

Наука, Москва 1971 и 1972. — H. I. Колчин, Механика машин. Машиностроение, Москва 1971. — B. A. Зиновьев, Курс теории механизмов и машин. Наука, Москва 1972. — Z. Sapunar, Mehanizmi I i II. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 1972. — H. H. Mabie, F. W. Ocvirk, Mehanizam i dinamika maština. Vuk Karadžić, Beograd 1973. — Академија наука СССР, Анализ и синтез механизама. Наука, Москва 1974. — B. A. Светличкић, Случајни колебания механических систем. Машиностроение, Москва 1976.

Z. Sapunar

MELIORACIJA, mijenjanje fizikalnih svojstava tla da se poboljša plodnost, odnosno da se osigura normalan rast i razvoj biljaka. Melioracija tla obuhvaća odvodnjavanje i navodnjavanje tla. Potreba odvodnjavanja i navodnjavanja ovisi o svojstvima tla i o vodi u tlu.

SVOJSTVA TLA I VODA U TLU

Svojstva tla ovise o mehaničkom sastavu tla, njegovoj strukturi, te pojavi vode u njemu.

Mehanička svojstva tla. Tlo se sastoji od čvrste, tekuće i plinovite faze. Čvrstu fazu čine mineralne, mineralno-organske i organske čestice različite usitnjenosti. Čestice se prema veličini svrstavaju u kamen, šljunak, krupni i sitni pjesak, prah i glinu (tabl. 1).

Tablica 1
FRAKCIJE MEHANIČKIH ČESTICA U TLU

Kamen	> 20 mm
Šljunak	2...20 mm
Krupni pjesak	0,2...2 mm
Sitni pjesak	0,02...0,2 mm
Prah	0,002...0,02 mm
Gлина	< 0,002 mm

Krupni pjesak ima veliku propusnost i ne može zadržavati vodu, nije vezan, neplastičan je, pa tlo sastavljeno pretežno od krupnog pjeska nije pogodno za poljoprivredu. Sitni pjesak pun je sitnih pora, vrlo lako propušta vodu, nije plastičan, ne lijepi se i rasipa se u suhom stanju. Prah može primiti veće količine vode, dobro propušta vodu, ne bubri, malo je plastičan, omogućuje kapilarni uspon vode, vezan je u suhom stanju. Gлина praktički ne propušta vodu, vrlo je plastična, ljepljiva je i bubri u vlažnom, a kompaktna je i tvrda u suhom stanju.

Mehanički sastav tla može se klasificirati i prema udjelu čestica manjih od 0,02 i manjih od 0,002 mm (tabl. 2). Često se mehanički sastav prikazuje trima komponentama, tj. udjelima pjesaka, praha i gline.

Tablica 2
KLASIFIKACIJA MEHANIČKOG SASTAVA TLA
PREMA UDJELU SITNIH ČESTICA

Vrsta tla	Udj. čestica (%)	
	< 0,02 mm	< 0,002 mm
Pjesak	< 10	< 4
Ilovasta pjeskulja	10...20	4...9
Pjeskovita ilovača	20...30	9...15
Ilovača	30...40	15...20
Teža ilovača	40...50	20...25
Ilovasta gлина	50...75	25...36
Gлина	> 75	> 36

Pomoću mehaničkog sastava tla mogu se procijeniti mnoga svojstva tla, pa se ispitivanju mehaničkih svojstava tla za potrebe odvodnjavanja posvećuje posebna pažnja. Taj sastav daje osnovne podatke o genezi tla, njegovu bonitetu i zračno-vodenom režimu u tlu.

Utjecaj mehaničkog sastava tla na njegova svojstva prikazuje tabl. 3. Na temelju mehaničkog sastava tla posredno se

utvrđuje količina fiziološki neaktivne vode, te razmaka i dubine drenažnih rovova.

Tablica 3
UTJECAJ USITNJENOSTI TLA NA NJEGOVA SVOJSTVA

Vrlo usitnjeno tlo (gлина)	Srednje usitnjeno tlo prah i sitni pjesak	Slabo usitnjeno tlo (pjesak)
Slaba propusnost vode		Dobra propusnost vode
Velika kohezija		Slaba kohezija
Visoki sadržaj hranična		Neznatna količina hranična
Slaba biološka aktivnost		Jaka biološka aktivnost
Tesko obradiva tla		Lako obradiva tla
Slabo ispiranje		Jako ispiranje
Znata mogućnost zadržavanja vode		Neznatna mogućnost zadržavanja vode
Dobra kemijska svojstva		Slaba kemijska svojstva
Loša fizička svojstva		Dobra fizička svojstva
Tla pogodna za livade i pašnjake	Tla pogodna za oranine s mogućnošću utjecaja na kemijska i fizička svojstva	Tla pogodna za uzgoj šuma

Struktura tla. Da bi se dobila što potpunija slika o tlu, potrebno je poznavati i strukturu tla. Pod struktrom tla razumijeva se način aglomeriranja čestica, čime nastaju tzv. strukturni agregati. Oni mogu imati različite oblike i veličine, pa se govori o strukturnim karakteristikama tla. Tlo se djelovanjem različitih faktora drobi i raspada. Ako se tlo ne raspada u strukturne agregate, govori se o bestrukturnom tlu. Takva su ona tla koja su sastavljena od različitih vrsta pjesaka jer se oni ne vežu u strukturne aggregate. Takva su i tla s velikim sadržajem vlažne gline koja imaju homogeni sastav bez strukturnih agregata.

Struktura tla može biti prirodna i umjetna. Prirodna je struktura nastala djelovanjem prirodnih faktora, a umjetna djelovanjem čovjeka (npr. obradom zemljišta).

Strukturni agregati nastaju uglavnom *obaranjem* (flokulacijom), *lijepljenjem* (adhezijom) i *cementacijom*. Na razvitan strukturni agregat najviše utječe neki sastojci humusa, vapno i spojevi željeza, koji djeluju kao cement, te sitnozrne strukture vežu u veće nakupine. Na razvitan strukturnih agregata mnogo djeluje i vegetacija koja korijenjem rahli i zbiji tlo, tvori kanaliće, te svojim izlučinama i ostacima djeluje na fizičke i kemijske promjene sastava tla. Tako se stvaraju sitni agregati, mrvice i grudice u tlu. Smatra se da struktura korijenja trava mnogo utječe na poboljšanje strukture tla.

Strukturni agregati mogu se prema veličini svrstati u četiri skupine: *mikrostrukturni* (promjeri manji od 0,25 mm), *mezostrukturni* (promjer 0,25...2 mm), *makrostrukturni* (promjer 2...50 mm) i *megastrukturni* (promjer veći od 50 mm) agregati.

Prema obliku strukturni se agregati svrstavaju u sljedeće skupine: a) kockasti ili kuboformni agregati koji su podjednako razvijeni u smjeru svih triju osi, b) stupasti ili prizmoformni agregati koji su razvijeni u smjeru vertikalne osi i c) plosnati ili lamoformni agregati koji su razvijeni u smjeru dviju horizontalnih osi. Unutar tih skupina razlikuje se više grupa strukturnih agregata prema njihovoj duljini u smjeru karakterističnih osi.

Pri pedološkim istraživanjima tala koja se žele meliorirati treba svakako utvrditi stabilnost strukture tla. Ta stabilnost ovisi o postojanosti strukturnih agregata u vodi. Ona je često različita i u različitim profilima istog tla. Strukturni agregati nekih tala imaju veliku stabilnost i nakon što su dugo u vodi, dok se oni drugih tala u vodi veoma brzo raspadaju u mikrostrukturne aggregate. Stabilnost strukturnih agregata ovisi o faktorima koji uvjetuju cementaciju i o faktorima koji djeluju kao sredstva za disperziju (peptizatori). Humusne tvari, kalcij, aluminij i trovalentno željezo povećavaju stabilnost strukture, a mehanička obradba i peptizatori smanjuju tu stabilnost.

Na temelju poznavanja stabilnosti strukture agregata može se shvatiti cjelokupno dinamičko ponašanje tla, te se može procijeniti propusnost tla za vodu i zrak. Rasporedom strukturalnih agregata određena je, naime, poroznost tla. Time je obujam tla podijeljen na obujam supstancije i obujam pora, koji je više ili manje ispunjen promjenljivim sastojcima tla, tj. vodom i zrakom. Veličina i oblik pora veoma utječe na količinu vode i zraka u tlu. Klasifikacija pora vidi se u tabl. 4.

Tablica 4
KLASIFIKACIJA PORA U TLU

Vrsta pora	Djelovanje	Ekvivalentni promjer mm	Tisk potreban za isisavanje kPa
Makropore	voda se brzo drenira	> 50	< 6
Srednje pore	voda se sporo drenira	10...50	6...35
Fine pore	korisna voda	0,2...10	35...1500
Vrlo fine pore	mrtva voda	< 0,2	> 1500

Voda u tlu. Kad se promatra odvodnjavanje, zanimljiva su hidromorfna tla, tj. ona koja su suviše vlažna. Voda koja je dospjela u tlo zadržava se kraće ili duže vremena u njemu, a može ga potpuno zasiliti (saturirati) ispunjavajući potpuno sve pore. Pojava vode u tlu naziva se hidrogenizacijom tla. Prema porijeklu vode razlikuju se oborinska i dopunska voda.

Oborinska voda potječe od oborina koje padnu na površinu promatranog tla. Ta se voda zadržava na nepropusnom horizontu u tlu. Tada se voda ne može procijediti kroz nepropusni sloj. Pojava je te vode sezonska i ona djelomično ili potpuno nestaje za vrijeme vegetacijskog razdoblja zbog evapotranspiracije (v. *Hidrologija*, TE 6, str. 404). Za razliku od hidromorfnih tala, u automorfnim tlima voda se ne zadržava na nepropusnom horizontu jer takav u automorfnim tlima i ne postoji.

Dopunska voda obično obilno povećava količinu vode u tlu. Ona se sastoji od slivene, poplavne i podzemne vode. *Slivena* voda dotječe s bokova sliva, bilo s padina okolnih tala, bilo kroz tlo tih padina. *Poplavna* voda se izljeva iz vodotoka. *Podzemna* voda se skuplja na dubljem nepropusnom sloju. Ona se prihranjuvajući penje u više dijelove tla, pa tako uzrokuje hidromorfizam. Podzemna voda priteže iz vodotoka kroz vodonosne slojeve, s površine infiltracijom ili lateralno kroz slojeve zasićene vodom (kroz akvifer).

Hidromorfna tla karakterizirana su povremenom ili trajnom suficitnom vlažnošću dijela profila ili cijelog profila tla. Hidromorfna tla, koja su zanimljiva za melioracijske zahvate, mogu se svrstati u aluvijalna (fluvijalna) tla, pseudoglej, semiglej (livadsko tlo), humoglej (ritska crnica) i euglej (močvarna tla).

Aluvijalna (fluvijalna) tla pojavljuju se uz velike rijeke i obično nisu široka, ali se protežu cijelim tokom. To su mlađi riječni, jezerski i morski nanosi. Za njihov nastanak važni su nanosi koje nose vodotoci i koji se talože na pogodnim mjestima. Takvi procesi traju i danas na nebranjennim površinama, pa na njima nema razlike među genetskim horizontima. Obično su vidljivi sedimentni slojevi koji se razlikuju po debljinama i krupnoći istoloženog materijala, što se podudara s visinom i trajanjem poplava. Najkrupnije čestice talože se bliže obali. Provođenjem radova za regulaciju vodotoka, za obranu od poplava, te melioracijskim zahvatima kojima se regulira zračno-vodni režim aluvijalna tla postaju veoma prikladna za poljoprivredu.

Pseudoglej je karakteriziran znakovima hidromorfizma što se pojavljuje zbog prekomjernog vlaženja stajaćom vodom koja je pretežno oborinskog porijekla. Pojavljuje se najčešće tamo gdje postoji zbijeni teško propusni horizont koji sprečava poniranje oborinskih voda. Tako nastaje voda koja se zadržava i ispunja makropore (gravitacijske pore) u površinskom dijelu iz kojih istiskuje zrak. Djelovanjem te vode reduciraju se spojevi željeza i mangana iz trovalentnih u dvovalentne spojeve koji su topljivi u vodi. Oni se pokreću difuzijom i

izbjeljuju površine strukturalnih agregata i korijenja. Suha faza nastaje ljeti kad se najprije uspostavlja ravnoteža između oborina i evapotranspiracije, odnosno kasnije kad je evapotranspiracija intenzivnija od oborina. Tada se mijenja smjer kemijskog procesa, nastaje oksidacija te se izljučuju željezo i mangan kao rđaste mrlje, pa tlo dobiva mramorasti izgled tipičan za pseudoglej. Dinamika takva procesa ovisi o trajanju i o izmjenama suhe i vlažne faze. Trajanje vlažne faze osnova je za mogućnost melioracije pseudogleja, a to trajanje ovisi o klimi, reljefu zemljišta, te o položaju i debljini nepropusnog sloja. Zbog toga se razlikuje pseudoglej na zaravni i onaj na obronku, te pseudoglej s plitkim (do dubine 25 cm), srednjedubokim (25...50 cm) i dubokim (više od 50 cm ispod površine) nepropusnim slojem.

Pseudoglej je tip tla male plodnosti, nepovoljnih svojstava, nesredenog zračno-vodnog režima, siromašan hranljivim sastojcima i s plitkim aktivnim horizontom. Pseudoglej ima, međutim, i svojih prednosti jer se razvio na dubokom supstratu, a rasprostranjen je na nižim nadmorskim visinama i ima povoljan reljef u povoljnim klimatskim uvjetima. Zbog toga se pseudoglej smatra rezervnim poljoprivrednim površinama.

Zadatak je melioracije u području pseudogleja da se odvedu suviše vode i time regulira zračno-vodni režim, pa se tako eliminiraju loše posljedice izmjena suhih i vlažnih faza. Rahljnjem teško propusnog sloja eliminira se vlažna faza, jer se osigurava bolja infiltracija vode u dublje slojeve, veća prozračnost tla i povećanje korisne vode u tlu. Suvršna voda odvodi se mrežom drenažnih cijevi. Osim toga, treba popraviti strukturu tla i održavati poroznost dodavanjem kalcija i organskih tvari.

Kad se meliorira pseudoglej, potrebno je prethodno razgraničiti poljoprivredne i šumske površine.

Semiglej (livadsko tlo) je tlo u kojemu se hidromorfizam pojavljuje djelovanjem podzemnih voda koje se nalaze u tlu na dubini većoj od 1 m. Taj se tip tla pojavljuje u riječnim dolinama gdje je pojava podzemnih voda uvjetovana topografskim odnosima. Prekomjerna voda ne utječe na gornje dijelove profila jer se ona procjeđuje kroz gornje propusne slojeve. To su recentna tla u kojima se nalaze humifificirane organske tvari s koloidnim karakteristikama ispod kojih je rastresiti dio matičnog supstrata.

Većina tala s karakteristikama semigleja prema fizikalnim, kemijskim i biološkim karakteristikama spada među najplodnija tla. Kad se provode veliki regulacijski i melioracijski zahvati, mora se paziti da se ne pogorša vodni režim u takvim tlima zbog promjene vodnog režima u velikim vodotocima i zbog stalno visoke razine vode u vodotocima s kojima komuniciraju meliorirana tla. Tada je potrebno predvidjeti odvodnjavanje pomoću podzemne drenaže da se osigura kontrola razine podzemne vode.

Humoglej (ritska crnica) pojavljuje se kod nas u Baranji, Slavoniji, Srbiji i Vojvodini. Takav tip tla razvija se u posebnim hidrološkim uvjetima kad je u dijelu godine cijeli profil tla sve do površine zasićen vodom, pa je tlo često preplavljeno; nakon toga voda se povlači i spušta u dubinu veću od 100 cm. Humoglej se pojavljuje u najnižim dijelovima riječnih dolina i u poplavnim područjima gdje se održava relativno visoka razina podzemne vode. Matični supstrat ritskih crnica u nas sastoji se uglavnom od fluvijalnih nanosa tež mehaničkog sastava, od pretaloženog lesa i od eolskih pijesaka. Karakteristika je tih tala da se pri procesu hidrogenizacije stvara hidromorfn humus karakteristične crnometalne boje (akvatički humus), a za vrijeme sušnog razdoblja pri procesu aerifikacije matični humus.

Svojstva su ritskih crnica heterogena jer su one razvijene na sedimentima različitih mineraloških i kemijskih svojstava, različite teksture i uslojenosti. Najviše ritskih tala ima teži mehanički sastav. Teksturno lakša tla imaju povoljniji zračno-vodni režim i propusnija su, ne bubre, sadrže više zraka i imaju duže razdoblje za obradbu.

Obrana od poplavnih voda i sniženje razine podzemne vode osnovna je svrha melioracije. Ako je to postignuto i ako se uspostavi povoljan zračno-vodni režim, takva tla mogu dati

visoke i stabilne prinose svih ratarskih kultura, a teksturno lakša tla pogodna su i za uzgoj površinskih kultura.

Euglej (močvarno-glejna tla) tip je tla koje je po cijelom profilu, dakle sve do površine, ovlaženo kraće ili duže dopunskom vodom. Za razliku od ritskih crnica u močvarno-glejnom tlu razina se vode malo mijenja, pa se zbog toga u području do dubine od približno 1 m stalno nalazi mokra zona. Zbog dugog zadržavanja i slabog kretanja vode smanjuje se kisik u tlu i pojavljuje se tipični reduksijski horizont sivkasto-zelenkaste ili plavkaste boje jer nastaju lakotopljni dvovalentni spojevi željeza i mangana.

U površinskom sloju u kojem vladaju tokom većeg dijela godine anaerobni uvjeti, hidrofiti odlažu organske tvari koje se razgrađuju i stvara se hidromorfni humus. Karakteristike toga humusa i njegova dubina ovise o vrsti, količini i sastavu biljnih ostataka, te o sadržaju baza i o kemijskim reakcijama u tlu. U srednjem sloju dominiraju reduksijski procesi, pa se stvaraju spojevi željeza i mangana u obliku smeđih i tamnih mrlja, a ako u vodi ima kalcij-bikarbonata, može se izlučiti kreč.

S obzirom na porijeklo suviše vode, koja ima utjecaja na melioracijske zahvate, razlikuje se: hipoglej (podzemna voda djeluje na pojavu suviše vode), epiglej (površinska, najčešće poplavna voda djeluje na pojavu suviše vode) i amfglej (na pojavu suviše vode djeluju i podzemna i poplavna voda).

Vrste vode u tlu. Pod vodom u tlu razumijeva se voda koja se nalazi u porama tla i u šupljinama stijena ispod površine tla, tj. u litosferi. Udio vode u tlu iznosi 1...70%, a najčešće 15...30%. Procjenjuje se da se do dubine od 5 km po hektaru nalazi $\sim 50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ vode. Na poljoprivrednu proizvodnju, međutim, utječe samo voda u površinskim slojevima tla, pa će samo o toj vodi biti riječi.

Najčešće se voda u tlu, s obzirom na hidropedologiju, svrstava u kemijski vezanu, higroskopnu, opnenu, kapilarnu i gravitacijsku vodu.

Kemijski vezana voda nalazi se u kemijskim spojevima, pa je nekorisna za rast biljaka i poljoprivredu.

Higroskopna voda adsorbirana je na površini čestica tla. Ta se voda drži za čestice tla velikim silama koje iznose od 3...5 MPa pa do 500 MPa, te je biljke ne mogu preuzeti iz tla.

Opnena voda obavlja čestice u obliku tanje ili deblje opne. Drži se za čestice tla silama od 0,3...0,4 MPa (na periferiji opne) do 3...5 MPa (prijelaz u higroskopnu vodu). Ta je voda samo djelomično korisna za biljke. Opnena voda vrlo se sporo giba od čestice s debljom prema čestici s tanjom opnom djelovanjem adsorpcijskih sila. Količina opnene vode ovisi o fizikalnim svojstvima tla: u pjeskovitim tlama može maseni udio iznositi do 4%, u ilovastim do 10%, a u glinenastim i do 25%. Ako se količina vode u tlu povećava, ne povećavaju se opne oko čestice, nego ta slabije vezana voda popunjava pore u tlu.

Kapilarna voda drži se u kapilarnim porama površinskim silama. Ta se voda giba u svim smjerovima, a njezina je brzina veća u krupnijim porama. Voda u sitnijim porama može dosegati veću daljinu. Kapilarna se voda drži u tlu silama koje odgovaraju tlaku 0,3...0,4 MPa, pa je biljke mogu lako preuzimati. Zbog toga je kapilarna voda najkorisnija za uzgoj biljaka.

Gravitacijska voda korisna je za biljke, ali ona samo protjeće kroz makropore u tlu. Pojavljuje se nakon obilnijih oborina i prekomjernog vlaženja tla natapanjem. Biljke je mogu iskoristiti samo na prolazu kroz područje u kojem se nalazi korijenje.

Vodne konstante tla. To su karakteristike tla izražene sadržajem vode u tlu koji se može odrediti. Za regulaciju vodnog režima najvažnije su slijedeće vodne konstante: vlažnost venuća, lentokapilarna vlažnost, poljski vodni kapacitet i maksimalni vodni kapacitet tla.

Tlok koji treba svaldati da se odvoji voda od tla izražava se jedinicama tlaka (MPa), a prije obvezne upotrebe mjernih jedinica SI i pomoći Scofieldova broja (pF) koji je jednak dekadskom logaritmu visine vodenog stupca u cm kojim se izražava tlak potreban da se voda odijeli od tla. Treba spo-

menuti da vodenom supcu od 1 cm odgovara tlak $\sim 100 \text{ Pa}$. Taj tlak je veći što je tlo suše. Interval tog tlaka iznosi 0...1000 MPa.

Vlažnost venuća količina je vode u tlu uz koju biljka počinje venuti. To su prilike kada korijenje u tlu nema na raspolažanju dovoljno vode za održavanje fizioloških procesa. Korijen biljke ima usisnu moć od $\sim 1,5 \text{ MPa}$, pa kad sila zadržavanja vode u tlu dostigne tu vrijednost, biljka počinje venuti. Vlažnost tla mora se tako održavati da se količina vode u tlu nikada ne spusti na vlažnost venuća. Takvo stanje, naime, vrlo nepovoljno djeluje na prinose, pa čak, ako vlažnost ostane i kraće vrijeme na toj granici, biljka može uginuti. Vlažnost venuća ovisi o vrsti tla, odnosno o strukturi agregata u tlu. Više vrsta biljaka vene na tlu od finog pjeska ako je sadržaj vode manji od 2,7...3,5%, na tlu od pjeskovite ilovače kad je sadržaj vode manji od 5,6...6,9%, a na tlu od glinaste ilovače kad je sadržaj vode manji od 13,0...16,6% masenog udjela.

Razlikuje se početna i trajna vlažnost venuća. Ako se pojavi početna vlažnost venuća, biljka će se oporaviti nakon što se stavi u mračni prostor ispunjen zrakom zasićenim vodenom parom. Ako ni tada ne nestanu znaci venuća, bila je dostignuta trajna vlažnost venuća tla. Takvi pokusi omogućuju određivanje početne i trajne vlažnosti venuća. U tu svrhu najčešće se upotrebljavaju ječam i suncokret kao eksperimentalne biljke. Vlažnost venuća može se odrediti pomoću uzorka tla zasićenog vodom. Uzorak se održava pod tlakom od 1,5 MPa tokom 48 sati, a količina vode koja ostaje u uzorku odgovara vlažnosti venuća.

Lentokapilarna vlažnost količina je vode koju tlo drži silom koja odgovara tlaku od 0,625 MPa. Tada se voda u tlu giba vrlo sporo i ona ne osigurava dovoljnu količinu vode potrebnu biljkama. Prema tome, lentokapilarna vlažnost je granica količine vode kad se ona teže i lako giba u tlu, odnosno granica između vezane vode i vode koja se slobodno giba. Ta vodna konstanta iznosi 60...70% vrijednosti konstante koja je nazvana poljskim vodnim kapacitetom tla. Ona je važna za navodnjavanje, jer se uzima da je donja granica optimalne vlažnosti, pa je mjeru za određivanje početka navodnjavanja. Lentokapilarna vlažnost određuje se u laboratoriju, gdje se uzorak tla podvrgava tlaku od 0,625 MPa, a preostala količina vode u uzorku odgovara lentokapilarnoj vlažnosti.

Poljski vodni kapacitet količina je vode koju tlo u prirodnim uvjetima nakon obilnog vlaženja i poslije gravitacijskog projedivanja može maksimalno zadržati. Kad je dostignuta vrijednost poljskog vodnog kapaciteta, voda se više ne projeduje kroz tlo. Smatra se da je poljski vodni kapacitet gornja granica optimalne vlažnosti, pa ga treba odrediti za svako tlo koje je meliorirano. Naziv poljski uveden je zbog toga jer se vodni kapacitet određuje u uvjetima na polju. Obično se ispituje na parcelici $1,5 \times 1,5$ ili $2,0 \times 2,0 \text{ m}$. Tlo se na parcelici zasiti vodom, a zatim se prekrije slamom da se sprječi ishlapljenje. Nakon toga se nekoliko dana (1...10 dana) uzimaju uzorci tla po slojevima. Kad se ustanovi da se vlažnost ustalila, ta se vrijednost vlažnosti uzima kao poljski vodni kapacitet. Vrijednost te konstante ovisi o svojstvima tla. Za lakša tla (pjeskovito tlo) iznosi 10...20%, za srednje teška tla 20...30%, a za teže ilovače i glinovita tla 30...40% masenog udjela. U laboratoriju se poljski vodni kapacitet određuje tlačenjem uzorka tla pod tlakom od 0,033 MPa.

Maksimalni vodni kapacitet maksimalna je količina vode koju tlo može primiti, ali je ne može zadržati. U trenutku kad je tlo primilo maksimalnu količinu vode, sve su pore ispunjene vodom. Takvo je stanje tla vrlo nepovoljno za uzgoj biljaka, jer je voda istisnula zrak iz pora, a zrak je za život biljaka isto tako važan kao i voda. Kad je postignut maksimalni vodni kapacitet, dio vode je slobodan, pa se cijedi djelovanjem gravitacije. Tada se neke od pora oslobođaju od vode, pa u njih ulazi zrak, što opet omogućuje normalne procese u biljkama.

Optimalna vlažnost tla. Da bi se ostvarili visoki i stabilni prinosi poljoprivrednih kultura, potrebno je tokom vegetacije održavati optimalnu vlažnost tla. Višak vlažnosti šteti biljkama,

jer tada nema dovoljno zraka u tlu pa se biljke guše i trunu. Ako je, međutim, vlažnost nedovoljna, biljka troši veliki dio svoje energije da odvoji vodu od čestica tla. Zbog toga ona se može tako održavati samo neko kratko vrijeme, a nakon toga počne venuti i konačno ugine.

Optimalna vlažnost tla ovisi o biljnoj vrsti, razvojnoj fazi biljke, svojstvima tla i količini soli u tlu. Za uzgoj povrća, na otvorenom i u zatvorenom, gornja je granica optimalne vlažnosti poljski vodni kapacitet, dok donja granica ovisi o vrsti kulture i uvjetima uzgoja. Za većinu povrćarskih kultura uzgajanih na otvorenom donja se granica nalazi oko lentokapilarne vlažnosti, a ako se uzgajaju u staklenicama, donja je granica nešto veća od lentokapilarne vlažnosti.

U intervalu vlažnosti između poljskog vodnog kapaciteta i lentokapilarne vlažnosti biljka preuzima vodu pod istim uvjetima. Što je vlažnost bliža poljskom vodnom kapacitetu, lakše se voda odvaja od tla, pa je biljka lakše preuzima. Za biljku postaje sve teže što je sadržaj vlage u tlu manji. Da bi se osigurala optimalna vlažnost, potrebno ju je stalno kontrolirati i prema potrebi povećati vlažnost navodnjavanjem.

Gibanje vode u tlu ovisi o agregatnom stanju vode u tlu, o količini vode i silama koje uzrokuju to gibanje. Voda se u tlu može gibati u svim smjerovima. Prilikom prirodnog vlaženja i navodnjavanja voda se giba od površine prema dubljim slojevima, a kad se tlo suši, voda se kapilarno diže prema površini. Osim toga, voda se može gibati i u ostalim smjerovima, već prema djelovanju kapilarnih sile. Vlaga se u tlu giba od vlažnije zone (manje kapilarne sile) prema zonama manje vlažnosti. Takvo gibanje odvija se uglavnom u kapilarnim porama tla. Ako se pozna to kapilarno gibanje, mogu se pri regulaciji vodnog režima postići veći efekti i veća rentabilnost pri navodnjavanju. Visina kapilarnog gibanja ovisi o mehaničkim svojstvima tla. Što su čestice tla veće, brzina je kapilarnog dizanja vode veća, ali je manja visina dizanja. Visina kapilarnog dizanja iznosi: laka tla $0,020 \dots 0,035$ m, srednje teška tla $1,20 \dots 3,50$ m, a teža tla $6,50 \dots 12,00$ m. U pjeskovitom tlu kapilarno je dizanje, dakle, neznatno prema dizanju u glinastom tlu.

Infiltracija je proces upijanja vode u tlu. Poznavanje infiltracije vrlo je važno za određivanje mogućnosti regulacije u tlu jer o intenzivnosti infiltracije ovisi pogodnost tla za navodnjavanje i mogući način navodnjavanja. Infiltracijom se tlo vlaži od površine prema dubljim slojevima djelovanjem gravitacije, kapilarnih sile i hidrostatskog tlaka (ako voda leži na površini tla). U početku infiltracije najveće su kapilarne sile, pa je i infiltracija najveća. Nakon nekog vremena slojevi tla se zasite, pa se kapilarne sile smanje ili potpuno nestanu. Tada ostaje samo djelovanje gravitacije i eventualnog hidrostatskog tlaka, pa upijanje postaje konstantno neovisno o vremenu. Takvo konstantno upijanje naziva se filtracijom.

Intenzivnost infiltracije ovisi o fizikalnim i kemijskim svojstvima tla. Ako se tlo sastoji od krupnih čestica, ima bolju strukturu, veću poroznost, više organskih tvari, više kalcijevih a manje natrijevih soli, bit će veća infiltracija. Osim toga, upijanje se povećava kad je tlo bolje obrađeno, kad ima veći nagib, kad je gušći biljni pokrivač, te kad je viša temperatura vode i tla. Zbog toga se intenzivnost infiltracije mijenja tokom godine. Intenzivnost infiltracije izračunava se iz relacije

$$W_t = W_1 t^{1-d}, \quad (1)$$

gdje je W_t (cm) sloj vode koji je upijen tokom vremena t (h), W_1 (cm) sloj vode upijen u prvom satu, a d koeficijent infiltracije. Vrijednost koeficijenta infiltracije ovisi o svojstvima tla, a za poljoprivredna tla iznosi $0,3 \dots 0,8$. Ritska crnica u Vojvodini ima koeficijent infiltracije 0,55, a livadska tla u Vojvodini 0,40.

Infiltracija se mjeri infiltrometrima, koji se sastoje od dva cilindra ili kvadratna okvira što se dijelom utisnu u tlo. Nadolijevanjem vode u cilindre ili okvire održava se konstantna razina, a mjerjenjem upijanja određuje se intenzivnost infiltracije. Minimalna infiltracija pojavljuje se najčešće nakon $3 \dots 5$ sati, pa tada počinje filtracija. Računa se da tlo nije pogodno za navodnjavanje ako je upijanje manje od 25 cm/h .

Filtracija je gibanje vode kroz tlo djelovanjem gravitacije i eventualno hidrostatskog tlaka. Tada su mikropore i kapilarne pore zasićene vodom, pa kapilarne sile prestaju djelovati. Voda se giba kroz mikropore. U pjeskovitim tlama filtracija može biti vrlo intenzivna, pa se gubi mnogo vode i ispiru se hranjive tvari iz površinskog tla. U težim tlama filtracija je vrlo malena. Intenzitet filtracije ovisi o propusnosti tla (tabl. 5).

Tablica 5
INTENZIVNOST FILTRACIJE

Propusnost tla	10^{-5} cm/s	m/dan
Vrlo mala	< 3	< 0,026
Mala	3 - 15	0,026 - 0,13
Umjereni mala	15 - 60	0,13 - 0,52
Umjereni	60 - 170	0,52 - 1,47
Umjereni velika	170 - 350	1,47 - 3,02
Velika	350 - 700	3,02 - 6,05
Vrlo velika	> 700	> 6,05

Zrak u tlu. Zračni je kapacitet tla količina zraka koja preostaje u tlu nakon što je ono zasićeno vodom. Tada se u kapilarnim porama nalazi voda, a zrak u ostalim porama. Prema tome, najveći zračni kapacitet imaju pješčana, srednje ilovasta, a najmanji glinenasta tla. Rahla tla stabilne strukture imaju veći zračni kapacitet nego zbijena tla, usprkos jednakom mehaničkom sastavu. Zračni se kapacitet može povećati dodatkom organskih tvari, pepela ili pjeska, a novija istraživanja pokazuju da se taj kapacitet može povećati dodatkom polimera i stabilizatora strukture.

Zračni kapacitet može se promijeniti mehaničkom obradom tla, jer se tada povećava poroznost tla, pogotovo nekapilarna poroznost, a ona je mjerodavna za zračni kapacitet. Učestalom usitnjavanjem tla oruđima koja rotiraju može se smanjiti nekapilarna poroznost. To smanjenje slabih aeracija, smanjuje mikrobiološku aktivnost u tlu i smanjuje infiltriranje vode u tlu. Ako je tlo nestabilne strukture duže vremena bilo poplavljeno, zračni kapacitet može postati vrlo malen. Upotreboom teških poljoprivrednih strojeva u nepovoljnim vremenskim prilikama smanjuje se nekapilarna poroznost zbog zbijanja tla.

Istraživanja o djelovanju aeracije na razvoj korijena pokazuju da postoji optimalni zračni kapacitet koji ovisi o vrsti poljoprivredne kulture. Tako je, npr., za sudansku travu optimalni zračni kapacitet $6 \dots 10\%$, za pšenicu i zob $10 \dots 15\%$, a za ječam i šećernu repu $15 \dots 20\%$ volumenskih udjela. H. Yoder (1937) postigao je najveći prinos pamuka na parceli koja je imala za 30% veći zračni kapacitet. J. Bayer i U. Farnsworth (1940) utvrdili su da šećerna repa počinje propadati kad zračni kapacitet u tlu iznosi 8% , a ako se taj kapacitet smanji na 2% , propast će 50% biljaka. Isti su istraživači utvrdili da i malo povećanje aeracije tla mnogo povećava prinos kukuruza.

Tlo se opskrbљuje zrakom djelovanjem razlike tlakova i difuzijom zbog razlike u koncentraciji. Utvrđeno je da se difuzijom dovodi najveći dio potrebnog zraka korijenu biljaka, jer je razlika tlakova u tlu malena.

Sastav zraka u tlu mijenja se s dubinom. Koncentracija kisika u zraku koji se nalazi u tlu obično je manja nego u atmosferi, dok je koncentracija ugljik-dioksida veća. I koncentracija kisika i koncentracija ugljik-dioksida mijenjaju se tokom godine, a ovisi o sastavu organskih tvari unijetih u tlo. Povećanje koncentracije ugljik-dioksida tumači se povećanom aktivnošću mikroorganizama pri razgradnji organskih tvari.

ODVODNJAVANJE

Svrha je odvodnjavanja ostvarenje povoljnog zračno-vodnog režima u tlu koji omogućuje visoku i stabilnu poljoprivrednu proizvodnju, koja je potrebna zbog povećanja stanovništva na Zemlji i zbog toga što je danas veliki dio stanovništva u najmanje razvijenim područjima nedovoljno ishranjen. Stanje se može poboljšati većom proizvodnjom na već iskorištavanim poljoprivrednim površinama i povećanjem poljoprivrednih površina odvodnjavanjem i navodnjavanjem.

Kad se utvrđuju raspoložive obradive površine, uračunavaju se i ona tla koja nemaju povoljna fizikalna svojstva. Površina tih tala najčešće je veoma velika. Ta se svojstva mogu popraviti odvodnjavanjem. Danas se, naime, smatra da je opravdano odvodnjavati dreniranjem i ona tla za koja se do nedavno smatralo za su dobro drenirana. Upotreba teških strojeva za obradu zemljišta traži bolje odvodnjeno tlo nego što je bilo potrebno kad su polja bila obrađivanja konjskim i volovskim zaprgama.

Velike površine potencijalno plodnih tala danas praktički nisu plodna zemljišta. To u prvom redu vrijedi za hidromorfna tla u kojima suvišak vode onemogućuje povećanje poljoprivredne proizvodnje, pa se nastojanja usmjeravaju na obranu od poplava i na odvodnjavanje hidromorfnih tala.

Prve kamene i cijevne drenaže upotrebljavane su za odvodnjavanje još prije nove ere. U rimsko doba odvodnjavane su Pontijske močvare u blizini Rima natkritim kanalima. U srednjem vijeku zaboravljeno je na odvodnjavanje i dreniranje tala. Tek oko 1650. godine ponovo počinje, u Engleskoj i Rusiji, primjena odvodnjavanja gradnjom podzemnih rovova obloženih drvetom ili kamenom. Nešto poslije počinje u Škotskoj i Engleskoj upotreba krovnog crijeva (kanalica, v. *Krov*, TE 7, str. 410) za izradbu drenažnih odvoda. To je bila početna faza upotrebe glinenih proizvoda za cijevnu drenažu. Pronalazak preša za strojnu izradbu glinenih cijevi (1840) poslijepo je gradnju drenažnih uređaja u Evropi. Sljedećih stotinu godina odvodnjavanju se zemljisti drenažom pomoću glinenih cijevi postavljenih u ručno iskopane rovove.

Tek 1940. godine počinju intenzivna istraživanja matematičko-fizikalnih osnova za odvodnjavanje zemljišta, a od 1950. godine počinje intenzivnija upotreba posebnih strojeva za iskop drenažnih rovova i ukapanje drenažnih cijevi. Prije dvadesetak godina počele su se upotrebljavati drenaže plastične cijevi. Njihova cijena, lako postavljanje i mala težina uvjetovali su da su one potpuno istisnute iz upotrebe glinene cijevi. U posljednje vrijeme drenaže se cijevi od plastičnih materijala uvlače bez iskopa drenažnih rovova.

Tablica 6
POVRŠINE KOJE TREBA ODVODNJAVATI U NEKIM EVROPSKIM ZEMLJAMA

Zemlja	Površine koje treba odvodnjavati (10^6 ha)	Udio u ukupnim obradivim površinama %
Engleska i Wales	3,4	75
Finska	2,1	67
Danska	1,4	45
Njemačka DR	2,4	38
SR Njemačka	4,4	31
Švedska	1,0	23
Austrija	0,5	21
Nizozemska	0,7	17
Švicarska	0,2	9

Tablica 7
HIDROMORFNA TLA U JUGOSLAVIJI I HRVATSKOJ

Tipovi tla	Jugoslavija 10^3 ha	Hrvatska 10^3 ha
Aluvijalna tla	1300	400
Pseudoglej	1200	500
Livadska tla	450	300
Ritska crnica	770	207
Močvarna tla	1200	600
Tresetna tla	10	1
<i>Ukupno</i>	4930	2008

U skoro svim zemljama danas se nastoji povećati plodnost tla odvodnjavanjem otvorenim kanalima i drenažom. Izbor sustava odvodnjavanja ne ovisi samo o potrebnom sustavu nego i o ekonomskim mogućnostima. Najuspješniji je sustav odvodnjavanja zemljišta obično i najskuplji. Razvijene zemlje najčešće ulažu sredstva ne samo u obranu od poplava nego i u regulaciju odvodnjavanja podzemnom drenažom, dok nerazvijene zemlje grade tek uredaje za obranu od poplava jer teško pronađe sredstva za detaljno i regulirano odvodnjavanje, pa se zadovoljavaju manje uspješnim sustavima odvodnjavanja.

Potreba odvodnjavanja ovisi i o klimatskim uvjetima. U Evropi potreba odvodnjavanja opada od zapada prema istoku i od sjevera prema jugu. Površine koje treba odvodnjavati i udio tih površina u ukupno obradivom zemljištu u nekim evropskim zemljama vidi se u tabl. 6.

U SR Njemačkoj potrebno je odvodnjavati $4,4 \cdot 10^6$ ha, a od toga drenirati $2,6 \cdot 10^6$ ha. Od 1955. do 1972. odvodnjeno je $2,4 \cdot 10^6$ ha, a od toga drenirano $1,0 \cdot 10^6$ ha. Godišnje se drenira $\sim 65 \cdot 10^3$ ha uz troškove od $135 \cdot 10^6$ DM.

Površina hidromorfnih tala u Jugoslaviji iznosi $4,93 \cdot 10^6$ ha, od kojih se $2,0 \cdot 10^6$ ha nalazi na području SR Hrvatske (tabl. 7). U SR Hrvatskoj

poplavne površine iznose $800 \cdot 10^3$ ha, od čega je danas branjeno oko 60% poplavnih površina, a odvodnjeno je tek nešto više od $1/4$ površina koje treba meliorirati. Detaljno odvodnjavanje provodi se u nas na tlima na kojima voda stagnira. Primjena je drenaže za detaljno odvodnjavanje tek na početku (u Jugoslaviji je tako odvodnjeno samo $20 \cdot 10^3$ ha, a od toga u SR Hrvatskoj $12 \cdot 10^3$ ha).

Odvodnjavanje tla sastoji se u evakuaciji suvišne vode iz aktivnog profila tla. Aktivni profil obuhvaća dio tla u kojemu se razvija glavni dio korijena.

Odvodnjavanje suvišne vode obuhvaća zaštitu melioriranih područja od voda izvan toga područja, evakuaciju viška vode s područja koje se odvodnjava i detaljno odvodnjavanje s poljoprivrednih površina (tabla, rudina). Osim toga, sustav odvodnjavanja obuhvaća crpne stanice, mostove, propuste, ustave i ostale hidrotehničke građevine.

Zaštita od vanjskih voda. Zaštita nizinskih terena od voda s okolišnih brda i od visokih voda prirodnih vodotoka osnovni je preduvjet za uspješno melioriranje površina u nizini. Uobičajeno je da se melioracija u nizini provodi neovisno o sanaciji viših površina koje su na ivici melioriranog područja. Zaštita melioriranih površina postiže se a) obodnim kanalima i b) regulacijom prirodnih vodotoka za zaštitu od poplavnih voda.

Obodni kanali. Da se melioraciono područje zaštiti od brdskih voda, potrebna je barem parcijalna sanacija povišenih okolišnih terena. Trasa se obodnih kanala postavlja podnožjem nagnutih terena, a njihova je duljina ovisna o uvjetima pada. Na dijelu na kojemu se ne postiže pad potreban za otjecanje vode obodni se kanal vodi u prirodni ili umjetni recipijent. Obodni kanali ne uvode se u osnovnu kolektorskou mrežu. Istodobno s gradnjom obodnih kanala grade se zaštitne strane koji se zasijavaju travom da se spriječi erozija.

Regulacija prirodnih vodotoka za zaštitu melioriranih površina mora prethoditi ostalim radovima, a obično su izdaci za regulaciju mnogo veći od izdataka za ostale radove. Ta je regulacija radi zaštite od poplavnih voda potrebna jer se ne može ostvariti intenzivna poljoprivreda ako se zemljište popavljuje u bilo koje godišnje doba. Osim toga, biljke stradavaju ako je gornji sloj zemljišta zasićen vodom.

Evakuacija viška vlastitih voda provodi se tek nakon što je dovršena zaštita od vanjskih voda. Projekt evakuacije osniva se na detaljnim istraživanjima hidroloških prilika (v. *Hidrologija*, TE 6, str. 396) i fizikalno-kemijskim svojstvima tala koje treba meliorirati. Najbolji se rezultati postižu kad se hidromelioracijski radovi provode paralelno s komasacijskim radovima (v. *Komasacija zemljišta*, TE 7, str. 195) jer je tako moguće pronaći najbolja rješenja za većinu zemljišnih parcela.

Glavni odvodni kanali unutrašnjeg odvodnjavanja imaju pretežno tranzitnu funkciju. Oni se redovito trasiraju prema najnižem terenu, a često se prirodni vodotoci upotrebljavaju kao glavni odvodni kanali. U nizinskim terenima s vrlo malim uzdužnim padom oni imaju ograničenu duljinu. Optimalne duljine odvodnih kanala iznose $10 \cdots 12$ km s koncentriranim dotocima. Njih treba dimenzionirati tako da mogu odvesti velike vode povratnog razdoblja od $5 \cdots 10$ godina (v. *Hidrologija*, TE 6, str. 396), uz normu odvodnjavanja od $0,8 \cdots 1,0$ m. Norma odvodnjavanja ovisi o dubini drenaže, retencijskoj sposobnosti kanala i propusnoj moći kanala. Norma odvodnjavanja može se odrediti iz izraza

$$W = \sqrt{c_w Y_{\max}} \quad (2)$$

gdje je c_w koeficijent ($1,5 \cdots 2,5$), a Y_{\max} maksimalna dubina vode u kanalu. Norma je odvodnjavanja zapravo razlika između gornjeg ruba kanala i maksimalne kote vode u kanalu (sl. 1).



Sl. 1. Oblik kanala za odvodnjavanje. Y_{\max} najveća dubina vode, W norma odvodnjavanja

Voda se odvodnim kanalima najčešće odvodi u glavni recipient preko gravitacijskog ispusta ili pomoću crpne stанице. Crpne stанице grade kad u svim prilikama nije moguće osigurati gravitacijsko odvođenje vode.

Crpne stанице i gravitacijski ispusti. Crpne stанице postavljaju na ušću glavnog odvodnog kanala u glavni recipient. Kanalima se mora osigurati koncentracija dotoka, jer se uz dobru koncentraciju dotoka ostvaruju i dobre norme odvodnjavanja i na najudaljenijem mjestu kanala (i za tzv. posljednji hektar), što se teško postiže kad je kanal dug i kad ima mali pad.

Gravitacijski ispusti dimenzioniraju se za protoke većega povratnog razdoblja (25 ili 50 godina), a crpne stанице iz ekonomskih razloga za manji protok, tj. prema kraćem povratnom razdoblju. Osim toga, pri dimenzioniranju crpne stанице računa se s retencijom dijela vodenog vala u manjim i većim depresijama, te u kanalskoj mreži. Maksimalni učin crpne stанице Q_c izračunava se iz izraza

$$Q_c = Q_{\max P} \left(1 - \frac{W_r}{W_p} \right), \quad (3)$$

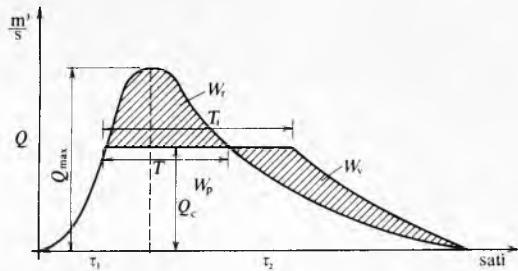
gdje je $Q_{\max P}$ maksimalni protok povratnog razdoblja P godina, W_p ukupni volumen vodenog vala, a W_r volumen retencije u kanalskoj mreži i prirodnim depresijama (sl. 2). Ukupni volumen vodenog vala određen je izrazom

$$W_p = Q_{\max P} \gamma \tau, \quad (4)$$

u kojem je

$$\gamma = 9450 m^{-0.515} (1 - \varphi)^{1.5} \exp(-0.5\varphi), \quad (4a)$$

a τ trajanje vodenog vala od početka porasta do kraja opadanja protoka. Konstanta m ima vrijednost 1–6, s tim da se smanjuje s povećanjem površine sliva, dok je φ omjer učina crpne stанице i maksimalnog protoka (v. *Hidrologija*, TE 6, str. 413). Djelovanjem retencija smanjuje se maksimalni protok i produžuje se trajanje pogona crpne stанице s maksimalnim učinom za $\Delta T = T_1 - T$ (sl. 2).



Sl. 2. Tok vodenog vala. W_p ukupni volumen vodenog vala, W_v volumen retencije u kanalskoj mreži i prirodnim depresijama, Q_c učin crpne stанице

U našim prilikama crpnim stanicama odvodi se 1,5–2,0 dm^3/s vode po hektaru.

Sabirni i detaljni kanali za unutrašnje odvodnjavanje imaju u prvom redu tranzitnu funkciju. Da li će oni djelovati i na regulaciju zračno-vodnih prilika u aktivnom profilu tla, ovisi o fizikalnim svojstvima tla. U lakšim i srednje teškim tlima, s dovoljnom propusnošću za vodu, osnovna kanalska mreža može preuzeti i regulacijsku i kolektorsku funkciju, jer ona tada ne samo da sakuplja višak vode nego i snizuje razinu podzemnih voda. Samo za takvo odvodnjavanje opravдан je naziv detaljno odvodnjavanje. U tlima s težim i teškim mehaničkim sastavom kanalska mreža djeluje samo kao kolektor voda jer se njezinom izgradnjom ne snizuje razina podzemnih voda u aktivnom profilu tla.

Da bi se u teškim tlima postigao optimalni zračno-vodni režim, potrebno je, osim sabirnih kanala, izgraditi i detaljne kanale (kanali II i III reda), a osim toga predviđjeti i dodatne regulacijske zahvate. Pri tom treba uskladiti melioracijske i eksplotacijske zahtjeve takvim rasporedom kanalske

i putne mreže da se postigne najbolje iskorištavanje poljoprivrednih površina.

Od postavljanja osnovne kanalske i putne mreže ovisi i formiranje zemljisnih parcela kao proizvodnih jedinica. U nizinskim područjima grade se paralelni sabirni i detaljni kanali. Pri tom se iskorištava prirodni pad zemljišta, a obradba se predviđa u smjeru prirodnog pada. Oblik, veličina i smjer parcele (table) ovisi o prosječnoj veličini posjeda u individualnom vlasništvu i o načinu obradbe. Duljina i smjer parcele u društvenom posjedu ovise o sastavu odvodnjavanja i smjeru obradbe zemljišta. Budući da su na nizinskim ravnim zemljištima padovi ograničeni, najčešće duljine tabla iznose 600–1000 m, dok je širina table određena sustavom regulacijskog odvodnjavanja. Prema iskustvu širine su tabla 250–400 m, a najčešće optimalna širina iznosi ~300 m. Prema tome, prosječne su površine parcela 24–30 ha.

Razmak sabirnih kanala određuje se prema izrazu (A. N. Kostjakov)

$$l = \frac{0.5 c T^2 [(\sigma i)^{0.75} + k_s]^2}{\sigma i}, \quad (5)$$

gdje je c Chezyev koeficijent, T dopušteno zadržavanje vode na parceli, σ koeficijent otjecanja, i maksimalni satni intenzitet kiše, a k_s srednja brzina poniranja vode poslije kiše.

Dimenzioniranje kanala. Glavni odvodni i sabirni kanali obično se dimenzioniraju za maksimalne protoke s povratnim razdobljem od 5 ili 10 godina. Pri tom se mora osigurati unaprijed utvrđena norma odvodnjavanja (2). Takvi kanali dimenzioniraju se uz kriterij manje sigurnosti, jer s povećanjem sigurnosti (dulje povratno razdoblje, veća norma odvodnjavanja) rastu i troškovi gradnje. O potrebnoj sigurnosti postoje, međutim, različita mišljenja, jer su potrebna ulaganja za melioraciju, kad se uračunaju i drenaže, vrlo velika. Budući da za većinu naših područja ne postoje normativi za hidrološku analizu, koji se osnivaju na mjerenim protocima, najčešće se analiza temelji na empirijskim formulama. Za područje srednjeg Posavlja upotrebljavaju se formule (D. Srebrenović) koje se osnivaju na intenzivnosti kiše (mm/h) prema relaciji

$$i = 1,111 H \left[\frac{67,84(1 + \lg P)^{0.98}}{t} \right]^{0.843 \exp(-0.146 \lg P)}, \quad (6)$$

gdje su H godišnje oborine (m), t je trajanje kiše (h), a P povratno razdoblje (god.). Uz koeficijent otjecanja $\alpha = 1$ za povratno razdoblje od 5, 10 i 25 godina specifični protoci u dm^3/s po hektaru dobivaju se iz relacija

$$q_5 = \frac{2,78}{\tau} \left\{ 28,37 H \left[\left(\frac{v}{28,37 H} \right)^{3,165} + \tau \right]^{0,316} - v \right\}, \quad (7a)$$

$$q_{10} = \frac{2,78}{\tau} \left\{ 39,35 H \left[\left(\frac{v}{39,35 H} \right)^{3,682} + \tau \right]^{0,272} - v \right\}, \quad (7b)$$

$$q_{25} = \frac{2,78}{\tau} \left\{ 52,42 H \left[\left(\frac{v}{52,42 H} \right)^{4,156} + \tau \right]^{0,240} - v \right\}, \quad (7c)$$

gdje je v retencijska sposobnost tla, a τ zbroj trajanja koncentracije

$$\tau_1 = \frac{3}{4} \tau_0 \quad (8)$$

i trajanja evakuacije voda

$$\tau_2 = 2,6 \left(\frac{F}{I} \right)^{1/3}, \quad (9)$$

gdje je τ_0 trajanje evakuacije sa zemljišta nakon prestanka jake kiše, F površina sliva (km^2), a I prosječni pad terena (%).

Maksimalni protok u m^3/s računa se iz izraza

$$Q_{\max} = 0,1 F q, \quad (10)$$

gdje je q specifični protok određen relacijama (7).

Za proračun specifičnog dotoka često se upotrebljava i formula A. N. Kostjakova:

$$q = 2,80 \frac{p\sigma k}{ts^{1/x}} \text{ dm}^3 \text{s}^{-1} \text{ha}^{-1}, \quad (11)$$

gdje su p jednodnevne oborine (mm), σ je koeficijent otjecanja, k koeficijent koji karakterizira histogram otjecanja, t trajanje kiše (h), s prijedeni put vode, a x eksponent ovisan o obliku, duljini, padu i površini slija.

Kanali se dimenzioniraju na temelju utvrđenih maksimalnih protoka. Brzina toka određena je relacijom

$$v = c \sqrt{R i}, \quad (12)$$

gdje je c koeficijent brzine, R hidraulički polumjer, a i pad razine vode. Omoćeni presjek dobiva se iz omjera protoka i brzine ($A = Q/v$). Koeficijent brzine može se odrediti pomoću izraza

$$c = k_m R^{1/6}, \quad (13)$$

pa se za brzinu dobiva

$$v = k_m R^{2/3} i^{1/2}. \quad (14)$$

Vrijednost koeficijenta ovisi o obliku kanala, njegovu održavanju i zaraštenosti, dubini vode i materijalu u kojem je izgrađen kanal (tabl. 8 i 9).

Tablica 8
KOEFICIJENT k_m (13) OVISAN O ODRŽAVANJU KANALA

Vrlo dobro održavan	$30 < k_m < 45$
Dobro održavan	$20 < k_m < 30$
Malo zarastao	$15 < k_m < 25$
Srednje zarastao	$10 < k_m < 20$
Vrlo zarastao	$k_m < 10$

Tablica 9
KOEFICIJENT k_m OVISAN O DUBINI VODE, VRSTI TLA I O DOBA GODINE

	Zima	Ljeto
Dubina vode do 0,80 m lako tlo teško tlo	35	20
	25	15
Dubina vode 0,70...1,7 m lako tlo teško tlo	40	30
	30	20
Dubina vode više od 1,5 m	40	50

Smanjenje razine vode određuje se izrazom

$$\Delta h = (\zeta_{ul} + \zeta_{tr} + \zeta_{iz}) \frac{v^2}{2g}, \quad (15)$$

gdje je ζ_{ul} ulazni koeficijent otpora, ζ_{tr} koeficijent otpora u kanalu, ζ_{iz} izlazni koeficijent otpora, v brzina vode, a g ubrzanje gravitacije.



Sl. 3. Odvodni kanal

Detaljne, tzv. suhe kanale, ne treba posebno dimenzionirati, jer su oni redovito predimenzionirani. Dubina tih kanala ovisi o regulacijskom sustavu. Ako se primjenjuje površinski sustav, prosječna je dubina kanala 1,20...1,60 m, a kad je primjenjena podzemna drenaža, potrebni su kanali duboki 1,60...1,80 m (sl. 3).

Dopuštena brzina vode u kanalima ovisi o geomehaničkim svojstvima tla. Dopuštene brzine vode i pokosi kanala prema nizozemskim propisima vide se u tabl. 10.

Tablica 10
DOPUŠTENE BRZINE VODE U KANALIMA I POKOSI KANALA PREMA NIZOZEMSKIM PROPISIMA

Tipovi tla	Dopuštena brzina m/s	Nagib pokosa l:n
Koherentno teško tlo (glina, ilovača, les)	0,6...0,8	0,75...2
Pjeskovita glina i koherentna pjeskovita tla	0,3...0,6	1,5...2,5
Fini pjesak	0,15...0,3	2...4
Grubi pjesak	0,3...0,6	1,5...3
Treset	0,3...0,6	1...2

Površinsko uređenje tla. Nakon što je iskrčeno višegodišnje raslinje i nakon što su iskopani sabirni i detaljni kanali potrebno je uređiti površinu zemljишta. Tome se često u nas ne poklanja dovoljno pažnje. Ujednačeni prinosi, naime, mogu se postići samo kad se svakoj biljci na parceli osiguraju jednak uvjeti rasta, jednakha ishrana i jednak vodni režim. Uz nedovoljno uređenje površine tla ostaju veće ili manje depresije i užvisne, pa je zemljишte nejednako namoćeno, a nejednaka je i debљina sloja zemlje s reguliranim vodno-zračnim režimom u kojem se razvija korjenje. Površinsko uređenje tla sastoji se od njegova planiranja i reguliranja. Grubim planiranjem zatravljaju se korita starih vodotokova i depresije zemljom s mikrouzvisinama i razgrču se deponije od novoiskopanih kanala. Tlo se uređuje na svakoj parceli u smjeru pada terena. Finim planiranjem zemljишta uskladjuje se površina sa sustavom regulacijskog odvodnjavanja. Nekad će biti potrebno zemljishte detaljno geodetski snimiti pomoću kvadratne mreže, da bi se odredile visinske razlike za površinsko rezanje i punjenje terena. Fino se planiranje provodi oranjem i finiširanjem pomoću strojeva za fino ravnanje. Ore se u smjeru pada terena, a finišira u smjeru dijagonale. Na tako uređenim parcelama može se primjeniti površinsko ili potpovršinsko odvodnjavanje.

Trajanje odvodnjavanja. Nekontrolirano preplavlivanje zemljишta u bilo kojoj fazi razvitka biljaka i u bilo koje godišnje dobi nepovoljno utječe na prinos. Preplavlivanje žitarica tokom 48 sati snizuje prinos na 50...60%, a ako je zemljishte preplavljeno 8...10 dana ne treba prinos ni očekivati. Trajanje evakuacije viška vode s oranica, tj. trajanje odvodnjavanja ne smije biti duže od 12 sati. Ako je trajanje odvodnjavanja duže, prinos se smanjuje, a očekivani prinos može se izračunati pomoću izraza

$$y = (10 - T)^2, \quad (16)$$

gdje je y prinos žitarica u postocima, a T trajanje potapanja u danima.

Regulacijsko odvodnjavanje

Regulacijsko odvodnjavanje može biti površinsko, podzemno i kombinirano.

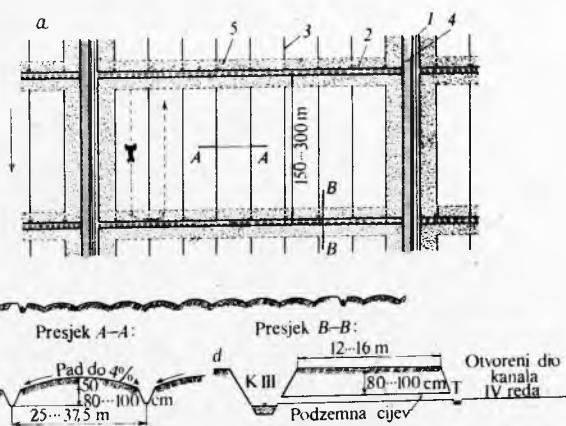
Površinsko odvodnjavanje najstariji je način regulacije vodno-zračnih odnosa u tlu. Tim se postupkom hvata višak oborina i nastoji ga se što prije odvesti u osnovnu kolektorsku mrežu. Primjenjuju se sljedeći sustavi površinskog odvodnjavanja: sustav sa srednje dubokim kanalima, sustav Bedding, dvostrešna baulacija, sustav s paralelnim poljskim kanalima i sustav Random.

Sustav sa srednje dubokim kanalima (sl. 4). Regulacijski kanali (kanali IV reda) prosječno su duboki 120 cm, a međusobno su udaljeni 100...150 m. Ispod navratine ugrađuju se cijevi promjera 25 cm, duge 12...16 m. Već prema prirodnom padu može se izvesti jednostrešan i dvostrešan sustav. Prednosti su sustava da njegova izvedba nije skupa, da kanali

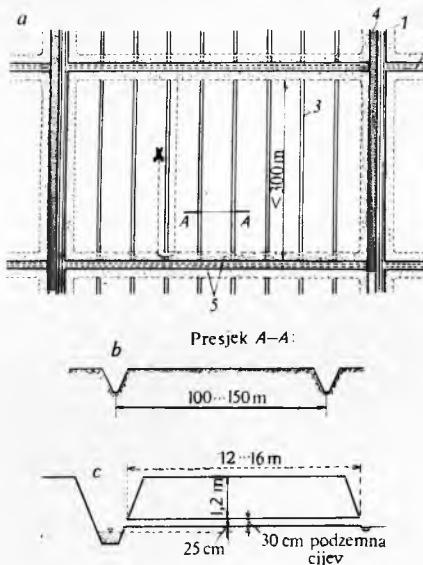
imaju manje padove od drenažnih cijevi i da kanali osnovnog odvodnjavanja mogu biti plići. Nedostaci su, međutim, što se kanalima smanjuje iskoristljiva površina parcela, što se ne regulira razina podzemne vode, što se obraduje u smjeru kraće stranice i što je skupo održavanje sustava.

Sustav Bedding (sl. 5) karakteriziran je uskim sloganima (širine 7...17 m). Duljina razmaka između sloganova iznosi 90...300 m. Slogovi s padom do 1% dobivaju se naoravanjem. Pogodan je za manje posjede, za to težeg mehaničkog sastava, te kad se za obradu upotrebljavaju traktori manjih snaga.

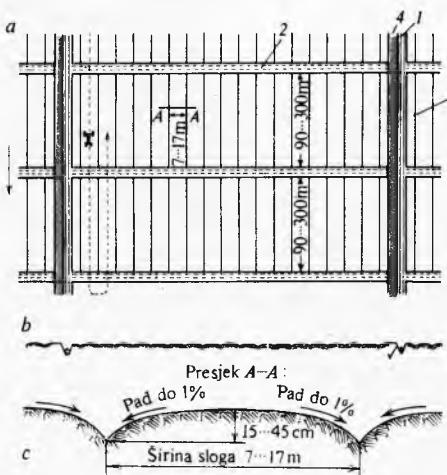
Dvostrešna baulacija provodi se stalnim plitkim kanalima (sl. 6) i plitkim kanalima koji se formiraju tokom obrade (sl. 7). Slog je širok 25 m, što je višekratnik širine oruđa za obradbu zemljišta. Izbočine (baule) na zemljištu stvaraju se stalnim naoravanjem. One moraju biti pravilno formirane s nagibom do 4%. U navratine se postavljaju cijevi promjera 25 cm, i to iznad razine srednje vode u kolektorskom kanalu. Obrada je u smjeru kraće stranice, što je nedostatak sustava. Troškovi gradnje sustava relativno su maleni, ali je održavanje skupo. Smanjuje se površina iskoristljivog



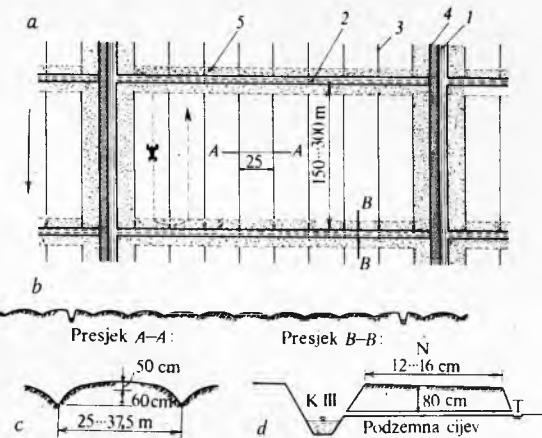
Sl. 6. Dvostrešna baulacija u kombinaciji sa stalnim plitkim kanalima. 1 kanal II reda, 2 kanal III reda, 3 stalni kanal IV reda (razmak 25-37,5 m), 4 poljski put II reda, 5 navratina široka 12-16 m; a tlocrt, b poprečni presjek, c presjek A—A, d presjek B—B



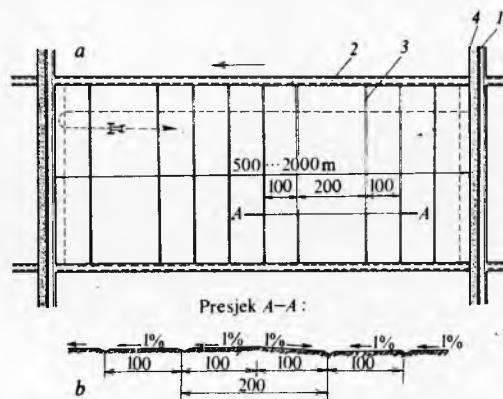
Sl. 4. Sustav odvodnjavanja sa srednje dubokim kanalima. 1 kanal II reda, 2 kanal III reda (duljina 500-2000 m), 3 kanal IV reda (dubina ~120 cm, duljina 300-600 m, razmak 100-150 m), 4 poljski put II reda, 5 navratina (Širina 12-16 m); a tlocrt, b poprečni presjek A—A, c poprečni presjek podzemnog propusta iz kanala IV u kanal III reda



Sl. 5. Sustav Bedding. 1 kanal II reda, 2 kanal III reda, 3 kanal IV reda ili odvodni razor (duljina 90-300 m, razmak 7-17 m), 4 poljski put II reda, a tlocrt, b poprečni presjek, c detalj poprečnog presjeka A—A



Sl. 7. Dvostrešna baulacija u kombinaciji s plitkim kanalima. 1 kanal II reda, 2 kanal III reda, 3 plitki kanal IV reda, 4 poljski put II reda, 5 navratina široka 12-16 m; a tlocrt, b poprečni presjek, c presjek A—A, d presjek B—B

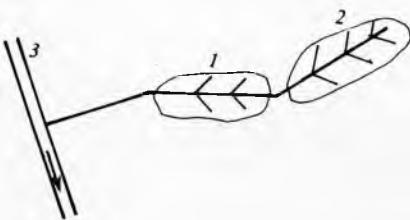


Sl. 8. Odvodnjavanje paralelnim poljskim kanalima. 1 kanal II reda, 2 kanal III reda, 3 kanal IV reda, 4 poljski put i navratina; a tlocrt, b poprečni presjek

zemljišta, a vegetacija je slabija u jarcima među sloganima i neposredno uz njih. Mnogo se primjenjuje na tlima težeg i teškoga mehaničkog sastava u srednjoj i zapadnoj Posavini.

Sustav s paralelnim poljskim kanalima (sl. 8). Karakteriziran je kanalima dubine 15-30 cm, s blagim poprečnim nagibom (1 : 8 do 1 : 10) preko kojih nesmetano prolaze strojevi. Kanali su razmaknuti 100-200 m. Zemljište se obrađuje u smjeru dulje stranice, pa se može uz optimalno iskorištenje primijeniti krupna mehanizacija. Najviše se primjenjuje na ravnim terenima s tlom teškoga mehaničkog sastava.

Sustav Random (sl. 9) služi za odvodnjavanje depresija na zemljištu, i to kad su one duge i uske. Grade se otvoreni kanali s blagim pokosima (1:8 do 1:10).



Sl. 9. Sustav Random. 1 i 2 depresije, 3 odvodni kanal

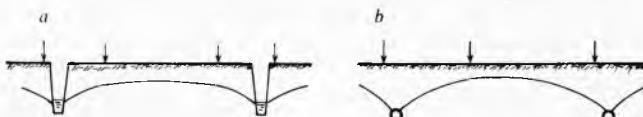
Podzemno odvodnjavanje primjenjuje se za sniženje razine podzemne vode u tlima koja su u aktivnom dijelu dovoljno vodopropusna. Tada se zahvatima u tlu prekida dizanje te vode u onaj sloj u kojem se nalazi najveći dio korijena. Osnovni je preduvjet za primjenu podzemnog odvodnjavanja (drenaže) da je aktivni dio tla vodopropustan u horizontalnom smjeru. Ta je vodupropusnost klasificirana prema njemačkim normativima u 7 klase (tabl. 11). Za klase I...III mora se drenažno odvodnjavanje kombinirati s dodatnim odvodnjavanjem (krtičenje, podrivanje, rigolanje), a za klase zemljišta IV...VII može se primijeniti neki od sustava odvodnjavanja.

Tablica 11

HORIZONTALNA VODOPROPUSNOST TLA
PREMA NJEMAČKIM NORMATIVIMA

Klasa	Horizontalna propusnost k cm/dan	Odvodnjavanje
I	$k \leq 1,0$	
II	$k \leq 6,0$	
III	$k = 6 \dots 16$	{ kombinirano }
IV	$k = 16 \dots 32$	{ sustavno }
V	$k = 32 \dots 50$	
VI	$k = 50 \dots 100$	
VII	$k > 100$	

Razina podzemne vode najčešće je zakrivljena između dva drenažna odvoda, koji mogu biti otvoreni kanali i ukopane cijevi (podzemna drenažna) (sl. 10). Prednost je podzemne drenaže u tom što se manje gubi obradivih površina, što se lakše obrađuje zemljište i što se lakše održava drenažni sustav.



Sl. 10. Razina podzemne vode. a odvodnjavanje otvorenim kanalima, b odvodnjavanje drenažnim cijevima

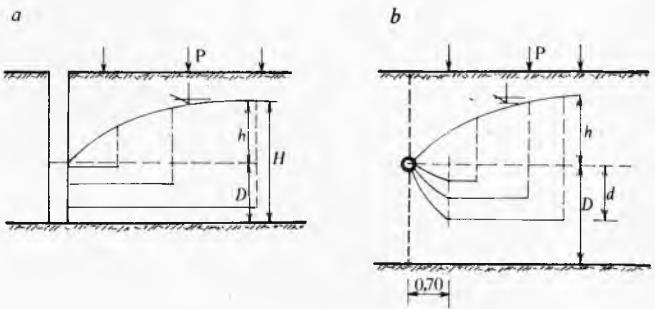
Mana je, međutim, podzemne drenaže u tome što su duljine drenažnih odvoda kraće, jer je potrebno osigurati veći uzdužni pad zbog većih gubitaka tlaka, i što su manji dotoci u drenažne odvode. Zbog svega toga primjenom otvorenih kanala postiže se niža razina podzemne vode. Na oblik plohe kojom je prikazana gornja granica podzemne vode i na visinu te vode utječu oborine i površinski dotoci, evaporacija, stanje tla, dubina i razmak drenažnih odvoda, površina s koje voda dotjeće drenažnom odvodu, površina presjeka drenažnog odvoda i razina vode u njemu.

Dotok prema drenažnom odvodu. Ako se računa samo s horizontalnim dotokom vode, dotok (m/dan) prema drenažnom odvodu iznosi

$$q = \frac{4k(H^2 - D^2)}{L^2}, \quad (17)$$

gdje je k horizontalna propusnost tla (m/dan), H visina podzemne vode u sredini razmaka među drenažnim odvodima iznad nepropusnog sloja, D visinska razlika između razine vode u drenažnom kanalu ili između središta cijevi podzemnog drenažnog odvoda i razine nepropusnog sloja, a L razmak među drenažnim odvodima (sl. 11a). Ako se razlika kvadrata u (17) zamjeni umnoškom zbroja i razlike, te ako se postavi da je $H + D = 2D + h$ i $H - D = h$, dobiva se

$$q = \frac{8kDh + 4kh^2}{L^2}. \quad (18)$$



Sl. 11. Uz određivanje dotoka u drenažne odvode. a odvodnjavanje otvorenim kanalima, b odvodnjavanje drenažnim cijevima

U izrazu (18) prvi dio ($8kDh/L^2$) predstavlja dio dotoka ispod razine vode u drenažnom odvodu, a drugi dio ($4kh^2/L^2$) dio dotoka iznad te razine. Ako se horizontalna propusnost iznad drenažnog odvoda (k_1) razlikuje od horizontalne propusnosti ispod tog odvoda (k_2), izraz (18) može se napisati u obliku

$$q = \frac{8k_1Dh + 4k_2h^2}{L^2}. \quad (19)$$

Kad se umjesto otvorenih kanala postavljaju drenažne cijevi (sl. 11b), računa se i s radikalnim dotokom, pa se u izrazu (19) veličina D zamjenjuje veličinom d_e koja znači visinu ekvivalentnog sloja, koja ovisi o veličini D i razmaku među drenažnim cijevima L (tabl. 12).

Visina podzemne vode (sl. 12) može se odrediti i iz izraza (D. Kirkham)

$$h = \frac{qL}{k_2} F_k \quad (20)$$

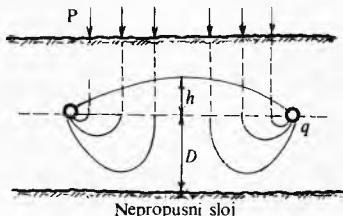
Tablica 12
VISINA EKVIVALENTNOG SLOJA d
PREMA S. B. HOOGHOUTU

L, m	5	7,5	10	15	20	25	30	35
$D = 0,5 \text{ m}$	0,40	0,43	0,45	0,46	0,47	0,47	0,48	0,48
0,75	0,49	0,56	0,61	0,65	0,69	0,71	0,72	0,73
1,00	0,54	0,64	0,71	0,78	0,83	0,86	0,88	0,89
1,25	0,56	0,69	0,78	0,89	0,96	1,01	1,06	1,07
1,50	0,73	0,83	0,98	1,08	1,15	1,20	1,24	
1,75	0,75	0,88	1,05	1,18	1,26	1,32	1,37	
2,00			0,91	1,11	1,25	1,35	1,43	1,50
2,25			0,93	1,16	1,32	1,44	1,54	1,61
2,50			0,94	1,19	1,38	1,52	1,63	1,72
2,75			1,22	1,42	1,58	1,70	1,81	
3,00			1,24	1,46	1,63	1,76	1,88	
3,25				1,26	1,49	1,68	1,83	1,96
3,50				1,28	1,52	1,72	1,88	2,01
3,75				1,29	1,54	1,75	1,92	2,07
4,00					1,56	1,79	1,96	2,13
4,50					1,59	1,84	2,03	2,22
5,00					1,61	1,87	2,09	2,28
5,50						1,90	2,13	2,34
6,00							2,17	2,39
7,00							2,21	2,46
8,00								2,53
9,00								
10,00								
∞	0,57	0,76	0,95	1,29	1,62	1,94	2,24	2,54

ako se zanemari tok iznad drenažnih cijevi, a kad se i taj tok uzme u obzir, iz izraza

$$h = \frac{qL}{k_2(1 - q/k_1)} F_k. \quad (21)$$

Vrijednosti veličine F_k koja ovisi o omjeru L/D i $D/2r_0$ (gdje je r_0 promjer drenažne cijevi) nalaze se u tabl. 13.



Sl. 12. Uz određivanje visine podzemne vode

Tablica 13

VRIJEDNOSTI VELIČINE F_k ZA ODREĐIVANJE VISINE PODZEMNE VODE IZNAD DRENAŽNE CIJEVI

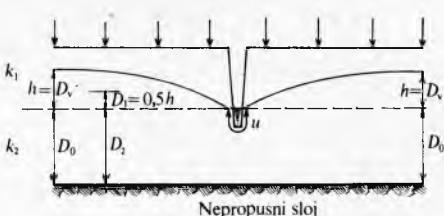
L/D $D/2r_0$	100	50	25	12,5	6,25	3,125	1,563	0,781
8192							2,65	
4096							2,43	
2048							2,21	
1024							1,99	
512							1,76	
256							1,54	
128							1,32	
64	13,67	7,64	4,53	2,96	2,19	1,78	1,54	
32	13,47	7,21	4,31	2,74	1,96	1,57	1,32	1,10
16	13,27	6,99	3,86	2,30	1,52	1,13	0,88	0,66
8	13,02	6,76	3,64	2,08	1,30	0,90	0,66	0,44
4	12,79	6,54	3,42	1,86	1,08	0,68	0,44	—
2	12,57	6,32	3,20	1,63	0,85	0,46	—	—
1	12,33	6,08	2,95	1,40	0,62	—	—	—
0,5	12,03	5,77	2,66	1,11	—	—	—	—
0,25	11,25	5,29	2,20	—	—	—	—	—

Kad se uzme u obzir vertikalni, horizontalni i radikalni tok podzemne vode, visina podzemne vode iznad razine vode u drenažnom odvodu izračunava se iz izraza (L. S. Ernst)

$$h = \frac{qD_v}{k_1} + \frac{qL^2}{8k_2D_0} + \frac{qL}{\pi k_2} \ln \frac{D_0}{u}, \quad (22)$$

gdje je $D_v = h$, D_0 razlika visine razine vode u drenažnom odvodu i nepropusnog sloja, a u je vodom opakivani obod drenažnog odvoda. Izraz vrijedi za homogeno tlo i kad je razlika visine D_0 između razine vode u drenažnom odvodu i nepropusnog sloja manja od $\frac{1}{4}L$. Ako se u tlu razlikuju dva sloja s propusnošću k_1 i k_2 koji se međusobno mnogo ne razlikuju, a drenažni se odvod nalazi na granici slojeva, visina podzemne vode izračunava se iz izraza

$$h = \frac{qL^2}{8(k_1D_1 + k_2D_2)} + \frac{qL}{\pi k_2} \ln \frac{D_0}{u}. \quad (23)$$



Sl. 13. Uz određivanje visine podzemne vode kad se drenažni odvod nalazi na granici slojeva različite vodopropusnosti

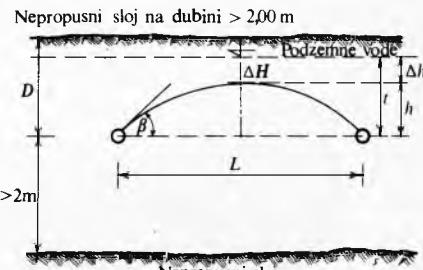
Značenje veličina D_1 i D_2 vidi se na sl. 13. Kad je $k_1 \ll k_2$, vrijedi relacija (22), a kad je $k_1 \gg k_2$, može se upotrijebiti relacija (19).

Proračun udaljenosti među drenažnim odvodima ovisi (prema A. N. Kostjakovu) o položaju vodonepropusnog sloja. Ako je nepropusni sloj na većoj dubini od 2 m ispod drenažnog odvoda (sl. 14), udaljenost među drenažnim odvodima računa se prema izrazu

$$L = \frac{\mu \pi k T (1 + \beta / 90)}{\delta (\ln \frac{b}{d} - 1) \ln \frac{t}{n}}, \quad (24)$$

gdje je μ faktor koji iznosi 1,5, k koeficijent propusnosti (m/s), T vrijeme (s) potrebno da se snizi razine podzemne vode za ΔH (sl. 14), β srednji kut depresione linije razine podzemne vode koji ovisi o vrsti tla, a iznosi $2,7 \dots 18,0^\circ$ (manji za pjeskovito, a veći za glinasto tlo), $\delta = (A - C)/100 = 0,04 \dots 0,23$, gdje je A maksimalni a C poljski vodni kapacitet tla, d promjer drenažne cijevi, b razmak cijevi, $t = h + \Delta H$ (sl. 14), a n koeficijent ponavljanja. Tada se dotok u drenažni odvod (m^3/s) određuje prema izrazu

$$q = \frac{\mu \pi k h}{\ln(L/d)} (1 + \beta / 90). \quad (25)$$



Sl. 14. Uz određivanje razmaka drenažnih odvoda

Ako je nepropusni sloj na dubini manjoj od 2 m ispod drenažnog odvoda, razmak (m) među drenažnim odvodima računa se prema formuli

$$L = \left[\frac{2\mu k T h(t + 2a)}{\delta(t - h)} \right]^{1/2}, \quad (26)$$

gdje je a (m) visinska razlika između drenažnog odvoda i nepropusnog sloja. Tada se dotok (m^3/s) u drenažni odvod dobiva iz relacije

$$q = \frac{2kh(2a + h)}{L}. \quad (27)$$

Kad je drenažni odvod upravo na nepropusnom sloju, razmak među drenažnim odvodima i dotok u drenažni odvod dobivaju se iz izraza (26) i (27), ako se postavi da je $a = 0$.

Ako se melioriraju područja u nekim razdobljima godine natapaju ili ako je velika intenzivnost oborina, mora se računati s nestacioniranim tokom u drenažnim odvodima, koji utječe i na potreban razmak među drenažnim odvodima. To je opravданo kad je vremenski ograničeno trajanje sniženja razine podzemnih voda s obzirom na uzbunjene usjeve i na mogućnost pojave šteta zbog predugog zadržavanja podzemne vode na višoj razini od optimalne. Tada se razmak među drenažnim odvodima određuje prema izrazu

$$L = \pi \left(\frac{kDt}{\mu} \right)^{1/2} \left(\ln 1,116 \frac{h_0}{h_t} \right)^{-1/2} \quad (28)$$

gdje je D dubina drenažnog odvoda ispod površine tla, t trajanje sniženja razine vode (dan), h_0 razine podzemne

vode na polovici razmaka među drenažnim odvodima u trenutku $t = 0$, a h_t ta razina u trenutku t , koja se dobiva iz izraza

$$h_t = 1,16 h_0 \exp(-\alpha t), \quad (29)$$

u kojemu je α reakcijski faktor određen relacijom

$$\alpha = \frac{\pi^2 k d}{\mu L^2}, \quad (30)$$

gdje je d promjer drenažne cijevi.

Dimenzioniranje drenažnih cijevi. Potreban promjer drenažne cijevi ovisi o količini vode koju treba odvesti, nagibu cijevi položene u tlo, otporu što ga hraptavost cijevi suprotstavlja strujanju, te o vrsti strujanja (laminarno ili turbulentno). Potrebni nagib cijevi određen je izrazom

$$i = \frac{\lambda}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (31)$$

gdje je λ faktor otpora cijevi, d promjer, v brzina vode, a g ubrzanje gravitacije. Protok kroz cijevi uz laminarno strujanje određuje se pomoću izraza za

$$\text{glatke cijevi: } Q = 30 a^{-0.57} d^{2.71} i^{0.50}, \quad (32a)$$

$$\text{rebraste cijevi: } Q = 21,8 d^{2.67} i^{0.50}, \quad (32b)$$

a uz turbulentno strujanje pomoću izraza za

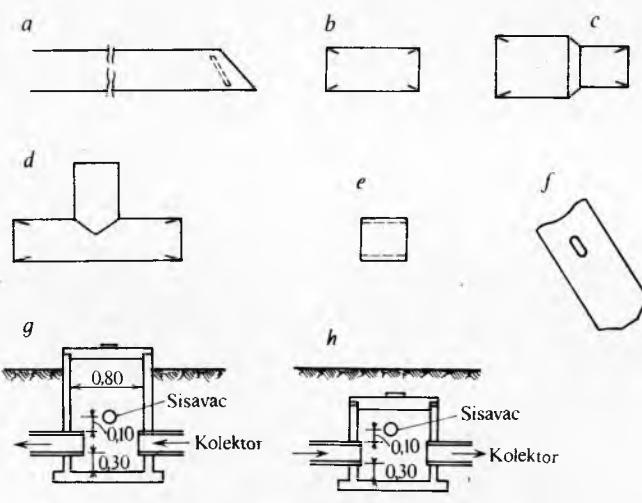
$$\text{glatke cijevi: } Q = 50 d^{2.714} i^{0.572}, \quad (33a)$$

$$\text{rebraste cijevi: } Q = 22 d^{2.667} i^{0.500}. \quad (33b)$$

U izrazima (32) i (33) d je promjer cijevi, a a je faktor koji ovisi o čistoći cijevi (za čistu cijev $a = 0,40$).

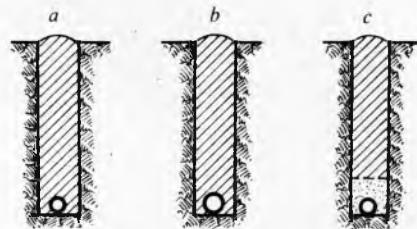
Materijal za cijevnu drenažu. Kao cijevi za drenažu upotrebljavaju se glinene i betonske cijevi, te cijevi od plastičnih materijala. Cijevi mogu biti glatki i rebrasti. Najviše se upotrebljavaju rebraste cijevi od polivinilklorida. Izrađuju se s unutrašnjim promjerom od 50, 60, 80, 100 i 125 mm, duljine 70...200 m, a isporučuju se u kolutima. Cijevi imaju šest redova rupa sa ~ 100 rupa na metar duljine. Površina rupe iznosi $1\cdots 3 \text{ mm}^2$, a njihov je promjer $0,6\cdots 0,9, 1,1\cdots 1,5$ i $1,7\cdots 2,0 \text{ mm}$. Ukupna površina rupa po metru duljine iznosi $12\cdots 48 \text{ cm}^2$. Potreban promjer rupa na cijevi ovisi o geomehaničkim svojstvima tla.

Za priključak na spojne bunare upotrebljavaju se krute cijevi s poklopacima i štitnicima (sl. 15a i f), za spajanje cijevi spojnica, reduksijske spojnica, T-spojnica i čepovi (sl. 15b, c, d i e), a za spajanje drenažnih cijevi nadzemni ili podzemni bunari (sl. 15g i h).



Sl. 15. Fazonski komadi cijevi za podzemnu drenažu

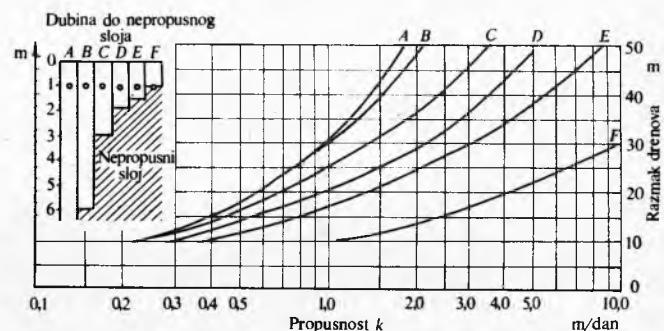
Ako se drenažne cijevi polažu u tlo bogato prahom slabih kohezijskih svojstava, kad postoji opasnost od zamuljenja cijevi, postavljaju se oko cijevi mehanički filtri (sl. 16). To mogu biti porozni materijali omotani oko cijevi ili filtri od granuliranog šljunka, treseti, slame i sl. koji se postavljaju na dno drenažnog rova.



Sl. 16. Mehanički filtri oko cijevi za podzemnu drenažu. a bez filtra, b filter oko cijevi, c filter iznad cijevi

Drenažne cijevi postavljaju se pomoću posebnih strojeva, tzv. drenmastera. Postoje dva tipa takvih strojeva. Jednima se drenažne cijevi uvlače u tlo, a drugima se kopaju drenažni rovovi. Prvi se upotrebljavaju kad je tlo lakše i za tla nevezanog sastava. Drugi frezanjem (glodanjem) kopaju rovove do dubine od 1,6 m, a široke 17...40 cm. Kad se ugrađuju filtri, rovovi su široki 17...30 cm.

Dubina i razmak drenažnih cijevi. Dubina drenažnih cijevi ovisi o geomehaničkim svojstvima tla, njegovoj uslojenosti i dubini vodopropusnog sloja, dok razmak među drenažnim cijevima ovisi o vodopropusnim svojstvima tla i dubini drenažnih cijevi. U tlu težega mehaničkog sastava s manjom horizontalnom propusnošću i s pličim vodonepropusnim slojem potreban je manji razmak drenažnih cijevi (sl. 17).



Sl. 17. Razmak drenažnih cijevi s obzirom na propusnost tla i dubinu nepropusnog sloja. Propis drenažne cijevi 100 mm, dubina odvodnjavanja 50 cm, dubina cijevi 1,0 m, modul odvodnjavanja 10 mm/dan



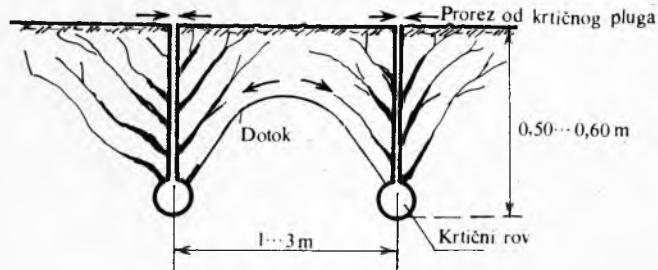
Sl. 18. Raspored i dubina drenažnih cijevi uz jednaki efekt odvodnjavanja. a veća dubina i veći razmak, b manja dubina i manji razmak drenažnih cijevi

U propusnom tlu isti se efekti odvodnjavanja može postići različitim kombinacijama dubine i razmaka drenažnih cijevi. Dublje postavljene drenažne cijevi traže veće razmake, a pliče drenažne cijevi manje razmake (sl. 18).

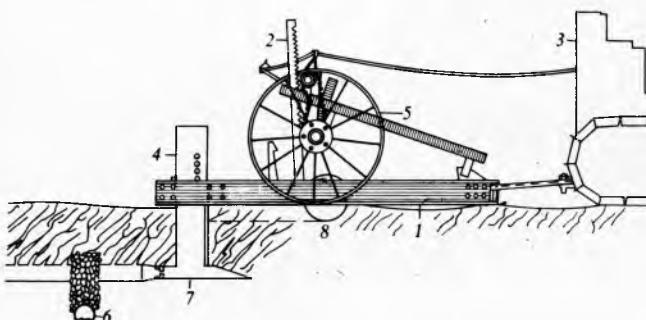
Krtična drenaža potrebna je tlima teškoga mehaničkog sastava zasićenima oborinskom vodom koja se zbog zbijenosti

i male propusnosti tla, te množine finih kapilarnih pora, ne može procijediti u dublje slojeve. Zbog toga je zemljiste trajno ili povremeno suviše vlažno. Djelotvornost je krtične drenaže to veća što je veći sadržaj glinenih čestica u tlu. Krtičnom se drenažom, naime, stvaraju podzemni rovovi (sl. 19). Takva drenaža ne može se uspješno primijeniti u tlama s manje od 30% glinenih čestica. Smjer rovova treba da bude u smjeru najvećeg pada, a njihov pad treba da iznosi od 0,5...1,0% do 4...7%. Rovovi se izvode na dubini 50...60 cm s razmakom od 1...3 m.

Krtična se drenaža izvodi pomoću specijalnih krtičnih plu-gova s kuglom promjera 7...10 cm. Plug vuče traktor ili gusjeničar. Engleski tip pluga (sl. 20) smatra se danas najuspješnijim oruđem za krtičnu drenažu.



Sl. 19. Krtični rovovi



Sl. 20. Krtični plug. 1 teška greda koja sprečava da neravne površine pokvare nagib rova, 2 zupečana letva za podizanje pluga, 3 traktor, 4 noge za bušenje krtičnog rova do dubine od 75 cm, 5 transportni kotač, 6 drenažna cijev koja služi za odvod vode iz krtičnih rovova, 7 naprava za bušenje rovova promjera 75 mm, 8 nož pluga

Krtični drenažni odvodi djeluju kao pojedinačne odvodne cijevi, ali se bolji rezultati postižu u kombinaciji s plitkim i rijetko postavljenim kanalima (kombinirana drenaža).

Podrivanje (rahljenje) zemljista postupak je za izmjenu strukture tla. Želi se, naime, od zbijenog i intaktnog tla dobiti rastresito tlo koje može dobro prihvati vodu i koje je, osim toga, dobro prozračeno. Postupak podrivanja primjenjuje se najviše kad se želi meliorirati tlo na kojem se zadržava oborinska voda (pseudoglej), u kojem postoji zbijeni podorančki sloj koji sprečava ocjeđivanje vode. U takvu tlu prevladava polidrička i pločasta struktura s oštrim bridovima.

Nakon rahljenja mora se stabilizirati kvalitetna promjena svojstava tla. Tlo se može stabilizirati kemijski (u prvom redu dodavanjem kalcija) i biološki (obogaćivanje korijenjem).

Prema dosadašnjem iskustvu, duboko se podrivanje provodi u tlu kojem zbijeni sloj leži na vodopropusnoj podlozi. Ako je, međutim, nepropusni sloj debo, mora se primijeniti kombinirano odvodnjavanje, tj. podrivanje u kombinaciji s cijevnom drenažom. Iskustvo, osim toga, pokazuje da podrivanje nije

uspješno u vlažno-plastičnim tlama bogatim glinom i tlama bogatim muljem ako je sadržaj gline u njima manji od 17%.

Brazde podrivanja izvode se u smjeru pada zemljista, a taj pad za uspješno podrivanje ne smije biti veći od 5%. Dubina podrivanja ovisi o dubini zbijenog sloja. Tlo na kojem se zadržava voda i na kojem postoje duboki zbijeni slojevi podriva se najmanje od dubine od 75...80 cm (sl. 21), jer se pliće podriveno tlo brzo zasiti vodom, pa može doći do ponovnog zbijanja. Razmak brazda iznosi u prosjeku 75 cm s najmanjim preklapanjem od 30 cm.

Podriva se statičkim ili vibracijskim podrivalima, i to u vrlo sušnim ljetnim mjesecima kad je tlo raspucano. U područjima s godišnjim oborinama većim od 600 mm, ili kad se podriva u nepovoljnim vremenskim prilikama, tlo se zasićuje vodom, što djeluje štetno na njegovu strukturu. Tada je potrebno kombinirano odvodnjavanje: rahljenje u kombinaciji s cijevnom drenažom.

Duboko oranje (melioracijsko oranje). To je odrezivanje i prevrtanje dijela tla najmanje debljine od 60 cm s jednoorančkim plugom. Prevrtanjem se dio tla dovodi na površinu, pa se nakon ravnjanja sljedećim poprečnim oranjem mijesha s gornjim slojevima oranice. Istdobro se tlo rahli, pa se povećava sposobnost upijanja vode.

Duboko oranje daje dobre rezultate kad je tlo srednje pjeskovito i kad se na tlu nalaze grumeni veoma zbijene zemlje. Ne preporuča se duboko oranje kad gornji sloj sadrži više od 35% gline, kad je tlo muljevit sa sadržajem gline manjim od 20% i kad je visoka razina podzemne vode.

Primjena kombiniranog odvodnjavanja. Za prihvaćanje voda iz krtičnih rovova ili podrivene zone potreban je kolektor (recipijent, kolektorski kanal ili drenažna cijev). Vrijednost takvog kombiniranog sustava ovisi o djelovanju kolektora i o stabilnosti veze između krtičnih rovova, odnosno podrivene zone i kolektora. Kad se fizikalna svojstva tla izmijene krtičenjem ili podrivanjem, sva voda otjeće na dubini od 50...60 cm, pa se to može smatrati specifičnim površinskim tokom, s jedinom razlikom da se tok vode koncentriira na dijelovima koji su međusobno udaljeni 1...3 m. Ako je tlo bilo podriveno, kanali su slabije izraženi, pa je otjecanje slično kao da je provedeno dvostruko međusobno okomito krtičenje (kvadratno krtičenje) s nešto manjom koncentracijom dotoka.

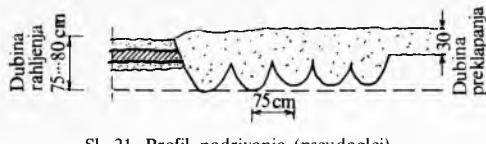
Radi koncentracije otjecanja mora filterski materijal kojim je ispunjen kolektor prihvati vodu koja dotječe da se ne bi zadržavala u kanalima stvorenim krtičenjem ili podrivanjem. Kad bi se to, naime, dogodilo, umjetno stvorena struktura brzo bi se poremetila. Osim toga, tlo u modificiranom stanju mora imati veću propusnost za vodu nego kad je primijenjeno drenažno odvodnjavanje bez krtičenja ili podrivanja, jer tada voda u drenažni odvod ulazi na cijeloj duljini drenažne cijevi. Takva propusnost tla potrebna je samo na dubini između zone krtičenja ili podrivanja i zone u kojoj su drenažne cijevi. Propusnost tla iznad tih zona manje je važna za odvodnjavanje.

Tablica 14
OVISNOST RAZMAKA CIJEVNIH KOLEKTORA O PADU TERENA

Pad terena %	Razmak cijevnih kolektora m
0,2	30...50
0,5	35...40
1,0	40...45
2,0	45...50
3,0	50...60
5,0	60...70

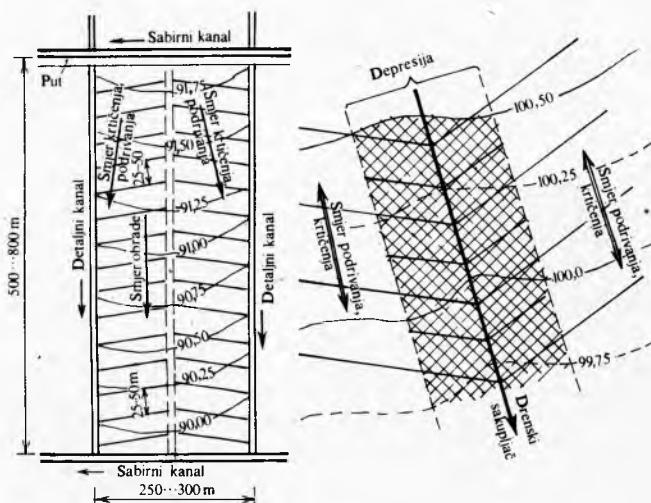
Tablica 15
SVOJSTVA TALA POGODNIH ZA PODRIVANJE I KRTIČENJE

Vrsta tla	Podrivanje	Krtičenje
Gлина %	> 17	> 30
Prah %	< 70	< 60
Pjesak %	< 50	< 50



Sl. 21. Profil podrivanja (pseudoglej)

Razmak drenažnih cijevi ovisi o intenzivnosti oborina, vrsti tla i nagibu terena (tabl. 14). Te je razmake teško odrediti nekim formulama, pa se najčešće određuju na eksperimentalnim poljima. Kolektori se postavljaju na dubinu od 0,90...1,00 m. Okomito ili pod malim kutom niz padinu provodi se krtičenje ili podrivanje (sl. 22).



Sl. 22. Sheme kombiniranog odvodnjavanja

Da li će se za kombinirano odvodnjavanje upotrijebiti krtičenje ili podrivanje, ovisi o tipu tla te o sadržaju gline i praha (tabl. 15).

Gradnja sustava za odvodnjavanje

Priprema gradnje. Predradnje za regulaciju vodnog režima mogu se svrstati u dvije skupine: opća priprema regulacije vodnog režima i tehnička priprema.

Opća priprema obuhvaća komasaciju (v. *Komasacija zemljišta*, TE 7, str. 195) i odvajanje poljoprivrednog zemljišta od šumskih površina i naseljenih područja. Tehnička priprema obuhvaća, osim izradbe podloge (hidroloških, pedoloških, geodetskih) za projektiranje i izvedbu, još i krčenje i ravnjanje terena.

Krčenje i grubo ravnjanje terena uključuje i zatrpanje starih kanala, graba i većih depresija.

Prije ostalih melioracijskih zahvata treba odstraniti biljni pokrov koji se sastoji od gustih skupina višegodišnjih odrvenjelih biljaka, panjeva i manjih šumaraka. Šumarci se uklanjaju kad smetaju oblikovanju rudine (table) ako je to ekonomično. Ako je, naime, potrebno iskrčiti 0,5 ha šumarka da bi se dobila rudina površine od 25 ha, krčenje šumarka (sjeka, vađenje panjeva) može iziskivati veće troškove nego melioracija cijele rudine. Tada je bolje smanjiti obradivu površinu, a na ostalom dijelu uz šumarak posaditi topolu ili drugo drveće.

Kad se uklanja šuma, najbolje je ukloniti (ručno ili pomoću stroja) panj s drvetom, jer je to lakše i jeftinije. Prema gustoći drveća iskorijenjeno se drveće skuplja na jednom ili više mjeseta na rudini. Ako drvo nije moguće drukčije iskoristiti (za loženje, u industriji), ono se spaljuje. Ako na zemljištu ima depresiju ili dijelova koji se neće obrađivati, panjevi se deponiraju. To, međutim, zahtijeva utovar, transport i depoziranje. Panjevi se mogu i zatrpati. Tada se iskopa jama dubine 4...5 m. Panjevi se angledozerima doguraju do jame koja se napuni do razine od ~ 2 m ispod površine tla. Ostatak se napuni zemljom s nadvišenjem od ~ 0,5 m iznad razine okolišnog zemljišta, jer panjevi ne ispunjavaju potpuno jamu. Nakon nekog vremena taj će se humak slegnuti i izravnati s ostalim zemljištem. Panjevi se mogu uklanjati i dinamitom, što obično nije skuplje od ostalih postupaka, ali traži stručne radnike.

Grmlje koje raste pojedinačno ili kao živica najčešće se siječe ručno, ali postoje i posebni strojevi za sječenje koji se montiraju na traktor. Poslije toga se zemljište izore. Ako grmlje ima plitko korijenje, zemljište se prelazi teškom tanjuricom ili tanjurastim plugom. Ostaci iskrčenog grmlja ostaju na polju do dvije godine.

Dugogodišnje trave uništavaju se paljenjem, oranjem, tanjuranjem ili pomoću herbicida. Postoje i strojevi za paljenje trave i biljnih ostanaka.

Uklanjanje biljaka sa zemljišta vrlo je važna priprema faza melioracije, jer ostaci trave, grmlja, drveća i panjeva otežavaju rad sijačica, kombajna i drugih strojeva. Oni, osim toga, vrlo često uzrokuju kvarove na strojevima.

Dosadašnja praksa pokazuje da uređenje površina većih od 200 ha, koje su na 5...10% površine obrasle grmljem i drvećem, traži mnogo mukotrpnog rada, što često usporuje melioraciju novih površina.

Oblikovanjem rudine nastaju sa svih strana kanali ili brazde za odvodnjavanje. Iskopavanjem se stvaraju velike hrpe zemlje (ponekad i nekoliko tisuća m³). Ako na rudini nema starih kanala, graba ili većih depresija, ta se zemlja mora jednoljubno razgrnuti po cijeloj rudini. Pri tom se mora paziti da se zbog lošeg razgrtanja ne stvore depresije u sredini rudine, što bi onemogućilo odvodnjavanje. Razgrće se angledozerima (udaljenosti do 100 m), grejderima (100...250 m) i skrejperima (više od 250 m). Jeftinije je razgrati skrejperima točkašima nego elevatorskim skrejperima. Skrejperima se može prebacivati zemlja i na udaljenost od 2000 m, što znači da se zemlja prebacuje s jedne na drugu rudinu. Kad je potrebno razgrnuti veće količine zemlje, potreban je jedan angledozer i nekoliko skrejpera. Zemlju koju je iskopao bager treba, naime, razgrnuti angledozerom da se omogući rad skrejpera.

Pri zatrpanju starih kanala, graba i većih depresija treba ih najprije isušiti (odvođenjem vode ili pumpanjem), jer se ne smiju zatrpati dok su vlažni. Tek poslije toga mogu se zatrpati, s tim da se ostavi nadvišenje od 10...20 cm kako bi se površina nakon slijeganja nasute zemlje izravnala.

Obračun obujma iskopa i nasipanja. Racionalna se priprema zemljišta postiže kad je obujam iskopa (V_s) jednak obujmu nasipanja (V_n) i kad je premještanje zemlje minimalno. Zbog toga je potrebno pri projektiranju izračunati te obujme i što više izjednačiti ih, određujući pri tom dubine iskopa i visine nasipanja. Obujam iskopa i nasipanja za kvadratni dio rudine izračunava se pomoću relacija:

$$V_s = \frac{L^2}{400} \frac{H_s^2}{H_s + H_n}, \quad (34a)$$

$$V_n = \frac{L^2}{400} \frac{H_n^2}{H_s + H_n}, \quad (34b)$$

u kojima je L duljina stranice kvadrata, H_s zbroj dubina iskopa u četiri vrha kvadrata, a H_n zbroj visina nasipanja također u četiri vrha kvadrata. Relacije (34) omogućuju dovoljno točno izračunavanje obujma iskopa i nasipanja ako se rudina podijeli na dovoljno veliki broj kvadrata. Često se, da se pojednostavi proračun, odabiru za proračun kvadrati sa stranicama od 20 m, pa prvi član u relacijama (34) postaje jednak jedinici.

Uski napeti slog tipični je površinski sustav odvodnje. Takav sustav naziva se i dvostrešnom baulacijom ili sloganjem. U nas se najčešće nagib sloganova postiže dvokratnim ili trokratnim oranjem. Širina sloga iznosi 25...30 m s padom na objema stranama od 2...3%. Između sloganova nalaze se jarni ili vodene brazde koje se poslije oranju oblikuju kanalokopačima. Vodene brazde idu od sredine rudine prema rubnim kanalima, a pad brazda iznosi 1...2%. Na duljoj strani rudine nalaze se uvratine preko kojih strojevi prelaze sa sloga na slog. Uvratina mora biti za ~ 2 m šira od najšireg sloga. Da bi se omogućio lagan prijelaz strojeva sa sloga na slog, jarni ne sijeku uvratine, nego se jarni pod uvratinom produžuju cijevnim ispustom. Promjer ispusta ne smije biti manji od 15 cm. Ispust je od betonskih, plastičnih ili gli-

nenih cijevi. Kao najbolje pokazale su se betonske perforirane cijevi. Dubina jarka na ulazu u cijevni ispust iznosi 50...60 cm. Dno je jarka široko 25...30 cm s pokosom 1:0,5. Često se nazivaju kanalima četvrtog reda.

Izradba je takvog sloga jednostavna. Najprije se iskolči pravci i šrine slogova, te junci. Ore se tek kad je tlo grubo izravnano. U sredini sloga najprije se pooru dvije plitke brazde, svaka na svoju stranu. Zatim se poore od sredine, s tim da se zahvate i dvije plitke brazde. To je potrebno da u sredini sloga ne bi ostao dio zemljišta nepooran. Dubina je prvog oranja 30...40 cm. Tako se navlači zemlja prema sredini sloga, pa se počinje formirati dvostrešni pad prema jarcima. Poslije dva do tri oranja za jednu ili dvije godine dobiva se dobro oblikovan slog. Zatim se ispod uvratina postave cijevni ispusti, a nakon toga se ore uvratina, i to naoravanjem prema sredini rudine. Ne smije se naoravati prema kanalu. Pri tom se mora paziti da se početnom brazdom uz kanal ne stvari prirodni jarak koji bi smetao odvodnji i radu strojeva. Konačno se kanalokopačem oblikuju junci. Bolji je kanalokopač koji baca zemlju na obadvije strane i koji oblikuje jarak jednim prohodom. Za to je potreban traktor veće snage s pogonom na sva četiri kotača, koji radi s malim brzinama (500...800 m/h).

Slično se izrađuju već opisani sustavi: sustav sa srednjem dubokim kanalima, dvostrešna baulacija (talijanski sustav) i dvostrešna baulacija prilagođena našim uvjetima. Također slično, s nešto drukčijim dimenzijama slogova, izrađuje se sustav dubokog oranja.

Široki napeti slog. Slogovi su široki 90...100 m, a nekada i 120 m. Smjer je oranja okomit na pravac sloga. Slog je dvostrešan s padom od 5^{0/00}. Između slogova nalaze se junci s vrlo blagim pokosom (1:10 do 1:15). Tako mali pokos potreban je zbog smjera oranja i ostalih agrotehničkih radova, jer strojevi ne samo da prolaze preko jaraka nego i obrađuju cijeli jarak. Junci imaju nagib od 1% prema obodnom kanalu. Nakon iskopa jarka kanalokopačem sredinom jarka oblikuju se vrlo plitke brazde.

Sustav širokog sloga povoljniji je s gledišta iskorištenja strojeva, ali s gledišta odvodnjavanja potpuno ne zadovoljava na ravnim terenima, ali je pogodan za nagnute terene.

U sustavu širokog sloga postoje uvratine na kraćim stranama rudine. Uvratine su široke 12...18 m, one su jednostrešne i nagnute prema prvom jarku.

Za izradbu širokoga napetog sloga potrebno je prebaciti velike količine zemlje i na udaljenosti veće od 50 m. Nakon iskolčenja mreže sustava započinje rad sa strojevima, i to od odvodnih kanala. Pomoću anglozera kopaju se kanali s obje strane, a zemlja se prebacuje prema sredini sloga. Tako se na mjestu kanala dobiva niža razina, a prema sredini sloga uzvisina. Kanal je širok ~8 m, a dubok ~50 cm, pa se za svaki metar kanala iskopaju 4 m³ zemlje, a na svaku stranu prebacuje se po 2 m³. Nakon iskopa grejderom zemljište se fino izravna uz izradbu potrebnog nagiba. Tek je tada zemljište pripremljeno za oranje. Ore se poprečno na slog. Nakon svih radova, a to znači i poslije sjetve, kanalokopačem se oblikuju plitke brazde.

Cijevna drenažna cijev. Cijevi se polažu u iskopani rov. Ako se rovovi kopaju strojem, a cijevi polažu ručno, širina rova je tolika da se u njemu može raditi. Ako, međutim, obje operacije obavlja stroj, rov je širok 17...30 cm. Dubina rovova i razmak drenažnih cijevi određeni su hidrauličkim proračunom. Obično je rudina dugačka 800 m, a široka 300 m. Drenažna je dvostrešna, od sredine rudine prema kanalima, što znači da su drenažne cijevi duge 150 m. Pad drenažnih cijevi iznosi 1,5...2,0^{0/00}. Dubina je drenažnih cijevi ~100 cm, a određena je hidrauličkim proračunom.

Upotrebljavaju se glinene drenažne cijevi i cijevi od plastičnih materijala. Proizvode se glinene cijevi duljine 33 cm s unutrašnjim promjerom 5...10 cm. Plastične cijevi isporučuju se u koturima, a režu se na 20...50 m; perforirane su i imaju unutrašnji promjer od 5...20 cm. Kraj plastične drenažne cijevi izlazi neposredno u kanal, dok se na kraj glinene cijevi umeće plastična cijev duljine ~1,5 m, od koje je 1 m u tlu,

a 0,5 m u kanalu. Glinena cijev bi se, naime, u kanalu lako slomila.

Prije polaganja drenažnih cijevi najprije je potrebno iskolčiti pravce drenaže. Ako se polažu betonske cijevi, one se ručno polažu u rov bez obzira na to kako se kopaju rovovi. Plastične cijevi polažu se strojem na koji je navučen kotur s namotanom cijevi. Za polaganje betonskih cijevi potrebno je 7...8 radnika, a za polaganje plastičnih cijevi 3...4 radnika. Zbog toga su troškovi drenaže s plastičnim cijevima, iako su one skuplje, približno jednakim troškovima drenaže s betonskim cijevima.

Postoje strojevi koji imaju i dio za zatravljivanje jarka. Danas mnogi strojevi za polaganje drenažnih cijevi imaju laserski uređaj za kontrolu dubine polaganja cijevi, pa su eliminirane pogreške pri određivanju dubine polaganja.

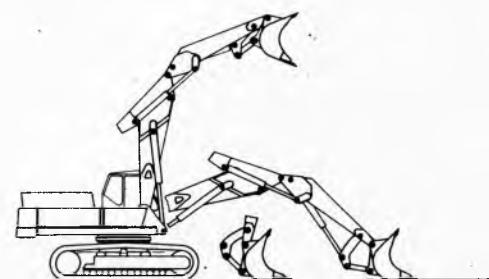
Izbor strojeva za melioracijske rade ovisi o predviđenom opsegu rada.

Kad se radi o manjim zahvatima na uređenju zemljišta, mogu se upotrijebiti oruđa i strojevi koji se obično upotrebljavaju za poljoprivredne rade (v. *Poljoprivredni strojevi*), ali ako su predviđeni veliki melioracijski zahvati, potrebni su posebni strojevi. Strojevi za odvodnjavanje i uređivanje tala mogu se prema namjeni svrstati u sljedeće skupine: traktori, strojevi za glavne rade na površini tla, strojevi za detaljno površinsko odvodnjavanje, strojevi za podzemno odvodnjavanje, strojevi za čišćenje i druge pomoćne rade. Ta se podjela ne smije shvatiti strogo, jer postoje kombinirani strojevi za više namjena, a stalno se pojavljuju i novi tipovi strojeva (v. *Bagerovanje*, TE 1, str. 636; v. *Mehanizacija građevinskih rada*).

Traktori koji se upotrebljavaju za uređivanje tala služe za vuču drugih strojeva te za priključak potrebnog oruđa. Traktori namijenjeni za uređivanje tala ne razlikuju se od traktora za poljoprivrednu, ali zbog velikih naprezanja koja se pojavljuju u upotrebi oni su čvršće građeni. Za rad u teškim uvjetima (npr. za rad na nagnutim zemljištima) prikladniji su traktori na gusjenicama, koji se upotrebljavaju na platnim i pjeskovitim zemljištima. Traktori na gusjenicama mogu se racionalno upotrebljavati na manjim udaljenostima (do 300 m). Zbog male brzine sve se više traktori na gusjenicama zamjenjuju traktorima na kotačima. Slabije pranje traktora na kotačima nadomješta se dodatnim opterećenjem kotača. Za uređivanje tala upotrebljavaju se traktori s kotačima sa širokim pneumaticima niskog tlaka. Traktori s kotačima nezamjenljivi su kad je potrebna velika pokretljivost i brze promjene brzine i smjera.

Strojevi za glavne rade na površini tla mogu se svrstati u tri podskupine: strojevi za iskopavanje, strojevi za premještanje zemlje, te strojevi za iskopavanje i premještanje zemlje.

Univerzalni ekskavator najstariji je stroj za iskopavanje: sastoji se od osnove na gusjenicama ili kotačima, okretne platforme s motorom, kabine i izduženog nosača. Na kraj nosača može se postaviti čeonu kašiku za iskretanje. Stroj može raditi na različitim razinama tla. Osim za iskopavanje, može služiti i za utočište iskopanog materijala. Posebna su vrsta strojevi s beskonacnim lancem na kojem su kašice a nazivaju se vedričarima. Obično se strojevi za iskopavanje nazivaju bagerima. Razlikuju se dva tipa: bager hidrauličar (sl. 23) i bager s užetom. Naziv ovisi o pogonu kašika za iskopavanje.



Sl. 23. Bager hidrauličar

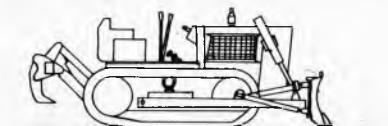
Prvi ima hidraulički pogon, a drugi pogon pomoću užeta. Radni dio može imati kašike za iskopavanje, profilnu kašiku (za kopanje manjih kanala), kašiku za grabljenje i drugo.

Strojevi za premeštanje zemlje služe za prijevoz zemlje i kamenja. Iako se najčešće prevozi traktorom s prikolicom ili velikim kamionima, grade se posebna prijevozna vozila (damperi) za melioracijske radove. To su prijevozna vozila s ojačanim metalnim sandukom i s kotačima za kretanje po teškom terenu.

Kombinirani strojevi za iskopavanje i premeštanje tla obavljaju obje vrste radova. Upotrebljavaju se za premeštanje zemlje na udaljenosti do 500 m.

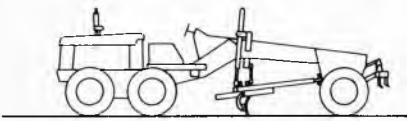
Toj grupi strojeva pripada buldozer koji je postavljen na čvrsti okvir, tzv. buldozersku dasku na kojoj je hidraulički ili mehanički uređaj za podizanje. Buldozer se može primijeniti za različite radove. Za krčenje i čupanje drveća buldozer ima poseban uređaj postavljen na stražnjem dijelu koji se naziva riperom. Glavna je primjena buldozera sjećenje tla i njegovo premeštanje na udaljenosti do 100 m. Osim toga, može se upotrijebiti za oblikovanje različitih profila u tlu, za kopanje jama i kanala, te za zatrpanjvanje depresija i starih kanala. Upotreboom dodatne opreme (riperi, teški plugovi, čupaći panjeva) proširuje se primjena buldozera. Riperima i teškim plugovima tlo se rahli da bi se omogućio rad drugih strojeva.

Za razliku od buldozera koji ima dva nosača daske stalne duljine, na angledozeru (sl. 24) može se mijenjati duljina tih nosača, pa se kut koji zatvara nož daske sa smjerom kretanja može mijenjati. Angledozer može se upotrijebiti za iste radove kao buldozer, ali zbog mogućnosti promjene kuta daske pogodan je za rad na nagnutim terenima, za trasiranje putova na nagibima, kopanje jama i oblikovanje profila.



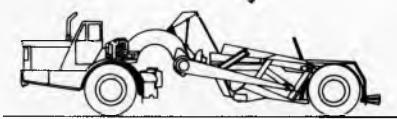
Sl. 24. Angledozer

Tiltodozer ima tako opremljenu dasku da se ona može tako nagnuti da jednom stranom može dublje prodrijeti u tlo. Taj se stroj može dobro iskoristiti za otkopavanje velikog drveća prije čupanja, za iskop jama i kanala, te za rad na nagnutim terenima.

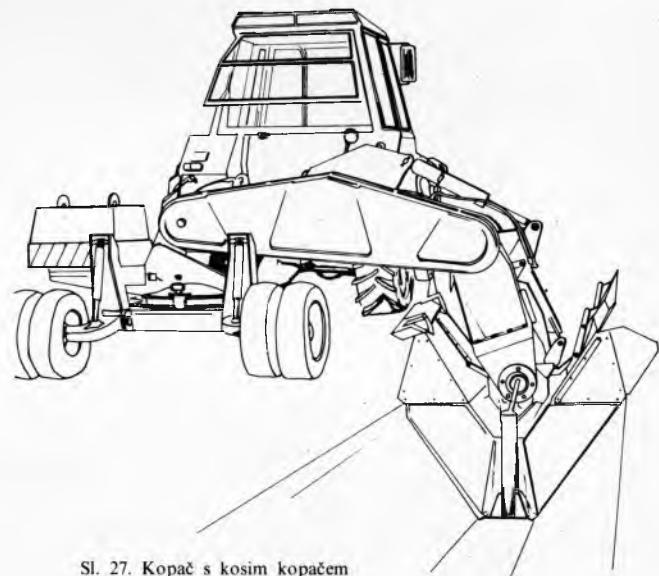


Sl. 25. Ravnjač ili grejder

Ravnjač ili grejder (sl. 25) sastoji se od okvira koji se oslanja na četiri ili šest kotača s pneumaticima. U sredini okvira je daska ili nož koji se može podizati i spuštati, pomocići u stranu, zakretati oko okomite i vodoravne osi, te mijenjati kut sjećenja. Ravnjači se upotrebljavaju za ravnjanje valovitih terena i ravnjanje slogova. Vrlo su pokretni i zbog toga prikladni za fino ravnjanje zemljišta. Za premeštanje zemlje na udaljenosti od 100–250 m racionalno je upotrijebiti ravnjače.



Sl. 26. Skrejper



Sl. 27. Kopač s kosim kopačem

Za premeštanje na veće udaljenosti služe skrejperi (sl. 26). Za razliku od spomenutih strojeva skrejperi ne guraju zemlju, već je sijeku, utovaruju, prevoze i istovaraju. Glavni je dio skrejpera sanduk koji ima nož na prednjoj strani. Nož siječe tlo koje kliže preko njega u sanduk. Skrejperi imaju vrlo jake motore (do 750 kW), a najveći imaju dva motora (jedan za pogon prednje, a drugi za pogon stražnje osovine).

U posljednje vrijeme upotrebljavaju se elevatorski skrejperi koji na prednjem dijelu imaju traku za utovar materijala u sanduk.

Strojevi za detaljnu površinsku obradu. Za oblikovanje široko napetih slogova upotrebljavaju se uglavnom angledozeri, skrejperi i grejderi, dok za oblikovanje usko napetih slogova služe plugovi i kanalokopači.

Kanalokopači su strojevi koji neprekidno obavljaju kopanje kanala. Pri upotrebni ekskavatora i buldozera za kopanje kanala rad se sastoji od više faza, od kojih je samo jedna radna. Kanalokopači razvili su se iz plugova. Plužno tijelo zamijenjeno je dvostrukim ralom koje se nastavlja s dvije odgrnjače promjenljivog razmaka. Najveća dubina kanala bila je 90 cm. Danas se za kopanje kanala upotrebljavaju strojevi s kašikama na lancima, s lopaticama na kotaču, s okomitom i koso postavljenim kotačima i s rovilicama.

Lančasti kopač s kašikama kopa kanal po osi koja je jednaka smjeru kretanja. U novijim izvedbama lanac s kašikama tako je postavljen da je os kanala usporedna s pravcem kretanja. Takav kopač služi za kopanje kanala s okomitim stranama širine 0,30–1,50 m i dubine 2–3 m. Brzina iznosi 24–400 m/h.

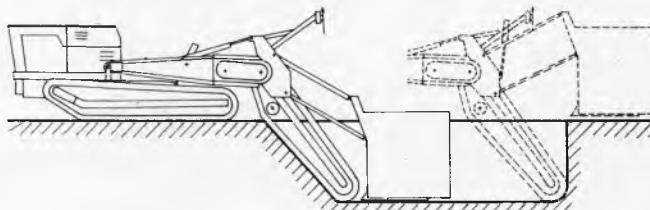
Lopatičasti kopači namijenjeni su za lakše radne uvjete. Dubina kanala iznosi do 1 m, širina 0,28–0,45 m, a brzina kopanja 55–75 m/h.

Kružni kopači s okomitim kotačem služe za kopanje kanala s okomitim stranama. Imaju veću radnu brzinu (do 200 m/h) nego lopatičasti kopači, a održavanje je jednostavnije.

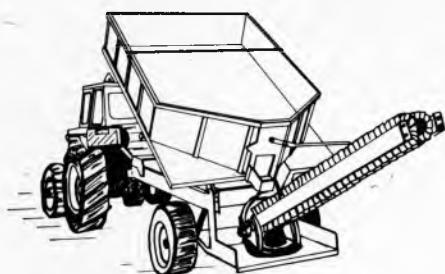
Danas se sve više upotrebljavaju kopači s kosim kotačem (sl. 27) koji imaju noževe na obodu kotača što sijeku i iznose iskopanu zemlju na površinu. Zahvaljujući brzini vrtnje kotača i prikladno postavljenom limenom oklopu, iskopana se zemlja odbacuje u stranu, pa se uz iskopani kanal ne stvaraju nasipi. Mogu se kopati kanali s kosim stranama do dubine od 2 m. Brzina kopanja iznosi od 100–600 m/h.

Strojevi za podzemno odvodnjavanje obuhvaćaju strojeve za polaganje drenažnih cijevi, krtične plugove i podrivače.

Strojevi za polaganje drenažnih cijevi služe za polaganje glinenih i plastičnih cijevi. Takvi strojevi imaju podrivač koji kopa rov u koji se uvlači plastična cijev. Strojevi za polaganje drenažnih cijevi mogu biti samohodni (sl. 28) ili vučeni. Kanalokopač je beskonačni lanac ili okomito postavljeni kotač.



Sl. 28. Stroj za polaganje drenažnih cijevi



Sl. 29. Stroj za polaganje pješčanih filtera u drenažni sustav

Ako se uz drenažu postavlja filter, upotrebljava se posebna prikolica sa sandukom za pijesak i transporterom u obliku beskonačne trake (sl. 29).

M. Čović A. Fabijanić R. Katalinić

NAVODNJAVA

Navodnjavanje je melioracijski postupak kojim se voda dodaje u tlo u razdoblju kad je nema dovoljno, odnosno kad je uzgajane biljke nemaju dovoljno za normalan rast i razvoj. U aridnim područjima pojavljuje se stalni nedostatak vode za uspešan uzgoj većine poljoprivrednih kultura, pa je tamo navodnjavanje prijevo potrebno. U područjima s dovoljnim ali nepovoljno raspoređenim oborinama potrebno je dopunsko navodnjavanje. Na ~55% od površine kontinenata na Zemljici prosječne su godišnje oborine manje od 500 mm (aridna i semi-aridna područja), pa to pokazuje koliku bi površinu trebalo navodnjavati. Primjenom navodnjavanja, naime, mogu se postići viši, stabilniji i kvalitetniji prinosi poljoprivrednih kultura.

Zemljišta uz rijeku u toplijim područjima navodnjavaju se od davnine. Smatra se da je navodnjavanje oko rijeke Murgab i Tedžen (Turkmenска SSR) započelo prije deset tisuća godina, a u dolini Eufrata i Tigrisa, u dolini Nila i u Indiji prije sedam tisuća godina. Navodnjavanje se primjenjivalo pr. n. e. u Kini, Japanu, sjevernoj i središnjoj Africi. Od evropskih zemalja najprije su navodnjavana zemljišta u Italiji, Grčkoj, Engleskoj i Španjolskoj, a poslijepot u Francuskoj i Nizozemskoj. Ima potvrdu da se u našim zemljama navodnjava u srednjem vijeku, ali razvoj navodnjavanja u nas započinje tek nakon drugog svjetskog rata.

Danas se navodnjava oko $190 \cdot 10^6$ ha (oko 15% ukupno obradivih površina) u 99 zemalja. Najviše se navodnjava u Kini ($74 \cdot 10^6$ ha), Indiji ($37 \cdot 10^6$ ha), SAD ($17 \cdot 10^6$ ha), Pakistanu ($12 \cdot 10^6$ ha) i u SSSR ($10 \cdot 10^6$ ha). U Evropi se najviše navodnjava u Italiji ($3 \cdot 10^6$ ha), Francuskoj ($2,5 \cdot 10^6$ ha) i Španjolskoj ($2,3 \cdot 10^6$ ha).

U nas, kako je već spomenuto, navodnjavanje nema duže tradiciju. Količina i sezonski raspored oborina nisu povoljni za ljetne kulture, pogotovo u srpnju i kolovozu, pa su i prinosi mnogo niži od mogućih. U našim glavnim poljoprivrednim područjima pojavljuje se suša u ljetnim mjesecima, zbog koje nastaju često vrlo veliki gubici u poljoprivrednoj proizvodnji. Danas se u nas navodnjava samo $155 \cdot 10^3$ ha, odnosno samo 1,9% od ukupno obradivih površina. Smatra se da je navodnjavanje izvedljivo na $2 \cdot 10^6$ ha u nizinskim područjima, odnosno ukupno na ~ $3 \cdot 10^6$ ha, kad se uračunaju površine krških polja, površine uz korita rijeka i kotline. Može se očekivati da će se u nas u neposrednoj budućnosti navodnjavati ~ $0,6 \cdot 10^6$ ha, a tek u daljoj budućnosti treba računati s navodnjavanjem ($1,5 \cdots 2,0 \cdot 10^6$ ha). Uskoro će se povećati navodnjavane površine u hidrosustavu Dunav-Tisa-Dunav, Ibar-Lepenac, te sustava u Polugu, Pelagoniji i Metohiji. Zelenim planom SR Hrvatske predviđeno je navodnjavanje u Slavoniji i Baranji ($110 \cdot 10^3$ ha), Dalmaciji ($30 \cdot 10^3$ ha) i Istri ($10 \cdot 10^3$ ha). Uz jadransku obalu predviđa se navodnjavanje krških polja i površina u riječnim dolinama na nadmorskim visinama do 100 m.

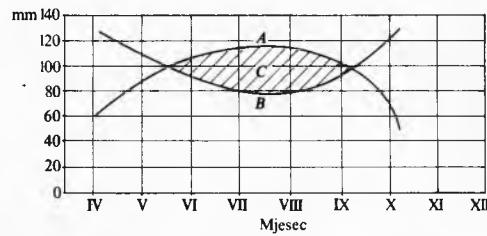
Potreba navodnjavanja ovisi o načinu uzgoja biljaka. Ako se biljke uzgajaju u zatvorenom (staklenici, plastenici, v. Gospodarsko graditeljstvo, TE 6, str. 147), potrebno je tokom

vegetacije stalno navodnjavati. Kad se biljke uzgajaju na poljima, potreba navodnjavanja najviše ovisi o klimatskim prilikama.

Postoje različiti kriteriji za određivanje potrebe navodnjavanja. Etcheverry za uvjete u SAD smatra da je navodnjavanje potrebno u područjima s godišnjim oborinama manjim od 375 mm, ako su godišnje oborine od 375...750 mm, potrebno je dopunsko navodnjavanje, a u područjima s godišnjim oborinama većim od 750 mm navodnjavanje je korisno samo u iznimnim prilikama (vrlo sušna godina, vrlo nepovoljan raspored oborina). Takav se kriterij može smatrati samo grubom aproksimacijom. Tako se npr. na otoku Javi navodnjava ~ $3 \cdot 10^6$ ha, iako prosječne godišnje oborine iznose ~ 2500 mm. Nasuprot tome, tla su na poluotoku Kola suviše vlažna iako godišnje padne samo 200 mm oborina.

Nešto bolje rezultate u procjeni potrebe navodnjavanja daju mnoge metode koje, osim oborina, uzimaju u obzir temperature ili vlažnost zraka. One, međutim, ipak daju samo indikacije o potrebi navodnjavanja jer ne uzimaju u obzir mikroklimatske karakteristike, svojstva tla i zahtjeve pojedinih kultura.

Bolje podatke o potrebi navodnjavanja daje usporedba potrebne i raspoložive vode (sl. 30) u vegetacijskom razdoblju.



Sl. 30. Potrebna (A) i raspoloživa (B) voda za vrijeme vegetacije, C deficit vode

Postoji više metoda za određivanje potrebne i raspoložive vode.

Potrebna voda. Voda je potrebna biljkama radi evapotranspiracije. Evapotranspiracija se može odrediti eksperimentalno ili indirektnim metodama na osnovi klimatskih elemenata. Eksperimentalni postupak, međutim, nije jednostavan zbog potrebe opreme i održavanja točno određenih uvjeta tokom eksperimenta. Zbog toga se najčešće primjenjuju indirektnе metode koje uzimaju u obzir temperaturu zraka (Thoruthwait, Ivanov, Šarov, Bouchet), deficit vlažnosti zraka (Alpatov), veći broj klimatskih elemenata (Turc, Penman), te klimatske elemente s koeficijentima pojedinih kultura (Blaney, Criddle). U praksi se najčešće upotrebljavaju metode L. Turca, H. F. Blaney-W. D. Criddle, te A. N. Ivanova.

Turcova metoda omogućuje proračun evapotranspiracije pomoću izraza

$$E_p = (I_g + 50) \cdot 0,4 \frac{t}{t + 15}, \quad (35)$$

gdje je E_p potencijalna evapotranspiracija (mm/mjesec), I_g prosječna sunčana radijacija (J/cm^2 dnevno), a t prosječna mjesечna temperatura zraka ($^{\circ}C$). Ako je $t \leq 0^{\circ}C$, treba staviti $E_p = 0$. Koeficijent 0,4 vrijedi za sve mjesecе osim za veljaču (februar), za koju ima vrijednost 0,37. Izraz (35) vrijedi za područja s relativnom vlažnošću većom od 50%. Za područja s aridnom klimom (relativna vlažnost zraka manja od 50%) vrijednosti se E_p (35) korigiraju množenjem faktorom

$$m = 1 + \frac{50 - r}{70}, \quad (36)$$

gdje je r relativna vlažnost zraka. Vrijednosti za I_g određuju se iz izraza

$$I_g = I_{gA} \left(0,18 + 0,62 \frac{h}{H} \right), \quad (37)$$

gdje je I_{gA} sunčana radijacija koja bi doprla do Zemljine površine kad ne bi bilo atmosfere (J/cm^2 dnevno) (tabl. 16), H trajanje dana (tabl. 17), a h stvarno trajanje insolacije. I_{gA} i H ovise o geografskoj širini.

Tablica 16
PROSJEČNA DNEVNA SUNČEVA RADIJACIJA (J/cm^2)
PREMA GEOGRAFSKOJ ŠIRINI

Mjesec	Geografska širina				
	40°	42°	44°	46°	48°
Siječanj (januar)	1524	1403	1281	1164	1074
Veljača (februar)	2072	1959	1846	1733	1202
Ožujak (mart)	2818	2726	2633	2541	2449
Travanj (aprila)	3488	3433	3374	3316	3257
Svibanj (maj)	3952	3936	3915	3894	3873
Lipanj (juni)	4124	4124	4120	4120	4116
Srpanj (juli)	4011	3994	3977	3961	3944
Kolovoza (august)	3592	3546	3500	3450	3400
Rujan (septembar)	2973	2889	2805	2717	2629
Listopad (oktobar)	2244	2135	2026	1918	1805
Studenici (novembar)	1633	1516	1394	1273	1151
Prosinc (decembar)	1352	1231	1110	988	871

Tablica 17
MJESEČNO DNEVNO SVJETLO (h) NA RAZLIČITIM
GEOGRAFSKIM ŠIRINAMA

Mjesec	Geografska širina				
	40°	42°	44°	46°	48°
Siječanj (januar)	301	294	287	280	273
Veljača (februar)	301	298	295	292	288
Ožujak (mart)	371	370	370	370	369
Travanj (aprila)	398	401	404	407	410
Svibanj (maj)	446	452	458	465	472
Lipanj (juni)	449	457	465	473	481
Srpanj (juli)	455	462	469	476	484
Kolovoza (august)	425	429	434	439	444
Rujan (septembar)	374	375	376	377	378
Listopad (oktobar)	346	344	342	340	337
Studenici (novembar)	300	295	290	284	278
Prosinc (decembar)	291	283	276	269	261

Tablica 18
MJESEČNO TRAJANJE DANA (%) PREMA GODIŠNJEM
TRAJANJU DANA

Mjesec	Geografska širina								
	34°	36°	38°	40°	42°	44°	46°	48°	
Januar	7,10	6,99	6,87	6,72	6,62	6,49	6,33	6,17	
Februar	6,91	6,86	6,79	6,73	6,65	6,58	6,50	6,42	
Mart	8,36	8,35	8,34	8,33	8,31	8,30	8,29	8,27	
April	8,80	8,85	8,90	8,95	9,00	9,05	9,12	9,18	
Maj	9,72	9,81	9,92	10,02	10,14	10,26	10,39	10,53	
Juni	9,70	9,83	9,95	10,08	10,21	10,38	10,54	10,71	
Juli	9,88	9,99	10,10	10,22	10,35	10,49	10,64	10,80	
August	9,33	9,40	9,47	9,54	9,62	9,70	9,79	9,89	
Septembar	8,36	8,36	8,38	8,38	8,40	8,41	8,42	8,44	
Oktobar	7,90	7,85	7,80	7,75	7,70	7,63	7,58	7,51	
Novembar	7,02	6,92	6,82	6,72	6,62	6,49	6,36	6,22	
Decembar	6,92	6,79	6,66	6,52	6,38	6,22	6,04	5,86	
Ukupno	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

Blaneyjeva i Cridgeova metoda može se upotrijebiti i za aridna i za ostala klimatska područja. Mjesečna potencijalna evapotranspiracija (mm) određena je izrazom

$$E_p = 0,254(1,8t + 32)pk, \quad (38)$$

gdje je t prosječna temperatura zraka ($^{\circ}\text{C}$), p prosječno mješevino trajanje dana u postocima prema trajanju dana u godini (tabl. 18), a k koeficijent koji ovisi o poljoprivrednoj kulturi (tabl. 19). Treba spomenuti da vrijednost koeficijenta k ovisi o području i mjesecu, pa ih je dobro utvrditi za svaki promatrani slučaj.

Ivanovljeva metoda osniva se na istraživanjima kojima je utvrđeno da je rashod vode iz dijela tla u kojem se nalazi korijenje biljaka približno jednak količini vode koja ishlapi s vodene površine uz istu temperaturu i vlažnost zraka. Ishlapljivanje (mm mjesечно) s vodene površine može se odrediti iz izraza

$$E = 0,0018(25 + t)^2(100 - r), \quad (39)$$

gdje je t prosječna temperatura zraka ($^{\circ}\text{C}$), a r prosječna mjesечna vlažnost zraka (%).

Tablica 19
VRIJEDNOSTI KOEFICIJENTA k ZA
ODREĐIVANJE POTENCIJALNE EVAPOTRANSPIRACIJE

Kultura	Klimatski uvjeti	
	umjereni	aridni
Kukuruz	0,75	0,85
Pšenica, ječam, raž	0,75	0,85
Šećerna repa	0,65	0,85
Rajčica	0,70	—
Grah	0,60	0,70
Krumpir	0,65	0,75
Povrće — prosjek	0,60	—
Riža	1,00	1,20
Lucerna	0,80	0,85
Djetelina	0,80	0,85
Sirak	0,70	—
Pašnjak	0,75	—
Voćarske kulture	0,60	0,70

Raspoloživa voda. Voda u tlu koja je na raspolaganju biljkama tokom vegetacije potječe od vode koja se nalazila u tlu na početku vegetacije, od vode od oborina i od podzemne vode koja se kroz kapilare tla podigla do vegetacijske zone. Prema tome, raspoloživa je voda (mm)

$$P = r + h + w, \quad (40)$$

gdje je r (mm) rezerva vode u tlu na početku promatranog razdoblja, h (mm) korisne oborine koje je uplo zemljište, a w (mm) voda koja je kroz kapilare dospijela u vegetacijsku zonu. Raspoloživa voda određuje se za vegetacijsko razdoblje ili za mjesec, pa se na promatrano razdoblje odnose i vrijednosti za h i w . Postoje, međutim, teškoće da se precizno odredi raspoloživa količina vode, pogotovo je teško točno odrediti korisne oborine i utjecaj podzemne vode.

Obično se korisne oborine određuju prema relaciji

$$h = \beta h_0, \quad (41)$$

gdje su h_0 (mm) oborine u promatranom razdoblju, a β je koeficijent iskorištenja oborina koji ovisi o intenzivnosti oborina, upijanju, otjecanju, filtraciji u tlu i dr., odnosno o vrsti tla, njegovu nagibu i obrastlosti. Ako ne postoje podaci o vrijednosti koeficijenta β određeni hidrometeorološkim istraživanjima (v. *Hidrologija*, TE 6, str. 398), može se računati sa srednjom vrijednošću $\beta = 0,7$.

Utjecaj podzemne vode na raspoloživu vodu tokom vegetacije ovisi o njezinoj dubini, o debljini sloja u kojem se nalazi korijenje i o klimatskim prilikama. Budući da se prilično tokom vegetacije mijenjaju, mijenja se visina i brzina dizanja vode kroz kapilare, pa ne postoji ni mogućnost za sigurno određivanje utjecaja podzemne vode. Približno se vrijednost w (40) može odrediti izrazom

$$w = k_w E_p, \quad (42)$$

gdje je E_p potencijalna evapotranspiracija, (35) ili (38), a k_w koeficijent utjecaja podzemne vode koji je određen izrazom

$$k_w = \left(1 - \frac{h}{h_1}\right)\left(1 - \frac{h^2}{h_1^2}\right). \quad (43)$$

U (43) h je dubina podzemne vode u promatranom razdoblju, a h_1 je dubina do koje može utjecati podzemna voda na

Tablica 20
KOEFICIJENT UTJECAJA PODZEMNE VODE k_w

Vrsta tla	Dubina podzemne vode u m			
	1,00	1,50	1,75	2,00
Teško tlo	0,25...0,20	0,17...0,15	0,10...0,08	0,05
Srednje tlo	0,20...0,17	0,15...0,10	0,07...0,05	0,02
Lako tlo	0,15...0,12	0,08...0,05	0,03...0,02	0,00

vegetaciju. Za većinu je tala $h_1 = 2,0 \dots 2,5$ m. Približne vrijednosti koeficijenta k_w s obzirom na vrstu tla i dubinu podzemne vode nalaze se u tabl. 20.

Norma navodnjavanja ukupna je količina vode koju treba dodati tlu navodnjavanjem u vegetacijskom razdoblju. To je, zapravo, ukupni deficit vode u tom razdoblju, a on se određuje pomoću izraza

$$N_n = \sum E_p - \sum P, \quad (44)$$

u kojemu se znak sume odnosi na mjesecu tokom vegetacije. Zbog gubitka vode (ishlapljivanje, površinsko otjecanje) na putu od zahvata do sloja tla koje se navodnjava potrebno je normu navodnjavanja (44) povećati pomoću koeficijenta iskorištenja vode γ , da bi se dobila bruto-norma navodnjavanja N_b prema relaciji

$$N_b = \frac{N_n}{\gamma}. \quad (45)$$

Vrijednost koeficijenta γ ovisi o načinu dovoda vode, klimatskim prilikama, te o načinu eksploracije sustava za navodnjavanje, pa iznosi 0,35...1,00. Smatra se da tako treba voditi eksploraciju sustava za navodnjavanje da vrijednost koeficijenta γ ne bude manja od 0,85.

Uvjeti za primjenu navodnjavanja. Za uspješnu primjenu navodnjavanja potrebno je da su ispunjeni klimatski i pedološki uvjeti, da je uređen vodni režim, da je uređeno zemljište i da je osiguran izvor kvalitetne vode. Proizvodne površine moraju biti branjene od poplavnih voda i mora postojati

Tablica 21
DUBINA GLAVNE MASE KORIJENJA POLJOPRIVREDNIH KULTURA U KARAKTERISTIČNIM FAZAMA RAZVOJA

	Faza razvoja	Dubina cm
Kukuruz	5...6 listova metličanje voštana zrioba	30...40 70...80 90...100
Strnine	bokorenje vlatanje klasanje voštana zrioba	30...40 50...60 60...70 70...80
Šećerna repa	ukorjenjivanje razvoj lišća razvoj korijena	40...50 60...70 80...100
Suncokret	4 lista formiranje glave cvjetanje	40...50 60...70 80...100
Lucerna	cvjetanje	75...120
Krumpir	razvoj lišća butonizacija razvoj gomolja	40...50 50...60 60...80
Rajčica	ukorjenjivanje razvoj lišća razvoj plodova	30...40 40...50 50...60
Grašak	ukorjenjivanje cvjetanje nalijevanje zrna	20...30 30...40 40...60
Kupus, krastavci, luk	ukorjenjivanje razvoj lišća sazrijevanje	20...30 30...40 40...50

sustav odvodnje za regulaciju suvišnih vlastitih voda. Osim toga, potrebno je oblikovati proizvodne jedinice tla s izravnanim površinama. Izbor poljoprivrednih strojeva, način obradbe i gnojidbe, vrste poljoprivrednih kultura i načina uzgoja treba prilagoditi uvjetima navodnjavanja.

Obrok navodnjavanja količina je vode (m^3/ha ili mm) koja se dodaje jednokratnim navodnjavanjem. To je dio deficit-a vode tokom vegetacijskog razdoblja ili dio norme navodnjavanja. Obrok navodnjavanja ovisi o dubini tla koje se želi navlažiti, vrsti tla i vlazi u tlu prije navodnjavanja. Dubina tla koju treba navlažiti ovisi o dubini korijena, odnosno o vrsti kulture i fazi razvoja biljke. Nije, međutim, potrebno navlažiti tlo do dubine do koje dopire korijenje, već samo aktivni sloj tla u kojemu se nalazi glavna masa korijena. Dubine glavne mase korijena poljoprivrednih kultura u karakterističnim fazama razvoja vide se u tabl. 21.

Obrokom navodnjavanja treba navlažiti tlo do poljskoga vodnog kapaciteta, i to do dubine prema tabl. 21, što znači da obrok navodnjavanja ovisi o vrsti tla. Za lakša (pjeskovita) tla potreban je manji obrok navodnjavanja nego za teža (glinovita) tla. Međutim, pjeskovita tla treba češće navodnjavati nego glinovita, jer biljke trebaju jednakе količine vode bez obzira na tlo na kojemu se uzgajaju. Budući da tlo treba zasititi do poljskoga vodnog kapaciteta, za određivanje obroka navodnjavanja treba poznavati vlažnost tla prije navodnjavanja. Obrok navodnjavanja (m^3/ha) može se odrediti pomoću izraza

$$N_0 = 100 \varrho_t h (P_k - T_v), \quad (46)$$

gdje je ϱ_t gustoća tla (t/m^3), h (m) dubina vlaženja, P_k (maseni %) poljski vodni kapacitet, a T_v (maseni %) sadržaj vode u tlu prije navodnjavanja.

Izraz (46) vrijedi za homogeno tlo. Ako je tlo heterogeno, obrok navodnjavanja izračunava se pomoću prosječnih vrijednosti ϱ_t , P_k i T_v . Prosječna vrijednost gustoće tla dobiva se iz izraza

$$\varrho_t = \frac{\sum \varrho_{ti} D_i}{\sum D_i}, \quad (47)$$

gdje je ϱ_{ti} gustoća i -tog sloja tla, a D_i debljine istog sloja. Prosječne vrijednosti poljskoga vodnog kapaciteta i sadržaja vode u tlu određuju se analognim izrazima.

Trenutak početka navodnjavanja. Točno određivanje trenutaka dodavanja obroka navodnjavanja jedan je od uvjeta za uspješno i racionalno navodnjavanje. Ako se trenutak početka navodnjavanja određuje *odokom*, navodnjavanje je najčešće neracionalno, a može biti i štetno. Ako se navodnjava češće nego je potrebno, troši se suviše vode, narušavaju se prirodna svojstva tla, ispiru se hranjive tvari, a tlo se može zasoliti zbog podizanja razine podzemne vode. Ako se, međutim, navodnjava rjeđe nego što je potrebno, ne mogu se ostvariti visoki i kvalitetni prinosi, pa je navodnjavanje nerentabilno.

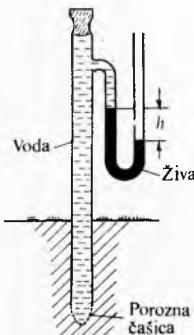
Trenutak početka navodnjavanja određuje se najčešće mjerjenjem vlažnosti tla. Na žalost, u praksi se primjenjuju i zastarjele metode koje se osnivaju na promatranju morfoloških promjena biljke, na procjenama vlažnosti tla (vizuelne procjene i procjene opipom), na utvrđenom ritmu dodavanja obroka vode. Pokušavaju se pronaći povoljniji postupci za utvrđivanje početka navodnjavanja (kritična faza razvoja biljke, fiziološke promjene biljke, obračun dnevne evapotranspiracije).

Mjerjenje vlažnosti tla osnova je za racionalno navodnjavanje. Vlažnost se tla mjeri u prvom redu na dubini na kojoj se nalazi najaktivniji dio korijena. Točnije stanje vlažnosti tla dobiva se ako se mjeri u području glavne mase korijena, i to na svakih 10 cm dubine. Na temelju tih mjerjenja određuje se početak i obrok navodnjavanja.

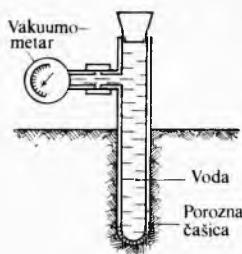
Vlažnost se najjednostavnije i najbrže mjeri na polju. Postoje instrumenti za neposredno i posredno mjerjenje vlažnosti. Za neposredno mjerjenje služe tenziometri, dok se posredno mjerjenje osniva na mjerjenju električnog otpora tla.

Postoje tenziometri sa živom (sl. 31) i vakuumometrom (sl. 32). Njima se mjeri napetost u kapilarnom prostoru tla. Tenziometar se sastoji od staklene ili metalne cijevi koja na

dnu ima poroznu čašicu od keramičkog materijala. Prilikom postavljanja tenziometra u tlo porozna čašica mora biti u neposrednom kontaktu s tlom. Kad se cijev postavi u tlo, ona se napuni vodom i na vrhu se hermetički zatvori. Kad se tlo suši, u njemu se napetost povećava, pa voda iz tla prodire u čašicu. Obrnuto je kad se povećava vlažnost tla, pa tada voda iz čašice prodire u tlo. Zbog toga raste, odnosno smanjuje se tlak u cijevi koji se registrira kao razlika razina u cijevi oblika slova U (sl. 31) ili kao položaj kazaljke vakuumometra. Tenziometrima se mogu mjeriti tlakovi od 0...0,09 MPa.

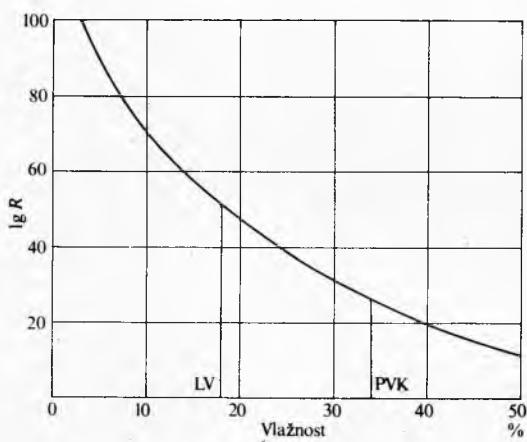


Sl. 31. Tenziometar sa živom za mjerjenje vlažnosti tla



Sl. 32. Tenziometar s vakuumometrom za mjerjenje vlažnosti tla

Električni otpor tla ovisi o njegovoj vlažnosti. Ta se ovisnost iskorištava za mjerjenje vlažnosti tla. Blok od gipsa (najčešće $42 \times 16,5 \times 31,5$ cm) postavlja se u tlo koje se nabije oko njega da se uspostavi što bolji kontakt između bloka i tla. U bloku su ugrađene mrežaste elektrode kroz koje se dovodi struja iz izvora istosmjerne struje. Ukopani blok preuzima vlagu iz tla ako je vlažnost tla veća od vlažnosti bloka, odnosno blok predaje vlagu tlu ako je vlažnost bloka veća. Struja koja protječe kroz blok uz konstantni napon izvora struje obrnuto je proporcionalna otporu među elektrodama (v. *Električna mjerena*, TE 3, str. 668), a mjeri se ampermetrom. Najčešće su na skali ampermeta označene vrijednosti logaritma otpora (od 0...100). Da se preračuna podatak očitan na instrumentu u postotak vlažnosti tla, treba uz istodobno mjerjenje otpora i vlažnosti tla (npr. tenziometrom) odrediti krivulju koja povezuje te dvije vrijednosti (npr. sl. 33). Te vrijednosti ovise o vrsti tla. Metoda određivanja vlažnosti mjeranjem električnog otpora jednostavna je i brza, ali se ne može primijeniti na slana tla (jer sadržaj soli utječe na električnu vodljivost tla). Osim toga, mogu se dobiti pogrešni rezultati ako je tlo vrlo vlažno i nije pogodno za određivanje vlažnosti pijeska i tresetnih tala.



Sl. 33. Ovisnost logaritma otpora R gipsanog bloka o vlažnosti tla. LV lentokapilarna vlažnost, PVK poljski vodni kapacitet

Voda za navodnjavanje. Kao voda za navodnjavanje može se upotrijebiti voda iz nadzemnih vodotoka, prirodnih i umjetnih jezera, te bunara (podzemna voda), a nekada i otpadna voda. Osnovni su uvjeti da su raspoložive dovoljne količine vode, te da voda ima potrebna kemijska i fizikalna svojstva. Voda se do površine koja se želi navodnjavati dovodi gravitacijski ili pumpama, već prema međusobnom položaju vodotoka ili jezera i navodnjavane površine, a razvodi se do parcela otvorenim kanalima ili cjevovodima.

Svaka voda u prirodi ima više ili manje otopljenih soli i suspendiranih čestica koje mogu nepovoljno utjecati na tlo i biljke, pa i na uređaje za navodnjavanje. Osim toga, temperatura vode može utjecati na djelotvornost navodnjavanja.

Kemijska svojstva vode za navodnjavanje. Koncentracija soli, odnosno iona u vodi određuje se kemijskom analizom, a kvaliteta vode definira se prema toj koncentraciji. Najčešće se kvaliteta vode procjenjuje prema vrijednosti irigacijskog koeficijenta, prema klasifikaciji US Salinity Laboratory, a u našim uvjetima i prema Neugebauerovoj klasifikaciji.

Irigacijski koeficijent (prema Stebleru) određuje se prema količini iona natrija Na^+ , klora Cl^- i sulfat-iona SO_4^{2-} . Ako se uglatim zgradama označe koncentracije ekvivalentnih jedinika ovih iona (mmol/dm^3) i ako je $[\text{Na}] < [\text{Cl}]$, irigacijski koeficijent određuje se iz relacije

$$k_i = \frac{288}{5 \cdot [\text{Cl}]} \quad (48)$$

Ako je $[\text{Cl}] < [\text{Na}] < [\text{Cl}] + [\text{SO}_4]$, irigacijski je koeficijent

$$k_i = \frac{288}{[\text{Na}] + 4 \cdot [\text{Cl}]} \quad (49)$$

te ako je $[\text{Cl}] + [\text{SO}_4] < [\text{Na}]$, irigacijski se koeficijent dobiva iz relacije

$$k_i = \frac{288}{10 \cdot [\text{Na}] - 5 \cdot [\text{Cl}] - 9 \cdot [\text{SO}_4]} \quad (50)$$

Kvaliteta vode procjenjuje se prema vrijednosti irigacijskog koeficijenta (tabl. 22).

Tablica 22
KVALITETA VODE PREMA IRIGACIJSKOM KOEFICIJENTU

Irigacijski koeficijent	Ocjena vode	Uvjeti iskorištavanja vode
> 18	dobra	voda se može upotrebljavati bez posebnih postupaka za sprečavanje nakupljanja štetnih soli u tlu
18...6	zadovoljavajuća	potrebni su posebni postupci za sprečavanje zasoljavanja, osim za tla koja su povoljno prirodno drenirana
5,9...1,2	nezadovoljavajuća	skoro uvek je potrebna umjetna drenaža
< 1,2	loša	voda nije pogodna za navodnjavanje

Klasifikacija US Salinity Laboratory. Električna vodljivost vode služi kao indikator koncentracije, a koeficijent je adsorpcije natrija SAR (Sodium Adsorption Ratio) indikator relativne aktivnosti natrija u reakcijama s tлом. Električna se vodljivost ($\mu\text{S}/\text{cm}$) vode mjeri na temperaturi od 25°C , a koeficijent adsorpcije natrija izračunava se pomoću izraza

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{[\text{Ca}] + [\text{Mg}]}{2}}} \quad (51)$$

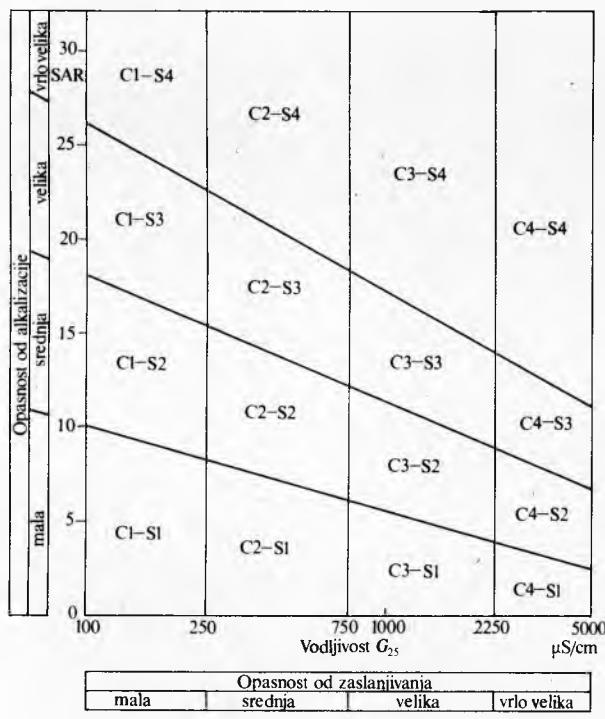
gdje su u uglatim zgradama označene koncentracije ekvivalentnih jedinika tih iona (mmol/m^3). Na osnovi vodljivosti

G_{25} i koeficijenta SAR određuje se kvaliteta vode za natapanje (sl. 34).

Prema toj klasifikaciji, dakle, razlikuju se vode prema koncentraciji soli (prema opasnosti od zasoljavanja) i prema koeficijentu adsorpcije natrija (opasnost od alkalizacije), pa se upotrebljivost vode za navodnjavanje određuje prema objemu kriterijima.

Prema koncentraciji soli razlikuju se četiri klase voda: *klasa C1* može se upotrijebiti za navodnjavanje većine tala i za većinu poljoprivrednih kultura uz vrlo malu opasnost od zasoljavanja; *klasa C2* može se upotrijebiti za navodnjavanje relativno propusnih tala i prema solima srednje tolerantnih biljaka nisu potrebni posebni zahvati za sprečavanje zasoljavanja, pogotovu ako postoje dobri uvjeti za ispiranje tla; *klasa C3* ne može se upotrijebiti za navodnjavanje tla koje nije drenirano, potrebni su posebni zahvati za sprečavanje zasoljavanja, a mogu se uzgajati biljke koje podnose veću koncentraciju soli u vodi; *klasa C4* nije pogodna za navodnjavanje ako tlo nije propusno za vodu, ako ne postoji podzemna drenaža, ako se ne navodnjava s većim obrocima radi ispiranja soli iz tla, te ako se ne uzgajaju biljke koje podnose visoku koncentraciju soli u vodi.

Prema koeficijentu adsorpcije natrija također se razlikuju četiri klase voda: *klasa S1* može se upotrebljavati za natapanje skoro svih tala, takva voda može štetiti samo kulture koje su vrlo osjetljive na natrij (npr. košturnjavo voće akumulira natrij, koji oštećuje lišće); *klasa S2* alkalizira teška tla, a to se može sprječiti dodavanjem gipsa u tlo; *klasa S3* alkalizira mnoge vrste tla; pa kad se navodnjava takvom vodom, potrebna je istodobna odvodnja uz održavanje dobrih fizičkih svojstava tla; *klasa S4* može se upotrijebiti za navodnjavanje samo karbonatnih tala s malim udjelom soli.



Sl. 34. Klasifikacija vode prema US Salinity Laboratory

Upotreba koeficijenta adsorpcije natrija, prema (51), za ocjenu kvalitete vode za navodnjavanje osniva se na korisnom djelovanju kalcija i magnezija, sprečavajući štetno djelovanje natrija koji pogoršava strukturu i ostala fizikalna svojstva tla.

I bor se može naći u vodi za navodnjavanje. Koncentracija bora može iznositi i nekoliko grama po m^3 . Na većinu biljaka već koncentracija bora od $1\text{--}2 \text{ g/m}^3$ djeluje toksično. Prema koncentraciji bora u vodi vode se klasificiraju u pet klasa (tabl. 23).

Tablica 23
KLASIFIKACIJA VODA ZA NAVODNJAVANJE PREMA KONCENTRACIJI BORA (g/m^3)

Klase vode prema koncen- traciji bora	Najveća dopuštena koncentracija bora		
	za osjetljive poljo- privredne kulture	za polutolerantne poljoprivredne kul- ture	za tolerantne poljoprivredne kulture
1	0,33	0,67	1,00
2	0,33...0,67	0,67...1,33	1,00...2,00
3	0,67...1,00	1,33...2,00	2,00...3,00
4	1,00...1,25	2,00...2,50	3,00...3,75
5	1,25	2,50	3,75

Tablica 24
KLASIFIKACIJA VODA ZA NAVODNJAVANJE PREMA NEUGEBAUERU

	Klase	Suhi ostatak mg/L	Koncentracija iona ¹
Besprijeckorna voda	Ia	< 700	$([\text{Ca}] + [\text{Mg}])/([\text{Na}] + [\text{K}]) > 3$
	Ib	< 700	$([\text{Ca}] + [\text{Mg}])/[\text{Na}] > 3$
Dobra voda	-II	< 700	$([\text{Ca}] + [\text{Mg}])/[\text{Na}] > 1$
	IIIa	700...3000	$([\text{Ca}] + [\text{Mg}])/[\text{Na}] > 3$
Potrebno posebno ispitati	IIIb	700...3000	$([\text{Ca}] + [\text{Mg}])/[\text{Na}] > 1$
	IVa	< 700	$([\text{Ca}] + [\text{Mg}])/[\text{Na}] < 1$
Nepogodna voda	IVb	700...3000	$([\text{Ca}] + [\text{Mg}])/[\text{Na}] < 1$
	IVc,d,e	> 3000	bez obzira na koncentraciju iona

¹ U uglatim su zagradama koncentracije ekivalentnih jedinika iona (mmol/L).

Neugebauerova klasifikacija osniva se na količini soli u vodi (suhi ostatak nakon ishlapljivanja) i na međusobnom omjeru koncentracija Ca, Mg, Na i K (tabl. 24). Ta je klasifikacija predložena za navodnjavanje u Vojvodini.

Fizikalna svojstva vode za natapanje. Najveće značenje ima temperatura vode i udjel krutih čestica. Niska temperatura negativno djeluje na razvoj biljaka, na mikrobiološke procese u tlu i na ishranu biljaka. Minimalna temperatura vode za navodnjavanje iznosi 19°C , a maksimalna 34°C . Optimalna je temperatura $29\text{--}30^\circ\text{C}$. Utjecaj krutih čestica ovisi o njihovoj vrsti i količini. Nepoželjne su čestice od $0,10\text{--}0,15 \text{ mm}$ jer se lako talože u uređajima za dovod i raspodjelu vode.

Metode navodnjavanja. Navodnjavati se može površinskim natapanjem, kšenjem, subirigacijom i kapanjem. O vrsti uzgajane kulture, svojstvima tla, klimatskim uvjetima, reljefu terena, porijeklu vode i svrsi proizvodnje ovisi izbor metode navodnjavanja. Od površinskih metoda navodnjavanja najviše se primjenjuje navodnjavanje brazdama, dok se preplavljanje ili potapanje primjenjuje za uzgoj riže.

Navodnjavanje brazdama najstariji je način navodnjavanja. Sustav navodnjavanja brazdama sastoji se od dovodnog i razdjelnih kanala, razdjelnih brazda, brazda za natapanje i prenosivih ustavica (provizornih brana). Razdjelne brazde mogu se zamjeniti plastičnim, gumenim ili metalnim cijevima pomoću kojih se voda prebacuje u brazde za natapanje. Sustav se može poboljšati upotrebom prenosivog cjevovoda. Tada se dovodni i razdjelni kanali te razdjelne brazde, ili samo razdjelni kanali i razdjelne brazde, zamjenjuju cijevima. Cijevi su od lakog matrijala radi lakšeg prenošenja. Promjer cijevi obično iznosi 15 cm . Cijevi koje zamjenjuju razdjelne kanale i brazde imaju otvore koji se mogu zatvoriti, što omogućuje izbor brazda u koje se dodaje voda. Prenosivim sustavom cijevi osigurava se bolja raspodjela i kontrola dodavanja vode, smanjuju se gubici vode zbog filtracije, pa se mogu smanjiti i obroci navodnjavanja, omogućuje se navodnjavanje i na neravnim terenima, povećava se obradiva površina jer nisu potrebni stalni kanali i razdjelne brazde, te se poboljšavaju radni uvjeti. Na tlu je tada potrebno samo načiniti brazde za natapanje, a sva se razdjelna mreža kanala i brazda zamjenjuje cijevima.

Razmak brazda za natapanje ovisi o svojstvima tla i uzgajanoj kulturi. Lakša tla upijaju vodu bočno iz brazda do udaljenosti od $\sim 40 \text{ cm}$ od brazde, srednje teška tla do $\sim 60 \text{ cm}$, a teška tla udaljenosti od $\sim 100 \text{ cm}$. Zbog toga su za uzgoj

ratarskih i povrćarskih kultura brazde za natapanje na razmaku od 50...200 cm, a za drvenaste kulture i do 500 cm. Poželjno je da zemljište navodnjavano brazdama bude ravno s ravnomjernim padom (najpovoljniji je pad 2...4%). Duljina brazda ovisi o svojstvima tla i padu terena, a može iznositi 20...500 m, a dubina brazde 15...25 cm.

Punjene brazde vodom, također, ovisi o svojstvima tla i padu terena. Na lakšem tlu, da se smanji ocjeđivanje vode kroz dno brazde, intenzivnost ulijevanja u brazdu iznosi 0,5...1,0 L/s, a na težim tlima ta je intenzivnost 0,1...0,5 L/s, jer je potrebno tlo duže vlažiti.

Obrok navodnjavanja ovisi o fizikalnim svojstvima tla, uzgajanoj kulturi i trenutnoj vlažnosti tla. Za većinu poljoprivrednih kultura iznosi 30...60 mm. Pri navodnjavanju brazdama samo je dio površine tla u neposrednom dodiru s vodom, dok na ostalom dijelu vladaju normalni zračni uvjeti. Nakon prošivanja tla procesi nitrifikacije obnavljaju se i u području brazda, gdje su bili privremeno spriječeni zbog nedostatka zraka.

Navodnjavanjem brazdama narušava se struktura tla i pogoršavaju se uvjeti za formiranje pokorice.

Navodnjavanje kišenjem. Pri navodnjavanju kišenjem voda se raspodjeljuje po površini tla u obliku kapljica kao umjetna kiša pomoću rasprskavala. Ta je metoda navodnjavanja jedna od najmladih, a proširila se poslije drugog svjetskog rata. Mnoge su prednosti navodnjavanja kišenjem: moguća je primjena u različitim topografskim uvjetima, nepotrebni su ili su potrebitni vrlo mali pripremni radovi na zemljištu, ne smanjuju se obradive površine, moguće je precizno dozirati vodu za navodnjavanje, minimalno se pogoršavaju fizikalna svojstva tla, mogu se navodnjavati sve vrste tla i u svim fazama razvoja biljaka uz istodobno dodavanje fertilizatora, može se primijeniti i kad je visoka razina podzemne vode. Navodnjavanje kišenjem, međutim, ima i nedostataka. To su: visoka cijena uređaja, visoki pogonski troškovi, neravnomerna raspodjela vode pri jakom vjetru, zrak nad tлом postaje vlažniji, što pogoduje razvoju biljnih bolesti, relativno su veliki gubici vode zbog ishlapljenja, teško je prenositi cijevi kad su visoki usjevi.

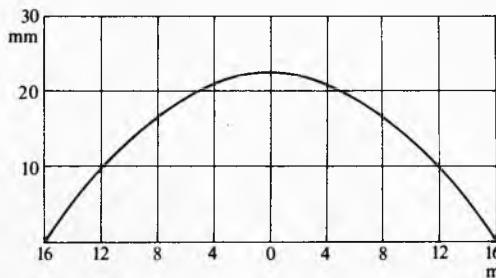
Sustav za kišenje može biti prenošljiv, polustabilan i stabilan.

U prenošljivom sustavu svi se dijelovi mogu prenositi, pa se mogu navodnjavati veće površine, ali se tokom prenošenja gaze nasadi i gubi vrijeme.

U polustabilnom sustavu glavni je cjevodov najčešće ukopan, na površini se nalaze hidranti na koje se spajaju cijevi za priključak rasprskavala. Takav se sustav smatra ekonomičnijim od prenošljivog i stabilnog sustava.

U stabilnom su sustavu svi dijelovi stabilni, a rasprskavala se priključuju na cijevnu mrežu koja je najčešće ukopana. Tada je potrebno najmanje radnog vremena, ali su troškovi gradnje visoki.

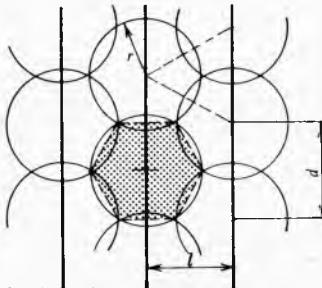
Rasprskavala se razlikuju prema vodnom tlaku, dometu, količini vode, površini koju navodnjavaju, intenzivnosti kišenja i broju mlaznica. Ravnomjernost kišenja jedno je od važnih svojstava rasprskavala. Idealan raspored vode vidi se na



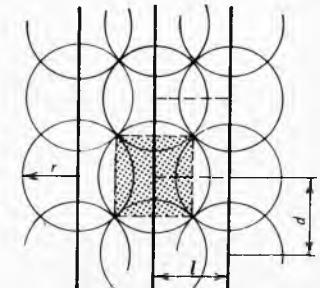
Sl. 35. Idealan raspored vode u okolju rasprskavala pri navodnjavanju kišenjem

sl. 35. Taj se raspored kvari djelovanjem vjetra, ali i zbog nejednolike brzine vrtnje rasprskavala.

Da bi se postigao što jednoličniji raspored kišenja, rasprskavala se moraju prikladno razmjestiti po površini. Najčešće se razmještaju u vrhove istostranih trokuta (sl. 36), ili u vrhove kvadrata (sl. 37). U trokutnom rasporedu rasprskavala njihove udaljenosti iznose $d = 1,73r$ i $l = 1,5r$ (sl. 36), gdje je r domet rasprskavala. U kvadratnom rasporedu razmaci su u oba smjera jednak i iznose $d = 1,41r$. Površina koja pripada jednom rasprskavalu uz trokutni raspored iznosi $2,6r^2$, a uz kvadratni raspored $2r^2$.



Sl. 36. Raspored rasprskavala u vrhovima istostranih trokuta



Sl. 37. Raspored rasprskavala u vrhovima kvadrata

Trajanje kišenja (min) jednako je omjeru obroka kišenja (mm) i intenzivnosti kišenja (mm/min). Intenzivnost kišenja (mm/min) određena je izrazom

$$i = \frac{\eta q}{A}, \quad (52)$$

gdje je η koeficijent iskorištenja vode (dio vode koji padne na tlo prilikom kišenja, najčešće 0,90...0,95), q količina vode koju izbacuje rasprskavalo (L/min), a A površina kišenja (m^2).

Intenzivnost kišenja treba prilagoditi sposobnosti tla za upijanje vode (infiltracija tla). Intenzivnost kišenja mora biti manja od početne infiltracije tla. Ona se, naime, postepeno smanjuje s kišenjem. Ako je intenzivnost kišenja veća od infiltracije, voda se sakuplja na površini, pa se narušava struktura tla, što može štetno djelovati i na tlo i na biljke. Orientacijske vrijednosti infiltracije i intenzivnosti kišenja za različite vrste tla nalaze se u tabl. 25.

Tablica 25
ORIJENTACIJSKE VRIJEDNOSTI INFILTRACIJE I INTENZIVNOSTI KIŠENJA (mm/min)

Vrsta tla	Infiltracija	Intenzivnost kišenja
Lakše tlo	2,5...4,2	0,7...1,0
Srednje tlo	0,8...2,5	0,3...0,7
Teže tlo	0,2...0,8	0,1...0,8

Intenzivnost kišenja može se regulirati podešavanjem mlaznica ili izborom rasprskavala, a infiltracijska sposobnost tla agrotehničkim zahvatima (gnojidba, obradba, plodorenje).

Navodnjavanje subirigacijom provodi se dovođenjem vode kroz tlo. Cijevi se postavljaju na dubinu od 0,50...1,50 m. Voda u tlo ulazi kroz rupice ili pore, već prema vrsti cijevi, a u njemu se širi kroz kapilare na sve strane. Što je tlo vlažnije, prima manje vode iz cijevi, a kad je zasićeno vodom, otvara se ventil na kraju cijevi, pa se voda odvodi u odvodni kolektor.

Promjer cijevi iznosi 5...12 cm, a razmak cijevi ovisi o vrsti tla i iznosi 1,5...5,0 m. Duljina cijevi može iznositi i do 200 m.

Mislilo se da će se navodnjavanje subirigacijom naglo proširiti. To se, međutim, nije dogodilo i usprkos prednosti takva navodnjavanja. Te su prednosti: tlo se vlaži kapilarnim širenjem vode, pa se ne kvari njegova struktura, skoro je uvijek postignuta optimalna vlažnost tla, nema većih gubitaka vode ishlapljenjem s površine, potrebna je manja obrada zemljišta i njega usjeva za vrijeme vegetacije, sustav navod-

njavanja ne ometa mehaniziranu obradbu zemljišta, sustav može služiti ne samo za navodnjavanje nego i za odvodnju. Nasuprot tome, natapanje subirigacijom ima mnogo nedostataka. Za uspješnu primjenu takva navodnjavanja mora tlo ispod sloja u kojem se nalazi većina korijena biti dovoljno nepropusno. Površinski sloj nije najčešće navlažen, što je nepovoljno uz uzgoj biljaka u prvoj fazi rasta. Ako je nepropusni sloj blizu površine, može se tlo učiniti močvarnim i zaslaniti, a ako je takav sloj suviše duboko, gubi se suviše vode. Najveći je, međutim, nedostatak subirigacijskog postupka što su potrebna velika ulaganja.

Navodnjavanje kapanjem razvilo se prije dvadesetak godina u Izraelu. Voda se iz cijevi kap po kap dodaje tlu, i to neposredno uz biljku. Navodnjavanje kapanjem može se primijeniti na svim tlima na poljima i u staklenicima. Zemljište nije potrebno ni ravnati ni posebno pripremiti, a ne narušava se ni struktura tla. Vodu je moguće vrlo precizno dozirati, pa je velika ušteda vode uz stalno održavanje optimalne vlažnosti.

Može se primijeniti za navodnjavanje kultura koje se siju ili sade u redovima. Za sada se natapa povrće i voće u staklenicima i plastenicima.

Voda se mora filtrirati da se spriječi začepljivanje rupica na cijevima kroz koje kapa voda. Voda je pod niskim tlakom (0,035–0,200 MPa). Glavne dovodne cijevi imaju promjer 2,5–5,0 cm, a cijevi s rupicama promjer 1,0–2,0 cm. Razmak cijevi s rupicama ovisi o razmaku biljaka i iznosi 40–100 cm, dok je razmak rupica (kapaljki) 40–60 cm. Promjer je kapaljki 1,0 mm. Iz jedne kapaljke padne na tlo 2–4 L/h, a ima i takvih iz kojih se dovodi tlu i do 8 L/h.

Takvim navodnjavanjem postižu se veći prinosi. U Izraelu je, npr., ostvaren za 75% veći prinos rajčica i krastavaca primjenom navodnjavanja kapanjem.

Uz visoke investicije, nedostatak je navodnjavanja kapanjem i to što je potrebno filtriranje vode i što se kapaljke začepljuju. U nas se malo primjenjuje.

F. Tomic

LIT.: P. Rolley, Ameliorations agricoles irrigations. J. B. Bailliere-Fils, Paris 1953. — A. Oliva, Le sistemazioni dei terreni. Edagricole, Bologna 1958. — O. W. Israelsen, V. E. Hansen, Irrigation principles and practices. John Wiley and Sons, New York-London 1962. — D. Stojčević, Navodnjavanje. Zadružna knjiga, Beograd 1964. — V. C. Visser, Tile drainage in Netherland. American society of agronomy, New York 1965. — J. D. Zimmerman, Irrigation. John Wiley and Sons, New York-London-Sydney 1966. — K. H. Beauchamps, Surface drainage. International institute for land and improvement, Wageningen 1967. — L. D. Baver, Soil physics. Isti 1968. — D. Srebenović, Problemi velikih voda. Direkcija za Savu, Zagreb 1970. — C. Constantimis, Bonifica ed irrigazione. Edagricole, Bologna 1970. — J. N. Luthin, Drainage of agricultural lands. American Society of Agronomy, New York 1971. — D. Hillel, Soil and water, physical principles and processes. Academic Press, New York-London 1971. — A. A. Počet, B. X. Смирнов, Почвоведение. Высшая школа, Москва 1972. — K. R. Frevert, T. W. Ebminster, Soil and water conservation engineering. McGraw-Hill, London 1972. — N. P. Kuleš, Osnovi melioracija. Tehnička knjiga, Beograd 1973. — N. Vučić, Navodnjavanje poljoprivrednih kultura. Poljoprivredni fakultet, Novi Sad 1976.

M. Čović A. Fabijanić B. Katalinić F. Tomic

MEMBRANE, barijere koje razdvajaju kapljive faze ili plinovite faze, ali omogućuju razmjenu nekih komponenata sustava među tim fazama. Od graničnih površina razlikuju se time što su i same faze. Najčešće su čvrste, ali mogu biti i kapljive. Prema suvremenim normama membrane (od latinskog membrana *kožica*) treba razlikovati od dijafragmi (prema grčkom διαφρύξ diafragma *pregrada, opna*), a pod time treba razumijevati opne koje služe za otežavanje difuzijske izmjene tvari.

Tom, barem zasad najprikladnijom, funkcionalnom definicijom obuhvaćene su vrlo brojne i raznovrsne tvorevine. Prije svega u te se ubrajaju za život izvanredno važne i u prirodi vrlo rasprostranjene opne stanica organizama (*biološke membrane, biomembrane*). Te membrane ne samo što odvajaju stanice jedne od drugih i štite ih nego i omogućuju usmjereni prijenos tvari potrebnih za biološke funkcije iz vanjske sredine

i, obrnuto, prijenos otpadaka od metabolizma u vanjsku sredinu. Bez tog prijenosa tvari ne bi bile moguće mnoge fiziološke funkcije organizama, npr. disanje, krvotok, biosinteza, apsorpcija hrane u organizmu i odvođenje otpadaka iz organizma.

Zbog toga se već odavno proučavaju struktura i djelovanje biomembrana. U posljednje vrijeme mnogi rezultati tog proučavanja omogućili su postavljanje različitih smjernica razvoju umjetnih membrana za znanstvene, medicinske i tehničke svrhe. Obrnuto, proučavanje ponašanja i djelovanja umjetnih membrana pod utjecajem raznovrsnih vanjskih uvjeta omogućilo je mnoge spoznaje o funkcioniranju biomembrana. To znači da će proučavanje veza među biomembranama i umjetnim membranama i procesa koji se provode s njima ubuduće biti jedna od glavnih niti razvoja upoznavanja i iskorišćivanja membrana i membranskih procesa. Osim toga, brzo množenje objavljenih informacija o membranama i membranskim procesima stvara uvjerenje da se poznavanje i primjena membrana razvijaju u vrlo važne grane znanosti i tehnologije (*membranologiju i membransku tehnologiju*).

Već je J. A. Nollet u drugoj polovici osamnaestog stoljeća otkrio difuziju (v. *Difuzija*, TE 3, str. 299) kroz prirodne membrane. Međutim, tek stotinjak godina nakon toga provedena je prva separacija tim membranama, dijaliza (v. *Dijaliza*, TE 3, str. 338), što se smije smatrati začetkom znanstvenog razvoja membranske tehnologije. Nekako istodobno za separaciju tvari upotrebljene su i prve umjetne (nitrocелulozne) membrane. Ipak se značenje membrana i dalje skoro isključivo zadražalo u znanstvenom istraživanju sve do drugoga svjetskog rata, kad su se membrane počele upotrebljavati u vrlo velikim postrojenjima za koncentriranje $^{235}\text{UF}_6$ iz UF_6 pri proizvodnji ^{235}U .

Nakon toga membranska tehnologija razvijala dosta brzo, osobito u primjeni za separacijske operacije. Tome je mnogo doprinio i razvoj proizvodnje umjetnih smola. (One su omogućile proizvodnju membrana vrlo različitih svojstava, pa su mogle zadovoljiti vrlo različite zahtjeve.)

Raznolikost membrana i njihove primjene u tehnici čine nemogućim čak i sažeti prikaz svih vrsta membrana u ovom članku, pa se on nužno ograničuje na najvažnije, uglavnom na membrane za separacijske operacije, i to one koje su do danas najudjele prodrle u industrijsku primjenu.

Osnovna svojstva membrane. Očito za obavljanje svoje funkcije u svakom procesu u kojemu sudjeluju membrane prije svega moraju biti propusne primjereno zahtjevima. To se njihovo vrlo važno tehnološko svojstvo naziva *permeabilitetom* (permeabilnošću, propusnošću). Za znanstvene svrhe mjeri se faktorom permeabiliteta (v. *Difuzija*, TE 3, str. 305). Za tehničke određuje se izrazom

$$G = \frac{V}{F\tau}, \quad (1)$$

gdje je G propusnost, odnosno (udjelna) proizvodnost, V volumen (obično L) fluida propuštenog kroz površinu F (obično m^2) membrane u vremenu τ (obično h, ponekad d).

Prema tom svojstvu membranski se procesi često nazivaju *permeacijom*, a proizvod permeacije propušten kroz membranu općenito *permeatom*. Analogno se zadražani proizvod permeacije (nepropušten kroz membranu) često naziva *retentatom*.

Također je očito da za separacijske operacije membrane trebaju biti primjereno selektivne. To se, također, vrlo važno svojstvo membrane naziva *permselektivitetom* (permselektivnost, semipermeabilitet, polupropusnošću). U operacijama se paracije kapljivih faza obično se izražava kao postotak izrazom

$$\varphi = \frac{x_1 - x_2}{x_1} 100, \quad (2)$$

gdje su x_1 i x_2 molni razlomci ili koncentracije u sirovini i permeatu tvari koja se separira. U operacijama separacije plinskih faza permselektivitet se može prikazati analognim izrazom pomoću parcijalnih tlakova plina, koji se separira, u permeatu i sirovini. Pri razdvajaju ili koncentriranju otopina soli membranskim separacijskim operacijama φ se naziva i *koefficijent retencije* (zadržavanja) soli, ili jednostavno *retencijom soli* membrane. U nekim operacijama te vrste naziva se i *koefficijentom retencije otopljene tvari*.

Kako nema ni potpuno neselektivnih, tako nema ni membrane koje ne bi dopuštale permeaciju nikakvih drugih vrsta