije karbona uzrokovane ljudskim uticajem su: deforestacija u tropskom području sa 1,6 Gt C god<sup>-1</sup>, promjene u načinu korištenja zemljišta sa 1,1 Gt C god<sup>-1</sup> i sagorijevanje fosilnih goriva sa 6,4 Gt C god<sup>-1</sup> [13]. Mjesta pohranjivanja tog ekstra emitiranog karbona su kopneni ekosistemi umjerenog pojasa sa 2,0 Gt C god<sup>-1</sup>, okeani sa 2,0 Gt C god<sup>-1</sup> i „nepoznato“ sa 1,7 Gt C god<sup>-1</sup> [133]. Ipak, šume, poljoprivredna zemljišta i drugi kopneni ekosistemi nude značajni, ali često privremeni, potencijal ublažavanja negativnih posljedica ljudskog miješanja u ciklus karbona. Konzervacija karbona u tlu i njegovo pohranjivanje u tlo, daju vrijeme da se razviju i implementiraju druge opcije.

Za postizanje većih zaliha karbona u tlu, poljoprivredna praksa mora: a) povećati dostavu karbona u tlo u vidu biljnih ostataka (povećanje neto produkcije biomase) i b) smanjiti nivo razgradnje organske materije tla (konzervacijska poljoprivredna praksa). Glavni procesi pohranjivanja karbona u tlu uključuju: humifikaciju organskog materijala, agregaciju kroz formiranje organomineralnog kompleksa, duboko pohranjivanje organske materije ispod dubine oranja, uzgoj biljaka sa dubokim ukorijenjavanjem, kalcizaciju. Dodatak anorganskih đubriva, na pravilnim osnovama, može voditi porastu sadržaja organske materije tla. Dodavanje hemijskih đubriva vodi boljem razvoju korijena, pa iako se nadzemna biljna masa odnese sa polja korjenova masa može povećati sadržaj ugljika u tlu. Ipak teško je predvidjeti generalne promjene u ukupnom inputu C u tlo intenzifikacijom biljne proizvodnje.

Po procjeni, jedna polovina do dvije trećine od ukupnih do sada procijenjenih gubitaka karbona sa poljoprivrednih zemljišta može biti vraćeno u tlo za 50 godina. Međunarodna grupa o klimatskim promjenama (IPCC) [80] predlaže potencijalni godišnji porast zaliha karbona tla od oko 0,4–0,6 Gt C (20–30 Gt kumulativno za 50 godina), boljim gospodarenjem obradivim tlima. Važeća procjena potencijala ublažavanja trenda povećanja koncentracije atmosferskog CO<sub>2</sub> biološkim opcijama je oko 100 Gt C (kumulativno) do 2050, što je ekvivalentno iznosu od 10–20 % očekivane emisije CO<sub>2</sub> nastalog sagorijevanjem fosilnih goriva za taj period. Međutim, velike zalihe C u tlu mogu prepostaviti veću emisiju CO<sub>2</sub> u budućnosti, ako se prekine sa praksom konzervacije karbona u tlu.

#### ***5.1.3.1. Određivanje gubitaka karbona u obradivim zemljištima***

Emisija CO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub> iz poljoprivrednih tala u atmosferu direktno je povezana sa mikrobiološkom razgradnjom organske materije tla. Dva pristupa se koriste za određivanje uticaja upravljanja zemljištem na skladištenje ugljika u tlu [132]:

- mjerjenje promjena količine organskog C u tlima pod različitim upravljanjem (šumsko, livadsko i poljoprivredno tlo) i
- mjerjenjem fluksa (toka) CO<sub>2</sub> iz tla u atmosferu i obrnuto.

Radna komisija u okviru izrade FAO Globalne mape organskog karbona tla [195] predlaže dva opšta pristupa za izvješćivanje o zalihamu karbona/ugljika i njihovim promjenama:

1. Pristup temeljen na procjeni neto bilansu dodavanja (inputa) i gubitka (outputa) zaliha karbona (metoda dobitka i gubitka)
2. Pristup temeljen na zalihamu: procjenjuje razliku u zalihamu ugljika u dvije vremenske točke (metoda razlike u zalihamu)

Mjerenje fluksa (toka) CO<sub>2</sub> iz tla u atmosferu predstavlja ujedno i aktivnost heterotrofnih mikroorganizama (gljive, bakterije, aktinomicete, alge) zaslužnih za krajnju mineralizaciju i humifikaciju organskih ostataka. Pojednostavljeno rečeno mjeri se obim kojim se od strane mikroorganizama iskorištava organski materijal kao izvor karbona i energije, odnosno mjeri se emisija CO<sub>2</sub> oslobođenog procesima biohemidske razgradnje i transformacije, iz tla u atmosferu. Taj proces se naziva disanje tla ili respiracija i uključuje potrošnju kisika (u aerobnim uslovima) ili neki alternativni krajnji akceptor elektrona (pod anaerobnim uslovima) i produkciju ugljen dioksida (CO<sub>2</sub>).

Doran et al. [33] su izdvojili nivo respiracije u poljoprivrednim tlima u 6 klase pri optimalnoj temperaturi tla i vlazi, sa 7,6 cm dubine i prosječnom zapreminskom gustom 1,2 g/cm<sup>3</sup>. Tako za:

- respiraciju tla <10,5 kg CO<sub>2</sub>-C/ha dnevno kažu da je tlo jako iscrpilo organsku materiju i ima malu biološku aktivnost, a za
- nivo respiracije od 36-71,5 kg CO<sub>2</sub>-C/ha/d kažu da je idealna i da je tlo u idealnom stanju biološke aktivnosti i ima dovoljan sadržaj organske materije i populacije mikroorganizama.

Mjerenje količine oslobođenog CO<sub>2</sub> se vrši na načina da se u sloj tla do određene dubine (plitki površinski sloj 7,6 cm) utisne kontejner poznatih dimenzija, koji služi za „hvatanje“ oslobođenih plinova mineralizacijom (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) sa poznate površine, a da se poslije zrak sa utrapljenim plinovima isisava i prenosi u laboratoriju gdje se vrši analiza sadržaja utrapljenih gasova.

#### ***Određivanje promjene u količini Corg u obradivom tlu u odnosu na livadsko i šumsko tlo***

Promjene u količini ugljika (karbona) u poljoprivrednom tlu u odnosu na livadsko i šumsko tlo utvrđuje se u što je moguće više uniformnim uslovima za sva tri načina korištenja tla, što podrazumijeva: isti tip tla, istu teksturu i da otvoreni profili zemljišta iz kojih se vrši uzorkovanje fizički nisu mnogo udaljeni jedni od drugih.

Kvantifikacija karbona vrši se po genetskim horizontima. Vrijednosti zaliha karbona se izražavaju u kg/m<sup>2</sup> do određene dubine. Radi što preciznije kvantifikacije karbona, najbolje je uzorkovanje zemljišta vršiti detaljnije, na svakih 5, 10 ili 15 cm dubine, zbog vjerovatnih velikih razlika u koncentraciji karbona i volumnoj gustini tla koje se smjenjuju sa dubinom.

Pod okriljem FAO u toku je izrada globalne mape organskog karbona tla (GSP Guidelines for sharing national data/information to compile a Global Soil Organic Carbon (GSOC) map, [195]) a radna Komisija u okviru Stuba 4, preporučuje šest standardnih intervala dubine:

- za površinski sloj do 30 cm: od 0-5 cm, 5-15 cm, 15-30 cm, te
- za dublje slojeve: od 30-60 cm, 60-100 cm i 100-200 cm.

Nakon izvršene kvantifikacije po slojevima, sabiraju se dobiveni rezultati po horizontima a zatim i do određene dubine za dati način korištenja zemljišta i upoređuju sa zalihama karbona do iste dubine u ostalim tipovima korištenja tla.

Nadalje, javlja se jedan **problem u kvantifikaciji organskog ugljika** po horizontima:

- problem sa skeletom, koji takođe zauzima prostor u volumenu tla, a vrijednosti volumne specifične gustine koje se koriste u obračunu se uglavnom odnose na uzorak sa sitnicom, tako da u konačnici ako to ne uzmemo u obzir kod obračuna dobijemo nešto nepreciznije, uvećane rezultate kvantifikacije karbona.
- često u uzorku tla imamo prisutne karbonate u kojima se nalazi mineralni karbon  $C_{\min}$ . Ukupni ugljik ( $C_{\text{tot}}$ ) u karbonatnom tlu dobiven metodom suhog izgaranja na višim temperaturama  $> 600-800^{\circ}\text{C}$  (elementarna analiza), sadrži udio karbona iz  $\text{CaCO}_3$  ( $C_{\min}$ ) koji se mora odrediti i oduzeti da bi se dobila količina organskog ugljika -  $C_{\text{org}}$  (anorganski ugljik takođe se oksidira). Tako u karbonatnim tlama u kojima je  $C_{\text{tot}}$  određen pri visokim temperaturama (elementarni analajzer) imamo:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{org}} + C_{\min} \quad \dots \quad \text{iz čega slijedi:}$$

$$C_{\text{org}} = C_{\text{tot}} - C_{\min}$$

Prema preporuci Radne komisije u okviru izrade FAO Globalne mape organskog karbona tla [195] standardna analiza opisana je u ISO 10693 (1994)11. Odnosi se na Scheiblerovu volumetrijsku metodu s hlorovodičnom kiselinom (HCl).

*Napomena:* Određivanje sadržaja organskog karbona tradicionalnim laboratorijskim analizama mokrim spaljivanjem vrši se u uzorcima fine zemlje sitnice iz koje je prethodno izdvojena frakcija krupnog pijeska (frakcije od 2 -1 mm pri metodi sa K-bihromatom, odnosno 2 – 0,25 mm pri metodi K-permanganatom) tj.  $C_{\text{org}}$  se određuje u uzorku sitnice prethodno prosijanom na situ od 1 odnosno 0,25 mm. Tako je i sadržaj  $C_{\text{org}}$  određen u odnosu na masu sitnice bez krupnog pijeska. Takođe, u obračunu se koristi vrijednosti volumne gustine -  $V_{\text{sg}}$  zajedno sa krupnim pijeskom, što u konačnici može dati nerealne količine  $C_{\text{org}}$ .

Takođe neki autori [195] sugeriraju da mokro spaljivanje na zadatim temperaturama ne spaljuje svu organsku materiju tla, što sve zajedno ovu metodu kvantificiranja organskog karbona tla (OKT) čini manje pouzdanom u odnosu na metodu suhog spaljivanja u elementarnom analajzeru [195].

#### 5.1.3.1.1. Kvantifikacija organskog karbona tla (OKT)

Količina organskog ugljika u tlu OKT ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) računa se po genetičkim horizontima ili samo do tražene dubine. Potrebni podaci su koncentracija organskog karbona ( $C_{\text{org}} \%$ ), volumna gustina ( $V_{\text{sg}}$ ), % skeleta u skeletnim mineralnim tlama i % karbonata u karbonatnim tlama.

**Za beskarbonatna i neskeletna tla** količina OKT u kg/m<sup>2</sup> do određene dubine računa se tako što maseni procenat organskog ugljika do određene dubine ( $C_{org}/100$ ) pomnožimo sa masom zapremine zemljišta do te dubine ( $V_{sg} \cdot h \cdot 1$ ) po formuli:

$$OKT \text{ (kg/m}^2\text{)} = h \cdot V_{sg} \cdot (C_{org}/100), \quad \text{gdje su:}$$

$C_{org}$  – koncentracija karbona u procentima (%)

$h$  – debljina horizonta za koju računamo količinu C u metrima (m)

$V_{sg}$  – volumna specifična gustina ispitivanog horizonta (kg/m<sup>3</sup>)

1 – obračun količine karbona se vrši po 1m<sup>2</sup>

*Napomena:* Gornja formula se koristi kada je % C određivan suhim spaljivanjem pri visokim temperaturama u elementarnom C analajzeru u odnosu na ukupnu masu fine zemlje sitnice u beskarbonatnom i tlu bez skeleta.

**Za karbonatna i skeletna tla** obračun se vrši po sljedećoj formuli [195]:

$$OKT \text{ (kg/m}^2\text{)} = h \cdot V_{sg} \cdot ((C_{tot} - C_{min}) \cdot CF_{sk}) \dots \text{gdje su:}$$

- $OKT$  = organski ugljik u tlu [kg/m<sup>2</sup>]
- $C_{tot}$  i  $C_{min}$  = ukupni i mineralni (ili anorganski) ugljik [g g-1], koji se uzima u obzir za karbonatna tla i ako se koristi suho izgaranje s tipično visokim temperaturama
- $h$  = dubina horizonta/razred dubine [m]
- $V_{sg}$  = volumna gustina [kg/m<sup>3</sup>]
- $CF_{sk}$  = faktor korekcije za kamenitost i sadržaj šljunka pri čemu je

$$CF_{sk} = (1 - (\% \text{ šljunka} + \% \text{ kamenja})/100)$$

**Za organski horizonti (OL) u šumskom tlu tj. u šumskoj prostirki** (pošto se u kvantifikaciji karbona šumskog zemljišta ukalkuliše i količina OKT pohranjena u šumskoj prostirci) za obračun se koristi sljedeća formula [195]:

$$OKT_{\text{šumske prostirke}} \text{ (kg/m}^2\text{)} = \text{težina}_{OL} \cdot (C_{tot} - C_{min})$$

Gdje su:

$OKT_{\text{šumske prostirke}}$  = organski karbon u šumskoj prostirci [kg/m<sup>2</sup>]

$\text{Težina}_{OL}$  = težina suhog uzorkovanog materijala šumske prostirke [kg/m<sup>2</sup>]

$C_{tot}$  i  $C_{min}$  = ukupni i mineralni (ili anorganski) ugljik [g g-1], koji se uzima u obzir za karbonatna tla i ako se koristi suho izgaranje s tipično visokim temperaturama

U sljedećim tabelama vidimo zalihe karbona pohranjenog u formi organske materije tla u nekim našim zemljištima pod oranicom, livadom i šumom.

**Tabela 5. Zalihe karbona ( $C_i$ ) u  $\text{kg}/\text{m}^2$  u površinskom sloju od 30 cm pod različitim načinom upravljanja - distrično smeđe tlo, pseudoglej i crvenica (vlastita istraživanja)**

Lokalitet	Dubina profila cm	Tip tla	Tekstura	Količina karbona do 30 cm u $\text{kg C}/\text{m}^2$			
				Obradivo	Livada	Šuma	Xsr
Nišićka visoravan	30	Distrično smeđe	Pjeskovita ilovača	5.5	4.8	6.6	5,6
Sprečko polje	30	Pseudoglej	Praškasta ilovača	5.2	8.1	8.4	7,3
Dubravskva visoravan	30	Crvenica	Glinovito	5.8	5.8	7.7	6,4
		Xsr		5.5	6.2	7.6	

Kada razmatramo uticaj antropogenizacije površinskog horizonta, vidimo iz tabele kako su zalihe karbona u oraničnom sloju do 30 cm ujednačene i iznose od 5,2-5,8  $\text{kgC}/\text{m}^2$ . U prosjeku najveće zalihe karbona su u šumskom tlu zajedno sa prostirkom (organskim horizontom), zatim u livadskom tlu i najmanje u obradivom tlu. Izuzetak je vrtno tlo na Nišičkoj visoravni (distrično smeđe, pjeskovita ilovača), jer je poznato da su tla vrtova (bašta) njegovana tla koja se redovno obogaćuju organskim đubrivima što je i ovdje slučaj.

**Tabela 6. Zalihe karbona ( $C_i$ ) u  $\text{kg}/\text{m}^2$  do različite dubine uzorkovanja pod različitim načinom upravljanja – distrično smeđe tlo, pseudoglej i crvenica (vlastita istraživanja [171])**

Lokalitet	Dubina profila cm	Tip tla	Tekstura	Količina karbona u $\text{kg C}/\text{m}^2$			
				Obradivo	Livada	Šuma	Xsr
Nišićka visoravan	90	Distrično smeđe	Pjeskovita ilovača	6.9	8.5	9.8	8,4
Sprečko polje	100	Pseudoglej	Praškasta ilovača	10.6	13.2	11.2	11,7
Dubravskva visoravan	78	Crvenica	Glinovito	14.9	10.6	12.5	12,7

Iako je različita dubina profila, vidljivo je da su zalihe karbona sa gledišta teksture tla, najveće u glinovitoj crvenici na Dubravskoj visoravni a najmanje u pjeskovitom distričnom smeđem tlu.

## **5.1.4. Određivanje sadržaja organske materije u tlu**

Ovdje treba istaći da se u svjetskoj literaturi najviše koristi izraz organska materija tla ili čak samo organski ugljik (karbon) a da je u našoj upotrebi više termin humus. U konačnici njihova koncentracija (%) se lako svede na iste vrijednosti, jer se u pedološkim laboratorijama za određivanje sadržaja organske materije odnosno humusa koriste dvije grupe metode (mokro i suho spaljivanje) bazirane na oksidaciji organskog ugljika ( $C_{org}$ ) iz organske materije, tako da ne razlikujemo udio oksidiranog ugljika iz svježih nevezanih čestica biljnih ostataka od udjela ugljika iz humificiranih ostataka. Na žalost metoda suhog spaljivanja na visokim temperaturama (većim od 600-800°C) u elementarnom analajzeru na ovaj način oksidiše i karbon iz  $CaCO_3$  ( $C_{min}$ ) pa se u karbonatnim tlima Cmin mora oduzeti od ukupnog karbona Ctot da bismo dobili organski karbon Corg..

Kako savremene studije sugerisu da sadržaj C u organskoj materiji tla varira (50-58 %) i da ne postoji jedinstveni faktor pretvorbe organskog C u humus koji je prihvativ za sva tla i sve horizonte, savremeni istraživači su se opredijelili za izvještavanje o sadržaju organskog ugljika (% C) u tlu a ne o sadržaju organske materije ili humusa [2].

### **5.1.4.1. *Određivanje odnosa mineralnog i organskog dijela tla metodom žarenja ili Određivanje sadržaja pepela (engl: ash content)***

Tlo kao trofazni sistem sastoji se iz čvrste, tečne i gasovite faze. Čvrsta faza zemljišta sastoji se iz mineralnog i organskog dijela. Ova metoda služi za određivanje tog odnosa. Koriste se metode ASTM Standards D 2974-87, *Test methods for moisture, ash and organic matter of peat and other organic soil*, ili ISO 749:1977 (postupak za biljni materijal ali može se koristiti i za tlo). Tako, prema odnosu organskog i mineralnog dijela razlikujemo:

- mineralna ili organska zemljišta (horizonte) ili tresete
- različite mješovite supstrate za biljni uzgoj u kojem dominira mineralni ili organski dio čvrste faze.

Ova analiza zemljišta upravo se najviše koristi za te svrhe. Prema svjetskim sistemima klasifikacije zemljišta [81, 153] kao granica između mineralnih i organskih zemljišta, horizonata i supstrata uzima se 30% organskog dijela ili 18%  $C_{org}$ . Kod tresetnih tala prema preporuci Međunarodnog udruženja za proučavanje treseta [75] sadržaj organskog dijela je veći od 75 %.

**Princip:** Određivanje odnosa mineralnog i organskog dijela bazira se na žarenju uzorka tla u specijalnim porculanskim šoljicama u peći na

temperaturi 500-600 °C do konstantne mase. Žarenjem, organska materija tla sagorijeva i prelazi u gasove ( $\text{CO}_2$  i vodena para) i pepeo (koji tako zaostaje i prelazi u mineralni dio). Mineralni dio zemljišta se nakon žarenja pretežno zadržava neizmjenjen. Razlika u masi uzorka u šoljici poslije žarenja, i mase uzorka prije žarenja predstavlja masu organskog dijela izgubljenu žarenjem.

Međutim, vrijednosti odnosa mineralnog i organskog dijela dobiveni žarenjem su samo donekle tačni. Naime, zajedno sa sagorijevanjem organske materije gube se i higroskopska i hemijski vezana vlaga iz uzorka ukoliko se radi o vazdušno suhom tlu. Slično, ukoliko je uzorak zemljišta karbonatan, žarenjem iz kalcita  $\text{CaCO}_3$  se gubi  $\text{CO}_2$  i zaostaje kreč –  $\text{CaO}$ :



Oslobođeni  $\text{CO}_2$  u toku žarenja ima svoju mmasu koja se u ovoj analizi ne može posebno obračunati tako da po konačnom obračunu ulaze u spaljenu organsku materiju odnosno u organski dio. Na ovaj način može da se izgubi i Cl iz hloridnih minerala.

**Postupak** [125, 88]: Evidentiramo i izvagamo praznu porculansku šoljicu za žarenje a zatim odvažemo 3-5 g vazdušno suhog uzorka tla (sitnice). Prethodno smo uključili peć za žarenje i lagano je zagrijavali do podešene temperature od 500-600°C. Odvagan uzorak u porculanskoj šoljici za žarenje metalnim mašicama prenosimo u peć za žarenje. U peći za žarenje dolazi do sagorijevanja organske materije tla. Kraj žarenja mineralnih tala se poklapa sa pojmom crvenkaste nijanse žarenog uzorka (oko pola sata). Uzorak izvadimo ponovo metalnim mašicama i hladimo u eksikatoru i mjerimo težinu poslije žarenja (na istoj vagi). Žarenje organskih uzoraka traje nešto duže od mineralnih i ponekad je potrebno provjeriti je li sva organska materija sagorila i malo promiješati uzorak u porcelanskoj šoljici.

#### Obračun:

- masa prazne porculanske šoljice, A (g)
- masa vazdušno suhog uzorka, B (g)
- masa uzorka sa šoljicom poslije žarenja C (g)
- gubitak žarenjem E = (A+B) - C (g)

$$\text{gubitak žarenjem (E)}$$

$$\text{Organski dio } (\%)_{\text{mas}} = \frac{\text{masa vazdušno suhog uzorka (B)}}{\text{masa vazdušno suhog uzorka (B)}} \cdot 100$$

Udio ili procenat mineralnog dijela čvrste faze dobijemo ako od 100 % oduzmemos vrijednost sadržaja organske materije u  $\%_{\text{mas}}$ .

$$\text{Mineralni dio } (\%)_{\text{mas}} = 100 (\%) - \text{organski dio } (\%)_{\text{mas}}$$

#### **5.1.4.2. Kvalitativno određivanje karaktera humusa**

Ova kvalitativna metoda može se vršiti i na terenu i u laboratoriji. Daje nam dragocjen podatak o karakteru humusa odnosno njegovoj vrijednosti/kvalitetu. Po svojim dimenzijama i ponašanju u rastvoru humus ima koloidni karakter, a po hemijskom sastavu humus u tlu može biti u obliku polimera organskih kiselina (kiseli ili sirovi humus) ili njihovih soli humata (blagi ili zreo humus kao Ca ili K - humati).

Ovom metodom utvrđujemo je li humus:

1. zasićen bazama (Ca, K, Mg), znači u obliku soli koje nisu topive u NH<sub>4</sub>OH (sadržaj u epruveti ostao bezbojan), ili se nalazi
2. u vidu slobodnih humusnih kiselina koje su topive u 2 % NH<sub>4</sub>OH (pojava žute ili smeđe boje).

**Postupak [125].:** U epruvetu nalijemo oko 6 – 10 ml 2 % NH<sub>4</sub>OH a zatim se doda bez vaganja nekoliko grama sitnice. Epruvetu začepimo i energično promućamo. Nakon 2 sata epruvetu sa sadržajem ponovo promućamo i ostavimo da se istaloži.

Poslije 24 sata očita se boja i uporedi sa opisima značenja boja u sljedećoj tabeli:

**Tabela 7. Opis karakter humusa Izvor: [125]**

Boja rastvora iznad uzorka	Karakter humusa
Smeđa	Humus je kiseo
Žuta	Humus je slabo kiseo
Bezbojna	Humus je zasićen bazama

#### **5.1.4.3. Kolorimetrijska metoda određivanja sadržaja organske materije u K-bihromatu (bihromatna metoda po Tjurinu)**

**Princip:**

Sadržaj humusa bihromatnom metodom se određuje u skladu sa ISO 14235:1994. Metoda [82] se zasniva na mokrom spaljivanju organske umaterija tla (oksidaciji ugljika) pomoću kalijum bihromata uz prisustvo H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Reakcija koja pri tome teče može se prikazati na sljedeći način (organska materija je predstavljena kao organski karbon - C):



U toku ove reakcije oslobađa se kiseonik koji sa karbonom (C) iz organske materije daje  $\text{CO}_2$ . Pri tome se šestovalentni Cr(VI) u kalij bihromatu (u kome je narandjaste boje), reducira u trovalentni Cr(III) tj. u  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$  (koji je tamno zeleno-plave boje). Količina stvorenog Cr(III) prema tom intenzitetu zeleno plave nijanse ekvivalentan je količini oksidisanog ugljika (C). Ova promjena boje odnosno količina nastalog Cr(III) u  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$  služi kao baza za kolorimetrijsko određivanje organskog ugljika u tlu. Treba istaći da spaljivanje mokrim putem nije nikada kvantitativno, jer jedan dio ostaje neoksidiran a u redoks reakcijama mogu učestvovati i druge materije.

**Postupak:** Uzorak fine zemlje-sitnice se prosije kroz sito od 1mm. Izvagati 1 g ovako prosijanog vazdušno suhog tla i prenijeti u odmjernu tikvicu od 300 ml. Zatim dodati 30 ml 0,1667 M rastvor  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  i 20 ml koncentrovane  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (tehnička). Istovremeno praviti i slijepu probu i standarde. Ovako vruća smjesa (burna reakcija) se odmah stavlja u sušionik na temperaturu od 98-100 °C (ne smije preći 100 °C zbog razlaganja stvorenog Cr sulfata) i ostavi se da stoji 90 minuta. Zatim se vadi iz sušionika, ohladi i doda 80 ml destilovane vode i ostavi da stoji preko noći da se odvoji talog od tečnosti. Sutradan se bistra tekućina pažljivo odvoji u kivete (epruvetice za spektrofotometar) i kolorimetriira se na instrumentu sa narandastim filterom (talasna dužina 590 nm), jer mjerimo plavo-zelenu boju. Mjerenje se vrši metodom otklona. Očita se vrijednost apsorbance (slijepa proba se koristi kao 0).

Očitanje apsorbance na skali instrumenta, za ispitivani uzorak, preko baždarne krivulje (izrađene na osnovu serije očitanja apsorbance u seriji standarda sa poznatim koncentracijama C) prevodi se u % ugljenika a zatim se množi sa faktorom 1,72 (humus sadrži 58 % ugljika) i prevodi u % humusa.

**Izrada baždarne krive:** Za izradu baždarne (standardne) krive upotrebljava se dehidratisana glukoza puris  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ . Napravi se 10 % standardni rastvor glukoze tako što 10 g glukoze rastvorimo u tikvici od 100 ml i dopunimo do oznake: molekulska težina glukoze iznosi 180, 156 g ( $\text{C}_6 = 72,060 \text{ g}$ ,  $\text{H}_{12} = 12,096 \text{ g}$ ,  $\text{O}_6 = 96,000 \text{ g}$ ).

Kako 1 mol  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  ima masu od 180,156 g a od toga sadrži 72,06 g ugljika (C), to znači da 1 g glukoze sadrži 0,3999 g ugljenika, a da 1 ml 10 % glukoze sadrži 0,03999 g ili 39,99 mg ugljenika ili kad zaokružimo 40 mg ugljika. Ako se uzmu sljedeće količine standardne otopine nalaziće se sljedeće količine ugljika odnosno humusa.

**Tabela 8. Standardni rastvori različitih količina 10% glukoze sa poznatim %C i % humusa**

10 % glukoza	mg C	%C	mg humusa	% humusa
0,1 ml	4	0,4	6,88	0,69
0,2 ml	8	0,8	13,76	1,38
0,3 ml	12	1,2	20,64	2,06
1,0 ml	40	4,0	68,80	6,88
2,0 ml	80	8,0	137,60	13,76

Baždarna kriva za preračunavanje humusa iz ugljika određenog kolorimetrijskom metodom na horizontalnoj osi sadrži očitanja apsorbance na skali instrumenta koji predstavlja % apsorbkcije. Vertikalna osa sadrži vrijednost sadržaja C u %. Rezultati mjerena se nanose na krivu. Primjer izgleda krive pogledaj u prilozima na kraju knjige.

Mjerenje proba tla vrši se na spektrofotometru. Podešavanje nul – tačke na skali instrumenta vrši se pomoću takozvane slijepе probe, tj. standardne otopine koja ne sadrži organsku materiju, a tačka 100 na instrumentu potpunim zamračivanjem foto-ćelije. Unutar ovih vrijednosti nalaze se sve ostale vrijednosti ispitivanih proba tla.

Sa ovom metodom se može odrediti maksimalna količina humusa od oko 27 %. Kod većih sadržaja humusa za analizu se umjesto 1 g tla koristi 0,5 g tla.

#### **5.1.4.4. Određivanje sadržaja organske materije s K-permanganatom (permanganatna metoda po Kotzmannu)**

**Metod analize:** Volumetrijska (titracijska) metoda analize zasnovana na redoks reakcijama, izazvanim mokrim spaljivanjem organske materije u K-permanganatu [82].

**Princip:** Ovom metodom se određuje sadržaj humificirane organske materije tla, oksidacijom ugljenika iz humusa u  $\text{CO}_2$  sa 0,02M  $\text{KMnO}_4$  (kalijum permanganat). Naime, utvrđeno je da ovom metodom 1ml 0,02M  $\text{KMnO}_4$  oksidiše 0,514 mg ugljika u  $\text{CO}_2$ . Količina utrošenih ml 0,02M  $\text{KMnO}_4$  određuje se titracijom sa 0,05M  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$  (oksalnom kiselinom).

0,02M rastvor  $\text{KMnO}_4$  je ekvivalentan 0,05M rastvoru  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ . Međutim, reakcija između oksalne kiseline i kalijum permanganata nije trenutna, nego se odvija sa zadrškom tako da pri titriranju dolazi do greške jer je dodata veća količina oksalne kiseline.

Retitracija viška 0,05M  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$  se obavlja rastvorom 0,02M  $\text{KMnO}_4$ . Reakcija je trenutna. Razlika između ukupno utrošenog kalijum permanganata pomnoženog sa faktorom normaliteta, i utrošene oksalne

kiseline pomnožene sa njenim faktorom normaliteta, daje vrijednost u ml KMnO<sub>4</sub> utrošenog za oksidaciju ugljika iz humusa.

Količina ugljika u humusu iznosi 58 %, tako da vrijednost humusa u mg izračunavamo množenjem vrijednosti ugljika (mg) sa koeficijentom za prevođenje = 1,72 (100 : 58 = 1,72).

Procenat humusa dobijemo tako što težinu humusa (mg) dijelimo sa težinom uzorka tla (mg) i pomnožimo sa 100.

**Pribor:**

analitička vaga  
erlenmajer kolba 500 ml  
stakleni mjerni cilindri 200 ml i 50 ml  
pipeta 50 ml  
mali stakleni lijevak  
uredaj za kuhanje  
dvije birete 50 ml

**Rastvor:**

- 0,0202 M kalijum permanganat  
- 0,05 M oksalna kiselina  
- sumporna kiselina koncentracije 1:3  
- destilovana voda

**Postupak:** Na analitičkoj vagi odvažemo 300 do 500 mg uzorka, prethodno prosijane sitnice na situ 0,25 mm. Tamnija boja uzorka ukazuje na veći sadržaj humusa, pa se u tom slučaju odmjerava manja količina uzorka. Uzorak prenosimo u erlenmajer tikvicu od 500 ml. Nakon toga dodajemo 130 ml destilovane vode, 20 ml razrijeđene sumporne kiseline (1:3) i pipetom 50 ml 0,02 M kalijum permanganata. Nakon toga tikvicu prekrijemo malim lijevkom. Sumporna kiselina će stvoriti kiselu sredinu u kojoj će se kalijum permanganat razoriti i oslobođiti kisik potreban za oksidaciju ugljika iz humusa.



Sadržaj tikvice kuhamo 15 min (mjerimo od početka ključanja), a potom odmah vršimo titriranje zaostalog kalijum permanganata sa 0,05 M oksalnom kiselinom iz prethodno pripremljene birete od 50 ml. Titriranje se vrši do potpunog obezbojenja. Na bireti očitamo utrošenu oksalnu kiselinu. Već smo napomenuli na grešku uslijed netrenutačne reakcije između oksalne kiseline i kalijum permanganata koju ispravljamo retitracijom viška oksalne kiseline sa 0,02 M KMnO<sub>4</sub> iz prethodno pripremljene birete od 50 ml. Retitracija se vrši do pojave blijedo ružičaste boje. Na bireti očitamo utrošeni KMnO<sub>4</sub> za retitraciju.

**Obračun:**

Procenat humusa po metodi Kotzmannova se obračunava po formuli :

$$\text{Humus ( \% )} = \frac{A \cdot 0,514 \cdot 1,72 \cdot 100}{m}$$

Obračun se vrši u nekoliko koraka:

1.  $A = \text{broj ml } 0,02 \text{ M KMnO}_4 \text{ utrošenog za oksidaciju ugljika iz humusa ,}$

$$A = a - b$$

$a = 50 \text{ ml } 0,02 \text{ M KMnO}_4 \text{ (dodatog u tikvicu) + ml KMnO}_4 \text{ utrošen retitracijom}$

Ovu vrijednost pomnožimo sa faktorom normaliteta 1,0005 za  $\text{KMnO}_4$

$$a = (50 \text{ ml} + \text{ml KMnO}_4) \cdot 1,0005$$

$b = \text{ml } 0,05 \text{ M oksalne kiseline utrošeni na titraciju KMnO}_4 \text{ pomnožen sa faktorom normaliteta za } 0,05 \text{ oksalnu kiselinu } 0,9995$

2. Ugljik (mg) =  $A \times 0,514$

$0,514 = \text{mg ugljika oksidisani sa } 1 \text{ ml } 0,1 \text{ n KMnO}_4$

3. Humus (mg) =  $\text{mg ugljika} \times 1,72$

$1,72 = \text{koefficijent za prevođenje ugljika u humus}$

Humus sadrži 58 % ugljika,  $100 : 58 = 1,72$

$$4. \text{ Humus (\%)} = \frac{\text{humus (mg)} \cdot 100}{m \text{ (masa uzorka u mg)}}$$

**Tabela 9. Oznaka humoznosti tla, Izvor [125]**

Oznaka humoznosti	% humusa
Slabo humozno	< 2
Umjereno humozno	2,1-4,0
Jako humozno	4,1-10,0
Vrlo jako humozno	> 10,0

#### **5.1.4.5. Određivanje koncentracije ugljika i azota suhim spaljivanjem u automatskom elementarnom C i N analajzeru**

Koncentracija (%) ukupnog organskog karbona tla ( $C_t$ ) i ukupnog azota ( $N_t$ ) u uzorcima se određuje i u automatskom C i N analajzeru različitih proizvođača (Na pr. Heraeus Elementar Vario EL, Hanau, Njemačka).



**Slika 34. Elementarni CN analajzer (foto Tвica M.)**

**Priprema uzorka** podrazumijeva fino sitnjene zemlje-sitnice u aparatu za sitnjene/mljevenje. Aparat radi na principu horizontalne centrifuge sa malim metalnim komorama u kojima su smještene tri metalne kugle. Fina zemlja – sitnica se stavlja u pomenute komore koje se potom zatvore. Uključivanjem uređaja za sitnjene uređaj počinje da se vrti u krug. Mljevenje ili sitnjene uzorka se vrši mehaničkim dejstvom kugli na frakcije sitnice, nakon čega usitnjen uzorak ima brašnast opip pod prstima.

**Postupak:** Postupak je (polu) automatiziran. Odvagamo na analitičkoj vagi, koristeći plastične rukavice, oko 40 mg prethodno fino usitnjenog tla spremlijenog u specijalne folijice (kapsulice) koje potom pritiskom prstima zatvorimo i formiramo malu kuglicu pazeci da uzorak ne ispadne iz kapsulice. Analitička vaga je u okviru jednog zatvorenog sistema povezana i sa kompjuterom i sa elementarnim CN analajzerom. Nakon što vaga pokaže masu svakog uzorka, klikom na tastaturi kompjutera ona se unosi u bazu podataka u kompjuterskom programu. Svakom izvaganom uzorku dodjeljuje se evidencijski broj memorisan u kompjuteru zajedno sa masom uzorka. Kapsulica se poslije vaganja odlaže u rupicu na plastičnoj pločici sa označenim redom i brojem po istom sistemu kao i u kompjuteru. Kapsulice sa uzorkom se poslije završenog vaganja vade redom sa pločice i postavljaju u automatski C i N analajzer (kružna ploča sa rupicama za kapsulice na vrhu

uređaja – vidi gornju sliku 34.). Svaka kapsulica odvagana i evidentirana, postavlja se na poziciju na CN analajzeru predviđenom za taj evidencijski broj po istom principu kao i u kompjuterskom programu.

Po puštanju u rad elementarnog analajzera kapsulice bi se automatski jedna za drugom u posebnim komorama izložile velikim temperaturama (>600-800°C) što bi uzrokovalo izgaranje organske materije u njima. Pri potpunom sagorijevanju (oksidaciji) organske materije oslobođaju se gasovi a masa gasovitih oblika oksida C i N se odredi u automatskom CN analajzera. Određena masa C ili N u odnosu na evidentiranu masu uzorka koristi se za obračun koncentracije (%) ukupnog C i ukupnog N u uzorku.

Podaci bi se obradili kompjuterski tako da bi % karbona/ugljika i azota po evidencijskim brojevima uzorka bio jednostavno izlistan na štampaču.

#### **5.1.4.6. *FIZIČKO FRAKCIJONIRANJE RAZLIČITIH FORMI ORGANSKE MATERIJE TLA***

Bolje upravljanje dinamikom organske materije u tlu, u kontekstu plodnosti tla i u kontekstu sve izraženije potrebe za pohranjivanjem atmosferskog CO<sub>2</sub> u formu organske materije tla, podrazumijeva razumijevanje različitih formi ili frakcija organske materije tla. U sljedećoj modificiranoj šemi Baldock i Nelson (2000) izdvajaju tri frakcije organske materije tla [2].:

- 1) nerazloženi biljni ostaci (nevezane čestice nerazloženih organskih ostataka slobodne u matriksu tla ili okružene i zaštićene od mikrobiološke razgradnje u agregatima tla), te drveni ugalj i ugljenisani ostaci,
- 2) biohemski transformisani humus, koji se dalje dijeli na: (1) specifične humusne materije (humini, huminske i fulvo kiseline), i (2) nespecifične ili nehumusne (netransformisane) biomolekule biljnog i mikrobiološkog porijekla (ugljeni hidrati, jedinjenja proteinske strukture, ostaci lignina i jedinjenja alifatične strukture).
- 3) rastvorena organska materija u tečnoj fazi tla. Preko rastvorene organske materije ispire se C iz gornjih slojeva tla, pored toga, rastvorena organska materija u procjednim vodama može se udružiti sa ionima Al i teških metala, te organskim zagađivačima i transportovati ih kroz profil tla sa mogućnošću zagodenja podzemne vode.

Povezano s razumijevanjem različitih formi (frakcija) organske materije, Christensen [21] opisuje tri glavna mehanizma zaštite OM od mikrobiološke razgradnje i stabiliziranja sadržaja organske materije u tlu:

- 1) hemijski zaštićena organska materija koja se štiti vezivanjem sa prahom i glinom;

- 2) fizički zaštićena organska materija okružena u mikroagregatima (53-250 µm);
- 3) biohemski zaštićena organska materija koja vodi porijeklo od komponenti otpornih na biorazgradnju iz biljnog materijala i otpornih komponenti nastalih procesima sinteze.

Naime, bakterije, prosječne veličine oko 3 µm, funkcionišu samo u porama koje su najmanje 3 puta veće od njihovog dijametra. Na taj način one se isključuju iz većine pora tla, a taj efekt je naročito izražen sa porastom sadržaja gline i dobrom agregacijom. Na taj način, fizička razdvojenost između mikroorganizama i organskih molekula u ovim tlima može biti jako izražena i djelomično objašnjava tendenciju da se u takvim tlima (glinovita tla sa dobrom agregacijom) akumulira više organske materije nego u tlima lakošeg teksturnog sastava a sa sličnim ostalim uvjetima. Na razdvojenost između supstrata i mikroba uzrokovanu makro i mikroagregatima ukazuje veća zastupljenost mikroba na spoljašnjem dijelu agregata dok znatan dio organske materije biva u centru agregata [52].

Jedna od metoda razlikovanja udjela čestica nerazloženih biljnih ostataka od udjela humificiranih ostataka je razvijen na konceptu fizičkog frakcioniranja različitih oblika organske materije u tlu.

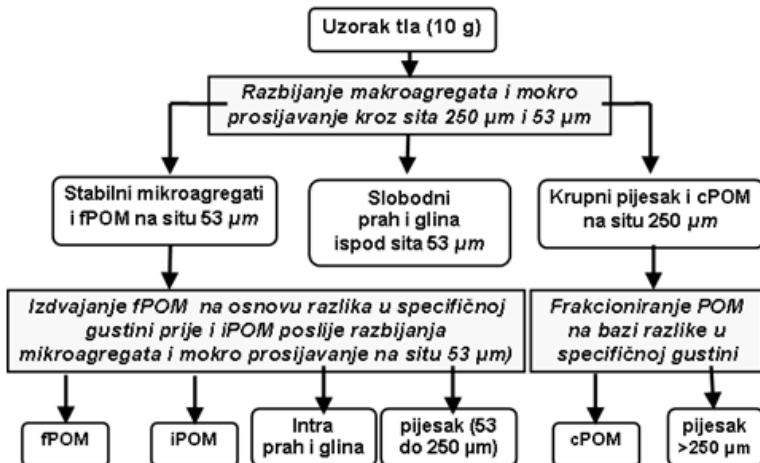
Uopšte, frakcioniranje (izdvajanje) različitih formi organske materije se bazira na činjenici da se humificirana organska materija, koja u hemijskom pogledu predstavlja jako reaktivne organske kiseline, najvećim dijelom veže sa mineralnim dijelom tla. Prije svih, veže se sa frakcijom gline gradeći glineno-humusni kompleks ali i sa česticama praha čineći zajedno frakciju OM vezane za prah i glinu (frakcija p+g). Nadalje, koncept se bazira na činjenici da se svježe, nevezane čestice nerazloženih biljnih ostataka (engl. *Particulated Organic Matter - POM*) slobodne u matriksu tla ili okružene u agregatima mogu se izdvojiti kao lebdeće u tekućini poznate specifične gustine (frakcija POM). Znači na bazi ovog koncepta, nakon razbijanja zemljjišnih agregata, fizičkim frakcioniranjem (izdvajanjem) humusa vezanog za frakciju praha i gline („teška“ frakcija p+g) te njegovim razdvajanjem od slobodnih, lebdećih, nevezanih, nerazloženih čestica biljnih ostataka („laka“ frakcija POM) može se približno odrediti odnos ovih frakcija.

Tako je napravljen novi konceptualni model OMT predložen od grupe autora J. Six, R.T. Conant, E.A. Paul i K. Paustian [144, 145]. Ovaj model se razlikuje od ostalih sličnih modela i po tome što su u ovom modelu definisane variabile mjerljive forme OMT.

**Princip fizičkog frakcioniranja** različitih formi organske materije, nešto detaljniji od gore navedenog (zavisno gdje se nalaze ili odakle se izdvajaju

teška frakcija OM vezana za prah i glinu (p+g) i laka frakcija nerazložene OM slobodne u matriksu tla -POM), bazira se na nekoliko koraka:

1. **Razbijanju makroagregata u uzorku tla u mikroagregatnom izolatoru:** agregatno frakcioniranje uzorka u stvari predstavlja izdvajanje stabilnih mikroagregata (manjih od 250 µm) iz krupnijih makroagregata kroz sljedeće mehanizme: disperzijom uzorka u vodi, razbijanjem makroagregata i kontinuirano mokro prosijavanje tekućom vodom kroz 2 vibraciona sita od 250 µm i 53 µm:
  - a) na prvom situ od 250 µm se zadržava krupni pjesak i krupnije čestice lake frakcije – krupne nevezane čestice nerazložene organske materije (c POM- engl. *coarse Particulate Organic Matter*),
  - b) na drugom situ od 53 µm se zadržavaju stabilni mikroagregati, sitni pjesak i čestice fine (sitne) lake frakcije – fine nevezane čestice nerazložene organske materije (fPOM).
  - c) na dnu u posudi se skuplja frakcija OM vezane za slobodne čestice praha i gline (sp+g) (prah i glina koje nisu u stabilnim mikroagregatima).
2. **Razbijanju stabilnih mikroagregata** (koji su se zadržali na situ od 53 µm) mućkanjem na mućkalici; ovim postupkom mikroagregati se raspadaju na: unutar mikroagregatnu laku frakciju nerazloženih organskih ostataka (iPOM engl. *intra-microaggregate POM*), frakciju organske materije vezane za unutar mikroagregatne čestice praha i gline (ip+g, *intra-microaggregate p + g*) i sitni pjesak.
3. **Fizičkom izdvajanju nevezanih lakih frakcija – POM** (cPOM, fPOM i iPOM) iz matriksa tla, na osnovu razlike u specifičnoj gustini između nevezanih čestica lake frakcije - (POM) koja je po definiciji lakša od 1,8 g/cm<sup>3</sup> i težeg mineralnog dijela vezanog sa organskom materijom. Izdvajanje frakcija POM se vrši dodavanjem tekućine poznate gustine (1,8 g/cm<sup>3</sup>) nakon čega se plutanjem na površini izdvajaju čestice nevezane lake frakcije OM (POM).



**Slika 35. Shema frakcioniranja OMT (izoliranja pojedinih frakcija OMT) u konceptualnom modelu OMT [Izvor: 171]**

**Postupak fizičkog frakcioniranja različitih oblika organske materije tla:**

**1. Razbijanje makroagregata i izdvajanje mikroagregata – agregatno frakcioniranje**

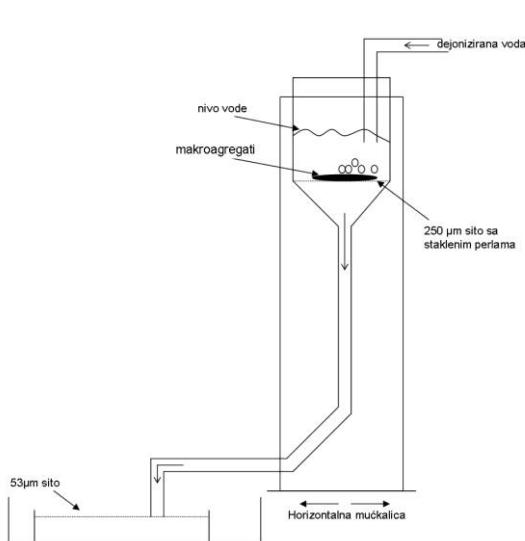
Za razbijanje makroagregata u uzorku tla i izolaciju stabilnih mikroagregata, zatim lake frakcije – čestica nevezane nerazložene organske materije (cPOM i fPOM), i slobodne (teške) frakcije OM vezane za prah i glinu (sp+g), koristi se modifikovani uređaj mikroagregatni izolator (slika 36.) koji omogućuje kompletno razbijanje makroagregata ( $>250 \mu\text{m}$ ), istovremeno minimizirajući razbijanje oslobođenih mikroagregata ( $53 - 250 \mu\text{m}$ ).

Odvaganih 10 g sitnice tla iz površinskog A horizonta sa 0 – 10 cm dubine, se potopi u dejoniziranu vodu iznad sita od  $250 \mu\text{m}$ . Na situ se već nalazi 50 staklenih perli (promjer = 4 mm). Horizontalnim mučkanjem sita sa uzorkom sitnice i perlama vrši se razbijanje makroagregata ( $>250 \mu\text{m}$  ili  $>0,25 \text{ mm}$ ). Tekuća voda kontinuirano ispire oslobođene stabilne mikroaggregate i fPOM iz razbijenih makroagregata koji se zatim zadržavaju na situ od  $53 \mu\text{m}$ , na taj način izbjegavajući njihovo daljnje narušavanje staklenim perlama. Nakon kompletног razbijanja makroagregata (ispire se bistra voda iz prvog sita), samo krupni pijesak i cPOM zaostaju na situ od  $250 \mu\text{m}$ , a u posudi na dnu se skupila frakcija OM vezane za slobodnu prah i glinu (s p+g).

Frakcija sakupljena na situ od  $53 \mu\text{m}$  se ispire vodom kroz sito do pojave čiste vode. Na taj način se vodostabilni mikroagregati koji se zadržavaju na situ zajedno sa česticama fPOM, razdvajaju od frakcije OM vezane za

slobodne čestice praha i gline (sp+g) koje se skupljaju zajedno sa vodom u hvataču uzorka koji se nalazi ispod sita od 53 µm na dnu uređaja.

Sadržaji (izdvojene frakcije) sa sita od 250 µm, sita od 53 µm i iz posude na dnu mikroagregatnog izolatora se pažljivo isperu u posebne posudice i odnose na sušenje na 50 °C do konstantne težine a zatim na vaganje.



**Slika 36. Mikroagregatni izolator (shematska prezentacija);** Nakon razbijanja makroagregata na prvom situ od 250 µm se zadržava krupni pjesak i čestice krupne lake frakcije – krupne čestice nevezane nerazložene organske materije (cPOM); na drugom situ od 53µm se zadržavaju vodostabilni mikroagregati, fini pjesak, čestice fine lake frakcije (fPOM); i na kraju u posebnoj posudi na dnu se izdvaja frakcija OM vezane za slobodne čestice praha i gline (sp+g) [Izvor: 144, 171]

## 2. Fizičko izdvajanje lakih frakcija: cPOM, fPOM i iPOM

Metoda izdvajanje krupnih, finih (sitnih) i unutar mikroagregatnih čestica nevezane nerazložene organske materije (cPOM, fPOM i iPOM) bazira se na razlici specifične gustine između lake frakcije - slobodnih čestica nerazložene organske materije (POM) koja je lakša od  $1,80 \text{ g cm}^{-3}$  i teške frakcije (mineralnog dijela tla odnosno mineralnog dijela vezanog sa organskom materijom) čija je specifična gustina  $>1,8 \text{ g cm}^{-3}$ .

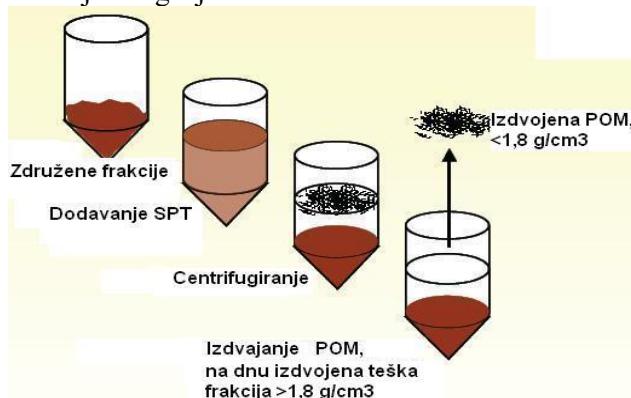
Izdvajanje lakih frakcija (POM) se vrši u rastvoru natrij politungstata (SPT – engl. sodium polytungstate) poznate specifične gustine  $1,8 \text{ g cm}^{-3}$  ( $\approx 246 \text{ g}$

SPT otopimo u 1 litri vode, provjeravamo na vagi da težina 100 ml SPT = 180 g).

#### ***Postupak izdvajanja krupne posebne organske materije (c POM):***

Izdvojena frakcija sa sita od 250 µm (cPOM i krupni pjesak) prosušena na 50 °C se prenese u posudicu za centrifugiranje (50 ml) u koju zatim sipamo pripremljen SPT (30 ml) i začepimo. Odmah primijetimo kako slobodna cPOM počinje plutati u rastvoru SPT. Posudicu začepimo i mućkamo na uređaju za vibriranje u trajanju od 60-tak sekundi. Za to vrijeme dolazi do fizičkog izdvajanja lake frakcije tj. krupnih nevezanih čestica nerazložene organske materije (cPOM), koje plutaju na površini, od krupnog pjeska koji se skuplja na dnu posudice. Nakon završenog mućkanja posudice ostavimo nekoliko minuta da miruju a zatim se iz posudice prelije sav sadržaj SPT sa plutajućom cPOM preko sita od 250 µm pazeci da krupni pjesak ostane na dnu posudice. Na taj način smo razdvojili cPOM koji se zadržao na situ, od rastvora SPT koji se skuplja ispod sita jer se ponovo može iskoristiti. Postupak mućkanja i prelijevanja se ponovi sve dok se ne razdvoji sva cPOM od krupnog pjeska odnosno pojave čistog SPT nakon mućkanja (2-3 puta). Laka frakcija tj. krupne nevezane čestice nerazložene organske materije (cPOM) zadržana na situ ide na ispiranje pod umjereni mlaz destilovane vode tako da se pazi da isprana vode ne sadrži čestice OM. Poslije se cPOM pažljivo ispere sa sita u posudicu i nosi na sušenje do konstantne težine i vaganje.

Posudica sa krupnim pjeskom na dnu se ispunji destilovanom vodom i ponovo stavlja na uređaj za vibriranje. Na taj način (2-3 puta) se ispire SPT sa površine čestica krupnog pjeska, koji se poslije pranja premješta u posudicu za sušenje i vaganje.



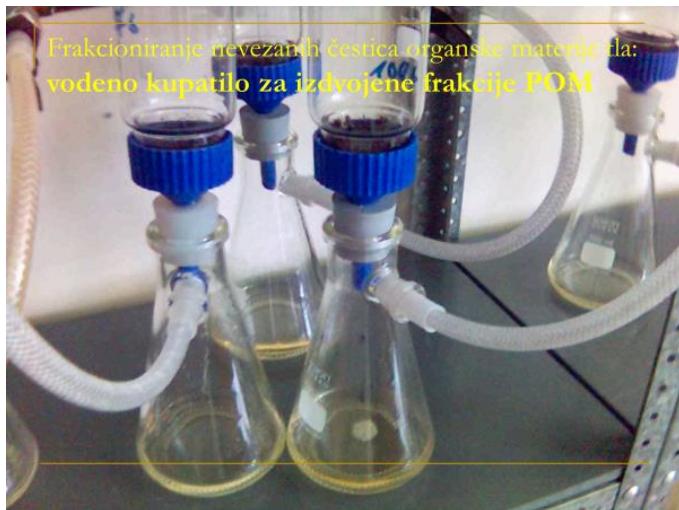
**Slika 37. Fizičko frakcioniranje lake frakcije (čestica slobodne, nevezane OM – POM), na osnovu razlike u specifičnoj gustini [Izvor: 144, 171]**

**Postupak izdvajanja finih nevezanih čestica nerazložene organske materije (f POM):**

Izdvojeni sadržaj sa sita od 53 µm (fPOM, vodostabilni mikroagregati i fini pijesak) prosušen na 50 °C se prenese u posudicu za centrifugiranje u koju zatim sipamo pripremljen SPT (30 ml). Posudicu pažljivo i polako (da ne razbijemo mikroagregate) okrenemo u horizontalan položaj 4-5 puta tako da se sav sadržaj pomiješa sa SPT-om. Odmah primijetimo kako dio f POM pluta u rastvoru SPT a na dnu se izdvajaju vodostabilni mikroagregati i fini pijesak. Zidove posudice isperemo SPT-om do pola centimetra od vrha posudica. Posudice zatim stavljamo u uređaj za centrifugiranje gdje u trajanju od 40 minuta vršimo centrifugiranje na 3600 okretaja u minuti. Za to vrijeme dolazi do fizičkog izdvajanja lake frakcije, tj. finih nevezanih čestica nerazložene organske materije (f POM) koja pluta na površini dok se mikroagregati i fini pijesak skupljaju na dnu posudice. Nakon završenog centrifugiranja iz posudice se pažljivo prelije SPT sa plutajućom finom nevezanom organskom materijom (f POM) u posebnu posudu. Postupak dodavanja novog SPT, centrifugiranja i prelijevanja se ponovi sve dok se ne razdvoji sva fPOM od mikroagregata, odnosno do pojave čistog rastvora SPT nakon centrifugiranja (2-3 puta).

Fine nevezane čestice nerazložene organske materija (**f POM**) zajedno sa rastvorom SPT ide na vodeno kupatilo gdje se prvo vrši procjedivanje rastvora SPT (koje će se ponovo koristiti) preko filtera na kome se zadržava fPOM. Zatim se vrši pranje fPOM dodavanjem vode koja ispiri SPT zadržan na površini čestica fPOM (isprati sa minimalno 2 litre vode). Poslije pranja f POM se pažljivo prenese u posudice i nosi na sušenje na 50 °C do konstantne težine i zatim vaga.

Mikroagregati preostali u posudici zajedno sa finim pijeskom idu na razbijanje mikroagregata



**Slika 38. Vodeno kupatilo za izdvojene lake frakcije (POM)**  
(foto: Tvica M.)

### **3. Razbijanje mikroagregata i izdvajanje unutar mikroagregatne POM (iPOM)**

U posudicu za centrifugu sa vodostabilnim mikroagregatima i finim pijeskom na dnu (preostalim poslije izdvajanja fPOM), stavljamo 15 staklenih perli (radijus 4 mm) i sipamo 30-tak ml SPT-a, začepimo i držimo na uređaju za vibriranje u trajanju nekoliko desetaka sekundi. Mućkanjem sadržaja dolazi do razbijanja kompaktne mase vodostabilnih mikroagregata sabijenih na dnu posudice nakon centrifugiranja. Zatim posudice stavljamo na uređaj za horizontalno mućkanje i to 80 - 90 frekvencija u minuti, u trajanju od 18 sati. Za to vrijeme će se razbiti stabilni mikroagregati i osloboditi unutar mikroagregatnu (laku frakciju) nerazloženu organsku materiju (**iPOM**), unutar mikroagregatnu prah i glinu vezanu sa organskom materijom (**ip+g**), te fini pijesak. Nakon mućkanja posudice otvaramo, ispiremo čep i zidove posudice sa SPT-om i stavljamo na centrifugiranje. Fizičko izdvajanje iPOM i pranje u vodenom kupatilu se dalje vrši po istom postupku kao i izdvajanje i pranje fine nerazložene organske materije (fPOM).

Nakon izdvajanja iPOM zajedno sa SPT, na dnu posudice su preostali unutar mikroagregatni prah i glina (**ip+g**) vezani sa organskom materijom i fini pijesak. Površina nabrojanih čestica je prekrivena SPT-om te se mora isprati. Pošto su sabijene na dnu zajedno sa staklenim perlama, u posudicu sipamo destilovanu vodu i stavljamo na uređaj za vibriranje da razbijemo tu sabijenu

smjesu. Nakon toga posudica sa destilovanom vodom i česticama ide na centrifugiranje. Nakon centrifugiranja odlijevamo vodu iz posudice i proces ispiranja SPT sa površine čestica ponavljamo tri–četiri puta. Može se desiti da u vodi nakon centrifugiranja budu dispergovane čestice gline tako da voda dobije mutnu boju. U tom slučaju u posudice sa dodaju tri – četiri kapi 1M CaCl<sub>2</sub> koji uzrokuje koagulaciju dispergovanih čestica gline. Nakon 15 minuta mirovanja posudice se ponovo centrifugiraju i nakon toga je voda uglavnom bistra.

Nakon završenog ispiranja, sadržaj se izlije na sito od 53 µm. Ispod sita u posudici se sakuplja frakcija unutarnjim mikroagregatnog praha i gline vezanih sa organskom materijom, a na situ se zadržava fini pijesak. Međutim, na situ zajedno sa finim pijeskom vidljivi su i zaostali stabilni mikroagregati koji nisu uspješno razbijeni u prethodnoj proceduri. Na situ nakon ispiranja oni se izdvoje plastičnom lopaticom i blagim mehaničkim silama (pritiskom lopatice) vrši se njihovo razbijanje. Nažalost ovim postupkom razbijanja zaostalih stabilnih mikroagregata i ispiranja, ispere se i dio iPOM u frakciju OM vezane za praha i gline, a jedan dio iPOM zaostane na situ sa frakcijom finog pijeska.

Frakcije **iPOM**, unutar mikroagregatnih praha i gline vezanih sa organskom materijom (**ip+g**), te fini pijesak se suše do konstantne težine i poslije idu na vaganje.

### Kvantifikacija karbona u izdvojenim frakcijama (C<sub>fr</sub>):

Određivanje sadržaja/koncentracije (%) C<sub>fr</sub> i N<sub>fr</sub> u izdvojenim frakcijama se vrši u elementarnom CN analajzeru po prethodno opisanom postupku.

**Obračun udjela (engl. yield) karbona** iz pojedinih frakcija (C<sub>fr</sub>) u ukupnom organskom karbonu tla (C<sub>org</sub>) do dubine od 10 cm izražava se u procentima. Izračunava se po formuli:

$$Y_{fr}(\%) = \frac{(C_{fr}/100) \cdot m_{fr}}{(C_{org}/100) \cdot 10} \cdot 100 = \frac{C_{fr} \cdot m_{fr} \cdot 10}{C_{org}} \dots \text{gdje su:}$$

Y<sub>fr</sub> - udio pojedine frakcije karbona u ukupnom C na ispitivanoj dubini (%)  
C<sub>fr</sub> – sadržaj organskog C u pojedinoj frakciji (predstavlja grame C u 100 grama frakcije) (%)

m<sub>fr</sub> – masa frakcije (g)

C<sub>org</sub> – sadržaj ukupnog organskog karbona na ispitivanoj dubini (%)

10 – frakcioniranje izvršeno u 10 g uzorka

## **5.2. FIZIČKE OSOBINA TLA**

U fizičke osobine zemljišta koje određujemo u ovom poglavlju ulaze:

Fizičke osobine primarnih čestica tla:

- oblik čestica tla,
- tekstura ili procentualna zastupljenost čestica tla prema veličini
- aktivna površina čestica tla i
- specifična gustina primarnih čestica tla ili čvrste faze,

Fizičke osobine povezane sa strukturom tla:

- struktura,
- volumna gustina zemljišta i
- poroznost.

Vodno-fizičke osobine tla:

- vlažnost tla,
- sile držanja vode u tlu,
- vodni potencijal tla,
- kretanje vode u tlu i
- konzistencija tla

### **5.2.1. FIZIČKE OSOBINE PRIMARNIH ČESTICA TLA**

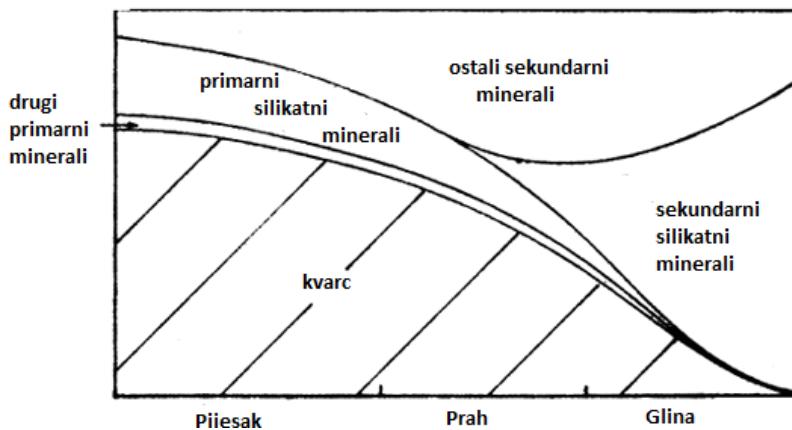
U čvrstu fazu zemljišta pored čestica organske materije tla ulaze i mineralne čestice. Mineralnu fazu zemljišta predstavljaju čestice minerala različitog oblika, hemijskog sastava i različitih veličina. Ove primarne mineralne čestice tla su:

1. porijeklom iz matične stijene iz koje su se izdvojile kao produkti njenog fizičkog usitnjavanja i hemijskog raspadanja (primarni minerali), i
2. nastale u samom tlu, tokom njegove geneze od krajnjih produkata raspadanja primarnih minerala i sintezom novih sekundarnih minerala.

Veličina i sastav tih mineralnih čestica variraju od:

- koloidnih dimenzija u koje ulaze sekundarni minerali gline i ostali kristalni i slabokristalisali sekundarni alumosilikati, te krajnji produkti raspadanja u vidu oksida i hidroksida Fe i Al i raznih soli alkalnih i zemnoalkalnih metala,
- čestica praha i pijeska koje čine najviše kvarc i primarni silikatni minerali otporniji na raspadanje (muskovit i ortoklas), sporednih minerala otpornih na raspadanje (cirkon, rutil), i raznih soli alkalnih i zemnoalkalnih metala (karbonati, sulfati, fosfati), pa do

- šljunka i kamena koji potiču od većih odlomaka matičnih stijena (sedimentnih, metamorfnih i magmatskih) ili krupnijih otpornijih minerala.

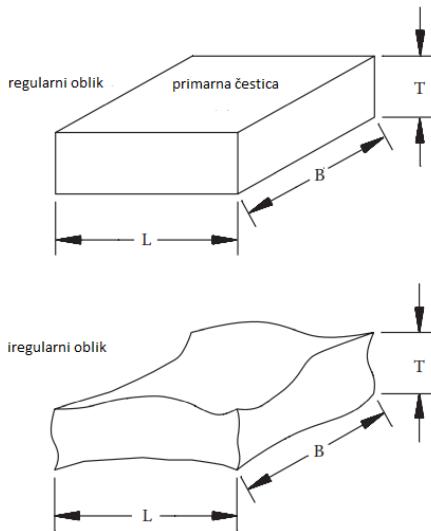


**Slika 39. Mineraloški sastav tla (područje unutar slike označava relativnu zastupljenost minerala)** (Izvor: [189])

#### 5.2.1.1. *Oblik čestica tla*

Oblik čestica tla utiče na njihovu specifičnu (aktivnu) površinu kao i na mehaničku ili teksturnu analizu zemljišta. Nadalje, oblik čestica ima snažan uticaj na pakovanje (slaganje) čestica u volumenu zemljišta, te čvrstoću tla, kao i na kretanje vode. Nažalost, oblik čestice je osobina tla teška za analizu i to bi mogao biti jedan od razloga zašto se ova analiza nije ustalila u našoj pedološkoj praksi [147].

Postoji niz termina za definiranje oblika čestice. Neke od definicija zahtjevaju upućivanje na figuru idealne čestice sa regularnim oblikom:



**Slika 40. Idealna individualna čestica zemljišta. (Izvor: [71])**

Neka  $L$ ,  $B$  i  $T$  kao što je predstavljeno na slici, predstavljaju dužinu, širinu i debљinu čestice. Definisani su sljedeći elementi (faktori) analize oblika čestica [71]:

- zaravnjenosti =  $B/T$ ,
- odnos izduženosti =  $L/B$ .

Ostali bezdimenzionalni pojmovi su:

- sferičnost = površina ekvivalentne sfere/stvarna površina
- kružnost = obim kruga iste površine / stvarni obim (perimetar),
- naboranost = stvarni obim (primetar)/obim opisane kružnice

### Određivanje oblika čestica

Postoji nekoliko metoda za ispitivanje oblika čestica tla.

*Prva metoda* analize oblika čestica tla je direktno posmatranje uzorka tla pod mikroskopom podržanim sistemom za analizu slike (engl. *image analysis system*) [28]. Postoje komercijalni sistemi za analizu slike koji automatski obrađuju faktore oblika čestica tla i povezanih svojstava i izbacuju podatke.

Uopšteno gledajući, mikroskopska slika tla pokazuje ili čvrstu materiju (čestice tla) ili praznine (pore). Pojednostavljenno, slika čvrstih čestica tla može geometrijski izgledati kao [147]:

1. sferna (kuglasta ili zaobljena),
2. u formi diska ili cilindrična,

3. kockasta i
4. u formi kvadra.

Istovremeno, pora (praznina) u tlu može izgledati kao:

1. cilindrična cijevčica ili
2. preze između dvije ravne površine mineralne ili organske faze.

Ove slike ili fizički modeli tla omogućavaju razumijevanje odnosa između aktivne površine i pakovanja čestica sa zadržavanjem ili kretanjem vode.

*Druga metoda* je indirektna tehnika za analize oblika čestica tla, dobijena iz varijacija viskoziteta i koncentracije suspendiranih čestica. Temelji se na principu da povećanje koncentracije čvrste materije uzrokuje da viskozitet suspenzije odstupa od viskoziteta čiste tečnosti, a ova odstupanja zavise od geometrije (oblika) čestica tla kao i od koncentracije suspenzije.

*Treća metoda* ispitivanja oblika čestica koristi analizu karakteristika raspršene svjetlosti koja prolazi kroz razrijedenu suspenziju tla a temelji se na mjerenu uglovu raspršene svjetlosti koja zavisi od oblika čestica.

Generalno govoreći, primarne čestice tla mogu istovremeno imati različitu veličinu i isti oblik. Promjene na primarnim česticama izazvane trošenjem minerala ili uopšte smanjenjem veličine ne mijenjaju samo krajnje dimenzije čestice nego i faktore oblika čestica.

### **5.2.1.2. Tekstura ili distribucija čestica tla prema veličini**

Za razumijevanje tekture tla mora se poznavati i razlikovati nekoliko termina:

Termin	Definicija
Primarne čestice tla	Sve čestice u tlu koje ulaze u sastav čvrste faze.
Mehanički element ili granulometrijski element	Mineralna čestica tla koje se ne može više usitnjavati slabim mehaničkim silama ili peptizatorima.
Frakcija	Skup mineralnih čestica tla koji je definisan njihovom veličinom. Jednu frakciju unutar mase tla predstavljaju sve mineralne čestice u određenom intervalu veličina bez obzira na njihov oblik, hemijski i mineraloški sastav. Na pr., u frakciju pijeska ulaze sve mineralne čestice veličine između 2 mm i 0,02 mm.
Tekstura ili granulometrijski sastav tla	Procentualno učešće frakcija skeleta, te pijeska, praha i gline u masi tla; Distribucija čestica tla prema veličini.

Mehanička analiza tla	Određivanja procentualnog učešća pojedinih frakcija kroz postupke dezagregacije zemljišta i izdvajanja frakcija iz mase tla. Odvojeno se vrše: - mehanička analiza skeleta i - mehaničke analize fine zemlje - sitnice.
Trokut za određivanje teksturne klase tla	Koristi se za određivanje teksturne klase fine zemlje ili fine zemlje-sitnice ispitivanog tla (na osnovu procentualne zastupljenosti frakcija pjeska, praha i gline). Na pr.: glinuše ili gline, pjeskulje, prahulje, ilovače... ili glinovito pjeskovite ilovače, i sl.
Teksturna oznaka	Karakteristika tla povezana sa teksturom koja mu se dodjeljuje nakon izvršenih mehaničke analize skeleta i mehaničke analize fine zemlje sitnice tla. Na pr.: skeletna pjeskulja, ili pjeskovita ilovača skeletoidna, ili glinuša...

Mehaničke ili granulometrijske čestice tla povezujemo samo sa mineralnom fazom zemljišta tako da se često susrećemo sa nazivom mineralne čestice tla, pogotovo u stranoj literaturi. Jednako tako često se pod primarnim česticama tla misli na mineralne čestice.

Procentualno učešće čestica tla prema veličini predstavlja fundamentalnu fizičku karakteristiku tla koja snažno utiče na sve osobine zemljišta. Definicija veličine primarnih čestica tla ili efektivnog dijametra čestica nije nimalo jednostavna uvezvi u obzir različite oblike primarnih čestica. Fraza *ekvivalentni dijametar* ima zadatok upravo da naglasi zavisnost dijametra čestice od primjenjene mjerne tehnike odnosno od načina izdvajanja (frakcioniranja) čestica prema veličini.

Radi lakšeg proučavanja mehaničke ili granulometrijske čestice tla raznih dimenzija svrstane su u frakcije. Donja i gornja granica veličine svake frakcije utvrđene su na osnovu fizičkih i hemijskih osobina čestica koje ulaze u njih, najviše na osnovu osobina čestica povezanih sa čuvanjem i kretanjem vode, plodnosti tla i njihovim koloidnim osobinama. Izdvojene su:

- frakcije skeleta veće od 2 mm:
- kamenje i
- šljunak
- frakcije unutar fine zemlje - sitnice manje od 2mm:
  - frakcija pjeska,
  - frakcija praha i
  - frakcija gline.

Postoje različiti sistemi grupisanja granulometrijskih čestica po dimenzijama (veličini) i imenovanja pojedinih frakcija, naročito skeleta. Ipak, u konačnici oni se ne razlikuju značajno međusobno. Najčešće je u upotrebi klasifikacija frakcija po Attebergovoj podjeli kod koje kao i u drugim podjelama, granica razdvajanja fine zemlje sitnice od skeleta iznosi 2 mm. Čestice pjeska su od 2-0,06 mm, frakcija praha od 0,06-0,002 mm, i najfinija frakcija gline manja od 0,002 mm ili  $< 2\mu\text{m}$ .

**Tabela 10: Klasifikacija frakcija po Attebergu [126]**

Frakcije			Dimenzijs (mm)
Skelet	kamenje	Kamenje	veće od 60
	šljunak	Grubi šljunak	20-60
		Srednji šljunak	6-20
		Sitni šljunak	2-6
Fina zemlja ili sitnica	pijesak	Krupni pjesak	2-0,6
		Srednji pjesak	0,6-0,2
		Fini pjesak	0,2-0,06
	prah	Krupni prah	0,06-0,02
		Srednji prah	0,02-0,006
		Fini prah	0,006-0,002
	glina	Krupna glina	0,002-0,0006
		Srednja glina	0,0006-0,0002
		Fina glina	$<0,0002$ (0,2 mikrona)

Zanimljiva je podjela granulometrijskih čestica prema prepoznatljivosti okom, a koje je predložila UN organizacija za hranu i poljoprivredu (FAO).

**Tabela 11. FAO klasifikacija čestica tla prema veličini i vidljivosti [190]**

Naziv čestica	Granice veličine (mm)	Prepoznatljivost okom
šljunak	od 1	očito
pijesak	1 do 0.5	lako prepoznatljivo
prah	0.5 do 0.002	jedva
glina	manje od 0.002	nemoguće vidjeti

Scheffer i Schachschabel [136] nam predstavljaju široku lepezu granulometrijskih elemenata odnosno frakcija, od najvećih do najmanjih, koji su u upotrebi u Njemačkoj i Sjedinjenim Američkim Državama.

**Tabela 12. Klasifikacija krupnih frakcija koje se koriste u Njemačkoj i SAD (Sjedinjenim Američkim Državama) [136]**

Njemačka		SAD	
Naziv	dimenzije	Naziv	dimenzije
Blokovi	6,3 m	Kamenje	>254 mm
fini	6,3 - 2,0 m		
Stijene	grube	2m - 630 mm	Oblutak
	srednje	630- 200 mm	
	fine	200 - 63 mm	
Šljunak	grubi	63 - 20 mm	Šljunak
	srednji	20 - 6,3 mm	
	fini	6,3 - 2 mm	
Pijesak	grubi	2000-630 $\mu\text{m}$	Pijesak
	srednji	630 - 200 $\mu\text{m}$	
	fini	200 - 63 $\mu\text{m}$	
Prah	grubi	63 - 20 $\mu\text{m}$	Prah
	srednji	20 - 6,3 $\mu\text{m}$	
	fini	6,3 - 2 $\mu\text{m}$	
Glina	gruba	2000- 630 nm	Glina
	Srednja	630 - 200 nm	
	fina	200 - 63 nm	

U našoj zemlji široku upotrebu ima klasifikacija Međunarodnog društva za proučavanje zemljišta gdje je granica između čestica pjeska i praha 0,02 mm

**Tabela 13: Mehaničke frakcije tla prema klasifikaciji Međunarodnog društva za proučavanje zemljišta [126]**

Naziv čestica	Granice veličine (mm)
Kamen	veći od 20
Šljunak	20 - 2
Krupni pjesak	2 – 0,2
Sitni pjesak	0,2 – 0,02
Prah	0,02 – 0,002
Glina	manje od 0,002

**Frakcija skeleta:** Vidimo da u svim podjelama granulometrijske čestice promjera preko 2 mm predstavljaju skelet a manje od 2 mm fino zemljište ili sitnicu. Skeletna tla predstavljaju tla sa fizičkim odlomcima matičnih stijena. Pojavljuju se najčešće u planinskim područjima, na zemljištima koja se formiraju na koluvijalnim i aluvijalnim nanosima te na pješčarima. Slabo su hemijski aktivna zemljišta, jako propusna za vodu i slabo je drže i sa malo hraniva.

**Pjesak** je nevezan, rastresit, propustan i ne drži vodu, bestrukturan i kažemo da ima loše fizičke osobine. Međutim u manjim količinama u masi tla ima značajnu ulogu u stvaranju dobre propusnosti zemljišta. Nastao je fizičkim trošenjem matične stijene najčešće od otpornih minerala kvarca, feldspata ili kalcita. Najčešće je izgrađen od kvarca i kao takav u pjeskovitim zemljištima stvara vrlo kisela i neplodna tla.

**Frakciju praha** čine čestice dimenzija između sitnog pjeska i gline, kao i pjesak sastavljen je od otpornijih minerala na raspadanje. Ima povoljnija fizička svojstva od pjeska, manje je rastresit, bolje zadržava vodu, ali je slabije propušta, prisutno je kapilarno dizanje vode, imaju nestabilnu strukturu. Specifična geneza i pakovanje čestica praha s frakcijom gline stvara slabo propustan do nepropusan sloj kod tipa tla pseudoglej (prahulje) što uzorkuje zadržavanje vode od padavina u podpovršinskim horizontima ovih tala koji leže na nepropusnom horizontu i na površini terena.

**Frakcija gline** predstavlja najfiniju frakciju u zemljištu. To je hemijski najaktivnija frakcija u tlu, među kojima minerali gline, slabo kristalisali listasti silikati (alofani), te kristalni i slabokristalisali (oksi)hidroksidi Fe i Al imaju osobine mineralnih koloidnih čestica. Kao takva, uz koloidne polimere humusnih kiselina, predstavlja najvažniju komponentu adsorptivnog

kompleksa tla i mehanizmom adsorpcije štiti hraniwa od ispiranja. Dimenziye frakcije gline su nešto veće od koloidnih ali se u vodi kao disperznom sredstvu ponašaju kao koloidi.

Kada se frakcija gline nalazi u velikom procentu u mehaničkom sastavu tla (<40%) nositelj je loših vodno – fizičkih, zračnih i topotnih osobina tla. Čestice gline imaju veliku snagu držanje vode, plastična je, ljepljiva, bubri i kontrahuje (skuplja se), stvara pokoricu. Takvo tlo je nepropusno za vodu, u njemu dominiraju sitne mikropore u kojima se nalazi voda nepristupačna biljci, ima mali kapacitet za zrak (malo krupnih pora) i teško se zagrijava u proljeće (hladna tla). Glineni sediment je nepropustan za vodu.

### **Tekstura, Teksturna analiza, Trokut za određivanje teksturne klase i Teksturne oznake**

Odnos zemljisnih frakcija u masi tla izražen u masenim procentima (%<sub>mas</sub>) predstavlja mehanički ili granulometrijski sastav zemljista ili jednom riječju tekstuру. Tekstura predstavlja jedan od najkvalitetnijih i najstabilnijih (teško promjenjivih) pokazatelja unutar fizičkih osobina zemljista. Kada se govori o teksturi, kod farmera su uobičajeno u upotrebi izrazi:

1. teško tlo - fine teksture (glinovito) koje je teško za obraditi ili
2. lako zemljiste - grube teksture (pjeskovito) koje se lako obrađuje.

**Tabela 14. Izrazi u upotrebi kada se govori o teksturi tla [190]**

Izrazi koje koriste farmeri	Izrazi u literaturi	
laka	pjeskovita	gruba, hrapava
srednja	ilovasta	srednja
teška	glinovita	fina

Maseni udio (%<sub>mas</sub>) pojedinih frakcija se ustanavljava teksturnom ili mehaničkom analizom zemljista. Posebno se radi mehanička analiza skeleta a posebno mehanička analiza fine zemlje – sitnice. Ovdje treba naglasiti da se tekstura tla, često pogrešno, izjednačava sa teksturom fine zemlje-sitnice tj. kao procentualni odnos frakcija pijeska, praha i gline u masi fine zemlje - sitnice. Međutim, teksturna oznaka koju dobija neko zemljiste uzima u obzir ukupnu masu zemljista znači zajedno sa frakcijom skeleta.

Zemljista mogu biti bez skeleta ili sa skeletom. Skelet iz uzorka donijetog sa terena se izdvaja još u pripremi uzorka za izvođenje fizičkih i hemijskih

analiza prilikom sušenja, sitnjenja i prosijavanja tla, i čuva se zajedno sa finom zemljom sitnicom. Zemljišta sa preko 50 % skeleta u masi tla dobijaju teksturnu oznaku *skeletna* dok ona zemljišta sa sadržajem skeleta ispod 50% dobijaju teksturnu oznaku *skeletoidna*. Mehaničkom analizom skeleta se mogu po potrebi utvrditi i različite frakcije unutar frakcije skeleta prema nekoj od podjela (npr.: sitni srednji i krupni šljunak, te sitno, srednje i krupno kamenje).

Mehanička analiza fine zemlje-sitnice ima za cilj utvrditi procentualno učešće frakcija pjeska, praha i gline. Nakon izvršene analize, pomoću trokuta za određivanje teksturne klase finoj zemlji - sitnici se određuje teksturna oznaka. Oznaka teksturnih klasa na poligonima unutar trokuta za određivanje teksturne klase ima različitih izvedbi ali u suštini svode se na sljedeći princip (na osnovu sadržaja gline):

- a) teška glina više od 45 % frakcije gline,
- b) glinovita tla sa 25-45% frakcije gline,
- c) ilovasta tla sa 15-25% gline i
- d) pjeskovita tla sa manje od 15% gline

### **Značaj tekture tla**

Od granulometrijskog sastava direktno zavise sva fizička, vodno – fizička, zračna i topotna svojstva zemljišta. Slobodno se može reći da tekstura diktira prirodna svojstva zemljišta koja se teško mijenjaju. Uopšteno gledano, s obzirom na naslijedena prirodna svojstva tla povezana sa teksturom, zbijena glinovita zemljišta (teška zemljišta) i rastresita pjeskovita zemljišta (lakša zemljišta) imaju negativne fizičke osobine dok su najbolja zemljišta u okviru ilovaste tekture. Međutim agregacija elementarnih čestica i sve ono što je poboljšava (humus, minerali gline, prisustvo polivalentnih kationa) može značajno da poboljša negativne fizičke osobine zemljišta naslijedene od mehaničkog sastava zemljišta.

Mehanički sastav utiče i na izbor kulture. Tako korjenjače, raž, duhan i rane povrtlarske kulture bolje uspijevaju na tlima lakšeg mehaničkog sastava, toplijim zemljištima. Negativne fizičke osobine utiču na hidromeliorativne mjere. Tako će norme navodnjavanja i količina mineralnih đubriva na lakšim (propusnim pjeskovitim) zemljištima biti manje i češće zbog velike propusnosti vode i slabih sila zadržavanja vode i hraniva. Kod glinovitih tala će razmak drenažnih cijevi i odvodnih kanala biti manji zbog slabije propusnosti. Teška tla, uslijed svoje slabe propusnosti vode i čestog zadržavanja vode na površini tla spadaju u tzv. minutna tla zbog kratkog intervala optimalnih uslova obrade tla. Čovjek obradom može miješati genetske horizonte ili slojeve kod aluvijalnih zemljišta s ciljem poboljšanja

fizičkih osobina orničkog sloja. Isto tako i pedomelirativna mjera opjeskavanja težih tala ili dodavanja praha (lesa) pijeskovima kvalitetno se odražava na fizičke osobine čiako se ove mjere rijetko primjenjuju kod nas [126].

#### **5.2.1.2.1. Određivanje teksture ili mehaničkog sastava tla**

Određivanje zastupljenosti pojedinih čestica tla prema veličini naziva se teksturna ili mehanička analiza. Najčešće se izvodi na temelju ISO 11277:2020 [196].

Cilj mehaničke analize je da utvrdi procentualnu ( $\%_{tez}$ ) zastupljenost frakcija skeleta, pijeska, praha i gline u uzorku tla. Uobičajeno je da se posebno izvodi mehanička analiza za skelet a posebno mehanička analiza za finu zemlju - sitnicu.

#### **5.2.1.2.2. Mehanička analiza skeleta u tlu**

Skelet izdvojen prilikom sušenja, sitnjenja i prosijavanja uzorka predstavlja frakciju česticu tla većih od 2 mm i dijeli se na čestice šljunka i kamenja. To su najčešće otporniji odlomci stijena ili minerala  $> 2$  mm porijeklom iz matičnog supstrata zadržani na licu mesta ili naneseni sa strane. Nalazimo ga najčešće u mladim, nerazvijenim zemljištima (fluvijalna i koluvijalna tla ili materijalu koji se nanosi bujicom – proluvijum) a manje u razvijenim tlima.

Analizu skeleta je potrebno uraditi prije ostalih analiza da bi se fina zemlja (frakcija gline i praha) koja u vidu opne pokriva čestice šljunka i kamenja vratila u frakciju fine zemlje sitnice.

Donja i gornja granica u veličini pojedinih frakcija skeleta nije kod svakoga ista. Nadalje, ni nazivi za pojedine frakcije skeleta koji su u upotrebi u pedologiji, koja se prvenstveno bavi ekološkim ulogama tla prije svih u proizvodnji biomase, nisu isti sa nazivima frakcija skeleta koja se koriste u mehanički tla, koja se opet izučava u okviru korištenja tla u tehničke svrhe (na pr. ugradnja zemlje u nasipe i brane, tlo kao podloga za građevinske objekte, različiti iskopi i sl.). Prema Gračaninu [54] frakcije skeleta se dijele na:

- čestice kamena:
  - krupne  $> 20$  cm
  - srednje 5-20 cm
  - sitne 2-5 cm
- čestice šljunka :
  - krupne 1- 2 cm

- srednje 0,5- 1 cm
- sitne 0,2-0,5 cm

U mehanici tla se susreću sljedeće podjele i nazivi [104]: blokovi >200 mm; drobina 200-60 mm; šljunak: a) krupan 60-30mm; b) srednji 30-15 mm i c) sitni 15-2 mm. U upotrebi su još kod izgradnje puteva nazivi tucanik, oblutak...

**Cilj:** Analiza skeleta podrazumijeva određivanje procentualnog učešća frakcije skeleta u ukupnom uzorku. Analiza skeleta podrazumijeva i određivanje sadržaja pojedinih frakcija unutar skeleta. Frakciji skeleta pripadaju sve teksturne čestice krupnije od 2 mm, znači:

- šljunak od 2 - 20 mm i
- kamenje > 20 mm.

Već je navedeno u okviru Pripreme uzorka da sadržaj na situ od 2mm nakon sitnjenja i prosijavanja ne predstavlja sami skelet. Iz jednostavnog razloga jer se među skeletom nalaze i grudvice zemlje koje nisu usitnjene u prethodnom sitnjenju uzorka u avanu. To se ne može dobro vidjeti jer su i čestice šljunka i kamenja okružene opnom od finih čestica gline pa i one imaju zemljano boju i izgled. To se najbolje provjeri tako što se grumenje zemlje sa sita uzme između dva prsta i pokuša se zdrobiti, što se nerijetko i događa. Takođe, grumen zemlje za razliku od skeleta ne pravi metalni zvuk kad ga bacimo na površinu laboratorijskog stola nego ima tupi zvuk.

**Postupak [118]:** Ukoliko kuhanje skeleta nije izvršeno u okviru Pripreme uzorka potrebno ga je uraditi naknadno u okviru Mehaničke analize skeleta. Sadržaj na situ od 2 mm nakon prosijavanja prebací se u posudu sa vodom i zagrijava na rešou do ključanja, dok ne ostane čist skelet (oko 45 minuta). Tokom prokuhavanja će se sve grudvice ili grumenje zemlje raspasti a istovremeno se sa površine skeleta ispere opna od gline. Tako na kraju imamo čist skelet i zamućenu vodu tj. suspenziju gline i praha.

Nakon završenog kuhanja izdvoji se prosijavanjem na situ od 2 mm čist skelet i ostavi na sušenje baš kao što se i zamućena voda ostavi na isparavanje. Nakon isparavanja i sušenja, fina frakcija koja je ostala u posudi se vrati u vrećicu i promiješa zajedno sa ostalom finom zemljom-sitnicom, koja je na ovaj način kompletirana i spremna za daljnju analizu.

Poslije toga posebno vagamo osušeni skelet a posebno finu zemlju - sitnicu. Ukupni skelet nakon sušenja, po potrebi, spremán je za analizu sadržaja pojedinih frakcija unutar skeleta.

**Obračun** ukupnog skeleta u uzorku tla se vrši po sljedećoj formuli:

masa skeleta  $m_s$  (g)

masa fine zemlje – sitnice  $m_{fz}$  (g)  
ukupna masa uzorka  $m_u = m_s + m_{fz}$  ....(g)

$$\%_{\text{mas}} \text{ skeleta} = (m_s / m_u) \cdot 100 \dots (\%_{\text{mas}})$$

Prema sadržaju skeleta tla se dijele na *skeletna* sa više od 50 % skeleta, i *skeletoidna* sa manje od 50 % skeleta. Na osnovu sadržaja skeleta prema Gračaninu [54], tla se mogu svrstati u sljedeće grupe:

Skeletna tla:

- apsolutno skeletna sa više od 90 % čestica skeleta
- jako skeletna, 70-90 % čestica skeleta
- skeletna, 50-70 % skeleta

Skeletoidna tla:

- jako skeletoidna, 30-50 % čestica skeleta
- skeletoidna, 10-30 % skeleta
- slabo skeletoidna, manje od 10 % čestica skeleta

Ukoliko je sadržaj skeleta veći od 50 % tada zemljište dobiva teksturnu oznaku skeletno npr. *skeletna ilovača*. Ukoliko je sadržaj skeleta manji od 50 % onda uzorak dobiva teksturnu oznaku skeletoidno npr. *ilovača skeletoidna*.

### ***Procentualno učešće pojedinih frakcija šljunka i kamenja***

Ukoliko su u uzorku nalazi veći sadržaj skeleta, analiza skeleta podrazumijeva i određivanje procentualnog učešća pojedinih frakcija šljunka i kamenja u ukupnom skeletu ili u ukupnom uzorku. To se radi naknadnim prosijavanjem ukupnog skeleta kroz posebni set sita poznatog dijametra koji odgovara frakcijama šljunka i kamenja, najčešće prema prema gore pomenutoj klasifikaciji po Gračaninu [54].

**Obračun** učešća pojedinih frakcija skeleta u ukupnom skeletu se računa preko mase frakcije skeleta u odnosu na masu ukupnog skeleta a može i u odnosu na cijelu masu uzorka.

- masa pojedine frakcije skeleta  $m_{fs}$  (g)
- ukupna masa skeleta  $m_s$  (g)
- ukupna težina uzorka  $m_u$  (g)

$$\% \text{ frakcije skeleta} = (m_{fs} / m_s) \cdot 100 \dots (\%_{\text{mas}}) \text{ ili}$$

$$\% \text{ frakcije skeleta u uzorku} = (m_{fs} / m_u) \cdot 100 \dots (\%_{\text{mas}})$$

### **5.2.1.2.3. Mehanička analiza fine zemlje - sitnice**

Procjenjuje se da postoji oko 400 metoda za određivanje granulometrijskog sastava tla. Najčešće se metoda određivanja granulometrijskog sastava bazira na izdvajanju frakcija postupkom prosijavanja i pipetiranja nakon sedimentacije u mirnoj vodi. Postoje i modernije metode kao što je laserska difrakcijska metoda [14].

Uobičajeno je u našoj pedološkoj praksi da se mehanička ili granulometrijska analiza izvodi uglavnom za B horizont odnosno za pod površinski horizont koji sadrži manje humusa. Ovo se pokazalo praktičnijim zbog uštede novca i vremena, a pogotovo kad se radi sa zemljištima sa manjim sadržajem frakcije gline (pjeskovita tla i prahulje).

Postupak utvrđivanja granulometrijskog sastava tla se sastoji iz četiri dijela:

1. dezagregacije uzorka,
2. izdvajanje frakcija prosijavanjem i na osnovu sedimentacije u mirnoj vodi,
3. obračun zastupljenoisti frakcija krupnog i sitnog pijeska, praha i gline i
4. određivanje teksturne klase ili oznake pomoću trokuta.

#### **5.2.1.2.3.1. Načini pripreme uzorka za izvođenje mehaničke analize**

Dezagregacija tj. priprema uzorka za mehaničku analizu se sastoji iz nekoliko radnji [118]:

1. dezagregacije (disperzija) uzorka mehaničkim tretmanom:
  - trljanjem suhog uzorka u avanu s tučkom,
  - trljanje vlažnog uzorka prstima,
  - ključanjem zemljišne suspenzije i
  - mućkanjem zemljišne suspenzije na mućkalici.
2. peptizacije hemijskim sredstvima,
  - uklanjanja humusa sa vodonik peroksidom ( $H_2O_2$ );
  - sa Na - pirofosfatom  $Na_4P_2O_7 \times 10H_2O$  ili Na - heksa-metafosfatom ( $NaPO_3)_6$ . Peptizacija je proces u kojem se koagulirani koloid vraća u disperzno stanje.  $Na^+$  kao dobar peptizator istiskuje/ zamjenjuje  $Ca^{2+}$  iz adsorptivnog kompleksa tla i vrši disperziju zemljišnih čestica;

- uklanjanja Ca i karbonata tretiranjem uzorka sa 0,2 n HCl. Međutim ovdje se javlja problem ispiranja koloida, gubitka karbonatnih minerala iz raznih frakcija, inaktivacije Na-pirofosfata. Za istiskivanje Ca jona iz adsorptivnog kompleksa koristi se 0,05 HCl kod bezkarbonatnih i 0,1N NH<sub>4</sub>Cl kod karbonatnih zemljišta.

Zavisno od toga koje se pripremne radnje koriste, u našoj pedološkoj praksi razlikuju se:

- Međunarodna A metoda sa spaljivanjem humusa, dekalcizacijom, peptizacijom i mućkanjem na mućkalici,
- Međunarodna B metoda sa peptizacijom u procesu kuhanja suspenzije 2 sata,
- Metoda sa Na – pirofosfatom Na<sub>4</sub>P<sub>4</sub>O<sub>7</sub> x 10H<sub>2</sub>O sa kuhanjem ili mućkanjem.

**Priprema uzorka za mehaničku analizu tj. dezagregacija, prema različitim metodama i autorima:**

- **Međunarodnoj A metodi [158]:**

Postupak:

Najprije se uzorak sitnice tretira sa H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> da bi se spalila organska materija. Višekratno se dodaje do 50 ml 6% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> i miješa se u čaši u vrućoj vodenoj kupelji sve dok ne prestane šumiti pri novom dodavanju vodonik peroksida.

Kada se ohladi dodaje se HCl u tolikoj količini da u konačnom volumenu od 250 ml koncentracija bude otprilike 0,2 n HCl. Dakako da se obračunaju i karbonati koji će se razoriti kiselinom. Tako stoji uz mućkanje 1 sat.

Poslije toga se za pipet metodu ispire tlo kroz filter papir toliko dugo dok ne prestane biti kisela reakcija filtrata. Zatim se ostatak na filteru ispiranjem vodom prenosi preko sita od 0,2 mm u posudu od 1 litre. Na situ ostaje frakcija krupnog pijeska veća od 0,2 mm.

U posudu od 1 litru u kojoj se nalaze frakcije sitnog pijeska, praha i gline se doda 50 ml 10% amonijaka i nadopuni sadržaj do 500 ml i mućka u rotacionoj mućkalici najmanje 24 sata ili u horizontalnoj mućkalici 2 sata. Nakon toga se dopuni do 1 litra i spremno je za pipetiranje.

- **sa Na-pirofosfatom i kuhanjem [118]**

Postupak: Odmjeri se 10 g fine zemlje i prenese u kolbu od 750 ml. Prelije se sa 25 ml 0,4 n Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> x 10 H<sub>2</sub>O (rastvori se 26,6 g anhidriranog ili 44,6

g hidratisanog Na pirofosfata u 1 litri destilovane vode) i prelije sa još 225 ml destilovane vode. Sve se dobro promućka i ostavi preko noći i ukoliko je moguće još koji put promućka. Sutradan se uzorak kuha u trajanju 1 sat pritom koristeći povratno hladilo, vodeći računa da kuhanje ne bude burno. Uzorak se ohladi. Od ovog momenata uzorak je pripremljen.

- **sa Na-pirofosfatom i mućkanjem [88]**

Postupak: Odmjeri se 10 g fine zemlje i prenese u kolbu od 750 ml. Prelije se sa 225 ml destilovane vode i energično promućka a onda se prelije sa još 25 ml 0,4 n  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \times 10 \text{H}_2\text{O}$ . Sve se dobro promućka i u toku sljedeća 3-4 sata svakih 15-20 minuta se ponovo energično promućka. Nakon toga se mućka 1 sat na rotacionoj mućkalici. Od ovog momenata uzorak je pripremljen.

- **Sa Na-pirofosfatom i mućkanjem [158]**

Postupak: Odvaga se 10 g tla u Erlenmajerovojoj kolbi od 300 ml, c prelije se sa 25 ml Na-pirofosfata promućka i ostavi da prenoći. Ujutro se mućka 6 sati na mućkalici.

- **Priprema uzorka prema Međunarodnoj B metodi [158]**

Postupak: 20 grama sitnog tla se prelije sa 200 ml destilirane vode, ostavi 24 sata, a zatim se kuha 2 sata uz dolijevanje isparene vode. Poslije hlađenja se uz dobro trljanje prenosi u cilindar za sedimentaciju preko sita od 0,2 mm. Posuda se dopuni do oznake i uzorak je spremam za pipetiranje.

### **5.2.1.2.3.2. Mehanička analiza po modificiranoj Međunarodnoj B metodi**

Po preporuci profesora Škorića [158] Međunarodna B metoda potpuno zadovoljava primjenu u agropedološke i praktične poljoprivredne svrhe, dok se za naučne svrhe preporučuje metoda sa Na-pirofosfatom što je i prihvaćeno u našoj pedološkoj praksi. Za potrebe brze i jeftinije analize, u praksi se primjenjuje i modificirana Međunarodna B metoda gdje se uzima 10 g uzorka i kuha u vodi a nakon hlađenja se prstima trlja u posudi.

Ovom analizom se prosijavanjem izdvaja frakcija krupnog pijeska, pipetiranjem frakcije praha i gline, dok se procenat sitnog pijeska određuje obračunom.

#### **1. Dezagregacija uzorka**

Odvaga se 10 g sitnice prenese u erlenmajerovu tikvicu od 750ml. Doda se 250 ml destilovane vode. Umjesto mućkanja i stajanja od 3-4 sata, izvrši se kuhanje koje ima približno isti efekat destrukcije agregata i odvajanja

pojedinih čestica jedne od druge. Nakon kuhanja uzorak se prelije u veću porculansku posudu gdje se rashladi dodavanjem destilovane vode a potom prstima trljaju i razbijaju preostali agregati o dno posude. Prste je potrebno svaki put saprati destilovanom vodom.

Nakon ovako izvršene dezagregacije uzorka pristupilo bi se izdvajaju frakcija krupnog pijeska prosijavanjem kroz sito od 0,2 mm i pipetiranjem frakcija praha i gline.

## 2. *Izdvajanje frakcija postupkom prosijavanja i pipetiranja:*

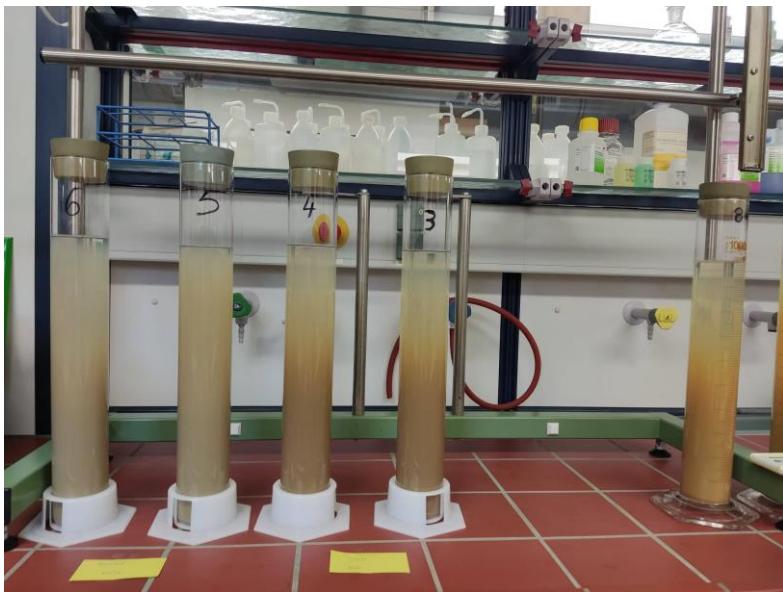
**Prosijavanjem** se izdvaja frakcija krupnog pijeska.

**Izdvajanje frakcije krupnog pijeska prosijavanjem:** Ovako pripremljen uzorak se kvantitativno prenese u cilindar zapremine 1000 ml, preko lijevka i sita promjera rupica 0,2 mm. Čestice krupnog pijeska koje su se zadržale na situ od 0,2 mm isperu se vodom do bistre vode, nakon čega se sito sa lijevkom skida. Frakcija krupnog pijeska zadržana na situ se zatim prenese u porculansku posudu ispiranjem, stavi na uparavanje i suši u električnoj sušnici. Osušen uzorak se vaga i obračunom u odnosu na ukupnu masu uzorka (10 g) određuje procentualna zastupljenost frakcije krupnog pijeska.

**Pipetiranjem** u dva navrata se izdvajaju prvo združena frakcija praha i gline i drugo pipetiranje frakcija gline.

**I. Prvim pipetiranjem se izdvaja združena frakcija praha i gline:** Za izdvajanje ovih združenih frakcija koristi se metoda sedimentacije i pipetiranja. Suspenzija uzorka u staklenom cilindru se dopuni do marke od 1000 ml sa destilovanom vodom. Cilindar se zatim zatvori gumenim čepom, energično mučka rukama u horizontalnom položaju tokom 1 minute i po skidanju gumenog čepa ostavljava stoji na miru na čvrstoj podlozi radi taloženja čestica. Brzina taloženja čestica u mirnoj vodi ( $v$ ) izračunava se pomoću Stoksovog zakona:

$$v = \frac{2r^2(d_1 - d_2)g}{9\eta} \quad \begin{aligned} r & - \text{dijametar čestica tla} \\ d_1 & - \text{prava specifična gustina tla} \\ d_2 & - \text{zapreminska specifična gustina tla} \\ \eta & - \text{viskozitet tečnosti u kojoj se vrši} \\ & \text{sedimentacija} \end{aligned}$$



**Slika 41. proces sedimentacije fine zemlje u menzurama** (foto Tvica M.)

Za vrijeme od 4 min. i 48 sek. pri temperaturi od 20°C, sve čestice sitnog pijeska (krupnije od 0,02 mm) preći će put u cilindru od 10 cm, tako da će se u gornjoj zoni suspenzije naći samo čestice koje pripadaju frakcijama praha i gline. Po isteku 4 minute i 48 sekundi vrši se pipetiranje specijalnom trobušnom pipetom (rupice sa strane) za mehaničku analizu sa dubine od 10 cm. Pipetira se 10 ml suspenzije. Postupak pipetiranja se izvodi vrlo pažljivo, polako i „tiho“. Uvlačenje pipete u suspenziju traje desetak sekundi (do označene crte od 10 cm) počinje nakon 4 min. i 30 sek. U 4min. i 48 sek. počinje pipetiranje i traje 10 sekundi. Suspenzija iz pipete se prenosi u označenu porculansku posudicu za prvo pipetiranje koja je poznate mase. Zatim se posudica sa suspenzijom stavlja na sušenje pri 105°C do konstantne mase, te mjeri masa na preciznoj analitičkoj vagi.

**II. Drugim pipetiranjem se izdvaja frakcija gline.** Cilindar se ponovo zatvara gumenim čepom, mućka rukama u horizontalnom položaju jednu minutu i po skidanju gumenog čepa ostavlja na miru. Ovaj put mirovanje traje 4 sata, za kojih će sve čestice krupnije od 0,002 mm (prah i sitni pijesak) preći put od 5 cm u stubu suspenzije uzorka. Tako će nam u gornjoj zoni suspenzije na dubini do 5 cm ostati samo frakcija gline, tj. čestice manje od 0,002mm. Postupak pipetiranja vršimo ponovo polako i „tiho“. Pipetu uvlačimo u suspenziju desetak sek. do označene dubine od 5cm. Pipetiranje 10 ml suspenzije traje 10 sekundi.

Ovaj put suspenzija u pipeti sadrži samo frakciju gline koju prenosimo u označenu šoljicu drugog pipetiranja koja je poznate mase, stavljamo je na vodenu kupelj i na sušenje do konstantne mase i vagamo.

### 3. *Obračun frakcija:*

#### 1. Krupni pjesak, zadržao se na situ promjera rupica 0,2 mm.

Broj posude krupnog pjeska

Masa prazne posude A (g)

Masa posude sa uzorkom poslije sušenja B (g)

Masa frakcije krupnog pjeska = B – A (g)

Masa krupnog pjeska (B-A)

$$\text{Krupni pjesak (\%)} = \frac{\text{Masa krupnog pjeska (B-A)}}{\text{Masa ukupnog uzorka (10g)}} \cdot 100 (\%)$$

#### 2. Združene frakcije praha i gline nalaze se u suspenziji prvog pipetiranja.

Broj posude prvog pipetiranja

Masa prazne posude prvog pipetiranja A (g).

Masa posude sa združenom frakcijom iz pipete poslije sušenja B (g).

Masa združene frakcije u pipeti od 10 ml ( $m_{fp}$ ) = B – A (g)

Ako u 10 ml suspenzije u pipeti ima  $m_{fp}$  (g), onda u 1000 ml suspenzije (10 g uzorka) ima  $100 \cdot m_{fp}$  (g) ..... što znači:

Masa združene frakcije praha i gline u 10g uzorka (1000 ml suspenzije) ( $M_{fzu}$ ):

$$M_{fzu} = 100 \cdot m_{fp} \text{ .....(g).}$$

Masa združene frakcije u uzorku

$$\text{Združene frakcije praha i gline} = \frac{\text{Masa združene frakcije u uzorku}}{\text{Masa ukupnog uzorka (10g)}} \cdot 100 (\%)$$

#### 3. Koloidna gлина, nalazi se u suspenziji drugog pipetiranja.

Broj posude drugog pipetiranja

Masa prazne posude A (g).

Masa posude sa uzorkom poslije sušenja B (g).

Masa frakcije koloidne gline u pipeti od 10 ml ( $m_{fgp}$ ) = B – A (g) .

Ako u 10 ml suspenzije u pipeti ima  $m_{fgp}$  (g), onda u 1000 ml suspenzije (10 g uzorka) ima  $100 \cdot m_{fgp}$  (g).

Masa frakcije koloidne gline u 10 g uzorka (1000 ml suspenzije) ( $M_{fgu}$ )

$$M_{fgu} = 100 \cdot m_{fgp}$$

$$\text{Koloidna glina (\%)} = \frac{\text{Masa fr. gline u 1000 ml suspenzije (g)}}{\text{Masa ukupnog uzorka (10 g)}} \cdot 100 (\%)$$

**4. Prah** se nalazi u združenoj frakciji koloidne gline i praha, znači u suspenziji prvog pipetiranja zajedno s frakcijom gline. Postotak frakcije praha odredimo tako da od procenta združene frakcije praha i gline oduzmemmo procenat frakcije gline (drugo pipetiranje).

$$\text{Prah (\%)} = \text{Združene frakcije praha i gline (\%)} - \text{Frakcija gline (\%)}$$

**5. Sitni pjesak**, dobije se tako što sumu postotaka ostale tri frakcije oduzmemmo od 100%.

$$\text{Sitni pjesak} = 100 - (\% \text{ krupnog pjeska} + \% \text{ gline} + \% \text{ praha})$$

**6. Ukupni pjesak**, dobije se sabiranjem procentnog sadržaja krupnog i sitnog pjeska.

$$\text{Ukupni pjesak} = \text{Krupni pjesak (\%)} + \text{Sitni pjesak (\%)}$$

**Rezime:** kraju obračuna dobije se procentualna zastupljenost (maseni udio) pojedinih frakcija u ispitivanom tlu:

- a. Frakcija gline %
- b. Frakcija praha %
- c. Frakcija pjeska %

Na osnovu sadržaja pojedinih frakcija što se ustanovljava mehaničkom analizom tla, sitnici se pomoću trokuta za određivanje teksturne klase dodjeljuje teksturna oznaka.

#### **5.2.1.2.3.3. Specifičnosti norme ISO 11277 u odnosu na tradicionalnu Pipet B metodu [120]**

Vidimo da se metode teksturne analize ustaljene u našoj pedološkoj praksi uglavnom razlikuju u postupku pripreme uzorka. Međutim, kada poređimo tradicionalne metode koje se vrše u našim pedološkim laboratorijama sa ISO 11277 metodom – (engl. Determination of particle size distribution in

mineral soil material - Method by sieving and sedimentation (Određivanje distribucije čestica tla po veličini u mineralnim tlima – Metod prosijavanja i sedimentacije) svi postupci u određivanju granulometrijskog sastava od pripreme uzorka, izdvajanja pojedinih frakcija prosijavanjem i pipetiranjem pa do obračuna se razlikuju.

### **1. Dezagregacija (Priprema) uzorka**

Priprema uzorka podrazumijeva mokro spaljivanje (oksidaciju) organske materije tla sa  $H_2O_2$ , zatim peptizaciju sa rastvorom Na-heksametafosfata i Na karbonata, te mućkanje.

**Postupak:** Odvaga se 10 g (ako je glinovito tlo) ili 30 g (ako je pjeskovito tlo) fine zemlje - sitnice u čašu od 650 ml (najčešće se uzima 15 g sitnice tla). Uzorak se prelije sa 30 ml vode i 30 ml 30% vodikovog peroksida radi oksidacije organske materije tla.\*

Poslije oksidacije uzorak se prebaci u Erlenmayerovu tikvicu i prelije sa 25 ml disperznog sredstva (rastvor Na-heksametafosfata i Na karbonata) i mućka u saltacijskoj (rotacionoj) mućkalici 18 sati. Ovim je priprema uzorka završena.

### **2. Izdvajanje frakcija**

**Prosijavanje:** Nakon mućkanja suspenzija se prebaci kroz dva sita dimenzija rupica 200  $\mu\text{m}$  i 63  $\mu\text{m}$  u sedimentacijski cilindar od 500 ml. Na ovaj način se na sitima izdvoje frakcije **krupnog i sitnog pjeska**, koje se prenesu u posudicu poznate mase, zatim nose u sušionik na sušenje na 105°C i poslije na vaganje.

**Pipetiranje:** Sadržaj sedimentacijskog cilindra mućka se u horizontalnom položaju dvije minute radi homogenizacije suspenzije. Sedimentacijski cilindar postavi se horizontalno u bazen s konstantnom temperaturom, tako da je spreman za pipetiranje. Temperatura bazena je značajna jer od nje ovisi trajanje vremena potrebnog za sedimentaciju pojedinih frakcija odnosno vrijeme pipetiranja. Što je temperatura u bazenu veća to će i sedimentacija biti brža a tako i vrijeme pipetiranja.

Pipetiraju se tri frakcije: **krupni prah, sitni prah i glina**:

- i. I pipetiranje:  $f_1$  - krupni prah (63 -20  $\mu\text{m}$ ); zavisno od temperature bazena u intervalu 44 – 56 sekundi (s) nakon mućkanja
- ii. II pipetiranje:  $f_2$  - sitni prah (20-2  $\mu\text{m}$ ) u intervalu 3 min i 41 s – 4 min i 38 s, nakon mućkanja
- iii. III pipetiranje:  $f_3$  - glina (< 2  $\mu\text{m}$ ) u intervalu 6 h, 9 min i 45 s – 7 h, 44 min i 16 s, nakon mućkanja

Sadržaj iz pipete prenosi se u prethodno izvaganu i označenu porculansku posudicu, koji se potom suši do konstantne mase u susioniku na 105°C.

### 3. *Obračun:*

**Obračun mase frakcija krupnog i sitnog pijeska izdvojenih na situ** određuje se iz razlike u masi prazne posudice i posudice sa izdvojenom frakcijom.

**Obračun mase frakcija krupnog i sitnog praha i gline izdvojenih pipetiranjem** izračunava se na osnovu odnosa količine suspenzije u cilindru i količine suspenzije u pipeti.

Masa pojedine frakcije u cilindru se obračunava:

$$m_{f1c} = (m_{s1p} - m_{dp}) \cdot (500/V_p)$$

$$m_{f2c} = (m_{s2p} - m_{dp}) \cdot (500/V_p)$$

$$m_{f3c} = (m_{s3p} - m_{dp}) \cdot (500/V_p)$$

**Korekcija:** Pri obračunu, da bi se dobila masa određene teksturne frakcije ( $m_{fxc}$ ) mora se sprovesti korekcija tako da se od mase solidifikata oduzme masa disperznog sredstva u pipeti:

$$m_{fxc} = (m_{sxp} - m_{dp}) \cdot (500/V_p) \dots \text{gdje je:}$$

$m_{fxc}$  – sveukupna masa neke frakcije ( $f_1, f_2$  i  $f_3$ ) u cilindru od 500 ml (g)

$m_{sxp}$  – masa solidifikata (teksturna frakcija + dispergent) u pipeti (g)

$m_{dp}$  – masa disperznog sredstva u pipeti – uzima se da je kod svakog pipetiranja ista (g)

$V_p$  – volumen pipete

Ova metoda uzima za polazište da je masa uzorka ( $m_t$ ) suma izmjerениh masa pojedinih frakcija ( $m_{fx}$ ), a ne početna masa fine zemlje - sitnice s kojom se ušlo u analizu.

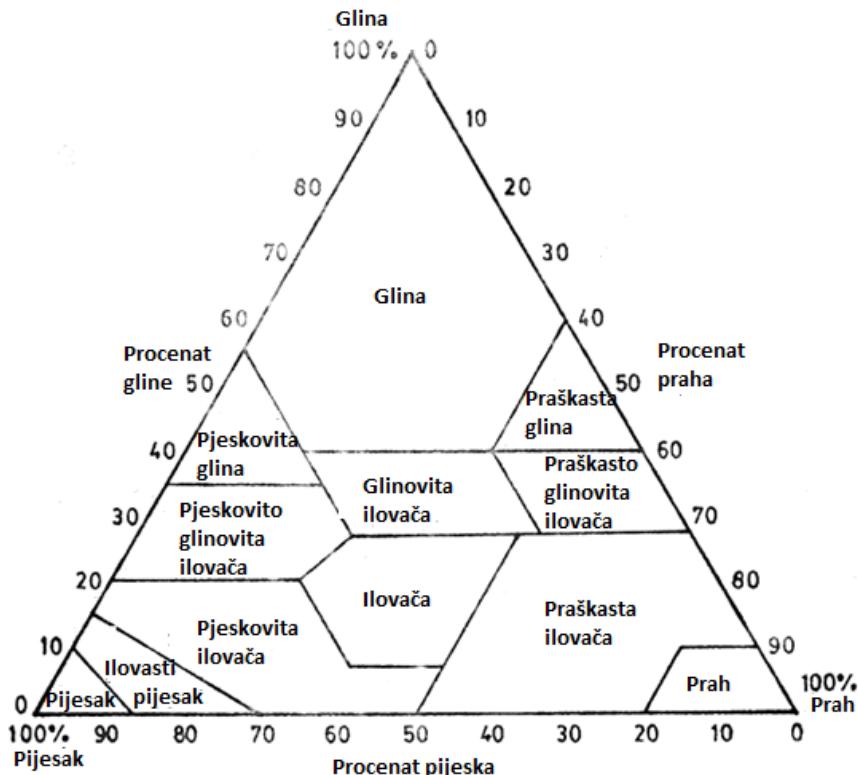
Tako dobivena masa uzorka osnova je za iskazivanje udjela pojedinih teksturnih frakcija ( $P_x$ ) u sitnici tla. Uobičajeno se izražava u procentima:

$$P_x = (m_{fx} / m_t) \cdot 100 \dots (\%)$$

#### 5.2.1.2.3.4. *Trokul za određivanje teksturne klase fine zemlje - sitnice*

Nakon završene mehaničke analize tla i nakon što smo utvrdili mehanički sastav fine zemlje-sitnice, pomoću trokuta za određivanje teksturne klase na osnovu procentualne zastupljenosti (maseni udio) frakcija gline, praha i pijeska određujemo teksturnu klasu fine zemlje sitnice u koju spada ispitivano tlo. U praksi se određivanje teksturne klase fine zemlje vrši pomoću trokuta.

**Postupak:** Stranice jednakostaničnog trokuta su izdijeljene i označene tako da predstavljaju procentualnu zastupljenost pojedinih frakcija fine zemlje. Tako imamo lijevu stranicu trokuta koja predstavlja % zastupljenosti frakcije gline (% vrijednosti raste odozgo prema gore), desnu stranicu koja predstavlja % frakcije praha (% raste odozgo prema dole) i donju stranicu trokuta koja predstavlja % frakcije ukupnog pjeska (zbroj frakcija krupnog i sitnog pjeska gdje vrijednost % raste s desna u lijevo). Procentualnu zastupljenosti pojedinih frakcija dobivene mehaničkom analizom, unesemo na stranice trokuta. Nakon toga povlačimo linije iz tih tačaka paralelno sa prethodnom stranicom. Na pr. iz tačke % frakcije gline označenoj na lijevoj strani trokuta paralelno sa donjom stranom trokuta povućemo liniju; iz tačke % praha povlačimo liniju paralelno sa stranom gline... Na kraju ovog postupka tačka na površini trokuta gdje se sijeku ove linije nalazi se u okviru označenog poligona. Oznaka na poligonu gdje se nalazi tačka sjecišta predstavlja teksturnu klasu ispitivanog tla.



Slika 42, FAO trokut za određivanje teksture tla (teksturne oznake)  
(Izvor: [189])

Teksturna analiza tla je dosta dugotrajan proces i dosta zavisi od korištenog pribora i iskustva laboranta. Vidimo da i razlike u pripremi uzorka i samim metodama, kao i vrsta korištenog trokuta mogu da utiču na konačnu teksturnu oznaku. Nadalje, mehanička analiza uglavnom se radi za B horizont (zbog manjeg sadržaja humusa u odnosu na površinski Ah hor.) a može i po svim horizontima ili slojevima (različitim dubinama). Tako se trebaju i predstavljati rezultati analize, znači po horizontima. Međutim, često se u literaturi izvršena mehanička analiza uzorka iz jednog horizonta, najčešće iz B horizonta, koristi kao teksturna oznaka za cijelo istraživano tlo.

Primjer rezultata mehaničkih analiza odnosno zastupljenosti pojedinih frakcija za naše vrlo zastupljene tipove zemljišta različite teksture dat je u sljedećoj tabeli. Rezultati su dati po dubinama. Za frakciju pjeska urađena je nešto detaljnija analiza (krupni, srednji i sitni pjesak).

**Tabela 15. Mehanički ili granulometrijski sastav** po dubinama za Distrično smeđe tlo na Nišićkoj visoravni – pjeskovita ilovača; Pseudoglej Sprečko polje – praškasta ilovača i Crvenica (Terra Rosa) Dubravska visoravan – glinovito tlo (izvor: [171])

Lokalitet/ Način korištenja	Dubina (cm)	<i>Frakcije pjeska (mm)</i>			Pjesak ukupni (%)	Prah 0,02- 0,002 (%)	Gлина 0,002 > (%)
		<i>krupni i 2-0,2 (%)</i>	<i>srednji 0,2- 0,063 (%)</i>	<i>sitni 0,063- 0,02 (%)</i>			
Smeđe tlo Nišići	0-10	3.2	51.5	12.5	<b>67.2</b>	14.8	18.0
	10-23	2.6	50.6	13.7	<b>66.9</b>	16.7	16.4
	23-60	2.6			<b>64.7</b>	14.9	20.4
	60-90	3.4			<b>65.4</b>	16.2	18.4
Pjeskovita ilovača	0-15	3.0	5.4	21.3	29.7	<b>49.5</b>	20.8
	15-30	2.2	5.5	22.4	30.1	<b>48.7</b>	21.2
	30-50	1.7	4.6	22.2	28.4	<b>46.8</b>	24.8
	50-100	0.9	0	17.9	18.8	<b>40.8</b>	40.4
Crvenica Dubravska visoravan Glinovita	0-10	0.2	13.8	17.0	31.0	37.4	31.6
	10-20	0.2	14.6	18.7	33.5	27.3	<b>39.2</b>
	20-40	0.3	12.4	18.9	31.6	22.4	<b>46.0</b>
	40-78				23.6	20.0	<b>56.4</b>

#### **5.2.1.2.4. Ostale metode određivanja teksturnog sastava**

**Coulterov brojač:** Pojedinačne čestice tla mogu se i prebrojati, i to u suspenziji tla mjerjenjem promjene električnog otpora (ili vodljivosti) dok čestice prolaze kroz jedan mali otvor. U tako konstruisanom brojaču, svaka pojedinačna čestica prilikom prolaska kroz otvor istovremeno istiskuje volumen rastvora koji je proporcionalan signalu. Dakle, broje se čestice koje prođu kroz otvor i mjeri se volumen istisnute tečnosti (za određivanje veličine čestica ili ekvivalentnog polumjera kugle istog volumena) [76]. Raspon promjera obično je između 0,4 i 1600  $\mu\text{m}$  a komercijalni uređaj naziva se Coulterov brojač [185]:

**Raspršavanje svjetlosti:** Kada svjetlost prolazi kroz suspenziju, pored apsorpcije svjetlost se može raspršiti u različitim smjerovima. Ponašanje raspršenog svjetla pruža alternativni način za određivanje distribucije čestica po veličini (teksture). Komercijalni uređaji mogu pri određivanju teksture analizirati ugao raspršene svjetlosti ili se bazirati na dinamičkim mjerenjima fluktuacije raspršene svjetlosti [23].

#### **Ostale metode:**

Postoje razne varijacije frakcionisanja uzorka tla taloženjem pod uticajem gravitacije u vodi. Tako se taloženje može ubrzati upotrebom centrifuge [156].

Taloženje se može odvijati i u zraku, što se naziva elutriacija zraka [84]. Jednačina taloženja za elutriaciju zraka je ista kao što je i ona prethodno razvijena za vodu, osim što se brzina odnosi na čestice u zraku koje lebde prema gore, a viskozitet se odnosi na viskozitet zraka.

Do potpunog izbjegavanja frakcionisanja na principu taloženja može doći korištenjem mikroskopskih metoda za brojanje i sortiranje čestica. Analiza slike u kombinaciji s mikroskopskim metodama može odrediti oblik čestice ili parametre njene geometrije.

Laserska difrakcija je također korištена za dobivanje teksture.

Razvijene su i akustičke metode [60], koje također imaju mogućnost određivanja svojstava električnog naboja čestica tla.

#### **5.2.1.3. Specifična površina čestica tla**

Aktivna površina individualnih čestica tla važan je faktor u adsorpciji hranjivih materija ili pesticida, upijanju vode, čvrstoći tla i svojstvima vezanim za tehničke funkcije tla. Ukupnu površinu čestica tla određene mase ili zapremine čine površine primarnih mineralnih čestica, prevlake od

amorfnih minerala i organska materija. Ovi pojedinačni doprinosi mogu se preklapati i poništavati. Nadalje, površina nekih ekspandirajućih minerala gline može se mijenjati s sadržajem vode i hemijskim sastavom rastvora tla [147].

Površina zemljišnih čestica ovisi o tome koliko je zemljišta prisutno. Zato je izvršeno uvođenje pojma specifične površine, koja je ili površina čestica tla po masi (Sm) ili po volumenu (Sv). Specifična površina po volumenu mijenjat će se sa zbijanjem tla.

**Tabela 16. Specifične površine minerala gline, različitih komponenti u tlu i samih tala kompiliranih iz različitih izvora [147].**

Konstituenti tla i zemljišta	Specifična površina ( $\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$ )
kaolinit	15 - 20
ilit	80 - 100
bentonit	115 - 260
montmorionit	280 - 500
organska materija	560 - 800
kalcit	0,047
kristalni Fe oksid	116 - 184
amorfni Fe oksid	305 - 412
alofan i imogolit	700 - 1500
pjeskovito tlo	<10
pjeskovita ilovača i praškasta ilovača	5 - 20
glinovita ilovača	15-40
glinovito tlo	>20

Vidimo iz gornje tabele da amorfni materijali i organska materija tla (OMT) imaju najveći uticaj na vrijednosti specifične površine čestica tla. Zabilježeno je da organska materija ima specifičnu površinu od čak  $1000 \text{ m}^2 / \text{g}$ . Ukupne vrijednosti specifične površine čestica tla umjerene zone značajno zavise od teksture te količine organske materije tla i amorfnih minerala.

**Određivanje specifične površine čestica** zasniva se na direktnom mjerenu adsorpcije ili plina (obično  $\text{N}_2$  ili Ar pod visokim naponom) ili tekućine (etilen glikol monoetil etera [EGME] ili vode) [119] na aktivnu površinu čestica tla pri čemu se taloži ili monomolekularni ili multimolekularni film ili se odredi izoterma adsorpcije plina. Kritična tačka u korištenju svih ovih postupaka je tumačenje načina na koji se dobiva multi- ili monomolekularni sloj. Takođe, može se očekivati da će adsorbirajuće molekule manjih

dimenzija zauzeti veće površine ispunjujući i pokrivajući mikroudubljenja te tako pokazivati veće vrijednosti specifične površine nego je slučaj sa većim molekulama. Razlike u specifičnoj površini (pri korištenju adsorbirajućih molekula različitih veličina) posebno su uočljive kada tla sadrže eksplandirajuće minerale gline.

Još jedna direktna metoda za određivanje specifičnih površinskih ispitivanja je fotomikrografija primarnih čestica.

U upotrebi su i geometrijski modeli koji pokazuju kako veličina čestica utiče na površinu. Ovi modeli stavljuju u odnos veličinu čestica sa specifičnom površinom čestica. Vrijednost specifične površine recipročna je karakterističnim dimenzijama čestica, što znači, što su čestice tla manje to imaju veću specifičnu površinu. Faktori oblika čestica tla također utiču na njihovu specifičnu površinu [147].

#### 5.2.1.4. Specifična gustina primarnih čestica tla

Specifična gustina zemljишnih čestica je jedna od temeljnih fizičkih veličina za određivanje fizičkih osobina zemljишta. Svaka individualna mineralna i organska čestica čvrste faze ima svoju specifičnu gustinu. Specifična gustina primarnih čestica tla predstavlja ujedno i Specifičnu gustinu čvrste faze, a u našoj pedološkoj literaturi često se označava kao Prava specifična gustina. Prava specifična gustina predstavlja masu ( $m$ ) čvrstih čestica u jedinici volumena ( $V$ ) čvrste faze. Koristi se i za izračun poroziteta i hidropedološka računanja.

Specifična gustina neke materije, prema definiciji koja se koristi u fizici, predstavlja broj koji kaže koliko je puta masa neke materije određene zapremine veća od mase iste zapremine vode pri temperaturi od 4°C (specifična gustina vode na 4°C = 1g/cm<sup>3</sup> ili 1t/m<sup>3</sup>). U ovom slučaju specifičnu gustinu predstavlja bezdimenzionalan broj.

Specifična gustina čvrste faze  $\rho_s$  ili  $P_{sg}$  (engl. *specific gravity of solid particles*) predstavlja odnos mase čvrste faze ( $m_{cf}$ ) i njegove zapremine ( $V_{cf}$ ) i izražava se u g/cm<sup>3</sup>, ili t/m<sup>3</sup>.

$$\rho_s \text{ ili } P_{sg} = \frac{m_{cf} \text{ (g)}}{V_{cf} \text{ (cm}^3\text{)}} \text{ (g/cm}^3\text{ ili t/m}^3\text{)}$$

U upotrebi je često i izraz **specifična težina čvrste faze ( $\gamma$ )** koja se izražava u N/m<sup>3</sup>. Specifična težina predstavlja težinu materijala po jedinici zapremine, a dobija se kao umnožak specifične gustine sa gravitacijom:

$\gamma = \rho \cdot g$  .... gdje je:

$\gamma$  - specifična težina materijala (jedinica: N/m<sup>3</sup>)

$\rho$  - gustina materije (jedinica: kg/m<sup>3</sup>)

$g$  - gravitaciono ubrzanje - 9,80665 m/s<sup>2</sup>

Pošto je čvrsta faza sastavljena od mineralnog dijela i organskog dijela to će i vrijednosti prave specifične gustine  $P_{sg}$  zavisiti od njihovog odnosa i zastupljenosti u tlu. Što je veći udio organske materije kao lakše od mineralne faze, to će i vrijednosti specifične gustine biti manje. Pored toga na vrijednosti  $P_{sg}$  utiče i prisustvo teških metala (Fe i Pb) u hemijskom sastavu minerala.

Ukoliko je manje organske materije u zemljištu to će i vrijednosti prave specifične gustine  $P_{sg}$  biti u okviru vrijednosti specifične gustine dominantnih zemljišnih minerala (kvarc i minerali gline), a ona iznosi od 2,5 - 2,8 g/cm<sup>3</sup>. Kao što smo naveli, više organske materije u tlu znači i manju pravu specifičnu gustinu jer je humus lakši od zemljišnih minerala. Tako vrijednosti prave specifične gustine organske materije iznosi oko 1,0 g/cm<sup>3</sup>. Kod tresetnih zemljišta sa više od 75% organskog dijela specifična gustina čvrste faze iznosi 1,2-1,4 g/cm<sup>3</sup>.

Nadalje, sadržaj mineralnih vrsta u čiji hemijski sastav ulaze teži elementi znači i veću pravu specifičnu gustinu. Tako veće prisustvo gvožđa ili olova u hemijskom sastavu minerala odnosno generalno veća zastupljenost primarnih minerala (okсида Fe) znači i veću pravu specifičnu težinu zemljišta. Na pr. specifična težina hematita  $Fe_2O_3 = 4,8-5,3$  g/cm<sup>3</sup>.

***Određivanje specifične gustine primarnih čestica tla*** može biti za pojedinačne minerale, za različite frakcije po veličini ili za tlo u cjelini. Za određivanje specifične gustine samo za mineralnu fazu potrebno je ukloniti organsku materiju. Veliki dio standardnih metoda uklanja organsku materiju i u tom slučaju specifična gustina čestica odražava samo mineralnu fazu. Međutim, to možda nije najbolja vrijednost za kasniji izračun poroznosti tla. Uključivanje organske materije znači da promjene u upravljanju tlom mogu promijeniti ovu specifičnu gustinu čestica.

Kod nas i u svijetu se najčešće određuje specifična gustina čvrste faze znači zajedno sa organskom materijom (ISO 11508:2004).

Već iz same formule za obračun Specifične gustine čvrste faze ili Prave specifične gustine ( $P_{sg}$ ) vidimo da je pored mase čvrste faze ( $m_{cf}$ ), koju određujemo vaganjem suhog zemljišta, potrebno odrediti i volumen čvrste faze ( $V_{cf}$ ). Pošto su pore integralni dio zapremine zemljišta određivanje

zapremine samo čvrste faze ( $V_{cf}$ ) predstavlja svojevrstan problem koji za sobom uvijek veže i grešku u određivanju vrijednosti  $P_{sg}$ .

Zapremina čvrste faze se tradicionalno u našoj pedološkoj praksi određuje metodom piknometra sa tečnošću.

#### **5.2.1.4.1. *Određivanje Specifične gustine primarnih čestica tla (čvrste faze) metodom piknometra sa tečnošću (Albert-Bogsova metoda)***

Piknometar je svaki uređaj koji održava ponovljiv ili mjerljiv volumen. Odvagani uzorak suhog tla ( $m_{cf}$ ) se unosi u piknometar ispunjen nekim fluidom i nakon toga se određuje volumen istisnutog fluida ( $V_{cf}$ ). Kao istisnuti fluid često se koristi voda ali to može biti i neka manje reaktivna tekućina (ksilol ili kerozin) ili zrak.

**Princip:** Određivanje zapremine čvrste faze tla metodom piknometra na bazi tečnosti je zasnovano na sljedećem principu. Ako u piknometar - posudu poznate zapremine (50 ml), pustimo da utiče voda ili neka manje reaktivna tekućina (ksilol ili kerozin) iz birete zapremine takođe od 50 ml, logično je da će tekućina ispuniti piknometar do oznake od 50 ml i da u bireti neće preostati ništa tekućine. Međutim ukoliko u piknometar (posudu) ubacimo zemljište poznate mase ono će zauzeti određeni prostor od tih 50 ml, tako da kada ponovo tekućinom iz birete ispunimo piknometar do oznake od 50 ml, neće isteći sva tečnost nego će u bireti ostati zapremina tekućine koja odgovara zapremini zemljišta u piknometru.

Izvođenje ove analize zahtjeva iskustvo i strpljivost potrebnu da tekućina iz birete istisne sav zrak iz pora i zauzme sav prostor u porama tla.

Metoda vodenog piknometra uopšte, zahtijeva uklanjanje organske materije tla prije upotrebe. To smanjuje probleme sa zarobljenim zrakom i smanjuje varijabilnost rezultata. Metoda vodenog piknometra takođe zahtijeva dobru kontrolu temperature.

**Postupak** [125]: U našoj pedološkoj praksi se kao fluid najčešće koristi neka manje reaktivna tekućina kao što su ksilol ili kerozin. Odvagamo 10 ili 20 g vazdušno suhe sitnice tla ( $m_{cf}$ ), zavisno koristimo li piknometar zapremine 50 ili 100 ml. Odvagani uzorak od 10 g stavimo u piknometar zapremine 50 ml. Iz birete koja je napunjena do oznake  $50 \text{ cm}^3$ , pušta se polako kerozin (ne reaguje sa tlom) u piknometar sve dok se piknometar ne napuni kerozinom do crte tj. granice od  $50 \text{ cm}^3$ . Preostala količina kerozina koja se očita u bireti ( $\text{cm}^3$ ) predstavlja u stvari (zauzetu) zapreminu tla u piknometru.

Prilikom sipanja kerozina piknometar treba nekoliko puta promućati ne dižući ga sa podloge da bi se istisnula gasovita faza i sve pore ispunile kerozinom. Pojava mjehurića koji se kreću prema površini i nalaze se na površini tečnosti u piknometru pokazatelj je da u je u rastresitom zemljištu zarobljeno još zraka u porama.

### Obračun:

$$P_{sg} = \frac{m_{cf} (g)}{\text{Zapremina preostalog kerozina (cm}^3\text{)}} \dots\dots \text{g/cm}^3$$

U oraničnim zemljištima vrijednosti  $P_{sg}$  se kreću od  $2,4 - 2,9 \text{ g/cm}^3$ , dok su prosječne vrijednosti u mineralnim tlima od  $2,65 - 2,75 \text{ g/cm}^3$ .

**Metoda piknometra sa tečnošću** (u skladu sa procesom harmonizacije Standardne Operativne Procedure SOP – GLOSOLANA (Global Soil Partnership pod okriljem FAO) sa referencom prema International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA) [42.a])

U nastavku predstavit će se određivanje - Prave specifične gustine ( $P_{sg}$ ), po prijedlogu Standardne operativne procedure (SOP) Glosolana za određivanje specifične gustine čestica tla (čvrste faze tla) metodom piknometra sa tečnošću. Kako je u toku harmonizacija SOP za poznate metode ova procedura ima formu samo prijedloga od strane GLOSOLANA, međunarodnog udruženja za suradnju u oblasti analize tla koja radi pod okriljem FAO, organizacije koje je član i Laboratorija za PIM (Pedologiju, ishranu biljaka i melioracije u okviru Poljoprivredno-prehrabrenog fakulteta UNSA).

**Oprema:** 1. Piknometar od 100 ml, 2. Destilirana voda, 3. Pećnica za sušenje, 4. Termometar, 5. Vaga, 6. Eksikator, (7. Rešo).

**Priprema uzorka:** Osušiti oko 50g vazdušno suhog prosijanog (2mm) uzorka tla u pećnici na  $105^\circ\text{C}$  u trajanju 24 sata do stalne mase (koristi se 20 g uzorka) – (u staklenim posudicama koje poslije ohladite u eksikatoru)

### Prijedlog procedure :

- 1 Izvagati u pećnici osušeni prazni piknometar s poklopcem ( $w_0$ ),
- 2 Staviti 20 g uzorka u čist i osušen piknometar,
- 3 Izvagati piknometar sa uzorkom i sa zatvorenim poklopcem ( $w_1$ ),

- 4 Dodati vodu do 3/4 visine piknometra i pričekajte da se uzorak tla polako zasiti vodom i zarobljeni zrak izade (ovo je važno da u uzorku ne ostane zarobljenog zraka),
- Napomena: originalna metoda [42.a] ovdje podrazumijeva i sljedeće radnje:
 

Ukloniti zarobljeni zrak laganim ključanjem vode na vrućoj ploči; uz često lagano mučkanje sadržaja kako bi se spriječilo gubitak zemlje pjenušanjem (kuhati nekoliko minuta dok se ne budu vidjeli mjeđuhraci zraka).
  - Ohladiti piknometar i njegov sadržaj na sobnu temperaturu u vakuumskom eksikatoru.
- 5 Zatim dodajte još vode u piknometar do oznake, izvagati piknometar s poklopcom sa uzorkom i vodom ( $w_2$ ),
- 6 Isprazniti piknometar,
- 7 Osušiti u pećnici i ohladiti u eksikatoru i napunite samo vodom i izvagajte ponovo ( $w_3$ ),
- 8 Izmjeriti temperature u laboratoriji. Radi smanjivanja moguće greške potrebno je temperaturu laboratorije održavati na  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- 9 Izmjeriti temperaturu destilovane vode ( $t$ ) koja se koristi za određivanje  $S_{gp}$

Obračun: Zapremina čvrste faze jednaka je:

$$\frac{gustina\ vode\ pri\ temperaturi\ t\ * (w_1 - w_0)}{[(w_1 - w_0) - (w_2 - w_3)]}$$

**Tabela 17. Gustina vode pri različitim temperaturama,**

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Gustoća ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
30	995,650
25	997,048
22	997,774
20	998,207
15	999,103
10	999,703

Kontrola kvaliteta podrazumijeva: 1.Kontrolni karton kvalitete; 2. ponoviti test; 3. Status kalibracije i 4. Test stručnosti.

#### **5.2.1.4.2. Određivanje Specifične gustine čvrste faze zračnim piknometrom [182]**

Po sličnom principu kao u prethodnoj metodi za određivanje zapremine čvrste faze zemljišta (Včf) koristi se i zračni piknometar. Mi ćemo ovdje objasniti princip i postupak rada Vakuum zračnog piknometra po Langeru proizvođača Eijkenkamp. Prednost ovog zračnog piknometra što može precizno da odredi zapreminu različitih tvari u rastresitom stanju.

**Upozorenje:** S velikom pažnjom treba puniti zračni piknometar živom; živin fluid nije tako opasan ali živina para ipak je ekstremno otrovna. Spriječiti isparavanja žive sipanjem 0,5 – 1 cm vode na živu u posudici za izravnjanje (3), isto tako i u staklenoj cijevi sa rezervoарom (6).

##### **Princip:**

Određivanje zapremine čvrste faze tla (Včf) se zasniva na sljedećem principu. Predmet kojem se mjeri zapremina stavlja se pod vakuum zvono. Pomoću živinog stupa se u zvonu stvara podpritisak (vakuum). U zavisnosti od zapremine gasa u zvonu, više ili manje vazduha će se isisati. Volumen vazduha zavisi od zapremine objekta u zvonu koji se meri. Stub žive u staklenoj cijevi će opadati, zajedno sa spuštanjem posude za nивелиranje, do određene razine kad će se zaustaviti i pokazat će traženi volumen objekta na kalibriranoj skali do oznake gdje se zadržala preostala živa ( $\text{cm}^3$ ).

Volumeni između 0 i  $115 \text{ cm}^3$  mogu se očitati direktno sa skale. Podjelom izvagane mase objekta pod zvonom (g) s ovom zapreminom objekta ( $\text{cm}^3$ ), dobije se specifična gustina čvrste faze u  $\text{g/cm}^3$  ( $1\text{g}/\text{cm}^3$  iznosi  $1000 \text{ kg/m}^3$ ).

**Postupak** se sastoји из dva dijela: kalibracije ili podešavanje zračnog piknometra i mjerjenja.

**Kalibracija:** Ispod metalnog vakuumskog zvona (13) stavimo kalibracioni valjak (14) poznate zapremine  $60 \text{ cm}^3$ . Kada je cijeli sistem zračnog piknometra zatvoren, zrak ispod vakuumskog zvona je povezan crijevom sa graduisanom staklenom cijevi koja je ispunjena živom (Hg) do oznake od  $100 \text{ cm}^3$ , i dalje, takođe sa sistemom cijevi (10), sa prelivnom posudom (9) i niveliрајуćom plastičnom posudom za živu (praznom) (3) koji se nalazi u gornjem položaju na kliznoj konzoli.

Kada pri poziciji 1 ventila za zrak (11), spustimo niveliрајуću praznu plastičnu posudu za živu na kliznoj šipci/ konzoli (2) iz gornjeg položaja (4) na donji položaj (1) sav zrak iz vakuumskog zvona se usisa a preko sistema cijevi potiskuje živu koja ispunjava graduisanu staklenu cijev od  $100 \text{ cm}^3$  tako da nivo žive padne i stabilizira se na oznaci  $60 \text{ cm}^3$  (zapremina valjka).

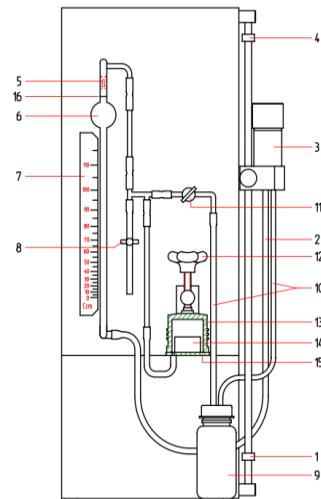


**Slika 43. Zračni piknometar proizvođača Eijkelkamp** (foto Tvica M.)

Istovremeno dok spuštamo praznu niveliраjuću plastičnu posudu na konzoli iz gornjeg u donji položaj, potisnuta živa iz staklene cijevi – manometra počinje da ispunjava niveliраjuću posudu. To znači da je zrak ispod vakuumskog zvona potisnuo živu koja je ispunjavala graduisanu staklenu cijev od gornje oznake od  $100 \text{ cm}^3$  do oznake  $60 \text{ cm}^3$  što odgovara zapremini valjka.

**Slika 44. Shema zračnog piknometra**  
[182]

1. Donji prsten za podešavanje
2. Nivelirna šipka (konzola)
3. Klizajuća posuda za niveliiranje
4. Gornji prsten za podešavanje
5. Nepovratni ventil
6. Cijev manometra
7. Skala
8. Cijev + stezaljka za cijev
9. Prelivna posuda
10. Prelivna cijev
11. Slavina/ventil za ispuštanje vazduha
12. Vijak za stezanje vakuum zvona



13. Vakuumsko zvono
14. Blok za kalibraciju
15. Mjerna ploča/tacna
16. Crvena oznaka

### ***Podešavanje zračnog piknometra tokom kalibracije prije puštanja u rad***

- Uvijek polako spuštati posudu za niveliiranje (3) tokom kalibracije kao i tokom mjerjenja. Ovo će spriječiti da kuglice žive ostanu u staklenoj cijevi. Takođe će spriječiti živu da padne izvan nule i pobegne iz staklene cijevi.
- Ako se desi da sva živa isteče iz cijevi onda ponovo vratite posudu za niveliiranje (3) u gornji položaj. Ovaj pu pažljivije pritisnite vakuumsko zvono (13) na gumenu brtvu (15), ovaj put bez cilindra, i stegnite (12). Obavezno okrenite vijak za stezanje zvona uvijek na istu tačku (crvena tačka). Postavite ventil za ispuštanje vazduha (11) u nulti položaj. Posuda za niveliiranje je na gornjem položaju. Koristite gornji prsten za podešavanje (4) tako da podesite nivo žive u staklenoj cevi (6) na crvenu oznaku (16). Ako nivo žive ne dostigne ovu oznaku, potrebno je dodati malo žive u niveliраjuću posudu dok se nivo žive ne postavi na crvenu oznaku.

Nakon pet sekundi kada živa miruje, postavite ventil za ispuštanje vazduha u položaj 1 i pažljivo vratite posudu iz gornjeg položaja u donji (1). Postavite stupac žive na skali (7) pored staklene cijevi na nulu - 0 i to podešavanjem donjeg prstena za podešavanje (1).

- Nakon toga se niveliраjuća posuda može ponovo postaviti u gornji položaj a slavina ventila za ispuštanje vazduha u položaj 0. Otpustite dugme za stezanje (12) i postavite kalibracioni blok (14) od  $60\text{ cm}^3$  ispod mjernoga zvona, zavrnite dobro vijak za stezanje zvona. Postavite slavinu za ispuštanje vazduha u položaj 1 kada živa miruje i pažljivo pomjerite posudu za niveliiranje (3) sa gornje u donju poziciju.

Sada postoje tri mogućnosti, tj da živin stupac u cijevi:

1. označava tačno  $60\text{ cm}^3$  na skali.
2. označava više od  $60\text{ cm}^3$  na skali.
3. označava manje od  $60\text{ cm}^3$  na skali.

- Ako živina kolona pokazuje tačno  $60\text{ cm}^3$  niveliраjuća posuda se može postaviti u gornji položaj pa ventil za ispuštanje vazduha na položaj 0, nakon čega se može započeti mjerjenje.

- Ako živina kolona pokazuje "više" ili "manje" od  $60\text{ cm}^3$ , slijedite proceduru datu u nastavku:

Nakon postavljanja posude u gornji položaj i ventila za ispuštanje zraka u položaj 0, kalibracijski blok mora biti uklonjen i vakuumsko zvono zatvoreno. Sada se zadnja ploča aparata mora odvrnuti i ukloniti da bi imali pristup stezaljki za cijev (8). Ako je označena zapremina prevelika (premala), prostor iznad žive mora se povećati (smanjiti). To se radi tako što se stezaljka cijevi (8) pomjeri 1-2 cm od (do) kraja cijevi (8) i ponovo pričvrsti. Shodno tome crvena oznaka i nulta tačka se sada podešavaju kako je gore opisano.

Tada se kalibracijski blok ponovo postavlja i mjeri.

Ako donjim prstenom za podešavanje (1) nije moguće doći do nulte tačke, moguće je podesiti skalu (7) odvrtanjem oba zavrtnja na prednjoj strani (ili odvrtanjem oba zavrtnja sa zadnje strane). Kalibracija je završena kada živa označava volumen od  $60 \text{ cm}^3$ , zadnja ploča se sada može vratiti na svoje mjesto.

Ako je ipak naznačena zapremina ili premala ili prevelika, ponovite postupak koliko god je potrebno da se postigne prava vrijednost  $60 \text{ cm}^3$ .

#### ***Pojednostavljeni prikaz kalibracijskog postupka izgleda ovako:***

- Postaviti vakuumsko zvono na njegovu stopu (ležište) i ventil za ispuštanje zraka u položaj 0. Podesiti posudu za nivelisanje na gornji položaj, tako da živa u manometru dodiruje crvenu oznaku od 100 ml.
- Podignite vakuumsko zvono, postavite kalibracijski valjak (blok - vidi se na slici lijevo od vakuumskog zvona) pa vratite i pritisnite vakuumsko zvono. Nakon 5 sek. postavite ventil za ispuštanje vazduha u položaj 1 i spustite polako posudu za nivelisanje u donji položaj na šipci.  
Podesite na taj način da poznata zapremina kalibracionog valjka ( $60 \text{ cm}^3$ ) bude identična očitanju nivoa žive u graduisanoj cijevi – manometru  $60 \text{ cm}^3$ .

Pri tome se moraju provjeriti sljedeći mogući efekti:

- Slavina za ispuštanje vazduha (11) je u položaju 0 umesto u položaju 1.
- Vakuumsko zvono nije dobro zatvoreno; nešto na rubu može sprječiti hermetičko zatvaranje zvona.
- Stezaljka cijevi (8) nije dovoljno uključena da zrak može izaći.
- Možda postoji curenje u sistemu koje treba pratiti i popraviti.

### **3. Mjerenje:**

- Postavite niveliраjuću posudu na konzoli u gornji položaj
- Podesite ventil za ispuštanje zraka u poziciju 0

- Postavite uzorak na tacnu ispod vakuumskog zvona i pritisnite zvono stezanjem
- Poslije stabilizacije žive u cijevi postavite ventil za ispuštanje zraka u poziciju 1
- Lagano spustite nivelerajuću posudu u donji položaj
- Očitajte stabilni nivo žive u graduisanoj cijevi – manometru
- Posuda za niveleranje se ponovo postavlja u gornji položaj
- Ventil/slavina za ispuštanje vazduha u poziciju 0.
- Sada se izmjereni uzorak može izvaditi kako bi se izvršilo sljedeće mjerjenje po gore opisanom postupku

### **Obračun:**

Obračun se vrši različito kada je pod vakuum-zvono postavljen:

1. uzorak tla bez cilindra kopeckog ili uzorak nekog drugog rastresitog materijala,
2. uzorak tla u cilindru kopeckog ( $100 \text{ cm}^3$ )

U slučaju 2. kada je mjerena zapremina čvrste faze u cilindru kopeckog ( $100 \text{ cm}^3$ ) moguće je jednostavno obračunati i zapreminu pora.

### **1. Obračun prave specifične gustine $P_{sg}$ sa mjerenim uzorkom bez cilindra**

Očitani nivo žive identičan je zapremini čvrste faze ispitivanog uzorka bez cilindra. Prava specifična gustina se dobije kao odnos mase suhog uzorka ( $m_{cf}$ ) ispod vakuumskog zvona i očitanog nivoa žive koja odgovara zapremini čvrste faze ( $V_{cf}$ ).

$$P_{sg} = \frac{m_{cf}(\text{g})}{V_{cf}(\text{cm}^3)} \dots (\text{g/cm}^3)$$

### **2. Obračun Prave specifične gustine $P_{sg}$ sa mjerenim uzorkom u cilindru**

Volumen uzorka tla u cilindru Kopeckog ( $V_{cf+c}$ ) koji se ovako utvrđuje pomoću zračnog piknometra sada predstavlja zbir izmijerenog volumena čvrste faze tla ( $V_{cf}$ ) i volumen samog cilindra ( $V_c$ ):

$$V_{cf+c} = V_{cf} + V_c \dots (\text{cm}^3),$$

a zapremina ovako mjerene čvrste faze tla  $V_{cf}$  je:

$$V_{\text{ef}} = V_{\text{ef+c}} - V_c \dots (\text{cm}^3).$$

Vrijednost zapremine cilindra  $V_c$  dobijemo takođe postavljanjem praznog cilindar ispod zvona u zračnom piknometru.

Konačno,  $P_{sg}$  obračunavamo kao:

$$P_{sg} = \frac{m_{\text{ef}} \text{ (g)}}{V_{\text{ef+c}} - V_c \text{ (cm}^3)} \dots (\text{g/cm}^3)$$

### **3. Obračun volumena pora ( $V_p$ )**

Volumen pora može se izračunati na sljedeći način:

$$V_p = 100 - (V_{\text{ef+c}} - V_c) \dots (\text{cm}^3)$$

100 označava zapreminu uzorka u cilindru tj. zapreminu čvrste faze plus zapremina pora. Ovo je odmah i volumni postotak pora (%<sub>vol</sub>) tj. porozitet, pošto je ukupna zapremina uzorka 100 cm<sup>3</sup>.

## 5.2.2. STRUKTURA ZEMLJIŠTA

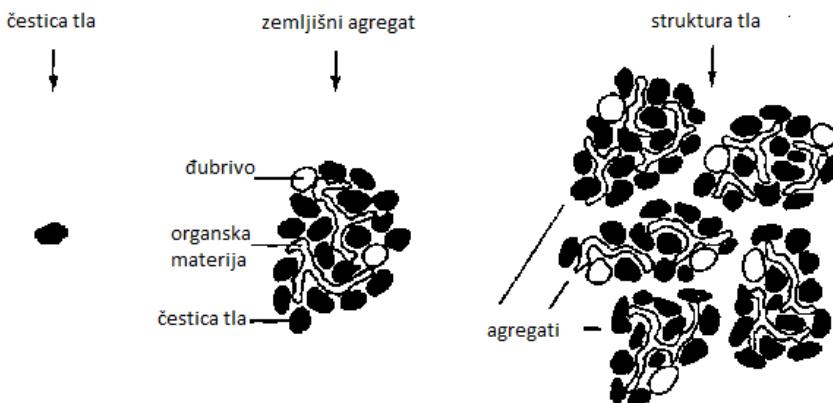
Najveći dio primarnih čestica ne nalaze se u masi tla neudruženo tj. odvojene jedna od druge, kako ih tretiramo pri analizi teksture. U stvarnosti, tlo se može smatrati složenim bio-organo-mineralnim sistemom gdje se minerali, organska materija (humus), mikroorganizmi, voda i zrak nalaze u bliskom kontaktu i interakciji. Elementarne mineralne čestice zemljишta: primarni alumosilikati u frakciji pjeska i praha (kvarc, ortoklas, muskovit...), zatim sekundarni kristalni i amorfni alumosilikati (minerali gline, alofani i imogolit) te amorfni i kristalni oksidi i hidroksidi Fe i Al u frakciji gline, i karbonati i ostale soli K, Na, Ca i Mg,... ne nalaze se odvojene jedne od drugih u volumenu tla, nego zajedno sa mikroorganizmima, biljnim ostacima, humusom te vodom i zrakom, međusobno udruženi grade zemljишne aggregate.

**Strukturu zemljишta** čine čestice tla prostorno organizirane u aggregate različitih oblika i veličina i rasporeda, tvoreći posljedično i istovremeno sistem povezanih i isprepletenih pora različitih veličina ispunjenih zrakom i/ili vodom. To je složeni kvalitet tla koji vrši značajnu kontrolu nad većinom fizičkih, vodno-fizičkih hemijskih i bioloških procesa koji se dešavaju u prirodnim i antropogenim tlima, uključujući kretanje i držanje vode, zraka i topote; prodiranje korijena; život mikroorganizama; te razlaganje i skladištenje organske materije tla.

Struktura tla [163]:

- je inherentno (urođeno ili nasljeđeno) svojstvo tla, jer su gradivne čestice toliko heterogene po veličini, obliku i hemijskoj prirodi, baš kao što su i mehanizmi koji povezuju čestice tako različiti da stvaraju jedinstvenu strukturu za svako tlo,
- podrazumijeva hijerarhijsku organizaciju, u kojoj se fine primarne čestice spajaju kako bi formirale sekundarne čestice, a male sekundarne čestice se spajaju kako bi formirale veće pedone ili aggregate.
- je dinamično svojstvo tla, koje se kontinuirano mijenja kao odgovor na različite unutrašnje i vanjske pokretače uključujući vlažnost i temperaturna kolebanja, zatim biološku aktivnost i ljudsku aktivnost.

Zbog ovih složenosti susrećemo se i s problemima opisa kvalitativnih karakteristika i kvantitativne analize strukture, još uvijek nam nedostaje istinski objektivan opis za strukturu, a univerzalno prihvaćena i kvantificirana mjera strukture tla još ne postoji [72]



**Slika 45. Struktura tla** (izvor [190])

Struktura tla se nalazi između dva ekstrema. Od bezagregatnih jednočestičnih pjeskulja ili nekih prahulja bez kohezije, sipkih, pa do velike kohezivne masivne strukture kakvu imaju teške gline bez vidljivih unutarnjih obilježja agregacije. Između ove dvije krajnosti, čestice tla tvore agregatnu strukturu sačinjenu od polutrajnih kvazi stabilnih čestica različitih oblika i veličina. Starija literatura o fizici tla svrstavaju jednozrna i masivna tla u bestrukturna. Iz tog razloga, pojam strukture tla često se koristi za opisivanje agregata tla.

**Opis vidljivih oblika** pojedinih strukturnih jedinica podrazumijeva korištenje nekoliko pojmova:

**Površinski sloj** zemljишta karakterišu kockasti agregati (slični zrnastim) koji se po veličini dijele na: praškaste ( $<0,5$  mm), mrvičaste (od 0,5-5 mm), graškaste (0,5-1cm), orašaste (1-3,5 cm) i grudvaste ( $>3,5$  cm).

**Otvoreni profil** nam pokazuje ili na usjecima u zemljишtu razlikujemo nekoliko vidljivih formi strukture:

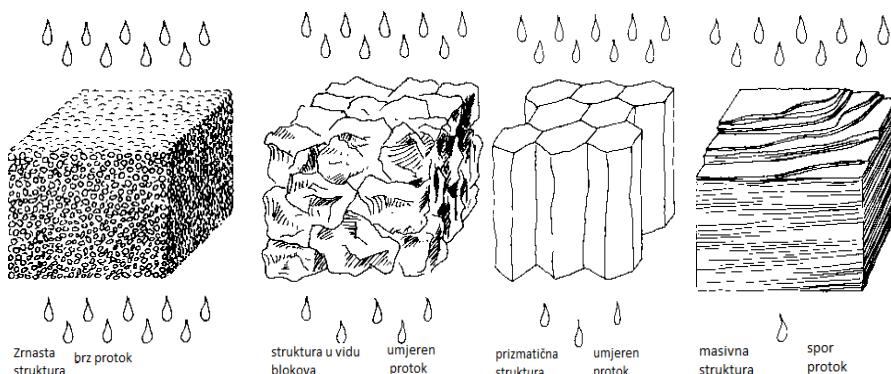
**Zrnaste strukturne jedinice:** Slični su kockastim formama agregata, osim što su čestice zaobljenije i površine nisu usklađene s površinama susjednih jedinica.

**Poliedarske jedinice ili one u vidu blokova:** poliedarske strukturne jedinice sa ravnim ili blago zaobljenim površinama. Površine ovih jedinica za razliku od zrnastih, su usklađene s površinama susjednih jedinica (uklapaju se).

**Prizmatične:** izdužene strukturne jedinice s ravnim okomitim stranicama koje se podudaraju s licima susjednih strukturnih jedinica. Vrhovi su obično ravnii.

*Stupaste*: Slični su prizmatičnim jedinicama, osim što su vrhovi zaobljeni, a okomite stranice su također blago zaobljene.

*Slojevite i masivne*: vodoravne i ravne strukturne jedinice koje se često pojavljuju u glinastim tlima.



Slika 46. Struktura tla i protok vode (izvor [190])

Za zemljišta težeg mehaničkog sastava gdje kao posljedica vlaženja i sušenja odnosno bubrenja i skupljanja nastaju vertikalne pukotine karakteristična je prizmatična struktura. Struktura tla u vidu blokova je negdje između a masivna struktura, koju imaju gline, sprečava procjeđivanje vode.

Sa aspekta poljoprivredne proizvodnje, u površinskom sloju, najpovoljnija je mrvičasta struktura veličine agregata od 0,5-5 mm. Takvu strukturu imaju humozna zemljišta pod prirodnom travnom vegetacijom ili oranični sloj kultiviranih tala uslijed redovne obrade i đubrenja organskim đubrivom. Ta zemljišta imaju povoljan vodno-zračni i toplotni režim i daju mali otpor obradi. Za takvo zemljište poljoprivrednici kažu da je «strukturno».

**Osnovnim strukturnim jedinicama** u tlu se smatraju mikroagregati dijametra  $<250 \mu\text{m}$  [39]. Oni predstavljaju komplekse (izgrađene od) minerala gline - polivalentnih metala - organske materije, koji su stabilni u vodi i nisu osjetljivi na poljoprivrednu praksu. Ti mikroagregati su povezani među sobom formirajući makroaggregate koji se definiraju kao veći od 250  $\mu\text{m}$ .

Dva su glavna procesa koji kontrolišu dinamiku strukture tla:

- a) procesi koji dovode do povećanog vezivanja ili agregacije čestica tla i
- b) procesi koji uzrokuju fragmentaciju (pučanje i usitnjavanje) agregata ili masivnih blokova.

### **5.2.2.1. Agregacija čestica tla**

Da bi se razmujela dinamika agregacije tla potrebno je uvijek imati na umu dva osnovna elementa ili koraka neophodna za proces agregacije [163]:

1. procese aglomeracije (približavanja) koji dovode čestice tla u blizinu jednu drugoj i
2. vezivna sredstva organskog i neorganskog porijekla koja stvaraju veze među približenim česticama.

Nerijetko se u tumačenju nastanka strukture, agregacija tla poistovjećuje sa koagulacijom i flokulacijom koloidnih čestica. Koagulacija je proces neutralizacije nanelektrisanja koloidnih čestica. Jednom neutralizirane, koloidne čestice se više ne odbijaju jedna od druge i mogu ostati grupisane. Flokulacija je sljedeća faza ili proces okupljanja koaguliranih čestica da bi se stvorile veće nakupine ili flokule. Bez koagulacije ne može nastupiti flokulacija, odnosno taloženje koloidnih čestica.

Činjenica je da je za formiranje agregata važno međusobno povezivanje koloidnih čestica tla (minerala gline, organskih koloida, oksida i hidroksida Fe i Al) u procesu koagulacije i flokulacije. Međutim, ovo dvoje, flokulacija i agregacija nisu sinonimi. Flokulacija je čisto hemijski proces, a stabilnost flokula ovisi o prisutnosti agensa za flokulaciju. S druge strane, stvaranje stabilnog agregata (granulacija) zahtijeva da primarne čestice budu toliko čvrsto spojene da se ne rasprše u vodi [3]. To implicira da agregacija zahtijeva neki oblik stabilizacije ili cementacije flokuliranih čestica. Prema riječima Bradfielda [10]: **Agregacija je cementacija plus!**.

#### **5.2.2.1.1. Hijerarhijski nivoi agregacije kao model prostorne organizacije čestica tla [163]**

Aktuelni konceptualni model strukture tla opisuje agregaciju tla kao hijerarhijske nivoe prostorne i vremenske organizacije čestica tla. Hijerarhijski nivoi organizacije zemljишnih čestica u prostoru i vremenu uključuju [167]:

- a) čestice različitih vrsta i veličina koje ulaze u agregaciju na svim hijerarhijskim nivoima,
- b) veze različite prirode koje te čestice različite kompleksnosti ostvaruju među sobom, i
- c) vremenski slijed (chronologiju) stvaranja tih veza.

Hijerarhijska organizacija čestica tla u prostoru i vremenu se odvija u nekoliko nivoa (redova):

- domene gline  $< 2 \mu\text{m}$  nastale vezivanjem primarnih čestica (pločica) gline (flokulacija),
- klasteri glinenih domena i/ili finih čestica praha ( $2 - 20 \mu\text{m}$ ),
- mikroagregati ( $20-250 \mu\text{m}$ ) nastali agregacijom klastera i
- makroagregati kao najviši hijerarhijski nivo nastali sljepljivanjem mikroagregata.

Uopšteno gledajući, svaka čestica (nakupnina) jednog hijerarhijskog reda agregacije se sastoji od  $100 - 10.000$  čestica iz nižeg hijerarhijskog reda. Ne susreće se uvjek gore pomenuti cijeli spektar hijerarhijskih redova agregacije. On će vjerovatno biti prisutan samo u zemljištima koja su bogata organskom materijom [108]. Čestice nižeg hijerarhijskog reda agregacije su tipično veće gustoće i stabilnije od čestica višeg reda [31]. To je zbog činjenice da čestice manjeg reda agregacije ne sadrže veće pore (koje su i slabije) koje postoje u česticama višeg reda.

**Domene gline  $< 2 \mu\text{m}$ :** Vezivanje primarnih čestica (pločica) gline u domene gline (flokulacija) predstavlja prvi i najniži red u hijerarhiji agregacije. Osnovni gradivni blokovi gline su alumosilikatne pločice koji imaju debljinu od nekoliko nanometara i bočne dimenzije nekoliko stotina nanometara, formirajući tako oblik pločica [135].

Elektrostaticko vezivanje ovih glinenih pločica (flokulacija) formira glinene domene (engl. *domaine*). Generalno, negativno nabijene pločice gline sa adsorbovanim pozitivnim ionima se odbijaju jedna od druge zbog istog naboja. Međutim, pločice gline počnu se privlačiti jedna drugoj kada udaljenost između njih postane toliko kratka da mogu dijeliti pozitivne jone koji ih okružuju. Ovaj oblik privlačenja u velikoj mjeri zavisi o valentnosti jona. Monovalentni joni ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) obično zauzimaju velike volumene kada su hidratisani (okruženi molekulima vode), što rezultira veoma velikim razdvajanjem između čestica gline. Dakle, čestice gline u kontaktu sa rastvorom monoivalentnih jona nalaze se u dispergovanom stanju (suprotno od flokulisanog). Naročito, velika koncentracija  $\text{Na}^+$  jona u zemljišnom rastvoru utiče negativno na aggregaciju. U tom slučaju,  $\text{Na}^+$  jon sa svojom vrlo velikom hidratantnom opnom koja ga okružuje, istiskuje i zauzima mjesta polivalentnih kationa, razdvaja koloidne čestice minerala gline jedne od drugih, što uzrokuje povećane peptizacije (raspršivanje) zemljišnih koloida. Peptizacija je prijelaz koloida iz stanja gela u stanje sola, suprotno od zgrušavanja (koagulacija). Za  $\text{Na}^+$  jon zbog tih svojstava kažemo da je dobar peptizator, a takva zemljišta su bestrukturna masa vrlo loših vodnofizičkih osobina i nepodobna za poljoprivrednu proizvodnju. Takve su slatine – slana zemljišta.

Nasuprot tome, dvovalentni kationi ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) oko pločica gline sa svojim malim hidratiziranim opnama (male zapremine iona), mogu se lako dijeliti među susjednim česticama (imaju ulogu mostova) što rezultira stabilnom i kompaktnom flokulacijom. Za  $\text{Ca}^{2+}$  jon kažemo da je dobar koagulator. Kalcicacija je pedomeliorativna mjera dodavanja karbonatnog materijala (mljeveni krečnjak, dolomit, lapor ili kreč) kojom se pored neutralizacije kiselih zemljišta vrši i popravak strukture. Zemljišta na karbonatnim supstratima (krečnjak, dolomit, lapor, karbonatne gline i karbonatni pjesak, fliš) sa puno  $\text{Ca}^{2+}$  jona u zemljišnom rastvoru uglavnom su dobro strukturalna.

Pored ove vrsta veza, rubovi pločica gline koji su u kiselim uslovima pozitivno nanelektrisani uslijed protonizacije R-OH grupe, takođe učestvuju u stvaranju veza sa negativno nanelektrisanim površinama bliskih pločica gline.

Generalno, flokulacija je složen fizičko-hemijski proces koji rezultira formiranjem stabilnih glinenih domena kroz vezivanje glinenih pločica elektrostatickim privlačenjem. *Kritična koncentracija koagulacije* (CCC) ili minimalna koncentracija elektrolita potrebnu za pokretanje flokulacije disperzne glinene suspenzije zavisi o vrsti dominantnih minerala gline, sadržaju organske materije, pH i kapacitetu izmjenjivih kationa [46, 66, 67].

**Klasteri (2 – 20  $\mu\text{m}$ ):** Stvaranje klastera glinenih domena i/ili finih čestica praha predstavlja sljedeći hijerarhijski nivo agregacije, koji je ujedno i najmanje proučavan. Klasteri se pretežno formiraju kada se koloidne čestice tla (domeni gline, oksidi Fe i Al i organski koloidi) spajaju zajedno s česticama praha [3]. Stoga nedostatak koloidnih čestica u tlu karakteriše nestrukturana, rastresita zemljišta kakav je pjesak. Postanak veza između granularnih čestica unutar klastera se povezuje i sa djelomično ireverzibilnim (nepovratnim) isušivanjem koloidnih čestica koje tada djeluju kao stvrđnuto ljepilo između čestica unutar klastera.

Koloidna gлина igra veću ulogu u stvaranju klastera kada se radi o agregatima veličine do 50  $\mu\text{m}$  nego u onima od 100  $\mu\text{m}$ . Nadalje, u prisustvu organskih koloida uloga koloidne gline u agregaciji se smanjuje [3]. Koloidna organska tvar, kao što je sluz izlučena iz mikroorganizama u tlu, može povezati domene gline zajedno i formirati vrlo stabilne klastere [170].

Generalno, najvažniju ulogu u građenju klastera ima količina i priroda koloidne frakcije uz pomenutu smjenu sušenja i vlaženja koloida.

**Mikroagregati (20-250  $\mu\text{m}$ )** nastali agregacijom klastera stvaraju sljedeći hijerarhijski nivo agregacije. Mikroagregati nastaju kada su klasteri i čestice praha vežu relativno postojanim i stabilnim vezivnim agensima (humifificirana organska materija i kompleksi polivalentnih metalnih katjona) te oksidima Fe i Al i nekristalisalim (amorfnim) alumosilikatima [143].

U originalnom uvodu hijerarhijskog konceptualnog modela strukture tla [167] implicirano je da je prijelaz s nižeg na viši hijerarhijski poredak ekvivalentan hronološkom redu, dok je Oades [106] modificirao ovaj pojam i predložio da se mikroagregati formiraju unutar makroagregata kroz proces fragmentacije (pučanja) makroagregata.

**Makroagregati veći od 250 μm** kao najviši hijerarhijski nivo agregacije nastaju vezivanjem mikroagregata. Makroagregati se formiraju od mikroagregata koji se međusobno povezuju slabim vezivnim agensima kao što su hife korijena i gljiva, kao i labilna organska jedinjenja koja potiču iz eksudata (izlučevina) zemljišnih mikroorganizama i korijena [103]. Prema hijerarhijskom modelu agregacije, mikroagregati nastaju iz klastera koji se međusobno povezuju relativno stabilnim organskim i anorganskim koloidnim česticama, dok se makroagregati formiraju kada se mikroagregati drže zajedno slabim organskim vezama kao što su hife i labilna organska tvar. Stoga mehanički poremećaj tla (kao što je obrada tla) tipično degradira slabe veze između mikroagregata i rezultira gubitkom relativnog obilja makroagregata na račun povećanja obilja „oslobodenih“ mikroagregata. Generalno, makroagregacija je vrlo osjetljiva na promjene načina korištenja zemljišta i kultivacijsku praksu, dok su mikroagregati mnogo manje osjetljivi (stabilniji).

Kao rezultat toga, na stabilnost, poroznost i unutrašnju hidrauličku provodljivost makroagregata snažno utiču prakse upravljanja tlom. Osim toga, postoji značajna varijabilnost fizičkih svojstava unutar pojedinačnih makroagregata. Park i Smucker [116, 117] upoređivali su poroznost, hidrauličku provodljivost i erozivnu čvrstoću cijelih makroagregata. Njihovi nalazi pokazuju da se poroznost i hidraulička vodljivost cijelih makroagregata povećavaju s povećanjem veličine, dok se erozivna čvrstoća (stabilnost) smanjuje s povećanjem veličine agregata. Unutar pojedinačnih agregata, vanjski slojevi su porozniji, provodljiviji i manje stabilni od unutrašnjih slojeva. Osim toga, oni su također pokazali da intenzifikacija korištenja poljoprivrednih tla smanjuje poroznost, hidrauličku provodljivost i otpornost na eroziju u odnosu na tla prirodnih ekosistema šume i livada.

**Velike grudve zemlje** koje često vidimo na poljima ili u uzorcima tla, se mogu u nekim razmatranjima posmatrati kao posljednji hijerarhijski nivo agregacije. Grudve zemlje mogu ali ne moraju sadržavati vidljive čestice nižeg hijerarhijskog reda nastale agregacijom. Na poljoprivrednim tlima velike grudve se mogu formirati zbog zbijanja tla poljoprivrednom mehanizacijom. U zavisnosti od stanja vlažnosti tla tokom zbijanja i intenziteta opterećenja tla teškim mašinama, granice između makroagregata mogu se potpuno izgubiti ili ostati kao mikropukotine. Krajnji cilj obrade tla

na takvim degradiranim tlima je da se preokrene stvaranje grudvica oslobađanjem agregata koji su „zatvoreni” u grudve [106].

Krupne grudve također predstavljaju i masu tla koje nastaju tokom isušivanja glinovitih tla. U ovom slučaju, grudve ne moraju sadržavati čestice nižeg hijerarhijskog reda [106].

Ove grudve (ili pedoni) i njihov proces formiranja su od velike važnosti, posebno kada se radi o pod površkim horizontima. Pod površinski horizonti obično nemaju aggregate, ali pokazuju sličnu kompleksnu strukturu. Ova struktura predstavlja najveću zabrinutost kada je u pitanju zbijenost pod površinskih horizonata jer se oštećenje strukture pod površinskih horizonata, za razliku od površinske (agregatne) strukture, smatra gotovo nepovratnom.

Postoje i **drugi modeli agregacije** čija tumačenja ne moraju biti u sukobu sa aktualnim hijerarhijskim modelom agregacije, čak možemo reći i da doprinose njegovom razumijevanju.

**Golchin et al.** [53] povezuju stvaranje agregata sa razgradnjom čestica lake frakcije nevezane nerazložene organske materije tj. manje ili više vidljih i prepoznatljivih organskih ostataka specifične gustine  $< 1,6 \text{ g/cm}^3$ , koje se mogu izdvojiti plutanjem u otopini poznate gustine. Ova teorija je negdje na tragu modifikacije Oadesa [106] da mikroagregati mogu nastati i fragmentacijom makroagregata.

Prema ovom modelu, čestice ovih slobodnih, nerazloženih organskih ostataka koje su locirane između agregata, karakteriše ograničenost prema adsorbciji individualnih mineralnih čestica na svojoj površini te nizak stepen povezivanja sa zemljšnjim mineralnim matriksom. Vremenom, na površini ovih slobodnih nerazloženih čestica OM raste mikrobiološka kolonizacija (npr. na dugačkim komadićima ostataka korijenovih dlačica ili hifama gljiva homogenizirano raspoređenim u matriksu tla) rezultirajući sve većom razgradnjom i proizvodnjom metaboličkih produkata koji imaju vezivna svojstva. Kao posljedica povećava se interakcija između čestica slobodne nevezane organske materije i okolnih mineralnih koloida. Na taj način se humificirani i biološki procesuirani organski materijal uključuje u vezivanje sa česticama gline i praha ( $<20 \mu\text{m}$ ) unutar malih mikroagregata  $<53 \mu\text{m}$ . Ovaj proces može se dokazati elektronskom mikrografijom koja pokazuje stvaranje neke vrste pokorice od neorganskih (mineralnih) čestica tla oko čestica nevezane organske materije [108]. Kako se stvaranje te pokorice povećava sa kontinuiranom razgradnjom i produkcijom različitih vezivnih agenasa, ove čestice formiraju centre intenzivne biološke aktivnosti oko kojih se stabilizira agregacija sa mineralnim česticama. Posmatranje makroagregata ( $>250 \mu\text{m}$ ) pomoću optičkog mikroskopa i skeniranjem

elektronskim mikroskopom pokazalo je da hife i fino korijenje zahvaćaju u neku vrstu mreže čestice tla i mikroagregate i na taj način igraju važnu ulogu u stabilnosti makroagregata. Stabilizacija makroagregata je prolazan proces, a održavanje dostignutog nivoa makroagregacije zavisi od kontinuiranog unosa svježeg organskog materijala u tlo.

Iako se početna faza razgradnje ovih slobodnih čestica pokazala korisnom za makroagregaciju, nastavljanjem razgradnje, organsko jezgro koje drži makroaggregate na okupu se raspada na male komadiće. Ovo **fragmentiranje čestica** nevezane organske materije se smatra rezultatom aktivnosti faune tla i selektivne mikrobiološke oksidacije onih dijelova čestice koji su izloženi u velikim porama tla a u kojima protok kisika i hraničiva nije ograničen. Sa kontinuiranom razgradnjom nevezanih čestica organske materije, stabilnost malih makroagregata će takođe opadati i na kraju preostati samo mikroagregati. Mikroagregati nastali prijelomom makroagregata smatraju se sastavljenim od malih fragmenta djelomično razloženih biljnih ostataka povezanih u matriksu ljepljivih agenasa i mineralnih čestica.

Prema **Sekeri** koji se tradicionalno obrađuje u našoj pedološkoj literaturi [126] proces agregacije odnosno proces stvaranja mrvičaste strukture tla teče u dvije faze:

- 1 kroz koloidno-hemijsku i
- 2 biološku fazu.

U *koloidno hemijskoj fazi* dolazi do koagulacije (zgrušavanja) koloida tla (minerala gline i polimera humusnih kiselina) pomoću koagulatora. Osim  $\text{Ca}^{2+}$ , kao koagulatori se javljaju  $\text{Mg}^{2+}$  i trovalentni oblici  $\text{Fe}^{3+}$  i  $\text{Al}^{3+}$  ioni. Prvo dolazi do koagulacija koloidne gline i organskih koloida u manje pahuljice pa u nakupine većih agregata. Irverzibilno (nepovratno) koagulirani koloidi daju najstabilnije mikroaggregate.

U *biološkoj fazi*, prema Sekeri, gdje dolazi do povezivanje mikroagregata u makroaggregate učestvuju:

- mikroorganizmi tla: prorašćuju i isprepliću mikroaggregate (sluzaste kolonije bakterija, aktinomiceta, hife gljiva, končići alga); njihove ljepljive izlučevine u vidu egzoenzima sljepljuju mikroaggregate,
- fine korijenove dlačice takođe prožimaju i povezuju aggregate,
- humus: poliuronidi i polisaharidi stvaraju kao konac tanku mrežu koja prožima makroaggregate,
- $\text{CaCO}_3$  koji sekundarnom kristalizacijom, tj. taloženjem iz rastvora tla na površini agregata cementira aggregate,
- pozitivni mineralni koloidi hidroksidi Al i Fe stvaraju finu zaštitnu opnu oko mikroagregata (cementiranje agregata) i

- pritisak koji se stvara kao posljedica rasta biljnog korijena, glista, oruđa za obradu, mraza...

#### **5.2.2.1.2. Faktori koji utiču na agregaciju**

U faktore koji kontrolišu agregaciju ulaze: anorganska vezivna sredstva, smjena vlaženja i sušenja, ulazak rastvorene organske materije u aggregate, biljni korijen, fauna tla i kišne gliste, mraz i kišne kapi te fragmentacija tla.

**Anorganska vezivna sredstva** čine polivalentni kationi (Ca i Mg) kao i koloidne čestice gline i oksidi Fe i Al. Ca i Mg ioni djeluju na najnižem hijerarhijskom nivou u stvaranju stabilnih domena gline.

**Dvovalentni  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{Mg}^{2+}$  ioni**, već je pojašnjeno, igraju ulogu mostova kada ih kao zajedničke adsorbovane jone dijele dvije bliske susjedne pločice kloida gline. Kao takva, njihova je prisutnost vrlo značajna za ukupnu stabilnost strukture tla na svim višim hijerarhijskim redovima agregacije. Osim toga, kalcij i magnezij potiču mikroagregaciju stvaranjem kompleksa gline – polivalentni kation – organska tvar [3, 22].

**Pozitivni koloidi oksida i hidroksida Fe i Al** mogu djelovati kao vezivna sredstva i to:

- *posebno na nivou stvaranja mikroagregata*; Koloidne čestice oksida i hidroksida Al i Fe za razliku od minerala gline i humusa imaju pozitivan naboj u pH intervalu u kojima se nalazi najveći dio zemljišta kopnenih ekosistema. Tako adsorpcijom organskih spojeva na svojim oksidnim površinama i elektrostatskim privlačenjem negativno nabijenih površina glichenih domena, aktivno učestvuju u procesima stvaranja mikroagregata,
- *i posebno na nivou makroagregata*: Zbog svoje mogućnosti nepovratne koagulacije Fe i Al oksidi posebno su značajni u procesu nastanka ali i za stabilnost makroagregata. Mogu da izgrađuju opne oko primarnih čestica tla i strukturnih agregata. Na ovaj način stvaraju svojevrsne mostove između primarnih i sekundarnih čestica tla koje su obložene Fe i Al oksidima [42, 110, 146]. Tako se makroagregati u zemljištima bogatim oksidima dodatno stabiliziraju. Na ovaj način se formira specifična stabilna poliedarska struktura kod naših crvenica.

**Glineno – humusni kompleks** - Poseban značaj u okolišu tla, a posebno u kontekstu uloge tla proizvodnji biomase i u ciklusu karbona/ugljika, ima interakcija gline i organskih tvari. Glineno – humusni kompleks igra ključnu ulogu u agregaciji čestica tla ali i u zaštiti OM tla od mikrobiološke razgradnje, čineći tla pogodnim za rast biljaka i dajući im značajnu klimatsko regulacijsku ulogu.

Dominantni faktori koji određuju prirodu interakcija gline i organskih tvari su osobine organske molekule, sadržaj vode, priroda izmjenjivog kationa na površini gline i jedinstvena svojstva strukture minerala gline. Samom razumijevanju mehanizma stvaranja organo-mineralnih kompleksa posebno onog glineno - humusnog nije se poklanjala dovoljna pažnja zato što je ekološki aspekt proučavanja zemljišta bio u prvom planu, međutim u zadnje vrijeme i tu su napravljeni pomaci.

Adsorpcija huminskih i fulvo kiselina od strane minerala gline tipa 2:1, pojavljuje se samo kada su polivalentni kationi prisutni u izmjenjivom kompleksu oko koloidne micle, u protivnom se dominantno negativni organski koloidi uglavnom odbijaju od negativno nabijenih minerala gline,. Glavni polivalentni kationi odgovorni za ovo vezivanje su:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  i  $\text{Al}^{3+}$ . Dvovalentni  $\text{Ca}^{2+}$  ion je zbog svoje zastupljenosti u rastvoru tla djelotvoran po obimu formiranja povezujućih mostova ali ne formira jaki koordinacioni kompleks sa organskim molekulama. Nasuprot tome  $\text{Fe}^{3+}$  i  $\text{Al}^{3+}$  ioni formiraju jak koordinacioni kompleks jako vezujući organske molekule ovim mehanizmom. Znači, polivalentni kationi igraju glavnu ulogu u stabilizaciji organskih i neorganskih koloida, kada pri većoj zastupljenosti limitiraju njihovu sposobnost bubreњa i skupljanja, favorizirajući flokulativno (stabilno) stanje. Polivalentni kationi služe kao mostovi između negativno nabijenih koloida gline i negativno nabijenih organskih koloida, koji povećavaju strukturalnu stabilnost.

**Ciklusi vlaženja i sušenja** izazivaju agregaciju i/ili fragmentaciju tla kroz brojne procese, uključujući bubreњe i skupljanje gline, kapilarna naprezanja, kao i transport, taloženje i stvrđivanje organskih i neorganskih veziva u unutrašnjosti agregata [163].

Smjena bubreњa i neujednačenog skupljanja kod glinovitih tala stvara unutrašnja naprezanja koja na kraju dovode do pucanja i pojave pukotima u zapremini tla. Donekle sličan proces je pucanje teških glinenih tla izazvano smrzavanjem i odmrzavanjem. S druge strane bubreњem dva susjedna agregata se spajaju i jačaju.

Mikromorfološka istraživanja pokazuju da se spajanje manjih agregata u klaster događa plastičnim spljoštavanjem i fuzijom međuagregatnih kontakata bez potrebe za dodatnim sredstvom za cementiranje. Važnu ulogu u samom procesu imaju snažne *zatezne sile kapilarne vode*. Gubitak velikih međuagregatnih pora popraćen povećanom povezanosti između agregata dovodi do povećane gustine tla ali i hidrauličke vodljivosti u nezasićenom tlu [4, 15, 16, 17].

*Transport rastvorene organske materije (ROM) i anorganskih koloida u unutrašnjost agregata:* Polagano vlaženje može pospješiti stabilizaciju

mikroagregata transportom rastvorene organske materije nastale tokom razgradnje organskih ostataka i/ili izlučene korijenjem biljaka, u unutrašnjost agregata. Sušenje uzrokuje nakupljanje rastvora tla u finim pukotinama i klinovima na kontaktima između čestica, gdje se rastvorenna organska jedinjenja ali i anorganske koloidne čestice talože i grade polutrajne veze [123]. Površine mikroagregata obloženih osušenom organskom tvari tako postaju djelom hidrofobne i manje osjetljive na dezagregaciju.

**Obrada poljoprivrednog tla** ima primarni cilj modificirati strukturu tako da rezultirajuća morfološka i hidrološka svojstva tla pogoduju optimalnom protoku i skladištenju vode i kisika, kao i minimalnoj otpornosti tla na kljanje i rast korijena. Istodobno, obrada tla izaziva zbijanje i trajno uništavanje inherentne strukture ispod oraničnog sloja. Značajan dio istraživanja mehanike poljoprivrednog tla posvećen je razumijevanju i smanjenju neželjenih posljedica obrade tla.

**Uticaj korijena na strukturu** - Posebno je značajan i uticaj korijena na strukturu. Dok raste i prodire u tlo, korijen zauzima pore u tlu na uštrb ukupnog poroziteta i povećava zbijenost tla u uskoj zoni rasta oko korijena [30]. To za posljedicu ima smanjenje infiltracije u toj zoni dok je korijen živ i posljedično povećanje infiltracije kroz novoformirane vertikalne makropore kad korijenje ugine i počne se raspadati.

Nadalje, potrošnja vode od strane korijena intenzivira *smjenu vlaženja i sušenja tla* u rizosfernem sloju, potiče agregaciju tla kao i fragmentaciju [163]. Pojava pukotina, naglašena u glinovitim tlima koja pokazuju sklonost bubrežju i skupljanju, snažno je povezana s distribucijom korijenskog sistema i prostornim rasporedom biljaka (npr. usjevi sijani u redove u odnosu na slučajnu distribuciju). Naime, korijenje biljaka potiče male razlike u vlažnosti tla u svom bliskom okolišu u tlu, koje mogu biti vrlo važne u stvaranju mikropukotina i ravnina sloma unutar makroagregata i grudva zemlje, čime se dodatno potiče agregacija tla.

Nadalje, korijenje potiče stvaranje stabilne agregacije tla u svojoj neposrednoj blizini (rizosfera) otpuštanjem ljepljivih organskih polimera (sluzave izlučevine) i hranjivih iona. Na ovaj način korijenje utiče direktno na povezivanje čestica tla i mikroagregata zajedno ili indirektno preko podržavanja života mikroba koji stvaraju složene i stabilne polimere i/ili hife koje prožimaju i učvršćuju makroaggregate. Ovi učinci obično su prolazni i ne traju duže od 1 mjeseca.

Uz pomenute kratkoročne direktne efekte korijenja biljaka, input neživih ostataka korijenja i nadzemnih dijelova biljaka u tlo dugoročno promoviše agregaciju i stabilizaciju tla kontinuiranom opskrbom organskom materijom. Procjenjuje se da se oko 20% karbona (ugljika) asimiliranog fotosintezom

pohranjuje u tlu u obliku izlučevina i mrtvih korijena [59]. Takođe, potrošnja ove organske tvari od strane faune tla i mikroba oslobađa složene organske molekule koje potiču stvaranje stabilnih agregata tla [143].

Fino i grublje korijenje takođe povećava stabilnost agregata tla fizičkim prožimanjima i proplitanjem agregata i čestica tla u širokom rasponu veličina, od najfinijih korijenovih dlačica pa do cjelokupnog korijenovog sistema u volumenu tla.

**Uticaj kišnih glista na strukturu** - Fauna tla igra važnu ulogu u dinamici agregacije tla olakšavajući transport i razgradnju organskih ostataka i formirajući prolaze (hodnike) koji pospješuju infiltraciju i brzu preraspodjelu vode nakon kiše ili navodnjavanja. Najutjecajnija fauna tla su kišne gliste. Isprepletena i dugačka mreže hodnika glista, koji su stabilizirani kombiniranim učincima zbijanja i mukoznih sekreta [38], grade sistem putova brzog protoka koji poboljšavaju infiltraciju i prozračivanje tla.

Gliste također igraju značajnu ulogu u formiranju i stabilizaciji agregata tla tako što gutaju mješavinu organskih i anorganskih materijala iz tla i izlučuju stabilne smjese iz svog tijela. Brojne studije pokazale su da su te izlučevine (ekskrementi) u vidu odljevaka stabilniji od okolnih agregata tla [143]. Gliste gutaju veće količine zemlje kada je sadržaj organskih ostataka u tlu (hrane) niži, što dovodi do većeg izbacivanja tih ekskremenata/odljevaka. Uopšteno govoreći, procjenjuje se da cijeli površinski sloj zemljišta umjerenog klimatskog pojasa prođe kroz crijeva glista svake 4 godine [47].

**Mraz** utiče na strukturu zemljišta drobeći stubaste i grudvaste aggregate.

**Kišne kapi i navodnjavanje orošavanjem** razbijaju strukturne aggregate na površini zemljišta uzrokujući raspršivanje finijih zemljišnih čestica što začepljuje okolne pore te negativno utiče na infiltraciju vode i stvara finu pokoricu na takvim površinama.

**Fragmentacija tla** je suprotna strana od agregacije i počinje pojavom pukotina unutar agregata ili masivnog volumena bestrukturnog tla. Pukotine nastaju u tlu kada energija naprezanja uzrokovana skupljanjem i bubrengom ili obradom premašuje međučestične veze [61].

Pukotine u tlu općenito se dijele na krte koje nastaju u suhom tlu i duktilne koje nastaju u vlažnom tlu. Pri krtom pucanju energija naprezanja premašuje međučestične veze, stvara se ravnina sloma i potom pukotina. Za vlažna tla pucanje je popraćeno značajnom plastičnom deformacijom. Vrlo vlažna i vrlo suha tla imaju jaku otpornost na pojavu pukotina. Negdje u sredini nalazi se stanje vlažnosti gdje je kombinirani učinak čvrstoće i žilavosti nizak i pucanje tla je najlakše.

### **5.2.2.1.3. Značaj agregatne strukture tla**

Značaj strukture zemljišta je višestruk. Slobodno se može reći da je povoljna struktura nosilac svih povoljnih osobina zemljišta. To se prije svega odnosi na volumnu gustinu neporemećenog tla, porozitet, kapacitet za držanje vode i hidrauličku provodljivost, karakteristike povezane sa zračnim i topotnim režimom tla.

Hijerarhijski model agregacije tla podrazumijeva postojanje i **hijerarhijskih kategorija pora**. Za hidrološke procese tla prema Hillel-u koristi se sljedeća kategorizacija pora [72]:

- mikropore, su uopšte pore koje su manje od 1 µm u promjeru. Voda u takvim porama čvrsto se drži adsorpcijskim silama [169] i njena pokretljivost je vrlo ograničena [168].
- kapilarne pore se kreću u rasponu od nekoliko mikrometara (µm) do nekoliko milimetara [72] i drže najveći dio biljci dostupne i pokretne vode, i
- makropore su od nekoliko milimetara do nekoliko centimetara u prečniku i mogu se formirati ukopavanjem organizama (hodnici glista) i/ili pucanjem tokom skupljanja gline (pukotine u tlu).

Dobrom agregatnom strukturu se popravljuju negativne osobine zemljišta povezane sa teškim mehaničkim sastavom kakav je slučaj sa glinušama sa dominantnim mikroporama (u kojima se nalazi teško pokretna i nepristupačna voda biljci) ili laganom teksturom kakva je kod nevezanih pjeskulja kod kojih dominiraju ekstremno propusne makropore u kojima se ne drži voda. Stvaranjem agregata u ovakvim tlima se popravlja diferencijalni porozitet tj. optimizira se odnos mikro, kapilarnih i makropora. Tako se u glinovitim tlima smanjuje udio mikropora u kojima su sile držanja vode veće od usisne moći biljnog korijenja i u kojima je voda gotovo nepokretna, dok se u jako propusnim pjeskovitim tlima povećava udio kapilarnih i sitnih pora koje drže vodu i smanjuju gubici vode procjeđivanjem kroz makropore. U konačnici, kod ovakvih zemljišta više pristupačne i pokretne vode se zadržava u srednjim porama u novoformiranim aggregatima i na taj način ostaje pristupačna biljkama.

Dobra izdiferenciranost pora, u stvari optimalna zastupljenost svih pora prema veličini, stvara optimalne uslove i za odvijanje biohemijskih procesa. Strukturna zemljišta imaju optimalne uslove (prisustvo vlage, zraka, topote) za biološku aktivnost korijena i organizama tla. Optimalnim stanjem se smatra kada su sitne i većim dijelom kapilarne pore ispunjene biljci pristupačnom vodom a krupne pore, biljci i organizmima tla takođe neophodnim zrakom.

Poseban značaj agregatne strukture i stabilnosti agregata, je njihovo korisno dejstvo u **smanjenju stepena erozije** zemljišta. Razne metode za izračunavanje erozije zemljišta uključuju u svoje jednačine i sadržaj humusa kao glavne komponente stvaranja stabilne strukture otporne na eroziju (erozivna čvrstoća) ali i koja obezbjeđuje dobru infiltraciju i smanjuje površinsko oticanje.

Dobro upravljanje zemljištem podrazumijeva gradnju i održavanje takve agregatne strukture i s njom povezane diferencijalne poroznosti u kojoj će se favorizirati sadržaj kapilarnih pora, smanjiti sadržaj mikropora a sadržaj makropora ispunjenih neophodnim zrakom održavati na optimalnom nivou. U tom pravcu izvode se i mjere poboljšanja zemljišta dubrenjem organskim dubrивима, kalcizacijom ili primjenom raznih prirodnih i vještačkih poboljšivača zemljišta. Zato je mjera kalcizacije (dodavanje karbonatnih materijala bogatih sa Ca jonom) u kombinaciji sa humizacijom (unos organske materije u tlo) jedna od najkompletnijih pedomeliorativnih mjer.

### **5.2.2.2. Struktturna analiza zemljišta**

Pravi uvid u fizičke osobine zemljišta podrazumijeva i struktturnu analizu zemljišta. Pod struktturnom analizom tla podrazumijevamo:

1. kvalitativna karakterizacija strukture
2. analizu veličine struktturnih agregata i
3. analizu stabilnosti struktturnih agregata

#### **5.2.2.2.1. Kvalitativna karakterizacija strukture**

Kvalitativna ili opisna karakterizacija strukture uključuje zapažanja vezana za oblik i veličinu i izraženost agregata. O kvalitativnoj karakterizaciji strukture već je pisano u poglavlju Terenska istraživanja i u uvodu u ovo poglavlje.

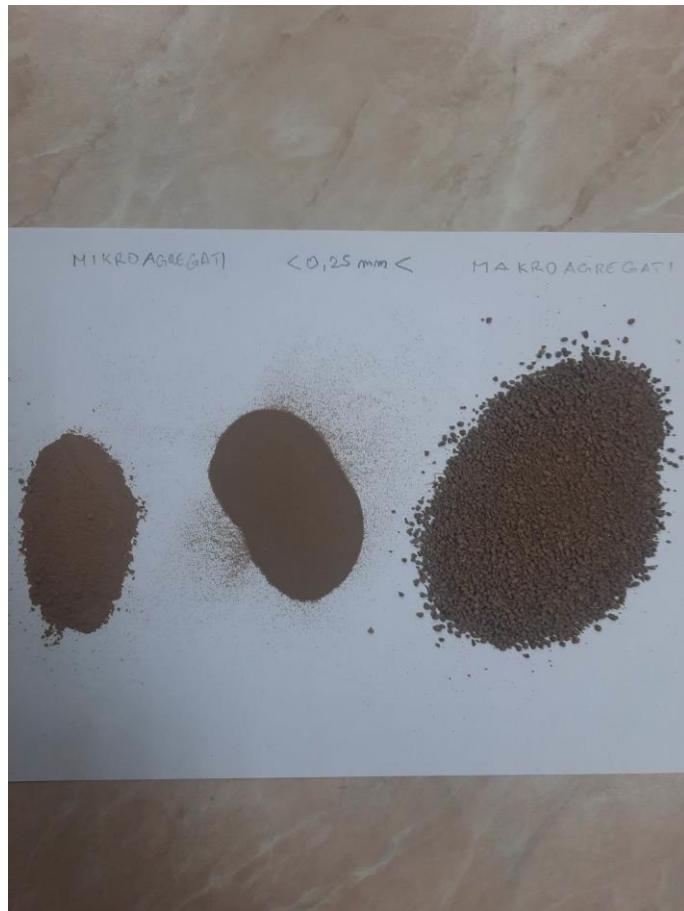
Kada govorimo o **izraženosti odnosno distinkciji agregata** u volumenu tla ona može biti [163]:

- slabo izražena,
- umjerena i
- jaka.

#### **5.2.2.2.2. Analiza struktturnih agregata po veličini**

Granica između mikroagregata i makroagregata uzima se da je 0,25 mm [3]. U praksi postoje razne podjele a vrlo česta je i detaljnija podjela agregata prema veličini na:

- sitne mikroagregate  $< 0,063$  mm
- mikroagregati do  $0,25$  mm,
- mezoagregati od  $0,25 - 2$  mm,
- makroagregati veći od  $2$  mm



**Slika 47: Desno makroagregati  $>0,250$  mm, u sredini mikroagregati  $0,250-0,063$  mm i lijevo mikroagregati  $<0,063$  mm (photo.M. Tvica)**

**Cilj** analize jeste utvrditi procentualno učešće pojedinih frakcija strukturnih agregata u ukupnom uzorku. Postoje dva načina izvođenja analize: suho prosijavanje i prosijavanje u vodi-mokro prosijavanje.

#### **5.2.2.2.3. Suhoprosijavanje strukturnih agregata po metodi Savinova [88]**

Po metodi Savinova izdvajamo frakcije strukturnih agregata po veličini prikazane u sljedećoj tabeli. U tabeli su pored dimenzija pojedinih agregatnih frakcija date i kolone za upis težine i procentualnog učešća pojedine agregatne frakcije:

Veličina struktturnih agregata u mm	Masa ( $m$ ) agregatne frakcije (g)	Učešće agregatne frakcije (%)
>10		
10 – 5		
5 – 3		
3 – 2		
2 – 1		
1 – 0,5		
0,5 – 0,25		
< 0,25		

**Postupak:** Od uzorka koji je donijet sa terena i nije sitnjen odvoji se metodom srednje probe 500 g tla. U međuvremenu pripremi se vibraciono sito sa standardnom garnitura sita i hvatačem uzorka na dnu. Zatim se uzorak srednje probe prenese u gornje sito i počne sa prosijavanjem. Vibraciono sito se podesi na broj vibracija i trajanje prosijavanja prema količini uzorka.

Nakon izvršenog prosijavanja na svakom situ zadržaće se dio uzorka koliko je dolična frakcija agregata zastupljena u masi tla.

**Obračun:** Odvagamo masu agregatne frakcije ( $m_f$ ) sa svakog sita i računamo njeno procentualno učešće po obrascu.

- m je masa u gramima (g)

Najpovoljniju strukturu imaju tla kod kojih je najzastupljenija frakcija od 0,5 – 3 mm (mrvičasta struktura).

#### **5.2.2.2.4. Mokro prosijavanje struktturnih agregata [88, 118]**

Cilj analize je da se odredi stabilnost struktturnih agregata u vodi, odnosno otpornost agregata na udare kiše. Kako su agregati veći od 5 mm nestabilni u vodi ovim postupkom se izdvajaju agregati veličine:

Veličina struktturnih agregata u mm	Masa ( $m$ ) aggregatne frakcije (g)	Učešće aggregatne frakcije (%)
> 3		
3 – 2		
2 – 1		
1 – 0,5		
0,5 – 0,25		
< 0,25		

**Postupak:** Izdvoji se 50 g uzorka iz srednje probe i prenese se u menzuru od 1000 ml i prelije sa 10-15 ml vode radi postepenog vlaženja uzorka. Kvašenje traje 5-6 minuta i potom se menzura napuni vodom do vrha i zatvori gumenim čepom.

Istovremeno pripremi se velika posuda (konbtejner, kanta) sa vodom u koju se stavi garnitura sita, tako da nivo vode u posudi premašuje ivicu najvišeg sita za 5-6 cm.

Zatim se menzura sa uzorkom okreće 10 puta gore dolje vodeći računa da sadržaj u menzuri (srednja proba) uvijek pređe put do dna prilikom svakog okretanja.

Prenošenje sadržaja iz menzure na sistem sita pod vodom se vrši na način da se menzura otčepi pod vodom i sačeka da cijeli sadržaj agregata iz menzure izade i pređe u sistem sita, što traje oko 1 minute. Nakon toga se ne vadeći menzuru iz vode, ona ponovo zatvori čepom. Znači zatvori se pod vodom.

Mokro prosijavanje uzorka se izvodi tako što se garnitura sita 10 puta podigne gore dole, vodeći računa da gornje sito sa uzorkom ne izade iznad površine vode u posudi.

Nakon prosijavanja vadi se svako sito pojedinačno. Sadržaj sita se prenosi u porculansku posudicu, sačeka da se zemlja istaloži a potom bistra voda iznad taloga odlije. Posuda sa aggregatima ostavi se par da na da se prosuši i zatim suši do konstantne težine.

**Obračun:** Poslije sušenja masa izdvojenih aggregatnih frakcija ( $m_{fr}$ ) se vaga i računa procentualno učešće svake izdvojene frakcije u vodi stabilnih agregata u odnosu na masu uzorka (50 g);

$$\% \text{ frakcije} = \frac{m_{\text{frakcije}} (\text{g})}{m_{\text{uzorka}} (50 \text{ g})} \cdot 100 \dots \%.$$

### **5.2.2.2.5. Određivanje stabilnosti struktturnih agregata**

Generalno za agronoma struktura tla se odnosi na kvalitet tla koji se odnosi na rast i produktivnost usjeva i može se odnositi na kapacitet zadržavanja vode, toplice i zraka, lakoću obrade tla i prikladnost za rast korijena i život mikroba.

Stabilnost agregata odnosi se na sposobnost agregata da se odupru vanjskim i unutrašnjim razornim silama. Djelovanje tih sila često razorno utiče na pore i/ili aggregate samo određenog hijerarhijskog reda, s tim da je uništenje određenog hijerarhijskog reda aggregacije popraćeno destrukcijom i svih viših redova.

Generalno, možemo identificirati dvije glavne vrste stabilnosti agregata:

- sposobnost tla da zadrži svoju strukturu pod djelovanjem vode i
- sposobnost tla da zadrži svoju strukturu pod djelovanjem vanjskih mehaničkih naprezanja; Mehanička stabilnost se odnosi na otpornost agregata na vanjske sile kao što su udar oruđa za obradu tla i točkova ili udari vjetra.

Zatezne sile koje se primjenjuju na aggregate određenog hijerarhijskog reda imaju tendenciju da izazovu površine loma po granici sa česticama i/ili aggregatima sljedećeg nižeg hijerarhijskog reda, dok te aggregate nižeg reda ostavljaju netaknutima [31]. To je generalno zato što unutrašnja snaga vezivanja među česticama opada sa povećanjem hijerarhijskog reda aggregacije.

**Metode direktnog snimanja struktturnih agregata** u presjeku tla i analiza tih slika mogu se široko klasificirati u tri grupe: (a) mikrografija tankog preseka, (b) skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM) i (c) rendgenska kompjuterizovana tomografija (CT) [163].

**Mikrograf tla** – ova metoda uključuje impregnaciju pora tla smolama niske viskoznosti (kao što su nezasićeni poliester, epoksid i metil metakrilat). Kako bi se osigurala potpuna zasićenost, ovaj proces se često provodi korištenjem suhog uzorka pod vakuumom. Mikrografija tankog presjeka tlase može se koristiti za direktno određivanje: veličine pora i raspodjele pora po veličini, geometrije pora, kao i veličine i oblika agregata.

**Skenirajuća elektronska mikroskopija – SEM**, u poređenju sa optičkom mikroskopijom, pruža daleko bolju rezoluciju, iako za mnogo manje vidno

polje. Stoga se primjena SEM-a najviše koristi za proučavanje mikrostrukture glinenih domena i njihove povezanosti s kationima i organskom tvari.

**2D rendgensko snimanje (kao i CT)** u strukturi tla je ograničeno zbog njegove nesposobnosti da razriješi složeni efekat u trećoj dimenziji. Na primjer, navodi se [163] da su Farrell i Greacen koristili medicinski rendgenski uređaj za proučavanje varijacija gustine tla oko penetrometra umetnutog u jednolično tlo. Ova zapažanja su kasnije korištena za razvoj konceptualnog i kvantitativnog modela interakcije tlo-korijen od strane Dextera.

#### **5.2.2.2.6. Određivanje stabilnosti strukturnih agregata u vodi**

Dokazano je da su strukturni agregati veći od 5 mm nestabilni u vodi. Razlikuje se raspadanje agregata pri brzom i sporom vlaženju [163].

Prilikom brzog vlaženja suhih agregata voda ulazi u svaki pojedinačni agregat kroz cijelu njegovu vanjsku površinu. To dovodi do slabljenja vanjskih slojeva agregata, dok istovremeno raste pritisak zraka zarobljenog unutar agregata. Ako i kada pritisak zarobljenog zraka premašuje snagu vanjskih navlaženih slojeva agregata, zrak izlazi razbijanjem agregata na manje fragmente. Agregati s visokim sadržajem organske materije manje su skloni ovom načinu razbijanja agregata zbog slabe hidrofobnosti organskih ostataka.

Sporo vlaženje može oslabiti aggregate stvaranjem mikropukotina. Mikropukotine mogu nastati zbog različitog izraženog bubrenja različitih čestica unutar agregata tla. To se dešava ili zbog neujednačenog vlaženja pojedinačnih agregata i/ili zbog unutarnjih heterogenosti. Mikropukotine se ne moraju uvijek spajati međusobom što bi dovelo do pucanja agregata, međutim, stvaranje mreže mikropukotina rezultira značajnim smanjenjem čvrstoće [31] čineći agregat podložnim poremećenju od strane drugih sila.

**Utvrđivanje stabilnosti makroagregata po Sekeri** [125, 158] vršimo na osnovu vremena i intenziteta raspadanja strukturnih agregata u vodi.

**Postupak:** Uzmemo 10 mrvica vazdušno suhog tla iz srednje probe, frakcije veličine 2-4 mm, stavimo u Petrijevu posudu, prelijemo destilovanom vodom i ostavimo da odstoji 10 minuta. Posudu nekoliko puta protresti lijevo-desno i ukrug ne podižući je sa stola. Nakon 10 minuta na osnovu slika zamuljivanja ocjejuje se postojanost odnosno stabilnost strukturnih agregata.

Prema Sekeri imamo 6 slučajeva (pogledaj prilog na kraju knjige):

1. mrvice se ne raspadaju ili samo malo na velike komade
2. mrvice se raspadaju u pretežno velike i malo malih komada
3. mrvice se raspadaju u jednakom omjeru na velike i male komade
4. mrvice se raspadaju na pretežno male komade
5. mrvice se raspadaju na samo male komade
6. manji komadi se raspadaju, dolazi do peptizacije uzorka tla

**Tabela 18. Slučajevi zamuljivanja prema Sekeri i opis stabilnosti i pojave u prirodi [125]**

Broj slučaja zamuljivanja prema Sekeri	Stabilnost strukturnih agregata	Pojava u prirodi
1-3	Vrlo dobra stabilnost	Pod pašnjacima i livadama
4-5		Plitki oranični sloj
5	Visok stepen raspadanja	
6	Veoma nestabilni str.agregati	Slana tla



**Slika 48. Slika zamuljivanja po Sekeri: mrvice se raspadaju na pretežno male komade (4) (foto Tvica M)**

### 5.2.2.3. Volumna (zapreminska) gustina tla – VSG

Volumna gustina tla, označava se sa  $\rho$  ili  $V_{sg}$ , (engl.: *bulk density* ili samo *density*,) je jedan od najznačajnijih fizičkih osobina tla koja se referira na strukturu tla.

Volumna gustina ili volumna specifična gustina predstavlja u stvari specifičnu gustinu strukturnog zemljišta, znači u njegovom prirodnom stanju sa porama tla. Definisana je kao suha masa ( $m$ ) jedinice volumena ( $V$ ) tla u prirodnom neporemećenom stanju. Za većinu primjena (u poljoprivredi, ekologiji, šumarstvu ili u tehničke svrhe), jezgro uzorka tla za mjerjenje volumne gustine se izvlači iz željene dubine tla pomoću metalnog cilindra.

Određuje se mjerjenjem mase ( $m$ ) osušenog tla u peći na  $105^{\circ}\text{C}$  i njegove zapremine ( $V$ ) (ISO 11272). Računa se kao odnos mase osušenog tla i poznate zapremine cilindra:  $\rho = m/V$ . Pošto se masa odnosi na osušeno tlo u peći na  $105^{\circ}\text{C}$  to je masa samo čvrste faze jer je masa zraka u porama zanemariva. Nadalje, ukupna zapremina osušenog tla u cilindru Kopeckog (zapremina čvrste faze plus zapremina pora ( $V_{uk} = V_{\epsilon f} + V_p$ )), je poznata i iznosi  $100 \text{ cm}^3$ . Obračunava se dakle kao odnos mase čvrste faze ( $m_{\epsilon f}$ ) u gramima i ukupne zapremine uzorka sa porama ( $V_{uk}$ ) u  $\text{cm}^3$ . U ovom slučaju vidimo da se radi o ukupnoj zapremini strukturnog tla ( $V_{uk}$ ) a ne kao što je slučaj kod specifične gustine čvrste faze ili prave specifične gustine ( $P_{sg}$ ) o zapremini samo čvrste faze ( $V_{\epsilon f}$ ).

**Princip:** Određuje se u neporemećenom uzorku u cilindru Kopeckog poznate ukupne zapremine ( $V_{uk} = 100 \text{ cm}^3$ ). Masa uzorka odnosno masa čvrste faze ( $m_{\epsilon f}$ ) se dobije vaganjem uzorka u cilindru nakon sušenja od čije vrijednosti se oduzme težina samog metalnog cilindra.

Kako je volumna gustina refleksija agregacije tla često se pristupa mjerenu volumne gustine samih grudvica zemlje. Gustoća makroagregata i grudvica tla može se odrediti mjerjenjem mase pojedinačnih grudvica i zapremine istih. Masa grudvice se odredi vaganjem nakon što se osuše na  $105^{\circ}\text{C}$ . Zapremina grudvice zemlje se određuje na osnovu zapremine vode koju grudvica istisne kada je potpuno uronjena u vodu. Prethodno se grudvica zemlje obloži s tankim slojem voska kako bi se spriječio ulazak vode.

Računa se prema formuli:

$$V_{sg} = \frac{m_{\epsilon f} (\text{g})}{V_{\epsilon f} + V_p (\text{cm}^3)} \dots (\text{g/cm}^3 \text{ ili t/m}^3)$$

Ukupna zapremina uzorka ( $V_{uk}$ ) je praktično zapremina uzorka strukturnog tla u neporemećenom stanju kakav smo uzeli iz prirodnog tla u cilindru

Kopeckog. U takvom uzorku ukupnu zapreminu predstavlja zapremina čvrste faze ( $V_c$ ) plus zapremina pora ( $V_p$ ).

**Postupak:** Cilindar Kopeckog poznate zapremine ( $100 \text{ cm}^3$ ) sa uzorkom u strukturnom, neporemećenom stanju se dobro očisti od zemlje priljepljene na vanjski zid cilindra i poklopaca. Skinemo poklopce i stavimo cilindar sa uzorkom (bez poklopaca) u peć za sušenje uzoraka da se suši do konstantne mase (njajčešće tri dana, zavisno od stanja vlage u uzorku) na temperaturi od  $105^\circ\text{C}$ . Nakon sušenja vaga se cilindar zajedno sa uzorkom a zatim sam očišćen cilindar bez uzorka. Treba paziti da prilikom sušenja uzorka u peći ne dođe do osipanja suhog uzorka iz cilindra.

#### Obračun:

- Masa poslije sušenja uzorka sa cilindrom bez poklopaca – A ... (g).
- Masa samog cilindra bez poklopaca – B ... (g).

Zapremina cilindra Kopeckog ( $V$ ) je unaprijed poznata, standardna i iznosi  $100 \text{ cm}^3$ .

$$V_{sg} = \frac{A - B \text{ (g)}}{V \text{ (cm}^3\text{)}} \dots \text{ g/cm}^3$$

Generalno, vrijednosti *zapreminske gustine* su dobar pokazatelj zbijenosti tla, odnosno poroznosti, strukture, i pomažu u razumijevanju mogućnosti ukorijevanja (prodiranja biljnog korijena). Ukoliko se vrijednosti *volumne gustine* približuju *specifičnoj gustini čvrste faze* to je tlo zbijenije. Što su vrijednosti *zapreminske gustine* manje u odnosu na *pravu specifičnu gustinu* to je tlo manje zbijeno i povoljnije strukture.

Prosječna vrijednost  $V_{sg}$  u oraničnom sloju zemljišta iznosi  $1,3\text{-}1,5 \text{ g/cm}^3$ .

Volumna gustina ukazuje na zbijenost zemljišta. Što su veće vrijednosti  $V_{sg}$  tlo je zbijenije. Vrijednosti  $V_{sg}$  u površinskom horizontu dobrih strukturalnih tala se kreću od  $1,1\text{-}1,3 \text{ g/cm}^3$ . U teškim zbijenim zemljištima vrijednosti mogu ići i do  $2,0 \text{ g/cm}^3$ , znači da se približavaju vrijednosti specifične gustine čvrste faze. Generalno, površinski sloj zemljišta koji je manje zbijen, sa većom poroznošću i bolje strukture ima manje vrijednosti  $V_{sg}$  od dubljih zbijenih slojeva zemljišta koji su uz to bestrukturni i ukoliko se radi o i ujednačenoj teksturi po dubini, sa manjim porozitetom. Smatra se da kada vrijednost  $V_{sg}$  pređe vrijednost od  $1,7 \text{ g/cm}^3$  korijen ne može da prodire u tako zbijen sloj zemljišta. To je pojava poznata i kao plužni taban koja se pojavljuje u dubini zemljišta na čijim se površinama koristi teška poljoprivredna mehanizacija.

Pored pobrojanog vidimo da Vsg zavisi i od tekturnog sastava i sadržaja humusa. Veći sadržaj humusa utiče povoljno na agregaciju i povećava porozitet odnosno rahlost površinskih slojeva, te smanjuje vrijednost Vsg. Glinovita tla mogu imati veliku poroznost što generalno smanjuje vrijednosti Vsg ali to ne podrazumijeva dobru diferencijalnu poroznost (povoljan odnos makro, srednjih i mikropora) odnosno povoljnu strukturu.

#### **5.2.2.4. Porozitet tla (P)**

Ukupnu zapreminu zemljišta u prirodnom strukturnom stanju na pr. na njivi ili u uzorku tla uzetom u cilindru čine zapremina čvrste faze i zapremina pora. Pore zemljišta su prostor u zemljištu koji je ispunjen zrakom ili vodom. Pore su ujedno i mjesto ukorijenjavanja biljaka ali i životni prostor organizama u tlu.

Već je navedeno kako na mikroskopskoj slici zemljišta čvrste čestice pojednostavljeni govoreći izgledaju kao sfere (kuglaste, zaobljene) ili kockaste (uglaste), dok praznine (pore) mogu izgledati kao cilindrična cijev ili prorez (pukotina) između dvije ravne površine. Pore znači predstavljaju vrlo razvedeni sistem međusobno povezanih cijevčica i pukotina (proresa) različitih dimenzija koje funkcionišu kao složeni sistem sličan kardiovaskularnom sistemu kod čovjeka. Sistem povezanih cijevčica i pukotina u tlu povezan je i sa atmosferom.

Razlikujemo opštu ili ukupnu poroznost koja se odnosi na ukupnu zapreminu pora i diferencijalnu poroznost koja se odnosi na odnos zapremina sitnih, srednjih i krupnih pora.

Vidjeli smo da strukturu zemljišta čine čestice tla prostorno organizirane u agrete različitih oblika, veličina i rasporeda, tvoreći istovremeno sistem povezanih i isprepletenih pora različitih veličina. Hjerarhijski model agregacije tla (od pločica gline do većih flokula domena gline, pa dalje do klastera i njihove agregacije u mikroaggregate te sljepljivanja mikroagregata u makroagregata) takođe podrazumijeva postojanje hjerarhijskih kategorija pora. Postoje različite podjele pora prema veličini i funkciji u zavisnosti od predmeta istraživanja.

Za tumačenje hidroloških procesa u tlu (sile držanja vode i pokretljivost vode u porama) već je predstavljena Hillelova kategorizacija pora [72]:

1. mikropore, manje od 1  $\mu\text{m}$  koje drže (gotovo nepokretnu) vodu vezanu adsorpcijskim silama,
2. kapilarne pore od nekoliko mikrometara do nekoliko milimetara koje drže vodu koja je podložna kapilarnim zakonima i kreće se u skladu s

Darcyjevim i Buckingham-Darcyjevim zakonima. Voda koja se nalazi u ovim porama predstavlja najveći dio biljci dostupne i pokretne vode. Zbir mikropora i kapilarnih pora se također može kategorizirati kao među-agregatne i unutar-agregatne pore [72, 111].

3. makropore – pukotine kod težih tala ili hodnici glista za brzu infiltraciju vode od kiše ili navodnjavanja.

Ove kategorizacije pora tla predstavljene su u modelima toka i transporta koristeći višestruke preklapajuće kontinuume. Modeli dvostrukе poroznosti i/ili dvostrukе propusnosti tla za vodu, koji razdvajaju među-agregatne i unutar-agregatne pore, najčešći su oblici takvih modela [36].

U nastavku, tabela 19. vidimo podjelu pora prema veličini u funkciji procjeđivanja vode koju su dali Sekera i Bodt.

**Tabela 19. Podjela pora po veličini prema Sekera i Bodt [125]**

Oznaka pora	Prečnik pora u mikronima ( $\mu\text{m}$ )	Funkcija
Krupne	$> 50$	Za brzo ocjeđivanje vode
	$50 - 10$	Za lagano cijedjenje
Srednje	$10 - 0,2$	Retenciona voda
Sitne (fine)	$< 0,2$	Vezana voda

Nadalje u kontekstu podjele pora, Elliott i Coleman [41] a zatim i Six [143] su predložili sljedeću kategorizaciju pora koja može biti korisna u objašnjavanju prostorne segregacije sljedećih grupa organizama u tlu:

- a. makropore, koje naseljavaju mikro artropode,
- b. među-makroagregatne pore sa nematodama,
- c. unutar-makroagregatne ili među-mikroagregatne pore, koje naseljavaju protozoe, male nematode i gljive, i
- d. unutar-mikroagregatne pore sa bakterijama.

Ovi koncepti su veoma moćni jer se mogu koristiti i za uvođenje prostorne segregacije biohemijskih procesa.

#### **5.2.2.4.1. Određivanje ukupne poroznosti tla**

Poroznost ( $\phi$ ) ili ( $P$ ) je mjeru udjela pora u ukupnoj zapremini tla. Određuje se mjeranjem ukupne zapremine datog uzorka tla i zapremine njegovih pora.

Vidjeli smo da korištenjem zračnog piknometra za mjerjenje zapremine čvrste faze u cilindru kopeckog ( $100 \text{ cm}^3$ ) moguće je jednostavno obračunati

i zapreminu pora tako da od ukupne zapremine cilindra ( $V_{uk}$ ) oduzmemmo izmjerenu zapreminu čvrste faze ( $V_{cf}$ ) [182]:

$$P = V_{uk} - V_{cf}$$

Međutim,  $\phi$  ili  $P$  - porozitet se najčešće određuje računski. Kada je poznata prosječna specifična gustina čvrste faze  $P_{sg}$  (koja je tipično oko  $P_{sg} = 2,65 \text{ g cm}^{-3} = 2650 \text{ kg m}^{-3}$ ), tada se poroznost može lako obračunati iz zapreminske gustine ( $V_{sg}$ ) kao [163] :

$$\phi \text{ ili } P = 1 - P_{sg}/V_{sg}.$$

### Princip određivanja/obračuna:

Ukupna poroznost se izračunava u %<sub>vol</sub> od ukupne zapremine tla. Ukupna poroznost je u stvari ukupna zapremina pora izražena u  $\text{cm}^3$ , međutim radi lakše predstave poroziteta nekog tla, ta zapremina pora se stavlja u odnos sa ukupnom zapreminom zemljišta i na taj način nam daje uvid koliko procenata od ukupne zapremine zemljišta zauzimaju pore. Znači poroznost zemljišta predstavlja odnos zapremine pora ( $V_p$  u  $\text{cm}^3$ ) prema ukupnoj zapremini zemljišta ( $V_{uk}$  u  $\text{cm}^3$ ) i vrijednost se izražava u volumnim ili zapreminskim procentima (%<sub>vol</sub>):

$$P (\%) = \frac{V_p (\text{cm}^3)}{V_{uk} (\text{cm}^3)} \cdot 100$$

Međutim, kako je zapreminu pora iz gornje jednačine teško praktično odrediti, iz tog razloga vrijednost poroznosti zemljišta se dobiva obračunom preko razlike prave specifične gustine ( $P_{sg}$ ) i zapreminske specifične gustine ( $V_{sg}$ ) podijeljene sa pravom specifičnom gustinom.

$$P (\%) = \frac{P_{sg} - V_{sg}}{P_{sg}} \cdot 100$$

**Tabela 20. Podjela tala prema poroznosti po Gračaninu [54]**

Oznaka poroznosti	Ukupan sadržaj pora u %
1. Vrlo porozno	> 60
2. Porozno	60 – 45
3. Slabo porozno	45 – 30
4. Vrlo slabo porozno	< 30

Povećanjem stepena disperzije čestica tla (glinovitija tla) povećava se poroznost zemljišta zbog velike zapremine sitnih pora manjih od 0,2 mikrona, međutim u takvima zemljištima makropore su jako slabo

zastupljene. Nasuprot glinovitim, u pjeskovitim tlima povećan je sadržaj makropora većih od  $50 \mu\text{m}$  a smanjen sadržaj sitnih i srednjih. Sa povećanjem sadržaja humusa, odnosno kod struktturnih zemljišta izvršena je kvalitetna diferencijacija pora odnosno ostvaren je najpovoljniji odnos sitnih, srednjih i makropora. Nije dovoljno poznavanje samo ukupnog sadržaja pora, nego i procentualne zastupljenosti pojedinih pora po veličini tzv. **diferencijalna poroznost**.

#### **5.2.2.4.2. *Određivanje diferencijalne poroznosti zemljišta***

Diferencijalna poroznost se odnosi na zastupljenost pojedinih grupa pora razvrstanih po dimenzijama (sitne ili mikropore, srednje ili kapilarne i krupne ili makropore). Sve pore imaju svoju ulogu u tlu.

Naročito je važno poznavati diferencijalnu poroznost zemljišta, odnosno % zastupljenost pojedinih vrsta pora prema veličini i funkciji u ukupnoj zapremini tla. Ukupni porozitet ne govori mnogo o vodno-zračnim svojstvima zemljišta. Zato je potrebno znati procentualnu zastupljenost krupnih, srednjih i sitnih pora, tj. diferencijalnu poroznost zemljišta.

Pri kapacitetu zemljišta za držanje ili retenciju vode, sitne i srednje pore su ispunjene vodom. Voda u njima se drži i kreće pod uticajem adsorpcijskih sila (slabo pokretna adsorbovana voda koja u vidu opne okružuje zemljišne čestice i biljke je ne mogu usisati) i kapilarnih sila (pokretna kapilarna voda u srednjim porama koja je pristupačna biljci).

Pri gore pomenutom kapacitetu zemljišta (kapacitet za držanje vode) makropore ili krupne pore su ispunjene zrakom i voda u njima se rijetko zadržava jer se procjeđuje pod uticajem gravitacije, znači zaslужne su za propusnost zemljišta za vodu. Pored uloge u procjeđivanju, krupne pore predstavljaju i spremište zraka odnosno  $\text{O}_2$ , neophodnog za disanje korijena i organizama u tlu. Postoji jedan obrazac za zemljiše da je zemljište dobro snabdjeveno  $\text{O}_2$  ako je sadržaj krupnih pora odnosno kapacitet za zrak  $\geq 15\%$ , odnosno da se nedostatak  $\text{O}_2$  javlja već kod kapaciteta za zrak od 5%.

**Princip određivanja:** Voda tla može da ispunjava sve grupe pora prema veličini, znači i sitne i srednje i krupne pore. Princip određivanja diferencijalne poroznosti zasniva se na poznavanju sila držanja vode u pojedinoj grupi pora. Eksperimentalno je utvrđena relacija između veličina pora i sila koje drže vodu u tim porama.

**Tabela 21. Podjela pora prema veličini i sili držanja vode u pojedinim porama [136]**

Vrsta pora	Prečnik pora ( $\mu\text{m}$ )	Sila držanja vode u cm visine stupca vode	pF
Krupne pore za brzo procjeđivanje	> 50	< 60	0 - 1,8
Krupne pore za sporo procjeđivanje	50 - 10	60 - 300	1,8 - 2,5
Srednje pore	10 - 0,2	300 – 15.000	2,5 - 4,2
Sitne pore	< 0,2	> 15.000	>4,2

Znači ako vodom zasićeni uzorak tla stavimo u aparat pod pritiskom, pri određenoj vrijednosti pritiska istisnuće se voda samo iz određene grupe pora. Zapremina vode, odnosno masa istisnute vode odgovara zapremini pora određene veličine, jer težina  $1\text{cm}^3$  vode iznosi 1 g. Na pr. ako vodom zasićen uzorak tla izložimo pritisku od 15.000 cm vodenog stuba ili 15 atm (atmosfera), tada će sva voda koja se drži slabijim silama od pomenutih 15 atm, biti istisnuta iz uzorka tla. To znači da će se teoretski, voda u uzorku tla zadržati samo u sitnim porama a iz srednjih i krupnih pora biće istisnuta i te pore će ispuniti zrak.

#### **Postupak [118]:**

Zasitimo uzorak vodom do maksimalnog kapaciteta i izvagamo ga i postavimo u aparat pod pritiskom (pogledaj sljedeće poglavlje Vodon-fizička svojstva tla). Primjenom najmanje sile od 60 cm vodenog stuba ili 0,06 atm ili 0,006 MPa, istisnućemo vodu iz krupnih pora  $> 50 \mu\text{m}$  za brzo procjeđivanje vode. Nakon toga ponovo vagamo uzorak, a razlika u težini predstavlja težinu vode istisnute iz krupnih pora  $> 50 \mu\text{m}$ . Pošto težina 1 g vode približno zauzima prostor od  $1 \text{ cm}^3$  (specifična težina vode), težina istisnute vode odnosno razlika u mjerjenjima približno će odgovarati zapremini krupnih pora  $> 50 \mu\text{m}$ . Postupak se dalje ponavlja sa većim pritiscima.

Diferencijalna poroznost nam pomaže bolje razumjeti koncept pristupačne vode biljci. Za pristupačnu vodu kažemo da se nalazi u srednjim porama u kojima dolazi do pojave kapilariteta. Tako, razumijemo da iako vrlo porozna zemljjišta, glinovita zemljjišta mogu imati manje biljci pristupačne vode u odnosu na ona manje porozna. To se povezuje sa manjim udjelom sitnih i

srednjih pora te velikim udjelom sitnih pora u glinovitim zemljištima, u kojima se nalazi biljni nepristupačna voda jer se drži silama većim od usisne moći korijena. Jednako tako razmijemo zašto i u pjeskovitim tlima imamo takođe male vrijednosti pristupačne vode biljni. Naime, zbog visokog udjela krupnih pora kroz koje se voda gravitacijski procjeđuje i relativno brzo gubi iz rizosfernog sloja, u pjeskovitim tlima nalazimo manji udio sitnih i srednjih pora koji bi držali vodu svojim silama.

Retencionna kriva ili pF kriva (određivanje će se obraditi u poglavljju Vodnofizička svojstva tla) opisuje količinu vode koja se može zadržati u tlu različitim silama (kapilarnim). Određivanje retencione krive uključuje istovremeno mjerjenje sadržaja vode i potencijala vode (kapilarni pritisak) pri različitim procentima vlažnosti. Dok su poroznost i volumna gustina mjere ukupnog volumena pora, kriva zadržavanja vode mjera je raspodjele pora po veličini (diferencijalni porozitet). Kriva zadržavanja vode kod strukturiranih tla povezana je sa hijerarhijskom prirodnom agregacije tla i rezultirajućeg prostora pora. Tla sa dobro definisanim makroagregatima pokazuju retencionu krivu sa uočljivom karakteristikom dvostrukog grbe [163].

### 5.2.3. VODNO-FIZIČKE OSOBINE TLA

Sposobnost zemljišta da kontinuirano snabdijeva biljku sa vodom predstavlja jedan od 4 glavnih elemenata plodnosti zemljišta (uz snabdijevanje biljke hranivima, zrakom i toplotom). U kopnenim ekosistemima biljni svijet se uglavnom vodom snabdijeva iz tla. Tlo sa svojim porama predstavlja jedan veliki rezervoar za vodu.

Voda u zemljištu nalazi se u porama u vidu vodenog rastvora, mada se ona pojavljuje i u čvrstom obliku kao led (povoljno za stvaranje mrvičaste strukture) i kao vodena para (u tlu je 98% zasićenost pora vodenom parom). Osnovni izvor snabdijevanja tla vodom su oborine, gdje 1 mm oborina predstavlja jedan litar oborina po kvadratnom metru ( $1 \text{ l/m}^2$ ) ili  $10.000 \text{ l/ha} = 10 \text{ m}^3$  vode po hektaru. Na pr.: ako je na neku površinu palo 25 mm kiše, to znači da je input vode oborinama u zemljište tom kišom iznosio  $25 \text{ l/m}^2$  ili  $250.000 \text{ l/ha} = 250 \text{ m}^3$  vode po hektaru.

Kada govorimo o vodi u zemljištu tada mislimo na zemljišnu otopinu ili rastvor. Voda tla i rastvorene materije grade istovremeno:

- pravi rastvor (rastvoreni kationi:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$ ; anioni  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$ ; rastvoreni gasovi u vodi  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ );
- koloidni rastvor (koloidna frakcija gline, oksidi i hidroksidi Fe i Al, glineno-humusni koloidni kompleksi i organski koloidi);

- suspenziju (suspendovana glina, prah i pjesak)

Uloga vode je višestruka ali po značaju se izdvajaju uloga vode kao jednog od osnovnih faktora geneze zemljišta (učestvuje u svim pedogenetskim procesima) i jednog od glavnih elemenata plodnosti zemljišta (snabdijevanje biljaka vodom). Promjene u sadržaju vode u tlu i njegov energetski status utiče na mnoga fizička svojstva tla, uključujući čvrstoću, zbijenost i propusnost, i može uzrokovati promjene u volumnoj gustini tla koje bubri. Karakteristike i količine tečne faze utiču i na gasovitu fazu tla koja takođe ispunjava pore, na stope razmjene između ovih faza, kao i na druga važna svojstva tla kao što je hidraulička provodljivost koja upravlja brzinom vode i protokom rastvorenih hemikalija.

Sposobnost zemljišta da vlastitim silama zadrži vodu u porama i da je učini dostupnom biljci predstavlja jednu od njegovih najvažnijih osobina i ekoloških funkcija. Već smo istakli da pore predstavljaju vrlo razvedeni sistem međusobno povezanih cijevčica različitih dimenzija koje, slikovito rečeno, funkcionišu kao složeni sistem spojenih posuda. Kada su ispunjene vodom govorimo o podzemnoj i kapilarnoj vodi a izvan ovog područja, postoji adheziona voda koja obavlja čvrste čestice tla. U uslovima kada su sve pore zasićene vodom, u kontekstu kretanja vode, tada govorimo o kretanju vode u zasićenom tlu, a u uslovima postojanja porne vode (adsorpcione i kapilarne) govorimo o kretanju vode u nezasićenom tlu.

Poznavanje vodno-fizičkih svojstava tla predstavlja jedan od prvih koraka za upoznavanje proizvodnih karakteristika zemljišta u cilju određivanja pogodnosti za pojedinu poljoprivrednu proizvodnju i poduzimanja mogućih agrotehničkih, pedomeliorativnih i hidromeliorativnih zahvata. U objašnjenju ponašanje vode u tlu koriste se dva odnosno tri srodna koncepta:

1. količina vode u tlu ili vlažnost ili vlaga tla,
2. sile držanja vode u tlu i
3. vodni potencijal tla.

Sile držanja vode i vodni potencijal su srodni koncepti tumačenja stanja vode u tlu i to na bazi energetskog stanja vode i kao takvi često se koriste zajedno ili se isprpeliču u tumačenjima. Sva tri koncepta su preduslov za kvantificiranje i upravljanje skladištenjem vode u tlu, za predviđanja u vezi sa brzinama i smjerovima toka vode i transporta rastvorene materije, za korištenje tla u građevinskim radovima i za mnoge druge svrhe. Ovi koncepti razumijevanja i tumačenja dinamike vode u tlu povezani su jedni s drugima kroz funkciju poznatu kao *karakteristika vode tla* (SWC – engl: *soil water characteristic*)

### **5.2.3.1. Količina vode u tlu ili vlažnost tla**

Snabdijevanje biljaka vodom na prvom mjestu zavisiće od sadržaja vode u tlu ili vlažnosti tla koja se izražava u procentima masenim ili procentima volumnim.

Najčešće se predstavlja kao odnos mase vode u tlu i mase tog istog tla osušenog na 105 °C (kada se izražava u masenim procentim - %<sub>mas</sub>), a može i kao odnos mase vode u nekom tlu i volumena tog tla (kada se izražava u volumnim procentima - %<sub>vol</sub>) [111]. Neke od metoda određivanja sadržaja vode u tlu su: gravimetrijska metoda, metoda određivanja sadržaja vode u tlu pomoću neutronske sonde, dielektrična metoda i metoda kapaciteta [23].

Još jedna od mjera u upotrebi kada govorimo o količini vode u tlu je i *stepen zasićenosti tla*  $\Theta$ , gdje se u odnos stavljuju zapremnina pora ispunjenih vodom  $\theta_V$  i volumetrijski sadržaj vode u tlu u uslovima potpuno zasićenih vodom  $\theta_{Vs}$  [111]:

$$\Theta = \theta_V / \theta_{Vs}$$

Ovaj indeks se kreće od nule u potpuno suhom tlu do jedinice u tlu potpuno zasićenim vodom. Stepen zasićenja se također obično naziva efektivnom zasićenošću ili relativnim sadržajem vode.

#### **5.2.3.1.1. Određivanje trenutne vlažnosti gravimetrijski**

Predstavlja sadržaj vode u tlu u trenutku uzimanja uzorka -  $Tv$ . Postoje direktni i indirektni metodi mjerjenja vlažnosti tla.

Najdirektniji metod određivanja vlage u tlu je gravimetrijski koji stavlja u odnos masu vode u tlu i masu absolutno suhog tla ili zapreminu uzorka tla. Može se izraziti u masenim (ISO 11465) i volumnim procentima [111].:

$$Tv \%_{mas} = \frac{\text{Masa vode}}{\text{Masa suhog tla (105°C)}} \cdot 100$$

$$Tv \%_{vol} = \frac{\text{Masa vode}}{\text{V ukupna}} \cdot 100$$

Vrijednost vlage u volumnim procenatima može se dobiti i množenjem masenih procenata vlažnosti sa volumnom gustinom  $Vsg$ :

$$Tv (\%)_{vol} = Tv (\%)_{mas} \cdot Vsg$$

U laboratoriji se vlažnost uzorka određuje **gravimetrijski**, stavljanjem u odnos gubitak vode sušenjem (razliku u masi vode prije i poslije sušenja uzorka tla na 105 °C) i mase apsolutno suhog uzorka (ili poznate zapremine uzorka).

**Postupak:** Pri određivanju trenutne vlažnosti tla potrebno je uzorak uzet sa terena izvagati odmah po dolasku u laboratorij. Za uzorkovanje tla na terenu se koriste specijalne limene kutijice sa poklopcom u koje stavimo ispitivani uzorak tla i vršimo mjerjenje težine što je prije moguće. Jednako tako mogu poslužiti i uzorci donijeti sa terena u zaklopljenim cilindrima Kopeckog (uzeti sa različitih dubina tla) koje je potrebno odmah izvagati po unosu u laboratoriju.

U našem slučaju masa vode pri momentnoj vlažnosti odredićemo iz razlike u mjerenu mase cilindra Kopeckog sa uzorkom odmah po dolasku u laboratorij i mase nakon sušenja cilindra sa uzorkom na 105 °C, odnosno iz razlike u masi uzorka tla donijetog sa terena i apsolutno suhog tla. Masa apsolutno suhog tla se dobije iz razlike u masi cilindra sa uzorkom nakon sušenja i mase samog cilindra bez uzorka. Zapremina tla (V) je jednaka zapremini cilindra Kopeckog (100 cm<sup>3</sup>).

### Obračun:

- broj kutijice/cilindra sa uzorkom u neporemećenom stanju
- masa kutijice/cilindra sa uzorkom donijetim sa terena sa trenutnim sadržajem vlage A, (g)
- masa cilindra sa suhim uzorkom, poslije sušenja na 105 °C, B... (g)
- gubitak mase sušenjem trenutne vlage C = (A - B) ... (g)
- masa same kutijice/ cilindra (D) ... (g)
- masa suhog uzorka E= (B – D) ... (g)
- zapremina uzorka tla V, poznata ako se radi o cilindru Kopeckog (V=100 cm<sup>3</sup>)

Obračun trenutne vlažnosti -*Tv* izražene u volumnim i masenim procentima:

$$Tv \%_{mas} = \frac{\text{Gubitak sušenjem tren.vlage}}{E \text{ (masa suhog uzorka)}} \cdot 100$$

$$Tv \%_{vol} = \frac{\text{Gubitak sušenjem tren.vlage}}{V \text{ (volumen uzorka u cilindru)}} \cdot 100$$

Gravimetrijska metoda, iako najdirektnija metoda mjerena vlažnosti tla, nije se pokazala dovoljno praktičnom prilikom praćenja postotka vlage u tlu u smislu određivanja trenutka uključivanja i isključivanja sistema za navodnjavanje parcele.

Ipak, gravimetrijska metoda se koristi za kalibraciju različitih senzora i mjernih uređaja koji se koriste u polju a povezani su sa praćenjem % vlage u tlu.

#### **5.2.3.1.2. Mjerenje/praćenje trenutne vlage u poljskim uslovima**

Već smo istakli da iako najdirektnija metoda za određivanja vlažnosti tla, gravimetrijska metoda nije dovoljno praktična za praćenje % vlažnosti u polju. Postoje razni instrumenti i senzori tj. indirektne metode za mjerenje i praćenje trenutne vlage tla u polju, ali uz prethodno urađene kalibracijske krive koje stavljuju u relaciju vlažnost tla određenu gravimetrijskom metodom i očitanja na brojčanicima tih mjernih instrumentata za praćenje vlage tla.

**Neutronska metoda** praćenja vlažnosti tla, se zasniva na otporu koji  $H^+$  joni vode stvaraju neutronima koji se emituju iz specijalnih izvora. Ovo je indirektna metoda koja se obično koristi za ponavlajuća terenska mjerenja volumetrijskog sadržaja vode (% vol) [56]. Zasnovan je na sklonosti  $H^+$  jezgri za usporavanje (termalizaciju) brzih neutrona visoke energije. Tipični neutronska mjerač vlage tla sastoji se od: (1) sonde koja sadrži radioaktivni izvor koji emituje brze ( $1600 \text{ km s}^{-1}$ ) neutrone visoke energije (2–4 MeV), kao i detektor sporih neutrona; (2) skaler za elektronsko praćenje fluksa sporih neutrona; i opcionalno (3) baza podataka (engl: *data logger*) koji olakšava skladištenje i pronalaženje podataka.

Prosječni gubitak kinetičke energije neutrona, dakle relativni broj sporih neutrona, je proporcionalan količini  $H$  jezgri u okolnom tlu. Primarni izvor  $H$  u tlu je voda pod prepostavkom se da su ostali izvori  $H$  u datom tlu konstantni.

Za korištenje ovog uređaja potrebno je izvršiti kalibraciju vlažnosti tla i očitanja na skaleru (brojaču). Kalibracija neutronske sonde je potrebna kako bi se uzeli u obzir i pozadinski izvori  $H$  i drugi lokalni efekti (volumna gustina tla, prigušivači neutrona u tragovima)

**Tenziometri** vrše mjerenje sila isisavanje vode (tenzije) iz cijevi tenziometra od strane tla, izražene u jedinicama pritiska kao potencijalna energija vode ili vodni potencijal. Što je u tlu manje vlage, to su jači podpritisci ili veće sile usisavanja.

Slično je i kod **gipsanih blokova** sa ugrađenim elektrodama spojenih sa mernim instrumentom za mjerjenje električnog otpora u tlu. Princip se zasniva mjeranjem električne provodljivosti tla koja direktno zavisi od sadržaja vode u tlu. Što je više vode u tlu manje su vrijednosti električnog otpora na mernom instrumentu.

Ovako praćeno stanje dinamike vode u tlu (očitanja) putem tenziometra (prati podpritisak ili silu usisavanja vode iz tenziometra pri različitim stanjima vlage u tlu) i gipsanih blokova (prati vrijednosti električnog otpora pri različitim stanjima vlage u tlu) se prije puštanja u rad preko kalibracijskih krivi prevodi u % vlage u tlu.

#### **5.2.3.1.3. Mjerjenje/praćenje vlažnosti tla metodom dielektrične konstante**

U okviru ove metode praćenja stanja vlage u tlu koriste se radarska reflektometrija (TDR – engl: *time domain reflectometry*) i frekvencijska reflektometrija (FDR – engl: *frequency domain reflectometry*) [111].

**TDR** ili radarska reflektometrija se smatra dosta preciznom metodom za procjenu sadržaja vode u tlu. Princip rada je u praćenju vremena koje je potrebno da elektromagnetni signal prođe kroz čelične senzore zabijene u tlo i reflektuje se nazad prema receptoru. Razlika u vremenu to jest brzina povratnog signala povezana je sa *dielektričnom konstantom* a koja je opet pod uticajem sadržaja vode u tlu.

*Dielektrik ili izolator* (eng. *dielectric*, njem. *Isolator*) je tvar ili medij koji ne vodi električnu struju, to jest vakuum i materija koja sadrži zanemariv broj slobodnih elektrona i iona koji se mogu kretati pod uticajem vanjskog električnog polja.

*Dielektrična konstanta ili permitivnost* ( $\epsilon$ ) jest mjera sposobnosti neke materije da smanji elektrostaticke sile između dva nabijena tijela. Što je vrijednost manja, smanjenje je veće.

Vrijednost dielektrične konstante opada s porastom temperature [48].

**Tabela 22. Dielektrična konstanta za različite materijale pri 20 °C [48].**

vakuum	1
zrak	1.00058
staklo	3
etanol	25
voda	81

Prednosti ove tehnologije su njegova preciznost, minimalno remećenje strukture tla, relativna neosjetljivost na pH tla, istovremena mogućnost mjerjenja električnog konduktiviteta (EC) tla, te činjenica da nije potrebno baždarenje za određene tipove tla. Pod nedostacima se smatraju visoka cijena opreme, ograničena primjene u uslovima s visokim sadržajem soli ili gline u tlu te relativno mala osjetljivost na promjene u sadržaju vlage u tlu.

**FDR** metoda ili frekvencijska reflektometrija funkcioniše na sličnom principu kao i TDR metoda. Takođe se bazira na posmatranju elektromagnetskog signala, ali u smislu promatranja napona. Uzrok razlike između određenog napona i napona reflektiranog iz senzora je dielektrična konstanta koja je u vezi s količinom vlage u tlu.

**TDT** (engl: *time domain transmission*) senzori nedavno su se pojavili [6] kao jeftini, samostalni senzori koji imaju uporedive mjerne karakteristike sa TDR-om (prate vrijeme protoka signala). Koristeći digitalnu tehnologiju (SDI-12), oni predstavljaju novu generaciju multifunkcionalnih senzora vlage u tlu, koji također mogu odrediti električni konduktivitet (ECa) i temperaturu tla.

**Geofizičke metode prostornog praćenja sadržaja vode na daljinu** su se razvile iz potreba za mjeranjem sadržaja vode na većem polju ili malom sливу [177]. Koriste se za premošćavanje jaza između tačkastih mjerjenja korišćenjem senzora kao što je TDR, i prostornih mjerjenja korišćenjem metoda daljinske detekcije [131]. Geofizičke metode kao što su, snimanje električne otpornosti (ERI – engl: *electrical resistivity imaging*) i elektromagnetna indukcija (engl: *electromagnetic induction* - EMI) se koriste za određivanje prostornih obrazaca sadržaja vode. Za razliku od mnogih tačkastih senzora, kod kojih su rad i interpretacija postali rutinski, geofizičke metode i dalje zahtijevaju čvrst stepen korisničke vještine kako u radu tako i u interpretaciji.

Međutim, oni nude prednosti pružanja prostorno gušćih podataka i nisu ili su minimalno invazivni, ali ipak sa svim povezanim problemima koji prate određivanje sadržaja vode iz električnih mjerjenja. Osim toga, geofizičke metode koristi nevođene valove koji mogu otežati tumačenje podataka o sadržaju vode u tlu. Kao rezultat toga, podaci iz geofizičkog snimanja često se nazivaju "meki podaci" i koriste se kao pomoć za tumačenje mjerjenja prostorno rjedih tačaka.

**Prostorna mjerena korišćenjem metoda daljinske detekcije** mogu biti bazirane na korištenju vozila, aviona ili satelita. Oni nude mogućnost mjerjenja vlažnosti terena velikog prostornog područja koje je često

privlačnije hidrolozima s obzirom na razmjere na kojima rade [102]. Metode dielektričnog daljinskog senzora mogu se podijeliti na "pasivne" i "aktivne" metode [111].

Pasivne metode se oslanjaju na sunce koje osvjetjava površinu tla i mjere prirodno emitovano zračenje sa tla i ne rade kada je oblačno. Zračenje se mjeri pomoću instrumenta koji se zove radiometar [105]. Sve veći interes izazivaju ovi sistemi koji se mogu montirati na zgrade ili na vozila. Tlo emituje zračenje koje se povećava sa temperaturom i naziva se emisivnost tla. U mikrotalasnem području detekcije, vrijednost dielektrične konstante tla, kao i geometrija ili hrapavost površine terena, utiču na to koliko blizu površina tla podsjeća na savršeni emiter ili crno tijelo.

Aktivne metode senzora obično imaju poseban izvor za osvjetljavanje površine tla i mjerjenje njegove reakcije (emisije). Kao i pasivni metod za slične frekvencije, smatra se da aktivne metode daju rezultate vlage za gornjih 5 cm tla. Jedna od glavnih prednosti aktivne metode je to što se ne oslanja na suncem obasjanu površinu tla i može raditi u gotovo svim vremenskim uslovima [142, 93].

### 5.2.3.2. *Vodni bilans*

Primarna upotreba informacija o sadržaju vode u tlu je vezana za procjenu Vodnog bilansa tla. Vodni bilans predstavlja jednačinu ravnoteže između inputa (ulaska) vode na određenom presjeku tla i izlaska (autputa) vode, kojeg opisuje sljedeća formula [111].

$$P + I = ET + D + R - \Delta W,$$

gdje su elementi inputa: P – padavina, I – navodnjavanje,

a elementi autputa:

ET - evapotranspiracija (gubitak vode isparavanjem iz tla i biljaka)

D - drenaža ili duboka perkolacija

R - površinsko oticanje

$\Delta W$  - promjena u sadržaju vode unutar profila (smanjenje vlažnosti tla)

$\Delta W = (W_{\text{početno stanje}} - W_{\text{krajnje stanje}})$ . Svi ovi parametri su povezani sa određenim vremenskim intervalom.

Mjerenje sadržaja vode za studije vodnog bilansa zahtijeva određivanje vlažnosti u profilu tla. Međunarodna studija [78] otkrila je da neutronska sonda i konvencionalna TDR metoda ostaju najtačnije i najprihvatljivije indirektne metode za određivanje sadržaja vode u profilu u brojnim tipovima tla za terenske studije vodnog bilansa.

### **5.2.3.3. Karakteristični sadržaji (kapaciteti) vode u tlu**

U složenom sistemu tlo-voda-biljka postoji nekoliko specifičnih sadržaja vode u tlu koji se još nazivaju i vodni kapaciteti ili indeksi vlažnosti tla. Svakako da su tu najvažniji poljski vodni kapacitet - *PVK* (kapacitet tla da drži vodu svojim silama) i vlažnost (tačka) trajnog venuća – *VTV*, između kojih se nalazi pristupačna voda biljci - *Pv*. Tu su još i higroskopska vlažnost – *Hy*, retencioni kapacitet – *Rk* i maksimalni vodni kapacitet- *MVK*.

#### **5.2.3.3.1. Higroskopska vlažnost tla - *Hy***

Higroskopnost je sposobnost vazdušno/zračno suhog tla da kondenzuje vodenu paru iz zraka na površini svojih čestica. Higroskopska vlaga (*Hy*) je količina vode koju tlo sadrži pri relativnoj vlažnosti zraka cca 96 %, a koju postižemo u eksikatoru nad 10 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pri sobnoj temperaturi (20 °C).

Vrijednost higroskopske vlage mjerene u uslovima relativne vlage zraka u laboratoriji se označava sa *Hy*, a higroskopska vlaga pri 96% relativnoj vlažnosti zraka kao *Hy* prema Mitscherlichu (*Hy<sub>Mitsch</sub>*). Ova vrijednost se može koristiti za računsko dobijanje vlažnosti (tačke) trajnog venuća (VTV) tako što ćemo *Hy<sub>Mitsch</sub>* pomnožiti sa 2.

*Hy* služi i za prevođenje vrijednosti vazdušno suhog tla u vrijednost suhog stanja tla.

Ona može biti i pokazatelj mehaničkog sastava tla jer glinovita tla zbog veće usitnjenosti i veće aktivne povšine za kondenzaciju vodene pare, imaju i veće vrijednosti *Hy*.

**Princip određivanja:** Zbog jednostavnijeg postupka pri radu sa više uzoraka, u praksi se manje koristi metod određivanja *Hy* po Mitscherlichu (pri 96% vlažnosti zraka), a češće jednostavni metod sušenja vazdušno suhog tla u sušnici pri 105° C do konstantne mase (apsolutno suho tlo). Razlika između mase vazdušno suhog i mase tla nakon sušenja u odnosu na apsolutno suho suho tlo predstavlja higroskopsku vlažnost *Hy* izraženu u  $\%$  mas.

**Postupak [125, 158]:** Prvo izvažemo staklenu posudicu u kojoj ćemo sušiti uzorak i zapišemo broj posudice. Odvagnemo 2-10 g vazdušno suhog tla. Stavljamo uzorak u staklenu posudicu i stavljamo na sušenje pri temp od 105°C u trajanju od 4-5 sati. Ustanovljeno je da se nakon protoka tog vremena ustali vrijednost mase suhog uzorka. Posudicu sa uzorkom vadimo iz sušnice i stavimo u eksikator na hlađenje, nakon čega vagamo suhi uzorak sa staklenom posudicom. Razlika između mase vazdušno suhog uzorka sa posudicom prije sušenja i apsolutno suhog uzorka sa posudicom nakon

sušenja na 105°C, predstavlja gubitak higroskopske vlage sušenjem. Masu apsolutno suhog uzorka dobijemo tako što od mase osušenog uzorka sa posudicom odbijemo težinu posudice. Odnos gubitka vlage sušenjem i mase suhog uzorka pomnožen sa 100 predstavlja Hy u %(tež).

### **Obračun:**

- broj staklene posudice
- masa vazdušno suhog tla , A (g)
- masa prazne staklene posudice, B (g)
- ukupna masa prije sušenja C = A + B (g)
- ukupna masa posudice i uzorka poslije sušenja, D (g)
- gubitak vlage sušenjem, (g) E = C - D
- masa apsolutno suhog uzorka F = A- E (g)

Procenat (težinski) higroskopske vlage se obračunava na sljedeći način:

$$Hy (\%)_{mas} = \frac{\text{Gubitak vlage sušenjem (g)}}{\text{Apsolutno suho tlo (g)}} \cdot 100$$

Ovako dobijena vrijednost predstavlja samo vlagu koju sadrži vazdušno suho tlo pri relativnoj vlazi zraka u laboratoriji u trenutku mjerena, a koja je u stvari samo dio higroskopske vlage po Mitscherlichu pri 96 % relativnoj vlagi zraka. Mnogi autori ovako dobivene vrijednosti množe sa različitim koeficijentima, (najčešće sa 2,2) da bi dobili vrijednost higroskopne vlage Hy po Mitscherlichu [158].

$$Hy_{Mitsch.} = Hy \cdot 2,2 (\%)_{mas}$$

Hy zavisi od vlažnosti zraka, aktivne površine zemljjišnih čestica i količini iona u adsorbtivnom kompleksu tla (AKT).

Kako se vлага zraka kondenzuje na površini zemljjišnih čestica, tako će i njene vrijednosti zavisiti od teksturnog sastava. Tako će usitnjjenije čestice težeg teksturnog sastava (gline) imati veću aktivnu površinu i više vrijednosti Hy od zemljšta laksog teksturnog sastava (pjeskulje) sa manjom aktivnom površinom. U sljedećoj tabeli vidimo rang vrijednosti Hy kao pokazatelj mehaničkog sastava:

**Tabela 23. Vrijednosti higroskopske vlage u zavisnosti od teksture [125]**

Teksturna klasa tla	Vrijednosti Hy (% <sub>mas</sub> )
Pijesak	1-2
Ilovača	4-6
Gline	6-20

**Koeficijent ( $K$ )** za prevođenje vazdušno suhog u absolutno suho tlo (na 105°C) se dosta koristi u obračunima vrijednosti dobivenih u hidropedološkim analizama [88].

$$\text{Koeficijent se izračunava preko formule: } K = \frac{100}{100 - Hy(\% \text{mas})}$$

Težinu absolutno suhog tla dobijemo tako da težinu vazdušno suhe zemlje podijelimo sa koeficijentom  $K$ .

$$\text{Apsolutno suho tlo} = \frac{\text{vazdušno suho tlo (g)}}{K} \dots \text{ (g)}$$

#### 5.2.3.3.2. Retencioni kapacitet tla (Rk)

Retencioni kapacitet Rk predstavlja hidrološku konstantu ili kapacitet tla za držanje (retenciju) vode vlastitim silama. To su u stvari zajedno voda u tlu koja u vidu opne okružuje čestice tla i drži se adsorpcijskim silama i voda koja se drži kapilarnim silama. Često se naziva i opneno kapilarni kapacitet ili opneno kapilarne vlažnost. Tradicionalno se određuje se u laboratoriju metodom po Gračaninu u cilindru Kopeckog. Metod se zasniva na kapilarnom vlaženju uzorka tla u metalnom cilindru preko navlaženog filter papira.

Retencioni kapacitet, kao i poljski vodni kapacitet, predstavlja gornju granicu biljci lako pristupačne vode i najoptimalniji odnos vlažnosti tla i kapaciteta za zrak za to tlo. Donja granica pristupačne vode predstavlja vlažnost trajnog venuća.

**Postupak** [125, 88]: U laboratoriji se s cilindra Kopeckog, u kome se nalazi uzorak u neporemećenom stanju, skinu oba poklopca i na naoštrenu (donju) stranu cilindra se postavi zaštitna metalna mrežica ili mrežica od najljonske čarape i učvrsti guminicom. Njen zadatak je spriječiti rasipanje uzorka. Cilindar sa mrežicom se stavi na dno posude ili kadice na za to predviđeni stalak ili dasku prekriven filter papirom čiji krajevi vise sa stalka. Posuda se ispuni vodom do tog nivoa da samo krajevi filter papira budu u vodi a cilindar sa uzorkom ostane iznad nivoa vode. U tom položaju se uzorak u cilindru vlaži kapilarnim putem posredno preko filter papira. Kada se voda kapilarnim silama podigne do vrha cilindra i orosi površinu tla u cilindru, to je znak da su sve sitne i kapilarne pore ispunjene vodom a makropore da su ispunjene zrakom. Cilindar sa uzorkom se potom vadi i ostavi na filter papir oko 20-30 minuta da se iscjedi voda iz donjih zasićenih makropora i zatim

vaga. Za ovakav uzorak kažemo da je zasićen do retencionog kapaciteta Rk. Nakon toga ide na sušenje na temperaturi od 105 °C do konstantne mase. Gubitak mase sušenjem (retenciona voda) u odnosu na zapreminu cilindra predstavlja retencioni kapacitet izražen u zapreminskim procentima.

### **Obračun:**

- broj cilindra sa uzorkom u neporemećenom stanju
- masa cilindra sa navlaženim uzorkom do Rk prije sušenja, B ... g.
- masa cilindra sa suhim uzorkom, poslije sušenja, C ... g.
- gubitak sušenjem retencione vlage (B - C) ... g.

### **Obračun retencionog kapaciteta - Rk**

$$Rk \% = \frac{\text{Gubitak sušenjem navlaženog uz.}}{V \text{ (cilindra Kopeckog)}} \cdot 100$$

**Tabela 24. Oznake vrijednosti retencionog kapacitet tla za vodu po Gračaninu [125]**

Retencioni kapacitet tla za vodu	% vol
Vrlo mali	>25
Malen	25-35
Osrednji	35-45
Veliki	45-60
Vrlo veliki	<60

### **5.2.3.3.3. Poljski vodni kapacitet - PVK**

Praćenje promjena u sadržaju vode u profilu tla nakon vlaženja navodnjavanjem ili padavinama pokazuju da se brzina promjena vlažnosti tla s vremenom smanjuje. U nekim slučajevima, sadržaj vode dostiže gotovo konstantnu vrijednost u roku od 1-2 dana nakon vlaženja, nakon preraspodjele vode u tlu kao posljedica unutrašnje drenaže. Poljski vodni kapacitet se u tom kontekstu može definisati kao sadržaj vode pri kojem unutrašnja drenažna postaje u suštini zanemarljiva.

PVK predstavlja onu vlažnost koju tlo ima nakon što se iz potpuno zasićenog tla (maksimalni kapacitet za vodu) gravitacijski iscjedi sva voda iz makropora. Vidimo da i u ovom slučaju u zemljištu zaostaje vezana voda kao i kod Rk, tj. zaostaje sva voda osim gravitacijske. To je znači ona voda koju zemljište veže svojim silama (adsorpcijskim i kapilarnim) i zato su vrijednosti vlažnosti Rk i PVK približne. Poljski vodni kapacitet se kako i

sama riječ kaže, određuje u poljskim uslovima, na terenu, za razliku od  $Rk$  koji se određuje u laboratoriji. Vrijednosti  $Rk$  mjerene u laboratoriju po Gračaninovom metodu nešto su veće od vrijednosti poljskog vodnog kapaciteta  $PVK$ .

**Princip:**  $PVK$  je znači ona voda koja zaostaje u tlu nakon što se nekog vremena procijedi gravitacijska voda. U suštini najteže je odrediti trenutak kada je otekla sva gravitaciona voda. Postizanje skoro konstantnog sadržaja vode pri određivanju vlažnosti poljskog vodnog kapaciteta nije uvijek sigurno. Tako pri određivanju  $PVK$  ukoliko nije otekla sva gravitacijska voda prilikom uzimanja uzorka tla može zahvatiti i dio nje a ukoliko je se predugo čekalo u uzorku može se izgubiti i dio kapilarne vode. Procijedivanje gravitacione vode u nekim tlima može trajati i desecima dana. U praksi se trenutak za određivanje vlažnosti pri  $PVK$  uzima kada se zadnja mjerena vlažnost zemljišta u određenim vremenskim intervalima ne mijenjaju.

**Postupak [118, 158]:** Na površini ispitivanog zemljišta, na parceli, se nasipom visine 25 cm ogradi površina od  $1 - 10 \text{ m}^2$ . Zatim se ta površina terena prekrije mulčem od sijena, slame ili šaši da bi se minimaliziralo isparavanje sa površine zemljišta. Proračuna se potrebna količina vode da zasiti zemljište do MVK u zavisnosti od površine ograđenog zemljišta i sipa se u prostor unutar nasipa. Najčešće je to uvezvi u obzir postojeću vlažnost tla oko 300 litara vode po  $\text{m}^3$  zemljišta. Nakon što se voda usula u nasip i formiralo vodno ogledalo nakon 24 sata od tog momenta počinje se sa uzorkovanjem zemljišta unutar nasipa.

Uzorkovanje zemljišta se vrši sa svakih 10 cm do dubine od 1m. Za uzorkovanje se koristi sonda – burgija, tako što se utisne u zemljište do željene dubine okrene za 90 stepeni i izvuče zajedno a uzorkom. Uzorak se stavlja u limenu kutijicu koja služi za transport uzorka do laboratorije gdje će se gravimetrijski odrediti vlažnost uzorka. Kako se uzorci uzimaju sa svakih 10 cm do 1 m dubine uzećemo 10 uzoraka sa svakog mjesta. Uzorci se uzimaju istovremeno sa tri mjesta. Znači u jednom uzorkovanju se uzme ukupno 30 uzoraka. Sljedeći dan se sa nova tri mjesta na isti način uzimaju sljedeći uzorci u limene kutije i ponovo određuje vlažnost. To se ponavlja i treći put, sve do trenutka kada vrijednosti vlažnosti na određenoj dubini ne budu jednaki onoj iz prethodnog dana. To znači da se gravitacijska voda sa te dubine procijedila i da je zaostala samo vezana voda. Logično je da će se na ovaj način gravitacijska voda prvo iscijediti iz površinskih slojeva zemljišta a kasnije i iz dubljih. Poljski vodni kapacitet na ovaj način može da se odredi za određenu dubinu, horizont ili prosječna vrijednost za cijeli profil do 1 m dubine.

#### **5.2.3.3.4. Vlažnost trajnog venuća - VTV**

Vlažnost trajnog venuća predstavlja specifični sadržaj vode u tlu tj. vodni kapacitet koja se odnosi na sadržaj vode u tlu kada biljka počne trajno da vene. Tačku trajnog venuća ne treba miješati sa fenomenom prolaznog venuća, koji se obično primjećuje tokom popodneva kada je potreba biljke za isparavanjem najveća. U ovom slučaju, biljke su sposobne da se u određenoj mjeri rehidriraju noću.

Tačka ili vlažnost trajnog venuća, je definisana kao sadržaj vode pri kojem biljke više ne mogu usvajati vodu iz tla brzinom dovoljnom da zadovolji fiziološke zahtjeve nametnute gubitkom vode u atmosferu, te nepovratno venu i umiru. Ovaj sadržaj vode prvenstveno ovisi o sposobnosti tla da prenosi vodu, ali u određenom stepenu i o sposobnosti biljke da izdrži ili ublaži sušu. Iako se obično kao VTV uzima vlažnost pri -1,5 MPa (-15 bara) matričnog potencijala, postoje značajne varijacije među biljnim vrstama u njihovim sposobnostima i mehanizmima da se odupru suši u tlu, pri čemu neke biljke, kao što su grmlje i drveće u suhom zemljištu, preživljavaju do potencijala od približno - 8 MPa, znatno ispod standardnog indeksa tačke venuća.

VTV čini vezana voda koja u vidu tanke opne okružuje zemljišne čestice i koja je vezana za česticu tla uglavnom adsorpcionim silama koje su znatno veće od usisne moći biljnog korijenja. Tako se može desiti npr.: u glinovitim zemljištima da procenat vlage iznosi i do 30% a da biljka trajno vene jer je sva voda nepristupačna biljci tj. u formi opnene vode oko pločica gline koja se drži silama većim od usisne moći biljaka. Kako vrijednost sile usisne moći biljnog korijena varira od kulture do kulture kao prosječna vrijednost usisne moći uzima se 1,5 MPa ili 15 bara ili 15.000 cm vodenog stuba. Kako je  $\log 15.000 = 4,2$  – to znači da se VTV određuje pri pF 4,2. Vlažnost trajnog venuća se može odrediti:

- računskim putem iz vrijednosti higroskopske vlage Hy,
- ogledom u loncima za uzgajanu kulturu, i
- u aparatu pod pritiskom, kada uzorak tla izložimo pritisku od 1,5 MPa ili 15 bara ili 15.000 cm vodenog stuba (pri pF 4,2) i istisnemo svu vodu koja se drži slabijim silama.

### ***Određivanje Vlažnosti trajnog venuća (VTV) računskim putem***

Eksperimentalno je utvrđeno da je Vlažnost trajnog venuća (tačka venuća) približno jednakoj dvostrukoj vrijednosti Hy pri 96% relativnoj vlazi zraka (po Mitscherlichu) [125, 158]:

$$VTV = 2 \cdot Hy_{Mitsch.} (\%)_{mas}.$$

### ***Određivanje VTV eksperimentom u loncima sa gajenom kulturom***

Kada određujemo vodne konstante za određenu parcelu sa poznatom kulturom preporučljivo je provesti eksperiment u loncima za određivanje VTV.

**Princip** [118, 158] U nekoliko lonaca/saksija stavi se ispitivano zemljište i posije kultura koja će se uzgajati na tom tlu. Vrši se redovno zalivanje i sačeka se da biljka ili više njih nikne i da se na njoj pojave tri listića. Nakon toga se prestaje sa zalivanjem. Nakon izvjesnog vremena na biljkama će biti evidentni prvi znaci venjenja (na pr. uvene jedan list). U tom trenutku uzimamo uzorak zemljišta iz lonca u limenu kutiju i određujemo gravimetrijski vlažnost uzorka. Istovremeno ponovo zalijemo biljku.

Nakon toga, mogu se desiti dva scenarija. Da biljka trajno uvene ili da se nakon zalijevanja oporavi. Ukoliko biljka trajno uvene izmjerena vlažnost predstavlja vlažnost trajnog venuća VTV. Ukoliko se biljka oporavi ponavljamo radnju s tim da sada ne čekamo prve znake venjenja neko vrijeme uzorkovanja produžimo u odnosu na prvi put (na pr. kada počnu da venu 2 lista). Ponovo uzmemo uzorak i gravimetrijski odredimo vlažnost a istovremeno uzorak ponovo zalijemo. Ovaj postupak ponavljamo sve do trenutka kada biljke trajno uvenu tj. dok vlažnost u loncima ne odgovara hidrološkoj konstanti vlažnosti trajnog venuća VTV za predviđenu kulturu na ispitivanom tlu.

#### ***5.2.3.3.5. Pristupačna voda biljci (Pv)***

Vidimo da Hidrološke konstante predstavljaju vrijednosti karakterističnih sadržaja vode tla pri karakterističnim silama držanja vode, izražene u masenim % ili volumnim %. Pristupačna voda u tlu je ona voda koja se nalazi između hidroloških konstanti poljskog vodnog kapaciteta (PVK) kao gornje granice i vlažnosti trajnog venuća (VTV) kao donje granice. U tom intervalu u tlu se nalazi pokretna kapilarna voda koja je za zemljišne čestice vezana privlačnim silama manjim od usisne moći korijena i zato kažemo da je to voda pristupačna biljci.

Zaliha pristupačne vode u tlu (dostupne biljkama) važan je faktor u određivanju količina navodnjavanja za obrađeno polje sa usjevom ili neki

drugi sistem zemljište-biljka. U praktične svrhe, količine vode date kroz navodnjavanje a koje premašuju poljski vodni kapacitet gube se zbog dubokog procjeđivanja i stoga ih treba izbjegavati u interesu efikasnog korištenja vodnih resursa kao i mogućeg ispiranja rastvorljivih hemikalija.

Sile privlačenja vode od strane čestica tla koje su veće od ranga vrijednosti 6-15 atmosfera [158] korijen kulturnih biljaka ne može savladati i ta voda je nepristupačna za biljke (*VTV*). Isto tako voda koja se drži silama manjim od 0,06 – 0,3 atmosfere (manjim od vrijednosti *PVK*) se gravitacijski cijedi i gubi tako da ni ona nije dostupna biljkama.

Pristupačna voda se može izraziti u procentima (%<sub>mas</sub> i %<sub>vol</sub>) i u m<sup>3</sup>/ha.

Formula za izračunavanje pristupačne vode biljci (*Pv*) u procentima glasi [158, 125]:

$$Pv (\%) = PVK (\%) - VTV (\%)$$

Navedeno je da retencioni kapacitet – *Rk* (%<sub>vol</sub>) predstavlja opneno - kapilaru vodu koja ispunjava mikro i srednje pore i da zbog toga približno odgovara vrijednosti *PVK*. Takođe, navedeno je i da dvostruka vrijednost higroskopske vlage po Mitscherlichu (*HyMitsch.*) odgovara Vlažnosti trajnog venuća – *VTV*(%<sub>mas</sub>). Kako su vrijednosti higroskopske vlage po Mitscherlichu (izražene u masenim procentima (%<sub>mas</sub>) potrebno ih je množenjem sa volumnom gustinom (*Vsg*) prevesti u volumne procente (%<sub>vol</sub>). Tako imamo:

$$Pv \%_{vol} = Rk (\%_{vol}) - (2 \cdot HyMitsch (\%_{mas}) \cdot Vsg)$$

**Tabela 25. Ovisnost hidroloških konstanti o teksturi** [125]

Teksturna klasa	Vlažnost trajnog venuća <i>VTV</i> (%)	Poljski vodni kapacitet <i>PVK</i> (%)	Pristupačna voda <i>Pv</i> (%)
Glinovito tlo	30	45	15
Ilovača	15	35	20
Pjeskulja	3	10	7

## **Određivanje količine pristupačne vode ( $Pv$ ) u $m^3/ha$**

Nakon što smo na opisani način odredili vodne kapacitete tj. hidrološke konstante za određeni tip tla tj. parcelu, pomoću tih vrijednosti možemo odrediti količinu pristupačne vode  $W$  na parcelli do određene dubine za svaku hidrološku konstantu (vlažnost tla u %<sub>vol</sub>) i izraziti je u  $m^3$  po hektaru ( $m^3/ha$ ).

Količina vode  $W$  ( $m^3/ha$ ) na određenoj dubini tla (h) pri raznim sadržajem vlage (trenutnoj vlažnosti, hidrološkim konstantama ili pristupačna voda biljkama) određuje se po formuli:

$$W \text{ (m}^3/\text{ha}) = \frac{10.000 \text{ (m}^2\text{)} \cdot h \text{ (m)} \cdot \text{vlažnost tla (\%}_{\text{vol}}\text{)}}{100} = \\ = 100 \cdot h \cdot \text{vlažnost tla (\%}_{\text{vol}}\text{)}$$

U slučaju da je vlažnost izražena u masenim procentima (%<sub>mas</sub>) sadržaj vode u  $m^3/ha$  računamo po formuli:

$$W \text{ (m}^3/\text{ha}) = 100 \cdot h \cdot \text{vlažnost tla (\%}_{\text{tež}}\text{)} \cdot Vsg$$

gdje su:

10.000  $m^2$  – površina 1 ha u  $m^2$ , pošto se proračun količine vode vrši u  $m^3/ha$

$h$  (m) – dubina tla u metrima (najčešće dubina razvoja korijena) do koje se vrši proračun (m)

*vlažnost tla (%)<sub>vol</sub>* – vlažnost pri kojoj vršimo proračun količine vode u tlu. Može biti trenutna vlažnost, PVK, VTV, pristupačna voda  $Pv$  ili bilo koja druga izražena u %<sub>vol</sub>.

100 - pošto je vlažnost izražena u procentima dijelimo sa 100

Ovo su važne vrijednosti pri raznim računanjima na pr. koliko ima  $m^3/ha$  fiziološki aktivne (pristupačne) vode pri trenutnoj % vlažnosti i koliko vode treba dodati da se tlo zasiti do optimalne vlage tj. poljskog vodnog kapaciteta ili retencionog kapaciteta [158]

### 5.2.3.3.6. Određivanje kapaciteta za zrak ( $K_z$ )

Ova veličina teoretski odgovara procentualnom sadržaju makro pora u tlu, odnosno zapremini pora ispunjenih zrakom, koja je preostala kada je tlo navlaženo do retencionog kapaciteta ili poljskog vodnog kapaciteta ( $PVK$ ).

Određuje se računski iz razlike ukupnog poroziteta ( $P \ %_{vol.}$ ) i poljskog vodnog kapaciteta ( $PVK \ %_{vol.}$ ) ili retencionog kapaciteta tla ( $Rk \ %_{vol.}$ ). Kao što vidimo izražava se u zapreminskim procentima.

**Obračun** [88, 125]:  $K_z \ %_{vol} = P - Rk$

**Tabela 26. Kapacitet za zrak kod teksturnih klasa** [125]

Teksturna klasa	$K_z \ %_{vol}$
pjeskovita tla	30-40
ilovače	10-25
glinuše	5-15 (i manje)

Kopecki je proučavao kapacitet tla za zrak kod različitih kultura i zaključio da su najčešće vrijednosti sljedeće:

**Tabela 27. Kapaciteta za zrak pod različitim kulturama po Kopeckom**  
[125]

VRSTA KULTURE	$K_z \ %_{vol}$
Trave	6 – 10
Pšenica	10 – 15
Ječam	15 – 20
Zob	10 – 15
Šećerna repa	15 – 20

**Tabela 28. Oznaka vrijednosti kapaciteta tla za zrak po Kopeckom** [125]

Opis Kapaciteta za zrak	Sadržaj zraka u $\%_{vol.}$
nepovoljan	>5
slab	5-10
osrednji	10-15
veliki	<15

Već je navedeno da postoji jednoopšte uvjerenje da je zemljишte dobro snabdjeveno  $O_2$  ako je sadržaj krupnih pora odnosno kapacitet za zrak  $\geq 15\%$ , odnosno da se nedostatak  $O_2$  javlja već kod kapaciteta za zrak od 5%.

#### **5.2.3.4. Sile držanja vode u tlu**

Koncept tumačenja stanja vode u tlu preko privlačnih sila koje na nju djeluju je još jedan pristup tumačenju koji se, kao i koncept vodnog potencijala, bavi energetskim stanjem vode. Kada govorimo o vlažnosti tla mi govorimo istovremeno i o vodi u zemljištu koja se nalazi u porama tla:

1. ili kao voda vezana za zemljишne čestice i aggregate različitim molekularnim silama (silama adhezije) koje izazivaju pojavu adsorpcije i kapilariteta,
2. ili kao slobodna voda koja se kreće pod uticajem gravitacije.

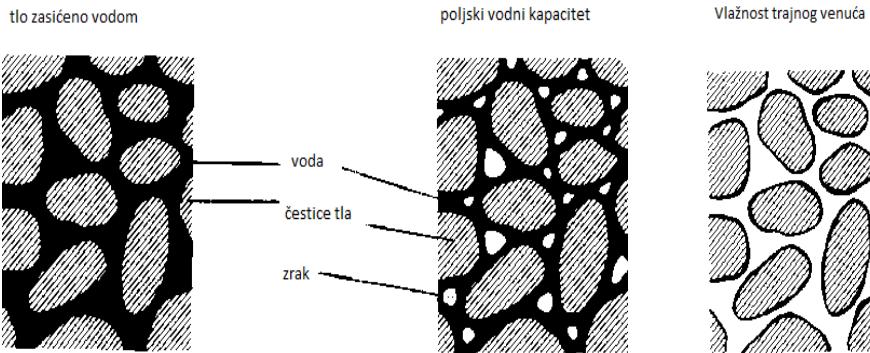
Zasićeno tlo je stanje vlažnosti kad su sve pore u tlu (makropore, srednje i mikropore) ispunjene vodom. Sa stanovišta poljoprivredne proizvodnje, najveći značaj ima vezana ili retencionu vodu (lat. *retentio*: zaustavljanje, zadržavanje) jer je jedan njen veliki dio pristupačan biljci. U zavisnosti od jačine sile držanja vode od strane čestica tla, ta vezana voda je ili nepristupačna ili lakše ili teže pristupačna biljci (vidi sliku 49).

Vezanu vodu ili retencionu vodu čine:

1. opnena ili adsorpciona voda koja u vidu tanke opne prekriva zemljishne čestice, slabo je pokretna i paralelna je sa površinom čestica i uglavnom nepristupačna biljci jer su adsorbcjske sile jače od usisne moći korijena i
2. kapilarna voda na mjestima gdje se pojavljuju meniskne ili kapilarne sile koje je čine pokretnom nasuprot gravitaciji, voda koja nije paralelna sa površinom čestica i predstavlja biljci lako pristupačnu vodu.

Retencionu vodu ili opneno - kapilarna voda ispunjava uglavnom mikropore i srednje kapilarne pore. U makroporama nema privlačnih adhezionih sila čestica tla. U njima se osjeća uticaj sile gravitacije i dolazi do descedentnog (silaznog) kretanja vode (infiltracije) koja omogućava popunjavanje pora u dubljim slojevima tla. To naravno pospješuje ulogu zemljišta kao rezervoara za vodu, posebno u područjima se većom količinom padavina u vanvegetacijskom periodu, ali samo ukoliko infiltracija ne proizvodi gubitke vode odvodeći je izvan zone korijenovog sistema u dubinu. Nakon infiltracije makropore ispunjava zrak.

Vidimo da nije sva vezana ili retencionu voda pristupačna biljci. Kada se u tlu nalazi samo adsorpciona voda koja u vidu tankog filma ili opne okružuje zemljishne čestice biljka počinje da vene jer je ta voda nepristupačna biljci.



**Slika 49. Karakteristične vlažnosti tla** (izvor [190])

Sila držanja vode od strane zemljjišnih čestica nije pristupačna direktnom posmatranju ili direktnom mjerenu. Zato se pristupilo posrednom mjerenu jačine sile držanja vode od strane elementarnih čestica i strukturnih agregata. Princip je jednostavan. Uzorak tla se kontrolisano izloži različitim pritiscima pri čemu se istiskuje dio tečnosti iz tla. Istisnuta količina vode iz uzroka tla podrazumijeva da se držala silama manjim od pritiska kojem je izložena. Nasuprot tome voda koja je ostala u tlu drži se silama većim od pritiska kojem je tlo bilo izloženo. Jačina pritiska držanja vode, može se izraziti u:

- paskalima Pa odnosno MPa i kPa, u atmosferama (atm) i barima negativnog pritiska,
- centimetrima vodenog stuba (njihovoj težini) ili
- $\text{Pf}$  vrijednosti - logaritmu visine vodenog stuba izraženog u cm.

Odnos između ovih mjera sila držanja vode od strane čestica tla je sljedeći:

- Jedinica za pritisak je paskal  $\text{Pa} = \text{N/m}^2$ ,  $(1.000.000 \text{ Pa} = \text{MPa})$  (megapaskal), a  $1.000 \text{ Pa} = \text{kPa}$  (kilopaskal)). U upotrebi su i druge jedinice.
- Standardni atmosferski pritisak se određuje kao srednji pritisak na morskom nivou i on iznosi jednu standardnu atmosferu (označava se sa: atm). Standardna atmosfera je jednaka 101 325 Paskala, ili 760 mm Hg (živinog stuba). Od 1999. dogovoren je da se standardna atmosfera definiše na točno 100 000 Pa (100 kPa) ili 750,01 mm Hg.
- Jedna atmosfera (atm) ili približno 1 bar odgovara stubu vode od 10,30 m što je ujedno najveća teoretska usisna visina pumpi.
- $1\text{bar} = 100.000 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa} = 0,1 \text{ MPa}$ .

- 1 atmosfera (atm) približno odgovara 1 bar ili preciznije 1 atm = 1013 mbar (milibara).

Težina stupca vode od 1030 cm odgovara pritisku od 1 atm ili 100 kPa ili približno jednom baru. Ovim pitanjima se posebno bavio Schofield (1935) koji je uveo da se umjesto cm visine vodenog stuba za izražavanje sile držanja vode koristi logaritam tog broja kojeg je nazvao pF. pF vrijednost predstavlja logaritam vrijednosti sile držanja vode izražene u cm visine vodenog stupca. Tako npr. pritisak od 1 bar odgovara stupcu vode od 10 m ili 1000 cm, vrijednost logaritma od 1000 (cm vodenog stuba), jednaka je 3 ( $1000 = 10^3$ ;  $\log 10^3 = 3$ ).

Npr. umjesto da kažemo da se voda u tlu drži silama tla jačim od 1,5 MPa ili 15 atmosfera ili približno 15.000 cm vodenog stuba mi kažemo da je to vlažnost pri  $pF = \log 15.000 = 4,2$ . Kod oznake pF, p znači logaritamski karakter skale a F je oznaka za силу ali i za slobodnu (Free) energiju tla za vezanje vode koja pri određenom stepenu vlažnosti ostaje slobodna. Što je tlo vlažnije, sve je manje ove slobodne energije tla za vezanje vode, tj. sve je manji pF. Vrijednosti pF kreće se od 0 za potpuno vodom zasićeno tlo do 7 za suho tlo.

Na primjer: Voda u tlu se drži za čestice tla silama maksimalne jačine do 1000 MPa ili 10.000 atm ili 10.000.000 cm vodenog stuba. To znači da će pri izlaganju uzorka zemljišta nekoliko dana u aparatu pod pritiskom od 1000 MPa ili 10.000 atmosfera ili 10.000.000 ( $10^7$ ) cm vodenog stuba, ili  $pF = 7$  ( $\log 10^7 = 7$ ), sva voda koja se drži u zemljištu biti istisnuta i da će opstati apsolutno suho tlo. To se može predstaviti i kao: pri pF 7 sadržaj vode u tlu je 0 ili imamo apsolutno suho tlo.

Jednako tako specifični sadržaji vode u tlu (*Hy, VTV, Rk, MVK*) mogu se povezati sa jačinama sila držanja vode od strane matriksa tla odnosno sa hijerarhijskim porama koje se ispunjavaju adsorpcionom vodom nepristupačnoj biljci, kapilarnom vodom pristupačnoj biljci i slobodnom gravitacijskom vodom. O ovome će nešto više biti riječi u sljedećem poglavljju Vodni potencijal koji se takođe bavi tumačenjem energetskog stanja vode.

### **5.2.3.5. Vodni potencijal**

Kao što je prethodno navedeno, status vode u tlu karakterišu količina prisutne vode i njezino energetsko stanje. Koncept vodnog potencijala je prikladan za tumačenje (modeliranje) kretanja vode u tlu posebno u poređenju sa konceptom privlačnih sila.

Vidimo da je voda tla podvrgnuta silama promjenjivog porijekla i intenziteta, stoga stiče različitu količinu i oblik energije. Dva primarna oblika energije, od interesa ovdje, su kinetička i potencijalna. Kinetička energija se stiče kretanjem, međutim, kako je kretanje vode u tlu relativno sporo (obično  $<0,1$  m/sat), njezina je kinetička energija zanemariva. Potencijalna energija, koja je definisana položajem (visinom) vode u tlu unutar tijela (profila) tla i unutrašnjim uslovima u tlu (privlačne molekularne sile matriksa tla i koncentracija rastvora), uvelike je odgovorna za određivanje statusa vode u tlu u izotermnim uslovima [111].

Kao i sva druga materija, voda u tlu nastoji se kretati s mjesta gdje je potencijalna energija visoka do mjesta gdje je niska, u potrazi za stanjem poznatim kao ravnoteža s okolinom. Veličina pokretačke sile iza takvog spontanog gibanja je razlika u potencijalnoj energiji na udaljenosti između ovih dviju tačaka.

Na makroskopskom nivou potencijalna energija može se definisati u odnosu na referentno stanje. Standardno stanje vode u tlu definisano je kao čista i slobodna voda (bez rastvorenih materija i bez djelovanja vanjskih sila osim gravitacije) pri referentnom pritisku, temperaturi i nadmorskoj visini, a proizvoljno joj je data vrijednost nula (0).

Voda u tlu je izložena djelovanju nekoliko polja sila čiji kombinovani efekti rezultiraju odstupanjem njene potencijalne energije u odnosu na referentno stanje. To stanje se naziva ukupni potencijal vode tla ( $\Psi_T$ ) ili **ukupni vodni potencijal**. Kako su fundamentalni koncepti definisanja i tumačenja ukupnog vodnog potencijala predmet tekuće debate, ovde će se spomenuti samo jednostavna i široko prihvaćena tumačenja. Vidjeli smo da se primarne sile čija polja djeluju na vodu koja se drži u čvrstom tlu i koje djeluju na njen energetsko stanje, mogu prikladno grupisati kao [111].

- (1) matričke sile koje su rezultat interakcije čvrste faze sa tečnom i plinovitom fazom,
- (2) osmotske sile koje se javljaju zbog razlike u hemijskom sastavu (koncentraciji) zemljишnog rastvora i
- (3) sile izazvane gravitacionim i drugim inercijskim poljima (centrifugalne).

Kako potencijal nekog tijela predstavlja njegovu sposobnost da izvrši rad, tako vodni potencijal predstavlja sposobnost vode u tlu da izvrši rad. Zbog

toga se vodni potencijal koristi da pojasni (modelira) sposobnost vode da se kreće u prirodnom zemljisu iz jednog područja u drugo. To kretanje vode se dešava pod uticajem pomenutih polja gravitacije, matričnih efekata (matriks predstavlja čestice tla u kontaktu sa vodom) i osmoze. Tako imamo gravitacijski, matriksni i osmotski potencijal.

Vodni potencijal se mjeri jedinicama za pritisak i obično se predstavlja grčkim slovom  $\Psi$  (psi). Ukupni vodni potencijal  $\Psi_T$  može se izraziti kao zbroj potencijala komponenata koji odgovaraju različitim poljima koja djeluju na vodu u tlu. Ukupni vodni potencijal je znači jednak zbiru matriksnog ( $\Psi_m$ ), osmotskog ( $\Psi_o$ ), gravitacijskog ( $\Psi_z$ ) i potencijala pritiska vode  $\Psi_p$  koji se javlja u zasićenim uslovima. Svi ovi vodni potencijali imaju svoje praktične vrijednosti:

$$\Psi_T = \Psi_m + \Psi_o + \Psi_z + \Psi_p$$

**$\Psi_m$  je matriksni potencijal** koji proizlazi iz kombinovanih učinaka kapilarnosti i adsorpcijskih sila unutar matriksa tla. Dominantni mehanizmi za ove učinke uključuju [111]:

- (1) adheziju molekula vode na površine čvrstih čestica zbog London-van der Waalsova sila kratkog dometa; Učinak ovih adhezionih sila je proširen kohezijom kroz H - veze nastale u tekućini,
- (2) kapilarnost uzrokovana sučeljavanjem u interakciji tekućina-plin i tekućina-čvrsta faza-plin unutar nepravilne geometrije pora tla, i
- (3) ionska hidratacija i vezanje vode u difuznim dvostrukim slojevima.

Za mjerjenje matriksnog potencijala u volumenu tla može se koristiti tenziometar. Vrijednost  $\Psi_m$  kreće se od nule kada je tlo potpuno zasićeno vodom do negativnih brojeva kada je tlo suho. Treba imati na umu da je

$$\Psi_m = 0 \text{ mm} > \Psi_m = -1000 \text{ mm}.$$

Budući da je često prikladnije ili intuitivnije raditi s pozitivnim nego negativnim veličinama, obično se koristi izraz matriksno usisavanje (usisna moć), sukcija ili napetost. Svaki od njih predstavlja apsolutnu vrijednost  $\Psi_m$ .

**$\Psi_o$  osmotski potencijal** određen prisutnošću rastvorenih materija u vodi tla, koje smanjuju njezinu potencijalnu energiju. Učinci  $\Psi_o$  značajni su a) pri postojanju značajnih količina rastvorene materije u vodi tla i b) u prisustvu selektivno propusne membrane ili difuzijske barijere, koja lakše propušta vodu nego soli. Učinci  $\Psi_o$  inače su zanemarivi kada se uzme u obzir samo protok tekuće vode i ne postoji difuzijska barijera. Dvije najvažnije difuzijske barijere u tlu se pojavljuju (1) na sučelju tlo-korijen biljke (ćelijske membrane korijena su selektivno propusne) i (2) na sučelju voda-

zrak; dakle, kada voda isparava a soli zaostaju. U razrijeđenim rastvorima, potencijal rastvorene materije (koji se također naziva osmotski pritisak) proporcionalan je koncentraciji i temperaturi. Korisna aproksimacija, koja se može koristiti za procjenu  $\Psi_o$  u kPa iz električnog konduktiviteta otopine tla pri zasićenju (ECs) u  $dS\ m^{-1}$ , je:  $\Psi_o = -36Ecs [111]$

**$\Psi_p$  je potencijal pritiska** definisan kao hidrostaticki pritisak koji vrši voda iznad određene tačke u uslovima zasićenja tla. Konvencija koja se ovdje koristi je da je  $\Psi_p$  uvijek pozitivan ispod nivoa vode ili nula ako je određena tačka na ili iznad nivoa vode. U tom smislu, veličine  $\Psi_p$  i  $\Psi_m$  različite od nule se međusobno isključuju; ako je  $\Psi_p$  pozitivan onda je  $\Psi_m$  nula (u zasićenim uslovima u tlu) ili ako je  $\Psi_m$  negativan onda je  $\Psi_p$  nula (suhi uslovi), ili na visini slobodne vode (nivou podzemne vode)  $\Psi_p = \Psi_m = 0$ .

**$\Psi_z$  je gravitacijski potencijal**, koji je određen isključivo visinom tačke u odnosu na neku proizvoljnu referentnu tačku i jednak je radu potrebnom da se tijelo podigne protiv Zemljine gravitacije sa referentnog nivoa na njegov sadašnji položaj. Kada se izrazi kao energija po jedinici težine, gravitacioni potencijal je jednostavno vertikalna udaljenost od referentnog nivoa do određene tačke. Sama numerička vrijednost  $\Psi_z$  stoga nije važna (definisana je u odnosu na proizvoljni referentni nivo); ono što je važno je razlika u visini ili gradijent u  $\Psi_z$  između bilo koje dvije određene tačke. Ova vrijednost se neće promijeniti s različitim lokacijama referentnih tačaka.

Generalno, u tlu se voda kreće iz područja većeg vodnog potencijala u područje manjeg vodnog potencijala, ili: voda koja ima veću sposobnost da izvrši rad (slobodna voda) se kreće u pravcu gdje će ta sposobnost biti manja (vezana voda). Voda u tlu je u ravnoteži kada je neto sila na beskonačno malo vodeno tijelo svuda jednaka nuli, ili kada je ukupni potencijal konstantan u sistemu. Razlika između hemijskih i mehaničkih potencijala voda iz tla i čiste vode na istoj temperaturi je poznata kao potencijal vode  $\Psi_w$

$$\Psi_w = \Psi_m + \Psi_o + \Psi_p$$

Treba imati na umu da gravitacione komponente ( $\Psi_z$ ) nema u ovoj definiciji [111]. Potencijal vode tla je stoga rezultat svojstava same vode u tlu i njenih fizičkih i hemijskih interakcija sa okolinom, dok ukupni potencijal uključuje efekte gravitacije (vanjsko i sveprisutno polje sile).

Ukupni vodni potencijal tla i njegove komponente mogu se izraziti na nekoliko načina u zavisnosti od definicije jedinične količine vode. Potencijal se može izraziti kao (1) energija po jedinici mase, (2) energija po jedinici zapremine ili (3) energija po jedinici težine.

**Tabela 29. Jedinice i simboli potencijalne energije vode tla [111]**

Jedinica	Simbol	Ime	SI jedinica
Energija/masu	$\mu$	Hemijski potencijal	$J \text{ kg}^{-1}$
Energija/volumen	$\Psi$	Vodni potencijal, moć usisavanja, tenzija	$N \text{ m}^{-2} (\text{Pa})$
Energija/težinu	$h$	Visina pritiska	m

Samo  $\mu$  ima jedinicu mjere kao potencijal;  $\Psi$  ima jedinicu mjere u pritisku a  $h$  predstavlja visinu vode. Kako god gornja terminologija je široko rasprostranjena i koristi se u nauci o tlu i biljkama. Različiti izrazi potencijalne energije vode su ekvivalentni sa [111]:

$$\mu = \Psi/\rho_w = gh$$

$\rho_w$  = gustina vode ( $1000 \text{ kg m}^{-3}$  na  $20^\circ\text{C}$ )

$g$  = gravitaciono ubrzanje ( $9.81 \text{ m s}^{-2}$ )

Praktično ili slikovito opisano pomoću koncepta vodnog poencijala kretanje vodu tlu se odvija na sljedeći način:

Slobodna procijedna voda se pod uticajem gravitacije procjeđuje descedentno kroz krupne pore i pukotine u dubinu profila jer voda u nižim tačkama položaja u profilu (promatrano u odnosu na neku referentnu ravan na pr. nivo podzemne vode ili nepropusni sloj) ima manje slobodne energije u odnosu na više tačke položaja tj. ima manji potencijal. Jednostavno gravitacija daje ubrzanje vodi i povećava njen potencijal ( $\Psi_z$ ) što je na većoj visini. Gravitacijski potencijal izražen je za vrijeme oborina ili navodnjavanja. Nakon izvjesnog vremena poslije kiše ili navodnjavanja gravitacijski potencijal gubi svoju važnost zbog uticaja matriksnog potencijala tla ( $\Psi_m$ ).

Kako se smanjuje zasićenost tla vodom, jača tzv. privlačna sila matriksa tla tj. pojavljuje se matriksni potencijal  $\Psi_m$ . Najmanju slobodnu energiju ima voda vezana za čestice tla silama adhezije. Kaže se da adsorbciona i kapilarna voda u sitnim i srednjim porama vezana adhezionim silama za čestice tla ima manji potencijal u odnosu na čistu vodu. Kako slobodna „čista“ voda od padavina ili navodnjavanja ima potencijal jednak nuli, vezana voda ima negativne vrijednosti potencijala. To je matriksni potencijal. Što su čestice tla manje, sila kojom drže vodu je snažnija vodni potencijal je manji. Jako niske vrijednosti vodnog potencijala imaju i teksturno teža tla - gline zahvaljujući velikoj aktivnoj površini minerala gline koja vrlo jakim silama drže molekule vode na svojoj površini ali i zbog dominantnih sitnih pora koji zajedno smanjuju slobodnu energiju vode.

I voden rastvor zbog rastvorenih materija u odnosu na čistu vodu takođe ima manji potencijal (osmotski potencijal) što znači da će voda porijeklom od padavina ili navodnjavanja ići u pravcu da razblaži voden rastvor. Međutim, osmotski potencijal  $\Psi_o$  ima simboličku vrijednost i iznosi -0.02 MPa s obzirom na to da je koncentracija rastvorenih materija u rastvoru tla vrlo niska. Izuzetak su zaslanjena tla gdje je veća koncentracija rastvorenih tvari i osmotski potencijal može biti niži od -0.02 MPa [94].

Jednostavan princip da će kretanje vode u tlu generalno ići iz zone višeg vodnog potencijala gdje je nivo slobodne energije vode visok (zasićeno tlo kišom ili vodom za navodnjavanje ili podzemna voda ili jednostavno vlažnije tlo) prema zoni gdje će voda imati niži vodni potencijal odnosno manje slobodne energije a to je suho tlo primjenjiv je i na sistem za navodnjavanje. Na pr.: voda u cijevima za navodnjavanje ima pozitivne vrijednosti potencijala ( $>+0$ ) jer se nalazi pod pritiskom, nadalje čista voda (uslovno rečeno voda od kiše) ima potencijal jednak nuli ( $= 0$ ), voden rastvor sa rastvorenim materijama ima nešto niži vodni potencijal od čiste vode, dok kapilarna i na kraju adsorpciona voda imaju jako niske negativne vrijednosti potencijala, znači značajno manje vrijednosti potencijala od kišnice ( $<-0$ ). Kaže se da voda ima tendenciju da zauzme položaj u kojem će imati manji potencijal odnosno manje slobodne energije.

I sama podzemna voda (saturisano tlo) ima pozitivne vrijednosti vodnog potencijala (veći ili jednak nuli) kao i voda od padavina. U zasićenom tlu (podzemna voda) slabe privlačne sile matriksa tla. To objašnjava pojavu kapilariteta tj. ascedentnog dizanja vode u kapilarnim porama gdje voda privučena silama adhezije od čestica tla ima niže tj. negativne vrijednosti potencijala.

U pedološkoj praksi vodni potencijal tla određuje se na razne način, a neke od najvažnijih metoda su:

1. određivanje vodnog potencijala tla na terenu tenziometrima, gips blokovima, ili psihrometrom;
2. određivanje vodnog potencijala u laboratoriji pomoću aparata pod pritiskom ili tlačnim ekstraktorom.

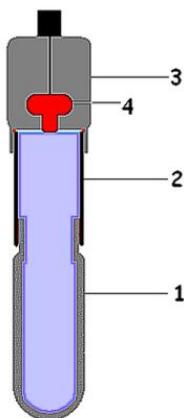
Metode za mjerjenje vodnog potencijala u tlu koriste se za određivanje momenta uključivanja sistema za navodnjavanje a mogu se koristiti i u naučnom istraživanju različitih odnosa u sistemu tlo-biljka. Tako, nivo vodnog stresa u biljci zbog smanjenog sadržaja vode u tlu, određuje se i mjeranjem vodnog potencijala tla i vodnog potencijala biljke. Važnost mjerjenja vodnog potencijala biljke leži u činjenici što je on jedan od najboljih indikatora vodnog stresa u biljci i najbolje sredstvo za procjenu potrebe navodnjavanja biljke [18].

#### **5.2.3.5.1. Mjerenje vodnog potencijala tla tenziometrima**

Voda u tlu koje nije zasićeno ili saturirano vodom je pod pritiskom manjim od atmosferskog pritiska za vrijednost koju je razumljivo nazvati usisnom moći ili usisavanjem. Kada se voda povuče iz pora tla, usisna moć tla se povećava. Iako je usisavanje nesumnjivo faktor od primarne važnosti u određivanju dostupnosti vode iz tla biljkama, istraživanja u tom smjeru uvelike su otežana poteškoćama mjerenja usisavanja.

Tenziometri su instrumenti koji se koriste za mjerenje vodnog potencijala tla. Mjerenjem vodnog potencijala tla tenziometrima određuje se tensija (potencijal, napetost, napon...) kojom čestice tla zadržavaju vodu. Postoje dvije vrste tenziometara: sa živom i sa vakuum mjerilom. Tenziometri sa vakuum mjerilom rade na istom principu kao i tenziometri sa živinim manometrom, samo umjesto žive imaju vakuum mjerilo. Ovo je mjerilo također kalibrirano centimetrima živinog stuba.

Tenziometar se sastoji od zatvorene plastične ili staklene cijevi ispunjene vodom dužine najčešće od 30 -100 cm, zavisno od namjene i koja kultura se uzgaja na parceli, i specijalnog vakuum mjerila. Vrh cijevi je hermetički zatvoren dok je donji dio cijevi (najčešće od keramike) porozan i on se postavlja u zemlju na željenu dubinu unutar korijenove zone. Tenziometrima se može mjeriti vodni potencijal tla u rasponu od -0 do -85 kPa (1 atm = 100 kPa).



**Slika 50. Elektronska sonda za tenziometar: (1) porozna čaša; (2) cijev ispunjena vodom; (3) glava senzora; (4) senzor pritiska** (izvor [192])

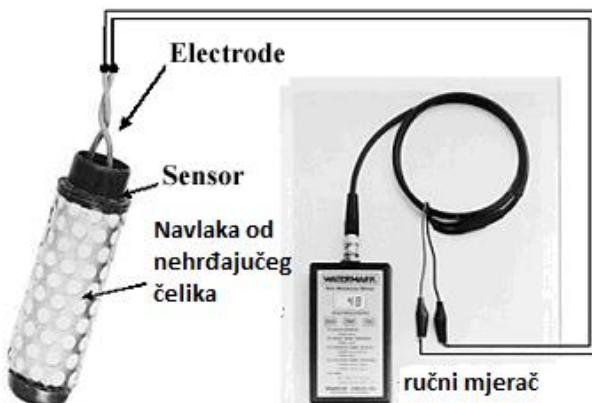
**Princip rada:** U uslovima povećane usisne moći suhog zemljišta, voda se usisava iz cijevi tenziometra a smanjenje nivoa vode u instrumentu stvara vakuum koji se očitava na mjerilu kao negativan pritisak. Što je zemljište više suho, to je njegova usisna moć veća, izvlači se više vode iz cijevi i stvara se više vakuma, te su i niže vrijednosti negativnog pritiska na manometru do -85 kPa. U takvim uslovima se smanjuje vodni potencijal.

U vlažnim uslovima poslije kiše ili navodnjavanja se ovaj postupak preokreće. Naime, vakum koji je stvoren zbog suhog zemljišta sada uvlači vodu iz zemljišta natrag u cijev tenziometra, i mjerilo pokazuje veće vrijednosti negativnog pritiska (približava se vrijednosti -0). U takvim uslovima se povećava vodni potencijal tla. Nedostatak tenziometara je što se njime može mjeriti samo gornji dio pristupačne vode ili fiziološki aktivne vlage u tlu, pa je zbog toga pogodan za mjerjenja u kontrolisanim uslovima proizvodnje gdje se sadržaj vode u tlu održava oko vrijednosti poljskog vodnog kapaciteta [157].

Tenziometri se mogu koristiti za određivanje i praćenje količine vode u tlu ili vlažnosti tla u % ako se prethodno izvrši kalibracija. To podrazumijeva da se pri karakterističnim potencijalima ili naponima (tenzijama) vode u tlu a koji se očitavaju na manometru ili mjerilu, uzmu uzorci tla i odredi vlažnost tla u % i to gravimetrijskom metodom u laboratoriji. Ovako dobivena vlažnost odgovara količini vode u tlu (vlažnosti tla u %) uzorkovanom pri datom očitanju na brojčaniku. S vježbom i iskustvom tenziometar može biti koristan alat za praćenje stanja vlažnosti tla i određivanje vremena uključivanja i isključivanja sistema za navodnjavanje.

#### **5.2.3.5.2. Mjerenje vodnog potencijala tla gipsanim blokovima**

Gipsani blokovi predstavljaju 10 cm dugačke i 2,5 cm promjera gipsane blokove u koje su ugrađene dvije elektrode koje su opet žicom iz samih blokova spojene sa mjernim uređajem za električni otpor koji se pojavljuje između elektroda. Gips je po hemijskom sastavu hidratizirani kalcijev sulfat i odabran je za ovu metodu kao jeftin porozni prirodni materijal sklon upijanju i otpuštanju vode odnosno brzo se prilagođava uslovima koji vladaju u tlu. U gipsanim blokovima pritisak se kreće od 0,1 bara pa sve do 15 bara, a to znači da očitavaju jako širok rang vrijednosti vodnih potencijala tla.



**Slika 51.** Svaki od proizvođača daje detaljna uputstva sa specifičnostima svakog modela: Unaprijedeni model - senzor sa navlakom od nehrđajućeg čelika i ručnim mjeračem (izvor [193])

Gipsani blokovi koji se postavljaju u zoni korijenovog sistema ispitivanog tla predstavljaju prilično jeftin uređaj za praćenje vodnog potencijala tla odnosno vlažnosti tla. Usljed niskih temperatura može doći do pucanja gipsanih blokova postavljenih u zemlju.

**Princip rada** - Gipsanim blokovima s ugrađenim elektrodama određuje se vodni potencijal tla po sličnom principu kao i kod tenziometara. Gipsani blokovi kao porazan prirodni materijal u bliskom kontaktu sa tlom, upijaju ili odaju vodu tla zavisno od snage držanja vode od strane čestica tla. Tako na pr. kada čestice tla jače drže vodu (glinovita i suhlja tla), količina vode u blokovima bit će manja i blokovi će biti suhlji. Nasuprot tome kad se voda u tlu drži manjim silama za matriks tla, porozni blokovi biće vlažniji. Vlažnost blokova ne zavisi od vlažnosti tla nego od sila držanja vode od strane čestica tla znači vodnog potencijala.

Mjerenja električnog otpora između ugrađenih elektroda se vrše pomoću mjernog uređaja povezanog sa ugrađenim elektrodama a koji je postavljen iznad površine tla u koji su postavljeni gipsani blokovi. Tako je električni otpor između elektroda manji što gipsani blokovi sadrže više vode (kada su uslovi u tlu takvi da su manje sile držanja vode od strane čestica tla) odnosno električni otpor raste ukoliko su blokovi suhlji (veće sile držanja vode od strane čestica tla). Kako sile držanja vode od strane čestica tla ne zavise samo od vlažnosti tla nego i od drugih faktora (teksture), u tom kontekstu ovdje je potrebno uraditi kalibraciju električnog otpora koji se očita na mjernom uređaju na jačinu sile kojim čestice tla drži vodu a ne na vlažnost

tla. Zato i kažemo da su gipsani blokovi mjera za vodni potencijal tla a ne za vlažnost tla.

Podaci su nešto manje pouzdani i prije postavljanja u tlo potrebno je kalibrirati uređaj za svaki tip tla posebno. Kalibracija predstavlja postupak stavljanja u odnos vrijednosti električnog otpora u gipsanim blokovima očitanim na mjernom instrumentu i vodnog potencijala odnosno vlažnosti tla pri mjerjenim vrijednostima električnog otpora. To se najčešće radi tako što se desetak gipsnih blokova (prethodno namočenih u vodi) postavi u veće ( $300 \text{ cm}^3$ ) metalne cilindre sa suhim uzorkom ispitivanog tla sa određene dubine, a potom se cilindri postave na postolje sa filter papirom čiji su krajevi umočeni u vodu. Na ovaj način uzorak ispitivanog tla u metalnom cilindru se kapilarnim putem vlaži (od kontakta sa filter papirom prema gore) do vrijednosti  $R_k$  odnosno do 0,06-0,3 bara što predstavlja gornju granicu pristupačne vode kada biljka troši najmanje energije za usvajanje vode. Potrebno je nekoliko dana (3-5 dana) da se navlaži cijeli uzorak u cilindru do retencionog kapaciteta  $R_k$  što se može primjetiti pojavljivanjem tamne vlažne nijanse na površini uzorka u cilindru ali istoj masi navlaženog uzorka poslije mjerjenja. Za to vrijeme vlaženja 2 puta dnevno (ujutro i popodne) uzorak u cilindru se vaga a istovremeno na mjernom instrumentu se očita vrijednost električnog otpora u blokovima. Iz razlike u masi ovako izvaganog uzorka pri različitim stanjima vlažnosti zemlje tokom vlaženja i osušenog uzorka na  $105^\circ\text{C}$  dobijemo gubitak vode sušenjem, koji u odnosu na masu suhog tla ili zapreminu cilindra daje % vlažnosti tla. U konačnici vlažnost uzorka u trenutku vaganja odgovara očitanju električnog otpora na instrumentu. Stavljanjem u odnos ovih vrijednosti dobijamo kalibracijsku krivu.

Pristupačna voda u tlu se nalazi između vodnih potencijala:  $R_k$  pri 0,06 ili 0,3 bara kao gornjoj granici i VTV pri 15 bara kao donjoj granici pristupačne vode biljci. VTV se može odrediti putem aparata pod pritiskom ili tlačnog ekstraktora, metodom uzgoja istraživane kulture u loncima ali i računskim putem preko vrijednosti higroskopske vlage  $Hy$ . Na osnovu toga se određuje pristupačna voda i optimalna vlažnost i početak navodnjavanja a koje se konačno utvrđi eksperimentom u polju.

**Postupak:** Gipsani blokovi sa ugrađenim elektrodama postavljaju se u tlo pomoću sonde kojom se izbuši rupa do određene dubine u rizosfernem sloju zavisno od uzgajane kulture. Prilikom zatrpanjavanja gipsanih blokova potrebno je paziti da se slojevi zemlje vraćaju u rupu po redoslijedu kako su i vađeni i da zemlja dobro pranja uz gipsane blokove kako bi oni bili pouzdani u praćenju uslova u tlu. Otud i problem u primjeni gipsanih blokova u skeletnim tlama. Žice koje spajaju elektrode ugrađene u gipsane blokove i mjerni instrument izvodimo na površinu tla (u PVC cijevčicama).

Praćenje variranja vrijednosti električnog otpora na mjernom instrumentu u zavisnosti od promjene vodnog potencijala u tlu vrši se sistemski i periodično tokom vegetacijske sezone najčešće za potrebe određivanja početka navodnjavanja, a potom se blokovi vade i spremaju. Korištenje gipsanih blokova je predviđeno uglavnom za dvije godine, a potom ih je potrebno zamjeniti.

Primjer komercijalnog uređaja je *Watermark*:

Izmjerene veličine se preračunavaju u centibare (1 bar = 100 cb) odnosno u vrijednosti koje prikazuju potrebnu silu koju biljka treba ostvariti da bi uvukla vodu u svoj korijen. Vrijednosti se kreću od 0 – 200 cb, što je vrijednost niža to je tlo zasićenije vodom odnosno što je vrijednost veća to je deficit vode u tlu veći.

Proizvođač senzora navodi kako interpretirati izmjerene vrijednosti:

- 0 – 10 cb = Tlo dobro saturirano vodom
- 10 – 30 cb = Tlo sadrži adekvatnu količinu vode za normalan rast i razvoj biljke (osim kod pjeskovitih tla, kod kojih se na oko 30 cb počinje javljati deficit vode)
- 30 – 60 cb = Uobičajene vrijednosti kada je potrebno navodnjavati (Osim kod teških tla)
- 60 – 100 cb = Uobičajene vrijednosti kada je potrebno navodnjavati teška tla
- 100 – 200 cb = Tlo postaje presuho za maksimalne prinose

Još jedna prednost ovog uređaja jest i mogućnosti postavljanja više senzora na više dubina. Tako se omogućuje bolje praćenje vlažnosti tla u zoni korijenovog sistema, kretanje vode te vlažnosti tla na većim dubinama.

**Mjerenje vodnog potencijala tla pomoću psihrometra** - Psihrometri su uređaji koji mjeru evaporaciju vode sa površine tla a čije vrijednosti se stavlaju u odnos i pretvaraju u vodni potencijal tla. Prednost određivanja vodnog potencijala tla pomoću psihrometara je što su vrlo pogodni za određivanje vodnog potencijala u relativno suhim tlima.

Metoda određivanja vodnog potencijala tla pomoću aparata pod pritiskom ili tlačnog ekstraktora biće predstavljena nešto kasnije u dijelu koji govori o konstruisanju pF krive.

### **5.2.3.5.3. Hidrološke konstante ili vodni kapaciteti tla – pF kriva različitih teksturnih klasa**

Povezano sa konceptom vodnog potencijala izučavaju se i već pomenute hidropedološke konstante ili vodni kapaciteti tla. Vrijednosti karakterističnih sadržaja vode u tlu (%) pri određenom vodnom potencijalu odnosno karakterističnim silama držanja vode od strane čestica tla (pF) nazivaju se hidropedološke konstante ili vodni kapaciteti. Praktično predstavljaju sadržaj vode u % koji se zadržava u tlu nakon što se zasićen uzorak tla izloži različitim pritiscima.

1. **Higroskopska vлага (maksimalna)** je maksimalna moguća količina kondenzovane vode na površini čestica tla porijeklom od vlage iz zraka. Predstavlja i količinu vode koja zaostaje u tlu nakon što se uzorak izloži pritisku od 30 bara (3 MPa).
2. **Vlažnost (tačka) trajnog venuća** je stanje vlažnosti u tlu kada nema pristupačne vode biljci. U poljoprivrednoj proizvodnji količina vode nikada ne smije doći do ovog nivoa, jer i kratki period može izazvati negativne posljedice kod biljke. Predstavlja količinu vode u tlu koja zaostaje nakon što se uzorak izloži pritisku od 15 bara (1,5 MPa).
3. **Lentokapilarna vlažnost** ili vlažnost prekida kapilarne veze je granično stanje između teže i lakše pokretne vode u tlu te se podrazumijeva donjom granicom optimalne vlažnosti tla u proizvodnji. Predstavlja količinu vode u tlu koja zaostaje nakon što se uzorak izloži pritisku od 6,25 bara (0,625 MPa).  
**Ekvivalent vlažnosti** - (engl. moisture equivalent) - je ravnotežno stanje između tla i vode koje se dobije centrifugiranjem vlažnog uzorka tla silom koja odgovara hiljadu puta sili teže. - 6,25 bara ili pF 3,8 [175].
4. **Poljski vodni kapacitet** tla je stanje kada su teoretski mikropore i srednje pore ispunjene vodom, a makropore sa zrakom. Predstavlja količinu vode u tlu koja zaostaje nakon što se uzorak izloži pritisku od 0,33 bara (0,033 MPa) (glinasto ilovasta tla) do 0,1 bar (0,01 MPa) (pjeskovita tla).
5. **Maksimalni kapacitet** tla za vodu je stanje zasićenosti to jest maksimalna količina vode koju tlo može primiti, ali ne i zadržati. Odgovara vrijednosti od 0 bara.

### **5.2.3.5.4. Određivanje hidroloških konstanti tla u aparatu pod pritiskom ili tlačnom ekstraktoru**

Jačina sile držanja vode zavisi od mehaničkog sastava pa tako i različite teksturne klase zemljišta imaju različit sadržaj vode (%) pri istim pritiscima. Pojednostavljeno rečeno, npr. ako pri određivanju Vlažnosti (tačke) trajnog

venuća (VTV) uzmememo uzorke pjesculje i glinuše i izložimo ih istom pritisku, od 15 atm ili 15.000 cm vodenog stuba (pF 4,2) što odgovara jačini sile usisavanje biljnog korijena, sadržaj vode u % koji će zaostati nakon istiskavanja vode koja se drži slabijim silama od 15 atm, biće znatno manji u pjesculji nego u glinuši. Slijedeći ovo saznanje, pristupilo se konstruisanju pF krive (sadržaj vode u tlu pri različitim silama držanja) za pojedine teksturne klase.

Aparat pod pritiskom ili tlačni ekstraktor se tradicionalno u našoj pedološkoj praksi koristi za određivanje hidropedoloških konstanti koje se koriste prilikom određivanja pF kriva ili retencijskih krivi pojedinog tla. Tlačnim ekstraktorom određuju se vrijednosti vodnog potencijala tla čak do -15.000 kPa (u rasponu od 0,33 do 15 bara prema ISO 11274:200). Tlačnim ekstraktorom sadržaj vode u tlu određuje se gravimetrijski. Prednost ovoga uređaja na drugima je vrlo velika preciznost u određivanju količine vode u tlu u relativno kratkom vremenu [179]. Postoje različite izvedbe ali uglavnom se zasnivaju na sljedećem principu.

**Princip** - Konstruisanje pF ili retencione krive za određenu teksturnu klasu zemljišta se vrši po principu da se iz vodom zasićenog uzorka tla različitim ali specifičnim pritiscima u aparatu pod pritiskom ili tlačnom ekstraktoru (različitim konstrukcija i proizvođača) po nekoliko dana istiskuje/iscjeđuje voda koje se drži slabijim silama od primjenjenog pritiska u aparatu, a potom uzorak vadi iz aparata i vaga. Na kraju kada se ponovi postupak sa različitim pritiscama, uzorak se suši i gravimetrijski određuje sadržaj vlage koja se zadržala u uzorku tla za svaki specifični pritisak. Svaki taj sadržaj vode u uzorku zaostao nakon izlaganja različitim pritiscima predstavlja karakterističnu vodnu konstantu izraženu u %.

**Postupak:** Zavisno od vrste i dizajna aparata pod pritiskom, tj. od proizvođača. Najčešće se iz uzorka u poremećenom stanju koji nije usitnjen u avanu s tučkom odvaga potrebna masa zemlje (tri četiri hrpice agregata) stavi u limenu kutijicu i natopi se vodom. U međuvremenu pripremi se aparat pod pritiskom koji je hermetički zatvoren, povezan sa bocom pod pritiskom zraka i manometrima - pokazateljima vrijednosti pritiska u aparatu. Uzorak ili uzorci se evidentiraju i stavljaju se na predviđena mesta – najčešće male prstenove koji su poredani po donjoj ploči. Nakon što se aparat propisno zadihtuje (zatvori hermetički) uključuje se pritisak iz boce a kontrola veličine pritiska se vrši preko odgovarajućih manometara. Za nekoliko dana biće istisnuta sva voda koju tlo drži silama manjim od pritiska u aparatu. Po završenom istiskivanju uzorci se vade iz aparata, vagaju, zatim suše u peći na 105°C i ponovo vagaju. Na taj se način, preko razlike u težini, određuje sadržaj vode u uzorku tla (poznate mase) pri određenom pritisku (pF 0, 1,2,3,4,5,6 i 7).



**Slika 52. Šema tlačnog ekstraktora ili aparata pod pritiskom za određivanje vodnih konstanti tla (pF) po Richardsu (izvor [126])**

U nastavku dajemo prijedlog (matricu) u okviru procesa harmonizacije (koji traje) standardne operativne procedure za određivanje pF krive GLOSOLAN-u. Procedura je data posebno za pritiske od 0 do 2 bara i posebno za pritiske od 2 do 15 bara

**Određivanje pF – krive (GLOSOLAN: Standard Operating Procedures-Matrices, engl.: Matrix water retention (pF Curve) template)**

**Metod: Pješčana kutija** (engl. *Sandbox*) za određivanje pF, obim pritisaka od pF 0 (zasićen uzorak) do pF 2 - kriva sušenja

**Uzorkovanje:** Određivanje se vrši u neporemećenom uzorku tla uzetom u metalnom cilindru (prstenu). Oprema:

1. Pješčana kutija (engl: *sandbox*) za određivanje pF od 0 do 2:
2. Najlonska tkanina, elastična traka ili O-prsten
3. Peć za sušenje,  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  kapacitet
4. Vaga za vaganje, preciznost od 0,001 g
5. Desikator

Za zasićenje uzorka koristi se dejonizovana voda ili tretirana voda ( $\text{CaCl}_2$  0,01 N) kako bi se spriječilo narušavanje agregata tla a time i raspodjelje pora po veličini.

#### **Postupak:**

1. Pričvrstiti komad najlonske tkanine (mrežice) elastičnom trakom ili O-prstenom na donju stranu (sa oštrim rubom) cilindra sa uzorkom ;
2. Osigurati da sloj vode od 0,5 cm prekriva površinu pijeska u kutiji s pijeskom;
3. Zasićenje uzorka:
  - 3.1 Staviti uzorak tla s donjom stranom prema dolje u kutiju s pijeskom. Pustite uzorak da se prilagodi 1 sat. Zasitite uzorak, podižući nivo vode

do 1 cm ispod vrha cilindra za uzorkovanje, stavite poklopac na posudu (kako biste spriječili isparavanje) ... ili

3.2. Neka tla s puno frakcije praha vrlo je teško zasititi vodom, u ovom slučaju, zasitite uzorak pomoću kadice, tako što postupno povećavajte razinu vode u kadici, nakon zasićenja vratite uzorak u pješčanu kutiju... ili

3.3. Za neka tla, brzo zasićenje uzorka unutar uređaja u kutiji s pijeskom, bilo bi nepotpuno i štetno za stabilnost agregata, pa bi uzorke trebalo polako zasititi u eksikatoru pod usisavanjem (npr. vakumska pumpa):

3.4 Pažljivo izvaditi cilindar sa zasićenim uzorkom iz posude s vodom i obrišite sve kapljice vode koje vise ispod uzorka prije vaganja. Ova težina se koristi za izračunavanje sadržaja vode pri zasićenju, pF 0;

4. Vratiti zasićene uzorke u kutiju s pijeskom;
5. Prethodno skicirati dijagram (označite) mjesta uzoraka u kutiji s pijeskom, tako da se cilindri mogu vratiti tačno na određeno mjesto nakon uklanjanja;
6. Lagano pritisnuti prsten kako biste poboljšali kontakt tla i pijeska;
7. Pomaknuti regulator usisavanja tako da se na središte uzoraka primijeni odgovarajući standardni pritisak;
8. Ostaviti uzorak da se uravnoteži, s poklopcem na kutiji kako biste zaustavili isparavanje;
9. Pažljivo ukloniti uzorke i izvažite ih;
10. Radi provjere, vratiti uzorak na usisni sto na potpuno isto mjesto (pazite da se uspostavi kontakt između pijeska i uzorka) i ponovo izvažite uzorak sljedećeg dana. U slučaju ravnoteže sa stvorenom napetošću, razlika u sadržaju vode neće prelaziti 0,002 zapreminskog udjela;
11. Ako je uspostavljena ravnoteža između sadržaja vlage u tlu i pritiska, zabilježiti težinu uzorka. Prije vaganja obrišite zrnca i kapljice vode ispod uzorka;
12. Vratiti uzorke tla u pijesku na potpuno isti položaj na kojem su bili prije;
13. Postaviti regulator usisavanja prema dolje do sljedećeg standardnog povećanja potencijala vode, tako da se veće usisavanje primijeni na središte uzoraka;
14. Pričekati ravnotežu tla i vode;
15. Ponavljati iste korake od 7-15;
16. Osušiti uzorke u pećnici za sušenje preko noći na 105°C kako biste dobili masu uzoraka osušenih u pećnici.

## **Metod: Komora pod pritiskom i porozni set keramičkih ploča za određivanja pF pritisaka raspona od pF 2 do pF 4,2: kriva sušenja**

Uzorkovanje: Određivanje se vrši na poremećenom uzorku tla (finoj zemljisitnici) uzetim ručnim svrdlom.

Oprema:

1. Dvije komore pod pritiskom, raspon pritisaka od 0-5 i od 5 -15 bara
2. Porozne keramičke ploče 1 bar, 3 bar, 5 bar, 15 bar
3. Panel za kontrolu pritiska,
4. Kompresor na 20 bara,
5. Najlonska tkanina, elastična traka ili O-prsten,
6. Rerna za sušenje,  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  kapacitet,
7. Vaga za vaganje, preciznost od 0,001g i
8. Desikator

### **Postupak:**

1. Zasititi porozne keramičke ploče 24 sata
2. Postaviti prsten na ploču i napunite ga finom zemljom
3. Zasititi uzorak dopuštajući da višak vode stoji na površini ploče nekoliko sati, najmanje 24 sata
4. Zatvoriti komoru pod pritiskom, umetnite izlaznu cijev i postavite pritisak počevši od 0,1 bara;
5. Čim se pritisak vazduha unutar komore podigne iznad atmosferskog pritisaka, viši pritisak unutar komore tjera višak vode kroz mikroskopske pore u poroznoj keramičkoj ploči van kroz izlaznu cijev;
6. Jednom kada se postigne hidrodinamička ravnoteža (ovo vrijeme je vrlo varijabilno: najmanje 24 h za pritisak manji od 5 bara, najmanje 48 h za pritisak između 5 - 10 bara, najmanje 94 h za pritisak veći od 10 bara), isticanje je prestalo i nema prisustva vode ili vlage kroz izlaznu cijev, smanjiti primjenjeni pritisak na atmosferski, otvoriti tlačnu komoru, odvojiti odvodnu cijev od porozne keramičke ploče i brzo ukloniti i izvagati vlažne uzorke;
7. Osušiti uzorke u pećnici za sušenje preko noći na  $105^{\circ}\text{C}$  da dobijete masu uzoraka osušenih u pećnici;
8. Promijeniti poroznu keramičku zasićenu ploču u skladu s povećanjem potencijala vode i ponovite korake 2-7 na svakom od potencijalnih inkremenata (za svako povećanje pritisaka) koje želite izmjeriti (1/3 bara, 3 bara, 5 bara, 7 bara, 9 bara, 11 bara i 15 bara); ako postoji više od dvije tlačne komore, a zbir primjenjenih pritisaka podržan je

kapacitetom kompresora, moguće je istovremeno raditi poduzorke istog tla na različitom pritisku.

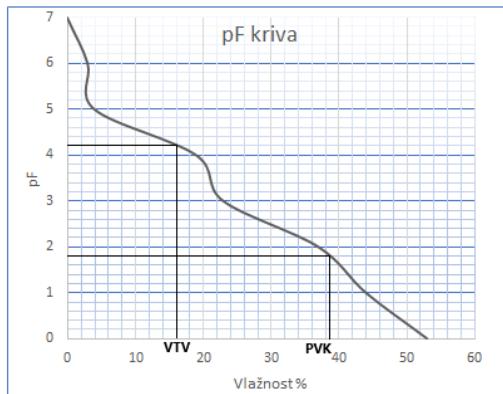
#### 5.2.3.5.5. Konstruisanje pF krive

Pri konstruisanju pF krive, na y-os se unose vrijednosti pF ili vrijednosti pritiska u atmosferama ili cm vodenog stuba kojima je bio izložen uzorak tla, a na x-os se unose obračunate vrijednosti vlažnosti zemljišta u % nakon djelovanja pojedinih pritisaka i istiskavanja vode koja se drži slabijim silama. U sljedećoj tabeli je primjer izmjerениh vlažnosti tla pri različitim pF vrijednostima koje se koriste za konstrukciju pF krive:

**Tabela 30. Vlažnost tla pri različitim pF vrijednostima [118]**

pF	0	1	2	3	4	5	6	7
% vlage	53	44	37	23	19	4	3	0

Nakon tabele konstruiše se pF kriva:



**Slika 53. pF – kriva, odnos između pF i sadržaja vlage (%vol) [118]**

Iz konstruisane pF krive za dato tlo se vidi da je vrijednost hidroloških konstanti za:

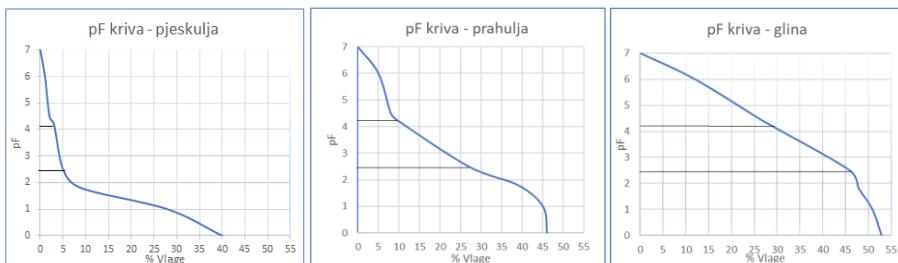
- Maksimalni vodni kapacitet MVK pri pF=0 iznosi 53 %, vlažnost kada su sve pore ispunjene vodom,
- Poljski vodni kapacitet PVK ili Retencioni kapacitet Rk pri pF=2,5 iznosi 29,5%; odnosno nakon što uzorak izložimo pritisku od 0,03 MPa 0,3 atm ili 300 cm vodenog stuba preostaje voda koju tlo drži svojim silama,
- Poljski vodni kapacitet PVK ili Retencioni kapacitet Rk pri pF=1,8 iznosi 38,5 %; odnosno nakon što uzorak izložimo pritisku od 0,006 MPa ili

0,06 atm ili 60 cm vodenog stuba u uzorku ostaje retencioni kapacitet odnosno voda koju tlo drži svojim silama,

- Vlažnost trajnog venuća - VTV pri  $pF=4,2$  iznosi 16%; odnosno nakon što uzorak izložimo pritisku od 1,5 MPa ili 15 atm ili 15.000 cm vodenog stuba ostaje vlažnost trajnog venuća pri kojem biljka trajno vene,
- Higroskopna vlaga - Hy pri  $pF=4,5$  iznosi 10,5%;, odnosno nakon što uzorak izložimo pritisku od 3 MPa ili 30 atm ili 30.000 cm vodenog stuba zaostane higroskopska vlaga;
- Apsolutno suho tlo pri  $pF=7$  vlažnost iznosi 0 %, , odnosno nakon što uzorak izložimo pritisku od 1000 MPa ili 10.000 atm ili  $10^7$  cm vodenog stuba iscijedi se sva voda;

Pristupačna voda biljci - Pv nalazi se u intervalu između vlažnosti trajnog venuća (VTV) kao donje granice pristupačne vode ili poljskog vodnog kapaciteta (PVK) kao gornje granice biljci pristupačne vode. Na  $pF$  krivi vidimo to kao interval između VTV pri  $pF\ 4,2$  (16%) i PVK pri  $pF\ 1,8$  (38,5%). Pošto je pristupačna voda  $Pv = PVK - VTV$ ;  $PV = 38,5 - 16$ , što znači da vrijednost pristupačne vode iznosi 22,5%. Voda u tlu je lako pristupačna ako je blizu vrijednosti poljskog vodnog kapaciteta, ali ako se sadržaj vode u tlu približava vlažnosti trajnog venuća, tada dolazi do otežanog usvajanja vode od strane biljke. Prema pojedinim autorima 50% biljci pristupačne vode je lakopristupačna voda, dok drugi smatraju da je udio lakopristupačne vode čak 75% [65].

U sljedećim dijagramima vide se  $pF$  krive u zavisnosti od teksturnog sastava.



**Slika 54. Odnos između  $pF$  i sadržaja vlage (%vol); pF krive pjeskulje, prahulje i glinuše** (u Excelu izradio Tvara M.)

Iz dijagrama vidimo da je pri  $pF\ 4,2$  odnosno pri vlažnosti trajnog venuća VTV sadržaj vlage u ispitivanim tlima najmanji kod pjeskulje sa  $3\%\text{ vol}$ , kod prahulje  $10\%\text{ vol}$  i najveći kod gline sa  $29\%\text{ vol}$ . Pojednostavljeno rečeno, sadržaj vlage od čak  $29\%\text{ vol}$  u glinušama odgovara vodnoj konstanti vlažnosti trajnog venuća (VTV) kada biljka počinje trajno da vene. Pri VTV u glinama voda je vezana za koloidne čestice gline (adsorpciona voda) silama većim od

usisne moći korijenovog sistema koje iznosi 1,5 MPa ili 15 atm ili 15.000 cm vodenog stupca (pF 4,2).

Nadalje pri pF 2,5 što odgovara vodnoj konstanti poljskog vodnog kapaciteta (PVK) ili retencionog kapaciteta (Rk) sadržaj vlage u tlu takođe je najmanji kod pjeskulja sa vlagom od 5 %<sub>vol</sub>, i raste preko prahulja 27 %<sub>vol</sub> do glina gdje je sadržaj vlage 46 %<sub>vol</sub>.

Vidimo da pri pF 0 kada je tlo potpuno zasićeno vodom, što donekle odgovora i ukupnom sadržaju pora, najveću vlažnost imaju gline sa 53 %, zatim prahulje sa 46 % i najmanje pjeskulje 40 %.

Zavisno od sile držanja različit je i procenat pristupačne vode biljkama. Sile adhezije kojim se voda veže u tlu (adsorpciona i kapilarna voda) su veće što je veća ukupna aktivna površina zemljišnih čestica na koju se veže voda u vidu tankog filma i meniska i što je manja udaljenost molekula vode od površine čestica. Međutim, gline iako imaju veliku ukupnu poroznost i veliki kapacitet za držanje vode (PVK) imaju relativno malo pristupačne vode biljkama. To je zato što su čestice gline jako usitnjene i imaju slojevitu građu što za posljedicu ima veliku ukupnu aktivnu površinu koja oko svojih čestica veže vodu vrlo jakim adsorbcionim silama, jačim od usisne moći korijena. Takođe u njenoj parcijalnoj poroznosti najzastupljenije su sitne pore manje od 0,2 mikrona tako da i nema mogućnosti velike udaljenosti molekula vode od površine minerala gline. S druge strane pjeskovita zemljišta sa svojim velikim promjerima elementarnih čestica što za posljedicu ima jako malo ukupne aktivne površine, te veliku zastupljenost makropora u ukupnom porozitetu (u kojima su molekule vode udaljenije od čestica pjeska i na njih ne djeluju sile adhezije nego gravitacije) imaju mali kapacitet držanja vode i malo pristupačne vode koja se najvećim djelom gravitacijski procjeđuje kroz krupne pore.

#### **5.2.3.5.6. Određivanje kapilarnog penjanja vode**

Sposobnost tla da kapilarno diže vodu iz nižih nivoa u više naziva se kapilarnost. Ta pojava nastaje kada sile adhezije između zemljišnih čestica i molekula vode u kapilarnim porama nadvladaju kohezione sile između molekula vode.

Kapilarna voda se veže i kreće u tlu pod uticajem složenih molekularnih sila koje izazivaju kapilarne ili meniskne pojave. Kapilarna voda predstavlja pokretnu vodu zahvaljujući kojoj voda tla vlaži ili se kreće iz djelova profila tla sa većom vlažnosti u suhlje dijelove i to u svim pravcima. Ona se kreće kapilarnim porama kada sile kohezije između čestica vode biva manja od sile adhezije koja djeluje između čestica zemlje (zidova kapilara) i čestica vode.

Od tuda i njena mogućnost suprastavljanja sili teže. Zahvaljujući kapilarnom penjanju u sušnim ljetnim mjesecima voda iz podzemne izdani može se dizati do zone rizosfere. Kapilarna voda je u cijelosti pristupačna biljkama i predstavlja ekološki najznačajniji oblik vode u tlu.

Pri dodiru molekula tečnih tijela (voda tla) i molekula čvrstih tijela (čestice čvrste faze tla) javljaju se dva oblika međumolekularnih sila. Između sloja graničnih molekula i unutrašnjih molekula vode u tlu vladaju sile kohezije. Istovremeno, između graničnog sloja molekula vode tla i molekula čvrstih čestica tla vladaju sile adhezije. Sile kohezije i adhezije su međusobno različite što zavisi od prirode molekula. Kada je adhezija veća od kohezije kakav je slučaj na kontaktu molekula vode tla i molekula čestica čvrste faze, dolazi do pojave meniska tj. tečnost „kiasi“ zid cijevi (pora). Usljed površinskog napona tečnost teži da zauzme što manju površinu uzdiže se i dolazi do kapilarnog kretanja vode tla.

Kapilarne pojave su najjače izražene u srednjim (kapilarnim) porama dijametra 0,2 -10 mikrona, (može se javiti i u porama do 8 mm), u kojima ponašanje tečnosti odstupa od zakona spojenih sudova. Naime, u spojenim otvorenim sudovima tečnost uvijek stoji na istom nivou, kakav je slučaj i sa slobodnim nivoom podzemne vode. Međutim ako se u dodiru sa slobodnom površinom podzemne vode nađe kapilarna pora ili cjevčica (niz spojenih kapilarnih pora predstavlja kapilarnu cjevčicu), doći će do podizanja nivoa tečnosti u kapilarnoj cijevi iznad nivoa podzemne vode. Tu pojavu nazivamo kapilarnom pojавom (kapilarna poduprta voda). Ovakvom uzdizanju vode protivi se težina stuba tečnosti u kapilarnoj cjevčici koja djeluje naniže, što u jednom momentu izaziva ravnotežu odnosno prestanak uzdizanja tečnosti u kapilarnim cjevima. Neki autori kapilarnu vodu dijele na:

- kapilarnu nepokretnu vodu koja se nalazi u sitnim kapilarama u koje korijenove dlačice ne prodiru. Ova voda nije pristupačna biljkama i u tlu se nalazi u vidu isprekidanih kapljica sa ograničenim meniskusima.
- lako pokretna voda odgovara tzv. visećoj vodi, lako je pokretna i pristupačna za biljku.
- poduprta kapilarna voda, nalazi se iznad podzemne koja je “podupire”.

Kod nas se uobičajilo određivanje kapilarnog uspona u laboratoriju, tj. sa usitnjениm tlom koje više nema prirodnu strukturu, pa otud ovaj način određivanja služi uglavnom kao približan relativan opis stanja zemljišta sa gledišta pojave kapilarnog penjanja vode. Pravo stanje podrazumijeva praćenje visine i brzine kapilarnog penjanja u prirodnom strukturnom tlu.

Kod kapilarnog penjanja vode treba razlikovati brzinu i visinu penjanja. Tako glinovita tla i uopšte tla težeg mehaničkog sastava, imaju velike visine kapilarnog penjanja vode ali veoma sporo, dok se u pjeskovitim, laksim

zemljištima relativno brzo uspostavi mali nivo penjanja vode kapilarnim putem.

**Postupak [158, 125]:**

U staklenu cijev promjera cca 2 cm i dugačku do 1 m naspe se kroz široki lijevak u kontinuiranom mlazu sitnica (fina zemlja). Na donjem kraju staklena cijev je zatvorena mrežicom ili gazom tako da tlo ne može propadati ali i da istovremeno može voda ulaziti i kvasiti uzorak u cijevi. Dobro je povremeno kuckati po staklenoj cijevi da se uzorak bolje slegne. Nakon toga staklenu cijev stavljamo u stalak i zdjelu sa vodom tako da nivo vode ne prelazi više od 1-2 cm ili do nulte tačke na visinskoj skali.

Pošto je važna i visina i brzina kapilarnog penjanja mjerjenje se vrši periodično:

10. minut _____ mm,	6. sat _____ mm,
20. minut _____ mm,	24. sat _____ mm,
30. minut._____ mm,	48. sat _____ mm,
5. sat _____ mm,	72. sat _____ mm,

I pored nedostataka ova metoda na osnovu penjanja vode nakon 5.(petog) sata može poslužiti kao pokazatelj vodnog režima i mehaničkog sastava tla.

**Tabela 31. Kapilarno dizanje vode u zavisnosti od tekture tla**  
(izvor FAO <https://www.fao.org/3/r4082e/r4082e03.htm>)

Tekstura tla	Kapilarno uzdizanje (cm)
gruba (pjeskovita)	20 do 50 cm
srednja (ilovasta)	50 do 80 cm
fina (glinovita)	više od 80 cm do nekoliko metara

#### **5.2.3.6. Kretanje vode u tlu**

Kretanje vode u zemljištu se vrši u različitim uslovima i to u:

1. zemljištu **nezasićenom** vodom i
2. zemljištu **zasićenom (saturiranim)** vodom

Kretanje vode **u nezasićenom tlu** vrši se u svim pravcima. Taj proces se naziva i vlaženje zemljišta. Voda se, pojednostavljeni rečeno, kreće od

vlažnih prema suhljim površinama tj. iz područja većeg ka području manjeg vodnog potencijala. Upravo prethodno opisani koncept vodnog potencijala najbolje tumači kretanje vode u nezasićenom tlu. Padavinska voda se znači infiltrira u zemljišta vertikalno pod uticajem gravitacije i bočno kapilarnim putem u smjeru manjeg matriksnog potencijala.

Najvažnija razlika između zasićenog (saturisanog) i nezasićenog kretanja je u vodoprovodljivosti. Vodoprovodljivost je osobina zemljišta povezana sa pogodnošću tla da se kroz njega vrši transport vode. Vodoprovodljivost nekog tla u prvom redu zavisi od [111]:

1. sadržaja vode tj. je li tlo zasićeno vodom ili se radi o nezasićenom tlu.
2. i od zastupljenosti krupnih, srednjih i sitnih pora u tlu.

Poznato je da laka pjeskovita tla imaju veće prisustvo krupnih pora u odnosu na glinovito tlo koje ima veće prisustvo sitnih pora otuda će i vodoprovodljivost pjeskovitih tala biti znatno veća.

Generalno vodoprovodljivost nekog tla se smanjuje sa sušenjem tla. Tako nezasićeno glinovito tlo ima najmanju vodoprovodljivost, i često se za glinu kaže da je nepropusna. S druge strane zasićeno tlo u lakšim tj. pjeskovitim zemljištima ima mnogo veću vodoprovodljivost nego u težim glinovitim ili ilovastim zemljištima. Kako tlo prelazi iz saturirane u nesaturiranu fazu vodoprovodljivost se drastično smanjuje.

#### **5.2.3.6.1. Slobodno kretanje vode u zasićenom tlu - filtracija**

Kod zasićenog (saturiranog) toka sve pore su zasićene vodom i vodopropusnost je maksimalna. Kad je tlo zasićeno sa vodom, voda tla se nalazi izvan sila privlačenja od strane čestica tla (nije pod tenzijom) i kreće se slobodno (ima maksimalni vodni potencijal). U ovakvom stanju treba razlikovati:

- vertikalno kretanje gravitacione vode ili descedentno kretanje vode u pravcu sile teže koje se naziva filtracija, hidraulička provodljivost, perkolacija ili cijeđenje vode, i
- horizontalno tečenje podzemne vode u smjeru pada nepropusnog sloja ili pada nivoa podzemne vode.

## **Mjerenje filtracije (hidrauličke provodljivosti) u zasićenom tlu u laboratoriji**

Filtracija (vodopropusnost, permeabilnost, perkolacija, hidraulička provodljivost) predstavlja vertikalno kretanje gravitacione vode ili descedentno kretanje vode u zasićenom tlu u pravcu sile teže.

Filtracija se određuje laboratorijski pomoću uređaja za laboratorijsko mjerenje vodopropusnosti tla u zasićenom stanju. Ovdje će se objasniti na primjeru uređaja Laboratory permeameter, proizvođača opreme Eijkelkamp Agrisearch Equipment: Određivanje hidrauličke provodljivosti u zasićenom tlu (Determination of the saturated hydraulic conductivity) [184] a kako je opisano u; ISO/FDIS 17312 Determination of the hydraulic conductivity of saturated porous materials; ISO/TS 17892-11 Laboratoy testing of soil: part 11 Determination of permeability by constant and falling head and in Methods of Soil Analysis van de American Society of Agronomy en de Soil Science Society of America SSSA Book series 5.

Laboratorijski permeametar je laboratorijski alat za mjerenje permeabilnosti zasićenih uzoraka tla. Upotreba vodene pumpe omogućava postavljanje zatvorenog vodovodnog sistema, koji osigurava konstantan kvalitet i temperaturu vode, a osim toga štedi vodu.

Laboratorijski permeametar se primjenjuje za utvrđivanje horizontalne i vertikalne propusnosti pojedinih slojeva tla. Već je navedeno da heterogeno tlo može u vertikalnom smjeru imati drugačiju propusnost nego u horizontalnom. Laboratorijski permeametar predstavlja alternativu metodama terenskog istraživanja za određivanje zasićene permeabilnosti.



**Slika 55. Ejkelkamp - Laboratorijski permeametar** (foto: Trica M.)

**Princip rada** - Generalno propustljivost se odnosi na sposobnost tla da drenira vodu. Koeficijent propusnosti je mjera propusnosti i određen je s jedne strane geometrijom kompleksa pora, ovisno o teksturi i strukturi tla, a s druge strane o svojstvima zemljišne otopine (viskozitet i gustoća). U slučaju kada je tlo potpuno zasićeno vodom, naziva se propusnošću zasićenog tla. Zbijenost tla, širenje i skupljanje, te zauzetost adsorpcionog kompleksa utiču na propusnost tla. Heterogeno tlo može u vertikalnom smjeru imati drugačiju propusnost nego u horizontalnom. Ovo se zove anizotropija.

Propusnost zasićenog tla utvrđuje se tokom geohidroloških istraživanja, koja često prethode planiranju i izvođenju projekata hidromelioracija i poljoprivrede kao što su drenaža i navodnjavanje. Također, u zaštiti i upravljanju okolišem bitno je razumjeti preovlađujuće hidrološke uslove na terenu.

Mjerenje koeficijenta filtracije ( $K_f$ ) se obavlja u uzorcima u cilindrima Kopeckog za sve otvorene profile, po horizontima u tri ponavljanja.

**Koeficijent vodopropusnosti** se određuje na osnovu razlike u hidrauličkom pritisku u uzorku koji je potpuno zasićen, te posljedičnom mjerenu brzine protoka vode. Metode se u osnovi zasnivaju na Darcy-evom zakonu kretanja vode kroz porozni medij (1856). Darcy'jev zakon:

$$V = K_f \cdot i \cdot A \cdot t$$

Gdje su:

$V$  = zapremina vode koja prođe kroz uzorak u cilindru ( $\text{cm}^3$ )

$K_f$  = koeficijent vodopropusnosti ( $\text{cm}/\text{d}$ )

$h$  = razlika u nivou vode unutar nosača cilindra i izvan nosača cilindra u kadici (cm)

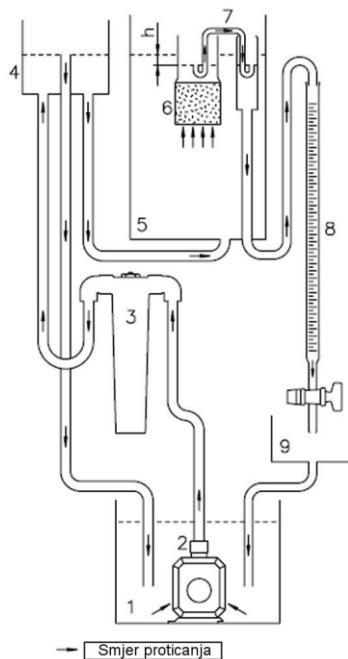
$L$  = dužina uzorka tla u cilindru (cm)

$i$  = gradijent porasta vodoprupsnosti, ili:  $h / L$  (-)

$A$  = površina poprečnog presjeka uzorka ( $\text{cm}^2$ )

$t$  = vrijeme potrebno za protok vode  $V$  (d) ( $d$  = dan)

U zatvorenom sistemu (slika 56) voda se pumpa iz rezervoara za skladištenje vode (1) pomoću cirkulacijske pumpe (2) do regulatora nivoa vode (4) i to kroz filter (3). Regulator je spojen na plastičnu kadicu ili kontejner (5) i ima cijev za vraćanje viška vode u rezervoar za skladištenje vode. Potpuno zasićen uzorak u cilindru kopeckog se postavi u posebne nosače (6) tako da se donji dio cilindra sa čarapom i guminicom ili hidrostatičkim filter papirom postavi u donji položaj u nosaču i pričvrsti šarafom, a gornji dio uzorka se nalazi okružen u nosaču koji ne propušta vodu. Nosač sa cilindrom se postavlja/potapa u vodu u jednoj kadi/kontejneru (5) tako da je cijeli uzorak pod vodom (sa šarafom u donjem položaju) a jedino nosač iznad cilindra dijelom viri iznad vode. U nosaćima cilindri tako prianjaju da voda ne može prolaziti sa „strane“ nego samo kroz uzorak. Tako, voda iz kade da bi ispunila unutrašnjost nosača iznad cilindra mora proći kroz uzorak u cilindru. Kada prođe kroz uzorak (dužina uzorka  $L = 5,1 \text{ cm}$ , a površina  $A = 19,625 \text{ cm}^2$ ) i počne ispunjavati prostor u nosaču iznad uzorka, voda se iz nosača preko sifona (7) transportuje u biretu - graduisanu staklenu cijev (8) u kojoj se bilježi vrijeme ( $t$ ) za koje određeni volumen vode ( $V$ ) ispunio biretu. Nivo vode u nosaču iznad uzorka se nakon kratkog vremena izjednači sa cijevi sifona tako da razlika razlika između nivoa vode u kadici i iznad uzorka predstavlja hidraulički gradijent ( $h$ ).



**Slika 56. Shema permeametra [184]**

Koefficijent vodopropusnosti (filtracije) se izvodi iz prethodne formule i računa po sljedećoj:

$$K_f = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot h}$$

Za uzorke koji imaju birete koje "rade" (porozniji uzorci koji propuštaju vodu) koristi se metod konstantne visine potencijala, a za uzorke koji ne ostvaruju proticaj kroz birete ili se voda ni nakon više sati ne pojavljuje nad uzorkom u nosaču, koristi se *metod opadajućeg potencijala*.

#### **Postupak za Konstantni metod:**

1. postavi se uzorak u cincilindru Kopeckog u nosač cilindra tako da je dio cilindra sa mrežicom okrenut prema dole i pričvrsti se šarafom,
2. nosač cilindra se postavi u kadicu permeametra, tako da je strana sa šarafom okrenuta prema dole,
3. zapiše se broj cilindra u nosaču i poveže sa brojem birete u kojoj se vrši očitanje V zapremine vode u bireti,
4. kada su svi nosači na mjestu, uključujemo pumpu (2) koja održava nivo vode u kadi/kontejneru i čekamo pojavu vode iznad uzorka; Kod

propusnih tala to se dešava nakon nekoliko minuta kod slabije propusnih treba i par sati; Kod teških glina voda se nikad ne pojavi iznad uzorka; Nivo vode u kadici regulisati preko pumpe i regulatora nivoa,

5. postaviti sifone; Prvo sifon uroniti u rezervni kontejner (1) i dobro ga protresti da sav zrak izade, prstom začepiti jednu stranu sifona i izvući sifon (provjeriti prisustvo balončića zraka, ukoliko ih ima ponoviti postupak); Još uvijek držeći prst na jednom kraju/nožici sifona, jednu nožicu stavljamo u vodu iznad cilindra a drugu u cijev koja je povezana s biretom; Ponoviti postupak za sve uzorke kod kojih se pojavila voda iznad uzorka.,
6. voda počinje da curi kroz staklene birate, skuplja se u donjoj tacni (9) i ponovo vraća u rezervni kontejner (1)
7. zatvorimo biretu (oprez da se ne slomi),
8. čekamo da voda u bireti dođe do oznake 0 i započinjemo mjerjenje vremena t startiranjem štopericice i čekamo da se bireta napuni do oznake 40 koja predstavlja V volumen vode koji je prošao kroz uzorak; Ukoliko je prolazak vode kroz uzorak spor i punjenje birete sporo, vrijeme se mjeri do neke druge oznake odnosno zapreminje vode ( $V= 5, 10, 15, 20 \text{ ml}$ ),
9. kada je voda ispunila biretu do željene zapreminje (V) zaustavljamo štopericu i zapišemo smo vrijeme (t) u minutama i zapišemo zapreminu u ml očitanu sa birete,
10. nivo vode iznad uzorka se ustalio u visini sifona,
11. odrediti visinu vode u kadici/kontejneru ( $h_1$ ) a zatim i visinu vode iznad uzorka u nosaču ( $h_2$ ), kako bi se iz njihove razlike odredila vrijednost hidrauličke visine ( $h$ ).

Preporuka je da se koristi više štopericica i mjeri više uzoraka istovremeno i da se prvo mjere uzorci sa bržim proticajem (brže pune birete).

### **Postupak za *Opadajući/silazni metod***

Koristi se kada se nivo vode nad uzorkom pojavi kasno nakon 2 sata i više i sporo nadolazi.

1. ugasiti pumpu; Sačekati da nivo vode u kadi dosegne stalnu vrijednost. Ako je nivo prenizak dosuti vode da je nekih 5 cm od numerisanih cijevi bireta,
2. iscrpiti/usisati svu vodu iznad uzorka i senzorom odrediti razliku u visini vode u kadici i iznad uzorka  $h_1$ ,
3. zabilježiti vrijeme  $t_1$  na satu ili štopericu,

4. nakon 8 sati ili više ( $t_2$ ), izmjeriti ponovo razliku u visini vode nad uzorkom i u kadici.  $h_2$  (na kraju mjerjenja).

### **Obračun:**

Za uzorke koji imaju birete koje "rade" (porozniji uzorci koji propuštaju vodu) koristi se metod konstantne visine potencijala, a za uzorke koji ne ostvaruju proticaj kroz birete ili se voda ni nakon više sati ne pojavljuje nad uzorkom u nosaču, koristi se *metod opadajućeg potencijala*. U slučaju da se u roku od tri dana voda ne pojavi nad uzorkom takvo tlo se smatra nepropusno odnosno da mu je koeficijent filtracije  $k = 0$  (teške gline).

Proračun je obavljen na osnovu formula za konstantni metod i opadajući/silazni metod. Oba metoda se, kao što smo objasnili u principu rada, u osnovi zasnivaju na Darcy-evom zakonu kretanja vode kroz porozni medij (1856). Opadajući metod se koristi pri mjerjenju malih propusnosti karakterističnih za glinu ili treset.

$$\text{Konstantni metod: } Kf = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot h}$$

$$\text{Opadajući metod: } Kf = \frac{A \cdot L}{A \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Gdje su:

$Kf$  – koeficijent filtracije. Prilikom popunjavanja formula uvjerite se da se različiti objedinjeni parametri podudaraju. Preporučuje se izražavanje  $K$  u  $(\text{cm}/\text{d})$  ili u  $(\text{m}/\text{d})$ .

$V$  – volumen vode prošao kroz uzorak u vremenu  $t$  očitan sa birete ( $\text{ml}$  ili  $\text{cm}^3$ )

$L$  – visina cilindra Kopeckog (const. 5,1 cm)

$A$  – površina poprečnog presjeka uzorka u cilindru Kopeckog (const.  $19,625\text{cm}^2$ )

$t$  – trajanje protoka, vrijeme punjenja volumena  $V$  ( $h$ , min, s). Koeficijent filtracije se najčešće izražava sa  $\text{cm}/\text{min}$ ,  $\text{cm}/\text{dan}$  ili  $\text{m}/\text{dan}$ . Vrijednost vremena  $t$  za koje se bireta protokom vode iz cilindra preko sifona ispuni do određenog nivoa odnosno zapremine ( $V$ ) a koje se mjeri štopericom, prvo se izrazi u minutima a onda izražava u željenoj jedinici mjere.

$h$  - razlika u nivou vode unutar i izvan držača cilindra (cm)

$t_1$  – vrijeme početka mjerjenja

$t_2$  – vrijeme kraja mjerjenja

$h_1$  – razlika nivoa vode unutar (iznad uzorka) i izvan nosača cilindra na početku mjerjenja  $t_1$  (cm)

$h_2$  – razlika nivoa vode unutar i izvan nosača cilindra na kraju mjerjenja  $t_2$  (cm)

$\ln$  – prirodni logaritam baze e (iracionalna konstanta, približna vrijednost  $e = 2,718281828$ )

Darcyjev zakon se koristi za izračunavanje  $K_f$  kada se primjenjuje metoda opadajuće glave za određivanje propusnosti. Međutim, budući da se brzina protoka i porast permeabilnosti mijenjaju tokom vremena, koristi se prilagođena verzija Darcyjevog zakona.

**Korekcija na isparavanje:** Budući da ovo mjerjenje opadajućim metodom može potrajati nekoliko dana i da je površina vode u direktnom kontaktu sa atmosferom, s obzirom na prilično lošu propusnost uzorka, ne treba zanemariti isparavanje vode u prstenastom držaču (uprkos korištenju poklopca). Promjena razlike u nivou vode može se u slučaju vrlo loše propusnosti u potpunosti pripisati isparavanju. Korekcija isparavanja (treći dio formule) vrši se koristeći prosječnu vrijednost razlike u nivou vode. (Napomena: Korekcija se ne mora koristiti u svakom slučaju.)

$x$  - faktor isparavanja (literarna vrijednost): 0,0864 cm/d ili 0,000864 m/d

Opadajući metod:

$$K_f = \frac{A \cdot L}{A \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} + \frac{x \cdot A \cdot L}{A \cdot \sqrt{(h_1 \cdot h_2)}}$$

**Korekcija temperature:** Propusnost tla je također određena viskoznošću rastvora tla. Viskoznost (sirupnost) zavisi od temperature (vidi tabelu). Temperatura vode u laboratoriju varira od 18 do 22 °C, dok je prosječna temperatura podzemne vode 10 °C. Zimi temperatura može pasti na 5 °C. Stoga će se za određene primjene propusnost morati korigirati za viskozitet otopine tla.

**Tabela 32. Odnos zavisnosti temperature vode i viskoznosti [184]**

Temperatura °C	Viskozitet vode ( $10^{-3}$ Pa.s)
5	1,52
10	1,31
15	1,14
18	1,05
20	1,01
22	0,96
25	0,89
30	0,81

Ispravite  $K_f$  na primjenjenoj tj. mjernoj temperaturi faktorom korekcije za viskoznost koristeći sljedeću formulu:

$$k_{10} = k_T \cdot h_T / h_{10}$$

Gdje su:

$k_{10}$  = korigovani  $K_f$  na 10 °C (u prirodnim okolnostima) (cm/d)

$k_T$  =  $K_f$  izmjerena na mjernoj temperaturi (cm/d)

$h_{10}$  = dinamički viskozitet vode na 10 °C (Pa.s)

$h_T$  = dinamički viskozitet vode pri mjernoj temperaturi T °C (Pa.s)

$k_r$  = faktor korekcije na 10 °C =  $h_T / h_{10}$

Nakon provedenih mjerena po horizontima u ponavljanjima i izvršenih obračuna odredi se srednja vrijednost koeficijenta filtracije za svaki horizont. Na osnovu koeficijenta filtracije ( $K_f$ ), određuju se filtracione sposobnosti zemljišta.

**Tabela 33 . Ocjena filtracionih svojstava zemljišta po O'Nealu [125]**

Koeficijent filtracije / Hidraulički konduktivitet ( $K_f$ )		Oznaka propusnosti
m/dan	cm/h	
< 0,026	< 0,11	vrlo mala
0,026-0,13	0,11-0,54	mala
0,13-0,52	0,54-2,17	umjereni mala
0,52-1,42	2,17-5,92	srednja
1,42 - 3	5,92-12,5	umjereni velika
3-6	12,5-25	velika
> 6	> 25	vrlo velika

**Tabela 34. Oznaka vrijednosti za vodopropusnost tla po Vukašinoviću**  
[125]

Koeficijent vodopropusnosti (Kf) u $\text{cm/s}^{-1}$	m/dan	Oznaka vodopropusnosti
$10^{-7}$	<0,000864	Nepropusno
$10^{-6}$	0,000864-0,00864	Vrlo slabo propusno
$10^{-5}$	0,00864-0,0864	Slabo propusno
$10^{-4}$	0,0864-0,864	Srednje propusno
$10^{-3}$	0,864-8,64	Jako propusno
$10^{-2}$	8,64-86,4	Vrlo jako propusno
$10^{-1}$	>86,4	Ekstremno propusno

#### 5.2.3.6.2. Infiltracija – upijanje vode nezasićenog tla

Infiltracija je proces prodiranja vode u površinu tla u jedinici vremena. Intenzitet ovog procesa naziva se **brzina infiltracije**. Infiltraciju slikovito možemo predstaviti kao upijanje vode od strane (nezasićenog) tla, i treba je razlikoviti od filtracije što se odnosi na hidrauličku provodljivost u zasićenom tlu.

**Brzina infiltracije (i)**, npr. u mm/min, se izražava u vidu zapremine vode koja se upije ( $Q$ ) po površini tla ( $F$ ) i po jedinici vremena (T):

$$i = \frac{Q}{F \cdot T} \quad (\text{npr. u mm/min, cm/h, mm/dan,})$$

$Q$  – Zapremina (količina) vode (u  $\text{cm}^3$  ili litrima) koja se upije u vremenu T (min, sat ili dan)

$F$  – površina poprečnog presjeka unutrašnjeg cilindra (u  $\text{cm}^2$ )

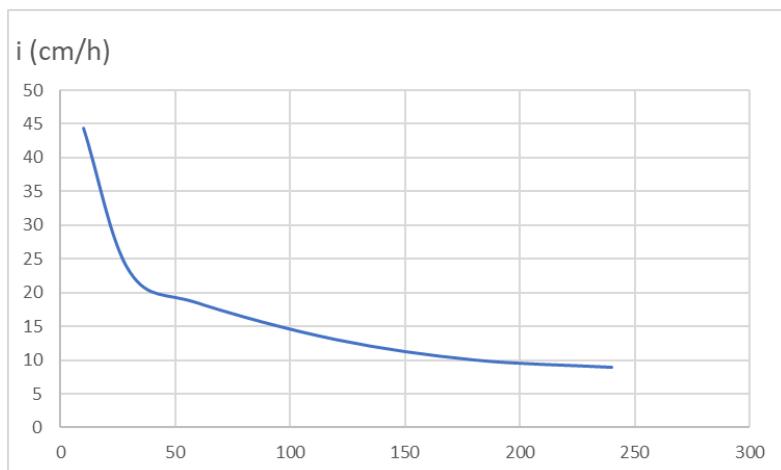
Pod određenim okolnostima, može biti potrebno odrediti kapacitet infiltracije tla, na primjer u infiltracijskim područjima ili infiltracijskim bazenima. **Kapacitet infiltracije** tla pokazuje **maksimalnu brzinu infiltracije** u određenom trenutku (mjerena).

Voda se infiltrira u tlo tokom padavina ili navodnjavanja. Ako intenzitet padavina ili navodnjavanje premašuju kapacitet infiltracije (maksimalnu brzinu infiltracije), voda se počinje nakupljati na površini tla. U tom slučaju, brzina infiltracije jednak je kapacitetu infiltracije. To će u homogenim zemljištima uzrokovati zasićenje površinskog sloja, a ispod zonu blizu zasićenja, koja će se proširiti vlaženjem tla ispod.

**Tabela 35. Praćenje upijanja (infiltracije) vode se vrši tabelarno [118]**

T - Vrijeme (min)	10	30	60	120	180	240
Q - Količina (nivo u mjernom cilindru) vode (cm)	7,4	11,6	18,5	26,2	32,8	36,0
Brzina infiltracije $i = (Q/T) \times 60$ (cm/h)	44,4	23,2	18,5	13,1	10,1	9,0

Potom se može formirati kriva infiltracije gdje je na x-osi uneseno vrijeme T (u min), a na y-osi trenutnu brzinu infiltracije -  $i$  (u cm/h).



**Slika 57. Kriva infiltracije [118]**

Kapacitet infiltracije tla se brzo smanjuje tokom vremena trajanja infiltracije. Tok kapaciteta infiltracije u vremenu izražava se kroz krivu infiltracije. Početni kapacitet infiltracije u suhim tlima je visok, što je uzrokovano velikim usisnom moći matriksa tla tj. velikoj rezlici u potencijalu slobodne infiltrirajuće vode i suhljeg okolnog tla. Kasnije u zoni zasićenja tla vodom, razlike u vodnom potencijalu su manje jer visok sadržaj vode jedva da uzrokuje bilo kakvu varijaciju u matriksnom potencijalu. Posljedično, kapacitet infiltracije se obično smanjuje u roku od nekoliko sati dok ne dostigne konstantnu vrijednost skoro jednaku hidrauličkoj provodljivosti zasićenog tla (filtraciji), međutim zarobljeni mjeđurići zraka tokom infiltracije sprečavaju maksimalno zasićenje.

Faktori koji utječu na kapacitet infiltracije na površini tla su: zbijenost tla uzrokovana kolotragama i gaženjem, ispiranje finih čestica u površinske pore, te pukotine i makro pore. Ovi faktori mogu dovesti do pojave pokorice tla. Osim toga, vegetacija i kultivacija tla mogu uticati na kapacitet infiltracije. Debljina sloja vode na površini će uticati samo na početak infiltracije.

Silazna brzina infiltriranja vode zavisi od teksture, strukture i slojevitosti (heterogenosti) tla, sadržaja vlage u tlu i nivoa podzemne vode. Visok nivo podzemne vode će uzrokovati stagnaciju infiltrirane vode, a kapacitet infiltracije će se smanjiti, približavajući se nuli.

Heterogeno tlo se često doživljava kao niz pojedinačnih homogenih slojeva tla. U heterogenom tlu sa propusnošću koja se smanjuje sa dubinom, kapacitet infiltracije jednak je ponderiranoj prosječnoj brzini infiltracije odvojenih slojeva. Kod heterogenog tla sa rastućom propusnošću sa dubinom, na primjer tlo s pokoricom, kapacitet infiltracije će odgovrati sloju tla blizu površine.

Neki primjeri konstantnih stopa infiltracije (ili približnih hidrauličkoj provodljivosti zasićenih tala) za različite teksturne klase tla navedeni su u tabeli.

**Tabela 36 Stopa infiltracije za različite teksturne klase [8, 79, 176]**

Teksturna klasa tla	Konstantna stopa infiltracije mm/dan
Pijesak	> 30
Pjeskovita ilovača	20 - 30
Ilovača	10 - 20
Glinovita ilovača	5 - 10
Glina	1 - 5

### **Određivanje brzine infiltracije vode na terenu pomoću infiltrometra s dvostrukim prstenom [183]**

Za određivanje brzine infiltracije vode u tlo na terenu se koristi jednostavan instrument infiltrometar s dvostrukim prstenom. Brzina infiltracije određena je kao količina vode koja prodire u tlo po jedinici površine i vremena.

Infiltrometar s dvostrukim prstenom je jednostavan instrument koji se koristi za određivanje infiltracije vode u tlo (Mjerenja prema standardnoj metodi ispitivanja ASTM D3385-03 i DIN 19682 str. 7). Infiltrometar sa dvostrukim prstenom je pogodan za gotovo sve vrste tla i primjenjuje se u projektima

navodnjavanja i drenaže, analizi podzemnih voda i infiltracijskih bazena, za optimizaciju dostupnosti vode za biljke i za određivanje efekata uzgoja.

Standardni set infiltrometara sa dvostrukim prstenom sastoji se od tri para unutrašnjih i vanjskih prstenova, ploče za nabijanje, čekića koji apsorbira udar, mjernih mostova i mjernih šipki sa plovциma. Parovi infiltracionih prstenova od nerđajućeg čelika imaju sledeće prečnike: 28/53 cm, 30/55 cm i 32/57 cm. Visina prstena je 25 cm i ima jednu naoštrenu ivicu (po DIN 19682-7)

Prstenovi se djelomično nabijaju u tlo (5 cm) i pune vodom, nakon čega se mjeri brzina infiltracije. Dvostruki prsten ispunjen vodom ograničava bočno širenje vode nakon infiltracije u manjem unutrašnjom prstenu. Standardni set se sastoji od tri para unutrašnjih i vanjskih prstenova, što omogućava sinhrono mjerjenje. Ovo štedi vrijeme i proizvodi pouzdane prosječne podatke.



Slike 58. i 59. Infiltrometar sa dvostrukim prstenom (foto: Čadro S.)

### Postupak - Instalacija

1. Postaviti unutrašnji prsten sa oštom ivicom okrenutom nadole na tlo. Uklonite kamenje ili grančice. Prilikom mjerjenja ispod površine tla treba napraviti profiliranu jamu.
2. Postaviti ploču za nabijanje na vrh unutrašnjeg prstena. Ovisno o svom promjeru, prsten će stati preko, između ili unutar klinova koji se nalaze na donjoj strani ploče.
3. Čekićem za upijanje udarca nabijte infiltracijski prsten oko 5 cm okomito u tlo. Pobrinite se da što manje poremetite tlo. Na tvrdom tlu neka neko stoji na ploči dok je druga osoba ubacuje. Uklonite ploču iz umetnutog infiltracionog prstena.
4. Postaviti vanjski prsten sa reznom ivicom okrenutom prema dolje oko unutrašnjeg prstena i stavite ploču na njega.

5. Ponoviti korak 3. Oblik ploče će osigurati dubinu identičnu onoj unutarnjeg prstena.
6. Standardni set infiltrometara sa dvostrukim prstenom omogućava istovremeno trostruko mjerjenje. Postavite prstenove na udaljenosti od 2 - 10 m, ovisno o situaciji na terenu, i ponovite korake 1 do 5.
- Postaviti sve prstenove na sličnu dubinu kako biste omogućili poređenje rezultata. Različiti prečnici prstena ne bi trebalo da daju različite rezultate.
7. Postaviti mjerni most sa mjernom šipkom i plovkom na unutrašnji prsten. Uklonite, bez narušavanja strukture tla, bilo koju vegetaciju koja može ometati slobodno kretanje plovka ili utjecati na mjerjenje.
8. Napuniti spoljni prsten vodom, a zatim unutrašnji prsten, do otprilike 5 - 10 cm. Odmah počnite s mjerenjem kako biste odredili krivu infiltracije.

Nivo vode unutar infiltracijskih prstenova treba da bude što je moguće niži kako bi se osigurala vertikalna infiltracija.

Prstenovi ne bi trebalo da se osuše. Preporučuje se punjenje do 5 - 10 cm. Za zaštitu površine tla od mlaza vode prilikom nalivanja vode koristite plastičnu foliju, krpu od jute, sunđer ili sloj pijeska ili šljunka od 1-2 cm. Također je moguće sipati vodu preko ruke na tlo. Pobrinuti se da imate dovoljno vode pri ruci. Za punjenje jednog seta prstenova potrebno je cca. 25 litara.

**Primjedba:**

Da bi se izmjerio samo kapacitet infiltracije zasićenog tla, dovoljno je zasiliti tlo (nalivanjem vode u prstenove) bez mjerjenja kao kod infiltracije kod nezasićenog tla.

### **Mjerenje:**

1. Započeti mjerjenje tako što ćete zabilježiti vrijeme i nivo vode u unutrašnjem prstenu (referentni nivo) očitanjem na mjernoj šipki. Koristite kolone A i B obrasca koji se koristi pri korištenju infiltrometra sa dvostrukim prstenom. Prilikom sinhronog mjerjenja koristite nekoliko obrazaca. Uvijek koristite kopije obrasca a original samo za reprodukciju.
2. Odrediti pad nivoa vode u unutrašnjem prstenu tokom određenog intervala. Zabilježite vrijeme i nivo vode u kolonama A i B obrasca. Počnite s kratkim intervalima (npr. 1-2 min) i završite mjerjenje s dužim intervalom (20 - 30 min, ovisno o vrsti tla).

Pazite da se infiltracijski prstenovi ne osuše tokom mjerjenja. Dodajte vodu kada ostane samo nekoliko centimetara vode u kolonama. Upišite nove nivoe u kolonu B obrasca.

Vodu u unutrašnjem i vanjskom prstenu održavajte na sličnom nivou. Viši nivo vode u vanjskom prstenu će dovesti do smanjenja stope infiltracije u unutrašnjem prstenu.

3. Zaustaviti mjerjenje samo ako je stopa infiltracije dostigla konstantnu vrijednost. Promjena manja od 10% u određenoj fazi se često smatra konstantnom. Ovisno o vrsti tla, to se može dogoditi u roku od 1 ili 2 sata, u izuzetnim slučajevima tek nakon jednog dana.

4. Ukloniti prstenove pomoću kuka za izvlačenje.

5. Isprati prstenove, pazite da se zemlja ne zalijepi i ne naliježe na prstenove. Pravilno održavanje će spriječiti nepotrebno narušavanje tla nakon instalacije.

**Slika 60.** Originalni Eijkelkamp obrazac koji se koristi u polju za evidenciju filtracije [183] (foto: Tvinca M.)

## Aplikacije infiltrometra

Infiltrometar sa dvostrukim prstenom je pogodan za gotovo sve tipove tla osim začepljenih tla, kamenitih tla ili tla na strmim padinama. Vanjski prsten uzrokuje gotovo vertikalnu infiltraciju vode iz unutrašnjeg prstena.

Mogu se odrediti brojne hidrološke karakteristike tla (po sloju tla):

- Kapacitet infiltracije.
  - Hidraulička provodljivost gotovo zasićenog tla.
  - Kriva infiltracija.
  - Kumulativna infiltracija tokom određenog perioda.

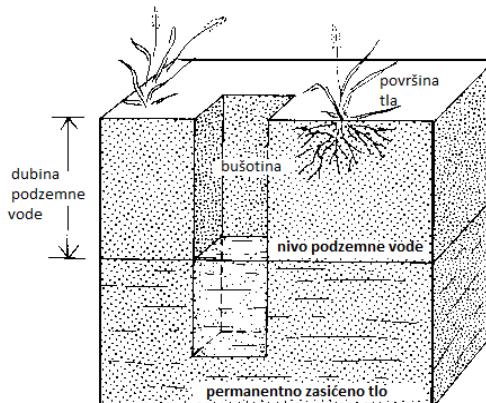
Infiltrometar sa dvostrukim prstenom primjenjuje se, između ostalog, za određivanje kapaciteta infiltracije poplavljenog tla za:

- Projekti površinskog navodnjavanja i drenaže.
  - Bazen za infiltraciju ili prečišćavanje vode.
  - Procjeđivanje iz vodotoka, kanala, bazena ili laguna otpadnih voda.
  - Ispiranje tla na lokacijama za skladištenje otpada.

- Istraživanje efekata uzgoja.
- Istraživanje efekata drenaže.
- Istraživanje loše propusnih slojeva sportskih terena.

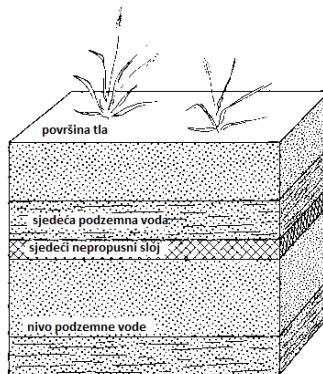
#### **5.2.3.6.3. Praćenje nivoa podzemne vode u buštinama (pijezometrima)**

Za određivanje pravca i brzine kretanje podzemne vode potrebno je znati pored koeficijenta filtracije vode u ispitivanom zemljištu i nivoe podzemne vode na ispitivanom području. Sljedeća slika daje nam šematski prikaz podzemne vode.



**Slika 61. Podzemna voda** (izvor [193])

Razlikujemo i podzemnu vodu koja se formira na tzv. sjedećem sloju tj. nepropusnom sloju stijene ili sedimenta ili relativno nepropusnom sloju iznad glavne podzemne vode/akvifera, ali ispod površine kopna.



**Slika 62. Sjedeća podzemna voda** (izvor [193])

Praćenje nivoa podzemne vrši se u bušotinama odnosno pijezometrima (vidi sliku). Pijezometri su perforirane pocičane cijevi koje se postavljaju/zabijaju u ispitivano zemljište do nepropusnog sloja, u paralelnim serijama od po više pijezometara (najčešće tri), upravno na smjer kretanja podzemne vode. Nakon postavljanja snime se geodetskim instrumentima kote terena na mjestima pijezometara (utvrdi se zabijanjem kolčića uz sam pijezometar), te izračuna visina pijezometara iznad terena. Nivo izdani u cijevi očitava se spuštanjem plovka na mjernoj traci u cijev do nivoa vode ili specijalnim „zviždačima“ mjernim trekama koje se spuštaju u pijezometar ili bunar i koje u trenutku kontakta sa vodom zazvižde i na taj način očitamo dubinu do nadzemnog dijela pijezometra. Kota terena plus visina nadzemnog dijela pijezometarske cijevi minus očitanje daje nam kotu nivo podzemne vode.



**Slike 63. i 64. (lijevo) Pijezometri; perforirane pocičane cijevi, zašiljene na vrhu (20-tak cm vrh), sa taložnikom 7 cm, rupe unakrsne promjera 3 mm u visini 70 cm od taložnika; filter na pijezometru: 4 x sloj medicinske gaze i 2 x sloj plastične mreže, učvršćeno na 4 mesta plastičnom steznikom, krajevi zalijepljeni ljepljivom trakom. (desno)Pijezometri se zabijaju u tlo najčešće do nepropusnog sloja. (vlastiti izvor) (foto: Ceric M.)**

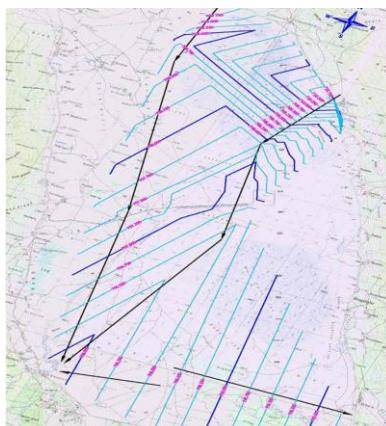
Praćenje nivoa izdani u pijezometrima predstavlja se tabelarno (za svaki pijezometar po datumima očitanja) i dijagramima koji ukazuju na sezonsko variranje nivoa izdani. Iz njih su vidljivi freatski maksimum i freatski minimum odnosno amplituda variranja nivoa izdani, te periodi plavljenja i periodi suhog dna.

**Tabela 37. Praćenje nivoa izdani u pijezometrima [172]**

A	B	C	E	F	G	H
Broj pijezo - metra	Dubina cijevi pijezometr a u tlu (m)	Nadmorsk a visina terena (m.nm)	Visina pijezom . iznad terena (m)	Očitanje na mjerenoj traci s plovkom, od nivoa vode do vrha pijezometr a (m)	Dubina podzemn e vode (m) $G = F - E$	Nivo podzemn e vode (m.nm) $H = C - G$
1	2,00	751,00	0,56	1,35	0,79	750,21
2	2,00	750,00	0,67	1,24	0,57	749,43
3	2,00	750,50	0,90	1,00	0,10	750,40

#### **5.2.3.6.4. Određivanje smjera i brzine kretanja podzemne vode**

Određivanje pravca smjera kretanja podzemne vode radi se na osnovu postavljene serije pijezometara, odnosno 3 pijezometra raspoređena u obliku trougla. Nivo vode u njima je uobičajeno na različitim nadmorskim visinama. Rastojanje između pijezometara podijeli se sa visinskom razlikom nivoa vode u pijezometrima, i to na jednake dijelove. Spajanjem svih tačaka sa istim nivoima dobijaju se hidroizohipse. Pravac kretanja podzemne vode predstavlja rezultanta koja se povlači upravno na hidroizohipse, iz pijezometra u kome je nivo podzemne vode na najvećoj visini, u smjeru pada nivoa vode.



**Slika 65. Hidroizohipse (plave crte) i pravac kretanja izdani (crne  
strelice), Tresetište Ždralovac, Livanjsko polje [172]**

**Brzina kretanja podzemne vode (v) ( $\text{ms}^{-1}$ )** zavisi od pada nivoa izdani odnosno pada nepropusnog sloja zemljišta (i) (.) i poroznosti zemljišta kroz koji se kreće tj. koeficijenta vodopropusnosti (k) ( $\text{m s}^{-1}$ ).

Za izračun brzine kretanja podzemne vode (v) koristi se Darcy-jev zakon:

$$v = k (\Delta h/l) \dots (\text{ms}^{-1})$$

gdje su:

v = brzina kretanja podzemne vode ( $\text{ms}^{-1}$ ),

k = koeficijent vodopropusnosti ( $\text{ms}^{-1}$ ),

$\Delta h$  = razlika u nadmorskoj visini između dvije tačke (m)

l = horizontalno rastojanje između tačaka (m)

i =  $(\Delta h/l) - \text{pad nivoa izdani} (.)$

#### Obračun (primjer):

**Tabela 38. Brzina kretanja podzemne vode (PV) u tresetištu Veliki Ždralovac [172]**

Tačka izdani	Kota izohipse Z(m n.m.)	Razlika u NPV $\Delta h(\text{m})$	Razmak između tačaka l (m)	Hidraulički gradijent $\Delta h/l$	Koeficijent vodo propusnosti ( $\text{m dan}^{-1}$ )	Brzina kretanja PV ( $\text{m dan}^{-1}$ )
Bastašica	709,431					
Pijezom. 5	708,600	0,831	1500	0,000554	70,6	0,039

Ukoliko je materijal porozniji to je i brzina kretanja podzemne vode veća.

### **5.2.3.7. KONZISTENCIJA TLA**

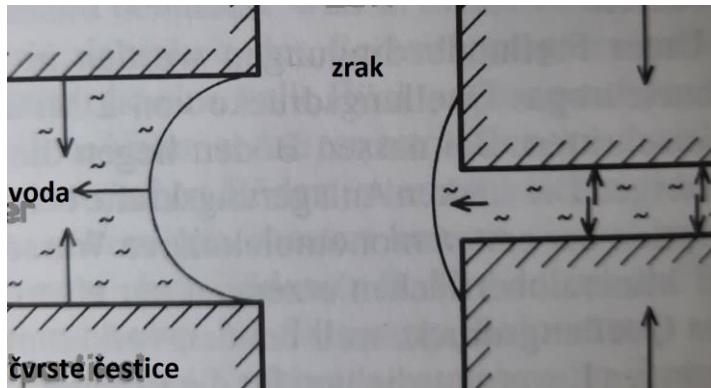
Konzistenciju zemljišta karakterišu određena stanja tla u zavisnosti od vlažnosti: suho tlo - tvrda konzistencija, umjereno vlažno – grudvasta konzistencija, vlažno tlo – plastično ljepljiva konzistencija i mokro tlo – tekuća konzistencija, u formi tečne paste.

Vidimo da su pojava i prestanak različitih oblika konzistencije vezani za određene intervale vlažnosti tla. Tako u suhom tlu jačaju privlačne kohezione sile između čvrstih čestica tla pa tako imamo suho i tvrdo tlo. Kohezione sile odnosno tvrdoča su veće što je veća usitnjenošć čestica, kao što je slučaj kod glinovite teksture a smanjuje se kod pjeskovitih tala. Sa stanjem umjerene vlažnosti mijenjaju se i kohezione sile između čvrstih čestica tla gdje se sada između njih smješta sloj molekula vode, ali je tlo i dalje čvrsto, grudvasto ali i drobivo i pogodno za obradu. Sa dalnjim povećanjem vlažnosti još više slabe kohezione sile između čvrstih čestica tla a jačaju sile adhezije tj. privlačne ljepljive sile između čestica tla i oruđa za obradu tla. S još većim povećanjem vlage nema više kohezionih sila između čestica tla a tlo postaje mokra pasta i tečno. Svaka promjena u sadržaju vode u tlu i njegov energetski status utiče na mnoga mehanička svojstva tla, uključujući čvrstoću, zbijenost i propusnost.

Prema Scheffer-Schachtschabelu [136] uslovno rečeno, smanjenje kohezije između čvrstih čestica tla opisuje se kao gubitak stabilnosti tla, ali i kao promjena konzistencije. Odlučujući faktor u ponašanju tla kada govorimo o njegovoj stabilnosti su vodeni menisci koji se formiraju na dodirnim tačkama između čvrstih čestica. Isto važi i za vodene filmove koji okružuju čestice glinene frakcije. Oni se takođe zbijavaju i formiraju meniskuse oko dodirnih tačaka, koji u početku imaju veoma male poluprečnike zakriviljenosti. Uticaj slobodnih organskih čestica na koheziju između grubljih primarnih čestica može se pripisati promjenama polumjera zakriviljenosti vodenih meniskusa.

Menisci, čija snaga kontrakcije ovisi o izgrađenom podprtisku (usisna sila), prisutni su pri svim sadržajima vode, od vazdušno suhih pora u poljskim uslovima pa do stanja zasićenosti vodom. Međutim, pore se mogu popuniti s vrlo malom dodatnom količinom vode. Ako se s ovom malom količinom vode proizvedu uniformni (ravni) meniskusi, gubi se učinak kontrakcije, a time i smanjenje kohezije između čvrstih čestica.

Isti se učinak događa i ako se agregat ili dio tla nakratko sabije, npr. vožnjom po njemu. Primarne se čestice zatim zbijaju i prisutna voda mora ispuniti sve manji prostor pora. To uvijek dovodi do spljoštenja zakriviljenosti meniskusa i prema tome do smanjenja kohezije, kao što je bio slučaj i sa unosom vode.



Slika 66. Shema djelovanja meniska: Lijevo: kontrahirani (lat. *contractio*: stezanje, kraćenje, smanjenje) niz meniska (konkavna zakriviljenost) stabilizirano stanje; Desno: Menisci se destabiliziraju kada se čvrste čestice komprimiraju (lat. *comprimere*: stisnuti, zgasnuti) (stvaranje konveksne zakriviljenosti) [136]

Budući da opskrba vodom uvijek znači opuštanje ili rasterećenje, kao rezultat toga mogu se pojaviti i povećanja volumena materijala koji u principu ne bubri (npr. les) i posmični lomovi. Ovisno o uglu gledišta, smanjenje kohezije opisuje se kao gubitak stabilnosti, ali i kao promjena konzistencije. Već je istaknuta bliska veza između bubreњa i konzistencije ili gubitka stabilnosti. Važnost ovog odnosa za ponašanje tla dovela je do podjele konzistencije na područja koja su sažeta u sljedećoj tabeli. Razdvajaju ih granice nazvane po autoru Atterbergu.

Tabela 39. Konzistencija glinovitog tla ovisno o sadržaju vode (Atterberg - granice) [136]

Vlažnost	Opis vlažnosti tla	Konzistencija tla	Granice konzistencije po Atterbergu
Visoka	vodna suspenzija teku zajedno	tekućina tečna pasta	granica tečenja
	lijepi se na oruđa obrade razmazuje se pri obradi	mekano plastična čvrsta plastična	granica valjanja
Niska	optimalno za obradu teško za obradu, otvrdlo	grudvasta tvrdna	

Zavisno od mehaničkog sastava, zastupljenosti pojedinih vrsta minerala gline, strukturi i sadržaju humusa, tlo u raznim stepenima vlažnosti pokazuje različitu konzistenciju.

Što je tlo finije, tj. što sadrži više gline, veća je količina vode koju tlo mora apsorbirati da bi prešlo iz tvrde u meku plastičnu ili tekuću konzistenciju. Fino raspoređena organska materija djeluje na isti način. Kad je sadržaj vode iznad granice tečenja, menisci ne daju potporu strukturi tla. Menisci daju potporu stabilnosti strukture tla tek sa sadržajem vode ispod granica tečenja. Na granici valjanja, sadržaj vode je konačno postao toliko malen da, unatoč sve većem pritisku kontrakcije meniskusa, nema dovoljno ukupne sile da sprijeći stub tla od raspadanja.

Povezano sa konzistencijom, u *mehanici tla* posebno se proučava *čvrstoća tla na smicanje* koja predstavlja najveći smičući napon koji se može nanijeti tlu u određenom pravcu. Čvrstoća tla na smicanje prvenstveno zavisi od interakcija između čestica tla. Lom u tlu nastaje kada nastupi klizanje između čestica tla. Na smičuću čvrstoću tla utiče kohezija i trenje između čestica tla. Kohezija predstavlja silu koja drži čestice tla zajedno i predstavlja mjeru cementacije čestica tla. Trenje između čestica tla se opisuje uglom unutrašnjeg trenja tla. Najveći dio smičuće čvrstoće tla potiče od trenja između čestica tla. Da tog trenja nema tlo bi se ponašalo kao tečnost.

#### **5.2.3.7.1. *Određivanje zbijenosti (tvrdine) tla penetrometrom-Mehanički otpor prodiranju***

Sila kojom se čestice tla drže među sobom naziva se zbijenost tla. Ona zavisi od aktivne površine čestica. Tako disperzna montmorionitna glina sa većim sadržajem natriuma u odnosu na viševalentne jone koji izazivaju koagulaciju, ima najveću zbijenost. U teškim zemljjištima humus poboljšavajući agregaciju smanjuje inače visoku zbijenost tla a u lakinim zemljjištima povećava inače niske vrijednosti zbijenosti tla.

Mehanički otpor koji tlo pruža prodiranju različih tijela u njega često se podvodi pod pojam tvrdoća tla. Mjeri se različitim napravama. Sonde i dinamometarske lopate služe za mjerjenje otpora ili zbijenosti koji se izražava u kg i kW ili brojem udaraca potrebnim za utiskivanje naprave u tlo.

Dio koji se utiskuje u zemljjiše najčešće je cilindričnog oblika, a može biti i konusnog ili loptastog oblika. Svaki takav dio ima svoju površinu izraženu u  $\text{cm}^2$ . Veličina otpora tla na pritisak izračunava se na osnovu kilograma

ostvarenog pritiska, podijeljenih sa površinom dijela penetrometar kojim je ostvaren pritisak na Tlo. Izražava se u kg/cm<sup>2</sup>.

Najbrži i najjednostavniji način terenskog određivanja mehaničkog otpora prodiranju ili tvrdoće tla na profilu je ručnim penetrometrom ili penetrologerom. On se sastoji od drške, opruge i kalibrirane skale, zatim tu je klip sa kalibriranim utorom i prsten koji se pomiče po kalibriranoj skali.

**Postupak** [158, 88]: Za mjerjenje otpora namjesti se pomični prsten na najniži dio skale, zatim se utisne klip u tlo do kalibriranog utora pri čemu se pomakne prsten i svojim donji rubom omogućava direktno očitanje mehaničkog otpora u kg/cm<sup>2</sup>.

Vraćanjem prstena na najniži dio skale penetrometar je pripremljen za sljedeće mjerjenje. Novi penetrologeri imaju mogućnost prikazivanja rezultata na grafikonu gdje y-osa predstavlja dubinu u cm a x-osa otpor prodiranju u kg/cm<sup>2</sup>.

**Tabela 40. Opis tvrdoće tla na osnovu otpora tla na pritisak prema Kačinskom** [88]

Tvrdoća tla	Otpor tla na pritisak u kg/cm <sup>2</sup>
Kompaktno tlo	veći od 100
Veoma tvrdo	50 – 100
Tvrdo	30 - 50
Umjereno tvrdo	20 – 30
Umjereno trošno	10 – 20
Trošno tlo	manji od 10

#### **5.2.3.7.2. Određivanje plastičnosti tla (PT) po Atterbergu**

Plastičnost tla je osobina da pod određenim stepenom vlažnosti tlo pod pritiskom mijenja oblik ali se pri tom ne lomi. Takvu osobinu tlu daje glina a smanjuje je prisustvo humusa. Količina vode pri kojoj zemlja poprima osobine plastičnosti naziva se donja granica plastičnosti. Količina vode pri kojoj zemlja gubi stečene osobine plastičnosti i prelazi u žitku masu naziva se gornja granica plastičnosti. Razlika u količini vode donje i gornje granice plastičnosti naziva se indeks plastičnosti.

**Princip** određivanja se sastoji u vlaženju uzorka i praćenju pojave: formiranje vrpce od zemlje ili tečenja žitke mase.

**Postupak** [88]:

**Donja granica plastičnosti (DGP)** - Za određivanje donje granice plastičnosti - DGP uzmemu 20 g sitnice stavimo u porculansku posudu sa ovalnim dnom. Biretom dodajemo destilovanu vodu i mješamo staklenim štapićem. Kada stvorimo uslove konzistencije pravimo lopticu od zemlje prečnika 1-2 cm. Lopticu stavljamo na ravnu ploču i laganim valjanjem pokušamo formirati vrpcu prečnika 3 mm. Ako se u momentu obrazovanja prečnika vrpeca ne raspada to je znak da ponovo od te vrpce formiramo lopticu i ponovimo postupak. U trenutku kada u obnovljenom postupku vrpeca počne da se raspada kažemo da smo postigli vlažnost donje granice plastičnosti. Vagamo lopticu sa posudom za sušenje i stavljamo u sušnicu i utvrđujemo gubitak mase sušenjem.

Postoje i modifikacije ove metode koje su razvijane u pojedinim pedološkim laboratorijama.

**Priprema uzorka [3a]** - 200 g sitnog vazdušno suhog zemljišta izmiješa se sa destilovanom vodom dok se ne stvari gusta pasta. Svaki uzorak sa prirodnom vlažnošću može se odmah uzeti u postupak, dok pastu zemljišta načinjenu od vazdušno suhog zemljišta, treba ostaviti u pokrivenoj posudi najmanje 12 sati.

**Postupak [3a]:** 10-20 g guste paste zemljišta umjesiti u kuglicu. Izvaljati zemljiše prstima (površinom dlana) na staklenoj ploči, ili gumenoj podlozi u valjčiće (vrpce) debljine 3-4 mm. Zatim se skupe ti valjčići i ponovo zamjese u lopticu. Ponoviti postupak valjanja na podlozi dok se iz zemljišta ne izgubi toliko vode da se valjčići počnu lomiti (pucati). Odlomljene dijelove tih valjčića staviti na vagu i obračunati sadržaj vode u tom uzorku,

Cijeli postupak sa novim probama uzetim od izvornog uzorka ponavlja se još dva puta, tako da se ukupno dobiju rezultati 3 određivanja. Donja granica plastičnosti je prosječan sadržaj vode (%) iz tri određivanja, zaokružen na cijeli broj.

**Gornja granica plastičnosti (GGP)** - Za određivanje gornje granice plastičnosti - GGP prenesemo 25-30g uzorka u mesinganu posudu sa dnom prečnika 12 cm. Dodavanjem vode postižemo konzistenciju guste paste. Mesinganu šolju poklopiti i ostaviti 24 sata u prostoriji koja neće usloviti gubitak vode iz uzorka. Nakon toga ravnom špatlom (lopaticom) pastu promješati i poravnati da se ostvari ravan sloj paste debljine 1 cm. Špatlom čiji je vrh u obliku slova V treba načiniti razrez sredinom pripremljene paste. Razrez treba imati širinu 12 mm na vanjskoj površini paste a pri dnu debljinu od 2 mm.

Da li je postignuta vlažnost gornje granice plastičnosti utvrdimo tako što u razmacima od 3 sekunde tri puta udarimo dlanom o dno posude ili posudu spustimo sa visine od 6 cm na gumenu ploču. Ukoliko se postigne spajanje paste pri dnu u najmanjoj dužini od 1,5 – 2,0 cm kažemo da je postignuta vlažnost gornje granice plastičnosti. Iz dijela paste gdje je postignuto spajanje nakon trećeg udara uzimamo 10–15 g uzorka i vagamo i nosimo na sušenje.

Ukoliko ne postignemo spajanje poslije trećeg udarca dodamo malo vode i ponovimo postupak. Ukoliko spajanje evidentiramo prije trećeg udarca vršimo valjanje uzorka (čime smanjujemo vlažnost) i ponavljamo postupak.

Za određivanje gornje granice plastičnosti može se koristiti i specijalni uređaj po Casagrandeu [3a].

### **Obračun:**

Koristi se i za izračun vlažnosti pri DGP (sa kuglicom)/ i GGP (sa pastom).

- masa prazne posude, A (g)
- masa posude sa kuglicom ili pastom prije sušenja , B. .... (g)
- masa poslije sušenja, C...(g)
- masa suhog uzorka, D = C-A...(g)
- Gubitak sušenjem, E = B-C... (g)

$$DGP = \frac{\text{Gubitak sušenjem (}E_{DGP}\text{)}}{\text{Suho tlo (}D_{DGP}\text{)}} \cdot 100 (\%_{\text{mas}})$$

$$GGP = \frac{\text{Gubitak sušenjem (}E_{GGP}\text{)}}{\text{Suho tlo (}D_{GGP}\text{)}} \cdot 100 (\%_{\text{mas}})$$

### **3. Obračun Indeksa plastičnosti $I_p$**

Indeks plastičnosti predstavlja razliku u sadržaju vode pri gornjoj (GGP) i donjoj granici plastičnosti (DGP).

$$I_p \text{ (index plastičnosti)} = \text{Vlažnost pri GGP} - \text{Vlažnost pri DGP}$$

#### **5.2.3.7.3. Određivanje ljepljivosti tla [88]**

Ljepljivost je odlika tla da se pri određenom stanju konzistencije lijepi za druge predmete i sposobnost čestica tla da se lijepe među sobom. To je važna osobina jer utiče na normalnu obradu tla. Ako je sadržajem vode u tlu

uslovljena veća ljepljivost otežana je obrada tla ali i efekat obrade je nekvalitetan a troškovi veliki. Onog trenutka kada prestaje svojstvo ljepljenja čestica za druge predmete javlja se granica ljepljivosti, odnosno pri toj vlažnosti je pogodan trenutak za obradu tla.

Ljepljivost zavisi od mehaničkog i hemijskog sastava, sadržaja vode i pritiska pod kojim je ostvareno ljepljenje. Natrijum povećava disperznost čestica tla i uslovljava veću ljepljivost. Kalcijum s druge strane izaziva koagulaciju dispergovanih čestica i smanjuje ljepljivost.

**Postupak:** određivanja granice ljepljivosti tla sastoje se prije svega u kvašenju pripremljenog uzorka u većoj porculanskoj šolji i miješanju uzorka pri kvašenju metalnom špatlom. Nakvašen uzorak špatlom se prenosi pod okruglu metalnu ploču uređaja Kačinskog za određivanje ljepljivosti tla (modificirana tehnička vaga gdje je lijevi tas vase zamijenjen okruglom metalnom pločom od  $10 \text{ cm}^2$  koja se može dodatno opteretiti tegom, dok se opterećenje suprotnog desnog tasa izvodi kvarcnim pijeskom). Potom metalnu ploču ispod koje je nakvašen uzorak opteretimo sa tegom od 200 g i držimo tako 1 minutu da bi se ostvarilo ljepljenje uzorka za donju površinu ploče.

Nakon jedne minute uklanjamo teg sa metalne ploče i opterećenjem desnog tasa kvarcnim pijeskom pratimo trenutak odvajanja metalne ploče od uzorka tla. Težina pijeska u trenutku odvajanja ploče površine  $10 \text{ cm}^2$  daje granicu ljepljivosti izraženu u  $\text{g/cm}^2$ .

Potrebno je odrediti i trenutni sadržaj vode - $T_v$  pri granici ljepljivost tako što ćemo špatlom uzeti određenu količinu nakvašenog uzorka i izvršiti mjerjenje po poznatom postupku određivanja trenutne vlažnosti .

Najčešće je u upotrebi sljedeća klasifikacija tla prema ljepljivosti.

**Tabela 41. Klasifikacija intenziteta ljepljivosti tla [136]**

Granica ljepljivosti u $\text{g/cm}^3$	Intenzitet ljepljivosti tla
$> 15$	Veoma jako ljepljiva
$15 - 5$	Jako ljepljiva
$5 - 2$	Osrednje ljepljiva
$2 - 0,5$	Slabo ljepljiva
$0,5 - 0,1$	Veoma slabo ljepljiva

#### **5.2.3.7.4. Određivanje granice skupljanja tla metodom M. M. Filatova [88]**

Poznato je da se tlo širi u vlažnom stanju (stanje plastičnosti) i da se skuplja u suhom stanju (sušenjem na 105°C). Razlika između ova dva stanja predstavljena je razlikom dužina, označenih tačkama na uzorku, prije i poslije sušenja navlaženog uzorka. Izražava se u procentima u odnosu na navlaženo stanje.

**Postupak:** Uzmemo 30 –40 g pripremljenog uzorka i prenesemo u porculansku šolju. Biretom se dodaje destilovana voda i stalnim mješanjem uzorak se dovodi u stanje plastičnosti. Tako pripremljen uzorak stavlja se na staklenu ploču i razastire prstima na debljinu od 1 cm. Obodni dijelovi razstrtog uzorka se sijeku nožem i oblikujemo prvougaonik dimenzija 6 x 2 cm.

Obilježimo 4 tačke ubodom igle, odnosno dvije duži u dijagonalnom pravcu čija je dužina 5 cm, odnosno toliko iznosi razmak između dvije obilježene tačke.

Tako pripremljen uzorak sušimo prvo na zraku a zatim u sušnici do konstantne mase i razdaljine među tačkama.

#### **Obračun:**

$L_1$  – dužina između tačaka na jednoj dijagonali u vlažnom stanju..... 5 cm  
 $L_2$  - dužina između tačaka na drugoj dijagonali u vlažnom stanju..... 5 cm  
 $L_3$  - dužina između tačaka na jednoj dijagonali u suhom stanju..... \_\_\_\_ cm  
 $L_4$  - dužina između tačaka na drugoj dijagonali u suhom stanju .... \_\_\_\_ cm

$$\% \text{ skupljanja} = \frac{(L_1 + L_2) - (L_3 + L_4)}{(L_1 + L_2)} \cdot 100 \text{ (%)}$$

### **5.2.3.7.5. Određivanje koeficijenta bubrenja tla metodom S. Rutkovskog [88]**

Ova metoda se koristi u okviru mehaničke analize tla po S. Rutkovskom za određivanje sadržaja gline. Zasniva se na sposobnosti minerale gline, koji su najzastupljenija grupa minerala u najfinijoj koloidnoj frakciji, da u vlažnom stanju bubre (povećavaju zapreminu), a u suhom kontrahuju (skupljaju se, smanjuje im se zapremina). Osobina bubrenja vezana je uz slojevitu građu minerala gline i njihovom sposobnosti da između slojeva prihvate molekule vode koji s druge strane vrše razdvajanje slojeva i povećavanje zapremeine.

Razlika između zapremine u nabubrenom stanju i kontrahiranom stanju u odnosu na kontrahirano (suho) stanje, predstavlja koeficijent bubrenja na osnovu kojeg se određuje sadržaj frakcije gline.

#### **Postupak:**

Sitnicu koju smo u pripremi uzorka za analizu prosijali na situ od 2 mm ovaj put ćemo prosijati na situ od 1 mm. Prosijanim materijalom napunimo stakleni cilindar zapremine 5 ml ( $V_0$ ), uz lagano sabijanje. Zatim se uzorak u cilindru rastrese, nalije se 50-70 ml vode, promiješa staklenim štapićem i doda mu se 3 ml 5,5 % rastvora  $\text{CaCl}_2$ , da bi se izvršila koagulacija disperznih čestica gline. Pošto se ponovo promiješa cijelokupna suspenzija, cilindar se naliva do zapremine od 100 ml i ostavlja da stoji 24 sata. Za to vrijeme nabubriće čestice gline do određene zapremine koju očitamo nakon 24 sata ( $V_I$ ).

#### **Obračun:**

Koeficijent bubrenja tla  $Kb$  metodom S. Rutkovskog dobije se obrascem:

$$Kb = \frac{V_I - V_0}{V_0}$$

Na osnovu koeficijenta bubrenja stnice tla može se odrediti sadržaj frakcije gline iz sljedeće tabele:

**Tabela 42. Zavisnost koeficijenta bubrenja prema Rutkovskom sa sadržajem gline [88]**

Koeficijent bubrenja K	Sadržaj gline u %	Koeficijent bubrenja K	Sadržaj gline u %
0,12	2,72	0,80	18,13
0,15	3,40	0,85	19,26
0,20	4,53	0,90	20,41
0,25	5,66	0,95	21,52
0,30	6,79	1,00	22,67
0,35	7,93	1,05	23,80
0,40	9,06	1,10	24,93
0,45	10,19	1,15	26,07
0,50	11,32	1,20	27,70
0,55	12,46	1,25	28,34
0,60	13,60	1,30	29,48
0,65	14,73	1,35	30,61
0,70	14,86	1,40	31,74
0,75	17,00	1,45	32,87
		1,50	34,00

### **5.3. HEMIJSKE OSOBINE TLA**

Zemljište kao višefazni sistem, sastavljen je od mineralne, organske, tečne i gasovite faze. Svaka od ovih faza karakteriše se svojim hemizmom ali istovremeno nijedna od ovih faza nije odvojena jedna od druge nego se nalazi u brojnim interakcijama koji posljedično regulišu dinamički karakter zemljišta.

Već smo istakli da djelovanje klime, reljefa i organizama izaziva promjene u geološkoj podlozi što dovodi do stvaranja zemljišta. Hemijski sastav pedosfere se razlikuje od hemijskog sastava zemljine kore. To se objašnjava mineralnim, hemijskim i biohemijskim promjenama koje se dešavaju prilikom formiranja tla i tokom geneze i koji mijenjaju hemijski sastav zemljišta u odnosu na matični supstrat. Tako se pedogenetskim procesima:

- primarni alumosilikatni minerali (feldspati, kvarc, liskuni, amfiboli i pirokseni, olivini), rude (magnetit, apatit, pirit) kao i ostali primarni minerali iz matičnih stijena koje se nalaze na površini izložene atmosferilijama, počinju fizički usitnjavati i hemijski trošiti (raspadati) ...
- ...na krajnje proekte raspadanja: okside i hidrokside Fe, Al i Si zatim soli sulfata, fosfata...
- dolazi do postanka sekundarnih minerala (minerali gline – montmorionit, ilit i kaolinit, zatim hlorit, serpentin) od krajnjih produkata raspadanja primarnih minerala tj. koloidnih i/ili jonskih formi oksida i hidroksida Si, Al i manje Fe,
- istovremeno, dio krajnjih produkata raspadanja se ne sintetiše u sekundarne alumosilikate, nego formiraju sekundarne amorfne i kristalne okside i hidrokside Fe i Al (i Si),
- takođe, hemijskim trošenjem primarnih minerala oslobođaju se metali koji su baznog karaktera/hraniva ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) koje prelaze u zemljišni rastvor ili bivaju privučene na adsorptivni kompleksi tla,
- vremenom, ispiranjem se gubi dio seskvioksiда ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) i baza ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ),
- vodonik H se ne nalazi u litosferi nego se gomila u zemljištu uzrokujući zakiseljavanje tla, kako odmiče geneza i pedogenetski procesi...
- istovremeno se povećava relativni sadržaj Si koji zaostaje i O jer se mnogi spojevi iz litosfere oksidiraju,
- primarni kvarc ( $\text{SiO}_2$ ) se samo usitnjava ulazeći u gotovo sve teksturne frakcije,
- organska materija ima veliku ulogu u vezivanju nekih elemenata naročito C, N, P i S tako da veći udio tih elemenata u površinskom sloju predstavlja različitost od litosfere.

Vidjeli smo da se slično mineralnoj fazi događa i sa organskim ostacima u tlu koji se biohemski razlažu do krajnjih produkata raspadanja (mineralizacija) ili dijelom biohemski transformišu u specifičnu organsku materiju – humus.

Istovremeno voda tla nikad nije u čistom stanju nego se u tlu pojavljuje kao zemljjišni rastvor ili otopina. U zemljjišnom rastvoru koji ispunjava pore se nalaze rastvorene mineralne i organske materije:

- kationi ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  i dr.) i
- anioni ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  i dr.) u vidu pravog rastvora, zatim
- koloidne čestice minerala gline, humusnih kiselina, humusno-glinenog kompleksa, oksida i hidroksida Fe i Al; znači čestice čvrste faze tla u vidu koloidnog rastvora,
- molekule plinova  $\text{O}_2$  i  $\text{CO}_2$  i
- rastvorena organska jedinjenja (proizvodi razgradnje organskih ostataka i izlučevine korijena).

Kada koncentracija pojedinih soli i oksida pređe tačku zasićenja ili pri promjeni redoks uslova u tlu, može doći do taloženja sekundarnih zemljjišnih minerala (oksida i hidroksida Fe, Al i Mn, karbonata, sulfida) na postojećim mineralnim i organskim površinama u tlu stvarajući obloge ili prevlake koje imaju ulogu i u cementiranja agregata.

Tečna faza je zaslužna i za transport rastvorenih materija duž profila tla.

Biljci su za njen razvoj neophodni elementi – biljna hraniva koje ona najvećim dijelom uzima iz zemljjišnog rastvora i iz adsorbtivnog kompleksa zemljista, te iz zraka ( $\text{CO}_2$  i  $\text{O}_2$ ).

Svi elementi potrebni za razvoj biljaka nazivaju se biogeni elementi. Oni se dijele na:

- i) makroelemente C, O, H, N, P, K, S, Ca, Mg, Fe koje biljka treba u velikim količinama (mg/100g tla, %) i
- ii) mikroelemente B, Cu, Mn, Zn, Mo... koji su isto neophodni ali ih biljka treba u manjim količinama (mg/kg tla ili ppm).

Biogeni elementi se nalaze u zemljiju u raznim oblicima: u primarnim mineralima, sekundarnim mineralima, fiksirani u međulamelarnom prostoru listastih alumosilikata, u humusu, u humusno-glinenom kompleksu, u netopivim jedinjenjima, u rastvoru tla i u jonskom obliku adsorbovani na adsorbtivni kompleks zemljista (mineralne i organske koloidne česice). Nisu svi ovi oblici biogenih elemenata jednakо pristupačni biljkama. Samo neki od njih su u fiziološki aktivnom obliku, što znači da su pristupačni za biljku.

U novije vrijeme za proračun preporuka đubrenja koriste se matematički modeli koji uključuju različite podatke. Tako pored zahtjeva biljke i količine pristupačnih formi hraniva u tlu u preporuci gnojidbe uzimaju se u obzir i fizičke osobine (tekstura) i hemijske osobine tla (pH tla, karbonati, sadržaj humusa) kao i primjenjena agrotehnika (organsko đubrenje, zaoravanje ostataka usjeva, obrada) zbog njihovog utjecaj na visinu prinosa.

U okviru Poljoprivrednih nauka Ishrana biljaka i fertlizacija se bavi ovom problematikom tj. obezbjeđivanjem hraniva kulturnim biljkama u agroekosistemima. U okviru Pedologije izučavaju se i određuje sljedeće hemijske karakteristike tla:

- sadržaj karbonata,
- pH vrijednost,
- električni konduktivitet EC,
- analiza adsorptivnog kompleksa – kapaciteta izmjenjivih kationa,
- puferna sposobnost tla i
- redoks potencijal tla

### 5.3.1. KARBONATI ( $\text{CaCO}_3$ ) U TLU

Karbonatni minerali većinom u tlu potiču iz primarnih izvora, tj. naslijedeni su iz karbonatnih sedimentnih stijena, međutim u tlu mogu nastati i kao sekundarni minerali kao talozi (precipitati) iz zemljишnog rastvora. Postoji oko 80 poznatih karbonatnih minerala; međutim, daleko najčešći karbonatni minerali pronađeni u našem tlu su kalcit ( $\text{CaCO}_3$ ) i dolomit ( $(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$ ) koji potiču prvenstveno iz mezozojske i paleogene karbonatne podloge. Većina karbonatnih minerala obično sadrži tragove drugih karbonatnih srodnih elemenata zamijenjenih u njihovim strukturama. Tako, u kristalnoj strukturi mnogih karbonatnih minerala karbonatni ion se obično pojavljuje u kombinaciji s Ca, Mg, Na, U, Fe, Al, Mn, Ba, Zn, Cu, Pb i drugim elementima [87].

Kalcit je slabo rastvorljiv u vodi, ali se rastvorljivost povećava pri nižim pH vrijednostima tla i obično se ne nalazi u tlima s pH vrijednostima manjim od 6,2 u  $\text{KCl}$ -u ili manjim od pH 7 u vodi (ispire se). Sekundarni kalcit iz soluma tla se tipično rastvara i ispire da bi se ponovno taložio u nižim horizontima u profilu tla, ponekad formirajući sekundarne kalcitne krvžice i krupnije forme. Zbog rastvaranja i ispiranja, karbonatni minerali mnogo češće se susreću zemljistiama aridnog područja.

Pored karbonatnih minerala kalcita i dolomita, primarni minerali koji sadrže  $\text{Ca}^{2+}$  su plagioklasi, pirokseni i amfiboli. Lako su podložni raspadanju i tako

oslobađaju  $\text{Ca}^{2+}$ . Rastvorljivost  $\text{Ca}^{2+}$  ovisi o parcijalnom pritisku  $\text{CO}_2$  ( $p\text{CO}_2$ ). Što je viši  $p\text{CO}_2$ , to je viši pH. Vrijednost pH će se spustiti ispod 7 ako se svi karbonati rastvore i počnu ispirati ili migrirati.

Karbonati imaju svojstvo spajanja mineralnih čestica i organskih spojeva zajedno u formu agregata. Stoga Ca-karbonati poboljšavaju strukturu tla, osobito u A i B horizontu. Akumulacija karbonata, obično Ca-karbonata, u horizontu označena je s 'k'. Ako je više od 90 % horizonta cementirano kalcijem i korijenje može prodrjeti samo kroz pukotine, koristi se simbol 'km'. Ako se karbonati isperu iz A ili čak B horizonta ti slojevi postaju kiseli do vrlo kiseli. To mijenja strukturu tla, kapacitet izmjene kationa, biološku aktivnost itd. [87]

Od sadržaja karbonata zavisi normalna fiziološka aktivnost biljke, jer oni utiču na reakciju tla i na imobilizaciju gvožđa (Fe) i cinka (Zn) u tlu gradeći Fe i Zn-karbonate, te izazivaju pojavu bolesti hloroze (manifestuje se žutilom na lišću zbog nedostatka Fe). Slično, Ca ion sa  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  i  $\text{HPO}_4^{2-}$  gradi teže rastvorljive i biljni teže pristupačne Ca-fosphate.

### ***Kvalitativna analiza prisustva karbonata***

Već je opisana detaljno u poglavlju Terenska istraživanja. Određuju se razaranjem sa 10% HCl-om i procjenom pjenušanja i šumljenja nastalog  $\text{CO}_2$ , po jednačini:



Nastali  $\text{CO}_2$  se mjeri volumetrijski ili gravimetrijski.

#### ***5.3.1.1. Kvantitativno određivanje sadržaja $\text{CaCO}_3$ [88, 125]***

Kvantitativnim metodom utvrđujemo količinu  $\text{CaCO}_3$  u tlu također tretiranjem uzorka sa 10% HCl-om s tim da se nastali  $\text{CO}_2$  mjeri i kvantificira koristeći:

1. gravimetrijski metod - mjerenjem mase razvijenog  $\text{CO}_2$
2. volumetrijski metod - mjerenjem zapremine nastalog  $\text{CO}_2$

### **Gravimetrijski metod – metod čaše**

**Princip** je u određivanju mase nastalog  $\text{CO}_2$ , mjerenjem razlike u masi prije i poslije reakcije.

#### **Pribor:**

- precizna tehnička vaga
- čaša 100 ml
- 10 % rastvor HCl

## **Postupak:**

- u čašu nalijemo 20 ml 10 % HCl i izvagamo zajedno sa čašom - A (g),
  - odvagamo 2–10 g tla, ako je više šumilo uzmememo manje grama - B (g),
  - dodamo tlo u posudu uz mućkanje, nastaje reakcija i oslobođanje  $\text{CO}_2$ ,
  - saberemo vrijednosti za ukupnu masu uzorka i posude sa HCl-om  
 $\text{C}=\text{A}+\text{B}$
  - nakon prestanka šumljenja izvagamo posudu sa HCl i uzorkom - D (g) i
  - razlika u masi predstavlja masu  $\text{CO}_2$  oslobođenog reakcijom -  $M_{\text{CO}_2}$  (g).

Nađenu masu  $\text{CO}_2$  množimo sa koeficijentom 2,273 za prevođenje mase  $\text{CO}_2$  u masu karbonata. Koeficijent predstavlja odnos relativnih molekulskih masa ili molarnih masa  $\text{CO}_2$  i  $\text{CaCO}_3$ .

$$Mcaco_3 = Mco_2 \cdot 2,273 \dots\dots (g)$$

I na kraju odredimo procentualni sadržaj (%<sub>mas</sub>) CaCO<sub>3</sub> u masi uzorka *Muz.*

$$\text{CaCO}_3 = \frac{Mc_{aco_3}}{Muz(B)} \cdot 100 \quad \dots \dots \dots \text{ % mas}$$

Metoda ima nedostatak što se pored CO<sub>2</sub> gubi i voda koja ulazi u masu CO<sub>2</sub>.

### **5.3.1.2. Volumetrijsko određivanje sadržaja $\text{CaCO}_3$ pomoću Scheiblerovog kalcimetra**

**Princip:** Princip ovog određivanja je u mjerenu zapremine nastalog CO<sub>2</sub>, pri određenom pritisku i temperaturi (ISO 10693:1995). Aparati kojim se volumetrijski određuje sadržaj CaCO<sub>3</sub> zovu se kalcimetri. Šajblerov kalcimetar može biti raznih izvedbi. Obično se sastoji od tri cilindrične cijevi. Očitanje nastalog CO<sub>2</sub> se vrši na graduisanoj cijevi koja je donjem krajem spojena sa kraćom (debljom) cijevi. Obje ove cijevi su ispunjene vodom i prije početka mjerena trebaju biti izjednačenih nivoa. Treća cijev je na svom donjem dijelu preko gumenog crijeva vezana kroz otvor u čepu sa bocom u koju se stavlja tlo i epruveta sa kiselinom. Ova cijev kroz koju prolazi nastali CO<sub>2</sub> je spojena preko ventila sa gornjim krajem graduisane cijevi odakle nastali CO<sub>2</sub> vrši pritisak na nivo tečnosti. Svi dijelovi ovog sistema postavljeni su na poseban metalni stativ. Duž metalnog stativa može se pomjerati kraća cijev sa vodom, čime se postiže izjednačavanje nivoa vode a time i pritiska u njoj i graduisanoj cijevi.

Pribor :

- Scheibler-ov kalcimetar
- barometar
- termometar
- precizna tehnička vaga
- 10 % rastvor HCl
- tabela za izračunavanje težine CO<sub>2</sub> (Prilog 2)

**Postupak** [88, 125, 158]: Izvagati 0,5 – 5,0 g tla. Ukoliko je više šumilo uzimamo manju masu uzorka. Uzorak stavimo u erlenmajer kolbu (bocu). U malu epruvetu nasuti razblaženu solnu kiselinu (HCl) i sa pincetom lagano spustiti u kolbu strogo pazeći da se ne prolije. Na aparatu nivo vode u graduisanoj cijevi podesimo na nulu (0). Zatvorimo stakleni ventil i kolbu sa uzorkom i epruvetom spojimo sa aparatom. Zatim se otvori stakleni ventil (na ovo se ne smije zaboraviti da ne bi došlo do eksplozije aparata) i izjednače se nivoi vode sa nulom u graduisanoj i maloj cijevčici. Kolba sa uzorkom i epruvetom se dovede u horizontalan položaj tako da se razblaženi HCl iz epruvete prospe po boci odnosno po tlu. CO<sub>2</sub> koji se razvija kroz otvor u čepu i gumeno crijevo dolazi u graduisanu cijev i tu nailazi na prepreku, vodu u cijevi, koju potiskuje. Istovremeno sa potiskivanjem nivoa vode od strane CO<sub>2</sub>, pomjeramo manju cijev po vertikalnoj šipki i na taj način održavamo na istoj visini nivo vode u manjoj cijevi sa nivoom u graduisanoj cijevi. Prestanak spuštanja nivoa vode je znak da je analiza završena i pristupa se očitavanju i izračunavanju.

**Obračun:** Očitamo vrijednosti:

- masa uzetog uzorka  $M_u$  (g).
- razvijena količina CO<sub>2</sub> (očitamo sa graduisane cijevi nivo vode),  $V_{CO_2}$  (ml)
- temperatura (°C)
- pritisak u mb (mm)

Uz pomoć tabele (vidi prilog) odredi se masa 1 kubnog centimetra CO<sub>2</sub> pri datoј temperaturi i barometarskom pritisku, pri kojima je vršeno određivanje -  $M_v$  (mg/ml)

Ukupna masa nastalog CO<sub>2</sub> se određuje množenjem zapremine nastalog CO<sub>2</sub> i mase 1 cm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>

$$M_{CO_2} = V_{CO_2} \cdot M_v \text{ (mg)}$$

Za prevođenje mase CO<sub>2</sub> u masu CaCO<sub>3</sub> množimo sa koeficijentom 2,274. Tu vrijednost podijelimo sa 1000 za prevođenje miligrama (mg) u grame (g).

$$Mc_{aCO_3} = M_{CO_2} \cdot 2,274 : 1000 \dots\dots(g)$$

Postotak (%<sub>mas</sub>) CaCO<sub>3</sub> se izračunava:

$$\text{CaCO}_3 = \frac{T_{\text{CaCO}_3}}{\text{Tuz}} \cdot 100 \dots \text{(%}_{\text{mas}}\text{)}$$

### 5.3.1.3. *Određivanje sadržaja aktivnog CaCO<sub>3</sub> u tlu po metodi Droineau – Gallet [88, 125]*

Podatak o ukupnom sadržaju karbonata u tlu ne govori nam i da li je ta količina fiziološki aktivna. Kod visokog sadržaja CaCO<sub>3</sub> dolazi do pojave bolesti hloroze (žutilo lišća) kod nekih vrsta (vinova loza, breskva) uslijed nedostatka nekih mikronutrijenata koji se vežu sa karbonatima, prije svih Fe. Zapažena je pojava da se na zemljишima koja imaju isti sadržaj ukupnog CaCO<sub>3</sub> različito ispoljava hloroze biljaka. To je dovedeno u vezu sa fiziološkom aktivnošću CaCO<sub>3</sub>, odnosno pojavi da veća usitnjenošć čestica CaCO<sub>3</sub> povećava njegovu fiziološku aktivnost. To je povezano sa većom aktivnom površinom čestica CaCO<sub>3</sub> koje u tom slučaju imaju veću rastvorljivost, veću reaktivnost i vezivanje za adsorptivni kompleks tla u odnosu na krupnije čestice CaCO<sub>3</sub>.

Breskve postaju hlorotične kada sadržaj aktivnog kreča pređe preko 9 %. Od vinove loze najosjetljivije su *riparia glorie de Montpellier* i *riparia grand Glabre*, jer već pri sadržaju aktivnog kreča od 6 % postaju hlorotične. Najmanje je osjetljiva *šasla x Berlandieri 333 E.M.* koja podnosi i do 40 % aktivnog kreča.

**Postupak:** Odvagati 1 g uzorka i staviti u flašu u kojoj će se vršiti mučkanje, dodati 100 ml 0,1 M rastvor amonij oksalata (14,212 g (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> u 1L vode) i mučkati 2 sata na mučkalici. Zatim filtrirati preko naboranog filter papira i od filtrata ispipetirati 20 ml i prenijeti u čašu od 400 ml. Tome dodati 100 ml destilovane vode i 20 ml razblažene 1:3 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Zagrijati do ključanja i titrirati sa 0,0404 M rastvorom kalij permanganata (6,4 g KMnO<sub>4</sub> u 1L vode) do pojave trajno ružičaste boje. U kiseloj sredini KMnO<sub>4</sub> neutrališe preostali amonij oksalat koji nije ragirao sa CaCO<sub>3</sub>. Količina utrošenog KMnO<sub>4</sub> pomnožena faktorom normaliteta daje vrijednost *n*.

**Proba:** Posebno se uzme 20 ml amonij oksalata, doda 100 ml destilovane vode i 20 ml razblažene H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, te titrira sa kalijum permanganatom. Ako su faktori normaliteta oba rastvora jednaka vrijednost slijepe probe biće 20 ml. To najčešće nije slučaj. Utrošeni KMnO<sub>4</sub> u probi pomnožen sa faktorom normaliteta daje vrijednost *N*.

**Obračun:**

Obrazac za izračunavanje Index Droineau-Golet (% aktivnog CaCO<sub>3</sub>) glasi:

$$\text{IDG}_{(\% \text{ akt.CaCO}_3)} = \frac{(N - n) \cdot 1,0023 \cdot 0,01 \cdot 500}{100 \text{ (g)}} \cdot 100 \text{ (%)}$$

gdje je:

- ( $N-n$ ) je količina amonij oksalata (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> utrošena za vezivanje aktivnog CaCO<sub>3</sub>, (ml)
- 0,01 je količina aktivnog CaCO<sub>3</sub> koja se veže za 1 ml amonij oksalata, (g)
- 500 je koeficijent za prevođenje vezanog CaCO<sub>3</sub> u 0,2 g uzorka (20 ml filtrata) na 100 g tla
- 100(g) je IDG je predstavljen u % na 100 g tla
- 1,0023 je faktor normaliteta 0,2 n KMnO<sub>4</sub>

### 5.3.2. pH REAKCIJA TLA

Prema tradicionalnoj definiciji hemijskih jedinjenja kiseline su jedinjenja koje u vodi od pozitivnih jona daju H<sup>+</sup> ion, a baze od negativnih jonova daju samo OH<sup>-</sup> ion. U otopini tla je pored rastvorenih raznih materija evidentno prisustvo i H<sup>+</sup> i OH<sup>-</sup> jona.

Kada govorimo o pH reakciji zemljišta govorimo u stvari o koncentraciji H<sup>+</sup> jona. Jonski proizvod vode ili proizvod koncentracije H<sup>+</sup> i OH<sup>-</sup> jona iznosi 10<sup>-14</sup> mol/dm<sup>3</sup>. To znači da voda u neutralnom stanju ima koncentraciju H<sup>+</sup> jona od 10<sup>-7</sup> mola/dm<sup>3</sup> i koncentraciju OH<sup>-</sup> jona od 10<sup>-7</sup> mol/dm<sup>3</sup>. Negativan logaritam vrijednosti koncentracije H<sup>+</sup> jona u mol/dm<sup>3</sup> predstavlja vrijednost reakcije tla i označava se sa pH. Vrijednosti pH mogu biti od 0 (konc. H<sup>+</sup> jona = 10<sup>0</sup> mol/dm<sup>3</sup> = 1mol/dm<sup>3</sup>), do pH 7 (konc H<sup>+</sup> jona = 10<sup>-7</sup> mol/dm<sup>3</sup>) pa do 14 (koncentracija H<sup>+</sup>=10<sup>-14</sup> mol/dm<sup>3</sup>). Vrijednost pH 7 označava neutralnu sredinu što podrazumijeva jednaku koncentraciju H<sup>+</sup> i OH<sup>-</sup> jona. Vrijednosti pH ispod 7 pokazuju da je sredina kisela (veća koncentracija H<sup>+</sup> jona od OH<sup>-</sup> jona), a vrijednosti pH iznad 7 pokazuju da je sredina bazna ili alkalna što znači da je veća koncentracija OH jona.

Za većinu kulturnih biljaka optimalna pH vrijednost poljoprivrednih zemljišta je u rangu slabo kiselih do neutralnih vrijednosti. U većini slučajeva pH kod rijeka, podzemnih voda i kišnice varira od skoro neutralne do vrijednosti pH nešto ispod 5. Neutralan pH podzemnih voda daje prisustvo rastvorenog kalcij bikarbonata - Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Kod voda kiselih bara pH može pasti ispod 2. Voda alkalnih jezera i zemljišta iznosi pH 11. Voda okeana ima pH 8.

Uzrok kiselosti zemljišta je povećana koncentracija vodonikovih jona u tlu. Tendencija je u zemljištu da se s vremenom vrši povećanje koncentracije  $H^+$  jona kako u rastvoru tla tako i u adsorptivnom kompleksu. Taj proces se naziva acidifikacija ili zakiseljavanje tla. Prethodi mu ispiranje karbonata (dekarbonatizacija – ispiranje kalcij bikarbonata) i baznih katjona (debazifikacija – ispiranje  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ). Slobodni  $H^+$  joni mogu nastati kao produkti disocijacije organskih kiselina naročito fulvo kiselina nastalih u procesu biohemiske transformacije biljnih ostataka. Od anorganskih kiselina značajna za prisustvo  $H^+$  jona odnosno kiselost je prisustvo i disocijacija ugljične kiseline, te u manjoj mjeri sumporne, sumporaste, fosforne i azotne kiseline. Povećana koncentracija  $H^+$  iona u tlu može biti i posljedica padanja kiselih kiša (molekuli azotnih i sumpornih oksida rastvoreni u kišnim kapima).

Joni vodonika mogu se nalaziti slobodni u rastvoru tla kao aktivna kiselost, ili vezani za koloidne čestice (adsorbtivni kompleks tla), kao potencijalna ili ukupna kiselost.  $H^+$  ioni se neprekidno kreću iz adsorbtivnog sloja oko koloidnih čestica u rastvor tla i obrnuto, (uspostavlja se dinamička ravnoteža). U toku pedogeneze dolazi postupno do ispiranja adsorbovanih baza iz tla ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ) i njihove zamjene  $H^+$  i  $Al^{3+}$  jonima (zakiseljavanje tla) koji zauzimaju njihova mjesta na koloidnim česticama (adsorptivnom kompleksu tla – AKT).

### **5.3.2.1. *Određivanje aktivne kiselosti tla (pH u H<sub>2</sub>O)***

Slobodni  $H^+$  joni se mogu nalaziti u vodenom rastvoru tla i tu kiselost nazivamo aktivna kiselost ili kiselost tečne faze i mjeri se elektrometrijski preko pH-metra u destilovanoj vodi (na 10 g sitne zemlje dolijemo 25 ml destilovane vode) te je još zovemo pH u vodi.

Aktivna kiselost, odnosno aktivna pH vrijednost tla, predstavlja trenutnu količinu  $H^+$  jona u vodenoj otopini tla u trenutku mjerjenja. Određivanje aktivne kiselosti vrši se u destilovanoj vodi i označava kao pH u  $H_2O$  prema ISO 10390: 2005 [158]

#### **Postupak:**

Izvagati 10 g vazdušno suhog tla i prenijeti u čašicu od 50 ml. Sa menzurom dodati 25 ml destilovane vode i suspenziju dobro izmiješati staklenim štapićem. Ostaviti da stoji trideset minuta i u tom intervalu ponovo više puta izmiješati. Takođe, potrebno je pred samo mjerjenje suspenziju dobro izmiješati i tek nakon toga vrši se elektrometrijsko mjerjenje na pH metru..

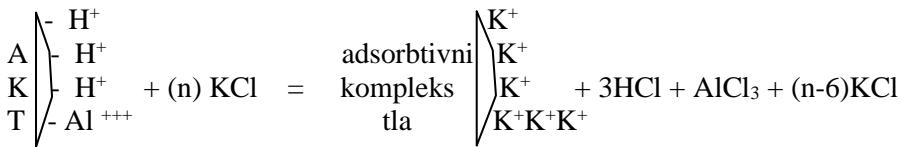
Elektrometrijsko određivanje pH u tlu bazira se na mjerenuj potencijalne razlike između dvije elektrode uronjenih u suspenziju tla. Potencijal tzv. referentne elektrode (obično zasićena kalomel elektroda) stalan je i neovisan

o pH vrijednosti otopine, dok se potencijal mjerne elektrode (staklena elektroda ili ranije u upotrebi kinhidron el.) mijenja u zavisnosti od sadržaja  $H^+$  iona u rastvoru.

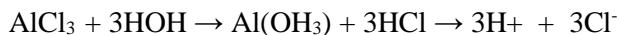
### 5.3.2.2. Određivanje supstitucijske kiselosti tla (pH u KCl)

$H^+$  ioni mogu se nalaziti i vezani za adsorbtivni kompleks zemljišta (negativno nanelektrisane mineralne i organske koloidne čestice), kao potencijalna kiselost ili kiselost čvrste faze. U adsorbtivnom kompleksu zemljišta uz  $H^+$  ione, kao uzroci potencijalne kiselosti zemljišta mogu biti i izmjenjivi  $Al^{3+}$  ioni. Ukoliko su slabije vezani tj. dalje od jezgra nanelektrisane koloidne čestice, u difuznom sloju, tada spadaju u grupu lakoizmjenjivih  $H^+$  i  $Al^{3+}$  iona. Oni se istiskuju tj. supstituišu tretiranjem zemljišta sa rastvorom neutralne soli 1M KCl-om ili  $CaCl_2$ . Ta kiselost se naziva fiziološki aktivna kiselost ili supstitucijska kiselost. Ime je dobila po procesu supstitucije (zamjene) koji se odvija kada uzorak ispitivanog tla prelijemo 1M KCl-om. Pri kome  $K^+$  ion iz dodanog rastvora 1M KCl-a zamjenjuje ili supstituiše lakoizmjenjive  $H^+$  i  $Al^{3+}$  ione iz adsorptivnog kompleksa ispitivanog tla. Tako izmjenjivi  $H^+$  i  $Al^{3+}$  ioni sa adsorptivnog kompleksa prelaze tj. napuštaju svoja mjesta i prelaze u rastvor a  $K^+$  ioni iz rastvora u ekvivalentnim količinama (jedan  $K^+$  ion supstituiše jedan  $H^+$  i/ili tri  $K^+$  iona supstituišu jedan  $Al^{3+}$ ) zauzimaju njihova mjesta u adsorptivnom kompleksu.

Supstitucijska kiselost je onaj dio potencijalne kiselosti koji predstavlja dio slabo vezanih (lahko izmjenjivih)  $H^+$ ,  $Al^{3+}$  iona, koji se iz adsorbcijskog kompleksa mogu oslobođiti tretiranjem tla neutralnim solima (KCl) prema sljedećem šematskom prikazu:



i dalje:



**Postupak:** Odmjeriti 10 g uzorka i prelići sa 25 ml 1M KCl. Dobro izmućati i nakon pola sata uz povremeno miješanje staklenim štapićem elektrometrijski odrediti pH vrijednost.

**Tabela 43. Oznaka pH vrijednosti u 1M KCl-u po Schefer-Schachatschabelu [136]**

Oznaka reakcije	pH	Oznaka reakcije	pH
vrlo jako kisela	ispod 4	slabo alkalna	7,1-8,0
vrlo kisela	4,0 – 4,9	umjereno alkalana	8,1-9,0
umjereno kisela	5,0 – 5,9	jako alkalna	9,1 -10
slabo kisela	6,0 – 6,9	vrlo jako alkalna	preko 10
neutralna	7,0		

Vrijednosti pH u 1MKCl su generalno manje nego pH u H<sub>2</sub>O, naročito u zemljištima sa visokim pH vrijednostima. U nekim tropskim zemljištima koja su izložena visokom stepenu raspadanju odnosno povećanoj koncentraciji hidroksida Fe i Al (koloidi sa pozitivnim nanelektrisanjem) i manjem sadržaju gline i organske materije (kolodi sa negativnim nanelektrisanjem), evidentirana je veća vrijednost pH u KCl nego pH u H<sub>2</sub>O. To se objašnjava tako što u pozitivnim koloidima koji dominiraju u tim zemljištima Cl<sup>-</sup> anion iz KCl u anionu izmjenjivačkoj reakciji istisne više OH<sup>-</sup> aniona nego što K<sup>+</sup> kation istisne H<sup>+</sup> katjona iz koloida sa negativnim nanelektrisanjem u katjonoizmjenjivačkoj reakciji. Posljedica toga je smanjena koncentracija H<sup>+</sup> jona u zemljišnoj otopini u KCl nego onoj u H<sub>2</sub>O.

Tako nam delta pH (pH u KCl minus pH u H<sub>2</sub>O) može poslužiti kao pokazatelj stepena raspadanja tla, odnosno kapaciteta adsorbcije. Tla kod kojih je delta pH veći od 0,1 kažemo da imaju gerične osobine tj, da su jako izložena raspadanju i da imaju jako mali kapacitet adsorpcije ili jako malo izmjenjivih baza.

Određivanje hidrolitičke ili ukupne potencijalne kiselosti, koja se odnosi na sve izmjenjive H<sup>+</sup> i Al<sup>3+</sup> ione sa adsorptivnog kompleksa tla, a ne kao u supstitucijskoj kiselosti samo lakoizmjenjive, biće obrađeno u poglavljiju analiza elemenata adsorptivnog kompleksa tla.

### **5.3.3. KONCENTRACIJA SOLI U ZEMLJIŠNOM RASTVORU I ELEKTRIČNI KONDUKTIVITET (EC)**

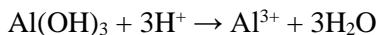
Koncentracija soli u zemljjišnom rastvoru se definiše na bazi sposobnosti rastvorenih soli da provodi električnu struju. Električni konduktivitet ili provodljivost (EC) predstavlja sposobnost vodnog ekstrakta tla da sprovede električnu struju. Prisustvo nanelektrisanih čestica u rastvoru tla obezbeđuje protok struje pod uticajem razlike potencijala.

Što je više iona tj. nanelektrisanih čestica prisutno u rastvoru tla to će i protok struje biti veći a time i električni konduktivitet. EC zavisi od koncentracije iona, a ne toliko od tipa iona. Ioni se formiraju rastvaranjem soli (minerala) u rastvoru tla. Npr. kalcit  $\text{CaCO}_3$  se u vodi u prisustvu  $\text{CO}_2$  rastvara na kalcij bikarbonat tj na  $\text{Ca}^{2+}$  i  $2(\text{HCO}_3^-)$  ione, ili halit  $\text{NaCl}$  se razdvaja na  $\text{Na}^+$  i  $\text{Cl}^-$  ion. Na mjerene vrijednosti EC utiču mnogi parametri kao što je tip ionskih jedinjenja rastvorenih u vodi, pokretljivost iona, viskozitet rastvora, temperatura, kao i spomenuta koncentracija iona.

Električni konduktivitet se koristi kao mjera zaslanjenosti zemljjišta kao i pri kontroli vode za navodnjavanje. To se posebno odnosi na često đubrena tla staklenika i platenika koja često treba kontrolisati na EC kao i tla koja se navodnjavaju zaslanjenom vodom. Električna provodljivost (EC) je mjera jačine hranjivog rastvora. Što je veća provodljivost, to je više rastvorenih čvrstih materija u rastvoru. Osjetljive biljke, reznice i sadnice mogu doživjeti opeklne od gnojiva ako je električna provodljivost previsoka.

Rastvori zemljjišta sa velikom koncentracijom rastvorenih iona otežavaju usvajanje vode od strane biljnog korijena, a mogu i da djeluju toksično i da izazovu poremećaj u dinamici ishrane gajene kulture.

Kako je koncentracija jona u zemljjišnom rastvoru u dinamičkoj ravnoteži sa koncentracijom izmjenjivih jona na adsorptivnom kompleksu tako će u rastvoru zemljjišta na karbonatnim supstratima dominirati  $\text{Ca}^{2+}$  kation, dok će u kiselim zemljjištima kao posljedica pufernog djelovanja  $\text{Al(OH)}_3$  dominirati  $\text{Al}^{3+}$  kation:



Iako je  $\text{Al(OH)}_3$  odigrao važnu ulogu u sprečavanju naglog zakiseljavanja tla, poznato je inhibitorsko djelovanje većih koncentracija  $\text{Al}^{3+}$  jona na razvoj biljnog korijena (zakržlja korijen).

#### **Mjerenje EC**

Električni konduktivitet se mjeri pomoću standardizovane EC sonde (raznih proizvođača) na mjerajući provodljivosti - konduktometru (ISO 11265:1994).

**Postupak** se zasniva na mjerenu električne provodljivosti u vodnom ekstraktu vazdušnosuhog tla u omjeru 1:5 (m/V - 20 g tla u 100 mL destilovane vode) pri temperaturi od 20°C i filtriranja nakon mučkanja od 30 minuta.

Električna provodljivost recipročna je električnom otporu i koristi jedinice Simens/cm (S/cm,  $\mu$ S/cm, mS/cm, dS/m).

1000 mikroSimensa/cm ili  $1000\mu$ S/cm = 1,0 miliSimensa/cm (mS/cm)

Napomena: Do 1971. jedinica za električni konduktivitet je bila mho/cm., pa se još može naći u literaturi ( $1\text{dS}/\text{m} = 1\text{mmho}/\text{cm}$ ) [122].

## Koncentracija zemljišnog rastvora

Koncentracija zemljišnog rastvora predstavlja masu rastvorene materije u odnosu na zapreminu vodenog rastvora tla (mg/l). Veća je u aridnim uslovima nego u humidnim. To znači da je više rastvorenih soli u zemljišnom rastvoru u suhljim područjima nego u vlažnijim, sa više padavina, odakle se soli više ispiru i u dublje slojeve i dalje. Zemljišni rastvor sadrži u rastvorenom obliku neorgansku i organsku materiju u ionskom i molekulskom obliku. Važniji anioni rastvora tla su:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  i  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Među kationima u rastvoru tla se nalaze svi oni koji ulaze i u sastav adsorbovanih kationa:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$  i  $\text{Fe}^{3+}$ . U veoma malim količinama se nalaze i mikroelementi:  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$  i dr. U molekularnom obliku u vodi nalazimo na  $\text{CO}_2$  i  $\text{O}_2$ .

Najveći dio hranjivih materija u rastvoru tla je porijekлом iz matičnog supstrata, jedan dio se oslobađa mineralizacijom organske materije, a jedan dio se unosi u tlo gnojidbom mineralnim i organskim đubrivima, oborinama, podzemnim vodama, slobodnom i simbioznom azotofiksacijom iz zraka i drugim načinima.

## Mjerenje koncentracija zemljišnog rastvora

Ukupne otopljene čvrste tvari u vodenom rastvoru sastoje se od anorganskih soli, prvenstveno kalcija, magnezija, kalija, natrija, bikarbonata, hlorida i sulfata te nekih malih količina organske materije rastvorenih u vodi.

TDS (engl: *total dissolved solids* - ukupne rastvorene čvrste materije), je metoda koja se koristi za određivanje sadržaja čvrstih materija u rastvoru. Da bi se odredio TDS (mg/l), **postupak** je jednostavan: rastvor čija je zapremina poznata  $V$  ( $\text{cm}^3$ ) se ispari i masa suhog ostatka  $m$  se izvaga - (g).

Međutim, mjerenje električne provodljivosti EC se obično koristi samo za **procjenu** ukupne rastvorene čvrste materije na osnovu pretpostavke da su čvrste materije pretežno ionske prirode i da je odnos između rastvorenih jona i provodljivosti poznat. Naime, rastvorena organska jedinjenja ne provode električnu energiju i stoga ih TDS brojila ne detektuju.

**Obračun koncentracija soli u rastvoru tla** procjenjuje se mjeranjem električnog konduktiviteta EC u vodnom ekstraktu tla po opisanom postupku i množenjem *faktorom konverzije*. Konverzija EC u mmol(+)/l, u osmotski pritisak (OP) u barima i u mg/l je predstavljano empirijskim izrazima [122]:

$$\text{mmol}(+)/\text{l} = 10 \times \text{EC} \text{ (EC u dS/m);}$$

$$\text{OP} = 0,36 \times \text{EC} \text{ (EC u dS/m);}$$

$$\text{mg/l} = 0,64 \times \text{EC} \text{ (EC u dS/m) .... ili}$$

$$\text{mg/l} = 640 \times \text{EC} \dots \dots \text{ za vodu ili ekstrakt tla koji ima vodljivost do } 5 \text{ dS/m.}$$

Količina rastvorene materije odnosno koncentracija zemljjišnog rastvora prosječno u mineralnim tlama humidnih područja iznosi oko 0,05% [126].

#### **Status natrijuma (Na):**

Status Na poznat kao ESP (engl. Exchangeable Sodium Percentage) ili procenat izmjenjivog Na predstavlja odnos izmjenjivog  $\text{Na}^+$  ( $\text{cmol kg}^{-1}$ ) u ukupnom kapacitetu izmjenjivih kationa (KIK) u tlu ( $\text{cmol kg}^{-1}$ ) [122]:

$$\text{ESP (\%)} = \frac{\text{Izmjenjivi } \text{Na}^+}{\text{Ukupni kapacitet izmjenjivih kationa}} \cdot 100$$

Sodna (engl. *sodium* = natrijum) tla sa visokim sadržajem Na (>15%) mogu imati pH 8,5 i više.

**Tabela 44. Važne karakteristike slanih, sodnih i slanih-sodnih zemljišta**  
[122]

Vrsta tla	pH	Vrsta rastvorenih soli	Električna provodljivost (dS m <sup>-1</sup> )	Izmjenjivi Na % u CEC
Slana tla	< 8,5	Visok sadržaj neutralnih soli -hloridi i sulfati Na, Ca i Mg	> 4	< 15
Slano-sodna	< 8,5	Izmješane karakteristike slanih i sodnih tala	> 4	> 15
Sodna tla (natrijumova)	> 8,5	Natrijumove soli	< 4	> 15

Slana tla imaju visoku koncentraciju neutralnih rastvorenih soli, dok u alkalnim dominiraju kationi  $\text{Na}^+$  i  $\text{Mg}^{2+}$ . U takvim tlima pojavljuje se nedostatak mikrohraniva kao Fe, Mn, Cu i Zn i ovakva tla postaju nepogodna za biljni uzgoj. U alkalnim zemljištima, sa >15 % izmjenjivog  $\text{Na}^+$  jona u CEC,  $\text{Na}^+$  ion može da razori strukturu stvarajući od zemljišta bezličnu bestrukturnu masu. Naime,  $\text{Na}^+$  ion je sklon hidrataciji, tj. oko  $\text{Na}^+$  iona stvori se plašt od molekula vode koji se kreće zajedno sa njim u rastvoru tla te kao takav istiskuje polivalentne katione koagulatore te razdvaja i raspršuje koagulirane koloidne čestice.

#### 5.3.4. ADSORBTIVNI KOMPLEKS TLA

Rastvorena materija u tečnoj fazi tla može doći u interakciju s nekoliko vrsta čestica čvrste faze tla kao što su [87].

- primarni minerali,
- oksidi, te
- mineralni i organski koloidi.

U jednoj takvoj interakciji, rastvoreni kationi i anioni iz rastvora tla bivaju privućeni od suprotno nanelektrisanih čvrstih čestica i neutrališu negativni ili pozitivni naboj koji se pojavljuje na površini ovih čestica tla. Ova vrsta interakcije je karakteristika svih čvrstih čestica u tlu, međutim po intenzitetu površinskog naboja i količini vezanih suprotno nanelektrisanih jona izdvaja se posebna grupa čestica koju nazivamo mineralni i organski koloidi tla. Velika usitnjenost čestica, postojanje površinskog naboja i svojstvo adsorpcije suprotno nanelektrisanih čestica iz rastvora tla karakteristika je jedne velike grupe čestica tla koju zovemo koloidi tla. Koloidi tla predstavljaju takve čestice u tlu koje se karakterišu tzv. koloidnim osobinama:

- velika usitnjenost, čestice imaju dijametar manji od 2  $\mu\text{m}$ ,
- ogromna aktivna granična površina čestica kao posljedica usitnjenosti,
- naelektrisanje na graničnoj površini čestica koje može biti negativno ili pozitivno,
- adsorbcija – sposobnost privlačenja i držanja suprotno naelektrisanih čestica iz rastvora tla na svojoj graničnoj površini ili oko koloidne čestice gdje se osjeti uticaj elektrostatičkog potencijala,
- izmjenjivačke reakcije iona u ekvivalentnim količinama – sposobnost izmjene adsorbovanih iona na graničnoj površini koloida i oko koloida sa ionima iz rastvora tla u ekvivalentnim količinama. To znači da  $2\text{H}^+$  iona adsorbovana od koloidnih čestica mogu biti zamjenjena sa  $1\text{Ca}^{2+}$  iz rastvora tla. Ili da bi se zamijenio adsorbovan jedan  $\text{Al}^{3+}$  ion potrebna su  $3\text{K}^+$  iona iz rastvora. Znači, ekvivalentna količina jednom negativnom punjenju na graničnoj površini koloidne čestice ili  $1\text{H}^+$  ionu koji je zauzeo to jedno mjesto negativnog punjenja su:  $1\text{K}^+$  ion ili  $1\text{Na}^+$  ion, ili  $\frac{1}{2}\text{Ca}^{2+}$  iona ili  $\frac{1}{2}\text{Mg}^{2+}$  iona, ili  $\frac{1}{3}\text{Al}^{3+}$  iona.

U sastav koloidne frakcije u zemljištu ulaze najfinije čvrste čestice u tlu koje najčešće povezujemo sa frakcijom gline: minerali gline, amorfni minerali, hidroksidi Al, Fe i Si, humus, organomineralni koloidi, kao i primarni minerali koji su usitnjeni i imaju naelektrisanje uslijed prijeloma. Mogu se grupisati u organske, mineralne i organo-mineralne koloide.

**Negativno naelektrisanje** koloidnih čestica minerala gline i alofana (amorfni slojeviti alumosilikati) najčešće nastaje izomorfnom zamjenom u strukturi minerala kada nižeivalentni kationi  $\text{Al}^{3+}$  zamjenjuju višeivalentne  $\text{Si}^{4+}$  u Si-tetraedrima (kao što je slučaj kod minerala gline iz grupe montmorionita ili ilita), ili kada nižeivalentni  $\text{Mg}^{2+}$  mijenja višeivalentni  $\text{Al}^{3+}$  u Al-oktaedrima. Takođe elektrostatičke sile se pojavljuju i na graničnim prijelomima slojevitih alumosilikata.

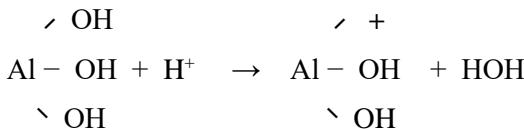
Negativno naelektrisanje koloidnih čestica humusa nastaje disocijacijom karboksilnih  $\text{COOH}$  i fenolnih  $\text{OH}$  grupa na rubnim površinama koloidnih čestica humusnih kiselina:



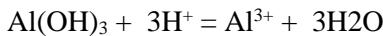
Količina ili broj mjesta negativnog punjenja predstavlja ujedno i kapacitet adsorpcije nekog zemljišta. Broj mjesta negativnih punjenja ili kapacitet adsorpcije je veći kod organskih (humusnih) nego kod mineralnih koloida, a među mineralima gline po kapacitetu za adsorpciju prednjače troslojni minerali iz grupe montmorionita u odnosu na dvoslojne minerale gline iz

grupe kaolinita. Specifična površina minerala gline varira od  $6\text{--}39 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$  za kaolinit do  $800 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$  za smektit i vermikulit [87].

**Pozitivno naelektrisanje** ili negativno naelektrisanje hidroksida Fe i Al direktno zavisi od pH vrijednosti tla. Kako su poljoprivredna zemljišta najčešće u rasponu pH u vodi od  $4,5 - 7,5$  i njihovo naboje tako uglavnom pozitivan (bazoidi). To se dešava uslijed disocijacije  $\text{OH}^-$  skupina iz koloidne čestice Fe i Al hidroksida, posebno u kiselijim uslovima, nakon čega na ovim mineralnim česticama ostaje pozitivnani naboje.



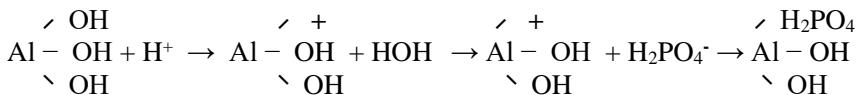
Ovo je jedna vrsta pufernog dejstva Al hidroksida u zemljištu kada se  $\text{Al(OH)}_3$  sprečava naglo zakiseljavanje:



Ovaj mehanizam pufernog dejstva  $\text{Al(OH)}_3$  objašnjava nam veliko prisustvo  $\text{Al}^{3+}$  iona adsorbovanih na koloidima, kao i onih u vodnom rastvoru tla u kiselim tlima.

Adsorbacija negativno naelektrisanih iona iz rastvora tla ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ...) na površini pozitivno naelektrisanih Al i Fe hidroksida je puno manjeg obima i značaja nego što je to slučaj sa adsorpcijom kationa iz rastvora tla na graničnoj površini i oko negativno naelektrisanih mineralnih (glina) i organskih (humus) koloidnih čestica.

Izuzetak je specifična adsorpcija fosfatnih iona ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) kada ovaj ion u potpunosti zamjenjuje (zauzima mjesto) disociirane  $\text{OH}^-$  grupe u kristalnoj strukturi (oktaedar) minerala Al i Fe hidroksida. Na ovaj način se vrši tzv. specifična adsorpcija i hemijska inaktivacija fosfatnih iona, ovog značajnog hraniva u ishrani biljaka.



U pedološkoj praksi u kontekstu koloidnih osobina zemljišta često se koristi izraz adorptivni kompleks tla (AKT). Adorptivni kompleks tla predstavlja u stvari koloidne čestice tla sa negativnim naboljem (acidoide): minerali gline, alofani i imogolit (amorfni i slabo kristalisali alumosilikati), humusne kiseline, humusno-glineni kompleksi... koje imaju sposobnost adsorbicije

kationa iz zemljišnog rastvora ( $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $H^+$ ,  $Al^{3+}$ ) na graničnoj površini i oko svojih negativno nanelektrisanih čestica.

Možemo reći da adsorptivni kompleks tla predstavlja jednu „ostavu ili špajz“ tj. spremište biljnih hraniva ( $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ) i sprečava njihovo naglo ispiranje iz tla. Slikovito opisano „adsorbovani kationi kruže oko koloidne čestice kao roj pčela oko košnice“.

Količina i vrsta adsorbovanih kationa na AKT odgovara količini i vrsti kationa u zemljišnom rastvoru. Za njih kažemo da se nalaze u dinamičkoj ravnoteži. To znači da ukoliko se poveća koncentracija jednog kationa u rastvoru, npr.  $K^+$  jona uslijed dođavanja kalijumovog mineralnog đubriva, da će se automatizmom povećati adsorpcija i udio tog kationa i u sastavu adsorbovanih kationa. Isto tako ako se smanji koncentracija jednog kationa u rastvoru, npr. uslijed usvajanja od strane biljnog korijenja taj kation će se desorbirati sa površine AKT i preći u rastvor. Biljni korijen usvaja hraniva kako iz rastvora tla tako i sa adsorptivnog kompleksa. Međutim ispiranje baza (debazifikacija) i lakotopivih aniona se ipak dešava u oblastima s izraženim padavinama, tako da s vremenom imamo povećanu koncentraciju tzv. izmjenjive kiselosti tla prije svih  $Al^{3+}$  i manje  $H^+$  jona na adsorptivnom kompleksu i u zemljišnom rastvoru, odnosno pojavu zakiseljavanja tla.

Analiza Adsorptivnog kompleksa tla podrazumijeva analizu ukupnog kapaciteta za adsorpciju (ukupni broj mjesta negativnih punjenja na graničnoj površini koloidnih čestica) i analizu vrste adsorbovanih iona (nije isto da li u kompoziciji adsorbovanih kationa dominiraju izmjenjive baze  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  ili izmjenjiva kiselost  $Al^{3+}$ ,  $H^+$ , tako da možemo procjeniti njegov kvalitet i produktivnost i predvidjeti pedomeliorativne mјere. Nadalje, analiza AKT pomaže da se sagleda stadij u kojem se tlo nalazi odnosno da se odredi tipološku pripadnost ispitivanog zemljišta, jer stanje adsorptivnog kompleksa je u direktnoj vezi sa intenzitetom i karakterom pedogenetskih procesa.

#### **5.3.4.1. Kapacitet izmjenjivih kationa - KIK (engl. Cation Exchange Capacity - CEC)**

Vidjeli smo da broj mjesta negativnih nanelektrisanja (punjenja) na graničnim površinama organskih i mineralnih koloida predstavlja ujedno i kapacitet mjesta izmjenjivih kationa iz rastvora. Ipak, ukupan broj mjesta negativnih punjenja je veći od Kapaciteta izmjenjivih kationa jer nisu svi adsorbovani kationi izmjenjivi bez obzira o kojem se ekstrakcionom sredstvu radi.

Kapacitet izmjenjivih kationa tla - KIK (engl. CEC - Cation Exchange Capacity) je mјera količine negativno nabijenih mjesta na graničnim

površinama čestica tla, koje mogu svojim elektrostatičkim silama zadržati pozitivno nabijene ione (adsorbovane katione iz rastvora tla) i izmjeniti ih sa kationima iz rastvora ili kationima iz ekstrakcionog sredstva pri mjerenu CEC. Kada govorimo o adsorbovanim kationima najčešći i najzastupljeniji su kalcij ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnezij ( $\text{Mg}^{2+}$ ) i kalij ( $\text{K}^+$ ) a u nekim zemljistima i natrij ( $\text{Na}^+$ ). Ovi kationi koji se zadržavaju elektrostatički na adsorptivnom kompleksu lako se izmjenjuju s kationima iz rastvora tla, tako da tlo s višim CEC ima veći kapacitet za zadržavanje adekvatnih količina  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  i  $\text{K}^+$  od tla sa niskim CEC. Međutim tlo s višim CEC ne mora nužno biti plodnije jer CEC tla može biti zauzet i kiselim kationima kao što su aluminijev ion ( $\text{Al}^{3+}$ ) i vodonikov ion ( $\text{H}^+$ ). Prva grupa kationa predstavlja izmjenjive baze ( $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{K}$  i  $\text{Na}$ ) a druga grupa kationa predstavlja izmjenjivu kiselost ( $\text{Al}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Mn}$ ). Stepen zasićenosti bazama (engl. *base saturation* – *BS*) predstavlja odnos izmjenjivih baza i CEC tla izražen u procentima. U kombinaciji sa drugim mjerama plodnosti tla, CEC je dobar pokazatelj kvaliteta i produktivnosti tla.

Pronalazak ionskih izmjena ili jonoizmjenjivačkih reakcija došao je kao i mnogi drugi pronalasci slučajno. 1850. engleski inženjeri Way i Thompson objavili su rad o ionskoj izmjeni kod prirodnih zeolita (prirodni alumosilikati hidrotermalnog porijekla). Sam početak istraživanja bio je vezan za ispitivanje vezivanja i ispiranja amonijačnog iona ( $\text{NH}_4^+$ ) kao gnojiva u tlu. Isporuči vodom zemlju koja je prije toga natopljena amonijevim sulfatom, tada jedinim umjetnim azotnim gnojivom, utvrdili su da se umjesto amonijevog sulfata u filtratu pojавio kalcijev sulfat. Tako je nenadano ustanovljeno, da se je  $\text{NH}_4^+$  ion iz amonij sulfata ostao vezan za zemljiste čestice, a zamijenjen je sa  $\text{Ca}^{2+}$  iz zemlje koji se isprao. Dalnjim istraživanjima ispitana je afinitet vezanja kationa. Postoji određeni redoslijed od najvećeg ka najmanjem afinitetu vezanja:



Tu izmjenu nazvali su ionskom izmjenom ili jonoizmjenjivačkom reakcijom i protumačili je kao povratnu izmjenu iona između čvrste materije i rastvora [50].

Mjesta kationske izmjene između čvrste faze tla i zemljiste rastvora predstavljaju u stvari negativna nanelektrisanja (punjenja) koja se nalaze prvenstveno na površinama minerala gline i humusa. Kako je mjera za količinu materije *mol* a radi se i određenoj masi zemljista (*kg*) CEC tla se obično izražava izvedeno od *mol/kg* tla odnosno jednom od dvije brojčano ekvivalentne jedinice mjere:

- $\text{cmol}/\text{kg}$  (centimola punjenja po kilogramu suhog tla). Kod uznake  $\text{cmol}/\text{kg}$  oznaka  $c$  u indeksu se odnosi na prvo slovo engl. riječi *charge* = punjenje ili naboj. U SI sistemu označava se kao  $\text{cmol}(+)\text{ kg}^{-1}$ , ili
- $\text{meq}/100 \text{ g}$  (miliekvivalenta naelektrisanja na 100 g suhog tla), koji je bio u upotrebi ranije a koji u konačnici ima istu brojčanu vrijednost kao i  $\text{cmol}(+)\text{ kg}^{-1}$

Da pojasnimo značenje ekvivalenti punjenja (naelektrisanja) ili centimoli punjenja. Uzmimo za primjer izdvojeni dio AKT koji ima ukupno 11 mesta negativnih naelektrisanja. Tih 11 mesta negativnih punjenja na dijelu AKT može adsorbovati 11 jednovalentnih  $\text{H}^+$  iona. Jednako tako tih 11 negativnih punjenja može zauzeti i ekvivalentna količina drugih kationa sa različitom valencijom, na pr.:  $2\text{Ca}^{2+} + 1\text{Mg}^{2+} + 1\text{K}^+$  jona kao izmjenjive baze, plus  $1\text{Al}^{3+} + 1\text{H}^+$  jona kao izmjenjivu kiselost, znači ukupno 6 različitih kationa sa različitim valencijama. U oba slučaja radi se o kapacitetu adsorpcije od 11 mesta negativnih punjenja. Međutim u prvom slučaju smo imali 11 jednovalentnih  $\text{H}^+$  jona koji su zauzeli ta mjesta a u drugom slučaju su  $2\text{Ca}^{2+}$  zauzela 4 mesta ( $2 \times 2 = 4$ ),  $1\text{Mg}^{2+}$  je zauzeo 2 mesta,  $1\text{K}^+$  je zauzeo 1 mjesto,  $1\text{Al}^{3+}$  je zauzeo 3 mesta i  $1\text{H}^+$  ion je zauzeo 1 mjesto ( $(2 \times 2) + (1 \times 2) + (1 \times 1) + (1 \times 3) + (1 \times 1) = 11$ ).

Otuda se javila potreba za uvođenje ekvivalentnih količina i oznake  $c$  (*charge*) ili  $(+)$  koje označavaju količinu kationa po jednom punjenju. Tako ako smo npr. iz zemljišta pri određivanju CEC isprali izmjenjive katione iz AKT i odredili da u filtratu ima 1 cmol  $\text{Ca}^{2+}/\text{kg}$  tla to će biti ekvivalentno 2  $\text{cmol}/\text{kg}$  tla (centimola punjenja po kilogramu tla) u Kapacitetu izmjenjivih kationa tog zemljišta, jer jedan  $\text{Ca}^{2+}$  ion zauzima dva negativna punjenja. Ili ako smo isprali iz AKT i u filtratu identifikovali 1 cmol  $\text{Al}^{3+}/\text{kg}$  tla to će biti ekvivalentno 3  $\text{cmol}/\text{kg}$  tla u CEC.

Kako su vrijednosti ispranih kationa u filtratu, pri određivanju CEC, izražene umjesto u  $\text{cmol}/\text{kg}$  (centimolima po kg tla) u  $\text{mg}/\text{kg}$  ili ppm, u tom slučaju pri određivanju CEC trebamo preračunati (konvergirati) ove vrijednosti u  $\text{cmol}/\text{kg}$  tla. Npr:  $1\text{cmolCa}/\text{kg}$  tla teži  $400 \text{ mgCa}/\text{kg}$  tla ili  $400 \text{ ppm}$  ( $1\text{molCa} = 40 \text{ g}$ ;  $1\text{cmolCa} = 0,4 \text{ g Ca}$  ili  $400 \text{ mg Ca}$ ). Kako je  $1\text{cmol Ca}/\text{kg}$  tla ili  $400 \text{ mg Ca}/\text{kg}$  tla ekvivalentno  $2 \text{ cmol}/\text{kg}$  tla CEC, to ćemo vrijednost od  $400 \text{ mg}/\text{kg}$  tla podijeliti sa 200 da bismo ovu vrijednost preveli u CEC u  $\text{cmol}/\text{kg}$  tla, znači  $400 : 200 = 2$ . Znači  $400 \text{ mg}/\text{kg}$  tla Ca u filtratu ekvivalentno je CEC od  $2 \text{ cmol}/\text{kg}$  tla.

Dobivene vrijednosti za ostale izmjenjive katione u  $\text{mg}/\text{kg}$  tla ili ppm takođe je potrebno prevesti u ekvivalentne mjere CEC. To ćemo uraditi tako da njihove vrijednosti u  $\text{mg}/\text{kg}$  ili ppm podijelimo sa određenim brojem koji dobijamo tako da atomsku težinu izmjenjivog kationa podijelimo sa njegovom valencijom i pomnožimo sa 10. Na pr.: u filtratu je evidentirano

320 mg Mg /kg tla. Atomska težina Mg je 24, koju podijelimo sa 2 (valencija Mg) i dobijemo 12. Taj broj pomnožimo sa 10 dobijemo 120. Znači 320 mg Mg /kg tla odgovara  $320/120 = 2,67$  meq/100g tla ili 2,67 cmol/kg tla.

Ukoliko su vrijednosti izražene u mg/100 g tla, ekvivalentne vrijednosti dobijemo tako da ove vrijednosti u mg/100g tla podijelimo sa brojem dobivenim tako što atomsku masu tog iona podijelimo sa njegovom valencijom. Npr.: uzmimo isti filtrat kao u gornjem slučaju gdje evidentirano 32 mgMg/100 g tla. Atomsku masu Mg 24 podijelimo sa 2 i dobijemo 12. Dalje kako je rečeno: 32 mg/100 g tla podijelimo sa 12 i opet dobijemo ekvivalentnu vrijednost CEC od 2,67 meq/100g tla ili 2,67 cmol/kg tla.

Veličina CEC nekog tla je direktno povezana sa sadržajem gline i humusa.

**Tabela 45. Povezanost CEC i teksture tla [85]**

Tekstura	CEC (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )
Pjeskovita	1-8
Ilovasta pjeskulja	9-12
Praškasto ilovasta	13-20
Ilovasta	21-28
Glinovito ilovasta	29-40
Glinovita	>40

CEC ili količina izmjenjivih kationa je zavisana od pH vrijednosti. U skoro neutralnim pH uslovima zbog većeg prisustva OH<sup>-</sup> skupina u rastvoru tla koje izazivaju izraženije disocijacije R-COOH<sup>+</sup> i R-OH<sup>+</sup> grupa humusnih kiselina, razviti će se veći CEC (više mesta negativnog naboja) nego što je to slučaj u kiselim uslovima. Stoga će dodavanje organskog materijala vjerovatno povećati CEC tla tokom vremena. S druge strane, CEC tla se također može smanjiti s vremenom, npr. zbog primjene prirodnog ili vještačkog gnojiva koje izaziva zakiseljavanje tla i/ili gubitkom organske materije OM mikrobiološkom razgradnjom. Udio Ca u CEC od 65-80%, zatim Mg 10-15%, K 1.5% i Na od 0-1% je poželjan za biljne kulture.

**Tabela 46. Koncentracija izmjenjivih kationa (cmol(+) kg<sup>-1</sup>) prema Hazelton and Murphy (prenose [134])**

Kation	Jako niska	Niska	Umjerena	Visoka	Vrlo visoka
Na	0-0,1	0,1-0,3	0,3-0,7	0,7-2,0	>2
K	0-0,2	0,2-0,3	0,3-0,7	0,7-2	>2
Mg	0-0,3	0,3-1	1-3	3-8	>8
Ca	0-2	2-5	5-10	10-20	>20

**Tabela 47. Oznake tla prema veličini CEC /cmol(+)kg-1) prema Hazelton and Murphy, (prenose [134])**

Oznaka	CEC / cmol(+)kg-1)
Jako nizak	<6
Nizak	6-12
Umjeren	12-25
Visok	25-40
Vrlo visok	>40

#### **5.3.4.1.1. Metode određivanje CEC tla**

Sve analitičke metode određivanja CEC, a one su brojne, mogu se prema principu određivanja količine negativnih punjenja ili izmjenjivih kationa na adsorptivnom kompleksu tla svrstati u nekoliko a pojednostavljeno govoreći najčešće u dvije grupe:

**Direktna mjerena sa zamjenskim „marker“ kationom** - tu se u postupku određivanja, prvo mjesta kationske izmjene (negativna punjenja adsorptivnog kompleksa tla) zasićuju sa „marker“ kationom iz rastvora, npr. sa  $\text{NH}_4^+$  ionom iz amonij acetata ( $\text{NH}_4\text{OAc}$ ). Zatim se procjedna voda (prvi filtrat) sa ispranim bazama baca. Potom se u drugom ispiranju adsorbovani kation ( $\text{NH}_4^+$ ) zamjenjuje sa kationom iz odabranog rastvora, npr.  $\text{K}^+$  iz  $\text{KCl}$ -a. Količina amonijačnog iona ( $\text{NH}_4^+$ ) odredena u drugom filtratu u mg/kg tla (ppm) i prevedena u ekvivalentnu vrijednost predstavlja CEC u cmol/kg suhog tla.

U upotrebi je i metoda bazirana na korištenju radioaktivnog izotopa kao marker kationa.

**Metoda sumiranja ispranih kationa**, zasniva se na istiskivanju adsorbovanih  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  i  $\text{Na}^+$  specifičnim kationom iz zasićenog rastvora, na pr. sa  $\text{NH}_4^+$  iz amonij acetata ( $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) i sumiranjem (sabiranjem) njihovih količina u prvom filtratu. Znači nakon istiskivanja izmjenjivih baza slijedi određivanje količine istisnutih baza u prvom filtratu (na atomskom adsorpcionom spektrofotometru -AAS u mg/kg tla ili ppm) i prevođenje u ekvivalentne vrijednosti po jednom punjenju (u meq/100g tla ili cmol/kg tla) i na kraju zbrajanje (sumiranje) ekvivalentne količine istisnutih pojedinačnih baza (Ca, Mg, K). Za tla sa pH nižim od 6, treba uzeti u obzir (dodati) vrijednost izmjenjive kiselosti (izmjenjivi  $\text{Al}^{3+}$  i  $\text{H}^+$ ). U literaturi se često ovakva vrijednost CEC dobivena zbrajanjem (sumiranjem) ispranih kationa, označava sa  $\text{CEC}_{\text{sum}}$ .

Već je napomenuto da broj mesta negativnih punjenja odnosno količina izmjenjivih kationa zavisi od pH reakcije. Zbog različitih metoda za procjenu CEC-a, važno je znati za koju namjenu će se upotrebiti dobiveni rezultati. Ukoliko se radi o potrebi za određivanje tipske pripadnosti tala (klasifikaciji tala), CEC tla se često mjeri pri standardnoj (zadanoj) pH vrijednosti ekstrakcionog sredstva [134]. Takve su Schollenberger amonijum acetatna -AA metoda [140] puferirana na pH 7 i Mehlich metoda barij hlorid-trietanolamin [96] puferirana na pH 8,2. Međutim, tako dobijene CEC vrijednosti mogu biti vrlo različite od CEC tla u poljskim uslovima pri stvarnom pH, koje se uglavnom razlikuju od zadanih standardnih pH u pomenutim metodama. U ovom slučaju (CEC tla u poljskim uslovima) govorimo o efektivnom CEC koji se označava sa  $CEC_e$ . Ovo posebno važi za kisela zemljišta sa CEC zavisnim od pH.

Za preciznije mjerjenje CEC tla u terenskim uslovima neki autori predlažu metod sa  $BaCl_2$  [49, 50, 128]. Za procjenu  $CEC_e$ , potrebno je na ove vrijednosti dodati izmjenjivi  $Al^{3+}$  (prenose [134]).

U širokoj upotrebi u svijetu su i metode određivanja CEC pri pH zemljišta sa kobalt – heksamniom kao ekstrakcionim sredstvom [112], i metoda po Metsonu ( $CEC_{Metson}$ ) za određivanje pH pri pH 7 [98].

#### **5.3.4.1.2. AA (amonijum acetat) metoda sa marker zamjenskim kationom za mjerjenje CEC pri pH 7, (Chapman, 1965 [19])**

Ova metoda spada u grupu mjerjenja CEC tla gdje se koristi zamjenski „marker“ kation.

**Princip određivanja** [134]: prvo se mesta kationske izmjene (negativna punjenja adsorptivnog kompleksa tla) zasićuju sa „marker“ kationom  $NH_4^+$  iz rastvora amonij acetata. Zatim se procjedna voda (prvi filtrat) sa ispranim bazama iz AKT baca. Potom se u drugom ispiranju adsorbovani marker kation ( $NH_4^+$ ) istiskuje sa  $K^+$  kationom KCl-a. Količina amonijačnog iona ( $NH_4^+$ ) određena u drugom filtratu u mg/kg tla (ppm) i prevedena u ekvivalentnu vrijednost predstavlja CEC u cmol./kg suhog tla.

*Prednosti CEC - amonijum acetat pri pH 7:* tradicionalno se zahtijeva da se CEC mjeri ovim postupkom. Takođe postoji velika baza podataka za CEC tla po ovoj metodi. Ovu metodu može lako i isplativo primijeniti većina laboratorija za ispitivanje tla.

*Nedostaci CEC - amonijum acetat pri pH 7:* Glavni problem s ovom metodom je što ona puferira pH tla na 7,0. Dakle, ova metoda samo će dati

približne vrijednosti efektivnom CEC<sub>e</sub> ukoliko je pH ispitivanog tla oko 7, a može rezultirati velikim precjenjenim vrijednostima CEC<sub>e</sub> za mnoga kisela tla.

Oprema:

- Aparat za filtriranje, Buchnerov lijevak.
- Vaga.
- Erlenmayer tikvice od 250 i 500 mL.
- Aparat za određivanje amonijaka (destilacijom ili kolorimetrijski).

Reagensi:

- 1M otopina amonijum acetat (NH<sub>4</sub>OAc) za zasićenje uzorka: razrijediti, u digestoru, 57 mL glacijalne octene (sirčetne) kiseline (99,5%) sa ~ 800 mL destilirane H<sub>2</sub>O u volumetrijskoj tikvici od 1L. Dodati 68 mL koncentrovanog NH<sub>4</sub>OH, promiješati i ohladiti. Podesite pH na 7,0 sa NH<sub>4</sub>OH ako je potrebno i razblažite do 1 L.
- **Napomena!** ključna razlika između sirčetne i glacijalne sirčetne kiseline je da sirčetna kiselina ne naosi štetu, dok je glacijalna sirčetna kiselina nagrizajuća i s njom treba postupati pažljivo
- 1M KCl kao zamjenski rastvor: potpuno otopiti 74,5 g KCl u destilovanoj vodi i razrijediti do konačne zapremine od 1 L.
- Etanol, 95%.

**Postupak [134]:**

- Dodati 25,0 g zemlje u Erlenmajerovu tikvicu od 500 mL.
- Dodati 125 mL 1 M NH<sub>4</sub>OAc, dobro promučkajte i ostavite da odstoji 16 sati ili preko noći.
- Postaviti Buchnerov lijevak od 5,5 cm sa filter papirom (br 2), navlažite papir, primijenite lako usisavanje i prenesite tlo. Ako filtrat nije bistar, ponovo filtrirajte kroz tlo.
- Nježno isprati tlo četiri puta sa 25 mL dodatne NH<sub>4</sub>OAc, dopuštajući svaki put da se dodatak isfiltrira, ali ne dozvoljavajući da tlo ispuca ili se osuši. Primijeniti usisavanje samo po potrebi kako bi se osiguralo sporo filtriranje. Odbaciti procjednu vodu, osim u slučaju utvrđivanja sume izmjenjivih katjona (CECsum). Napomena: Izmjenjivi katjoni se mogu odrediti u procjednoj vodi nakon razblaživanja do 250 mL.
- Oprati zemlju sa osam odvojenih dodataka 95% etanola da biste uklonili višak zasićenog rastvora. Dodajte samo toliko da pokrijete površinu tla i ostavite svaki put da se dodatak profiltrira prije dodavanja sljedećeg. Odbacite procjednu vodu i očistite prijemnu bocu.

- Ekstrahirati adsorbirani  $\text{NH}_4^+$  ispiranjem tla sa osam odvojenih dodataka od 25 mL 1 M KCl, ispirajte polako i potpuno kao išto je i gore opisano. Odbacite zemlju i prenesite procijeđeni dio u posudu zapremine 250 mL. Razblažiti do zapremine 250 mL sa dodatnim 1M KCl.
- Odredite koncentraciju  $\text{NH}_4\text{-N}$  u ekstraktu KCl destilacijom odnosno kolorimetrijski. Takođe odredite  $\text{NH}_4\text{-N}$  u originalnom rastvoru za ekstrakciju KCl (prazno) zbog moguće kontaminacije  $\text{NH}_4\text{-N}$  u ovom reagensu.

### **Obračun:**

Kada je  $\text{NH}_4\text{-N}$  izražen u mg N/L:

$$\text{CEC (cmol/kg)} = (\text{NH}_4\text{-N u ekstraktu} - \text{NH}_4\text{-N u originalnom rastvoru}) / 14$$

Kada je  $\text{NH}_4\text{-N}$  izražen u mg  $\text{NH}_4\text{/L}$ :

$$\text{CEC (cmol/kg)} = (\text{NH}_4\text{-N u ekstraktu} - \text{NH}_4\text{-N u originalnom rastvoru}) / 18$$

#### **5.3.4.1.3. Metode za određivanje $\text{CEC}_{\text{sum}}$ - zbrajanjem izmjenjivih kationa u nekom ekstrakcionom sredstvu**

Metode koje se koriste za određivanje  $\text{CEC}_{\text{sum}}$  razlikuju se prema sredstvima koja se koriste za ekstrakciju izmjenjivih kationa i po njima i nose naziv: AA metoda je najraširenija i kao ekstrakcijsko sredstvo koristi amonij acetat (1M  $\text{NH}_4\text{OAc}$ ), metod Mechlich 3 spada u grupu rutinskih testova tla vrlo popularnih u Americi a u okviru kojih se dobijaju i vrijednosti količine izmjenjivih kationa, zatim metoda sa barijevim kloridom ( $\text{BaCl}_2$ ), AL metoda, metoda sa AA EDTA i dr.

Laboratorije za ispitivanje tla često ne pružaju direktnu mjeru efektivnog kapaciteta adsorpcije -  $\text{CEC}_e$ . Umjesto toga, često se CEC procjenjuje ili izračunava kao  $\text{CEC}_{\text{sum}}$ .

**Princip određivanja ovim metodama:** Uzorak zemljišta se ispire nekim ekstrakcionim sredstvom (rastvorom) pri čemu adsorbtivni kompleks zemljišta adsorbuje kation iz rastvora a iz njega se u rastvor istiskuje ekvivalentna količina kationa koji se nazivaju izmjenjivi kationi. Zatim se zemljište sa ekstrakcionim sredstvom filtrira a potom određuje količina izmjenjivih  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  i  $\text{K}^+$  u tom filtratu. Potom se količine izmjenjivih kationa iz filtrata (mg/kg tla) prevode u ekvivalentne vrijednosti (meq/100g tla ili cmol/kg tla) sumiraju i dobivena suma predstavlja  $\text{CEC}_{\text{sum}}$ . Natrijum nije često prisutan u velikim količinama u zemljistima ali ako je prisutan u značajnim količinama, u proračun treba dodati i ekstrahovani  $\text{Na}^+$ . Takođe,

praksa je da ako je pH tla <6, što odražava da mogu biti prisutne značajne količine izmjenjivog  $\text{Al}^{3+}$ , vrijednost izmjenjive kiselosti se dodaje zbiru ekstrahiranih  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  i  $\text{K}^+$  ( $\text{CEC}_{\text{sum}}$ ).

**Napomene:**  $\text{CEC}_{\text{sum}}$  može se koristiti kao razumna i zadovoljavajuća procjena  $\text{CEC}_e$  (efektivni CEC) kada je pH tla 6,0-7,5 a na tlu nije vršena kalcizacija (nije dodavan karbonatni materijal) u posljednjih 6 mjeseci ili nije nedavno dodano gnojivo koje sadrži K, Ca ili Mg,

Pri pH >7,5, značajne količine kalcij karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ) ili drugih slobodnih soli mogu se otopiti u otopini za ekstrakciju, što dovodi do precijenjenih vrijednosti  $\text{CEC}_e$  tla. Dohrman [34] preporučuje za određivanje CEC karbonatnih tala metodu sa srebro-tiureom. Mechlich predlaže metodu sa puferiranim  $\text{BaCl}_2$  koji ima prednosti za određivanje CEC u karbonatnim tlima [62].

**Prednosti  $\text{CEC}_{\text{sum}}$ :** Ne zahtijeva nužno posebnu ekstrakciju ili kvantificiranje kationa ukoliko imate rezultate u okviru rutinskih testova tla (na pr. Mehlich 3 ili Morgan rutinski agronomski testovi tla koji se često koriste u Americi), ili imate AA EDTA ili AL ekstrakt dobiven pri određivanju pristupačnih formi teških metala odnosno pristupačih fosfora i kalija i stoga se može izvesti za veliki broj tala uz manje analitičkih troškova.

**Nedostaci  $\text{CEC}_{\text{sum}}$ :**  $\text{CEC}_{\text{sum}}$  nije direktno mjerjenje  $\text{CEC}_e$  tla, nego je procjena zasnovana na ekstrahiranim Ca, K i Mg i nekoj brzoj mjeri izmjenjive kiselosti. Često, neki rastvori za ekstrakciju kao što su 1M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  i Mehlich 3 imaju veću ionsku snagu i drugačiji pH od onih koji se nalaze u zemljišnom rastvoru. Dakle, direktna mjerena CEC mogu biti bolja jer će biti preciznija, posebno za karbonatna tla i tla na kojima je nedavno izvršena kalcizacija ili su đubrena.

#### **5.3.4.1.3.1. Obračun $\text{CEC}_{\text{sum}}$ zbrajanjem izmjenjivih kationa u nekom ekstrakcionom sredstvu**

Obračun (zbarajanje):

1. Izračunajte  $\text{CEC}_{\text{sum}}$  u meq/100g ili  $\text{cmol}_{\text{c}}\text{kg}^{-1}$ , iz vrijednosti Ca, Mg i K dobijenih nekim ekstrakcionim sredstvom ili rutinskim ispitivanjem tla. Za rezultate u ppm ili  $\text{mg}/\text{dm}^3$ :

$$\text{CEC}_{\text{sum}}(\text{cmol}_{\text{c}}\text{kg}^{-1}) = (\text{ppm Ca}/200) + (\text{ppm Mg}/120) + (\text{ppm K}/390)$$

2. Proračuni u koraku 1 prepostavljaju 100% zasićenost bazama. Međutim, za ispitivana tla sa pH 6 ili nižim, treba uzeti u obzir izmjenjivu kiselost. Najbolje je koristiti neku od vrijednosti izmjenjive kiselosti koja se

tradicionalno koristi u najbližem pedološkom laboratoriju. **U našem slučaju to je izmjenjiva kiselost tj. hidrolitička kiselost (H) određena prema Kappenu (meq/10+0g).** Ova vrijednost se dodaje CEC<sub>sum</sub> iz koraka 1.

*Na primjer: Većina američkih država procjenjuje izmjenjivu kiselost iz regresione jednačine između izmjenjive kiselosti u 1M KCl (Thomas, 1982) i pH pufera koji se koristi za određivanje potreba za kalcizacijom. Na primjer, Maine je eksperimentalno izveo sljedeću jednačinu [134]:*

$$\text{Izmjenjiva kiselost (meq/100g)} = 20,1 - (0,88 \times \text{pH u vodi}) - (2,46 \times \text{pH u Mehlich puferu})$$

Napomene o CEC<sub>sum</sub> metodi: Ako je pH tla >7,5 ili ako je nedavno izvršena kalcizacija tla ili je tlo gnojeno, nemojte koristiti ovu metodu.

#### **5.3.4.1.3.2. AA (amonijum acetat) metode za mjerjenje CEC<sub>sum</sub> pri pH 7**

AA metoda koja koristi amonij acetat kao ekstrakcionalo sredstvo za određivanje CEC<sub>sum</sub> je jedna od najstarijih [140] a zbog brzine izvođenja, pristupačnosti hemikalija, niske cijene, mogućnost analize više uzoraka i **najčešće korištena metoda u svijetu.** Upravo iz razloga čestog korištenja prati je velika baza usporedivih podataka na svjetskom nivou.

#### **AA metoda za mjerjenje CEC<sub>sum</sub> pri pH 7 - (Chapman, 1965) [19]**

Ova metoda je već opisana u prvom dijelu metode određivanja CEC tla gdje se NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ion koristi kao zamjenski „marker“ kation. Međutim u ovom slučaju prvi filtrat sa ispranim izmjenjivim bazama se ne baca nego se u njemu određuju količine izmjenjivih kationa odnosno CEC<sub>sum</sub>.

Reagensi:

- 1M otopina amonijum acetata (NH<sub>4</sub>OAc) za zasićenje uzorka: razrijediti, u digestoru, 57 mL glacijalne octene kiseline (99,5%) sa ~ 800 mL destilirane H<sub>2</sub>O u volumetrijskoj tikvici od 1 L. Dodati 68 mL koncentrovanog NH<sub>4</sub>OH, promiješati i ohladiti. Podesite pH na 7,0 sa NH<sub>4</sub>OH ako je potrebno i razblažite do 1 L.

Postupak [134]:

- Dodati 25,0 g zemlje u Erlenmajerovu tikvicu od 500 mL.
- Dodati 125 mL 1M NH<sub>4</sub>OAc, dobro promučkajte i ostavite da odstoji 16 sati ili preko noći.

- Postaviti Buchnerov lijevak od 5,5 cm sa filter papirom, navlažite papir, primijenite lako usisavanje i prenesite tlo. Ako filtrat nije bistar, ponovo filtrirajte kroz tlo.
- Nježno isprati tlo četiri puta sa 25 mL dodatne NH<sub>4</sub>OAc, dopuštajući svaki put da se dodatak isfiltrira, ali ne dozvoljavajući da tlo ispuca ili se osuši. Primjeniti usisavanje samo po potrebi kako bi se osiguralo sporo filtriranje.
- U procjednoj vodi nakon razblaživanja do 250 mL odrediti količinu izmjenjivih katjona na AAS.
- Obračunati ekvivalentene vrijednosti pojedinih kationa i sumiranjem odrediti C<sub>sum</sub>.
- U slučaju da je zemljište pH u vodi <6 sabrati i izmjenjivu kiselost.

#### **AA metoda za određivanje CEC<sub>sum</sub> pri pH 7 sa amonijum acetatom pri pH 7 - (Jones 2001) [85]**

Koristi se za kisela i slabo alkalna tla. Ekstrahirani kationi nekarbonatnih tala nazivaju se samo izmjenjivi a kod karbonatnih zemljišta izmjenjivi i topivi.

Reagensi:

Amonij-acetat - 1 M CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>: odvagati 77,08 g amonij acetata i prenijeti i posudu od 1000 mL. Dopuniti destilovanom vodom (kond.<0,2 mS/m) do oznake. Podesiti pH na 7 sa NH<sub>4</sub>OH.

Postupak:

- Dodati 10,0 g vazdušno suhe zemlje u bočicu za centrifugu od 100 mL.
- Preliti sa 50 mL 1 M NH<sub>4</sub>OAc, dobro promućkajte i ostavite da odstoji 24 sata, preko noći.
- Centrifugirati 5 minuta na 5000 o/min.
- Postaviti lijevak sa filter papirom u odmjernu tikvicu od 100 mL, i profilirajte supernatant.
- Dodati na preostalo tlo 20 mL dodatne NH<sub>4</sub>OAc, i ponovo centrifugirajte i filtrirajte. Ponovite to još jednom.
- Nakon završenog filtriranja dopunite posudu do oznake od 100 mL.
- Odrediti količinu izmjenjivih kationa u filtratu na AAS (mg/100 g tla)
- Preračunati dobivene količine izmjenjivih kationa u ekvivalentne vrijednosti i sumirati u CEC<sub>sum</sub>( cmol(+) $\text{kg}^{-1}$ )

$$\text{CEC}_{\text{sum}} = (\text{mgCa}/100\text{g}/20) + (\text{mgMg}/100\text{g}/12) + (\text{mgK}/100\text{g}/39) + (\text{mgNa}/100\text{g}/23)$$

- Dodati vrijednost H-hidrolitičke kiselosti po Kappenu za tla sa pH manjom od 6.

Sljedeća modificirana metoda se najčešće koristi i u našim pedološkim laboratorijama modificirana na način da se izostavi centrifugiranje i umjesto toga ostavi preko noći 24 sata da odstoji.

### **Modificirana AA metoda za određivanje CEC<sub>sum</sub> bez centrifugiranja**

U našoj pedološkoj praksi je u upotrebi Modificirana AA metoda (modificirani Jones, 2001.) za određivanje CEC<sub>sum</sub> (bez centrifugiranja):

Postupak:

- Dodati 10,0 g vazdušno suhe zemlje u plastičnu bocu od 100 mL.
- Dodati 50 mL 1 M NH<sub>4</sub>OAc, dobro promučkati i ostaviti da odstoji 24 sata (preko noći);
- Postaviti lijevak sa filter papirom (plava traka) u odmjernu tikvicu od 100 mL i prenijeti tlo. Ako filtrat nije bistar, ponovo filtrirati kroz tlo;
- Nakon završenog filtriranja (bistar filtrat) dopuniti posudu do oznake od 100 mL;
- Priprema kalibracionih rastvora za izmjenjive katione (Ca, Mg, K i Na) i pravljenje kalibracione krive od standardnih otopina za pojedine izmjenjive katione;
- Odrediti količinu izmjenjivih kationa u filtratu na AAS (mg/100 g tla)
- Preračunati dobivene količine izmjenjivih kationa u ekvivalentne vrijednosti i sumirati u CEC<sub>sum</sub>(cmol(+))kg<sup>-1</sup>):

$$\text{CEC}_{\text{sum}} = (\text{mgCa}/100\text{g}/20) + (\text{mgMg}/100\text{g}/12) + (\text{mg K}/100\text{g}/39) + (\text{mgNa}/100\text{g}/23)$$

- Dodati vrijednost H-hidrolitičke kiselosti po Kappenu za tla sa pH manjom od 6.

#### **5.3.4.1.4. Ostale metode za određivanje CEC**

Ostale metode za određivanje CEC razlikuju se prije svega po sastavu ekstrakcijske otopine, ali i po njihovim pH vrijednostima:

- metoda Mehlich 3 (Jones, 2001.); ekstraktanti: amonijev-nitrat, amonijev-fluorid i nitratna kiselina, pH vrijednost 2,5;
- BaCl<sub>2</sub> metoda (ISO 11260:1994+Cor 1: 1996); ekstraktant barijev-klorid, pH vrijednost 8,2;
- AA EDTA (amonij-acetat-etilen-diaminotetra-acetat metoda, Lakänen and Ervio, 1971.); ekstraktanti: amonijev-acetat i octena kiselina, pH vrijednost 4,65;

- AL metoda (amonij-laktat metoda, Egner i sur., 1960.); ekstraktant amonijevlaktat, pH vrijednost 3,75.

U Njemačkoj se kao vrijednost efektivnog CEC<sub>e</sub> (označava se AKe) za kisela tla često koristi metoda sa ekstrahujućim sredstvom NH<sub>4</sub>Cl. Ispiranje adsorbovanih kationa iz uzorka se vrši pomoću 1M NH<sub>4</sub>Cl čija je vrijednost pH = 4,6. Određivanje količine adsorbovanih kationa u filtratu se vrši na atomskom adsorpcionom spektrofotometru. Zbir svih količina adsorbovanih kationa predstavlja efektivni kapacitet adsorpcije (AK<sub>e</sub>) koji u stvari odgovara kapacitetu izmjenivih kationa (CEC<sub>e</sub>) za kisela tla. Vrijednost CEC<sub>e</sub> dobivene sa NH<sub>4</sub>Cl pri stvarnom pH kiselih tala su manje nego vrijednosti CEC dobivene AA metodom pri pH 7 [40].

U nastavku dajemo vrijednosti AKe za neka od naših najzastupljenijih zemljišta.



**Slika 67. Određivanje AKe (CECe), ekstrakciono sredstvo NH<sub>4</sub>Cl (foto: Tvica M.)**

**Tabela 48. AKe (ekstrakciono sredstvo NH<sub>4</sub>Cl pri pH 4,6) i sastav izmjenjivih kationa na Distričnom smeđem tlu (Nišićka visoravan), Pseudogleju (Sprečko polje) i Crvenici (Dubravskva visoravan) sa različitim načinima korištenja tla (izvor: vlastita istraživanja, laboratorija Institut za zemljište i ishranu šuma Goettingen - Njemačka [171])**

Distrično smeđe na pješčarima - Nišićka visoravan											
dubina (cm)	Glina (%)	C (%)	pH		Izmjenjivi kationi (cmol/kg)					Zasićenost bazama (%)	
			H <sub>2</sub> O	KCl	Izmjenjive baze		Izmjenjiva kiselost				
					Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>			
<b>Obradivo tlo - vrt</b>											
0-18	19,2	2,46	4,84	3,91	4,27	1,58	1,22	0,41	7,48	77,5	
18-38	26,4	0,49	4,59	3,57	1,68	1,06	3,95	0,29	6,98	40,0	
38-66	17,2	0,20	4,46	3,61	0,48	0,36	2,30	0,13	3,26	25,0	
<b>Šuma (crnogorica)</b>											
0-10	28,0	2,89	4,38	3,43	2,35	1,12	6,44	0,95	10,87	32,08	
10-20	26,4	1,46	4,56	3,51	1,84	0,95	5,98	0,53	9,31	29,96	
20-48	26,0	0,55	4,63	3,52	1,48	0,74	6,13	0,28	8,64	25,72	
48-90	29,2	0,30	4,60	3,51	1,16	0,68	7,46	0,21	9,51	19,36	
<b>Livada</b>											
0-23	17,2	1,84	4,76	3,63	1,98	0,65	4,15	0,27	7,05	36,60	
23-60	20,4	0,54	4,62	3,57	0,84	0,41	6,11	0,17	7,53	16,56	
60-90	18,4	0,22	4,67	3,52	0,46	0,35	5,56	0,16	6,53	12,43	

Pseudoglej – Sprečko polje											
dubina (cm)	glina (%)	C (%)	pH		Izmjenjivi kationi (cmol/kg)					Zasićenost bazama (%)	
			H <sub>2</sub> O	KCl	Izmjenjive baze		Izmjenjiva kiselost				
					Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>			
<b>Oranica (kalcifikacija)</b>											
0-30	25,6	1,20	4,9	3,7	3,09	0,88	2,13	0,37	6,47	61,26	
30-52	24,8	0,99	4,9	3,6	2,80	1,14	2,29	0,32	6,55	59,62	
52-99	41,6	0,27	5,0	3,3	6,32	4,62	4,10	0,5	15,5	70,35	
<b>Šuma (hrast)</b>											
0-15	20,4	2,49	4,2	3,5	0,41	0,49	4,55	0,63	6,07	14,75	
15-30	18,8	0,98	4,5	3,5	0,74	0,46	3,39	0,32	4,91	24,35	
30-50	24,4	0,29	4,7	3,3	2,77	2,17	3,63	0,30	8,86	54,41	
50-99	39,2	0,25	4,9	3,3	6,45	5,48	3,67	0,46	16,0	74,33	
<b>Livada (kalcifikacija)</b>											
0-30	21,0	1,94	5,2	3,9	3,33	1,33	1,47	0,24	6,38	73,02	
30-50	24,8	0,79	4,8	3,5	1,74	1,13	3,04	0,35	6,26	45,74	
50-99	40,4	0,35	4,8	3,3	4,05	3,29	5,95	0,47	13,7	53,03	

Crvenica - Dubravskva visoravan												
dubina (cm)	glina (%)	C (%)	pH		Izmjenjivi kationi (cmol/kg)				CECe	Zasićenost bazama (%)		
			H <sub>2</sub> O	KCl	Izmjenjive baze		Izmjenjiva kiselost					
					Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>				
<b>Oranica</b>												
0-23	28,0	1,49	5,70	4,30	8,02	1,55	0,30	0,05	9,92	96,42		
23-47	43,2	1,21	6,19	4,68	9,08	1,24	0,02	0,08	10,42	98,95		
47-78	39,6	1,25	6,15	4,72	11,34	1,44	0,00	0,06	12,84	99,55		
<b>Šuma (degradirana)</b>												
0-11	33,2	2,63	5,98	4,63	10,21	2,28	0,13	0,30	12,92	96,64		
11-23	37,6	1,65	5,67	4,20	7,39	1,46	0,79	0,36	10,00	88,44		
23-38	44,0	0,98	5,59	4,13	7,29	1,52	0,90	0,25	9,96	88,46		
38-78	43,6	0,63	5,61	4,07	7,82	1,62	0,86	0,20	10,51	89,87		
<b>Livada</b>												
0-20	39,2	1,66	6,07	4,61	9,20	1,79	0,08	0,14	11,21	98,00		
20-40	46,0	0,82	5,95	4,45	10,08	1,63	0,19	0,11	12,01	97,48		
40-78	56,4	0,63	6,17	4,56	16,57	1,12	0,06	0,05	17,79	99,37		

### **5.3.4.2. Analiza adsorptivnog kompleksa tla po Kappenu**

Ova metoda se tradicionalno koristi na našim prostorima mnogo duže nego AA metoda za CEC. Ona je gotovo sveprisutna u pedološkoj literaturi za razliku od AA metode za CEC koja se počinje masovno koristiti tek odnedavno. U Pedološkoj mapi BiH analiza AKT urađena je upravo po Kappenu. Elementi analize AKT po Kappenu su:

- Hidrolitička kiselost (H)
- Suma adsorbovanih baza (S)
- Totalni kapacitet adsorbcije (T)
- Stepen zasićenosti AKT bazama (V)

#### **5.3.4.2.1. Određivanje hidrolitičke kiselosti po Kapennu (H)**

Ova vrijednost predstavlja jednu od glavnih vrijednosti u okviru analiza Adsorptivnog kompleksa tla s jedne i s druge strane osnov za izračunavanje potrebnih količina za kalcizaciju. Ovako dobivena vrijednost H, kao izmjenjiva kiselost, zbraja se sa izmjenjivim Ca, Mg, K i Na jonima pri obračunu CEC<sub>sum</sub> u kiselim tlima kod kojih je pH manja od 6.

Hidrolitička kiselost je ona kiselost koju čine svi izmjenjivi  $\text{Al}^{3+}$  i  $\text{H}^+$  joni koji se iz adsorptivnog kompleksa tla mogu osloboediti tretiranjem tla otopinom slabih kiselina i jakih baza. Hidrolitička kiselost po Kappenu predstavlja ukupnu izmjenjivu kiselost tla. U tom kontekstu kiselost se dijeli na:

- 1 kiselost zemljишnog rastvora ili aktivnu kiselost i određuje se elektrometrijski kao pH u vodi, i
- 2 kiselost čvrste faze ili potencijalnu (izmjenjivu) kiselost, koja se dalje dijeli na:
  - a) supstitucijsku ili fiziološki aktivnu kiselost koja se određuje elektrometrijski u 1M KCl-u,
  - b) hidrolitičku kiselost po Kappenu ili ukupnu izmjenjivu kiselost, određuje se titrimetrijski u Ca ili Na-acetatu.

#### **Postupak [125]:**

Originalni postupak predviđa odvagu 100 g uzorka i 250 ml Ca acetatata i pipetiranje 125 ml. Zbog uštede mi ćemo odvagati 20 g sitnice, prenijeti u erlenmajer kolbu od 300 ml, preliti sa 50 ml 0,5 M  $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  (0,5 M Ca acetat = 1n Ca acetat = 88 g Ca-acetata u litri vode). Tako pripremljen uzorak se mučka na rotacionoj mučkalici jedan sat, zatim filtrira i od filtrata pipetira 25 ml. Prenesemo filtrat u erlenmajer kolbu zapremine 150 ml, a zatim se titrira sa 0,1 M NaOH (0,1 M NaOH = 0,1n NaOH) radi

neutralizacije nagrađene sirćetne kiseline  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , u prisustvu fenolftaleina do pojave blijedo-ružičaste boje. Očitati ml utrošene 0,1 M NaOH za titraciju.

Pošto se ova titracijska vrijednost odnosi na 25 ml pipetiranog filtrata ili 10 g zemlje (u 50 ml ima 20 g = u 25 ml ima 10 g), a već smo rekli da se ova metoda obračunava na 50 g zemlje mi ćemo našu vrijednost pomnožiti sa 5 da bi smo je preveli na 50 g uzorka. Obrazac za obračunavanje prve titracione vrijednosti je:

$$Y_1 = \text{ml 0,1 M NaOH utrošenih za titraciju } 25 \text{ ml filtrata} \cdot 5$$

Eksperimentalno je utvrđeno da izvjesna količina izmjenjivih  $\text{H}^+$  jona nije mogla da bude istisnuta (zamijenjena) jednokratnim tretiranjem uzorka sa 0,5 M Ca – acetatom. Zbog toga bi trebalo neistisnute  $\text{H}^+$  jone iz adsorbtivnog kompleksa tla na neki način naknadno zamijeniti. U tom slučaju bi trebalo ostatak uzorka na filter papiru ponovo vratiti u kolbu, preliti sa Ca- acetatom, mučkati, titrirati, znači ponavljati postupak sve dok ne istisnemo sve izmjenjive  $\text{H}^+$  jone. Pri tome bi hidrolitička kiselost bila jednaka zbiru dobijenih titracionih vrijednosti. To se obično ne provodi, jer je eksperimentalno dokazano da se množenjem prve titracione vrijednosti sa koeficijentom 3,25 za kisela, odnosno 1,5 kod manje kiselih tala, dolazi do približnih vrijednosti hidrolitičke kiselosti.

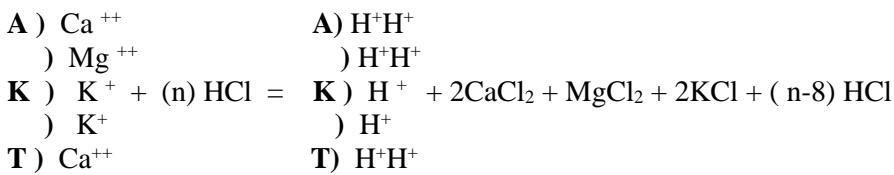
Hidrolitička kiselost se obilježava slovom H i izražava se u  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  zemlje ili

$$H = \frac{Y_1 \cdot 20 \cdot 3,25 (1,5)}{10 \cdot 10} (\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1})$$

Prvu titracionu vrijednost  $Y_1$  množimo sa 20 da bi se prevelo na 1kg tla. Zatim tu vrijednost dijelimo sa 10 radi prevođenja u 1M rastvor, i još sa 10 radi prevođenja mmol u cmol.

#### **5.3.4.2.2. Određivanje sume adsorbovanih baznih katjona u beskarbonatnom tlu - metoda Kappena-a**

**Princip:** Sumu adsorbovanih baznih katjona **beskarbonatnih tala** čine izmjenljivi bazni kationi ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  i  $\text{Na}^+$ ) adsorbovani na površini koloidnih čestica tla. Pošto adsorbcija na površini koloidnih čestica ima jonoizmjenjivački karakter (mogućnost zamjene) princip određivanja sastoji se u zamjeni baznih kationa sa adsorbtivnog kompleksa tla sa  $\text{H}^+$  jonima iz  $\text{HCl}$ -a.



Neutrošenom količinom HCl, čiju količinu dokazujemo neutralizacijom sa NaOH, indirektno dobijemo podatak o količini HCl koja je utrošena na izmjenu baznih kationa. Time se dobije podatak o sumi adsorbovanih baznih katjona.

#### Pribor:

- precizna tehnička vaga
- erlenmajer kolba 30 ml
- pipete 50 i 25 ml
- rotaciona mućkalica
- uređaj za filtriranje
- erlenmajer kolba 200 ml
- uređaj za titriranje

#### Rastvori:

- 0,1 M (0,1 n) HCl
- 1 % fenolftalein
- 0,1 M (0,1 n) NaOH

**Postupak** [125, 158, 88]: Odmjeri se 5 g uzorka tla, prenese u erlenmajer kolbu i prelije se sa 50 ml 0,1 M HCl. Tako pripremljen uzorak mućka se na rotacionoj mućkalici oko 1 h, zatim filtrira i isipetira 25 ml filtrata. Isipetiran filtrat prenosi se u erlenmajer kolbu, doda se 1 % fenolftalein i titrira sa 0,1M NaOH do pojave bijedo ružičaste boje. Titracijom je izvršena neutralizacija preostale HCl u filtratu, te očitamo utrošenu količinu 0,1 M NaOH.

Obračun se vrši tako da se od 25 ml filtrata oduzme količina u ml 0,1 M NaOH utrošena na neutralizaciju viška 0,1 M HCl. Dobijena razlika predstavlja količinu u ml HCl utrošene za supstituciju baza iz 2,5 g uzorka ( 5g uzorka : 50 ml = 2,5 g : 25 ml filtrata).

Pošto se količina ml 0,1 M HCl utrošena za izmjenu baznih kationa odnosi na 2,5 g uzorka, množenjem sa 400 podatak se prevodi na 1kg uzorka. Dijeljenjem sa deset (10) 0,1M rastvor NaOH utrošen na titraciju prevodi se u molarni, čime se dobija mogućnost da se konačan rezultat prikaže u obliku milimola a dijeljenjem još sa 10 prevodimo u centimole

### **Obračun:**

Ispipetirana količina filtrata koja sadrži višak HCl, (a) = 25 (ml)  
faktor normaliteta 0,1 M HCl = 1,0023; A = 25 · 1,0023 (ml)

Količina 0,1 n NaOH utrošenog na titraciju, (b) ml  
faktor normaliteta 0,1 M NaOH = 0,9984; B = b · 0,9984 (ml)

Količina 0,1 M HCl utrošene za supstituciju baza iz 2,5 g tla = A - B (ml).

Obračun sume adsorbovanih baza vrši se po formuli:

$$S = \frac{(A - B) \cdot 400}{10 \cdot 10} \text{ (cmol}_c \text{ kg}^{-1}\text{)}$$

gdje su:

400- za preračunavanje 2,5 g u 1kg zemlje

10 - za preračunavanje 0,1 M NaOH u molaran rastvor

10 – za preračunavanje u cmol

#### **5.3.4.2.3. Obračun totalnog kapaciteta adsorbcije – T [125, 158, 88]:**

Totalni kapacitet adsorbcije - T prema Kappenu predstavlja ukupan kapacitet adsorbtivnog kompleksa koji se teoretski može ispuniti bazama. Totalni kapacitet adsorbcije T tako predstavlja sumu ukupno adsorbovanih baznih kationa S i ukupno adsorbovanih H<sup>+</sup> jona H (hidrolitička kiselost po Kapennu) i izražava se u cmol kg<sup>-1</sup> tla.

$$T = S + H \text{ (cmol}_c \text{ kg}^{-1}\text{)}$$

Ukoliko bi govorili u terminima koji se koriste kod Kapaciteta izmjenjivih kationa ili CEC, adsorbtivni kompleks tla je zasićen dijelom izmjenjivim bazama (K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>), a dijelom tzv. izmjenjivom kiselosti. U izmjenjivu kiselost ulaze Al<sup>3+</sup>, H<sup>+</sup>, Mn<sup>2+</sup> i Fe<sup>3+</sup> ioni, vezani za AKT i koji predstavljaju izvor potencijalne kiselosti tla.

Da li će u tlu biti više izmjenjivih baza ili ukupno adsorbovanih baznih kationa (K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>) u odnosu na izmjenjivu kiselost ili hidrolitičku kiselost (Al<sup>3+</sup>, H<sup>+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>) zavisi od stadija razvoja tla (sa vremenom više ekvivalenta kiselosti), matičnog supstrata (kisele ili bazne stijene), količine padavina i dreniranosti tla (ispiranje baza), reljefa, vrste humusa itd.

#### **5.3.4.2.4. Obračun stepena zasićenosti bazama – V**

Već je navedeno da je totalni kapacitet adsorbcije ispunjen dijelom izmjenjivim bazama ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ) ili sumom adsorbovanih baza po Kappenu (S) a dijelom izmjenjivim ekvivalentima kiselosti ( $Al^{3+}$ ,  $H^+$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ) ili hidrolitičkom kiselošću (H) po Kappenu.

Stepen zasićenosti bazama predstavlja udio sumom adsorbovanih baznih kationa u odnosu na totalni kapacitet adsorbcije i izražava se u %. Možemo reći da je to korisno popunjeno prostor adsorptivnog kompleksa tla.

$$V = \frac{S}{T} \cdot 100 (\%)$$

Za tla koja imaju stepen zasićenosti bazama manji od 50 % kažemo da su distrična ili slabo zasićena bazama. Takva tla imaju veliku potencijalnu kiselost, a za ona zemljišta čiji je kapacitet zasićenosti bazama veći od 50 % kažemo da su eutrična ili zasićena bazama.

#### **5.3.5. KALCIZACIJA S HUMIZACIJOM**

**Puferna sposobnost zemljišta** predstavlja sposobnost zemljišta da neutrališe nagle promjene pH reakcije zemljišta i na taj način izbjegne štetno dejstvo (stres) na biljke. Za mogućnost neutralizacije promjena u pravcu naglog povećanja ili u pravcu smanjenja pH vrijednosti zaslužno je nekoliko mehanizama koje prepoznajemo u tlu.

Prvi mehanizam proizilazi iz osobina adsorptivnog kompleksa zemljišta. U slučaju povećanja koncentracije  $H^+$  jona u rastvoru tla i povećanja kiselosti zemljišta adsorptivni kompleks zemljišta (kapacitet izmjenjivih kationa) može adsorbovati jedan dio  $H^+$  jona ili izvršiti supstituciju (izmjenu) s nekim od katjona, i tako smanjiti nagli pad pH vrijednosti. S druge strane u slučaju povećanja koncentracije  $OH^-$  jona u otopini zemljišta adsorptivni kompleks reagira desorbacijom  $H^+$  jona koji mogu izvršiti neutralizaciju  $OH^-$  jona.

Poznavanje karakteristika adsorpcijskog kompleksa je značajno kod đubrenja kiselim đubrивima koji u nedostatku pufernog dejstva zemljišta naglo povećaju kiselost otopine što može imati štetne posljedice. Na ovo posebno treba obratiti pažnju kod lakih (pjeskovitih) zemljišta, gdje uslijed malog kapaciteta adsorptivnog kompleksa, moguća je značajna promjena vrijednosti pH pri đubrenju ili prskanju zaštitnim sredstvima.

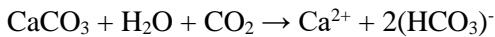
Nadalje, u alkalnoj sredini amfolitoidni koloidi hidroksidi Fe i hidroksidi Al imaju negativno naelektrisanje što znači da mogu neutralisati nagli skok pH vrijednosti, tako što sa površine ovih koloidnih čestica disosuje  $H^+$  ion (jezgro  $AlO_3^{3-}$ ,  $FeO_3^{3-}$ ) koji neutrališe  $OH^-$  ion. Amfolitoidni koloidi u uslovima kisele sredine imaju pozitivno naelektrisanje što znači da sa površine koloidne čestice disosuju  $OH^-$  joni (jezgro  $Al(OH)_2^+$ ,  $Fe(OH)_2^{2+}$ ) koji mogu neutralizirati eventualne nagle povećanje koncentracije  $H^+$  jona.

Puferno dejstvo u zemljištu ima ugljična kiselina ( $H_2CO_3$ ) kao slaba kiselina i njene soli (u karbonatnim zemljištima prisustvo kalcita -  $CaCO_3$ ). Rastvor zasićen  $CO_2$ , pri pritisku koji odgovara njegovom parcijalnom pritisku u atmosferi ima pH 5,2 dok rastvor  $Ca(HCO_3)_2$  u vodi ima pH oko 8.

**Kalcizacija sa humizacijom** je pedomeliorativna mjera dodavanja kreča ( $CaO$ ) ili mljevenog kalcijum karbonata ( $CaCO_3$ ) kiselima zemljištima u cilju neutralizacije pH vrijednosti i popravljanja fizičkih, hemijskih i bioloških osobina zemljišta.

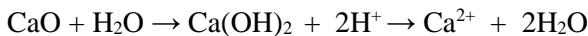
Radi što efikasnije kalcizacije odnosno lakše topivosti i preporučuje se korištenje što usitnjenijeg (finijeg) krečnog ili karbonatnog materijala. Takav materijal se treba aplicirati na tlo u uslovima bez vjetra.

Takođe, pošto je rastvorljivost  $CaCO_3$  u vodi veća u prisustvu  $CO_2$ , ova pedomeliorativna mjera se izvodi zajedno sa humizacijom odnosno zajedno sa dodavanjem organske materije tlu (stajnjak). Naime, mikrobiološka mineralizacija organske materije oslobađa  $CO_2$  koji se nakuplja u porama tla a zajedno sa pornom vodom pospješuje rastvorljivost kalcita ( $CaCO_3$ ) u  $Ca$ -bikarbonat:



Rastvoren  $CaCO_3$  vrši neutralizaciju kiselih tala i tako povisuje pH vrijednost kiselih tala. U kiselim tlima, u čijem adsorptivnom kompleksu dominira izmjenjiva kiselost tj.  $Al^{3+}$  i  $H^+$  joni, dodavanjem mljevenog karbonatnog materijala ( $CaCO_3$ ) dolazi do izmjene ili supstitucije adsorbovanih  $Al^{3+}$  i  $H^+$  iona sa  $Ca^{2+}$  ionom.

Neutralizacija kiselog zemljišnog rastvora pripisuje se različitim mehanizmima uzrokovanim kalcizacijom:



Brojna su poboljšanja tla izazvana kalcifikacijom sa humizacijom:

$\text{Ca}^{2+}$  ioni poznati kao dobri koagulatori, intenziviraće agregaciju i popraviće i strukturu ovakvih tala.  $\text{Mg}^{2+}$  ioni zbog jake hidratacije imaju nešto slabije koagulacijsko dejstvo.

Povišenjem pH reakcije vrši se mobilizacija fosfora iz netopivih Fe-fosfata.

Ca je i sam biogeni element koji je važno biljno hranivo.

Neutralizacija pH kod kiselih tala povoljno utiče i na mikrobiološku populaciju i njihovu aktivnost.

Smatra se da kalcizaciju treba primijeniti već kod zasićenosti tla bazama od 90 % i hidrolitičkoj kiselosti ( $\text{H}$ ) od  $3,9 \text{ cmol}_\text{c} \text{ kg}^{-1}$ .

Za određivanje potreba kreča ili karbonatnog materijala za kalcifikaciju koristi se više različitih metoda. Mi ćemo se na ovom mjestu upoznati sa tri:

- na osnovu vrijednosti pH po Schachtschabelu (pH u Ca-acetatu)
- na osnovu  $\text{Y}_1$  kod postupka određivanja vrijednosti H adsorptivnog kompleksa tla po Kapennu
- na osnovu vrijednosti H pri određivanju hidrolitičke kiselosti po Kapennu

#### **5.3.5.1. Određivanje potrebne doze za kalcifikaciju**

##### **Određivanje ukupne kiselosti po Schachtschabelu (pH u Ca-acetatu)**

Potrebne doze za kalcizaciju mogu se izračunati po Schachtschabelu na bazi mjerena pH vrijednosti u suspenziji tla sa  $0,5 \text{ M } \text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (kalcijev acetat).

Vrijednost ukupne kiselosti može se izračunati po Schachtschabelu na bazi elektrometrijskog mjerena pH vrijednosti u suspenziji tla sa  $0,5\text{M } \text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (kalcijev acetat ili natrijev acetat). Za pripremu 1n rastvora Ca-acetata uzmememo 88 g u litri vode što odgovara  $0,5 \text{ M}$  rastvoru.

##### **Postupak [125, 158, 88]:**

Određivanje pH vrijednosti vrši se elektrometrijski, tako da se 10 g sitnice prelije sa 25 ml  $0,5\text{M}$  kalcijevog acetata (pH 7,2 – 7,6), uz povremeno ručno mučkanje. Rastvor se ostavi do sutradan kada se u suspenziji određuje pH vrijednost pomoću pH metra, uz upotrebu staklene elektrode.

Na osnovu ovako dobijene pH vrijednosti, očitaju se potrebne količine  $\text{CaCO}_3$  odnosno kreča ( $\text{CaO}$ ) da se postigne neutralna reakcija (pH 7,00). Količine kreča se očitaju iz sljedeće tabele.

**Tabele 49. Potrebne količine CaO za kalcifikaciju na osnovu pH u Ca – acetatu [125]:**

1 pH u Ca acetatu	2 CaO (t/ha)	1 pH u Ca acetatu	2 CaO (t/ha)
7	0,3	6,35	4,0
6,90	0,6	6,30	4,5
6,85	0,9	6,25	5,0
6,80	1,2	6,20	5,5
6,75	1,4	6,15	6,2
6,7	1,7	6,10	7,0
6,65	2,0	6,05	7,8
6,60	2,3	6,00	9,0
6,55	2,6	5,95	10,3
6,50	2,9	5,90	12,0
6,45	3,2	5,85	14,3
6,40	3,6	5,80	19,0

Potrebne količine za kalcijum karbonatom ( $\text{CaCO}_3$ ) preračunavaju se množenjem CaO t/ha sa koeficijentom 1,786 .

$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = \text{CaO} \text{ (t/ha)} \cdot 1,786$$

### **Obračun potrebnih količina za kalcizaciju na osnovu vrijednosti $Y_1$**

Proračun potrebnih količina za kalcifikaciju može se vršiti na bazi vrijednosti  $Y_1$  mjerene u okviru H (Hidrolitička kiselost). Potrebnu količinu za kalcifikaciju dobijemo ako vrijednost  $Y_1$  pomnožimo sa faktorom 4,5 za  $\text{CaCO}_3$  ili 2,52 za CaO.

$$\text{potrebna količina } \text{CaCO}_3 = Y_1 \cdot 4,5 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ dt/ha} : 10 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ t/ha } \text{CaCO}_3$$

$$\text{potrebna količina } \text{CaO} = Y_1 \cdot 2,52 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ dt/ha} : 10 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ t/ha } \text{CaO}$$

## **Obračun potrebnih količina za kalcifikaciju na osnovu vrijednosti H [125,158, 88]:**

Proračun potrebnih količina za kalcifikaciju može se vršiti i na osnovu vrijednosti hirdrolitičke kiselosti po Kapennu H izražene u cmol kg<sup>-1</sup>.

1cmol vodika ima masu od 0,01 gram jer 1mol H ima masu 1g.

Za neutralizaciju 0,01 g H je potrebno 0,5 g CaCO<sub>3</sub>, odnosno za svakih 1cmol H/kg tla potrebno je dodati 0,5 g CaCO<sub>3</sub> po kilogramu tla..

Ako je za neutralizaciju 1 cmol H kg<sup>-1</sup> potrebno 0,5 g CaCO<sub>3</sub>/1kg tla, znači da je u našem slučaju za izračunatu vrijednost H potrebno:

$$X = H \text{ (cmol kg}^{-1}\text{)} \cdot 0,5 \text{ (g)} ,$$

Površina od 1 ha (10.000 m<sup>2</sup>), pri prosječnoj zapreminskoj gustini Vsg = 1,5 g/cm<sup>3</sup> = 1,5 t/m<sup>3</sup>, do dubine od 20 cm ima težinu u kilogramima:

$$10.000 \text{ m}^2 \cdot 0,20 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ t/m}^3 = 3.000 \text{ t} = 3.000.000 \text{ kg}$$

Ako 1kg ispitivianog tla za neutralizaciju treba X g CaCO<sub>3</sub>, onda 3.000.000 kg treba x g CaCO<sub>3</sub>

$$x = \frac{X \cdot 3.000.000}{1} = \text{_____ g/ha} : 1.000.000 = \text{_____ t/ha}$$

U sljedećoj tabeli vidi se razlika u pH vrijednosti, CEC i kompoziciji izmjenjivih kationa (zasićenosti bazama) na Pseudogleju (Stagnic Albeluvisol) na diluvijalnim glinama, praškasta tekstura, Sprečko polje kraj Tuzle, i to između prirodnog šumskog tla gdje nije izvršena kacizacija i u obližnjoj livadi i njivi gdje izvršena kalcifikacija.

Vidi se u tabeli 50, kako je nakon kalcifikacije u površinskom sloju pseudogleja evidentna veća pH u H<sub>2</sub>O u njivi sa pH=4,9 i u livadskom tlu pH=5,2 u odnosu na pH=4,2 u šumskom tlu gdje nije vršena kalcifikacija.

Razlika između šumskog ekosistema s jedne strane i agroekosistema njive i livade nakon kalcifikacije je takođe vidljiva i u manjem sadržaju izmjenjivog Al<sup>3+</sup> u njivi i livadi sa 2,13 i 1,47 cmol/kg u odnosu na 4,55 cmol/kg u šumi.

Sadržaj izmjenjivog  $\text{Ca}^{2+}$  nakon provedene kalcizacije na njivi i livadi iznosi 3,09 i 3,33 cmol/kg i veći je nego u prirodnog ekosistemu šume gdje nije izvršena kalcizacija i iznosi samo 0,41 cmol/kg.

**Tabela 50. Razlika u pH vrijednosti, CEC i kompoziciji izmjenjivih kationa na Pseudogleju između prirodnog šumskog tla gdje nije izvršena kacizacija i u obližnjim agroekosistemima livadi i njivi gdje izvršena kalcifizacija(vlastita istraživanja [125])**

dubina (cm)	glina (%)	C (%)	pH		Izmjenjivi kationi (cmol/kg)					Zasićenost bazama (%)	
			H <sub>2</sub> O	KCl	Izmjenjive baze		Izmjenjiva kiselost		CEC		
					Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>			
<b>Šuma prirodni ekosistem</b>											
0-15	20,4	2,49	<b>4,2</b>	<b>3,5</b>	<b>0,41</b>	0,49	<b>4,55</b>	0,63	6,07	<b>14,75</b>	
15-30	18,8	0,98	4,5	3,5	0,74	0,46	3,39	0,32	4,91	24,35	
30-50	24,4	0,29	4,7	3,3	2,77	2,17	3,63	0,30	8,86	54,41	
50-99	39,2	0,25	4,9	3,3	6,45	5,48	3,67	0,46	16,0	74,33	
<b>Njiva poslije kalcizacije</b>											
0-30	25,6	1,20	<b>4,9</b>	<b>3,7</b>	<b>3,09</b>	0,88	<b>2,13</b>	0,37	6,47	<b>61,26</b>	
30-52	24,8	0,99	4,9	3,6	2,80	1,14	2,29	0,32	6,55	59,62	
52-99	41,6	0,27	5,0	3,3	6,32	4,62	4,10	0,5	15,5	70,35	
<b>Livada poslije kalcizacije</b>											
0-30	21,0	1,94	<b>5,2</b>	<b>3,9</b>	<b>3,33</b>	1,33	<b>1,47</b>	0,24	6,38	<b>73,02</b>	
30-50	24,8	0,79	4,8	3,5	1,74	1,13	3,04	0,35	6,26	45,74	
50-99	40,4	0,35	4,8	3,3	4,05	3,29	5,95	0,47	13,7	53,03	

### **5.3.6. ODREĐIVANJE SADRŽAJA LAKOPRISTUPAČNIH FORMI KALIJA I FOSFORA U TLU – AL metoda**

AL metoda je tradicionalno najzastupljenija metoda za određivanje pristupačnih formi fosfora i kalija kod nas.  $\text{K}_2\text{O}$  i  $\text{P}_2\text{O}_5$  se ispiru iz zemljišta AL rastvorom (ekstrakciono sredstvo), a količina biljci pristupačnog kalija u filtratu se određuje plamenofotometrijski dok se pristupačni fosfor određuje spektrofotometrijski a kao bojeni reagens koristi se amonij molibdat.

**Ekstrakcija lakopristupačnog kalija ( $\text{K}_2\text{O}$ ) i fosfora ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) [125, 158]:**

Reagensi:

- Osnovni standardni rastvor: kalij-dihidrogen fosfat ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) i kalij-hlorid
- Radni standardni rastvor
- Serija standardnih rastvora
- Koncentrovani AL- rastvor
- Mlijecna kiselina (p.a. čistoće 80 %,  $\rho = 1,20 \text{ kg/l}$ ,  $\text{Mr}=90,08 \text{ g/mol}$ ),  $c(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) = 1\text{mol/dm}^3$
- Amonij-acetat (p.a. čistoće 98 % ),  $c(\text{CH}_3\text{COONH}_4) = 1\text{mol/dm}^3$
- Sirćetna kiselina (p.a. čistoće 96 %,  $\rho = 1,06 \text{ kg/l}$  ),  $c(\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2) = 4 \text{ mol/dm}^3$
- Ekstrakcioni AL-rastvor:
- Koncentrovani AL-rastvor se razblaži 10 puta tj. 100 mL koncentrovanog AL-rastvora razblažiti do 1000 ml sa destilovanom vodom.
- Destilovana voda, sa specifičnom konduktivnosti ne većom od 0,2 mS/m na 25 °C i pH vrijednosti većoj od 5,6 (ocjena 2 vode prema BAS EN ISO 3696:2008).

#### Pribor i oprema:

- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| - Plamen-fotometar, JENWAY PFP7 | - Sušnica                               |
| - UV-VIS Spektrofotometar       | - Analitička vaga, sa tačnosti od 10 mg |
| - Mućkalica                     | - Posudica za vaganje                   |
| - Polietilenske boce, 250 mL    | - Kašika                                |
| - Erlenmayer tikvice od 100 mL  | - Menzura od 100 mL                     |
| - Stakleni lijevak              | - Štopericica                           |
| - Filter papir, plava traka     | - Odmjerne tikvice od 100 mL            |

#### **Priprema ekstrakcionog AL rastvora:**

*Koncentrovani AL rastvor:* Priprema: Odmjeriti 469 mL mlijecne kiseline te razblažiti sa 1000 mL destilovane vode i hidrolizirati u sušnici na 95 °C u trajanju 48 sati. Ovako ohlađenu mlijecnu kiselinu treba pomiješati sa 861 mL 96 % sirćetne kiseline i 385,00 g amonij-acetata. Poslije rastvaranja amonij-acetata odmjernu posudu nadopuniti do 5000 mL.

*Ekstrakcioni AL-rastvor:* Priprema: 100 mL koncentrovanog AL-rastvora razblažiti do 1000 mL destilovanom vodom. Koncentracija ekstrakcionog rastvora iznosi 0,1 mol/dm<sup>3</sup> amonij-laktata, 0,4 mol/dm<sup>3</sup> etanske kiseline i pH vrijednost 3,7.

#### **Priprema serije standardnog rastvora:**

*Osnovni standardni rastvor:* Priprema: Odvagati 1,9170 grama kalij-dihidrogen fosfata  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  i 0,534 g kalij-hlorida (KCl), prethodno osušenih

na 105 °C i rastvoriti u odmjernoj tikvici od 1000 mL sa ekstrakcionim AL-rastvorom, te dopuniti do marke. Dobiveni standardni rastvor odgovara koncentraciji od 1mg/mL P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> i 1 mg/mL K<sub>2</sub>O. Ovakvi rastvori su jako postojani i čuvaju se u plastičnim bocama.

*Radni standardni rastvor:* Priprema: Radni standardni rastvor se pravi od osnovnog standardnog rastvora, tako što se razblaži 10 puta. Na pr. 100 mL osnovnog standardnog rastvora treba razblažiti ekstrakcionim AL rastvorom u odmjernu tikvicu od 1000 mL. Dobiveni radni rastvor odgovara koncentraciji od 0,1 mg/mL K<sub>2</sub>O i 0,1mg/mL P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

*Serija standardnih rastvora:* Priprema: Serija standardnih rastvora za očitanje pravi se u odmjernim tikvicama od 100 mL prema sljedećoj tabeli.

**Tabela 51. Pravljenje serije standarda za K<sub>2</sub>O i P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> [125, 158]:**

1	Broj odmjernih tikvica od 100 mL	1	2	3	4	5	6	7	
2	mL dodanog <i>radnog standardnog rastvora</i> (0,1 mg/mL K <sub>2</sub> O i P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0	1	2	4	8	16	32	
3	<i>Ekstrakcioni AL-rastvor, mL</i>	Sve tikvice dopuniti do marke							
4	mg K <sub>2</sub> O i P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / 100 g tla	slijepa	2	4	8	16	32	64	

### **Postupak ekstrakcije K<sub>2</sub>O i P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> iz analiziranog uzorka**

Odvagati 5,00 grama zrako suhog tla prethodno prosijanog kroz sito od 2 mm u polietilensku bocu za mućkanje. U bocu dodati 100 mL ekstracionog AL-rastvora i dobro zatvoriti. Boce postaviti na rotacionu mućkalicu i mućkati 2 sata. Nakon mućkanja ekstrakt profiltirati kroz gusti filter papir (plava traka) u Erlenmayer tikvice od 100 mL. Prve kapi filtrata prosuti tako da sa njima operemo unutrašnje zidove Erlenmayer tikvice. Ukoliko je filtrat zamućen dodati malo aktivnog uglja za obezbojenje i ponovo filtrirati.

### **Određivanje sadržaja lakopristupačnog kalija (K<sub>2</sub>O)**

Ovako pripremljen filtrat služi za određivanje lako pristupačnog kalija direktnim očitanjem na plamenofotometru.

Na plamenofotometru se prvo očita serija standarda i napravi standardna kriva.

**Izrada baždarne krive i obračun:** Na ordinatu se nanesu poznate koncentracije serije standarda, a na apscisu dobivene ekstinkcije (očitanja sa plamenofotometra) za pojedine standarde.

Analizirani uzorci se takođe očitaju na plamenofotometru a pomoću dobivene standardne krive se odredi sadržaj kalija u analiziranom uzorku.

Novije serije plamenofotometra nakon očitanja serije standarda poznatih koncentracija daju odmah vrijednost sadržaja pristupačnog kalija u uzorku.

### **Određivanje sadržaja lakopristupačnog fosfora ( $P_2O_5$ )**

#### **Reagensi:**

- Sulfatna kiselina (p.a. čistoće 96%,  $\rho=1,84\text{ g/mL}$ ),  $c(H_2SO_4)=4\text{ mol/dm}^3$ . U odmjernu tikvicu od 1000 mL dodati oko 500 mL destilovane vode i 222 mL koncentrovane sulfatne kiseline ( $H_2SO_4$ ). Kiselinu pažljivo dodavati i poslije hlađenja odmjerku dopuniti destilovanom vodom do marke.
- Amonij-molibdat ( $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \times 4H_2O$ , p.a. čistoće 99%), koncen. 1,44 %. Rastvoriti 14,4 grama  $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \times 4H_2O$  u 400 mL vruće destilovane vode i prenijeti u odmjernu tikvicu od 1000 mL i poslije hlađenja dopuniti sa destilovanom vodom do marke.
- Askorbinska kiselina ( $C_6H_8O_6$  p.a. čistoće 99,7 %), koncentracije 2,5 %. Rastvoriti 2,5 grama  $C_6H_8O_6$  sa destilovanom vodom u odmjernu tikvicu od 100 mL i dopuniti do marke. Rastvor pripremiti pred samu upotrebu.

#### **Postupak određivanja[125, 158]:**

Iz svake odmjerne tikvice: slijeye probe, serije standardnih rastvora poznatih koncentracija i filtrata analiziranog uzorka, treba odpipetirati 25 ml i prebaciti u odmjerne tikvice od 100 ml. U svaku tikvicu sa alikvotom dodati 9 ml 4 mol/dm<sup>3</sup> sulfatne kiseline i malo dodati desilovane vode, te staviti u sušnicu na 90 °C u trajanju od 30 minuta. Nakon vađenja iz sušnice u sve odmjerne tikvice sa serijom standarda, uzorcima i slijepom probom treba dodati 10 mL 1,44 % amonij molibdata i 2 mL 2,5 % askorbinske kiseline te destilovanom vodom tikvice dopuniti do oko 80 mL (ne do marke). Obavezno tikvice malo promućkati pa ih ponovo staviti u sušnicu na 90 °C u trajanju od 90 minuta. Tikvice ostaviti da se ohlade, dopuniti destilovanom vodom do marke i promućkati. Fosfor u reakciji sa amonij-molibdatom obrazuje plavu boju.

Na spektrofotometru na talasnoj dužini 830 nm očitati apsorbancije slijeye probe i serije standardnih rastvora, a zatim uzoraka.

**Izrada standardne krive i obračun:** Na ordinatu se nanesu poznate koncentracije serije standarda izražene u mg/100g tla, a na apscisu dobivene apsorbancije (očitanja na spektrofotometru) za pojedine standarde.

Unosom očitanja sa spektrofotometra analiziranog uzorku na apscisu pomoću dobivene standardne krive se očita sadržaj (koncentracije)  $P_2O_5$  na ordinati.

### 5.3.7. OKSIDOREDUKCIIONI POTENCIJAL TLA

Kiseonik igra ključnu ulogu u regulisanju disanja kako korijena tako i mikroorganizama tla, te generalno u dinamici biohemijskih procesa u tlu, između ostalih i procesu mikrobiološke razgradnje organske materije. Međutim, u zemljištima mokrih staništa - *wetlandima* ili hidromorfnim tlima, kada je tlo izloženo pretjeranom vlaženju ili poplavljeno, razmjena  $O_2$  između čvrste, tečne i gasovite faze je ograničena. U takvim uslovima rastvoreni  $O_2$  prisutan u vodi tla koja se nalazi u porama ubrzano se konzumira tokom aerobnog disanja korijena i mikroorganizama i približava nuli u roku od samo nekoliko sati. Kako korijenje uvijek treba  $O_2$  naročito u zoni meristemskog tkiva, prilagodba biljaka anaerobnim uslovima izazvanim zasićenosti soluma tla vodom, manifestuje se transportom kiseonika od nadzemnog dijela biljke do korjenovog vrha specijalnim tkivom tzv. aerenhimom. Takav je način prilagođavanja prisutan kod močvarne vegetacije (trska) ili kod mangrovog drveća ali i kod uzgoja riže u naplavljenim poljima.

Ovdje je značajno naglasiti da se proces mikrobiološke razgradnje organskih ostataka u okolnostima promjenljivih hidroloških uslova u wetlandima, hidromorfnim zemljištima i pseudogleju kontinuirano odvijaju i u aerobnim i u anaerobnim uslovima.

Različiti tipovi *mikroorganizama* objedinjuju *oksidaciju organskog materijala* sa *redukcijom krajnjih akceptora elektrona* radi stvaranja energije (ATP) potrebne za rast tih mikroorganizama. Takve procese nazivamo **redoks procesi**. Vidimo da su za odvijanje *redoks procesa* u tlu potrebni:

1. *mikroorganizmi*,
2. *organski materijal i*
3. *krajnji akceptori elektrona.*

Generalno, sve reakcije oksidacije organske materije i redukcije krajnjih akceptora elektrona temelje se na prijelazu elektrona jedne hemijske vrste (atomi, molekule, ioni) u drugu. Do prijelaza elektrona dolazi zato što jedan atom s relativno velikim elektronskim afinitetom može oduzeti elektron nekom drugom, s manjim elektronskim afinitetom.

Prema tome, oksidacija se može definirati kao gubitak elektrona, ali i otpuštanje vodika i vezanje kisika. Redukcija je proces suprotan oksidaciji, tj. obuhvaća sve one procese u kojima dolazi do primanja elektrona, primanja vodika i otpuštanja kisika.

Nedavni razvoj mikrobiologije okoliša otkrio je da bakterije formiraju biofilmove gotovo sveprisutno u vodenim i koloidnim sredinama, kao što su prirodne vode, zemljišta i ljudsko tijelo. Stoga, razumijevanje uloge mikroba u kontroli redoks procesa u tlu zahtijeva uvažavanje takvih „narasnina unutra matriksa tla koja se prianjuju na biološke i nebiološke površine“ [73].

Vidimo da organska materija predstavlja najvažnijeg donatora elektrona u tlu koji se oslobađaju njenom mineralizacijom, dok su najuobičajeniji krajnji akceptori elektrona koje nalazimo u vlažnim staništima:  $O_2$  u aerobnim uslovima, te u anaerobnim uslovima uslijed zasićenosti vodom,  $NO_3^-$ ,  $Mn(IV)$ ,  $Fe(III)$ ,  $SO_4^{2-}$ , i  $CO_2$ .

Uopšte uzevši, u uslovima zasićenja tla vodom, kakvi vladaju u vlažnim staništima, dolazi do smanjenja prisustva  $O_2$  u tlu i smanjene mineralizacije organske materije. Okoliš sa malo raspoloživog kiseonika, kakav je slučaj sa vlažnim staništima inhibira aktivnost aerobnih mikroorganizama i stimuliše aktivnost fakultativnih i obligacionih anaerobnih mikroorganizama, baš kao što favorizuje rast hidrofilne vegetacije. Aerobna mineralizacija organske materije tla je oko tri puta brža nego mineralizacija u anaerobnim uslovima.

U takvim uslovima, alternativni krajnji akceptori elektrona koji nastaju pri razgradnji (oksidaciji) organske materije su nitratni ioni u rastvoru  $NO_3^-$ ,  $Mn^{4+}$  u obliku oksida  $MnO_2$ ,  $Fe^{3+}$  u obliku oksida  $Fe_2O_3$ , oksi hidroksida  $FeOOH$  i hidroksida  $Fe(OH)_3$ , te sulfatni ion iz rastvora  $SO_4^{2-}$ . Znači, uslijed nedostatka  $O_2$  pobrojana jedinjenja se ponašaju kao oksidaciona sredstva.

U vlažnim staništima, depoziti svježih biljnih ostataka i detritus algi uobičajeno završavaju na površini. Većina (70% -80%) njihove razgradnje odvija se radom *aerobnih* gljivica i bakterija. Takođe i uski pojas oko površine korijena može biti mjesto aerobne mikrobiološke razgradnje. Nasuprot nedzemnim biljnim ostacima, ostaci biljnog korijena kao i biomasa algi koji se nalaze pohranjeni u dubini vlažnih staništa, podvrgnuti su *anaerobnoj razgradnji*, pri čemu mikroorganizmi moraju koristiti alternativne akceptore elektrona pri mineralizaciji organske tvari a ne  $O_2$  kao je što slučaj pri aerobnoj mineralizaciji. Sporije stope anaerobnih procesa razgradnje u odnosu na aerobne djelom objašnjavaju zašto se u vlažnim staništima i močvarama nakuplja više organske materije nego u drugim ekosistemima (na pr. stvaranje naslaga treseta) i zašto predstavljaju mjesto sekvestracije (pohranjivanja) C. Međutim, kad se vlažna staništa isuše, povećane stope aerobne mikrobiološke razgradnje rezultiraju povećanom

emisijom CO<sub>2</sub>, pa močvare od mjesta pohranjivanja postaju izvor emisije CO<sub>2</sub> u atmosferu [33].

### ***Određivanje i vrijednosti redoks potencijala***

Hemija zemljišta vlažnih staništa je pod jakim uticajem procesa hemijske redukcije koja je uobičajena pojava u uslovima zasićenja tla vodom. Analogno pH vrijednosti koja mjeri aktivnost protona (H<sup>+</sup>), redoks potencijal Eh predstavlja mjeru aktivnosti elektrona (e<sup>-</sup>) u zemljištu. Redoks potencijal se definiše kao sklonost para hemijskih jedinjenja da učestvuju u prijenosu elektrona. Zemljišni rastvor sadrži veliki broj redoks parova.

Ovisno o koncentraciji oksidacijskih ili redukcijskih sredstava i zemljište sa svojom otopinom pokazuje određeni potencijal koji se mjeri u mV ili u rH vrijednostima.

U elektrometrijskom mjerenu sposobnosti zemljišta da izvrši reakcije oksidacije ili redukcije koriste se redoks elektrode (mjerna elektroda i referentna ili standardna elektroda) čija razlika u potencijalu je direktno proporcionalna sa stepenom oksidujućih ili redukujućih reakcija. Redoks potencijal je elektrodni potencijal. Elektrodni potencijal E je napon elektrode koji se može mjeriti nasuprot referentne elektrode sa poznatim potencijalom, tj. sa poznatim elektrohemiskim stanjem. Kao osjetljive mjerne elektrode koriste se redoks elektrode od zlata ili platine konstruirane na principu oksidacijsko-redukcijske izmjene, dok se kao referentna elektroda koristi zasićena kalomel elektroda umjesto standardne vodikove elektrode čiji je potencijal dogovorno jednak nuli. Elektrode se uranjaju u rastvor koji sadrži katione, anione ili molekule dvaju različitih stepena oksidacije, te posreduju pri reverzibilnom (povratnom) prijelazu elektrona s jednog oksidacijskog stupnja u drugi [12]. Pojedinačni potencijal nije mjerljiv, već samo razlika između dva različita pojedinačna potencijala, tj. razlika potencijala. Razlika između potencijala redoks elektrode i referentne elektrode mjeri oksidoreduktionski potenciometar i dobijenu vrednost (Eh) prikazuje na displeju u mV.

Umjesto redoks potencijala (Eh) izraženog u mV može se koristiti i pojam rH vrijednosti koji je uveo Clark, a koji predstavlja mjeru za oksidacijsku odnosno redukcijsku sposobnost hemijskog sistema [70].

Ako kao referentnu elektrodu koristimo zasićenu kalomel elektrodu, jednadžba će pri 20°C biti sljedećeg oblika:

$$rH = 0,0343 Eh + 2pH$$

gdje je: Eh = očitani elektrodni potencijal na aparaturi

**Mjerenja na terenu** su posebno osjetljiva. U našoj zemlji su profesori Resulović i Bisić-Hajro [124] pratili dinamiku redoks potencijala u primarnom pseudogleju na području Tuzle. Poznato je da se tip tla pseudoglej razvija u uslovima smjene suhe (oksidacijski uslovi u tlu) i vlažne faze (reduksijski uslovi u tlu). Koristili su svijetle platinaste elektrode kao mjerne i zasićene kalomel elektrode kao referentne. Platinaste elektrode su postavljali na željene dubine najčešće utiskivanjem o vertikalni zid iskopanog profila (25 cm dalje od vanjskog zida profila) a potom zemljiste pažljivo vraćali istim redoslijedom. Očitanja su vršena na terenskom potenciometru.

Izdvojili su tri faze definisane redoks potencijalom u mV: oksidaciona faza sa Eh >400 mV; prelazna faza sa Eh = 300-400 mV i redukciona faza sa <300 mV. U njihovom istraživanju osciliranja vrijednosti redoks potencijala (Eh) kretale su se u sljedećim dijapazonima:

- za dubinu do 10 cm – 780 mV
- za dubinu do 27 cm – 835 mV
- za dubinu do 60 cm – 360 mV
- za dubinu do 95 cm – 266 mV.

Vidimo da su najveće oscilacije bile u sloju na dubini od 27 cm zbog intenzivnih kolebanja vlažnosti. U ovom sloju su zabilježene i najniže negativne vrijednosti Eh do -165 mV ali i najviše pozitivne 670 mV. Vrijednosti Eh u ovom sloju karakteristične za oksidacijsku fazu tokom mjerenja zabilježene su u 32% a za redukcionu fazu u 68% slučajeva. U površinskom sloju oksidaciona faza je zabilježena u 67% slučaja. U nepropusnom sloju oksidaciona faza je zabilježena u 80% slučaja.

### **Vrijednost redoks potencijala**

Eh u tlima vlažnih staništa najčešće varira od +700 do -300 mV ili + 0,7 do -0,3 V. Pri promjeni aerobnih (oksidacionih) u anaerobne (redukcione) uslove u tlu Eh vrijednost redoks potencijal opada. U nastajanju nižih potencijala uglavnom učestvuju *anaerobni* mikroorganizmi.

*Visoki redoks potencijali* su u dobro aerisanom tlu, sa mnogo rastvorenog kiseonika u vodi, velikim sadržajem oksidovanih jedinjenja (okсида Fe i Mn, nitrata i sulfata), tj u tlu bez stagnirajuće donje i gornje vode i sa malim sadržajem lako razložive organske materije tla.

Pozitivne vrijednosti reprezentuju manju elektronsku aktivnost i aerobno ili umjereno anaerobno stanje tipično za tla vlažnih staništa u prelaznoj zoni. U tim uslovima imamo veći potencijal za prenos (transfer) elektrona, uslijed

većeg prisustva akceptora elektrona/oksidanata kakvi su kiseonik, nitrati i oksidacione forme Fe i Mn.

*Niski redoks potencijali* su u tlu siromašnom kiseonikom, sa visokim sadržajem redukovanih jedinjenja ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{S}^{2-}$ ) i visokim sadržajem lako razložive organske materije, tj u tlima sa gornjom ili donjom vodom (močvarna tla, tresetna tla, pseudogleji, neki fluvisoli). Biljci više pogoduju oksidacioni uslovi. Izuzetak je riža kojoj odgovaraju niske vrijednosti redoks potencijala.

Negativne vrijednosti predstavljaju veliku aktivnost elektrona i intenzivno anaerobno stanje tipično za permanentno stanje zasićenosti vodom. U takvima uslovima potencijal za transfer elektrona između donatora i akceptora elektrona je mali uslijed nedostatka akceptora/oksidanta kakav je kiseonik.

**Tabela 52. Vrijednosti redoks potencijala Eh (V) u tlu za različite redoks reakcije (eksperimentalno ispitano)** [136]:

Redoks reakcije	Redokspotencijal Eh (V)
Početak redukcije $\text{NO}_3^-$	+0,55.. +0,45.
Početak gradnje $\text{Mn}^{2+}$	+0,45... +0,35
Nije više potvrđeno prisustvo $\text{O}_2$	+0,33
Početak gradnje $\text{Fe}^{2+}$	+0,15
Početak redukcije $\text{SO}_4^{2-}$ i gradnja sulfida	- 0,05
Početak gradnje $\text{CH}_4$	-0,12
Nije više potvrđeno prisustvo $\text{SO}_4^{2-}$	-0,18

## LITERATURA

1. Aleksandrović, D., 1984. Agrogeologija, Poljoprivredni fakultet – Zemun, skripta, Univerzitet u Beogradu
2. Baldock, J.A. and Nelson, P.N., 2000. Handbook of Soil Science, part Soil Organic matter, editor-in-chief M.E. Sumner, Boca Raron London New York Washington DC, 2000
3. Baver, L., 1940. Soil physics. John Wiley & Sons, London, U.K.
- 3a. Belić M., Nešić Lj. i Ćirić V., 2014., Praktikum iz pedologije . - Novi Sad : Poljoprivredni fakultet, 2014
4. Berli, M., Carminati, A., Ghezzehei, T.A. and Or, D., 2008. Evolution of unsaturated hydraulic conductivity of aggregated soils due to compressive forces. Water Resour. Res. 44:W00C09.
5. Blonquist, J.M., Jr., Jones, S.B. and Robinson, D.A., 2005a. Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors: Part 2. Evaluation of seven sensing systems. Vadose Zone J. 4:1059–1069.
6. Blonquist, J.M., Jr., Jones, S.B. and Robinson, D.A., 2005b. A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics. J. Hydrol. 314:235–245.
7. Blonquist, J.M., Jr., Jones, S.B., Lebron, I. and Robinson, D.A., 2006. Microstructural and phase configurational effects determining water content: Dielectric relationships of aggregated porous media. Water Resour. Res. 42:WO5424. doi:10.1029/2005WR004418.
8. Bouwer, H., 1986. Intake rate: cylinder infiltrometer. In: methods of soil analysis, part I. Physiscal and mineralogical methods. Agronomy Monograph no. 9 (2nd ed.). Am. Soc. of Agronomy, Soil Sc. Soc. of America.
9. Bowden, J.W., Bolland, M.D.A., Posner, A.M. and Quirk J.P., 1973. Generalized model for anion and cation adsorption at oxide surfaces, Nature London 245:81-82
10. Bradfield, R., 1936. The value and limitations of calcium in soil structure. Am. Soil Surv. Assoc. Bull. 17:31–32
11. Brady, N.C. and Weil, R. R., 2017. The nature and properties of soils, Pearson education limited, UK,
12. Brdička, R., 1969. Osnove fizikalne kemije, Školska knjiga, Zagreb.(1969).
13. Bruce, J. P., Frome, M., Haites, E., Janzen, H., Lal, R. and Paustian, K., 1998. Carbon Sequestration in Soils - Workshop, Soil and Water Conservation Society, Calgary-Alberta,1988, 6-7
14. Buurman, P., 1997. Laser grain-size determination in soil genetic studies. 1. Practical problems Soil Science (1997)

15. Carminati, A., Kaestner, A., Fluhler, H., Lehmann, P., Or, D., Lehmann, E. and Stampanoni. M., 2007a. Hydraulic contacts controlling water flow across porous grains. *Phys. Rev. E* 76:026311.
16. Carminati, A., Kaestner, A., Ippisch, O., Koliji, A., Lehmann, P., Hassanein, R., Vontobel, P., Lehmann, E., Laloui, L., Vulliet, L. and Fluhler. H., 2007b. Water flow between soil aggregates. *Trans. Porous Media* 68:219–236.
17. Carminati, A., Kaestner, A., Lehmann, P. and Fluhler, H., 2008. Unsaturated water flow across soil aggregate contacts. *Adv. Water Resour.* 31:1221–1232
18. Centeno, A., Baeza P., Ramón Lissarrague P., 2010. relationship between soil and plant water status in wine grapes under various water deficit regimes, Departamento de Producció́n Vegetal, Spain, 20(3)
19. Chapman, H.D., 1965. Cation-exchange capacity. In: C.A. Black (ed.). *Methods of soil*
20. Chatzistathis, T., Papaioannou, B.; Gasparatos, D.; Molassiotis, A., 2017. From which soil metal fractions Fe, Mn, Zn and Cu are taken up by olive trees (*Olea europaea* L., cv. ‘ChondroliaChalkidikis’) in organic groves? *J. Environ. Manag.* 2017, 203, 489–499. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]].
21. Christensen, B. T., 1996. Carbon in Primary and Secondary Organomineral Complexes,” In: M. R. Carter and B. A. Stewart, Eds., *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*, CRC Press, Inc., Boca, Raton, 1996, pp. 97-165.
22. Clough, A., and Skjemstad. J.O., 2000. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate. *Aust. J. Soil Res.* 38:1005–1016.
23. Cooper, L.R., Haverland, R.L., Hendricks, D.M., and Knisel, W.G., 1984. Microtrac particle-size analyzer: An alternative particle-size determination method for sediment and soils. *Soil Sci.* 138:138–146
24. Čustović, H., Ljuša M. i Tvica M., 2004. Primjena GIS-a u upravljanju zemljištem, XV privredna manifestacija: Dani jagodastog voća (zbornik radova), Čelić
25. Čustović, H., Kovačević, Z. i Tvica, M., 2013. Ruralna ekologija, PPF u suradnji sa TEMPUS WBREN – 15877, Univerzitetsko izdanje, ISBN 978-9958-597-33-6, 2013
26. Ćirić, M., 1991. Pedologija, III Izdanje, “Svetlost”, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Sarajevo 1991,
27. Dalal, R.C., Hallsworth, E.G., 1976. Evaluation of the parameters of soil phosphorus availability factors in predicting yield response and

- phosphorus uptake. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1976, 40, 541–546. [Google Scholar] [CrossRef]
28. Davis, P.F. and Dexter, A.R., 1972. Two methods for quantitative description of soil particle shape. *J. Soil Sci.* 23:448–455
  29. Dexter, A.R., 1987a. Compression of soil around roots. *Plant Soil* 97:401–406.
  30. Dexter, A.R., 1987b. Mechanics of root-growth. *Plant Soil* 98:303–312.
  31. Dexter, A.R., 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil Till. Res.* 11:199–238.
  32. DIN 19682-7, 1997. Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Felduntersuchungen - Teil 7: Bestimmung der Infiltrationsrate mit dem Doppelzylinder-Infiltrometer.
  33. Doran, J. W., Kettler, T., Liebig, M., and Tsivou, M., 1997. Solvita soil test evaluation, USDA-ARS, University of Nebraska, Lincoln, November 1997.
  34. Dorhman, R., 2006,. Problems in CEC determination of calcerous clayey sediments using the ammonium acetate method. *Journal of Plant nutrition and soil Science*, 169: 330-334
  35. Dugalić, G. J. i Gajić, B. A., 2005. Pedologija praktikum. Agronomski fakultet, Čačak, 173
  36. Durner, W., 1994. Hydraulic conductivity estimation for soil with heterogeneous pore structure. *Water Resour. Res.* 30:211–223.
  37. Đukanović M., 1996,. Životna sredina i održivi razvoj, Elit, Beograd, 1996
  38. Edwards, C.A., and Bohlen. P.J., 1996. Biology and ecology of earthworms. Chapman & Hall, London, U.K
  39. Edwards, A.P. and Bremner, J.M., 1967. Microaggregates in soil *J. Soil Sci.* (1967)
  40. Efron, D., Jimenez, M.P., and De La Hora, A.M., 2000. Soil pH cation exchange capacity for acid soils; Method of measurement, *Agrochimica*, 44 (1-2): 61-68
  41. Elliott, E.T., and Coleman, D.C., 1988. Let the soil work for us. *Ecol. Bull. Natl. Speleol. Soc.* 39:23–32
  42. El-Swaify, S.A., and Emerson. W.W. 1975. Changes in physical properties of soil clays due to precipitated aluminum and iron hydroxides. I. Swelling and aggregate stability after drying. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 39:1056–1063.
  - 42.a Estefan G., Sommer R., and Ryan J., 2013, Methods of Soil, Plant, and Water Analysis: ICARDA International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA) Box 114/5055, Beirut, Lebanon.

43. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1976, Soil Resources Development and Conservation Service Land and Water Development Division A framework for land evaluation. This book is published as: FAO Soils Bulletin No. 32 ILRI Publication No. 22, 1976, p. 11.
44. Fontana, M.;, Bélanger, G., Hirte, J.;, Ziadi, N., Elfouki, S., Bragazza, L., Liebisch, F. and Sinaj, S., 2021. Critical plant phosphorus for winter wheat assessed from long-term field experiments. *Eur. J. Agron.* 2021, 126, 126–263. [Google Scholar] [CrossRef]
45. Ford, G. R., 2012. Chemisorption and Precipitation Reactions, Soil Chemistry: Handbook of soil sciences 17.-1
46. Frenkel, H., Fey, M.V. and Levy, G.J. 1992. Organic and inorganic anion effects on reference and soil clay critical flocculation concentration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1762–1766.
47. Gardner, W.R. 1991. Soil science as a basic science. *Soil Sci.* 151:2–6
48. Generalić, E., 2022. Dielektrična konstanta, Englesko-hrvatski kemijski rječnik & glosar. 29 June 2022. KTF-Split. 19 Sep. 2022. <<https://glossary.periodni.com>>.
49. Gillman, G.P., 1979. A proposed method for the measurement of exchange properties of highly weathered soils. *Aust. J. Soil. Res.* 17:129-139.
50. Gillman, G.P. and Sumpter, E.A., 1986. Modification to the compulsive exchange method for measuring exchange characteristics of soils. *Aust. J. Soil Res.* 24:61-66.
51. Gillman, G.P. and Sumpter, E.A., 1986. Modification to the compulsive exchange method for measuring exchange characteristics of soils. *Aust. J. Soil Res.* 24:61-66.
52. Golchin, A., Baldock, J. A., Clarke, P., Higashi, T. and Oades, J. M., 1997. The effects of vegetation and burning on the chemical composition of soil organic matter of a volcanic ash soil as shown by  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy. II. Density fractions, Received 2 July 1996; accepted 28 November 1996. ; Available online 5 June 1998, [science@direct](mailto:science@direct)
53. Golchin, A., Baldock, J. A., Clarke, P., Higashi, T. and Oades, J. M., 1997. The effects of vegetation and burning on the chemical composition of soil organic matter of a volcanic ash soil as shown by  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy. II. Density fractions, Received 2 July 1996; accepted 28 November 1996. ; Available online 5 June 1998, [science@direct](mailto:science@direct)
54. Gračanin M., 1946. Pedologija, I dio Geneza tla, Poljoprivredno nakladni zavod, Zagreb 1946

55. Gračanin M., 1947. Pedologija, II dio Fiziografija tala, Poljoprivredno nakladni zavod, Zagreb 1947,
56. Greacen, E.L., Correll, R.L., Cunningham, R.B., Johns, G.G. and Nicolls, K.D., 1981. Calibration, p. 50–81. In E.L. Greacen (ed.) Soil water assessment by the neutron method. CSIRO, Melbourne, Australia
57. Green, W.H. & Ampt, G.A., 1911. Studies in soil physics, part I. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4.
58. Gregorich, E.G. and Janzen, H.H., 2000. Soil biology and Biochemistry - Decomposition), Handbook of Soil Science, editor-in-chief M.E. SUMNER, Boca Raron London New York Washington DC, 2000
59. Gregory, P., 2006. Roots, rhizosphere and soil: The route to a better understanding of soil science? *Eur. J. Soil Sci.* 57:2–12.
60. Guerin, M., and Seaman, J.C. 2004. Characterizing clay mineral suspensions using acoustic and electroacoustic spectroscopy: A review. *Clays Clay Miner.* 52:145–157
61. Hallett, P.D., and Newson, T.A., 2001. A simple fracture mechanics approach for assessing ductile crack growth in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1083–1088.
62. Hanna, W. J., Reed, J., Fielding, A., 1948. A comparison of ammonium acetate and buffered barium chloride methods for determining cation-exchange properties of limed soils, *Soil Science*, 66 (6); 447-458
63. Hassink, J., 1997. The Capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles, *Plant and Soil* 191, 77-87, 1997
64. Hassink, J., Whitmore, A. P. and Kubat J., 1997. Size and density fractionation of soil organic matter and the physical capacity of soils to protect organic matter, *European Journal of Agronomy*, Volume 7, Issues 1-3, sept.1997, 189-199
65. Haverkort A. J., 2006. Management of nitrogen and water in potato production. Wageningen academic publishers
66. Heil, D., and G. Sposito., 1993a. Organic-matter role in illitic soil colloids flocculation I. Counter ions and pH. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1241–1246.
67. Heil, D., and Sposito G., 1993b. Organic-matter role in illitic soil colloids flocculation. 2. Surface-charge. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1246–1253.
68. Heil, D., and Sposito, G., 1995. Organic-matter role in illitic soil colloids flocculation. 3. Scanning force microscopy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:266–269.

69. Hendershot, W.H. and Duquette, M., 1986. A simple barium chloride method for determining cation exchange capacity and exchangeable cations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:605-608.
70. Hewitt, L. F., 1950. Oxidation-reduction potentials in bacteriology and biochemistry, 6 ed. Edinburgh E. & S. Livingstone Ltd
71. Heywood, H., 1947. Symposium on particle size analysis. *Trans. Inst. Chem. Eng.* 22:214.
72. Hillel, D., 1998. Environmental soil physics. Academic Press, San Diego, CA.
73. Huang, P. M. (Deceased) and Hardie, A.G., 2012. Role of Abiotic Catalysis in the Transformation of Organics, Metals, Metalloids, and Other Inorganics Huang, Soil Chemistry, Second Edition Handbook of Soil Sciences: 18.-2 Second Edition© 2012 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business
74. Huang, P. M., Li Y. and Sumner, M. E., 2012. (Edited by) Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes, Second Edition Handbook of Soil Sciences: Resource Management and Environmental Impacts, Second Edition© 2012 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business
75. Huat, B.B.K., 2004. Organic and peat soils engineering. Universiti Putra Malaysia Press, Serdang, Malaysia. 146 pp.
76. Hurley, J. 1970. Sizing particles with a Coulter counter. *Biophys. J.* 10:7679.
77. IAEA, 1970. Neutron moisture gauges. Technical Report Series No. 112. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
78. IAEA, 2008. Field estimation of soil water content: A practical guide to methods, instrumentation and sensor technology. Training Course Series No. 30. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria
79. ILRI, 1974. Drainage principles and applications, vol. III: Surveys and investigations.
80. IPCC, 2001. Climate change 2001. The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
81. IUSS Working Group WRB. 2022. The World Reference Base for Soil Resources (WRB), International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4<sup>th</sup> edition. International Union of Soil Sciences (IUSS) Viena, Austria.
82. JDPZ, 1967. Metodika terenskog ispitivanja zemljišta i izrade pedoloških karata, Priručnik, Beograd.(1967)

83. Jenny, H., 1948; Great soil groups in the equatorial regions of Colombia, South America. *Soil Sci.* 1948, 66, 5. [Google Scholar] [CrossRef]
84. Jensen, E., and Hansen, H.M., 1961. An elutriator for particle-size fractionation in the sub-sieve range. *Soil Sci.* 92:94–99.
85. Jones, J.B., 2001. Laboratory Guide for Conducting Soil Test and Plant analysis. Boca Raton, London, New York, Wasginton D.C., CRC Press, 79 – 932001
86. Jones, J.B., 2001. Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis. Boca Raton, London, New York, Washington D.C., CRC Press, 79-93
87. Kämpf, N.R, Scheinost, C. A., and Schulze G. D., 2012. Oxide Minerals in Soils, Soil mineralogy, Handbook of soil science, 22.-1
88. Korunović, R. i Stojanović, S., 1989. Praktikum Pedologije, Poljoprivredni fakultet, Beograd 1989.
89. Kuipers, S.F., 1951. Principles of fertilization. In Nederlandse LandenTuinbouwbibliotheek; Wolters: Groningen, The Netherlands, 1951. (In Dutch) [Google Scholar]
90. Lal, R. and Kimble, J. M., 1997. Conservation tillage for carbon sequestration, Cluwer Academic Publishers, Nutrient Cycling in Agroecosystems 49: 243-253, 1997
91. Lal, R., 2001. Testimony about Concernig Soil Carbon Sequestration to reduce Net Gaseous Emissions, to Committe on Enviroment and Public Works, 2 May 2001, 4
92. Lal, R., Kimble, J. M. and Follett, R.F., 1998. Managing U.S. Cropland to sequester C in soil, The Ohio State U. Congresional Briefing report, july 1998
93. Lambot, S., Antoine, M., Vanclooster, M. and Slob, E.C., 2006. Effect of soil roughness on the inversion of off-ground monostatic GPR signal for noninvasive quantification of soil properties. *Water Resour. Res.* 42: W03403.
94. Lazarević, B. i Poljak, M., 2019. Fiziologija bilja. Sveučilšte u Zagrebu Agronomski fakultet, Zagreb
95. Magdoff, F.R. and Bartlett, R.J., 1985. Soil pH buffering revisited. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:145-148.
96. Mehlich, A. 1938. Use of triethanolamine acetate-barium hydroxide buffer for the determination of some base exchange properties and lime requirement of soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29:374-378.
97. Mesić, H., Čidić, A., Kisić, I., Husnjak, S., Mesić, M., Husnjak, S., Bašić, F., Romić, D., Zgorelec, Ž.: 2006. Priručnik za trajno motrenje tala Hrvatske. 1. izd.: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:442998>. str.26-28::

98. Metson, A.J. (1956) Methods of chemical analysis for soil survey samples. New Zealand Soil Bureau Bulletin) No. 12
99. Milivoj, B., Ljiljana, N. i Vladimir, Ć., 2014. Praktikum iz pedologije, Poljoprivredni fakultet - Novi Sad 2014.
100. Mitscherlich, E.A., 1913. Pedologija za poljoprivrednike, šumare i vrtlare, Poljoprivredni fakultet Sarajevo, kataloški broj 288
101. Moody, P.W., Aitken, R.L., Compton, B.L. and Hunt, S., 1988. Soil phosphorus parameters affecting phosphorus availability to, and fertilizer requirements of, maize (*Zea mays*). Aust. J. Soil Res. 1988, 26, 611–622. [Google Scholar] [CrossRef]
102. Moran, M.S., Peters-Lidard, C.D., Watts, J.M. and McElroy, S., 2004. Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models. Can. J. Remote Sens. 30:805–826
103. Munsell Soil Color Charts, 1994. prerađena verzija, engl. revised edition
104. Najdanović. N.J., 1967, Mehanika tla , Građevinska knjiga Beograd
105. Njoku, E.G., and Entekhabi, D., 1996. Passive microwave remote sensing of soil moisture. J. Hydrol. 184:101–129
106. Oades, J.M., 1984. Soil organic-matter and structural stability—Mechanisms and implications for management. Plant Soil 76:319–337.
107. Oades, J.M., 1986. Associations of colloidal materials in soils, p. 660–674. Proc. 13th Congr., Int. Soil Sci. Soc. Vol. 6. Hamburg, Germany.
108. Oades, J.M. and Waters, A.G., 1991. Aggregate hierarchy in soils. Australian Journal of Soil Research, 29, 815-828.
109. Oades, J.M. and Waters, A.G., 1991. Aggregate hierarchy in soils. Aust. J. Soil Res. 29:815–828.
110. Oades, J.M., Gillman, G.P. and Uehara. G., 1989. Interactions of soil organic matter and variable-charge clays, p. 69–95. In D.C. Coleman et al. (eds.) Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. Hawaii Press, Honolulu, HI.
111. Or. D., Wraith, J.M., Robinson, D.A. and Jones, S. B., 2012. Soil Water Content and Water Potential Relationships; Property and Proces, Handbook of soil science, Second Edition© 2012 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business
112. Orsini, L. and Remy, J.C., 1976. Utilisation du chlorure de cobaltihexammine pour la détermination simultanée de la capacité d'échange et des bases échangeables des sols. Bulletin de l'AFES Science du Sol, 4, 269-275)

113. Osman, K.T., 2013. Physical Properties of Soil. Soils. In Soils; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2013. [Google Scholar] [CrossRef].
114. Pamić, J., 1987. Osnovi petrografije, II dopunjeno izdanje, Univerzitetski udžbenik, Sarajevo 1987, str.127
115. Park, E., Sul, W.J. and Smucker. A.J.M., 2007. Glucose additions to aggregates subjected to drying/wetting cycles promote carbon sequestration and aggregate stability. *Soil Biol. Biochem.* 39:2758–2768.
116. Park, E.J., and Smucker. A.J.M., 2005a. Erosive strengths of concentric regions within soil macroaggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1912–1921.
117. Park, E.J., and Smucker. A.J.M., 2005b. Saturated hydraulic conductivity and porosity within macroaggregates modified by tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:38–45.
118. Pejković, M., 1985. Fizika zemljišta, Praktikum skripta, Poljoprivredni fakultet, Beograd
119. Pennel, K.D., 2002. Specific surface area, p. 308–313. In J.H. Dane and G.C. Topp (eds.) Methods of soil analysis. Part 4. SSSA Book Series No. 5. ASA, Madison, WI.
120. Perković I., Pernar N. i Bakšić D., 2013. Usporedba dvije metode prosijavanja i sedimentacije za određivanje granulometrijskog sastava tla – mogućnost i ograničenja interpretacije, Šumarski list, 11-12: 567-574)
121. Pernar, N., Bakšić, D. i Perković, I., 2013. Terenska i laboratorijska istraživanja tla priručnik za uzorkovanje i analizu. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 192.).
122. Prasad, J. and Power J.F., 1997. Soil fertility management for sustainable agriculture, 1997 by CRC Press LLC Reference
123. Reid, J.B. and Goss. M.J., 1982. Interactions between soil drying due to plant water-use and decreases in aggregate stability caused by maize roots. *J. Soil Sci.* 33:47–53
124. Resulović, H. i Bisić-Hajro, Dž., 1972. Dinamika redoks potencijala u pseudogleju, Zemljište i biljka, Vol. 21 N0. 1, 1972, str.69-76)
125. Resulović, H., Jovandić P. i Bisić-Hajro Dž., 1982. Mali pedološki priručnik, Poljoprivredni fakultet UNSA, Sarajevo 1982.
126. Resulović, H. i Čustović. H., 2002, Pedologija, Nacionalna i univerzitetski biblioteka BiH, Sarajevo
127. Resulović, H., Čustović, H. i Čengić, I., 2008. Sistematika tla/zemljišta, Nacionalna i univerzitetska biblioteka BiH, Sarajevo

128. Rhoades, J.D. 1982. Cation exchange capacity. In: A.L. Page (ed.) Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties (2nd ed.) Agronomy 9:149-157.
129. Ristić P. i Pamić J., 1981. Petrografija i petrologija magmatskih stijena, Svetlost Sarajevo, 28 str.
130. Robinson, D.A., and Friedman, S.P., 2001. Effect of particle size distribution on the effective dielectric permittivity of saturated granular media. Water Resour. Res. 37:33–40.
131. Robinson, D.A., Campbell, C.S., Hopmans, J.W., Hornbuckle, B.K., Jones, S.B., Knight, R., Ogden, F., Selker, J. and Wendoroth, O., 2008. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed scale observatories: A review. Vadose Zone J. 7:358–389.
132. Rochette, P., Gregorich, E. G. and Desjardins R. L., 1992. Comparison of static and dynamic closed chambers for measurement of soil respiration under field conditions Canadian Journal of Soil Science, November 1992
133. Rosenberg, N. J. and Izaurrealde, R.C., 2000. Storing Carbon in Agricultural Soils to Help Mitigate Global Warming, Council for Agricultural Science and Technology, Iowa, USA, April 2000
134. Ross, D. S. and Ketterings, Q., 2011. Recommended Methods for Determining Soil Cation Exchange Capacity, Last Revised 5/2011), chapter 9, Cooperative Bulletin No. 493, Pages 75-85.
135. Rouse, J.H., White, S .T. and Ferguson. G.S., 2004. A method for imaging single clay platelets by scanning electron microscopy. Scanning 26:131–134.
136. Scheffer, F., and Schachtschabel, P., 2002. Lehrbuch der Bodenkunde. 15st edition. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. 2002
137. Schlesinger W. H. and Andrews J.A.. 1999. Soil Respiration and The Global Carbon Cycle, Biogeochemistry 48: 7-20, 2000.
138. Schmidt, M.W.I.; Rumpel, C. and Kögel-Knabner, I., 2020. Evaluation of an ultrasonic dispersion procedure to isolate primary organomineral complexes from soils. Eur. J. Soil Sci. 2020, 50, 87–94. [Google Scholar] [CrossRef]
139. Schofield, R. K., 1935. Trans. Third Int. Ccmgr. Soil Sci. 2, 37.
140. Schollenberger, C.J. and Simon, R.H., 1945. Determination of exchange capacity and exchangeable bases in soil-ammonium acetate method. Soil Science, 59 (1): 13-24)
141. Schwertmann U., 1985. The Effect of Pedogenic Environments on Iron Oxides Minerals. In: Advances in Soil Science, Vol. 1, Springer-Verlag, New York, Inc.

142. Serbin, G., and Or, D., 2004. Ground-penetrating radar measurement of soil water content dynamics using a suspended horn antenna. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 42:1695–1705
143. Six, J., 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.* 79:7–31
144. Six, J., Callewaert, P., Lenders, S., De Gryze, S., Morris, S.J., Gregorich, E. G., Paul, E.A, and Paustian, K., 2002a. Division S-7 – Forest and range soils; Measuring and Understanding Carbon Storage in Afforested Soils by physical Fractionation, Published in *Soil Sci. Soc. Am J.* 66:1981-1987 (2002)
145. Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A. and Paustian, K., 2002b. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils, *Kluwer Academic Publishers, Plant and Soil* 241: 155-176
146. Six, J., Elliott, E.T. and Paustian, K., 2000. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am J.* 64:1042–1049
147. Skopp, M. J., 2012. Physical Properties of Primary Particles 1-2, *Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes*, Second Edition; CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton London New York
148. Službene novine FBiH 72/2009, 2009. Pravilnik o utvrđivanju dozvoljenih količina štetnih i opasnih materija u zemljištu i metode njihovog ispitivanja, 72/2009. str.14 (Official Gazette of the Federal Republic of BiH No. 72/09; Rulebook on Determination of Permitted Amounts of Harmful and Hazardous Substances in Land and Methods of Their Examination, 2009, page 14
149. Službene novine FBiH 52/2009, 2009. Zakon o poljoprivrednom zemljištu (Official Gazette of the Federal Republic of BiH No. 52/09; Law on Agricultural Land, 2009
150. Službene novine Federacije BiH br. 2/06, 72/07 i 32/08., Zakon o prostornom planiranju i korištenju zemljišta na nivou Federacije Bosne i Hercegovine
151. Soil Science Society of America (SSSI), 2001. Glossary of Soil Scince Terms, pp140
152. Soil Survey Staff, 1998. Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys, USDA agric.Handb. 436, US Government Printing Office, Washington DC
153. Soil Survey Staff, 2010., Keys to soil taxonomy. 11th ed. USDANRCS, U.S. Government Printing Offi., Washington, DC

154. Sollins, P., Swanston, C. and Kramer, M., 2007. Stabilization and destabilization of soil organic matter—a new focus - Biogeochemistry, 2007 - Springer
155. Sumner, M.E. and Miller, W.P., 1996. Cation exchange capacity, and exchange coefficients. In: D.L. Sparks (ed.) Methods of soil analysis. Part 2: Chemical properties (3rd ed.). ASA, SSSA, CSSA, Madison, WI.
156. Svedberg, T., and Nichols. J.B., 1923. Determination of size and distribution of size of particles by centrifugal methods. *J. Am. Chem. Soc.* 45:2910
157. Šimunić, I., Špoljar, A. i Peremin, V. T., 2007. Vježbe iz tloznanstva i popravaka tla (skripta). Visoko
158. Škorić A., 1982; Priručnik za pedološka istraživanja, Fakultet poljoprivrednih znanosti, Zagreb 1982.
159. Škorić, A., 1986. Postanak, razvoj i sistematika tla. Fakultet poljoprivrednih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb. 129.
160. Škorić, A., 1991. Sastav i svojstva tla. Fakultet poljoprivrednih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb. 130.
161. Škorić, A. i sur. 1977. Tla Slavonije i Baranje. Projektni savjet za izradu Pedološke karte S. R. Hrvatske, Zagreb. 128.
162. Tate, R. L. III, 1987. Soil Organic Matter, Biological and Ecological Effects, A Wiley – Interscience Publication, USA, 1987, 5,261,
163. Teamrat Ghezzehei, A., 2012. Soil Structure; Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes, Second Edition; CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton London New York
164. Tešić, Ž. i Todorović, M., 1992. Mikrobiologija, Mikrobiologija tla, Poljoprivredni f. Naučna knjiga, Beograd, 144
165. Thomas, G.W., 1982. Exchangeable cations. In: A.L. Page (ed.). Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties (2nd ed.) Agronomy 9:159-165.
166. Tisdall, J.M., and Oades, J.M., 1979. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. *Aust. J. Soil Res.* 17:429–441.
167. Tisdall, J.M., and Oades, J.M., 1982. Organic-matter and waterstable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33:141–163.
168. Tuller, M. and Or, D., 2001. Hydraulic conductivity of variably saturated porous media: Film and corner flow in angular pore space. *Water Resour. Res.* 37:1257–1276.
169. Tuller, M., Or, D. and Dudley, L.M. 1999. Adsorption and capillary condensation in porous media: Liquid retention and interfacial configurations in angular pores. *Water Resour. Res.* 35:1949–1964.

170. Turchenek, L.W., and J.M. Oades. 1979. Fractionation of organomineral complexes by sedimentation and density techniques. *Geoderma* 21:311–343.
171. Tvica, M., 2008. Stanje organskog karbona u važnijim tipovima zemljišta u zavisnosti od načina korištenja, Magistarski rad, Poljoprivredno-prehrambeni fakultet UNSA, 2008
172. Tvica, M., 2018. Uticaj hidrološkog režima na process mineralizacije i mogućnost remedijacije tresetište Livanjskog polja, Doktorska disertacija, Poljoprivredno-prehrambeni fakultet UNSA, 2018
173. Tvica, M. and Ćustović, H., 2011. The Soil Adsorption Complex of Representative Types of Soil in Bosnia and Herzegovina under Different Land Use and Different Soil Management Proceedings of the 22nd International Scientific-Expert Conference of Agriculture and Food Industry, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 28 September - 1 October, 2011 2012 pp.250-253 ref.6
174. Van Rotterdam-Los, A.M.D., 2010. The Potential of Soils to Supply Phosphorus and Potassium, Processes and Predictions. Ph.D. Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 2010. [Google Scholar]]
175. Vukadinović, V. i Vukadinović, V., 2011. Ishrana bilja, sveučilišni udžbenik. Poljoprivredni fakultet Osijek, Osijek, 442.)
176. Ward, R.C. & Robinson, M., 1990. Principles of Hydrology. McGraw-Hill Book Company, London
177. Western, A.W. and Grayson, R.B., 1998. The Tarrawarra data set: Soil moisture patterns, soil characteristics, and hydrological flux measurements. *Water Resour. Res.* 34:2765–2768.
178. Western, A.W., Grayson, R.B. and Blöschl, G., 2002. Scaling of soil moisture: A hydrologic perspective. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 30:149–180.
179. Weil R. R. and Brady N.C., 2017. The nature and properties of soils, Pearson education limited, UK
180. Woods, M.S., Ketterings, Q.M. and Rossi, F.S., 2005. Effectiveness of standard soil tests for assessing potassium availability in sand rootzones. *Soil Sci.* 2005, 170, 110–119. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
181. World Resource Institute (WRI), 2005, Milenijska procjena ekosistema, na zahtjev Generalnog sekretara UN 2000, UNEP United Nations Environment Program 2005

Internetski izvori:

182. <https://www.environmental-expert.com/downloads/eijkelkamp-model-0860-air-pycnometer-according-to-langer-manual-532697>
183. <https://www.royaleijkelkamp.com/media/akhiek0/m-0904e-double-ring-infiltrometer.pdf>
184. <https://www.royaleijkelkamp.com/products/lab-testing-equipment/soil-physical-research/water-permeability/soil-water-permeameters/>
185. <https://media.beckman.com/-/media/pdf-assets/brochures/particle-brochure-coulter-principle-short-course.pdf>
186. [https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Soil\\_Science/Digging\\_into\\_Canadian\\_Soils%3A\\_An\\_Introduction\\_to\\_Soil\\_Science/03%3A\\_Digging\\_Deeper/3.01%3A\\_Soil\\_Mineralogy](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Soil_Science/Digging_into_Canadian_Soils%3A_An_Introduction_to_Soil_Science/03%3A_Digging_Deeper/3.01%3A_Soil_Mineralogy)
187. <https://opengeology.org/Mineralogy/13-crystal-structures/>
188. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/corine-land-cover-2000-by-country-3/bosnia-herzegovina>
189. [https://www.fao.org/3/AC172E/AC172E04.htm\)](https://www.fao.org/3/AC172E/AC172E04.htm)
190. [https://www.fao.org/3/r4082e/r4082e03.htm\)](https://www.fao.org/3/r4082e/r4082e03.htm)
191. <https://www.fao.org/global-soil-partnership/glosolan-old/soil-analysis/standard-operating-procedures/en/>
192. [https://en.wikipedia.org/wiki/Tensiometer\\_\(soil\\_science\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Tensiometer_(soil_science))
193. [https://cropwatch.unl.edu/measuring-soil-water-status-using-watermark-sensors\)](https://cropwatch.unl.edu/measuring-soil-water-status-using-watermark-sensors)
194. <https://blog.hannaservice.eu/sr/conductiviti-ec/>
195. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ff00b7e5-6918-42cc-93dd-4cff6edff84/>
196. <https://www.iso.org/standard>

## P R I L O Z I

### Prilog 1.

**Tabela Prefiksi za izražavanje fizičkih veličina**

Prefiks	Oznaka	Vrijednost
deci	d	$10^{-1}$
centi	c	$10^{-2}$
mili	m	$10^{-3}$
mikro	μ	$10^{-6}$
nano	n	$10^{-9}$
pikno	p	$10^{-12}$
feno	f	$10^{-15}$
alto	a	$10^{-18}$

Prefiks	Oznaka	Vrijednost
eksa	E	$10^{18}$
peta	P	$10^{15}$
tera	T	$10^{12}$
giga	G	$10^9$
mega	M	$10^6$
kilo	k	$10^3$
hekta	h	$10^2$
deka	da	$10^1$

### Prilog 2. Tabela za izračunavanje težine CO<sub>2</sub> pri volumetrijskom određivanju karbonata, pri datom pritisku i temperaturi [3a]

(Barometarski pritisak u mb (milibarima))

T °C	989	992,5	996	998,5	1001,5	1005,5	1008	1010,5	1013	1017	1020	1022,5	1028
28	1778	1784	1791	1797	1804	1810	1817	1823	1828	1833	1837	1842	1852
27	1784	1790	1797	1803	1810	1816	1823	1829	1834	1839	1843	1848	1852
26	1791	1797	1803	1809	1816	1822	1829	1335	1840	1845	1849	1854	1871
25	1797	1803	1810	1816	1823	1829	1836	1842	1847	1852	1856	1861	1871
24	1803	1809	1816	1822	1829	1835	1842	1848	1853	1858	1862	1867	1877
23	1809	1815	1822	1828	1835	1841	1848	1854	1859	1864	1868	1873	1883
22	1815	1821	1828	1834	1841	1847	1854	1860	1865	1870	1875	1880	1890
21	1822	1828	1835	1841	1848	1854	1861	1867	1872	1877	1882	1887	1897
20	1828	1834	1841	1847	1854	1860	1867	1873	1878	1883	1888	1893	1903
19	1834	1840	1847	1853	1860	1866	1873	1879	1884	1889	1894	1899	1909
18	1840	1846	1853	1859	1866	1872	1879	1885	1890	1895	1900	1905	1915
17	1846	1853	1860	1866	1873	1879	1886	1892	1897	1902	1917	1912	1922
16	1853	1860	1866	1873	1879	1886	1892	1898	1903	1908	1913	1918	1928
15	1859	1866	1872	1879	1886	1892	1899	1905	1910	1915	1920	1925	1935
14	1865	1873	1878	1885	1892	1899	1906	1912	1917	1922	1927	1932	1942
13	1872	1878	1885	1892	1899	1906	1913	1919	1924	1929	1934	1939	1949

Brojevi prikazani u tabeli podjeljeni sa 1.000 predstavljaju masu 1 cm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> pri datom pritisku i temperaturi. [3a]